

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE CONSTANTINE 1

FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE, DE LA GEOGRAPHIE ET DE
L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE
DEPARTEMENT DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

N° d'ordre :
Série :

THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES
(Géographie et Aménagement du Territoire, option : Hydrologie)

**LE BASSIN-VERSANT DE LA SEYBOUSE (Algérie orientale):
HYDROLOGIE ET AMENAGEMENT DES EAUX**

Par :

Abdelaziz LOUAMRI

Sous la direction de: Pr Azeddine Mebarki

Devant le jury :

Président	Nabil CHABOUR	Maitre de conférences (A)	Université Constantine1
Rapporteur	Azeddine MEBARKI	Professeur d'hydrologie	Université Constantine1
Examineurs :	Benoit LAIGNEL	Professeur d'hydrologie- Géomorphologie	Université de Rouen (France)
	Mohamed MEDDI	Professeur d'hydrologie	ENSH Blida
	Ahmed BOUGHERARA	Maitre de conférences (A)	Université Constantine1

Soutenu à Constantine, le 09 avril 2013

TABLE DES MATIERES

Pages

Avant –propos	
INTRODUCTION GENERALE	.....1
<u>PREMIERE PARTIE : LES FACTEURS CLIMATOLOGIQUES.</u> LES PRECIPITATIONS, FACTEUR DECISIF DE L'ECOULEMENT	.....9
INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	.....10
<u>Chapitre 1 : Précipitations annuelles : données et analyse statistique</u>	.....11
INTRODUCTION	.....11
1. DONNEES DISPONIBLES : CHOIX DE LA PERIODE D'ETUDE ET DES POSTES PLUVIOMETRIQUES	.....11
1.1. Critères de choix des postes et des séries pluviométriques	.....11
1.2. Postes pluviométriques retenus	.....12
2. HOMOGENEISATION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES DES STATIONS DE BASE	.....14
2.1. Les stations de base	.....14
2.2. Ajustement des séries pluviométriques à une loi racine-normale	.....15
2.3. Vecteurs régionaux et homogénéisation des données pluviométriques	.....17
2.3.1. <i>Les données des stations de base</i>	.....17
2.3.2. <i>Homogénéisation des données à l'aide du programme "Bouche trous"</i>	.....18
2.3.3. <i>Les résultats de l'homogénéisation par A.C.P. sur les données des stations de base</i>	.....23
3. HOMOGENEISATION DES SERIES PLUVIOMETRIQUES LACUNAIRES.....	.....26
3.1. Critique des données pluviométriques par la méthode des cumuls des résidus de régression	.....27

3.1.1. Rappel de la méthode des cumuls des résidus de régression	
3.1.1.1. Détection des anomalies accidentelles	.....29
3.1.1.2. Détection des anomalies systématiques	.....29
3.1.2. Application des cumuls des résidus sur les séries de la Seybouse	.....29
3.1.2.1. Les anomalies accidentelles détectées	.....29
3.1.2.2. Les anomalies systématiques détectées	.....32
3.2. Régression double et comblement des lacunes	.....35
3.2.1. Les formules pour la régression double	.....35
3.2.2. Signification des coefficients de corrélations totale, multiple et partiels	.....36
3.2.3. Exemple d'application de la régression double au comblement des lacunes annuelles, la station de Hammam N'Bails	.....37
3.2.3.1. Etapes de calcul	.....37
3.2.3.2. Signification des coefficients de corrélations totale, multiple et partiels	.....38
3.3. Confiance à accorder aux séries étendues	.....40
3.4. Incertitude sur l'estimation de la moyenne	.....42
4. ESTIMATION FREQUENTIELLE DES PLUIES ANNUELLES	.....43
4.1. Le modèle gaussio-arithmétique appliqué aux séries pluviométriques annuelles	.....43
4.2. Les résultats obtenus	.....44
CONCLUSION DU CHAPITRE 1	.....46
<u>Chapitre 2</u>: Cartographie automatique des pluies moyennes interannuelles et fréquentielles du bassin de la Seybouse	.....47
INTRODUCTION	
1. ETAT DE L'ART ET RAPPELS THEORIQUES	.....47
1.1. Historique	.....47
1.2. Rappels des principaux concepts et définitions sur le krigeage	.....49
1.2.1. Les variables régionalisées et le krigeage	.....49
1.2.2. Hypothèses sur la fonction aléatoire (F.A.)	.....50
1.2.3. La fonction de structure : le variogramme	.....51
1.2.4. Les variogrammes: comportements à l'origine et à l'infini	.....51
1.2.5. Les principaux modèles de variogrammes	.....53

1.2.6. Ajustements des variogrammes aux variables à interpoler	54
2. REGRESSION MORPHOMETRIE –PLUVIOMETRIE	54
2.1. Paramètres utilisés comme facteurs explicatifs	54
2.2. Les études sur la pluviométrie réalisées en Algérie	56
2.3. Principes de la régression multiple linéaire	56
2.3.1. Seuils de signification des coefficients de corrélation	56
2.3.2. Méthodes de mise en œuvre	57
2.3.2.1. Méthode progressive (Stepwise Regression)	57
2.3.2.2. Méthode régressive (backward elimination)	57
3. APPLICATION : CARTOGRAPHIE DES PLUIES MOYENNES ANNUELLES ET FREQUENTIELLES DU BASSIN DE LA SEYBOUSE	57
3.1. Les étapes de la cartographie	57
3.2. Cartographie des pluies interannuelles d'une série de 30 ans (1969/70-1998/99)	59
3.2.1. Les résultats de la régression multiple linéaire (1969/70-1998/99)	59
3.2.2. Ajustement des variogrammes théoriques aux données expérimentales. Application aux résidus de régression (1969/70-1998/99)	62
3.2.3. Carte pluviométrique (1969/1970-1998/1999)	62
3.3. Cartographie des pluies interannuelles d'une série de 17 ans (1971/1972 - 1987/1988)	64
3.3.1. Résultats de la régression multiple linéaire pour les pluies de la période (1971/1972 - 1987/88)	64
3.3.2. Ajustement des variogrammes théoriques aux données expérimentales. Application aux résidus de régression (1971/1972-1987/1988)	66
3.3.3. Carte pluviométrique (1971/72 - 1987/88)	67
3.4. Cartographie des pluies annuelles fréquentielles décennales humides (série de 30 ans)	69
3.4.1. La régression multiple pluie-morphométrie	69
3.4.2. Variogramme des résidus pour les pluies décennales humides	70
3.4.3. Carte des pluies décennales humides	70
3.5. Cartographie des pluies annuelles fréquentielles décennales sèches (série de 30 ans)	72
3.5.1. Résultats de la régression multiple	72
3.5.2. Variogramme des résidus pour les pluies fréquentielles décennales sèches	73
3.5.3. Carte des pluies décennales sèches	73
CONCLUSION DU CHAPITRE 2	75
Chapitre 3 : Les données thermiques et l'évapotranspiration	77

INTRODUCTION	.....77
1. LES TEMPERATURES ET LEURS VARIATIONS	.....78
1.1. Les températures annuelles et leur variabilité interannuelle	.....78
1.2. Les températures mensuelles et le régime thermique	.....81
2. L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE MENSUELLE ET ANNUELLE	.....82
2.1. Evaluation de l'E.T.P. Thornthwaite	.....83
2.2. L'E.T.P. Turc	.....84
2.3. L'E.T.P. A.N.R.H.	.....85
2.4. Comparaison des résultats	.....88
3. LES ETAGES BIOCLIMATIQUES	.....88
4. DEFICIT HYDRIQUE ET PERIODE SECHE	.....89
4.1. Les zones de déficit en eau agricole	.....89
4.2. Détermination de la période sèche	.....91
CONCLUSION DU CHAPITRE 3	.....92
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	.....93
<u>DEUXIEME PARTIE : ETUDE DES ECOULEMENTS LIQUIDES ET MOBILISATION DES EAUX SUPERFICIELLES</u>	.....95
INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE	.....96
<u>Chapitre 4. Le bassin-versant de la Seybouse</u>	.....97
INTRODUCTION	.....97

1. L'ORGANISATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE: L'OUED SEYBOUSE ET SES PRINCIPAUX AFFLUENTS	.....97
1.1. L'artère principale	.....97
1.2. Les affluents de l'oued Seybouse caractérisés par leurs profils en long	.....99
1.2.1. <i>L'oued Cherf</i>	.....99
1.2.2. <i>L'oued Bouhamdane</i>	.....99
1.2.3. <i>La Moyenne Seybouse</i>	.....100
1.2.4. <i>L'oued Mellah</i>	.....100
1.2.5. <i>La Basse Seybouse et l'oued Ressoul</i>	.....101
2. ANALYSE MORPHOMETRIQUE	.....102
2. 1. Intérêt de l'analyse morphométrique	.....102
2.2. Surfaces et altitudes des bassins jaugés	.....102
2.3. Indices de compacité (forme des bassins-versants)	.....104
2.4. Indices de pente et classes de relief	.....105
2.5. Caractéristiques du réseau hydrographique	.....105
2.5.1. <i>Longueur totale des cours d'eau</i>	.....105
2.5.2. <i>Densité de drainage, coefficient de torrentialité et temps de concentration</i>	.....107
3. LES ENSEMBLES LITHOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES	.....108
3.1. Les grands ensembles lithologiques	.....108
3.2. Les ensembles hydrogéologiques	.....109
4. LE COUVERT VEGETAL	.....112
CONCLUSION DU CHAPITRE 4	.....115
<u>Chapitre 5</u> : Les apports liquides des oueds aux différents pas de temps	.....117
INTRODUCTION	.....117
1. LE RESEAU HYDROMETRIQUE DU BASSIN ET LE COMPLEMENT DES LACUNES D'OBSERVATION	.....117
1.1. L'évolution du réseau hydrométrique du bassin de la Seybouse	.....117

1.2. Comblement des lacunes d'observation à l'échelle mensuelle	.....119
<i>1.2.1. Ajustement à la loi log-normale (loi de Galton)</i>	.....120
<i>1.2.1.1. Fonction de répartition</i>	.....120
<i>1.2.1.2. Application aux débits moyens annuels et mensuels des stations du bassin de la Seybouse</i>	.....120
1.2.2. Régressions à deux variables (débits mensuels à la station lacunaire –débits mensuels à la station de référence)	.....123
2. LES BILANS HYDROLOGIQUES ANNUELS ET LA VARIABILITE SPATIALE DE L'ÉCOULEMENT	.....126
2.1. Bilans hydrologiques annuels des bassins jaugés	.....126
<i>2.1.1. Écoulement et coefficient d'écoulement annuels</i>	.....127
<i>2.1.2. Déficit d'écoulement annuel</i>	.....128
<i>2.1.3. Comparaison avec les résultats d'autres bassins algériens</i>	.....128
2.2. Corrélations débit-surface, débit –pluie et déficit d'écoulement –pluie	.....130
<i>2.2.1. Corrélation débits absolus - surfaces des bassins jaugés</i>	.....130
<i>2.2.2. Corrélation écoulement moyen annuel - pluie moyenne annuelle</i>	.....132
<i>2.2.3. Corrélation déficit d'écoulement –pluie</i>	.....133
2.3. Cartographie de l'écoulement annuel moyen	.....134
<i>2.3.1. Cartographie de l'écoulement moyen selon le modèle bilan tenant compte du déficit d'écoulement de Turc (Méthode Mebarki)</i>	.....134
<i>2.3.2. Méthode Loieau</i>	.....135
3. LA VARIABILITE INTERANNUELLE DES ECOULEMENTS	.....137
3.1. Variabilité interannuelle des débits moyens annuels	.....137
<i>3.1.1. Les modules et leurs fluctuations annuelles</i>	.....137
<i>3.1.2. Analyse statistique des débits annuels observés</i>	.....140
4. LES ECOULEMENTS MENSUELS ET LES REGIMES SAISONNIERS	.....141
5. LES DEBITS MAXIMAUX MOYENS JOURNALIERS ET INSTANTANES ET LEUR VARIABILITE	.....144
5.1. Méthodes d'étude des crues: rappels	.....144

5.2. Les débits maximaux moyens journaliers et instantanés	.....146
5.3. Les hydrogrammes journaliers observés	.....147
5.4. Etude fréquentielle des Q max journaliers et instantanés	.....149
<i>5.4.1. Ajustement des Q_{max} à la loi de Galton et valeurs fréquentielles</i>	.....149
<i>5.4.1.1. Q max moyens journaliers</i>	.....150
<i>5.4.1.2. Q max moyens instantanés</i>	.....152
<i>5.4.2. Evolution des Q_{max} fréquentsiels en fonction de la surface des bassins</i>	.....153
6. CAS DU BASSIN DE L'OUED BOUHAMDANE : LES CRUES ET LEURS RELATIONS AVEC LES PLUIES MAXIMALES	.....158
6.1. Les crues du bassin de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II	.....158
<i>6.1.1. Les hydrogrammes journaliers de 3 années humides (1972/736,1983/84 et 1984/85)</i>	.....158
<i>6.1.2. Les crues de saison froide et de saison chaude de la période 1969/70-1987/88</i>	.....160
<i>6.1.2.1. Les crues de saison froide</i>	.....160
<i>6.1.2.2. Les crues de saison chaude</i>	.....160
6.2. Approche cartographique des crues du bassin de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II	.....163
<i>6.2.1. Etude et cartographie des pluies journalières maximales (P_{jmax})</i>	.....163
<i>6.2.1.1. Etude statistique des pluies journalières maximales (loi de Gumbel)</i>	.....163
<i>6.2.1.2. Elaboration des cartes des gradex et pluies journalières maximales décennales et vingtennales</i>	.....166
<i>6.2.2. Modélisation des Q_{max} par la formule A.N.R.H.</i>	.....170
<i>6.2.2.1. Prédétermination des débits moyens journaliers décennaux</i>	.....170
<i>6.2.2.2. Prédétermination des débits de pointe de crue décennaux</i>	.....171
CONCLUSION DU CHAPITRE 5	.....172
<u>Chapitre 6. Mobilisation des eaux de surface du bassin de la Seybouse</u>	.....173
INTRODUCTION	.....173
1. LES GRANDS BARRAGES ET LA REGULARISATION DES EAUX SUPERFICIELLES	.....173

1.1. Le barrage de Hammam Debagh sur l'oued Bouhamdane	.....174
<i>1.1.1. Caractéristiques techniques</i>	.....174
<i>1.1.2. Régularisation des apports</i>	.....175
1.1.3. Affectation des eaux du barrage de Hammam Debagh	.....176
<i>1.1.3.1. Le périmètre irrigué de Guelma-Bouchegouf (vallée de Guelma)</i>	.....176
<i>1.1.3.2. L'alimentation en eau potable et industrielle</i>	.....182
1.2. Le barrage de Foum El Khanga sur l'oued Cherf amont	.....182
<i>1.2.1. Caractéristiques techniques et régularisation des apports</i>	.....182
<i>1.2.2. Affectation des eaux du barrage de Foum El Khanga</i>	.....184
2. LES PETITS BARRAGES ET LES RETENUES COLLINAIRES	.....185
2.1. Les petits barrages	.....185
2.2. Les retenues collinaires	.....186
3. LES TRANSFERTS HYDRAULIQUES	.....187
3.1. Les transferts intra –bassin	.....187
<i>3.1.1. Du barrage de Hammam Debagh vers la vallée de Guelma</i>	.....187
<i>3.1.2. Les adductions vers les centres du versant nord de la vallée de Guelma et vers l'extérieur du bassin</i>	.....188
<i>3.1.3. D'Ain Arko vers l'agglomération d'Oued Zenati</i>	.....188
3.2. Les transferts inter-bassins	.....190
<i>3.2.1. Transferts à partir des ouvrages des Côtiers Constantinois</i>	.....190
<i>3.2.1.1. Transfert du barrage de Cheffia vers Chaiba</i>	.....190
<i>3.2.1.2. Transferts à partir des ouvrages des Côtiers Constantinois Centre</i>	.....192
<i>3.2.2. Le couloir Ain Délia-Foum El Khanga vers les Hautes Plaines</i>	.....194
<i>3.2.3. Zone du Bassin de l'oued Mellah</i>	.....194
CONCLUSION DU CHAPITRE 6	.....197
CONCLUSION DE LA SECONDE PARTIE	.....198
<u>TROISIEME PARTIE</u> : APPORTS SOLIDES DE L'OUED SEYBOUSE ET LEURS RELATIONS AVEC LES ECOULEMENTS	.....204
INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE	.....205
<u>Chapitre 7.</u> Les transports solides en suspension et leur	

variabilité spatio-temporelle à l'échelle du bassin de Seybouse	.....206
INTRODUCTION	.....206
1. PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE DES TRANSPORTS SOLIDES DES COURS D'EAU	.....206
1.1. Etat de l'art : études sur la turbidité réalisées en Algérie	.....206
1. 2. Aspects méthodologiques	.....207
1. 3. Problèmes liés à la nature même du phénomène	.....208
1. 4. Problèmes liés à la mesure des transports en suspension	.....209
1. 5. L'exploitation des mesures bathymétriques pour estimer les apports solides des oueds	.....210
2. LES DONNEES DISPONIBLES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES (MESURES DES CONCENTRATIONS)	.....211
2.1. Bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort	.....212
2.2. Bassin de l'oued Sabath à Bordj Sabath	.....213
2.3. Bassin de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II	.....214
2.4.. Bassin de l'oued Mellah à Bouchegouf	.....216
2.5. Bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda	.....216
2.6. Synthèse sur les données de concentration	.....216
3. LES COURBES D'ETALONNAGE DES SEDIMENTS	.....218
3.1. Calcul des débits moyens journaliers: turbidigrammes et débits solides moyens journaliers	.....218
3.2. Elaboration de relations saisonnières	.....218
3.2.1. <i>Relation concentrations en fonction des débits liquides</i>	.....218
3.2.2. <i>Relation débits solides en fonction des débits liquides</i>	.....218
3.3. Relations débits liquides –concentrations (valeurs instantanées)	.....219
4. ETABLISSEMENT DES RELATIONS DEBITS LIQUIDES – DEBITS SOLIDES A L'ECHELLE SAISONNIERE	.....221
4.1. Bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort	.....222
4.2. Bassin de l'oued Sabath à Bordj Sabath	.....223
4.3. Bassin de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II	.....224
4.4. Bassin de l'oued Mellah à Bouchegouf	.....227
4.5. Bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda	.....229
4.6. Comparaison des performances statistiques des relations	.....230

5. EVALUATION DES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION ET DE LEUR VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE	.....233
5.1. Les apports solides annuels, mensuels et saisonniers et leur variabilité	.....233
<i>5.1.1. Le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort</i>	.....235
<i>5.1.2. Le bassin de l'oued Bouhamdane</i>	.....237
<i>5.1.3. Le bassin de l'oued Mellah à Bouchegouf</i>	.....239
<i>5.1.4. Le bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda</i>	.....240
5.2. Les apports solides annuels, mensuels et saisonniers calculés en appliquant les facteurs de correction saisonniers	.....241
CONCLUSION DU CHAPITRE 7	.....244
<u>Chapitre 8.</u> Etude de cas: Les transports solides de l'oued Bouhamdane, et leur impact sur l'envasement du barrage Hammam Debagh	.....245
INTRODUCTION	.....245
1. CONTEXTE, DONNEES ET METHODES	.....246
1.1. Le bassin versant de l'Oued Bouhamdane et le barrage Hammam Debagh	.....246
<i>1.1.1. Le bassin versant</i>	.....246
<i>1.1.2. Le barrage</i>	.....246
1.2. Les données de mesures hydrologiques	.....247
1.3. Valorisation des données de mesures disponibles	.....250
<i>1.3.1. Régression des données Qsi-QLi issues de la station hydrométrique</i>	.....251
<i>1.3.1.1. Facteur de correction</i>	.....252
<i>1.3.1.2. Extension de la série de débits solides journaliers au barrage</i>	.....252
2. VALEURS ANNUELLES, VARIABILITE ET FACTEURS CONDITIONNELS DU TRANSPORT SOLIDE	.....252
2. 1. A l'échelle de l'Oued Bouhamdane	.....252
2.2. Comparaison avec les bassins d'Algérie du Nord	.....254

3. LA VARIABILITE INTRA-ANNUELLE DES APPORTS SOLIDES	.....256
3.1. Le régime moyen saisonnier	.....256
3.2. Variabilité du régime : années humides et années sèches	.....257
3.3. Variabilité journalière des flux solides et liquides	.....259
4. CONSEQUENCES SUR L'ENVASEMENT DU BARRAGE	.....261
4.1. Envasement calculé et envasement mesuré	.....261
4.2. Pertes de capacité du barrage	.....261
CONCLUSION DU CHAPITRE 8	.....263
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE	.....264
CONCLUSION GENERALE	.....266
Références bibliographiques .....	.....273
Liste des figures.....	.....286
Liste des tableaux.....	.....295
Liste des photos.....	.....298
Résumé en arabe.....	.....299
Résumé en anglais (Abstract) .....	.....300

AVANT – PROPOS

Cette thèse est le résultat du travail de plusieurs années au cours desquelles j'ai pu bénéficier de l'aide de professeurs et chercheurs confirmés, aussi bien en Algérie qu'en France.

Je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé lors de la réalisation de ce travail. Que ceux que j'ai pu oublier me pardonnent.

Le Professeur Mebarki Azeddine, de la Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire à l'Université de Constantine 1 qui a accepté de diriger cette thèse et qui a contribué à son aboutissement alors que mes travaux de recherche étaient bien engagés.

Le Professeur Jean-Pierre Laborde de l'Université de Nice Sophia –Antipolis qui m'a reçu au cours de deux stages effectués à l'Université de Nice Sophia Antipolis. Ces stages ont été l'occasion de m'initier à la cartographie automatique. Ils m'ont fourni également l'occasion de rencontrer et de discuter avec Mohamed Assaba, Taheir Tcheiko, et Hocine Hammoum, alors doctorants.

Le Professeur Benoit Laignel, de l'université de Rouen, qui m'a fait également bénéficier de ses conseils.

Le Professeur Marc Côte, de l'université d'Aix-en-Provence, qui m'a fait découvrir la rigueur du travail au cours de mes études à l'Institut des sciences de la Terre de l'université de Constantine, et qui m'a prodigué des conseils et des encouragements pour terminer ma thèse.

Monsieur Azziz Serradj, Maitre de Conférence à l'Université de Strasbourg qui m'a reçu au cours d'un stage effectué à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

Les responsables et collègues de la faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire : Le professeur Djamel Raham de l'université de Constantine, doyen depuis mars 2010, ainsi que le professeur Abdelghani Ghanem, et de Moussa Boularak, Maitre-assistant (A) qui a corrigé la partie consacrée à la présentation géologique.

Je tiens à souligner que j'ai bénéficié du soutien du LASTERNE (Laboratoire des Sciences du Territoire, Ressources Naturelles et Environnement)

Je remercie vivement messieurs les professeurs et maitres de conférences qui ont accepté de faire partie du jury de soutenance:

Azeddine Mebarki, Professeur à l'Université de Constantine 1, Directeur de thèse, rapporteur.
Nabil Chabour, Maitre de conférences (A), Université de Constantine 1, Président
Mohamed Meddi, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Blida, examinateur.

Benoit Laignel, Professeur à l'Université de Rouen, France, examinateur.
Ahmed Bougherara, Maitre de conférences (A), Université de Constantine, examinateur.

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans les données qui m'ont été gracieusement fournies par les ingénieurs et responsables des différents services en charge de la gestion des réseaux de mesures. Je tiens à exprimer mes remerciements particulièrement à:

-Messieurs Abderrahmane Boumaza, Abdelkrim Bouacida, H'sen El Hadeff El okki, Ahmed Boussafsaf ainsi que Boukarit de l'A.N.R.H.de Constantine.

-Madame Abda et Mr Moumen de l'A.N.R.H. Birmandreis, Alger sans lesquels la partie consacrée aux transports solides en suspension n'aurait pas pu être réalisée.

Monsieur Abdellah Bouchedja et Madame Belkadi de l'A.B.H., Constantine qui m'ont facilité l'accès aux documents et données sur l'aménagement des eaux.

Les techniciens de l'O.N.M.de Constantine dont certains sont aujourd'hui à la retraite: Omar Lemdaoui et Abdelhamid Zoghba, et également M^r Khoutir.

Les gestionnaires de barrages de Hammam Debagh, Foum El Khanga et Cheffia .Je remercie notamment Mr Kamel Bahri, gestionnaire du barrage de Hammam Debagh qui m'a facilité l'accès aux documents et données sur le remplissage de la retenue du barrage de Hammam Debagh.

INTRODUCTION GENERALE

1. PROBLEMATIQUE DE L'EAU EN ALGERIE

Avec l'augmentation des besoins en eau liés à la poussée démographique, la croissance urbaine, les besoins industriels et agricoles, la gestion de l'eau est devenue une préoccupation majeure du pays.

L'Algérie, qui appartient à la diagonale aride, est soumise, en plus de la relative faiblesse des précipitations, à leur très grande variabilité spatiale et temporelle.

Ce sont les données pluviométriques et géologiques (structurales) qui expliquent l'inégale répartition spatiale des ressources en eau.

1.1. Les différences entre l'Est et l'Ouest du pays

La région Est de l'Algérie bénéficie d'une pluviométrie plus importante que le reste du pays. Ce sont les grands types de circulation qui expliquent ce phénomène. L'Algérie du Nord est moins fréquemment sujette aux flux d'Ouest qu'aux flux d'Ouest et du Nord-Ouest qui viennent sur le Tell Est après avoir traversé l'isthme Gascogne-Méditerranée (Côte, 1996).

En position d'abri par rapport aux chaînes du Rif et de la Sierra Nevada, l'Oranie est en plus soumise à une dorsale anticyclonique fréquente sur l'ensemble Maroc –Espagne pendant les saisons d'automne et de printemps (Semmoud, 1986). Ces deux raisons expliquent la faiblesse des précipitations en Algérie occidentale.

1.2. Les différences Nord-Sud

Schématiquement, les ressources en eau en Algérie se différencient en fonction des grandes zones structurales. Les eaux de surface correspondent plus à la zone tellienne. C'est la zone des grands bassins-versants à écoulement exoréique (Chellif, Tafna, Macta, Soummam, Kébir-Rhumel, Seybouse). Les eaux souterraines se localisent plus dans les zones des Hautes Plaines et du Sahara (Côte, 1996), même si les écoulements ne sont pas absents: oueds dans le bassin du Hodna, les bassins du versant Nord des Aurès et sur le piémont saharien des Aurès.

A l'Ouest, les zones montagneuses dominent les plaines, ce qui explique le nombre important de barrages construits pendant la période coloniale (vallée de l'oued Cheliff et les périmètres irrigués).

La région Est bénéficie certes d'une pluviométrie plus importante mais les surfaces des plaines sont limitées et elles ont subi une diminution du fait de l'urbanisation à l'exemple des plaines d'Annaba et de Jijel.

La politique des barrages et d'aménagement des ressources en eau a connu un retard dans le projet de développement algérien par rapport aux autres secteurs économiques (industries, agriculture). La croissance des villes et l'augmentation de la population urbaine ne se sont pas accompagnées d'une mobilisation suffisante des ressources en eau. Les conséquences en ont été des coupures d'eau fréquentes et la concurrence par rapport à l'eau, qui est le plus souvent préjudiciable au secteur de l'agriculture.

Selon Remini (2010), un nombre important de problèmes à la fois techniques, naturels et humains sont la cause à la fois du déficit en ressources hydrauliques alors que les besoins sont en constante augmentation d'une part, et d'autre part de la diminution du volume régularisable. L'envasement relativement rapide des barrages constitue la menace la plus importante ; l'histoire hydraulique de l'Algérie soit au début et pendant la colonisation, et les échecs enregistrés pour les barrages construits dans les années 1940 (barrages de Foum El Gueiss, Ksob dans le Hodna, Zardézas,...) ont prouvé les difficultés à maîtriser les aménagements hydrauliques. Certains barrages dans les régions Centre et Ouest du pays ont connu un envasement très rapide à cause essentiellement de problèmes de gestion (Touaibia et al, 2009; Remini, 2009 et 2010).

La politique des retenues collinaires concerne un objectif de 8000 réalisations et a pour objectif de favoriser la petite irrigation. Ces ouvrages sont maîtrisables à l'échelle des communes.

La pollution de plus en plus alarmante des cours d'eau à l'aval des grandes agglomérations et des zones industrielles a des effets négatifs sur la qualité des ressources en eau superficielles et souterraines.

2. LE BASSIN DE LA SEYBOUSE : CADRE DE L'ETUDE

Le bassin-versant de la Seybouse présente à l'instar des bassins à écoulement exoréique de l'Algérie orientale (Kébir-Rhumel, Soummam, etc...) une extension latitudinale importante. Les limites méridionales du bassin sont à 120 km de la mer à vol d'oiseau (fig.1).

De ce fait, les milieux physiques et les caractéristiques climatiques et bioclimatiques connaissent une diversité à partir du bassin amont situé dans les Hautes Plaines jusqu'au littoral, ce qui entraîne des répercussions aussi bien sur les écoulements que sur les aménagements.

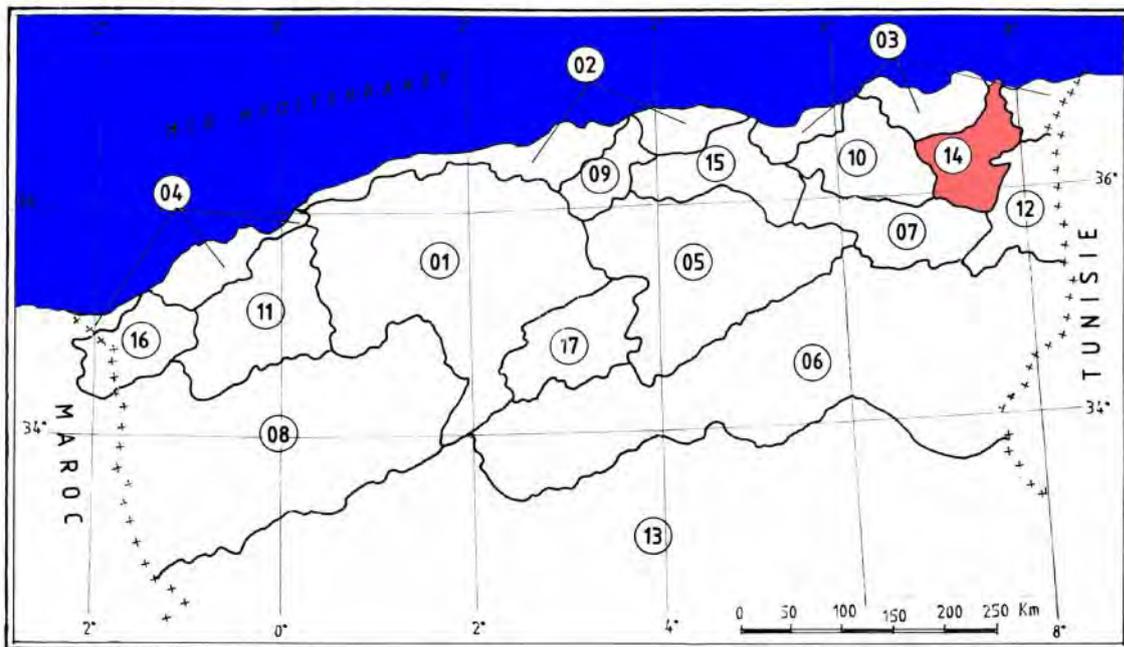


Fig.1 : Position du bassin-versant de la Seybouse en Algérie

2.1. Les grands ensembles physiques du bassin de la Seybouse.

Le bassin de l'oued Seybouse (fig. 1) qui couvre une superficie de 6745 km², chevauche trois grands domaines physiques et bioclimatiques :

- le domaine des Hautes Plaines au Sud ;
- le domaine sud-Tellien ;
- le domaine Tellien du Nord qui comprend la Seybouse maritime : bassin de l'oued Ressoul, oued Dardar et la zone des plaines littorales.

Ces grands ensembles physiques présentent des caractéristiques topographiques qui les différencient nettement (fig.2).

2.1.1. La zone des Hautes Plaines

Elle intègre en totalité le bassin du Haut Cherf. C'est une zone au relief plat, parsemée de plaines (plaine de Sedrata, plaine d'Ain Babouche, plaine de Tamlouka) avec un encadrement montagneux imposant :

- djebel Tiffech (1164 m);
- djebel El Guelaa au Nord de Ain Beida (1135 m);
- djebel Sidi Reghiss (1635 m);
- Chebket Sellaoua , d'orientation SW –NE avec djebel El Hamra (1188m), Koudiat El Bouib (1117 m);
- Djebel Terraguelt (1156 m).

Le bassin-versant du Cherf aval est une zone de transition entre les Hautes Plaines et le Tell, les altitudes diminuent mais le relief devient compartimenté.

2.1.2. Le domaine sud-Tellien :

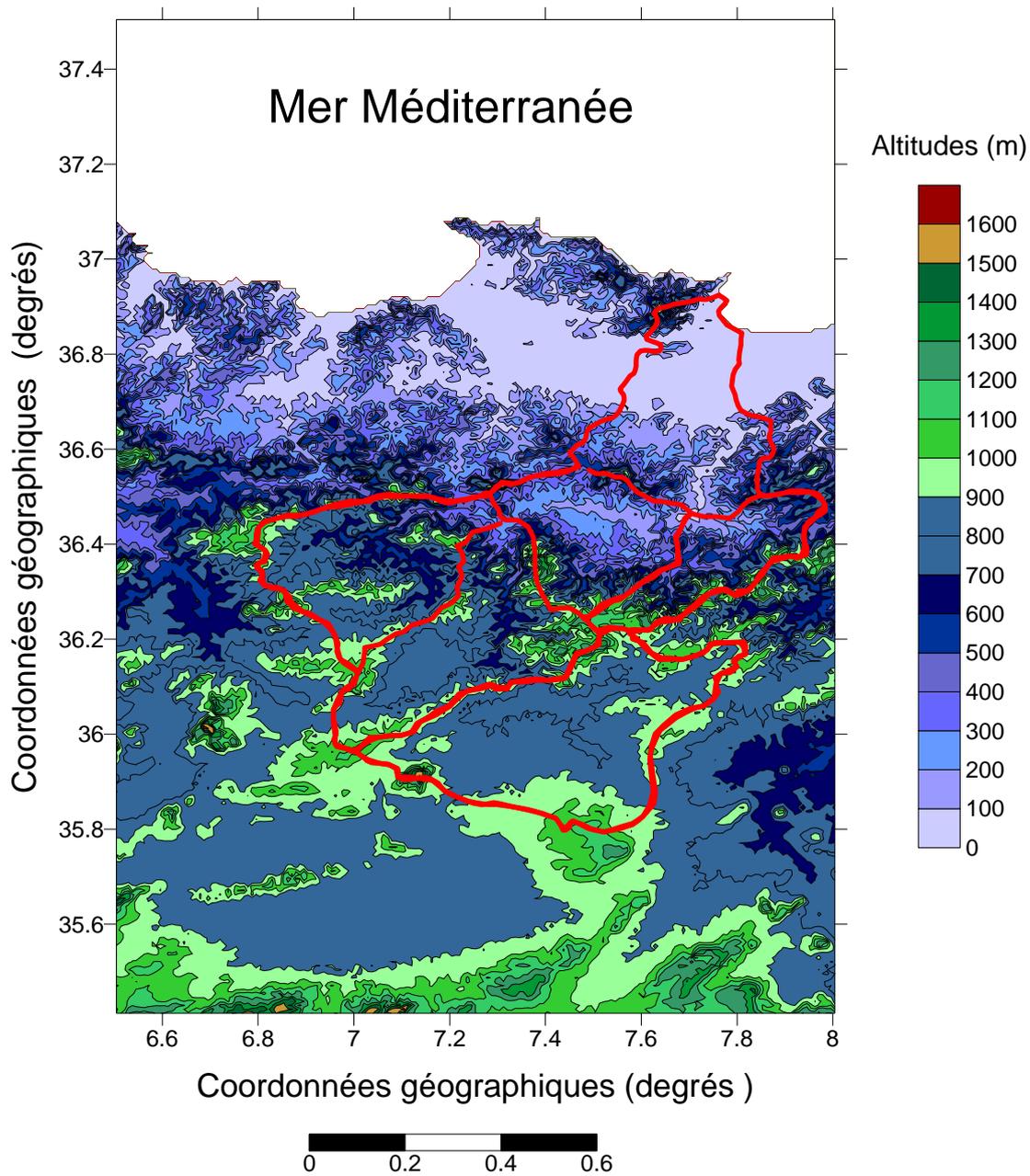
Il couvre une superficie importante qui correspond assez étroitement sur le plan morpho-structural à la chaîne numidique. A ce domaine appartiennent plusieurs sous-bassins, le bassin aval de l'oued Cherf ; le bassin de l'oued Bouhamdane ; les affluents de la Seybouse dans la vallée de Guelma (oued Halia, oued Bou Sorra, oued Zimba , affluents de rive gauche dans la vallée de Guelma) ; le bassin de l'oued Mellah; la Moyenne Seybouse avec des reliefs encadrant la vallée de Guelma (courbe qui encadre la vallée= 200 à 300 m). Sur le versant Nord, les altitudes augmentent progressivement jusqu'à 583 m (Kef Es Soud), et Kef El Mansour (932 m).

Le Versant Sud est plus étendu, plus vaste spatialement, et présente des altitudes plus élevées : Il correspond au versant Nord des Monts de la Medjerdah. Le djebel Mahouna culmine à 1051 m (Koudiat Ed Drizina).Le versant Nord des Monts de la Medjerdah est occupé par les affluents de la Moyenne Seybouse, et le bassin de l'oued Mellah.

2.1.3. Le domaine Tellien du Nord :

La Basse Seybouse présente un relief dissymétrique avec une zone de moyennes montagnes, relativement accentué sur la rive gauche de l'oued Seybouse.

A l'extrême Nord-Ouest, le massif de l'Edough, est à une altitude de 1008 m (Kef Seba).



Limites du bassin de la Seybouse et des sous-bassins

Fig.2: Le bassin versant de la Seybouse : Modèle numérique de terrain et limites de sous bassins.

2.2. Les aménagements hydrauliques dans le bassin de la Seybouse

Le bassin de la Seybouse fait l'objet depuis le début des années 1980, d'aménagements hydrauliques destinés à régulariser les eaux d'écoulements superficiels :

- le barrage de Hammam Debagh sur l'oued Bouhamdane (capacité utile:180 hm³), destiné au périmètre irrigué de Guelma-Boucheougouf(12900 ha) et à l'A.E.P.de Guelma.
- le barrage de Foug El Khanga sur l'oued Cherf amont, d'une capacité de 157 hm³ et destiné à l'irrigation.

Deux autres barrages, destinés à l'irrigation, celui de Koudiat Harricha dans le Cherf aval et celui de Koudiat Mahcha dans la Basse Seybouse, sont programmés pour 2013.

Quatre petits barrages ont été réalisés sur l'oued Cherf amont (Tiffech, Sedrata), M'djez El Bgar dans le Cherf aval, et Ben Badis sur l'oued El Heria qui est un petit affluent de l'oued Bouhamdane.

Par ailleurs, le bassin a connu, grâce à la politique initiée à l'échelle locale, un développement des retenues collinaires (70 recensés sur le bassin de la Seybouse).

3. AXES DE L'ETUDE

3.1.. Etudes réalisées sur le bassin de la Seybouse

Le bassin de la Seybouse, d'une surface de 6745 km², a fait l'objet de plusieurs études, soit initiées par les pouvoirs publics dans le cadre des projets hydrauliques, soit des études universitaires.

Les études universitaires ont abordé plusieurs thèmes.

Ghachi, (1983), dans sa thèse de troisième cycle, a abordé en plus d'une étude hydrologique, les bilans ressources-besoins dans le bassin de la Seybouse. La monographie du bassin-versant de la Seybouse a comporté des séries hydrologiques courtes. Par ailleurs, l'utilisation des moyens informatiques était très limitée.

Khanchoul, (2006), dans sa thèse d'Etat, a étudié les transports solides des cours d'eau dans cinq bassins de l'Est algérien dont trois situés dans la Seybouse (oued Bouhamdane à Medjez Ammar II, oued Ressoul à Ain Berda, oued Mellah à Boucheougouf). Il a procédé à l'analyse des transports solides à l'échelle des événements hydrologiques extrêmes (les crues).

L'étude sur les transports solides réalisée par la SOGREAH en 1983, constitue un important travail bibliographique contenant une base de données sur les pays du Maghreb. Elle complète le travail de Demmak (1982) qui a approfondi l'étude de 30 bassins-versants algériens pour une période de 7 années (1972/73 à 1978/79).

Un nombre important d'études a été réalisé durant les phases d'avant-projet et la phase de réalisation des barrages et des projets d'irrigation, Mais ces projets ont confirmé la nécessité d'approfondir les études dans le domaine des apports liquides et solides.

Ces aménagements hydrauliques posent avec une très forte intensité la nécessité d'une connaissance très précise des éléments qui peuvent influencer fortement sur les écoulements, et l'impact des débits solides sur les ouvrages de régularisation des eaux superficielles.

3.2. Les axes développés dans le présent travail

Beaucoup de thèmes abordés dans le cadre de mes activités d'encadrement de mémoires au sein de la filière « Aménagement des Milieux Physiques » ont été approfondis dans la thèse.

Le cadre de travail choisi, le bassin –versant, est idéal pour étudier l'enchaînement des phénomènes de l'amont à l'aval, par la connaissance des facteurs de l'écoulement, et celle de ses différentes manifestations.

Sans prétendre être exhaustive, l'étude aborde en les approfondissant certains thèmes : la cartographie des pluies moyennes annuelles et fréquentielles, les transports solides des cours d'eau.

Mon choix du bassin de la Seybouse a été renforcé et conforté par la disponibilité des données de mesures (pluviométrie, concentrations pour l'étude des transports solides en suspension) grâce au travail des services de l'A.N.R.H.

Le document est organisé en trois parties :

- La première partie est destinée à dégager les caractères principaux des paramètres climatiques : étude détaillée et cartographie des précipitations, annuelle et interannuelle, et les pluies fréquentielles annuelle décennales sèche et humide. Par ailleurs, étude des températures, de l'évapotranspiration Potentielle E.T.P. et des bilans hydriques.
- La seconde partie est consacrée à l'étude des écoulements liquides et la mobilisation des eaux superficielles. Après avoir présenté le cadre physique du bassin versant et ses caractères morphométriques, cette partie a porté sur l'analyse des bilans annuels, les écoulements mensuels et les phénomènes extrêmes (crues). L'aménagement des eaux est abordé à travers les barrages et les transferts hydrauliques;
- La troisième partie aborde les apports solides de l'oued Seybouse et leurs relations avec les écoulements liquides. Les transports solides en suspension sont étudiés grâce aux données de mesures de quatre stations hydrométriques. L'étude de cas sera consacrée aux transports solides de l'oued Bouhamdane, leur modélisation en relation avec les écoulements liquides et leur impact sur l'envasement du barrage de Hammam Debagh.

4. MATERIELS ET METHODES

4.1. Données :

Ce travail s'appuie principalement sur les données de mesures :

-Données pluviométriques et thermométriques : A.N.R.H. Constantine, A.N.R.H.Alger, O.N.M. Constantine.

- Données de concentrations : A.N.R.H.Alger.
- Données de débits moyens journaliers : A.N.R.H.Alger, A.N.R.H.Constantine.

Les outils de travail : Les analyses statistiques de données ont été réalisées grâce au logiciel Excel, et à Hydrolab, ensemble de macro-commandes développées sous Excel par Jean-Pierre Laborde de l'Université de Nice Sophia-Antipolis.

La cartographie des pluies, réalisée grâce au logiciel Surfer, a nécessité l'exploitation de l'information sur le relief sous forme de Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.).

Le Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.) diffusé sur Internet par EROS Data Center de l'U.S. Geological Survey couvrant l'ensemble du continent africain, est extrait d'une image satellitaire traitée par stéréorestitution. Les données qui y sont diffusées concernent les coordonnées des nœuds d'une grille présentées en colonnes et lignes dans le système de coordonnées géographiques (30 " d'arc en longitude et latitude). Mais ces coordonnées ont été converties en coordonnées Lambert (Mouhous, 1997 et A.N.R.H., 2002).

4.2. Méthodes

4.2.1. Pour les pluies : Traitement statistique basée sur les A.C.P., critique des données par la méthode des résidus de régressions, la cartographie automatique qui fait appel aux régressions multiples pluie-morphométrie, à l'interpolation des résidus de régressions et à la cartographie sous Surfer.

4.2.2. Les apports annuels, mensuels et journaliers et les Q_{max} : ajustements des débits et des pluies journalières maximales aux lois de probabilité (lois normale, racine-normale, log-normale et loi de Gumbel; modélisation des débits maximaux décennaux).

4.2.3. Transports solides en suspension (T.S.S.): Régressions à l'échelle saisonnière et annuelle, régression unique, facteur de correction, courbes bi-fréquentielles;

4.2.4. Les sources de documentation : Elles sont constituées par la collecte de données de terrain, des visites sur terrain, et les données d'information numérique et cartographique.

PREMIERE PARTIE :

LES FACTEURS CLIMATOLOGIQUES.

**LES PRECIPITATIONS, FACTEUR DECISIF
DE L'ECOULEMENT**

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE

Le climat, l'une des composantes les plus importantes des milieux physiques des bassins versants, constitue le facteur le plus influent sur les écoulements, à la fois annuels et extrêmes (crues et étiages). Deux facteurs climatiques sont de première importance :

-La pluviométrie, constitue le facteur essentiel car générateur de l'écoulement superficiel à toutes les échelles de temps. De ce fait, les précipitations annuelles feront l'objet d'une analyse détaillée : critique et comblement des lacunes, calcul des régressions pluie-relief et cartographie automatique des isohyètes, enfin analyse fréquentielle des pluies. La pluviométrie journalière (pluies maximales de 24 heures) sera analysée dans le cadre de l'étude des crues à l'échelle du bassin de l'oued Bouhamdane (chap 5). Les pluies maximales de 24 heures feront l'objet d'une cartographie automatique des gradex ainsi que celle des pluies maximales fréquentielles.

-La thermométrie, étudiée pour cinq stations climatologiques, permettra l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle calculée par les formules de Thornthwaite, de Turc et de l'A.N.R.H. La combinaison pluies-températures est utilisée pour définir les étages bioclimatiques du bassin de la Seybouse allant du sub-humide au Nord au semi-aride dans sa partie méridionale intégrant aussi bien la vallée de Guelma que la zone des Hautes Plaines.

-Les bilans hydriques mensuels, seront esquissés à travers l'exploitation des cartes du déficit hydrique et des zones d'égal mois "secs" de Mebarki sur l'Algérie du Nord.

Chapitre 1 : Précipitations annuelles : données et analyse statistique

INTRODUCTION

Les précipitations et principalement les pluies, qui constituent le poste entrée du cycle de l'eau, sont une composante fondamentale en hydrologie. Leur mesure et leur étude détaillées sont primordiales pour la connaissance du régime des oueds, de l'état des réserves en eau du sol et de la recharge des nappes (Laborde, 2000 ; Cosandey et al. 2000).

Les précipitations sont, avec les écoulements, l'un des processus hydrologiques les plus variables, à la fois dans l'espace et dans le temps (aux échelles annuelle, mensuelle et journalière).

Ce chapitre traite de l'étude statistique des précipitations à l'échelle annuelle. On procédera dans un premier temps, à la critique et à l'homogénéisation des pluies annuelles en suivant la démarche adoptée par l'A.N.R.H. (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, 1993) et développée par Laborde (1997). Cette étape permet d'estimer les paramètres statistiques caractéristiques des pluies dans le bassin de la Seybouse. Ils serviront dans le chapitre suivant à la cartographie automatique des pluies annuelles moyennes et fréquentielles.

1. DONNEES DISPONIBLES : CHOIX DE LA PERIODE D'ETUDE ET DES POSTES PLUVIOMETRIQUES

1.1. Critères de choix des postes et des séries pluviométriques

L'étude des précipitations se heurte, en Algérie, au double problème des lacunes d'observation et de leur fiabilité. Ceci a été mis en évidence dans d'autres études hydrologiques et climatologiques (Mebarki, 1982 et 2005; A.N.R.H., 1993 ; Anser, 1998, Touaibia et al, 2006, Medjerab et Henia, 2005). La faible densité du réseau pluviométrique dans les zones montagneuses constitue un handicap supplémentaire aux études.

L'objectif étant l'étude hydrologique du bassin de la Seybouse, la période adoptée (1969/70 à 1998/99) pour les postes pluviométriques est celle qui concorde avec les données d'observation hydrométriques. Celles-ci sont disponibles pour la majorité des stations hydrométriques à partir de 1968, mais certaines stations hydrométriques ont fonctionné avant l'indépendance.

Deux raisons essentielles ont présidé au choix de la période précitée:

- disponibilité pour l'ensemble du bassin d'une information pluviométrique couvrant une période longue et récente (trentenaire), avec nécessairement recours à l'homogénéisation des données d'observation;
- la période choisie permet d'aboutir à des résultats significatifs concernant la variabilité des précipitations.

Le choix des postes pluviométriques utilisables s'est fait en plusieurs étapes :

- collecte des données de pluviométrie mensuelle auprès de plusieurs services : A.N.R.H. Alger, antenne régionale de l'A.N.R.H. de Constantine, secteurs A.N.R.H. de Annaba et

de Tebessa; Office National de la Météorologie (O.N.M.), Directions régionales de Constantine et Dar El Beida (Alger).

- exploitation des annuaires pluviométriques, des archives et de la bibliographie pour l'historique des stations.

1.2. Postes pluviométriques retenus

Nous avons retenu les stations les moins lacunaires, situées à l'intérieur du bassin de la Seybouse, au nombre de 17, et 4 stations périphériques (fig. 3 et tabl. 1). Une première analyse nous a contraints à éliminer certains postes mêmes très anciens car ils présentaient peu de données sur la période 1969-1999.

Tableau 1: Postes pluviométriques et pourcentage d'information pluviométrique disponible (période 1969/70 -1998/99)

Postes pluviométriques	Organisme gestionnaire	X Lambert (km)	Y Lambert (km)	Nombre de mois lacunaires	% de lacunes
Ain Beida	A.N.R.H.	923,75	287,7	4	1.1
Ain Babouche	A.N.R.H.	905	303,1	64	17.8
Ksar Sbahi	A.N.R.H.	910,5	319	51	14.2
Mechtat Cheikh	A.N.R.H.			92	25.5
Rabah		909,2	310,05		
Aioun Settara	A.N.R.H.	922,4	318,3	52	14.4
Ain Makhlouf	A.N.R.H.	909,1	336,1	27	7.5
Constantine (Ain El Bey)	O.N.M.	851,6	338,5	0	0
Bordj Sabat	A.N.R.H.	889,1	355,08	45	12.5
Bou Snib (Ouled Habeba)	A.N.R.H.	882,1	362,95	46	12.7
Guelma	A.N.R.H.	924,1	361,4	46	12.7
Bouati	A.N.R.H.			0	0
Mahmoud		913,85	375,55		
Bouhegouf	A.N.R.H.	949,19	362,44	0	0
Hammam	A.N.R.H.			67	18.61
N'Bails		943,69	347,5		
Mechroha	A.N.R.H.	961,14	351,84	56	15.55
Ain Berda	A.N.R.H.	937,3	383,2	0	0
El Hadjar	A.N.R.H.	949,9	401	122	33.89
Annaba	O.N.M.	956,1	404,4	0	0
Berrahal	A.N.R.H.	923,35	403,1	39	10.83
kerma	A.N.R.H.	944,6	395,5	74	20.55
Dréan	A.N.R.H.	952,7	383,87	101	28.1
Khemissa	A.N.R.H.	946,25	332,3	100	27.8

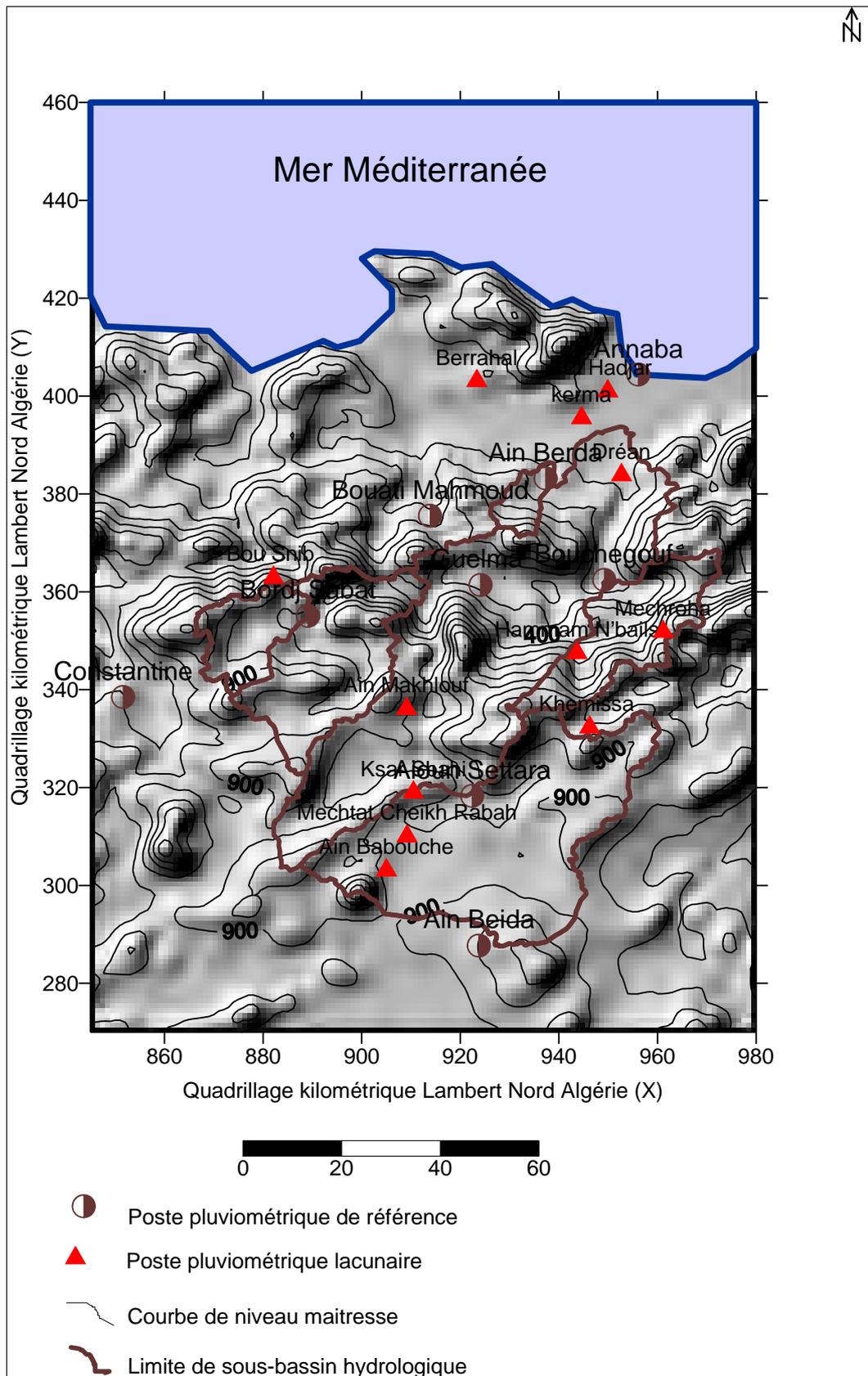


Fig. 3 : Localisation des postes pluviométriques dans le bassin de l'oued Seybouse, vue sous modèle numérique de terrain

Les postes non pris en compte sont soit des postes très anciens qui ont été abandonnés après des études de rationalisation du réseau pluviométrique, (cas des stations Abdi Mabrouk, Ain El Arbi ex Gounod, Tamlouka, Sedrata, Chihani ex Barral) soit des postes installés en 1971 et 1972 et dont l'exploitation a été interrompue (Ragouba, Mouladheim).

Malgré leur nombre assez important, les stations sont mal réparties spatialement. Le problème de la densité du réseau s'est posé notamment pour les bassins des oueds Cherf, Bouhamdane et la Moyenne Seybouse. Ceci nous a conduit à utiliser des stations proches du bassin : Ain Beida pour le Haut Cherf, Constantine et Ouled Habeba (Bou Snib) pour l'oued Bouhamdane, Bouati Mahmoud pour la Moyenne Seybouse. La station de Khemissa a été retenue à cause de sa situation qui permet d'étudier le bassin amont de l'oued Cherf.

Les stations périphériques les plus fiables ont été, de ce fait, très utiles dans les phases de contrôle de la fiabilité des données et du comblement des lacunes annuelles. Les stations de Constantine, Ouled Habeba, Ain Beida, et Bouati Mahmoud ont été intégrées dans les calculs par composantes principales (A.C.P.) et utilisées comme stations de base dans la construction des vecteurs régionaux: Constantine (Ain El Bey) est utilisée pour représenter toute la partie occidentale du bassin du Bouhamdane, dépourvue de postes pluviométriques, Ouled Habeba présente une similitude avec le bassin amont de l'oued Sabath; Ain Beida est très représentative des Hautes Plaines, enfin Bouati Mahmoud est représentative de la Moyenne Seybouse (versant Nord de la vallée de Guelma).

2. HOMOGENEISATION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES DES STATIONS DE BASE

2.1. Les stations de base

Pour l'homogénéisation des données pluviométriques, la méthode utilisée est celle des vecteurs régionaux, adoptée lors de l'élaboration de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord (A.N.R.H., 1993). Après avoir adopté le modèle statistique auquel s'ajustent les données pluviométriques des postes étudiés (les stations de base et les stations lacunaires), on évaluera à l'aide des A.C.P. sur 9 stations de base (fig. 4) les composantes principales qui seront utilisées pour la critique de la fiabilité des données de toutes les stations, et dans une seconde étape, pour l'homogénéisation des séries (comblement des lacunes annuelles).

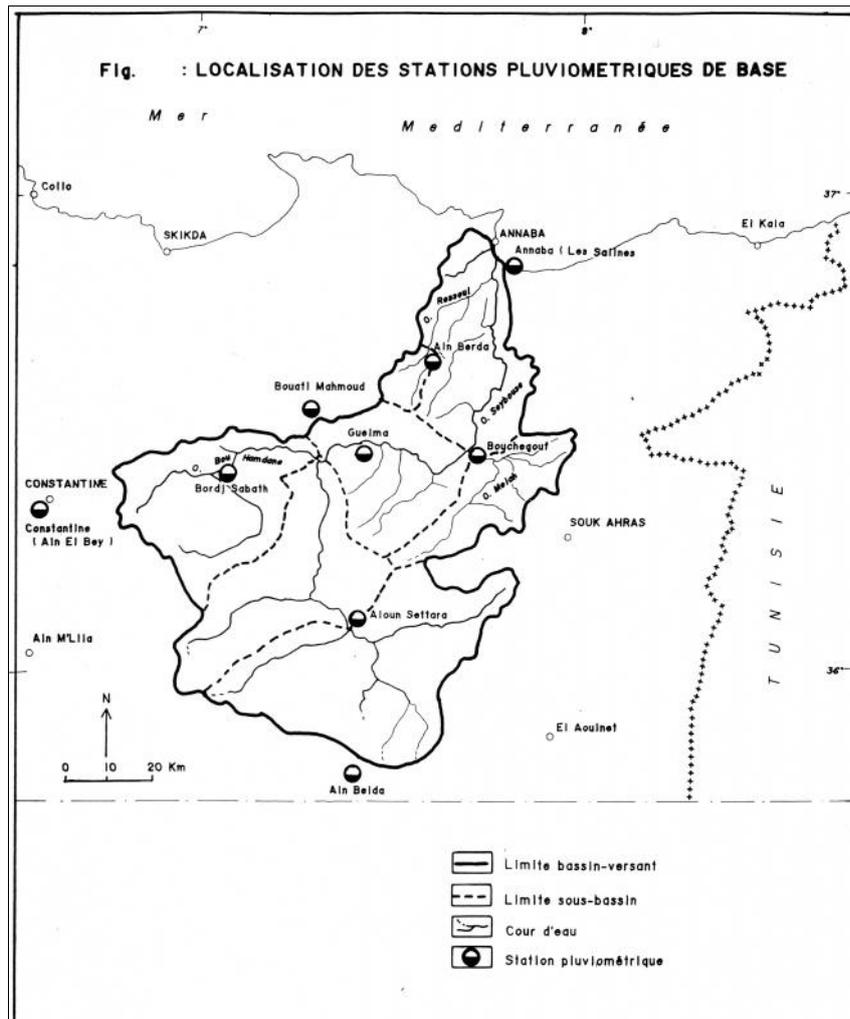


Fig.4: Localisation des postes pluviométriques de référence

2.2. Ajustement des séries pluviométriques à une loi racine-normale

Les études antérieures (Chaumont, 1971; A.N.R.H., 1993; Mébarki, 2005; Touaibia et al, 2006) ont montré que les pluies aussi bien annuelles que mensuelles pouvaient être ajustées à une loi racine-normale (les pluies étant exprimées en racines de dixièmes de millimètres).

L'expression de la loi racine-normale est :

$$F(P) = \frac{1}{\sqrt{2f}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad \text{Avec : } u = \frac{\sqrt{P} - \overline{\sqrt{P}}}{\dagger_{\sqrt{P}}}$$

Où :

$F(P)$: probabilité qu'une valeur quelconque P soit inférieure ou égale à p ;
 u : variable réduite de Gauss, avec P : pluie en dixièmes de millimètres

$\overline{\sqrt{P}}$: moyenne des racines carrées de la série d'observations ;
 $\dagger_{\sqrt{P}}$: écart -type des racines carrées de la série d'observations.

Cette loi est caractérisée par deux paramètres :

- La moyenne des racines carrées des pluies mensuelles (\sqrt{P});
- L'écart-type des racines carrées des pluies mensuelles ($\sigma_{\sqrt{P}}$).

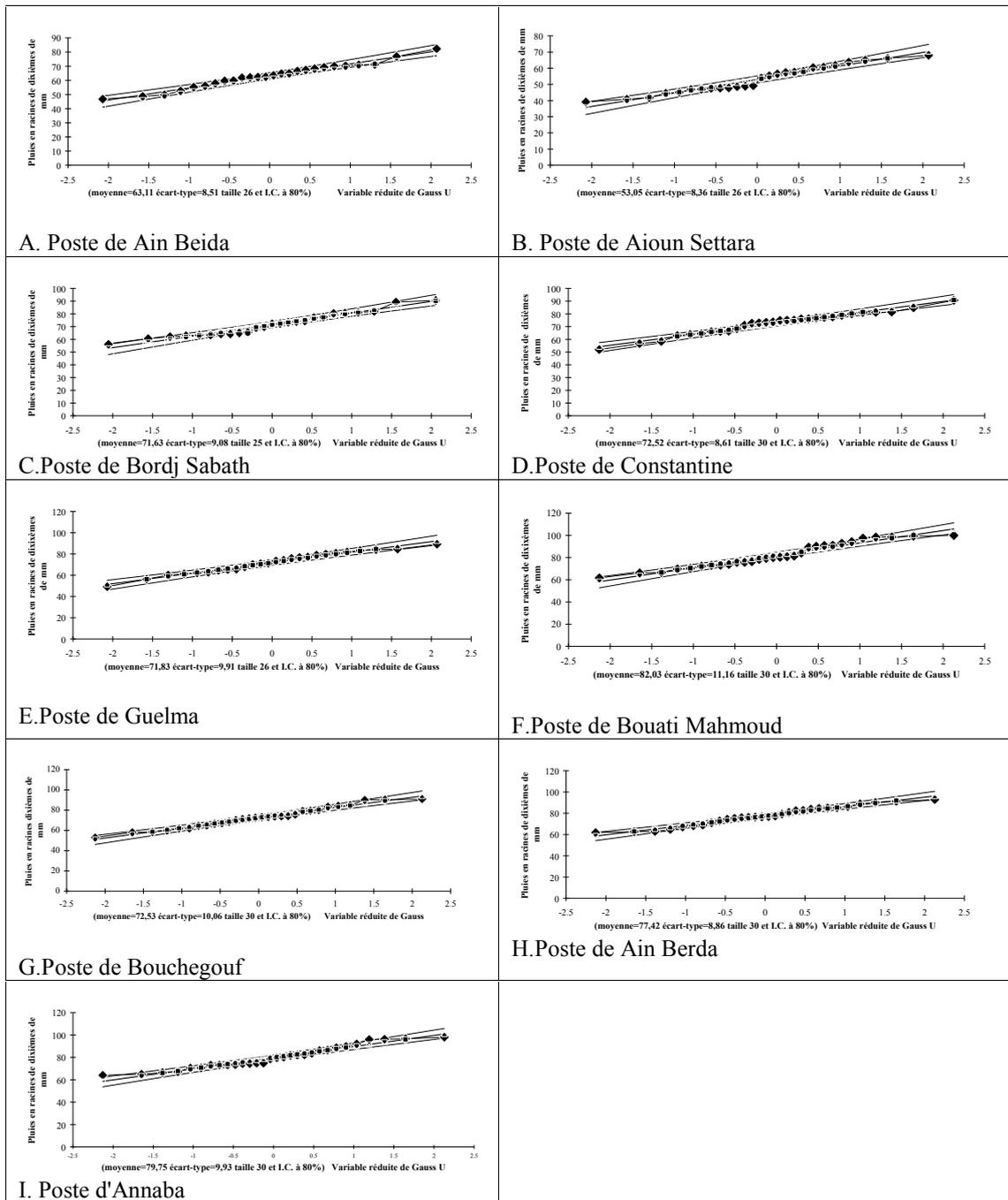


Fig. 5: Ajustement à une loi normale des pluies annuelles des postes pluviométriques de référence (période 1969/1970-1998/1999); valeurs exprimées en racines de dixièmes de mm

La loi racine-normale est très bien adaptée aussi bien pour les stations situées en Hautes Plaines peu pluvieuses (Aioun Settara, Ain Beida) que les stations telliennes

(Bouchegouf, Ain Berda) avec une pluviométrie annuelle plus importante. Les stations de base au nombre de neuf ont été testées sur la loi normale et sur les lois à dissymétrie positive (loi log-normale et loi racine-normale). Les graphiques montrent que la loi racine-normale ajuste bien les données des différentes stations (fig. 5).

2.3. Vecteurs régionaux et homogénéisation des données pluviométriques

Dans le domaine du comblement des lacunes pluviométriques, les vecteurs régionaux utilisés à la place des régressions poste à poste, permettent de réduire considérablement le nombre de graphiques et les calculs. Ils constituent donc des séries de base homogènes. Hiez (1977) a proposé la notion de vecteur régional, série chronologique synthétique représentant les variations annuelles des pluies. Brunet-Moret, en 1979, a de son côté proposé un vecteur d'indices annuels de précipitations. Laborde a appliqué la méthode des vecteurs régionaux pour les pluies annuelles moyennes en Algérie en se basant sur les A.C.P. (A.N.R.H., 1993).

Les composantes principales calculées par A.C.P. sur la matrice des coefficients de corrélation des stations de base constituent les vecteurs régionaux. Ces derniers représentent des stations virtuelles sans lacunes et sans erreurs, utilisées par la suite pour la critique des données et le comblement des lacunes annuelles des postes pluviométriques.

2.3.1. Les données des stations de base

Les lacunes, sont comblées pour les stations de base, choisies pour être représentatives des différents secteurs géographiques du bassin de la Seybouse (tabl.2). Sur neuf des stations de base, quatre présentent des lacunes somme toute peu nombreuses.

La méthode d'homogénéisation des données des stations de base par A.C.P. a été appliquée pour la réalisation de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord. Elle permet de combler les lacunes pour une matrice contenant à la fois des valeurs mesurées et des lacunes. Les variables sont en colonnes et les observations en ligne. Les années avec plus de 4 lacunes mensuelles, sont considérées comme lacunaires ; pour les années ayant moins de 4 lacunes mensuelles, les valeurs manquantes sont remplacées par les moyennes inter-mensuelles.

Tableau 2: Stations pluviométriques de base

Postes pluviométriques	Nombre de mois Lacunaires	Nombre d'années concernées par les lacunes annuelles
Ain Beida	4	1970/1971; 1977/1978; 1981/1982; 1982/1983
Aioun Settara	52	1969/1970; 1970/1971; 1972/1973; 1995/1996
Bordj Sabath	64	1969/1970; 1970/1971; 1971/1972; 1972/1973; 1973/1974
Guelma	15	1970/1971; 1975/1976; 1976/1977; 1989/1990
Bouchegouf	0	Série complète
Constantine	0	Série complète
Bouati Mahmoud	0	Série complète
Ain Berda	0	Série complète
Annaba	0	Série complète

2.3.2. Homogénéisation des données à l'aide du programme "Bouche trous"

On donnera ci-après un aperçu sur la méthode des A.C.P. On trouvera des explications plus détaillées dans les ouvrages de statistique (Dumolard, 2007 ; Dagnélie, 1986; De Lagarde, 1983) et également Laborde (2000).

L'A.C.P. est une méthode de statistique multivariée. A l'origine, c'est une méthode descriptive permettant de réduire la taille de l'ensemble de l'information apportée par les variables d'origine en un nombre réduit de nouvelles variables qui sont des indices synthétiques.

Ces nouvelles variables (les composantes principales) ont les caractéristiques suivantes :

- elles apportent un pourcentage d'explication décroissant ;
- elles sont indépendantes entre elles (les composantes sont orthogonales).

L'A.C.P. est un outil de travail particulièrement performant en hydrologie lorsque les problèmes exigent un regroupement de variables (reconstitution de données manquantes, critique des données pluviométriques, cartographie). L'une des utilisations des A.C.P. est la reconstitution des données manquantes; elle est utilisée pour la pluviométrie à l'aide du programme "Bouche trous", comblement des lacunes pluviométriques annuelles par A.C.P. (A.N.R.H. ,1993 ; Laborde, 1997 ; Laborde, 2000). Les données de départ se présentent sous forme d'une matrice de 9 colonnes (9 variables ou stations de base) et 30 lignes (30 observations annuelles par poste pluviométrique).

Pour expliquer cette méthode, on s'inspirera des travaux de Laborde (1993, 1997,2000).

A titre d'exemple, on prendra une matrice de 5 colonnes (5 variables) et 10 lignes (10 observations) (tabl.3).

Tableau 3 : Données pour le comblement des lacunes pluviométriques annuelles par A.C.P., programme "Bouche trous"

Années	Ain Beida	Aioun Settara	Constantine	Bordj Sabath	Bouati Mahmoud
1969/1970	X _{1,1}	lacune	X _{3,1}	lacune	X _{5,1}
1970/1971	X _{1,2}	lacune	X ₃	lacune	X _{5,2}
1971/1972	X _{1,3}	lacune	X ₃	lacune	X _{5,3}
1972/1973	X _{1,4}	lacune	X ₃	X _{4,4}	X _{5,4}
1973/1974	X _{1,5}	lacune	X ₃	X _{4,5}	X _{5,5}
1974/1975	X _{1,6}	X _{2,6}	X ₃	X _{4,6}	X _{5,6}
1975/1976	X _{1,7}	X _{2,7}	X ₃	X _{4,7}	X _{5,7}
1976/1977	X _{1,8}	X _{2,8}	X ₃	X _{4,8}	X _{5,8}
1977/1978	X _{1,9}	X _{2,9}	X ₃	X _{4,9}	X _{5,9}
1978/1979	X _{1,10}	X _{2,10}	X _{3,10}	X _{4,10}	X _{5,10}

Les données sont en dixièmes de racines de millimètres (distribution normale des pluies annuelles pour tous les postes pluviométriques). La matrice inclut aussi bien les valeurs observées que les années lacunaires (notées lacune). Cependant, une ligne ou une colonne ne doit pas contenir que des lacunes.

Première étape:

On calcule pour chaque variable la moyenne $M_{xi}(0)$ sur les valeurs observées.

$$\begin{array}{cccccc}
 M_{xi}(0) & M_{x1} & M_{x2} & M_{x3} & M_{x4} & M_{x5} \\
 & (0) & (0) & (0) & (0) & (0)
 \end{array}$$

Seconde étape :

Dans la matrice de départ, on remplace les valeurs lacunaires par la moyenne $M_{xi}(0)$ de la variable, et on effectue une A.C.P. Le choix du nombre de composantes doit être dicté par leur signification physique. Les travaux antérieurs orientent vers le choix de 2 ou 3 composantes principales. L'exemple est donné en utilisant 3 composantes principales.

On obtient :

-la projection des variables sur les composantes :

$$\begin{array}{l}
 a_1 = \begin{array}{ccccc}
 a_1(1,1) & a_1(1,2) & a_1(1,3) & a_1(1,4) & a_1(1,5) \\
 a_1(2,1) & a_1(2,2) & a_1(2,3) & a_1(2,4) & a_1(2,5) \\
 a_1(3,1) & a_1(3,2) & a_1(3,3) & a_1(3,4) & a_1(3,5)
 \end{array}
 \end{array}$$

-la projection des observations sur les composantes :

C1	C2	C3
C1 (1,1)	C1 (1,2)	C1(1,3)
C1 (2,1)	C1(2,2)	C1(2,3)
C1 (3,1)	C1(3,2)	C1(3,3)
C1 (4,1)	C1(4,2)	C1(4,3)
C1 (5,1)	C1(5,2)	C1(5,3)
C1(6,1)...	C1(6,2)	C1(6,3)
C1(7,1)...	C1(7,2)	C1(7,3)
C1(8,1)...	C1(8,2)	C1(8,3)
C1(9,1).	C1(9,2)	C1(9,3)

C1(10,1) C1(10,2) C1(10,3)

On aura calculé sur la matrice les moyennes et les écarts-types.

Mxi(1)	Mx1(1)	Mx2(1)	Mx3(1)	Mx4	Mx5(1)
				(1)	
Sxi(1)	Sx1(1)	Sx2(1)	Sx3(1)	Sx4 (1)	Sx5 (1)

L'estimation des valeurs lacunaires se fait par :
(Exemple Aioun Settara, Variable X2)

$$Xe1(2,1) = \{(Mx2(1),1 + Sx2(1)) * (a2,1 * c2,1) + (a2,2 * c2,2) + (a2,3 * c2,3)\}.$$

On obtient une première matrice dont les lacunes sont comblées.

Années	Ain Beida	Aioun Settara	Constantine	Bordj Sabath	Bouati Mahmoud
1969/1970	X _{1,1}	Xe ₂ (2,1)	X _{3,1}	X _{4,1}	X _{5,1}
1970/1971	X _{1,2}	Xe ₂ (2,2)	X _{3,2}	X _{4,2}	X _{5,2}
1971/1972	X _{1,3}	Xe ₂ (2,3)	X _{3,3}	X _{4,3}	X _{5,3}
1972/1973	X _{1,4}	Xe ₂ (2,4)	X _{3,4}	X _{4,4}	X _{5,4}
1973/1974	X _{1,5}	Xe ₂ (2,5)	X _{3,5}	X _{4,5}	X _{5,5}
1974/1975	X _{1,6}	X _{2,6}	X _{3,6}	X _{4,6}	X _{5,6}
1975/1976	X _{1,7}	X _{2,7}	X _{3,7}	X _{4,7}	X _{5,7}
1976/1977	X _{1,8}	X _{2,8}	X _{3,8}	X _{4,8}	X _{5,8}
1977/1978	X _{1,9}	X _{2,9}	X _{3,9}	X _{4,9}	X _{5,9}
1978/1979	X _{1,10}	X _{2,10}	X _{3,10}	X _{4,10}	X _{5,10}

On obtient :

-la projection des variables sur les composantes :

$$a2 = \begin{matrix} & a2(1,1) & a2(1,2) & a2(1,3) & a2(1,4) & a2(1,5) \\ a2(2,1) & a2(2,1) & a2(2,2) & a2(2,3) & a2(2,4) & a2(2,5) \\ a2(3,1) & a2(3,1) & a2(3,2) & a2(3,3) & a2(3,4) & a2(3,5) \end{matrix}$$

-la projection des observations sur les composantes :

$$\begin{matrix} & C1 & C2 & C3 \\ C1(1,1) & C1(1,1) & C1(1,2) & C1(1,3) \\ C1(2,1) & C1(2,1) & C1(2,2) & C1(2,3) \\ C1(3,1)... & C1(3,1) & C1(3,2) & C1(3,3) \\ C1(4,1)... & C1(4,1) & C1(4,2) & C1(4,3) \\ C1(5,1)... & C1(5,1) & C1(5,2) & C1(5,3) \\ C1(6,1)... & C1(6,1) & C1(6,2) & C1(6,3) \\ C1(7,1)... & C1(7,1) & C1(7,2) & C1(7,3) \\ C1(8,1)... & C1(8,1) & C1(8,2) & C1(8,3) \\ C1(9,1)... & C1(9,1) & C1(9,2) & C1(9,3) \\ & C1(10,1) & C1(10,2) & C1(10,3) \end{matrix}$$

On aura calculé sur la matrice les moyennes et les écarts-types.

$$\begin{matrix} M_{xi}(1) & M_{x1}(2) & M_{x2}(2) & M_x \\ S_{xi}(1) & S_{x1}(2) & S_{x2}(2) & \end{matrix}$$

La deuxième estimation des valeurs lacunaires se fait par :
(Exemple Aioun Settara , variable X2)

$$Xe2 = \{(M_{x2}(2) + S_{x2}(2) * ((a2(1,2) * C2(2,1)) + ((a2(2,2) * C2(2,2)) + ((a2(3,2) * C2(2,3))))\}$$

On obtient une deuxième matrice dont les lacunes seront comblées par les estimations de Xe2.

On recommence cette procédure un certain nombre de fois (nombre d'itérations choisies) jusqu'à ce que le processus se stabilise (diminution des écarts).

On peut retenir entre 6 et 7 itérations, mais d'une façon générale, on aboutit à la convergence des écarts au bout de 7 à 8 itérations. Par contre, pour le nombre de composantes principales, on ne peut retenir que les composantes ayant une signification physique. Les travaux réalisés ont montré qu'à partir de la troisième composante, le variogramme des projections des composantes sur les variables devenait pépétique pur, signifiant que la composante n'a pas de structure spatiale. Ceci signifie que les erreurs de mesures sont reportées sur ces composantes.

Années	Ain Beida	Aioun Settara	Constantine	Bordj Sabath	Bouati Mahmud
1969/1970	$X_{1,1}$	X_{e2} (2,1)	$X_{3,1}$	$X_{4,1}$	$X_{5,1}$
1970/1971	$X_{1,2}$	X_{e2} (2,2)	$X_{3,2}$	$X_{4,2}$	$X_{5,2}$
1971/1972	$X_{1,3}$	X_{e2} (2,3)	$X_{3,3}$	$X_{4,3}$	$X_{5,3}$
1972/1973	$X_{1,4}$	X_{e2} (2.,4)	$X_{3,4}$	$X_{4,4}$	$X_{5,4}$
1973/1974	$X_{1,5}$	X_{e2} (2,5)	$X_{3,5}$	$X_{4,5}$	$X_{5,5}$
1974/1975	$X_{1,6}$	$X_{2,6}$	$X_{3,6}$	$X_{4,6}$	$X_{5,6}$
1975/1976	$X_{1,7}$	$X_{2,7}$	$X_{3,7}$	$X_{4,7}$	$X_{5,7}$
1976/1977	$X_{1,8}$	$X_{2,8}$	$X_{3,8}$	$X_{4,8}$	$X_{5,8}$
1977/1978	$X_{1,9}$	$X_{2,9}$	$X_{3,9}$	$X_{4,9}$	$X_{5,9}$
1978/1979	$X_{1,10}$	$X_{2,10}$	$X_{3,10}$	$X_{4,10}$	$X_{5,10}$

Le graphe représentant les modifications des écarts entre les itérations (écart moyen, écart-types des écarts, écart maximal) montre qu'à partir de la quatrième itération, l'écart devient minime entre l'écart moyen et l'écart-type des écarts. L'écart maximal égal à 1 (ce qui équivaut à 100mm) à la quatrième itération, se réduit jusqu'à 0.3 (9 mm).

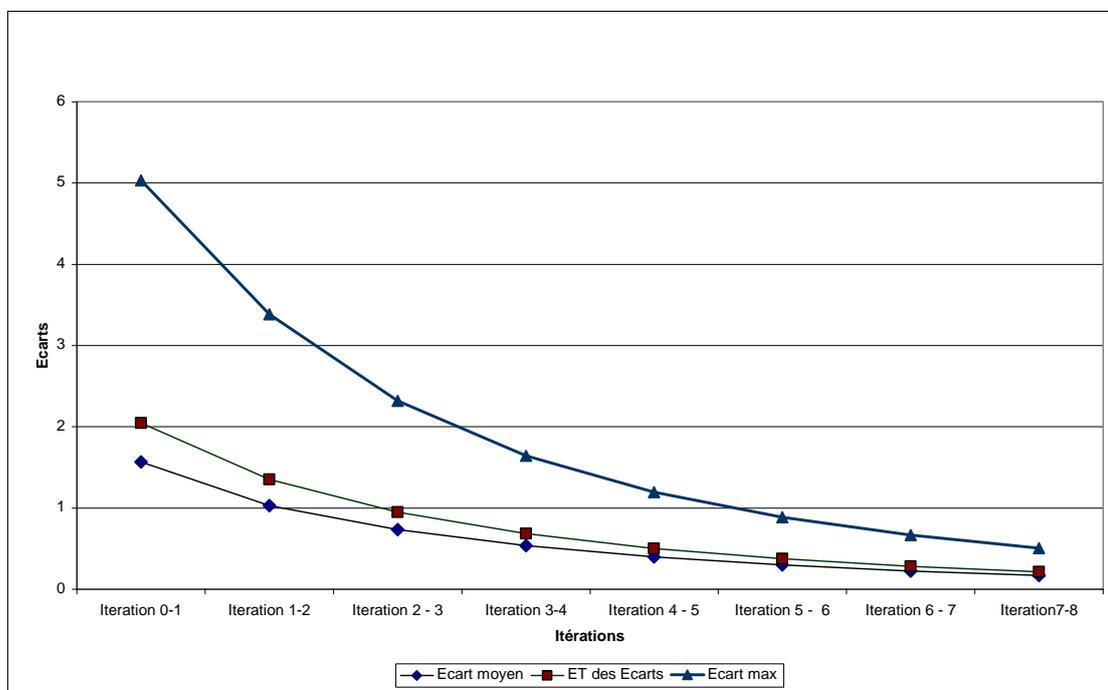


Fig. 6: Modifications des écarts entre les itérations (écart moyen, écart-types des écarts, écart maximal)

2.3.3. Les résultats de l'homogénéisation par A.C.P. sur les données des stations de base

Les paramètres statistiques des stations de base après homogénéisation sont reportés dans le tableau 4.

Les postes d'Ain Beida et Aioun Settara situés en Hautes Plaines ont les moyennes les plus faibles. Les postes de Constantine, Bordj Sabath, Guelma, Bouchegouf situés dans la zone du Tell intermédiaire avec des sites différents et les postes situés en vallée ont des moyennes très proches (Guelma, Bouchegouf). Les valeurs les plus fortes concernent les postes de Bouati Mahmoud et Ain Berda situés dans le Tell septentrional et Annaba (zone littorale).

Tableau 4 : Moyennes et écarts-types des variables actives des stations de base en racines de dixièmes de mm

Postes pluviométriques	Moyennes	Écarts-types
Ain Beida	62,9	8,1
Aioun Settara	55,0	10,2
Constantine	72,5	8,6
Bordj Sabat	71,5	8,9
Bouati Mahmoud	82,0	11,2
Guelma	72,1	9,4
Bouchegouf	72,5	10,1
Ain Berda	77,4	8,9
Annaba	79,7	9,9

Seules les deux premières composantes sont prises en compte, car elles ont une signification spatiale. La première composante représente une part importante de la variance expliquée (75.3%). Les deux premières composantes principales ont une variance cumulée de 86.4 %.

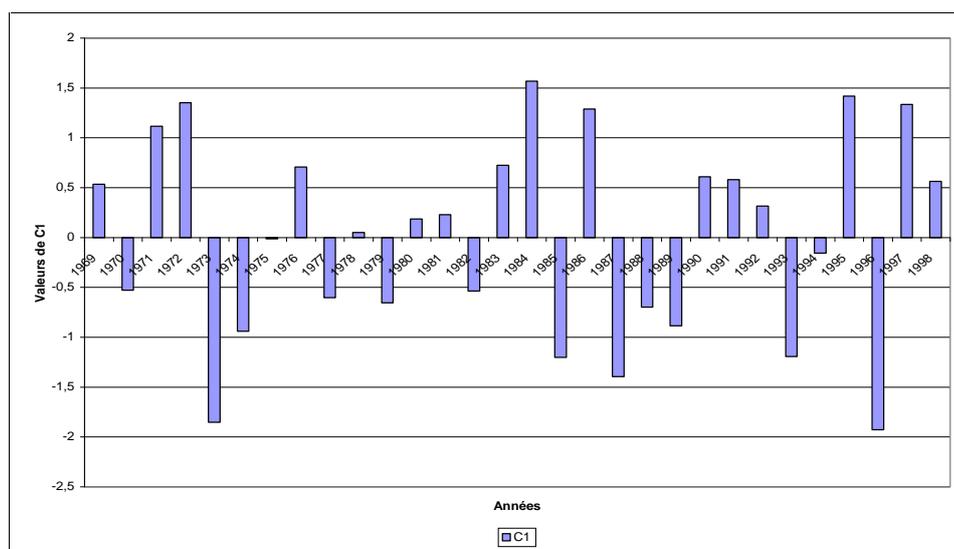


Fig. 7: Valeurs prises par la composante 1 (projections des observations actives).

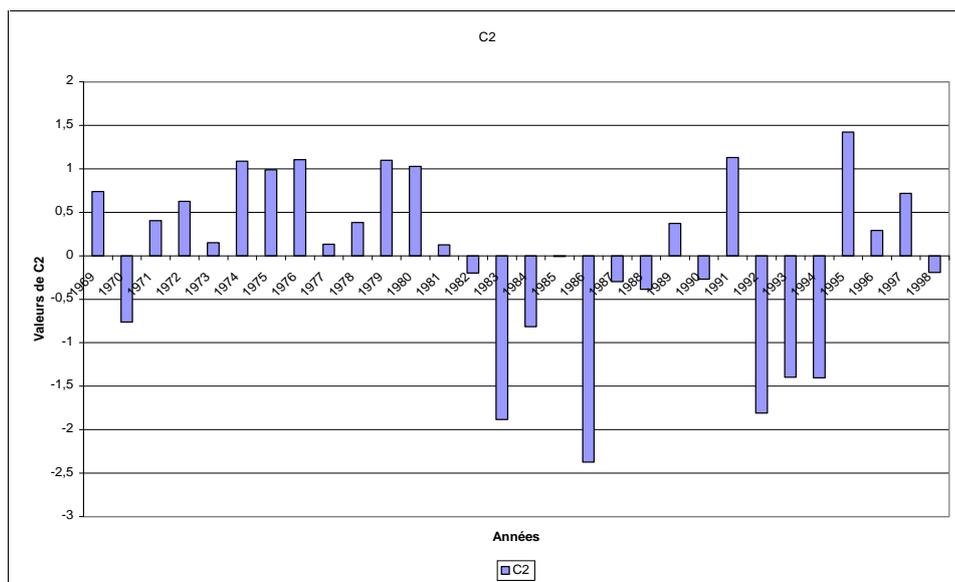


Fig. 8 : Valeurs prises par la composante 2 (projections des observations actives).

Tableau 5 : Projection des variables actives sur les pluies annuelles.

Projections des variables actives :		
	C1	C 2
Ain Beida	0,81	0,47
Aioun Settara	0,69	0,68
Constantine	0,81	-0,02
Bordj Sabat	0,89	-0,35
Bouati Mahmoud	0,88	-0,27
Guelma	0,95	-0,12
Boucheouf	0,93	0,19
Ain Berda	0,94	-0,17
Annaba	0,87	-0,20

En ce qui concerne la projection des variables actives, la première composante représente la variabilité temporelle des pluies (fig. 7). La corrélation est très bonne avec toutes les variables, supérieure à 0.80 sauf pour Aioun Settara.

On notera à partir du graphe que les années les plus pluvieuses sont 1995/1996 et 1984/1985, les années les moins pluvieuses 1973/1974 et 1996/1997.

La seconde composante présente un caractère spatial, elle est corrélée avec la position en latitude des stations (fig. 8). Les plus forts coefficients de corrélation positifs correspondent à la station de Boucheouf et aux stations situées plus au Sud, à pluviométrie faible (Ain Beida, Aioun Settara).

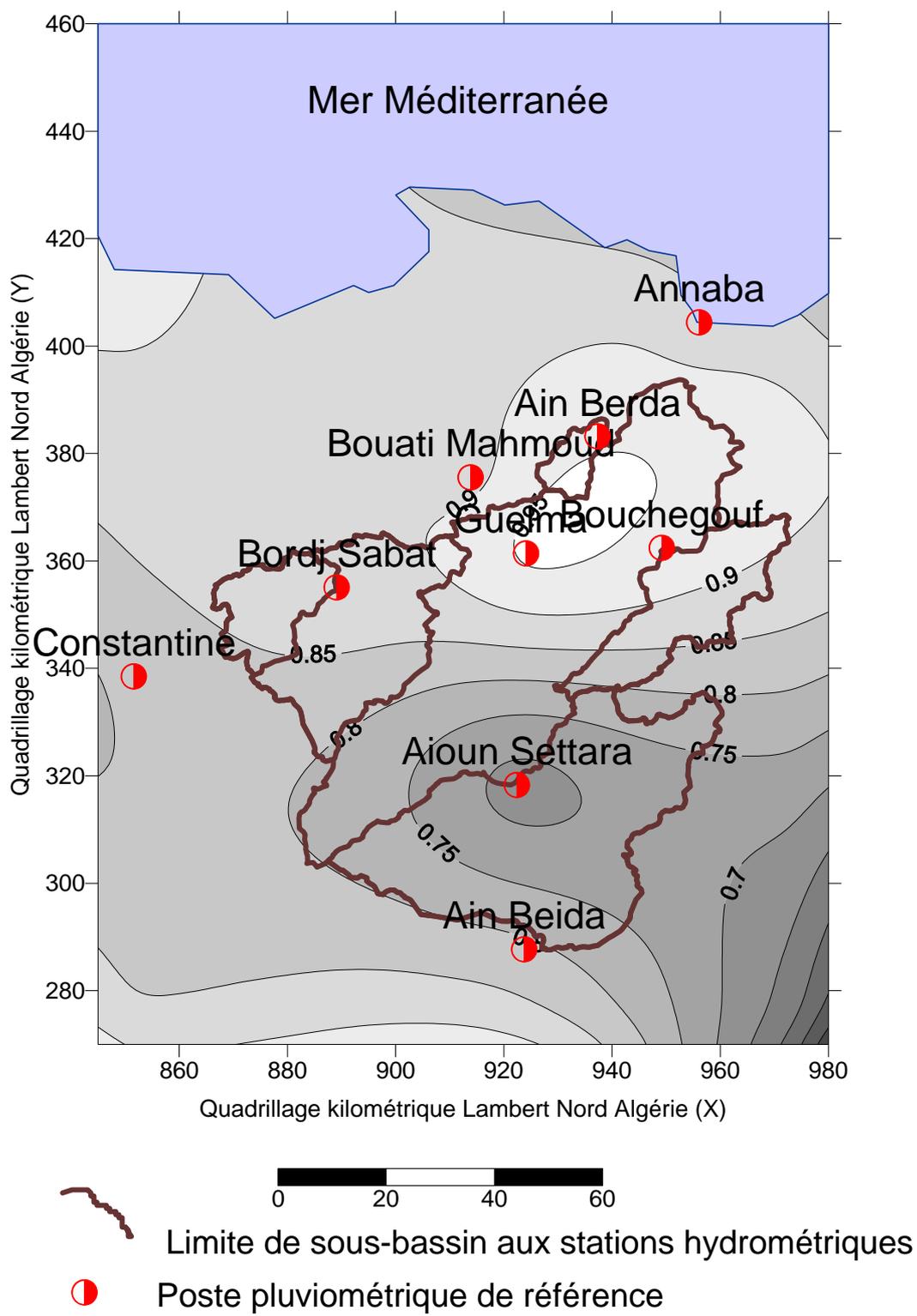


Fig.9 : Comportement des postes pluviométriques de référence avec la première composante C1

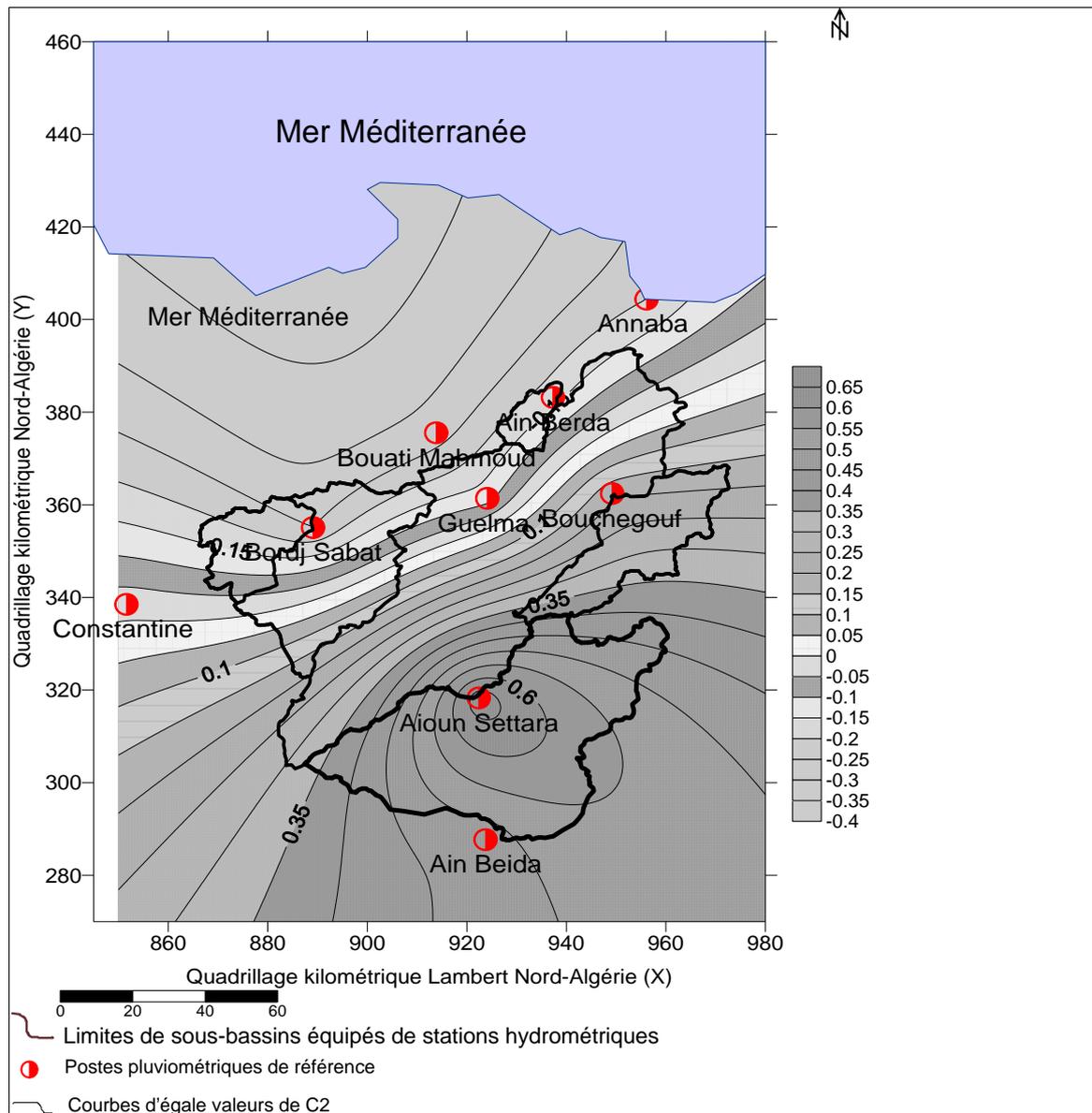


Fig.10 : Comportement des postes pluviométriques de référence avec la seconde composante C₂

Les stations situées le plus au Nord ont un coefficient de corrélation négatif (Aïn Berda, Annaba, Bouati Mahmoud, et Bordj Sabath). La station de Constantine, géographiquement située à la latitude médiane du bassin a une valeur de r intermédiaire.

3. HOMOGENEISATION DES SERIES PLUVIOMETRIQUES LACUNAIRES

Les deux premières composantes représentent 86.4 % de la variance expliquée, cela signifie pour les stations de référence que les séries pluviométriques se ramènent à une combinaison linéaire de ces composantes, avec un coefficient de corrélation multiple r de $\sqrt{0.86} = 0.923$. Pour généraliser ce résultat aux autres stations qui sont lacunaires, nous pouvons considérer que les observations pour n'importe quelle station ne dépendent que des valeurs prises par les projections des observations actives sur les deux premières composantes principales (C1 et C2). Les conditions de normalité sont réunies pour les

stations lacunaires puisque les pluies sont exprimées en racines de dixièmes de millimètres et pour les composantes C1 et C2 (fig.9, 10,11 et 12).

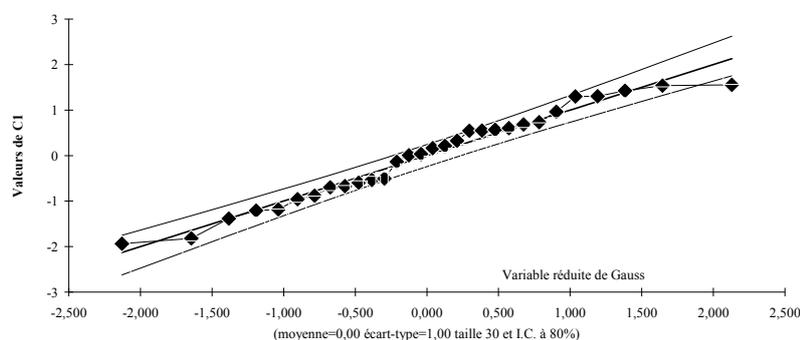


Fig. 11. Ajustement à une loi normale des projections des observations actives sur la première composante (n=30)

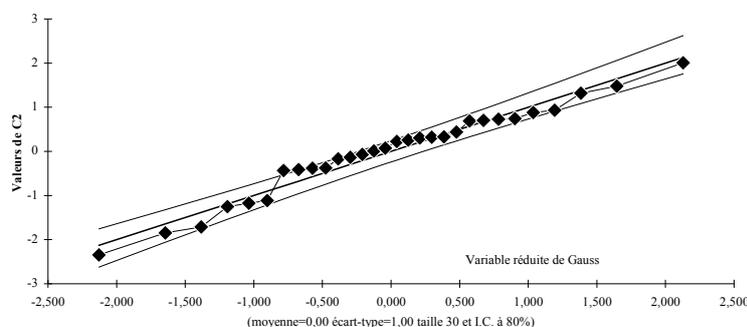


Fig. 12. Ajustement à une loi normale des projections des observations actives sur la seconde composante (n=30)

On peut raisonnablement penser que les régressions seront linéaires. Ceci doit permettre d'homogénéiser les données des 12 stations lacunaires en utilisant les composantes C1 et C2.

L'homogénéisation des données pluviométriques se fera en deux étapes :

- critique des données,
- comblement des lacunes d'observation.

Pour ces deux opérations, les deux premières composantes principales obtenues pour les postes pluviométriques de référence seront utilisées. Parmi celles dont les données ont été collectées, 12 stations lacunaires ont été retenues car présentant un pourcentage de lacunes < à 30%.

3.1. Critique des données pluviométriques par la méthode des cumuls des résidus de régression

Deux types d'erreurs peuvent être commis dans le domaine des mesures de la pluie.

Les erreurs accidentelles (erreurs lors de la lecture , oublis, erreurs de transcription) et les erreurs systématiques (changement de site avec maintien du nom du poste et même des coordonnées , utilisation d'une éprouvette inadéquate). Les changements d'observateurs sont aussi une cause d'apparition d'erreurs de mesures. Plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature spécialisée pour tenter de découvrir les erreurs. Il serait plus juste de parler de détecter les anomalies par rapport à la représentation statistique du phénomène.

3.1.1. Rappel de la méthode des cumuls des résidus de régression

Elle permet de déceler les anomalies, aussi bien les erreurs accidentelles que les erreurs systématiques. Laborde (2003) a bien défini les concepts, dont le principal est la notion d'anomalie à détecter et les limites de la méthode qui sont liées à la responsabilité qui incombe au chercheur de corriger ou non les valeurs "douteuses". Les erreurs accidentelles affectent ponctuellement certaines mesures, alors que les erreurs systématiques affectent certaines portions de séries de mesures.

Ces erreurs se manifestent lorsqu'elles sont importantes, par des anomalies dans les distributions statistiques. Cependant, certaines anomalies statistiques ne sont pas liées à des erreurs de mesures mais à des erreurs d'échantillonnage (phénomènes exceptionnels) ou des ruptures de stationnarité (par exemple changement climatique).

La méthode des cumuls des résidus de régression est plus puissante que la méthode des doubles-cumuls (Bois, 1986) car elle la contient, mais elle travaille non pas sur les cumuls des valeurs mais sur les cumuls des résidus et elle présente un aspect probabiliste en étudiant les seuils de probabilité de cohérence des données.

Cette méthode, peut être mise en œuvre en utilisant un tableur (Excel, etc...). Elle exploite les propriétés de la régression linéaire entre 2 variables x et y. Le principe en est le suivant :

Disposant des données de mesure de deux postes pluviométriques, on désignera par x la variable de référence supposée dépourvue d'erreurs de mesures soit accidentelles ou systématiques, et par y la variable à tester.

Après avoir vérifié que les variables obéissent à la loi normale, on établit une régression entre elles.

$$Y = a x + b.$$

Le résidu de régression est $\varepsilon = y \text{ mesuré} - y \text{ estimé}$ (sur les données de l'échantillon).

Les 2 variables étant de distribution gaussienne, le résidu ε_i est une variable gaussienne de moyenne nulle et d'écart-type = $\sigma y \cdot (1-r^2)$.

On définit la variable Z_i cumul des résidus, $Z_i = \sum_{j=1}^i \varepsilon_j$ avec $j=1$ à i .

Cette variable Z_i est une variable aléatoire de moyenne nulle et d'écart-type :

$$\sigma Z_i = \sqrt{t v \cdot (i(n-i) / n - 1)}$$

Lorsqu'on se fixe un intervalle de confiance de $\alpha\%$, il y a $1 - \alpha\%$ de chance sur 100 % pour que Z_i soit extérieur au segment :

$$[-u\alpha\% \cdot \sigma Z_i , + u \alpha\% \cdot \sigma Z_i]$$

avec $u\alpha\%$ = variable réduite de Gauss et $Z_i = \sqrt{t v \cdot (j(n-1) / n - 1)}$

j : rang de la variable de $j=1$ à $j = n$.

3.1.1.1. Détection des anomalies accidentelles

Si on travaille avec IC de 95 %, on peut considérer que pour une année donnée i , il y a 95 % de chance pour que l'écart à la droite soit compris entre $-1.96 \dagger v < E(i) < +1.96 \dagger v$

Si la valeur de l'année i sort de cet intervalle, elle est considérée comme une anomalie accidentelle. Selon Laborde (2003), les erreurs accidentelles affectent ponctuellement certaines mesures.

3.1.1.2. Détection des anomalies systématiques

Selon Laborde (2003), les erreurs systématiques affectent certaines portions de séries de mesures.

Pour les mettre en évidence, il faut utiliser les cumuls des résidus.

Si on travaille avec IC de 95 %, on peut considérer que pour une suite d'années données, il y a 95 % de chance pour que l'écart à la droite soit compris entre $-1.96 \dagger v < E(i) < +1.96 \dagger v$. Les points qui sortent de l'intervalle formé par l'ellipse doivent être vérifiés.

3.1.2. Application des cumuls des résidus sur les séries de la Seybouse

La méthode des cumuls des résidus de régressions permet de détecter les anomalies accidentelles et les anomalies systématiques. On teste les données observées de chacune des stations lacunaires par rapport à la série fictive basée sur les composantes C1 et C2 afin de détecter les anomalies systématiques et accidentelles. L'application de cette méthode aux 12 stations lacunaires doit permettre de montrer les cas éventuels d'anomalies accidentelles et systématiques. Cependant, en l'absence d'archives ou du moins la difficulté d'accéder aux archives concernant les postes pluviométriques, il est difficile de s'engager dans des corrections qui peuvent être néanmoins reprises si on travaille sur les pluies année par année.

Lorsqu'on travaille sur des moyennes interannuelles, les éventuelles erreurs ne prennent pas beaucoup d'importance. Il faut aussi savoir que les observations peuvent être bonnes mais avoir une faible probabilité d'arriver.

3.1.2.1. Les anomalies accidentelles détectées

On travaille avec IC de 95 %; pour une année donnée i , il y a 95 % de chance pour que l'écart à la droite soit compris entre $-1.96 \dagger v < E(i) < +1.96 \dagger v$.

Une anomalie accidentelle survient lorsque la valeur de l'année i sort de cet intervalle.

Pour les postes de Mechtat Cheikh Rabah, Hammam N'Bails, et El Hadjar l'application de la méthode des cumuls de résidus n'a montré aucune anomalie (fig.13,14 et 15).

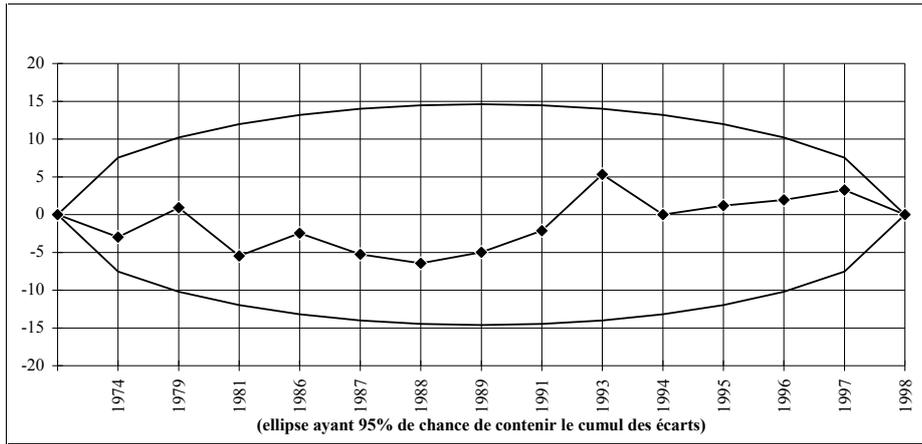


Fig.13: Détection des anomalies systématiques de Mechtat Cheikh Rabah par rapport à CIC2

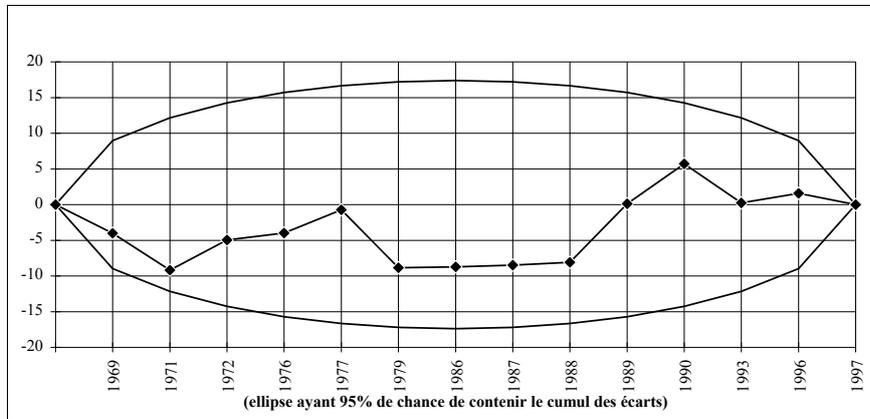


Fig.14: Détection des anomalies systématiques de Hammam N'Bails par rapport à CIC2

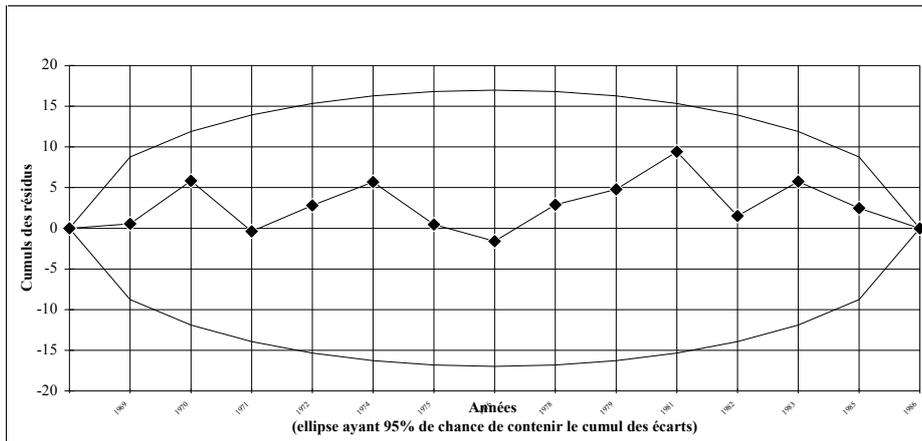


Fig.15 : Détection des anomalies systématiques d'El Hadjar par rapport à CIC2

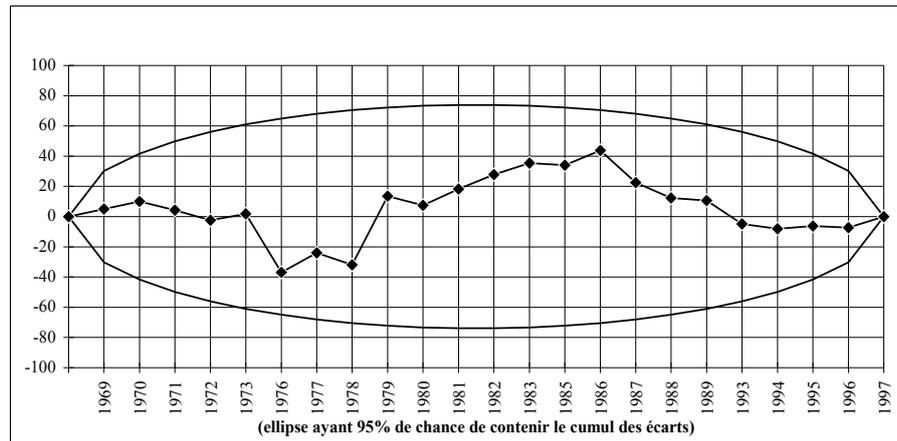


Fig. 16: Détection des anomalies systématiques de Mechroha par rapport à CIC2 (n=23)

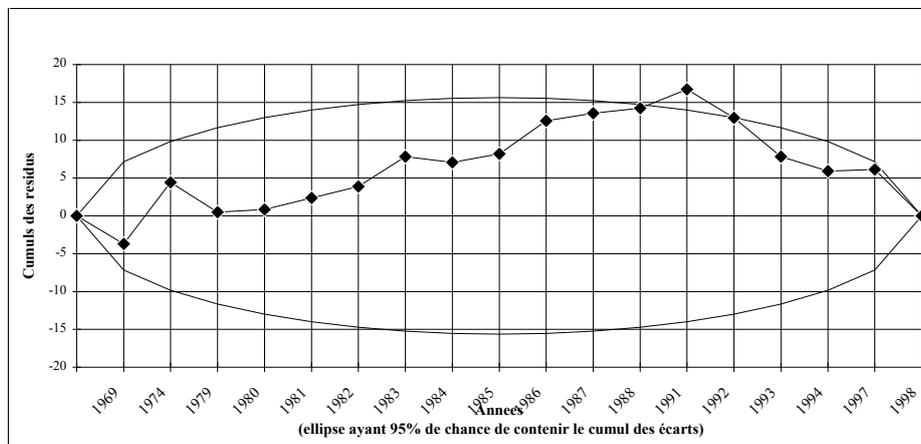


Fig.17 : Détection des anomalies systématiques de Khemissa par rapport à CIC2

Pour le poste de Mechroha, les valeurs des années 1976 et 1979 constituent des anomalies. L'année 1976 est sous-estimée alors que l'année 1979 est sur-estimée (fig.16).

L'année 1974 qui présente un écart important est sur-estimée pour le poste de Khemissa (en racines de dixièmes de mm 69 au lieu de 61.05 selon le modèle) et l'année 1991 sort de l'ellipse représentant l'intervalle de 95% (fig. 17).

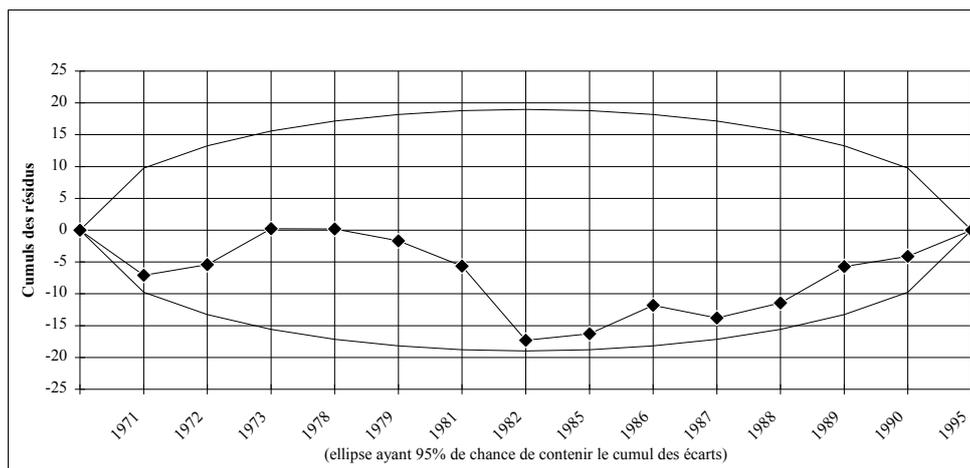


Fig.18 : Détection des anomalies systématiques de Kerma par rapport à CIC2

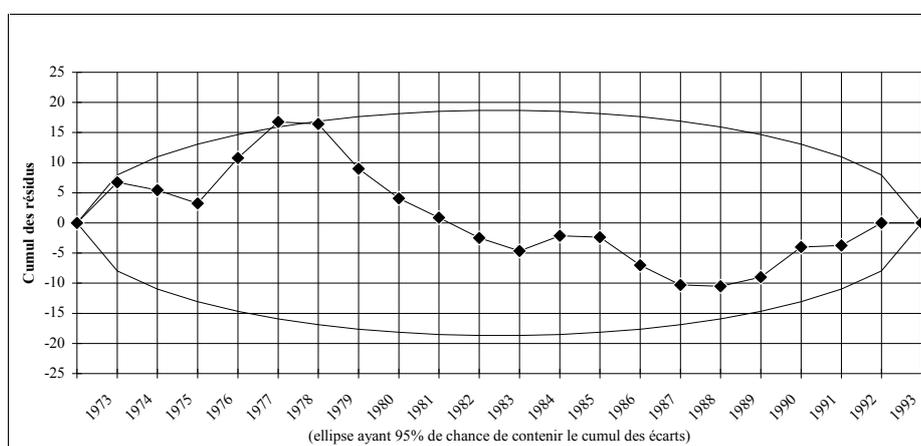


Fig. 19 : Détection des anomalies systématiques de Dréan par rapport à CIC2

Le graphe du poste de Kerma contient une anomalie ponctuelle: l'année 1982 est sous-estimée (57.61 au lieu de 69.63) (fig .18).

La pluie de l'année 1977 pour le poste de Dréan sort de l'ellipse représentant l'intervalle de 95% (fig .19).

3.1.2.2. Les anomalies systématiques détectées

Les cumuls des résidus mettent en évidence les anomalies systématiques. Si on travaille avec IC de 95 %, on peut considérer que pour une suite d'années données, il y a 95 % de chance pour que l'écart à la droite soit compris entre :

$$-1.96 \dagger v < E(i) < +1.96 \dagger v .$$

$\dagger v$: Écart-type des écarts

CE (i): Cumul des i premiers écarts.

Les cas d'anomalies systématiques ont été détectés pour les postes situés aussi bien en zone tellienne qu'en Hautes Plaines (Ain Babouche, Ain Makhlouf, Ksar Sbahi, Ouled Habeba, et Berrahal) (fig. 20 à 24). Pour le poste de Berrahal, les années 1969 et 1973 sortent de l'ellipse (fig. 24).

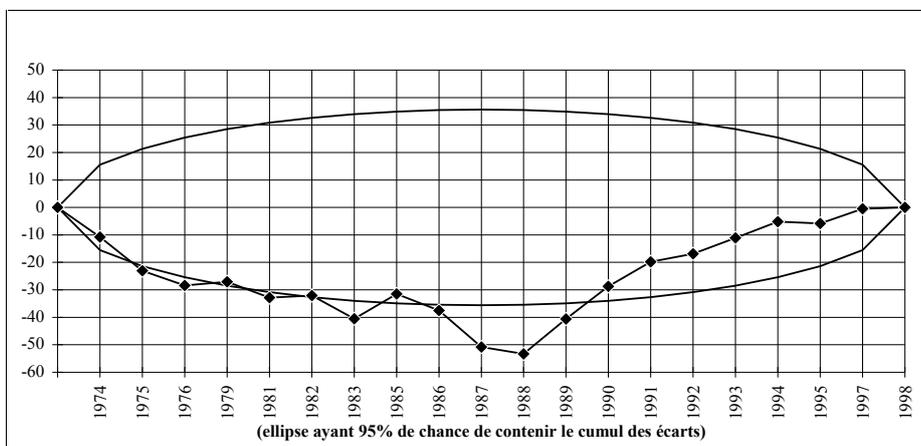


Fig.20 : Détection des anomalies systématiques d'Ain Babouche par rapport à CIC2

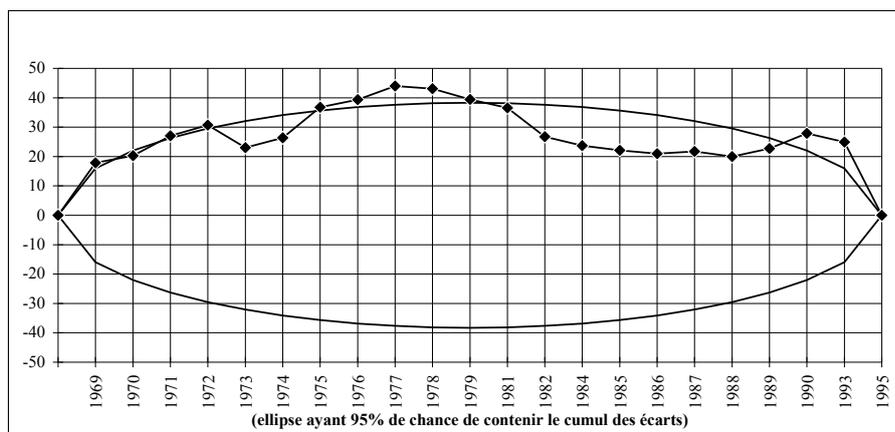


Fig.21 : Détection des anomalies systématiques d'Ain Makhlouf par rapport à CIC2

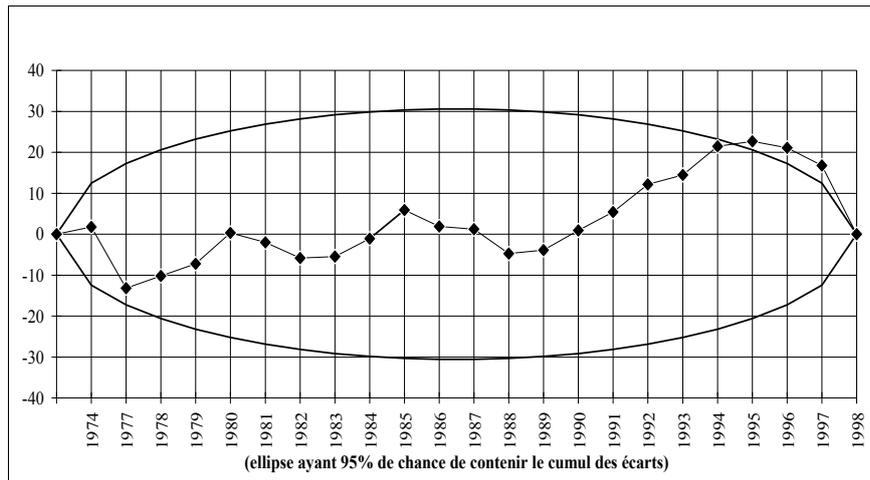


Fig.22 : Détection des anomalies systématiques de Ksar Sbahi par rapport à CIC2

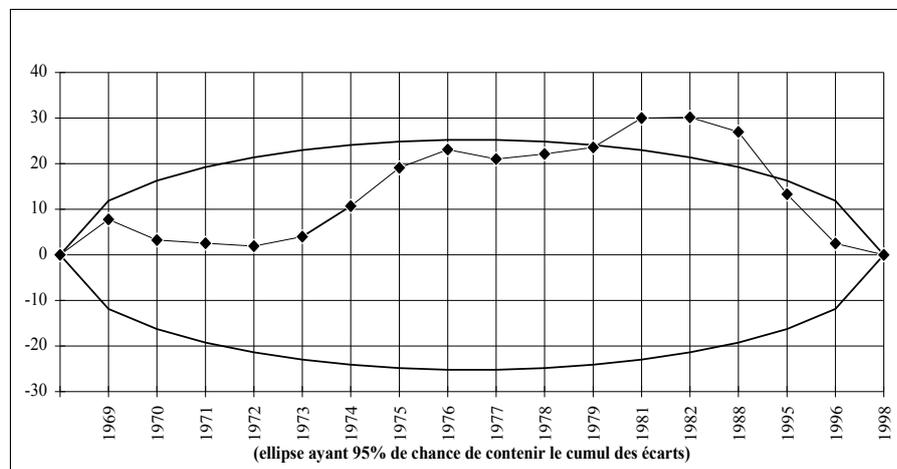


Fig.23 : Détection des anomalies systématiques de Ouled Habeba (Bou Snib) par rapport à CIC2

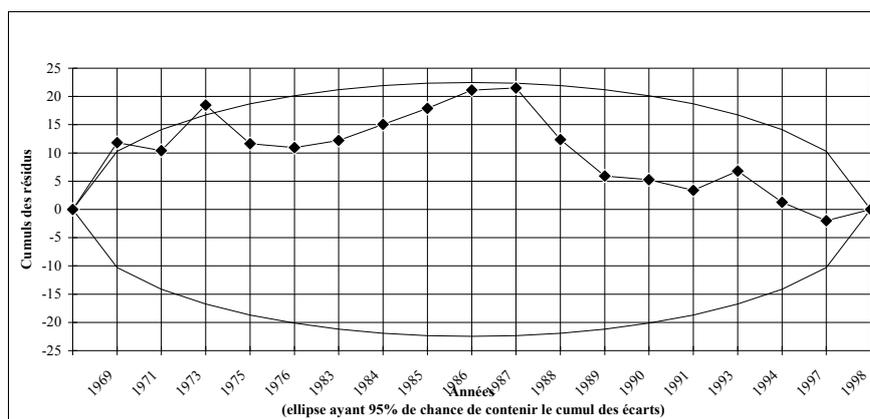


Fig.24 : Détection des anomalies systématiques de Berrahal par rapport à CIC2

Globalement, pour les 12 postes pluviométriques étudiés, on a pu mettre en valeur des cas d'anomalies accidentelles et des cas d'anomalies systématiques. Les erreurs représentent 4.92 % de l'information globale; pour les 12 postes lacunaires, ce pourcentage est de 8.61 %. Nous avons préféré garder les données sans procéder à des corrections dans la mesure où le travail concerne la moyenne interannuelle sur 30 ans (1969/1998). Cependant, pour procéder à des corrections, il est souhaitable de revenir aux originaux.

3.2. Régression double et comblement des lacunes

Les années lacunaires pour les 12 postes pluviométriques seront reconstituées à l'aide des modèles de régressions linéaires multiples avec des vecteurs régionaux issus de l'Analyse en Composante Principale (A.C.P.). Dans le cas présent, l'utilisation d'une régression double s'est avérée suffisante car deux composantes principales suffisent à caractériser la structure spatiale des pluies en expliquant 75 % de la variance.

Pour reconstituer les données manquantes, nous effectuons les régressions linéaires multiples entre les séries pluviométriques contenant des lacunes et les projections des observations sur les 2 composantes retenues. L'exemple de Hammam N'Bails servira à illustrer les étapes suivies pour le comblement des observations manquantes. Auparavant, il faut présenter la méthode de la régression double.

Le principe de la régression double est d'expliquer une variable z à partir de deux variables x et y.

La relation est linéaire du type : $z = a x + b y + c + \varepsilon$

z : variable dépendante

x : variable indépendante une

y : variable indépendante deux

a, b, et c : paramètres de la régression double .

ε : résidu de régression.

Les paramètres a, b et c sont déterminés de façon à minimiser la somme des carrés des écarts ε : $\varepsilon_i^2 = (z_i - a x_i - b y_i - c)^2$

3.2.1. Les formules pour la régression double

Les paramètres a, b et c sont exprimés en fonction des moyennes et écarts -types de z, x et y et des coefficients de corrélation totaux entre x et y (ρ), z et x (r_1) et z et y (r_2).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2}{n-1}}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2}{n-1}}$$

$$\bar{z} = \sum_{i=1}^n z_i, \quad \dagger z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n z_i^2 - n\bar{z}^2}{n-1}}$$

$$\dots_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{(n-1)s_x s_y}$$

$$\dots_{XZ} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i z_i - n\bar{x}\bar{z}}{(n-1)s_x s_z}$$

$$\dots_{YZ} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i z_i - n\bar{y}\bar{z}}{(n-1)s_y s_z}$$

$$a = \frac{r_1 - r_2 \dots}{1 - \dots^2} \frac{\dagger z}{\dagger x}, \quad b = \frac{r_2 - r_1 \dots}{1 - \dots^2} \frac{\dagger z}{\dagger y}, \quad c = z - a\bar{x} - b\bar{y}$$

On calcule également le coefficient de corrélation multiple qui exprime la dispersion des résidus ε_i , et les coefficients de corrélation partielles $r_{z, x/y}$ et $r_{z, y/x}$.

On donne ici la formule du coefficient de détermination multiple dont la racine carrée est le coefficient de corrélation multiple.

$$R^2 = \frac{R1^2 + R2^2 + 2\dots \times R1 \times R2}{1 - \dots^2}$$

Les coefficients de corrélation partielle entre z et x et entre z et y.

$$r^2_{zx/y} = \frac{R^2 - r2^2}{1 - r2^2}$$

$$r^2_{zy/x} = \frac{R^2 - r1^2}{1 - r1^2}$$

3.2.2. Signification des coefficients de corrélations totale, multiple et partiels

Les coefficients de corrélation totale r_1 (entre z et x) et r_2 (entre z et y) n'expriment pas le degré de liaison entre une variable expliquée (z) avec 2 variables

explicatives (x et y). En effet, pour r_1 (entre z et x) on ne tient pas compte de y, et pour r_2 (entre z et y) on ne tient pas compte de x.

La notion de coefficient de corrélation partielle a été introduite. Le principe en est de mesurer le coefficient de corrélation partielle entre x et z corrigé des variations de y, et le coefficient de corrélation partielle entre y et z corrigé des variations de x.

$R_{xz|y}$ est le coefficient de corrélation partielle entre x et z corrigé des variations de y, et

$r_{yz|x}$ est le coefficient de corrélation partielle entre y et z corrigé des variations de x.

Le coefficient de corrélations multiple R mesurera la dispersion des ε_i :

$\varepsilon_i = z \text{ mesuré} - z \text{ estimé}$

$\varepsilon_i = z_i - ax_i - by_i - c$; ε : écarts

3.2.3. Exemple d'application de la régression double au comblement des lacunes annuelles, la station de Hammam N'Bails

3.2.3.1. Etapes de calcul

Sur la période pluviométrique de 30 années, on dispose de 14 années observées, les 16 autres années contiennent des lacunes sur 1 ou plusieurs mois. On aura de ce fait 16 valeurs de pluies annuelles à estimer.

En utilisant les données de 14 années et les valeurs correspondantes des composantes principales C1 et C2, on calcule une régression double. Les étapes et les résultats des calculs sont reportés ci-dessous. Il faut toujours vérifier si les différents coefficients de corrélation calculés sont significatifs.

Les tableaux suivants (tabl. 6 à 9) détaillent les étapes de calcul pour le poste de Hammam N'Bails (n=14).

Tableau 6 : Détails de la régression double pluies annuelles à Hammam N'Bails avec C1C2

	Années	Hammam N'Bails	C1	C2
1	1969	79.66	0.57	1.48
2	1971	85.17	0.96	0.30
3	1972	95.86	1.43	1.316
4	1976	86.94	0.68	0.74
5	1977	78.52	-0.59	0.26
6	1979	64.58	-0.67	0.93
7	1986	100.21	1.30	-2.35
8	1987	69.06	-1.38	-0.13
9	1988	76.35	-0.70	-0.38
10	1989	80.25	-0.88	0.44
11	1990	93.86	0.60	-0.38
12	1993	68.067	-1.18	-1.178
13	1996	63.69	-1.93	0.338
14	1997	91.42	1.30	0.328

Tableau 7: Moyennes et écarts-types des 3 variables (z, x, et y)

	z	x	y
Moyenne	80,98	-0,034	0,108
Ecart-type	11,85	1,132	0,986

Avec z = Hammam N'Bails; x= C1 et y =C2.

Tableau 8: Coefficients de corrélation totale entre les 3 variables (z, x, et y)

	z	x	y	
Coefficients de corrélation. totale	1,000	0,896	-0,172	z
	0,896	1,000	0,052	x
	-0,172	0,052	1,000	y

Tableau 9: Coefficients de corrélation partielles et coefficient de corrélation multiple R

Paramètre	Valeur
Nombre d'observations : n=	14
Coefficient de corrélation partielle : rz, x/y =	0,908
Coefficient de corrélation partielle : rz, y/x =	-0,220
Coefficient de corrélation multiple : R=	0,923

La relation s'exprime par : $Z = ax + by + c$; ceci se traduit par : Pluies à Hammam N'Bails $= aC1 + bC2 + c$

L'application numérique donne :

Pluies à Hammam N'Bails $= 9.50 * C1 - 2.64 * C2 + 81.59$ avec une erreur-type sur l'estimation $= 4.57$

L'erreur-type sur l'estimation exprime l'écart-type des résidus de régression ou σ_{ϵ_i} que l'on peut également noter $\sigma_{Z_{XY}}$ et qui est calculé par $\sigma_{Z_{XY}} = \sigma_{\epsilon_i} = \sigma_z \sqrt{1 - R^2}$.

3.2.3.2. Signification des coefficients de corrélations totale, multiple et partiels

Le coefficient de corrélations partiel $r_{z, x/y} = 0,908$

Le coefficient de corrélations partiel $r_{z, y/x} = -0,220$; Il correspond parfaitement aux valeurs de la seconde composante principale.

Le coefficient de détermination multiple et le coefficient de corrélation multiple ($R = 0,923$):

$$R^2 = \frac{R1^2 + R2^2 + 2 \dots \times R1 \times R2}{1 - \dots^2}$$

- Le coefficient de corrélation multiple ($R= 0,923$): pour que le coefficient de corrélation multiple soit significativement différent de zéro au seuil de 5 %, la valeur expérimentale de F doit être supérieure à la valeur théorique de F ayant moins de 5% de chance d'être dépassée du seul fait du hasard. La valeur de F expérimental est:

$$F_{\text{exp}} = \left(\frac{n-k-1}{k}\right) \times \left(\frac{R^2}{1-R^2}\right) = (14-2-1)/(2) * (0.85/1-0.85) = 31.17$$

La loi de Fisher Snédecor à $v_1=k=2$ et $v_2=n-k-1 =11$ degrés de liberté indique qu'il y a moins de 5% de chance pour que la valeur expérimentale de F dépasse 3.98 du seul fait du hasard.

On en conclut que le coefficient de corrélation multiple est significativement différent de zéro au seuil de 5%.

Pour que cette estimation ait un sens, il faut que les coefficients de corrélation partiels soient significatifs.

Pour tester les coefficients de corrélation partielle $r_{z, x/y}$ (0.908) et $r_{z, y/x}$ (-0.220), on utilise les tables de Student comme pour les coefficients de corrélation totale. Pour un nombre de degrés de liberté $n=n-k=14-2-1=11$, il y a moins de 5% de chance de rencontrer du seul fait du hasard un coefficient de corrélation partielle supérieur à 0.555 en valeur absolue.

Le coefficient de corrélation partielle $r_{z, x/y}$ (0.908) est donc significativement différent de zéro au seuil de 5 % et aux seuils de 1% (0.63) et 2% (0.72) alors que $r_{z, y/x}$ (-0.220) ne l'est pas. Cependant, la valeur de $r_{z, y/x}$ correspond à la structure spatiale mise en évidence lors du calcul des vecteurs régionaux (A.N.R.H., 1993).

Pour vérifier l'homoscédasticité des résidus, on présente le graphe valeurs mesurées –valeurs estimées par régression double (fig.25).

Pluies mesurées et pluies estimées à Hammam N'Bails

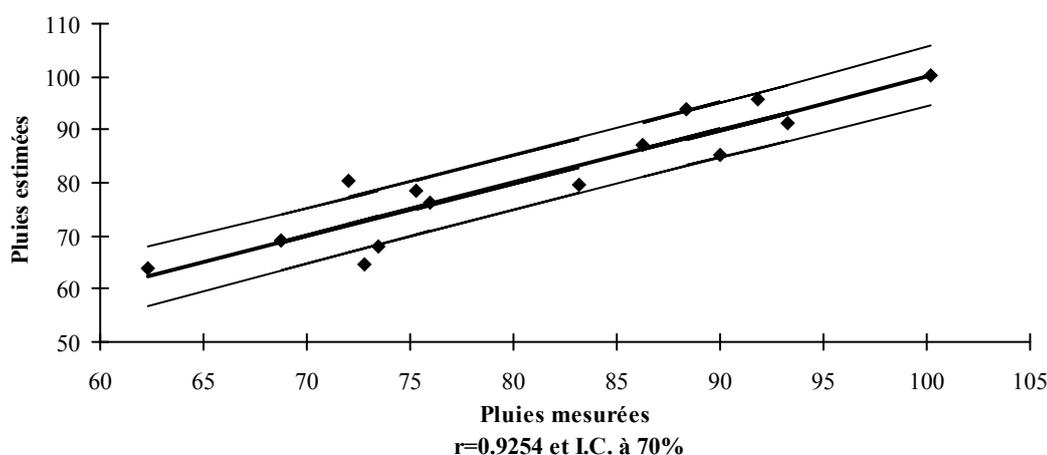


Fig. 25 : Pluies mesurées et pluies estimées par régression double à Hammam N'Bails

3.3. Confiance à accorder aux séries étendues

Dans les travaux concernant le comblement des lacunes des données pluviométriques annuelles, on considère qu'on ne peut pas accorder la même confiance à une série reconstituée qu'à une série observée. Bernier et Veron (Laborde, 1993 et 2000), ont proposé une formule qui permet d'estimer la période à laquelle on peut attribuer une confiance équivalente à celle de la période observée :

$n' = k/E$ avec :

n' = période fictive; n = période longue; k = période commune aux variables; $n-k$ = période reconstituée.

E : Efficacité de la régression calculée par la relation :

$E = 1 + [1 - k/n] * [(1 - (k-2) * r^2) / (k-3)]$; ici $n=30$; k = période commune aux variables à chaque régression ($k < n$). On a $n' = k/E$.

Le paramètre n' porte une double signification ; il englobe à la fois la fiabilité due à la période réelle d'observation et à la qualité de la régression double avec les vecteurs régionaux.

La valeur de n' la plus faible est de 22 ans (Bou Snib et El Hadjar). On pourra de ce fait utiliser les 12 postes pluviométriques dont les séries ont été comblées.

Le tableau 10 récapitule tous les résultats liés au comblement des lacunes (Coefficient de corrélation r , période fictive n' , erreur-type, variance expliquée et variance résiduelle).

Tableau 10: Récapitulatif des résultats du comblement des lacunes.
(r, période fictive n', erreur-type, variance résiduelle).

Postes pluviométriques	Période observée k	Coefficient de corrélation r	Erreur-type	Période fictive n'	Variance résiduelle
Ain Babouche	20	0.648	7.91	23	58,0
Mechtat Cheikh Rabah	14	0.931	3.82	26	13,3
Ksar Sbahi	23	0.738	6.36	26	45,5
Ain Makhlouf	22	0.659	8.2	25	56,6
Khemissa	18	0.888	3.65	26	21,1
Bou Snib	17	0.752	6.08	22	43,4
Hammam N'bails	14	0.923	4.57	25	14,4
Mechroha	23	0.851	8.99	28	27,6
Dréan	20	0.883	4.17	27	22,0
El Kerma	14	0.882	4.98	23	22,2
El Hadjar	14	0.844	4.46	22	28,8
Berrahal	18	0.795	5.25	24	36,8

Formules et explications de Calcul :

-période fictive (n');

-variance expliquée = r^2 ;

-variance résiduelle = $(1-r^2)$

Pour que le coefficient de corrélation multiple soit significativement différent de zéro au seuil de 5 %, la valeur expérimentale de F doit être supérieure à la valeur théorique de F ayant moins de 5% de chance d'être dépassée du seul fait du hasard. La

valeur de F expérimental est: $F_{\text{exp}} = \left(\frac{n-k-1}{k}\right) \times \left(\frac{R^2}{1-R^2}\right)$

On testera les trois coefficients de corrélation multiples les plus faibles (Ain Babouche, $r = 0.648$ pour $n=20$; Ksar Sbahi, $r = 0.738$ pour $n=23$; Ain Makhlouf, $r = 0.659$ pour $n=22$) (tabl.11).

Tableau 11 : Valeur expérimentale de F et valeur théorique de F pour trois postes pluviométriques

Postes pluviométriques	valeur expérimentale de F	valeur théorique de F ayant moins de 5% de chance d'être dépassée du seul fait du hasard
Ain Babouche, $r = 0.648$ pour $n=20$	6.12	3.63
Ksar Sbahi, $r = 0.738$ pour $n=23$;	11.978	3.49
Ain Makhlouf, $r = 0.659$ pour $n=22$	7.28	3.52

Les trois coefficients de corrélation multiple sont significatifs au seuil de 5 %.

3.4. Incertitude sur l'estimation de la moyenne

Très souvent les valeurs moyennes estimées sont entachées d'une certaine incertitude due à la taille de l'échantillon. On quantifie cette incertitude en calculant les erreurs-types sur l'estimation de la moyenne. L'écart à la moyenne vraie inconnue (m) est lié à une distribution de Student à v degré de liberté ($v = n'-1$) par la relation :

$$t = \frac{m - \bar{P}}{\dagger P \sqrt{n'-1}}$$

Comme n'est compris entre 23 et 27, il y a 70 % de chance pour que t soit inférieur ou égal à 1.06 en valeur absolue (t de Student = 1.061). La véritable moyenne se situera donc entre les limites suivantes:

$$\bar{P} - \frac{1.061 * \dagger P}{\sqrt{n'-1}} < m > \bar{P} + \frac{1.061 * \dagger P}{\sqrt{n'-1}}$$

L'incertitude à 70 % sur l'estimation de la moyenne s'exprime en % par la formule suivante:

$$v\% = \frac{1.061 * \dagger P}{\bar{P} \sqrt{n'-1}} * 100$$

Tableau 12: Incertitude à 70 % sur l'estimation de la moyenne

Stations	n '	Incertainude à 70 % sur l'estimation de la moyenne (en %)
Ain Babouche	23	8,84
Mechtat Cheikh Rabah	26	7,36
Khemissa	26	5,59
Ksar Sbahi	26	6,17
Ain Makhoulf	25	5,90
Bou Snib	22	4,37
Mechroha	25	6,93
Hammam N Bails	28	5,08
Kerma	27	5,03
El Hadjar	23	5,20
Berrahal	22	4,46
Drean	27	4,22

Pour les 12 postes, la valeur la plus forte est 8.84% (20.34 mm) pour la station d'Ain Babouche. En valeur absolue, l'incertainude la plus forte est celle de la station de Mechroha (60.08 mm), ce qui représente 6.93 %. Mais pour la majorité des postes pluviométriques (8/12), l'incertainude est inférieure à 6 % (tabl.12).

A l'issue de ce premier travail, après avoir reconstitué les données manquantes, nous disposons maintenant d'une base de données complète à l'échelle annuelle, pour une période de 30 années pour la période septembre 1969/août 1999 et pour 21 postes pluviométriques.

A partir de ces séries complétées nous pouvons estimer les précipitations annuelles moyennes, et les pluies fréquentielles quinquennales sèches et humides,

décennales sèches et humides, vingtennales, centennales et millénales ainsi que les intervalles de confiance sur ces estimations.

4. ESTIMATION FREQUENTIELLE DES PLUIES ANNUELLES

L'information pluviométrique est complétée par l'estimation des hauteurs de pluies dépassées plus fréquemment ou plus rarement. Il est d'usage d'estimer les hauteurs de pluies de fréquence 0.1, 0.2, 0.8 et 0.9. Ces fréquences correspondent aux hauteurs dépassées en moyenne 9 années sur dix (pluie décennale sèche), 8 années sur 10 (pluie quinquennale sèche), 2 années sur dix (pluie quinquennale humide) et une année sur 10 (pluie décennale humide). Dans cette étude, on a également estimé les pluies de fréquence vingtennale, cinquantennale, centennale et millénales.

4.1. Le modèle gaussio-arithmétique appliqué aux séries pluviométriques annuelles

Le modèle de distribution normale est bien adapté à la statistique des précipitations annuelles. Ainsi, connaissant la moyenne et l'écart-type de ces hauteurs pluviométriques nous pouvons déterminer les précipitations annuelles pour différentes fréquences au non-dépassement (année humide et année sèche) en appliquant l'équation de la variable réduite de Gauss:

$$U_F = \frac{P_F - \bar{P}}{\sigma_P} \quad \text{d'où} \quad P_F = \bar{P} + U_F * \sigma_P$$

avec :

U_F : variable réduite de Gauss de probabilité F , recherchée dans la table de Gauss ;

P_F : précipitations fréquentielles correspondantes à la probabilité F en mm ;

\bar{P} : moyenne des précipitations annuelles en mm ;

σ_P : écart-type des précipitations annuelles en mm.

Les valeurs des fréquences, des variables réduites de Gauss correspondant aux périodes de retour retenues (5, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans) sont présentées dans le tableau suivant (tabl.13).

Tableau 13 : Valeurs de U de Gauss, fréquences et périodes de retour

	Année humide		Année sèche	
Quantile annuel	F	U	F	U
Pluie moyenne	0.50	0.000	0.50	0.000
Pluie quinquennale	0.8	0.8414	0.2	-0.8414
Pluie décennale	0.9	1.282	0.1	-1.282
Pluie vingtennale	0.95	1.645	0.05	-1.645
Pluie cinquantennale	0.98	2.054	0.02	-2.054
Pluie centennale	0.99	2.33	0.01	-2.33
Pluie millénales	0.999	3,09	0.001	-3.09

4.2. Les résultats obtenus

On a également calculé, pour chacun des 21 postes pluviométriques étudiés, les régressions reliant les pluies fréquentielles aux variables réduites de Gauss (tabl.14).

Tableau 14 : Régression pluies fréquentielles avec la variable réduite de Gauss U

Coefficient de détermination R^2	Régression Pluies fréquentielles avec la variable réduite de Gauss U	Poste pluviométrique
1	$Pf = 102,4 * U_f + 401,95$	Ain Beida
0,9968	$Pf = 114,92 * U_f + 315,7$	Aioun Settara
0,8345	$Pf = 150,19 * U_f + 100,33$	Ain Babouche
0,9993	$Pf = 100,33 * U_f + 294,62$	Mechtat Cheikh Rabah
1	$Pf = 105,14 * U_f + 361,38$	Ksar Sbahi
1	$Pf = 141,08 * U_f + 517,79$	Ain Makhoulf
1	$Pf = 116,21 * U_f + 441,41$	Khemissa
1	$Pf = 122,13 * U_f + 533,07$	Constantine
1	$Pf = 124,78 * U_f + 661,68$	Bou Snib
1	$Pf = 129,52 * U_f + 518,82$	Bordj SabatH
1	$Pf = 132,56 * U_f + 528,4$	Guelma
1	$Pf = 185,25 * U_f + 684,98$	Bouati Mahmoud
1	$Pf = 147,66 * U_f + 535,9$	Boucheouf
1	$Pf = 277,42 * U_f + 866,$	Mechroha
1	$Pf = 168,34 * U_f + 676,84$	Hammam N'Bails
1	$Pf = 161,88 * U_f + 645,53$	Annaba
1	$Pf = 133,52 * U_f + 552,5$	Kerma
1	$Pf = 144,23 * U_f + 627,87$	El Hadjar
1	$Pf = 127,5 * U_f + 661,86$	Berrahal
1	$Pf = 136,32 * U_f + 606,96$	Ain Berda
1	$Pf = 129,05 * U_f + 635,99$	Drean

Avec Pf :Pluies fréquentielles en mm; U_f : Variable réduite de Gauss.

Pour les postes d'Aioun Settara, Ain Babouche, Mechtat Cheikh Rabah (Hautes Plaines), les quantiles correspondant à la pluie millénale sèche présentent une valeur négative, les valeurs ont été censurées à zéro. De ce fait, les coefficients de détermination sont inférieurs à 1.

La faiblesse des valeurs correspondant aux années sèches sont bien mises en évidence (cf. tabl. 15 pour la station de Hammam N'Bails et carte des pluies fréquentielles décennales sèches, au chapitre 2).

Pour s'assurer de la bonne qualité de l'estimation et aussi pour quantifier l'incertitude commise sur celle-ci, il est possible d'évaluer l'intervalle de confiance à α %

sur le quantile P_F estimé. Cet intervalle désigne une zone de valeurs à l'intérieur de laquelle la valeur P_F a une certaine probabilité de se trouver. Pour l'intervalle de confiance à α % sur le quantile P_F les bornes sont évaluées par (Laborde, 2000):

$$P_F \pm \frac{t_r}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{t_F^2}{2} \pm \frac{t_F t_r^2}{2n}} * \dagger$$

$$1 - \frac{t_r^2}{2n}$$

(2 fois plus pour la borne supérieure et 2 fois moins pour la borne inférieure)

t_F : variable réduite de Gauss ayant la fréquence au non-dépassement F

t_α : variable réduite de Gauss ayant la fréquence au non-dépassement $1 - \frac{1-\alpha}{2}$.

On calcule également l'erreur sur l'estimation des intervalles de confiance. A titre d'exemple, on donnera les détails pour la station de Hammam N'Bails (tabl. 15).

Tableau 15: Détails des calculs des fréquences de pluies pour la station de Hammam N'Bails

Fréquence	U Gauss	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure	Erreur sur l'estimation de Ic	% par rapport au quantile estimé
0.001	-3.091	156.6	44.6	239.3	124.6	79.6
0.01						
	-2,327	285,1	196,1	352,1	99,8	35,0
0.02	-2,054	331,0	249,9	392,7	91,4	27,6
0.05	-1,645	399,9	329,9	454,2	79,5	19,9
0.1	-1,282	461,1	400,3	509,7	70,0	15,2
0.2	-0,841	535,2	484,1	578,3	60,3	11,3
0.5	0,000	676,8	636,3	717,3	51,8	7,7
0.8	0,841	818,5	775,3	869,6	60,3	7,4
0.9	1,282	892,6	844,0	953,3	70,0	7,8
0.95	1,645	953,8	899,5	1023,7	79,5	8,3
0.98	2,054	1022,6	961,0	1103,8	91,4	8,9
0.99	2,327	1068,5	1001,6	1157,5	99,8	9,3
0.999	3,091	1197,1	1114,4	1309,1	124,6	10,4

Moyenne : 676,8 mm;

Ecart-type : 168,3 mm.

Pour calculer la pluie décennale humide par exemple, nous appliquons la formule suivante :

$$P_{0,9} = 676.8 + 168.3 * 1,2817 = 892,6 \text{ mm}$$

Cette estimation à un intervalle de confiance de 80% est comprise entre

$$844,0 \text{ mm} < 892,6 \text{ mm} > 953,3 \text{ mm}$$

Les erreurs d'estimation sur les quantiles sont calculées par :

$$\frac{\text{borne sup} - \text{borne inf}}{2 * t_r}$$

L'application de cette formule pour les pluies décennales humides de la station de Hammam N'Bails donne l'erreur d'estimation sur cette estimation, celle -ci est de l'ordre de 70.0mm. Elle représente 7.8 % de la valeur estimée.

CONCLUSION DU CHAPITRE 1

L'analyse statistique des séries pluviométriques de base de la Seybouse a été réalisée sur 21 postes pluviométriques de l'A.N.R.H. et de l'O.N.M.

L'étude d'homogénéisation est basée sur l'utilisation des A.C.P., des vecteurs régionaux et des régressions multiples. Auparavant, la fiabilité des séries pluviométriques a été testée grâce à la méthode des cumuls des résidus de régressions. L'homogénéisation des séries pluviométriques a été validée grâce au calcul de la période fictive n'.

L'information pluviométrique a été complétée par l'estimation des hauteurs de pluies dépassées plus fréquemment ou plus rarement.

Les précipitations moyennes annuelles s'échelonnent entre 230 mm à Ain Babouche dans les Hautes Plaines et 867 mm à Mechroha. Pour les pluies décennales humides, les valeurs varient entre 345 et 1222 mm; les pluies décennales sèches oscillent entre 115 et 511mm respectivement pour les mêmes stations.

Les pluies moyennes (1969/1998) et (1971/1987) ainsi que les pluies fréquentielles décennales humides et sèches estimées se prêtent à une cartographie automatique abordée dans le chapitre deux (2).

Chapitre 2 : Cartographie automatique des pluies moyennes interannuelles et fréquentielles du bassin de la Seybouse

INTRODUCTION

Les méthodes de critique des données et de comblement des lacunes pluviométriques annuelles ont permis l'accès à une information dont la fiabilité a été vérifiée par rapport aux deux premières composantes principales et sans lacunes pour la période septembre 1969 à août 1999 (30 années hydrologiques).

Cette information reste cependant limitée aux emplacements des postes pluviométriques (9 postes de référence et 12 postes homogénéisés).

La cartographie de la pluviométrie moyenne interannuelle permet le passage de l'information ponctuelle à une information couvrant tout l'espace du bassin versant. Il sera possible dans une seconde phase de calculer la pluie moyenne entrant dans les bilans hydrologiques (17 années hydrologiques, de septembre 1971 à août 1988).

L'élaboration des cartes pluviométriques intègre à la fois les techniques de cartographie proprement dites et les méthodes d'interpolation. Les difficultés résident beaucoup plus dans les techniques d'interpolation qui se distinguent par la multitude des méthodes citées dans la littérature spécialisée (triangulation, inverse de la distance au carré, etc....).

Le krigeage, l'interpolation optimale de Gandin et les splines (minimum courbure) constituent les méthodes d'interpolation les plus élaborées.

1. ETAT DE L'ART ET RAPPELS THEORIQUES

Après un rappel théorique sur le krigeage, les étapes de l'élaboration des cartes pluviométriques interannuelles (septembre 1969 / août 1999 et septembre 1971 / août 1988) et celles des pluies fréquentielles (pluies décennales humide et sèche) seront détaillées. La réalisation de la carte pluviométrique se fera en trois étapes principales: régression morphométrie – pluviométrie, interpolation des résidus de régression et cartographie de la pluie interannuelle.

1.1. Historique

La cartographie des caractéristiques statistiques des paramètres climatiques tels que les précipitations, les températures et l'évapotranspiration en utilisant des données issues d'un réseau de mesure est une technique récente. Ce type de cartes ne peut être réalisé que si la variable étudiée fait l'objet d'une interpolation en tout point de l'espace étudié.

Avant 1993 et la réalisation de la carte dite « A.N.R.H. », les cartes pluviométriques utilisées en Algérie étaient au nombre de trois:

- la carte pluviométrique de Seltzer (1946), établie à l'échelle du 1/1000 000, représentant les moyennes de 25 années climatiques, de septembre 1913 à août 1938;
- la carte au 1/500 000 de Gausson (1948) qui couvre la période 1913-1947;
- la carte au 1/500 000 de Chaumont et Paquin (1971) représentant les précipitations annuelles moyennes pour la période de 50 ans (1913-1963).

Selon Mébarki (2005), ces travaux de cartographie des précipitations en Algérie se basaient sur l'interpolation manuelle du contour des isohyètes, à partir des données mesurées aux stations, en s'appuyant sur un fond hypsométrique. Ces documents de référence restent très utiles pour les périodes anciennes qui ont été cartographiées.

La carte A.N.R.H., de 1993 avec les moyens de calcul, les outils utilisés et l'appui scientifique de Laborde, a permis de traiter des quantités considérables de données. Sa réalisation a été l'occasion de critiquer les données grâce à la méthode des cumuls de résidus de régressions, et de combler les lacunes d'observation grâce à la méthode de "Bouche trous" et des vecteurs régionaux.

La réalisation de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord, représentant les moyennes de 60 ans (du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989), à l'échelle du 1/500 000 (2 coupures), a ouvert la voie à la réalisation d'autres cartes concernant les pluies année par année (Touazi, 2000) et les pluies mensuelles (Assaba, 2004). Les pluies journalières maximales avaient auparavant fait l'objet de travaux dans la région algéroise (Aissani et Laborde, 1983), et Mouhous (1997) a réalisé la carte des pluies journalières maximales pour l'ensemble du territoire algérien.

Dans le cadre des recherches universitaires, citons entre autres les travaux de cartographie des pluies de: Anser (1998). Les travaux universitaires utilisant la géostatistique ont concerné notamment Mébarki (2005), Touaibia et al (2006), Medjereb (2005), Meddi (2007) et enfin Louamri (2008 et 2010).

Si on voulait retracer l'historique de la cartographie automatique des pluies, c'est Laborde (1982), en France, qui fut parmi les premiers à réaliser une cartographie des paramètres statistiques des précipitations en tenant compte de toute l'information disponible et notamment celle issue de la topographie.

Par la suite, la méthode AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdro-météorologie) créée à Météo France par Benichou et Lebreton (1987) a permis de définir les paysages influençant les champs pluviométriques.

De nombreux autres chercheurs ont continué à utiliser cette démarche (régression sur paramètres de relief et interpolation automatique des résidus) en cherchant à l'améliorer. Pour l'Algérie, on notera les travaux de Touazi (2000), Assaba (2004) et Mebarki (2005). Pour la région des Alpes (France et Italie), il faut citer les travaux de Kieffer Weiss (1998) et Djerboua (2001). Humbert et al (1998) ont proposé la méthode PLUVIA appliquée pour l'ouest algérien par Meddi, (2007).

1.2. Rappels des principaux concepts et définitions sur le krigeage

La géostatistique cherche à estimer les corrélations spatiales existant entre les données d'une variable. Ces corrélations sont modélisées par un outil probabiliste appelé le variogramme et la technique d'estimation est appelée le krigeage.

Le principe est d'estimer en tout point d'une grille régulière la valeur de la variable étudiée à partir des valeurs mesurées autour de ce point. Il est cependant indispensable d'étudier la structure spatiale de cette variable (Laborde, 2000).

1.2.1. Les variables régionalisées et le krigeage

Le terme krigeage est dû au géologue sud-africain Krige à la suite de ses travaux dans le domaine de l'exploitation minière dans les années 50. Krige a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution spatiale des teneurs en minerais à partir des données de forages. En France, dans les années 60, Matheron a formulé cette approche de Krige en utilisant les corrélations entre les forages pour en estimer la répartition spatiale et il l'a baptisée « Krigeage ».

Le krigeage est une méthode d'estimation basée sur la théorie des variables régionalisées (V.R.). Ces dernières désignent un phénomène se déployant dans l'espace (ou dans le temps) avec une certaine structure.

La théorie des variables régionalisées a pour but d'établir des bases théoriques permettant de rendre compte, sous une forme mathématique appropriée, des caractéristiques structurales des phénomènes naturels, et de fournir les moyens pratiques pour résoudre les différents problèmes d'estimation qui se posent à partir d'un échantillonnage fragmentaire.

La variable régionalisée (V.R.) $z(x)$ que l'on cherche à interpoler, peut être considérée comme une réalisation particulière de la fonction aléatoire (F.A.) $Z(x)$. Le krigeage consiste donc à estimer en tout point (exemple au point x_0) une valeur du champ par une combinaison linéaire des valeurs aux points d'observations voisins connus (x_1, x_2, \dots, x_n) tel que :

$$z^*(x_0) = z_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

z_0^* : une estimation de la valeur théorique inconnue au point x_0 ;

λ_i : poids affecté à la valeur de $z(x_i)$;

n : nombre total de points de mesures de la variable z (les observations).

L'objectif de cette méthode d'estimation est donc de trouver les poids λ_i pour les différents points de mesures en résolvant des systèmes d'équations qui dérivent des hypothèses faites sur le champ étudié.

Ainsi, disposant d'une seule réalisation de la F.A., il convient d'introduire quelques hypothèses supplémentaires sur la fonction aléatoire (F.A.) :

1.2.2. Hypothèses sur la fonction aléatoire (F.A.)

Trois hypothèses ont été énoncées sur la fonction aléatoire (F.A.).

- *Homogénéité et isotropie*

Une structure spatiale d'un phénomène est dite isotrope si la fonction de corrélation ne dépend pas des points d'application x_i et x_j mais de la norme du vecteur distance $h = \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|$. Elle est anisotrope si cette fonction dépend à la fois de la distance h et de la direction de vecteur distance $\vec{h} = \vec{x}_i - \vec{x}_j$.

La structure spatiale est dite homogène si la fonction de corrélation ne dépend pas des points \vec{x}_i et \vec{x}_j mais du seul vecteur distance $\vec{h} = \vec{x}_i - \vec{x}_j$.

- *Stationnarité d'ordre 2*

« Une fonction aléatoire est dite stationnaire si la loi de probabilité des valeurs prises par cette fonction en k points arbitraires est invariante par translation d'ensemble de ces points » (Delhomme, 1978).

Cette hypothèse d'homogénéisation spatiale permet de supposer que chaque réalisation particulière du phénomène suffit à rendre compte de l'ensemble des réalisations possibles.

Une fonction aléatoire est dite stationnaire d'ordre 2 lorsqu'il existe un variogramme et si la moyenne et la variance sont identiques en tout point de l'espace D :

-Espérance mathématique constante : $E[Z(x)] = m(x) = m$ (indépendante de x);

-Covariance entre deux points x et x' fonction uniquement du vecteur $x-x' = h$ (indépendamment des points d'appui).

$$C(x, x+h) = E[(Z(x) - m)(Z(x+h) - m)] = C(h)$$

- *Hypothèse intrinsèque*

Le krigeage dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque suppose que pour tout vecteur h , l'accroissement $(Z(x+h)-Z(x))$ a une espérance mathématique nulle et une variance indépendante du point x .

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0$$

$$\text{var}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h)$$

L'indépendance de la variance du point x est traduite par l'existence d'une fonction dite semi- variogramme $\gamma(h)$ ou simplement le variogramme.

1.2.3. La fonction de structure : le variogramme

Le variogramme est une fonction de structure utilisée pour quantifier la variabilité spatiale d'un phénomène. Il mesure l'écart quadratique moyen entre les valeurs prises en deux points x et $x+h$ distant de h .

Le variogramme d'une F.A. est défini par :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(x+h) - Z(x)]$$

$$\text{Où } \gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Z(x+h) - Z(x))^2]$$

Ainsi, $2\gamma(h)$ est l'accroissement quadratique moyen entre deux points distant de h . La fonction variogramme $\gamma(h)$ est estimée à partir des couples de points expérimentaux et sur l'ensemble des réalisations disponibles:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i+h) - z(x_i))^2$$

Où $z(x_i)$ est la valeur de z au point x_i ,
 x_i sont les points pour lesquels les données sont disponibles à la fois en x_i et x_i+h ,
 $N(h)$ est le nombre de couples de points distants de h .

Lorsque les points expérimentaux sont irrégulièrement répartis dans l'espace, on procède à des regroupements par classes de distance et d'angle pour le calcul des accroissements quadratiques moyens.

L'étude des comportements du variogramme dans les différentes directions permet d'avoir une idée sur l'isotropie ou non du phénomène étudié.

Un phénomène est dit isotrope s'il présente les mêmes propriétés dans toutes les directions. Dans le cas contraire, il est dit anisotrope.

1.2.4. Les variogrammes: comportements à l'origine et à l'infini

On peut classer les variogrammes (fig. 26) en deux catégories selon leurs comportements à l'origine et à l'infini.

*Comportement à l'origine: L'allure à l'origine traduit la continuité ou non de la variable régionalisée. Quatre types de comportement à l'origine se distinguent (fig.26 et 27), qui sont:

- *Parabolique* : il caractérise une variable extrêmement régulière;
- *Linéaire*: il caractérise une variable (phénomène spatial) continue moins régulière;

- *Discontinu ou à effet de pépite*: il caractérise une variable très irrégulière et qui peut être due soit à une micro-régionalisation d'échelle inférieure à l'espacement des données, soit à des erreurs de mesure. Mais il n'est pas toujours possible de discerner la part respective de ces causes.
- *Plat ou pépitique pur*: il correspond au cas aléatoire pur ou au cas d'absence totale de structure spatiale.

*comportement à l'infini: Selon le comportement du variogramme à l'infini on peut distinguer deux types :

- *Variogramme borné* : le variogramme se stabilise autour d'une valeur égale à la variance du champ appelée *Palier*. La distance à laquelle est atteint le palier est appelée *Portée*, au-delà de cette distance il n'y a pas de corrélation entre les points ;
- *Variogramme non borné*: lorsque $\gamma(h) \rightarrow \infty$ quand $h \rightarrow \infty$, signifie qu'il y a une présence de dérive. La moyenne du champ n'est pas constante dans l'espace, ce qui signifie que le phénomène ne peut pas être stationnaire d'ordre 2 et par conséquent l'application du krigeage simple (krigeage en covariance) est interdite. Par contre l'application du krigeage ordinaire est possible.

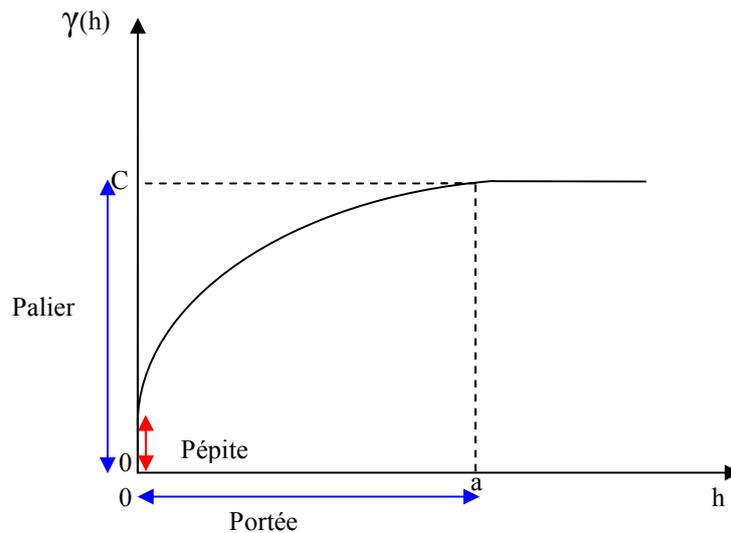


Fig. 26 : Eléments caractérisant un variogramme d'après Djerboua in Assaba (2004)

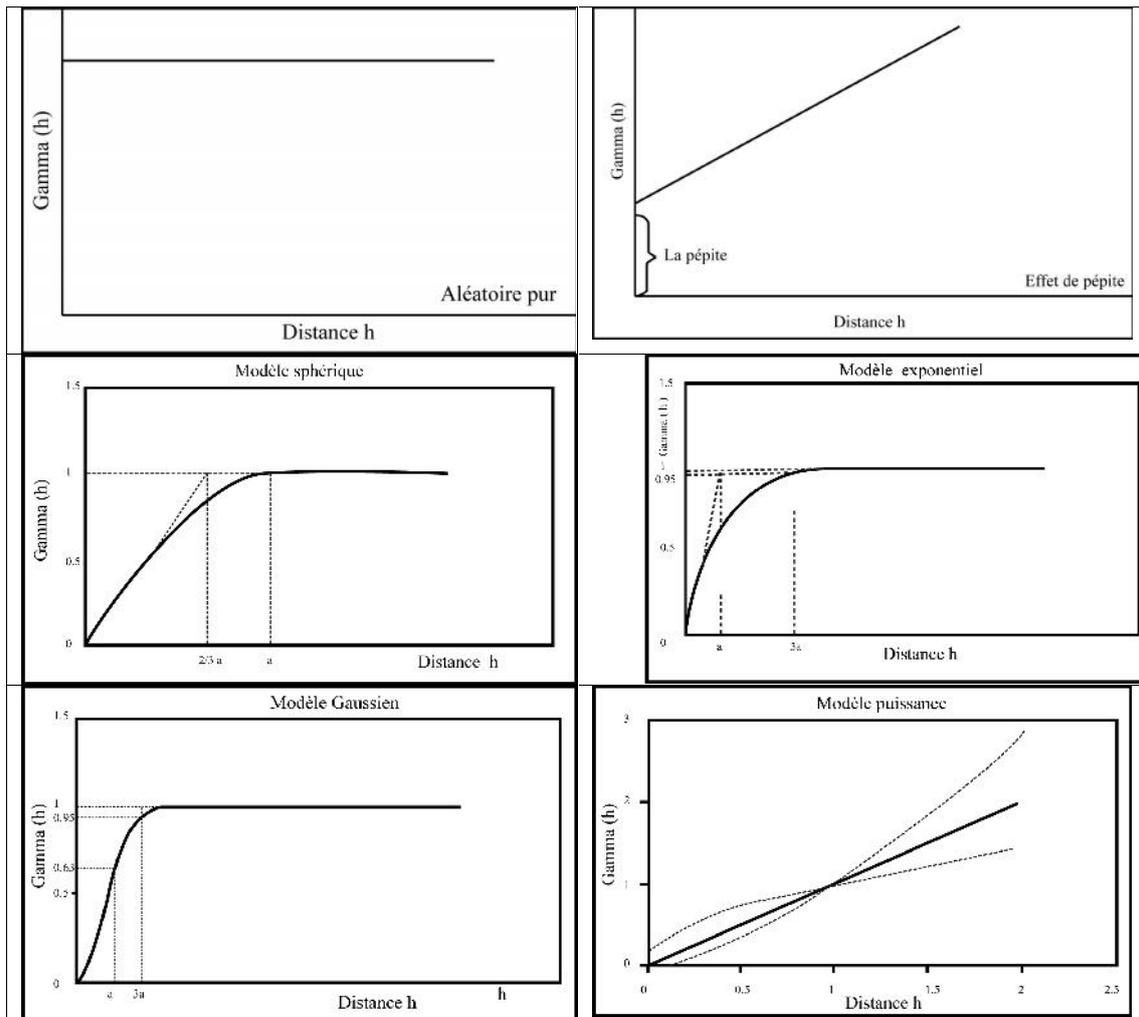


Fig.27: Comportements à l'origine et principaux types de variogrammes d'après Djerboua in Assaba (2004)

1.2.5. Les principaux modèles de variogrammes

Les principaux modèles de variogrammes utilisés en hydrologie sont : le modèle linéaire, sphérique, exponentiel et gaussien. Leurs expressions analytiques sont réalisées en fonction de la distance moyenne intra- classe (km), la portée théorique du phénomène (km), et le palier (mm²) (fig.26 et 27).

- le modèle linéaire: il correspond à un cas particulier du modèle puissance.

Le modèle puissance étant de la forme h^λ $0 < \lambda < 2$, le modèle est linéaire pour $\lambda = 1$

Modèle linéaire :
$$\gamma(h) = \text{Pépite} + h \frac{\text{Palier}}{\text{Portée}}$$

-l e modèle sphérique.

Le modèle sphérique, se caractérise par un comportement linéaire à l'origine et il atteint son palier (C) pour une distance (h) égale à la portée (a). La croissance est

forte à l'origine et la tangente à l'origine coupe le palier en un point d'abscisse égale à $2a/3$. Sa formule mathématique s'écrit sous la forme suivante:

$$\gamma(h) = C \left[\frac{3|h|}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right] \text{ Pour } h \leq a$$

$$\gamma(h) = C \text{ pour } h > a$$

Avec :

$\gamma(h)$: variogramme théorique,

h : distance moyenne intra- classe [km],

a : portée théorique du phénomène [km],

C : palier [mm^2].

-le modèle gaussien : allure parabolique à l'origine et palier atteint asymptotiquement.

-le modèle exponentiel : allure linéaire à l'origine et palier atteint asymptotiquement.

1.2.6. Ajustements des variogrammes aux variables à interpoler

On ajuste les variogrammes aux variables à interpoler, et notamment pour la cartographie des pluies les résidus de régressions.

Pour déterminer les paramètres du variogramme (portée, palier et effet de pépite), on procède généralement par un ajustement du variogramme expérimental (brut) à un modèle théorique en minimisant l'erreur-type entre les deux modèles. L'ajustement est réalisé soit d'une façon simple visuelle, ou en recourant à l'outil Solver de Microsoft Excel qui est un excellent outil utilisé pour minimiser l'erreur-type entre les deux modèles.

2. REGRESSION MORPHOMETRIE –PLUVIOMETRIE

L'exploitation de l'information caractérisant le relief permet de pallier à l'insuffisance du réseau de postes pluviométriques. En effet, celui-ci n'est ni suffisamment dense ni spatialement bien réparti. En particulier, les zones montagneuses où la répartition des pluies est complexe et obéit à une multitude de facteurs (exposition des versants, orientation des chaînes de montagnes) sont la plupart du temps faiblement pourvues de postes de mesures.

2.1. Paramètres utilisés comme facteurs explicatifs

Les paramètres caractérisant le relief ont été exploités dans plusieurs études et ont permis de montrer que l'altitude réelle des postes pluviométriques n'était pas toujours le facteur le plus pertinent dans l'explication des pluies. C'est plutôt le relief environnant qui peut être exprimé par l'altitude lissée, ou la combinaison de plusieurs facteurs (encaissement, exposition, pente) qui permettent d'obtenir des coefficients de corrélation significatifs.

-L'altitude lissée

La cartographie et l'interpolation des pluies ont connu un développement considérable avec la recherche de relations pluies-relief et l'introduction de la notion d'altitude lissée.

La notion d'altitude lissée a été introduite en France par Scherer J.C. (1977), qui a été le premier selon Marand et Zumstein (1990) à utiliser un procédé de lissage de la carte topographique pour obtenir l'altitude des sommets environnants d'un lieu considéré. Une régression linéaire est ensuite effectuée entre l'altitude lissée et le total pluviométrique du poste retenu. Pour la première fois, la notion d'altitude lissée est définie.

Cette notion a connu un développement grâce à Mentre Hildebrand (1986) et aussi Marand et Zumstein (1990). Laborde (1984), a introduit la notion d'encaissement de site (TG) ainsi que la combinaison de plusieurs facteurs (encaissement, exposition, pente).

Il faut signaler que la dérivation des paramètres topographiques est très souvent réalisée pour étudier et spatialiser les températures (Lhotelier et Patriche, 2007).

La représentation et l'étude du relief sous forme numérique se sont développées à partir des années 1990. Deux termes sont très souvent utilisés et confondus: le Modèle Numérique d'Altitude et le Modèle Numérique de Terrain. Le premier désigne les altitudes aux nœuds d'un maillage régulier selon une résolution donnée et le second, qui est le plus souvent utilisé, désigne l'ensemble des programmes qui permettent de traiter la topographie d'une zone d'étude.

Les paramètres caractérisant le relief sont extraits d'un Modèle Numérique de Terrain, M.N.T.

L'information sur la topographie, qui est l'un des facteurs principaux influençant la variation spatiale des pluies a pour source un M.N.T. (en anglais D.E.M. ou Digital Elevation Model).

Celui-ci a été extrait d'une image satellitaire, déjà traitée par un stéréorestituteur, il couvre l'ensemble du continent africain et il est diffusé sur Internet par EROS Data Center de l'U.S. Geological Survey. Les coordonnées des nœuds de la grille (tableau d'altitudes Z_{ij} , i en colonne et j en ligne), sont en coordonnées Lambert Nord Algérie, mais elles étaient à l'origine établies dans un système géographique (30'' d'arc en longitude et latitude).

La cartographie des pluies ne nécessite pas un M.N.T. présentant une résolution très fine. De ce fait, la connaissance des altitudes aux coins d'une grille de 2km*2 km ou de 1km*1 km est nettement suffisante dans la recherche de relations pluie-relief. Par contre, les études concernant la thermométrie et l'E.T.P. nécessitent une résolution plus fine.

2.2. Les études sur la pluviométrie réalisées en Algérie

Les études sur la pluviométrie réalisées en Algérie ont fait ressortir certains facteurs primordiaux qui constituent les lois de la pluviosité pour l'Algérie (Seltzer 1946; Gaussen, 1948; Chaumont et Paquin, 1971; Mébarki, 1982, Ansar, 1999; Mébarki, 2005; Meddi et al, 2007):

- l'éloignement par rapport à la mer,
- l'altitude.

Aissani et Laborde (1983) ont utilisé comme variables explicatives l'altitude et les coordonnées X et Y des postes pluviométriques et procédé à la cartographie des pluies annuelles et maximales dans l'Algérois.

Les études de Mébarki (2005) et Meddi et al (2007), ont permis d'exprimer des relations quantitatives entre la pluie et les facteurs explicatifs. Meddi et al (2007) en appliquant la méthode PLUVIA aux pluies de l'Ouest algérien ont fait ressortir les facteurs explicatifs.

Pour l'ensemble de l'Algérie du Nord, la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord (A.N.R.H., 1993) a permis d'exprimer une relation qui explique la répartition des pluies en fonction de paramètres tels que les X Lambert, les Y Lambert, et l'altitude lissée des postes pluviométriques.

D'autres études sur les pluies annuelles et mensuelles (Touazi 2000, Assaba 2004), ont intégré l'éloignement à la mer comme facteur explicatif dans les régressions multiples. Mouhous, pour les pluies journalières maximales, 1998, a utilisé l'altitude lissée et la distance à la mer comme facteurs explicatifs. Touaibia et al, 2006) ont utilisé comme variables explicatives l'altitude (m) et les coordonnées X et Y en km des postes pluviométriques.

2.3. Principes de la régression multiple linéaire

On cherche à expliquer une variable y à partir de k variables x. Les variables y et x sont gaussiennes, et les paramètres de cette loi de distribution sont:

- Les moyennes marginales : $\bar{y}, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_k$
- Les écarts-types marginaux : $\sigma_y, \sigma_{x1}, \sigma_{x2}, \dots, \sigma_{xi}, \dots, \sigma_{xk}$
- Les coefficients de corrélation totale.

Il faut évaluer les k+1 coefficients de régression a_j , le coefficient de corrélation multiple R, et les k coefficients de corrélation partielle $r_{y x_i x_1, x_2, \dots, x_k}$.

2.3.1. Seuils de signification des coefficients de corrélation

Pour le coefficient de corrélation multiple, on considère que R est significatif si la variance expliquée est significativement supérieure à la variance résiduelle. L'analyse de ces variances montre que la quantité

$$F = \frac{n-k-1}{k} \frac{R^2}{1-R^2}$$

doit être significativement supérieure à 1.

Les valeurs de F ayant une probabilité P d'être dépassées du seul fait du hasard sont données par les tables de Snedecor avec les degrés de liberté $v_1 = k$ et $v_2 = n - (k + 1)$.

Des abaques donnent directement les valeurs du coefficient R aux seuils de 1 % et 5 % en fonction du nombre d'observations.

Pour les seuils de signification des coefficients de corrélation partielle, on utilise comme précédemment, les tables de Student. Le nombre de degré de liberté v est alors égal à $v = n - k - 1$

2.3.2. Méthodes de mise en oeuvre

On désire réaliser une régression entre une variable Y que l'on désire expliquer à partir de plusieurs variables X. On effectue un premier travail de sélection des X_i susceptibles d'avoir une influence sur Y. Deux méthodes sont alors utilisables:

2.3.2.1. Méthode progressive (Stepwise Regression)

On commence par faire une régression simple entre Y et la variable X_i qui lui est le mieux corrélé; on vérifie que le coefficient de corrélation est significatif. On cherche alors la variable X_j qui se corrèle le mieux avec le résidu de la régression de X_i et Y. On effectue alors une régression double, on vérifie les coefficients de corrélations partielles. Si la dernière variable introduite n'est pas significative, on s'arrête, si une des variables précédemment entrées n'est plus significative, on la sort. Si le coefficient de corrélation multiple n'est plus significatif, on s'arrête. Enfin, dans les cas contraires, on introduit un nouveau X_k qui explique le mieux la variance résiduelle précédente.

2.3.2.2. Méthode régressive (backward elimination)

On effectue la régression multiple en utilisant toutes les variables X. On calcule alors les différents coefficients de corrélation partielle et on élimine éventuellement la variable dont le coefficient est le moins significatif. On recommence les calculs jusqu'à ce que tous les coefficients de corrélation soient significatifs à un seuil fixé à l'avance. C'est cette méthode que nous avons utilisée. Le principe de cette méthode est d'éliminer parmi l'ensemble de toutes les variables introduites au départ les variables qui sont les moins significatives au sens statistique. La régression multiple est appliquée grâce au logiciel Hydrolab.

3. APPLICATION : CARTOGRAPHIE DES PLUIES MOYENNES ANNUELLES ET FREQUENTIELLES DU BASSIN DE LA SEYBOUSE

3.1. Les étapes de la cartographie

Pour cette application sur le bassin de la Seybouse, l'objet est de réaliser les cartes pluviométriques des pluies moyennes interannuelles des périodes 1969/1970-1998/1999 et 1971/1972-1987/1988 et celles des pluies des fréquences décennales sèches et humides. La réalisation des quatre cartes s'est faite selon la même démarche:

régression multiple, interpolation des résidus de régressions, et cartographie proprement dite (logiciel Surfer).

Pour l'ensemble des cartes, nous avons dans un premier temps essayé une régression multiple entre la pluie : pluie moyenne (1969/1999, et 1971/1988) et pluie fréquentielles sèches et humides avec le maximum de facteurs qui pouvaient expliquer la répartition spatiale des pluies. Les variables X Lambert, Y Lambert, Z liss, et distance à la mer ont été essayées.

Enfin, et à la suite des travaux de Laborde (2000), Laborde et Assaba (2003), et Assaba (2004), une variable explicative exprimée sous la forme $e^{-d/p} * Z_{liss}$, qui exprime une exponentielle décroissante fonction de la distance à la mer que multiplie l'altitude lissée.

*L'expression $e^{-d/p} * Z_{liss}$ exprime aussi un gradient latitudinal fonction de la distance à la mer combiné à un gradient altitudinal.*

Finalement, la relation retenue est de la forme:

$$P_{mm} = f(Y \text{ Lambert}, e^{-d/p} * Z_{liss}).$$

- éloignement à la mer : la plus courte distance à la mer.
- Z liss : altitude lissée du poste pluviométrique à partir d'un M.N.T. avec une maille de 1 km*1km (fig.28).

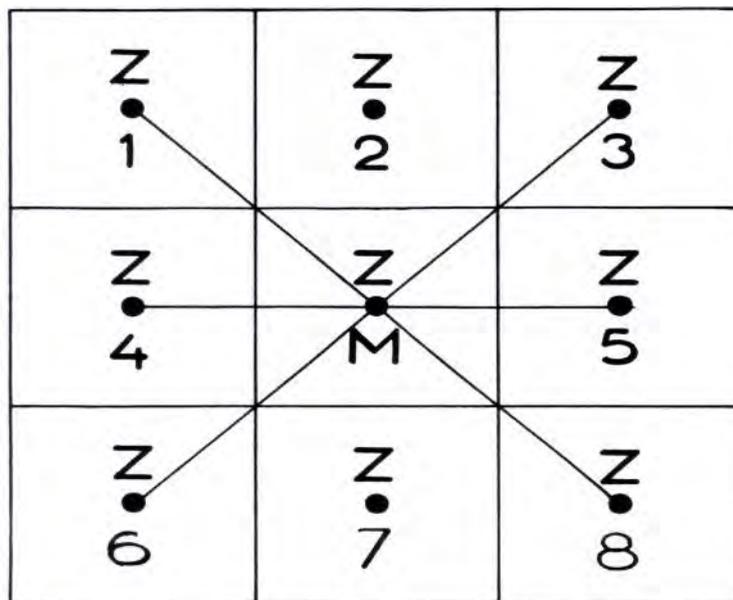


Fig.28: Méthode de calcul de l'altitude lissée

On considère que c'est l'environnement topographique du poste qui explique la pluviométrie du poste et non pas l'altitude réelle du poste.

Les calculs ont été réalisés avec le logiciel Hydrolab qui utilise la méthode par backward élimination.

La seconde étape a concerné l'interpolation des résidus de régressions grâce au logiciel Hydrolab, et enfin la cartographie proprement dite (logiciel Surfer).

Les étapes de réalisation des cartes de pluies moyennes 1969/1999 et 1971/1988 et celles des pluies fréquentielles sèches et humides sont représentées dans le schéma de la figure 29.

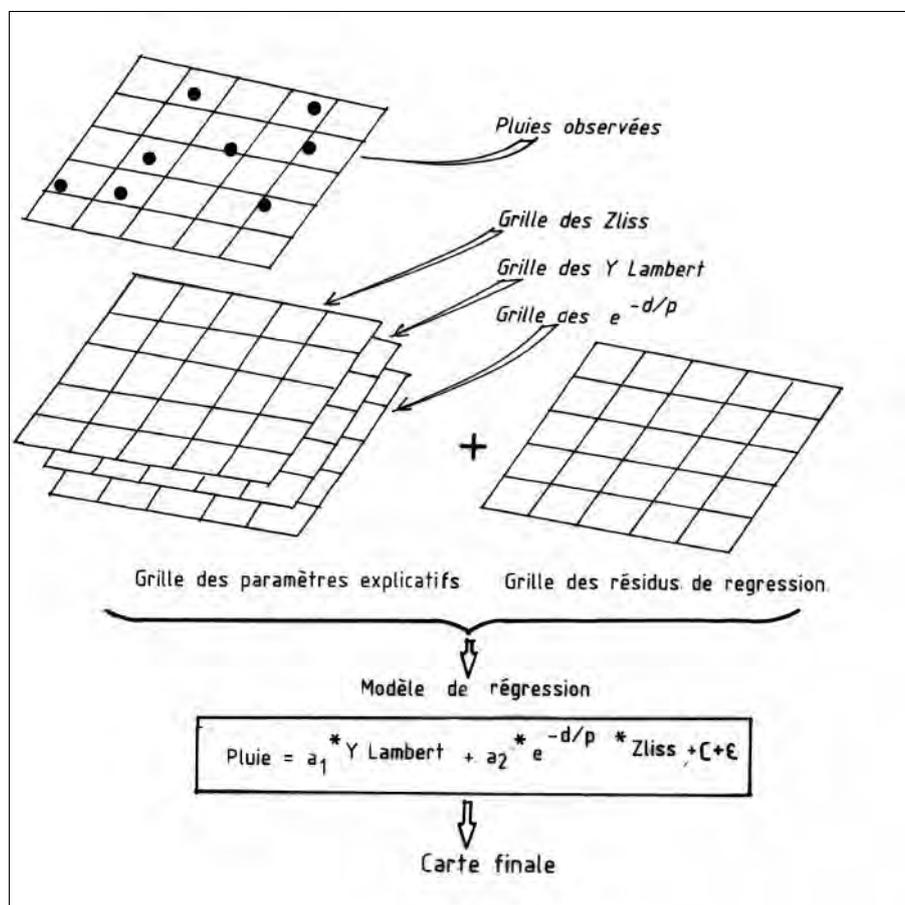


Fig.29: les étapes de la réalisation de la carte pluviométrique (D'après Laborde, 1993; Davtian, 1998; Assaba, 2003; Mebarki, 2005)

Pour plus de clarté, on présentera pour chaque carte de pluie ,pluies moyennes interannuelles (1969/1999), pluies moyennes interannuelles (1971/1988), pluies fréquentielles décennales humides et pluies fréquentielles décennales sèches, les résultats des trois étapes de travail : résultats de la régression multiple linéaire, ajustement des variogrammes théoriques aux données expérimentales, et enfin réalisation de la carte pluviométrique.

3.2. Cartographie des pluies interannuelles d'une série de 30 ans (1969/70-1998/99)

3.2.1. Les résultats de la régression multiple linéaire (1969/70-1998/99)

Les résultats de la régression multiple linéaire pour les pluies moyennes de la période trentenaire (1969-1970/1998-1999) sont résumés dans le tableau 16 :

Tableau 16: Résultats de la régression multiple linéaire avec (1969/1970-1998/1999)

Variable	Coefficient de régression	Coefficient de corrélation partielle
Y	3.74	0.83
E (-d/p)*z	1.01	0.63
Terme constant	-878.77	
Coefficient de corrélation multiple	0.838	
F expérimental	21.25	4.07/1.645 significatif car ayant moins de 5 % de chance d'être du au hasard
Plus petit r	0.63	3.05/1.96 significatif car ayant moins de 5 % de chance d'être du au hasard

Pour les pluies de la période (1969/1970-1998/1999), la régression multiple linéaire retenue l'a été avec 2 variables explicatives.

$$\text{Pluies (1969/1970-1998/1999)} = 3.74 * Y + 1.01 * E^{(-d/p)} * Z - 878.77$$

Avec un coefficient de corrélation multiple $R = 0.84$, les deux régresseurs Y Lambert et $(E^{(d/p)} * z)$ expliquent 70% de la variance des pluies moyennes annuelles (tabl.16 et fig.30).

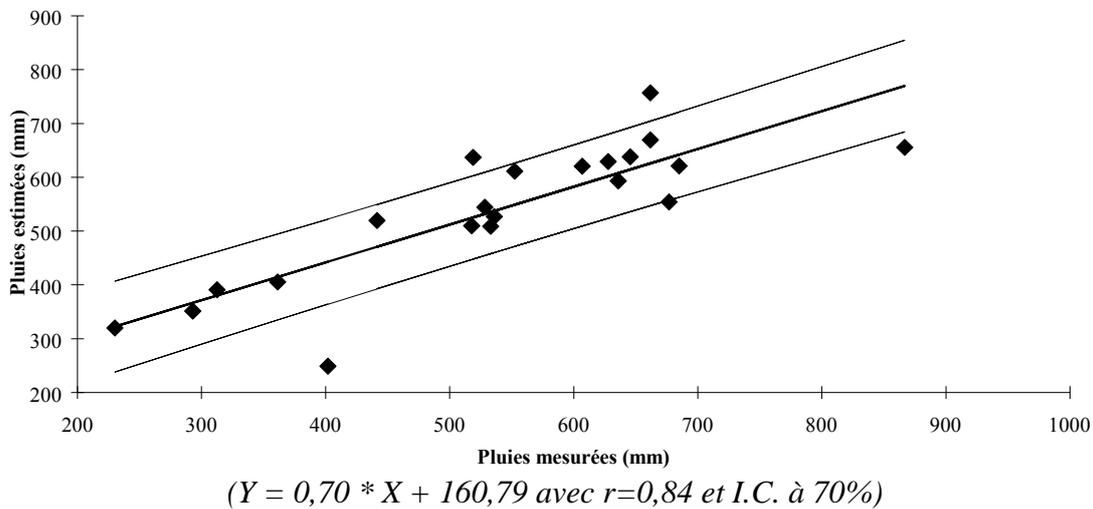


Fig. 30: Régression pluies mesurées et pluies estimées par régression multiple (1969/1970-1998/1999)

Les facteurs les plus corrélés avec la pluie et qui ont des coefficients de corrélation partiels significatifs sont la latitude exprimée par Y Lambert, et le gradient latitudinal exprimé par $e^{-d/p}$ combiné au gradient altitudinal (Z Liss).

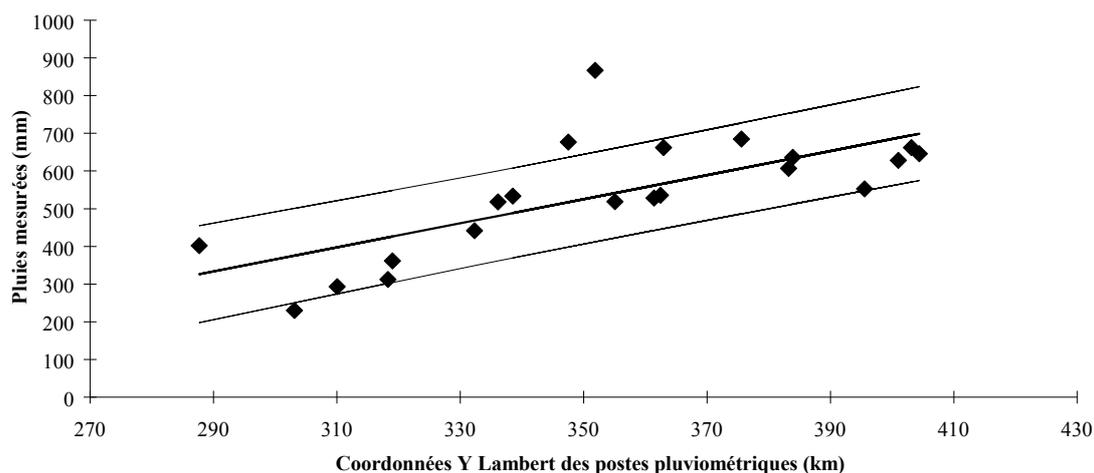
Le coefficient de corrélation multiple est de 0.84, il représente le coefficient de corrélation totale entre les valeurs de pluies mesurées et celles estimées par le modèle.

Le coefficient de détermination R^2 est égal à 0.702, la variance expliquée est donc de 70 %. D'après les résultats de la macro d'Hydrolab, la valeur expérimentale de F (Fisher-Snedecor) est égale à 21,25. Elle est largement supérieure à la valeur limite (4,07), ce qui permet de conclure que le coefficient de corrélation multiple R est significativement différent de zéro, car il y a moins de 5% de chance d'avoir obtenu des valeurs expérimentales de F du seul fait du hasard.

De même, les tests sur les coefficients de corrélation partielle des 2 régresseurs, montrent qu'ils sont significatifs au seuil de 5 % (valeur tabulée=0.44), au seuil de 2% (valeur tabulée=0.52), et au seuil de 1 % (valeur tabulée=0.56).

Afin d'illustrer les modèles de régression multiple linéaires adoptés pour les pluies sur le bassin de la Seybouse (1969/1999), des régressions simples ont été calculées entre les facteurs explicatifs de la pluviométrie et les pluies estimées.

La figure 31 illustre la forte relation entre les Y Lambert et les pluies mesurées aux postes pluviométriques, avec un coefficient de corrélation simple de 0.71 entre les deux variables.



$$(Y = 3,20 * X - 593,18 \text{ avec } r=0,71 \text{ et I.C. à } 70\%)$$

Fig. 31: Régression entre les coordonnées Y Lambert (km) et les pluies mesurées (1969/1970-1998/1999)

Ces facteurs expliquent donc 70 % de la variabilité des pluies, il reste à interpoler les résidus de régression qui constituent la part de variance non expliquée par la régression multiple. L'interpolation sera réalisée par krigeage après l'élaboration d'un variogramme.

3.2.2. Ajustement des variogrammes théoriques aux données expérimentales. Application aux résidus de régression (1969/70-1998/99)

Après plusieurs essais, le variogramme a été appliqué aux résidus de régression 1969/1999 avec les paramètres suivants:

-variogramme omnidirectionnel.

-nombre de couples : 210.

-distance maximale d'analyse : 70 km.

-pas: 10 km (afin d'éviter le faible nombre de classes, et les effectifs trop faibles par classe).

Le meilleur ajustement a été obtenu avec un modèle sphérique (fig.32).

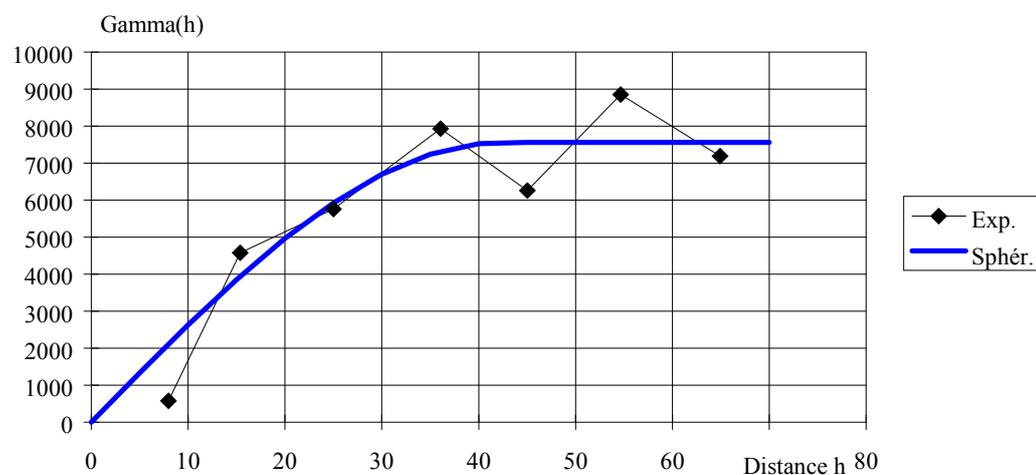


Fig.32: Variogramme des résidus de régression (1969/1970-1998/1999)

3.2.3. Carte pluviométrique (1969/1970-1998 /1999)

Les zones de forte pluviométrie sont le massif de l'Edough qui surplombe la mer Méditerranée et les monts de la Medjerdah (station de Mechroha). Mais la majeure partie des bassins aux stations enregistre moins de 500mm, mis à part le relief de la Mahouna dans la moyenne Seybouse. Les Hautes Plaines, malgré l'altitude supérieure à celle de la zone tellienne, connaissent une diminution importante de la pluviométrie annuelle (moins de 450 mm à 250 mm) à cause de l'effet de la continentalité (fig.33).

Par rapport à la carte A.N.R.H. (1993), on enregistre une diminution moyenne de 10 % des pluies moyennes interannuelles. C'est le même pourcentage qui a été remarqué entre les cartes Chaumont (1971) et A.N.R.H. La plus forte diminution est celle de Mechroha (-15%) qui est le poste situé le plus en altitude. Seule la station d'Ain Beida (Hautes Plaines) présente une légère augmentation de 5%. Mebarki (2004) a noté une très bonne corrélation ($r = 0.985$) pour 90 postes pluviométriques communs à la carte qu'il a réalisé pour la période 1972/73 à 1983/84 et celle de l'A.N.R.H. et une diminution générale de 8 %.

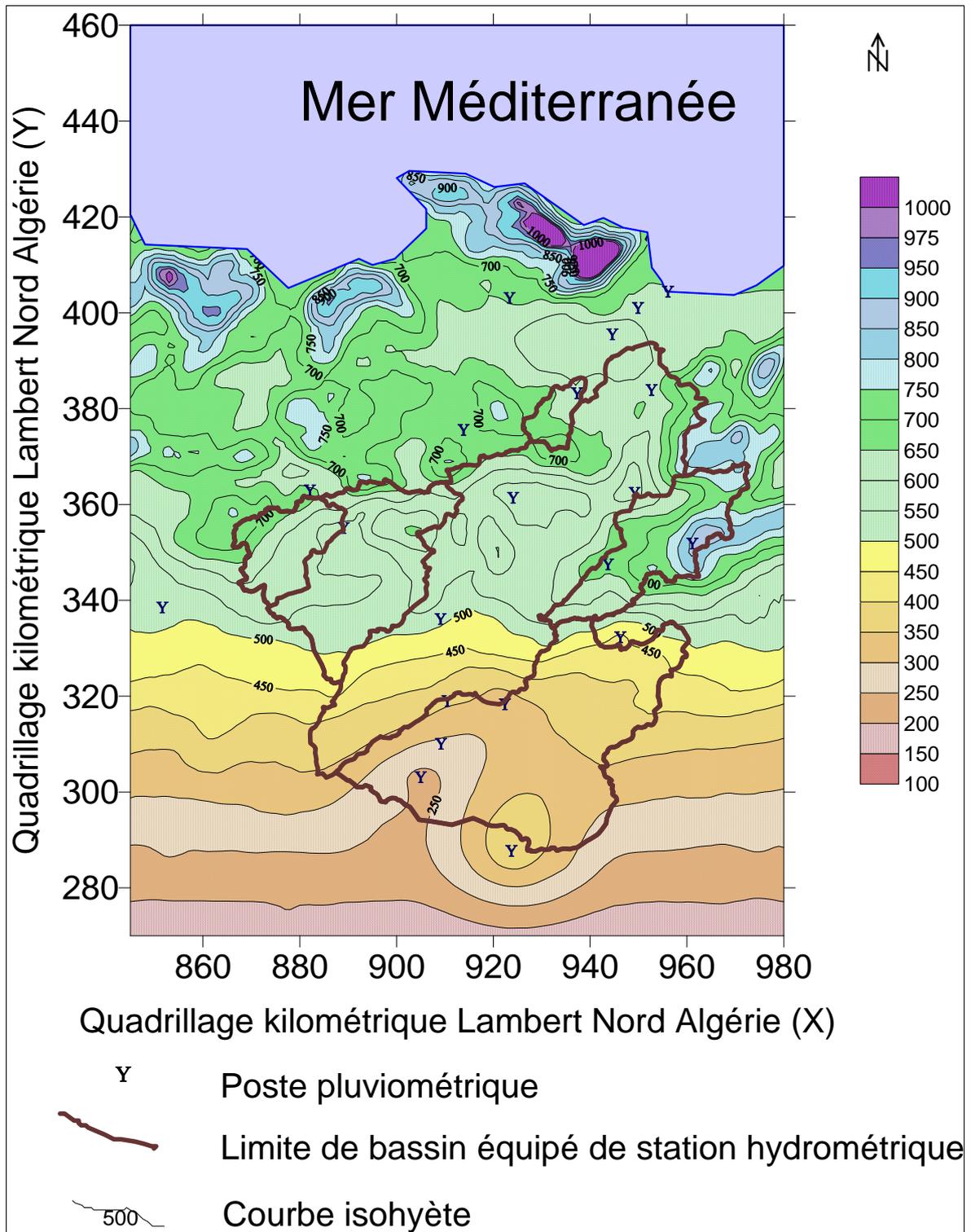


Fig.33: Carte pluviométrique interannuelle du bassin jaugé de la Seybouse (1969/1970- 1998/ 1999)

3.3. Cartographie des pluies interannuelles d'une série de 17 ans (1971/1972 - 1987/1988)

La carte pluviométrique (septembre 1971/août 1988) est réalisée pour le calcul de la pluie moyenne nécessaire à l'établissement du bilan hydrologique des 6 bassins équipés de stations hydrométriques (fig. 38).

3.3.1. Résultats de la régression multiple linéaire pour les pluies de la période (1971/72-1987/88)

La régression multiple linéaire modélisant les pluies de la série 1971/1972-1987/1988 a mis en œuvre 2 variables explicatives.

Tableau 17: Régression linéaire avec 2 variables explicatives, pluies 1971/1972-1987/1988

Variable	Coefficient de régression	Coefficient de corrélation partielle
Y	3,81	0,84
E (-d/p)*z	1,08	0,664
Terme constant	-919,18	/
Coefficient de corrélation multiple	0,84	/
F expérimental	22,34	4.20/1.645 significatif car ayant moins de 5 % de chance d'être du au hasard
Plus petit r	0,66	3.29/1.96 significatif car ayant moins de 5 % de chance d'être du au hasard

La régression est la suivante : Pluies 1971/1972-1987/1988 = 3,81*Y Lambert +1,08*Exp^{(-d/p)*Z} - -919,18.

Avec un coefficient de corrélation multiple R = 0,84, les deux régresseurs Y Lambert et (Exp^{(-d/p)*Z}) expliquent 72 % de la variance des pluies moyennes annuelles (tabl.17 et fig. 34 à 36).

Les tests sur les coefficients de corrélation aussi bien multiple que partielle prouvent qu'ils sont significatifs au seuil de 5 %.

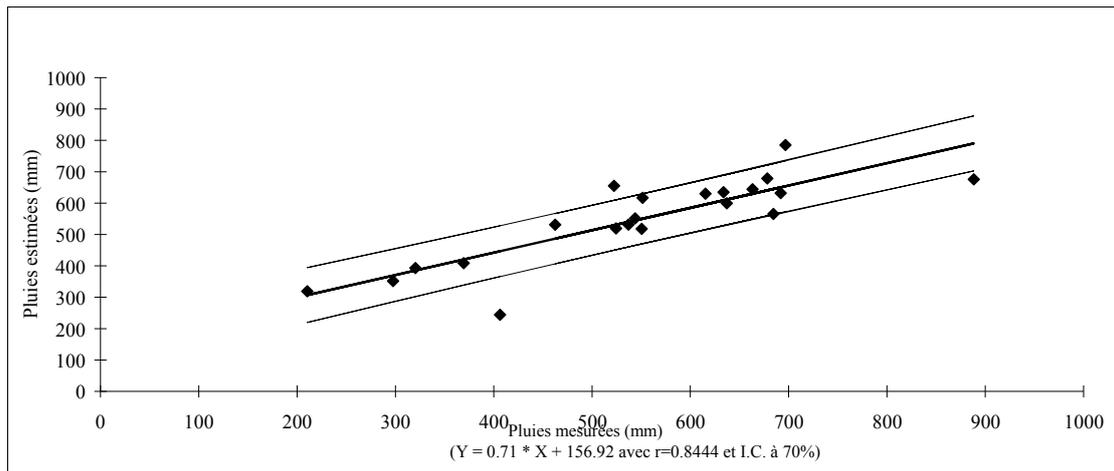


Fig.34: Régression pluies mesurées et pluies estimées par régression multiple (1971/1972-1987/1988)

La relation entre les pluies mesurées et les pluies estimées par la régression multiple est exprimée par : Pluies estimées= 0.71 * Pluies mesurées +156.92 avec R= 0.84.

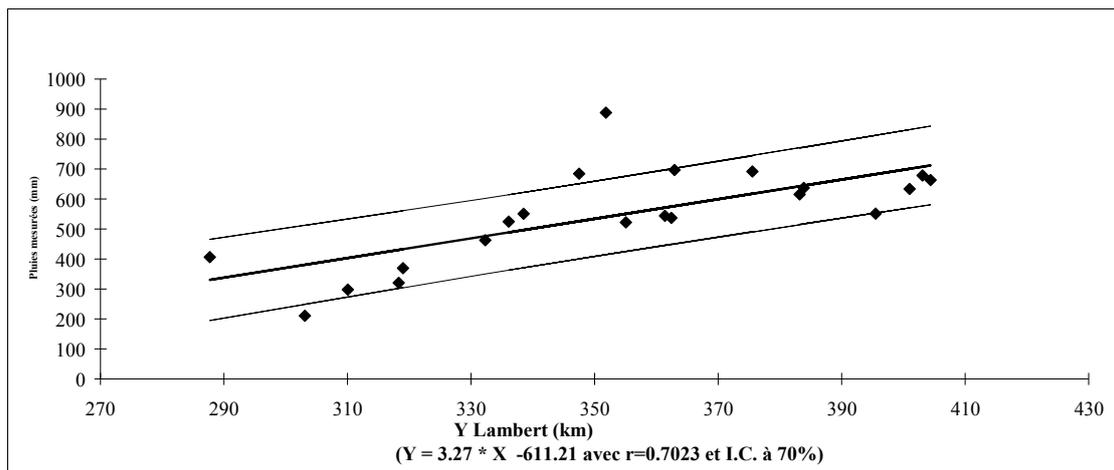


Fig.35: Régression entre coordonnées Y Lambert des postes pluviométriques et pluies mesurées (1971/1972-1987/1988)

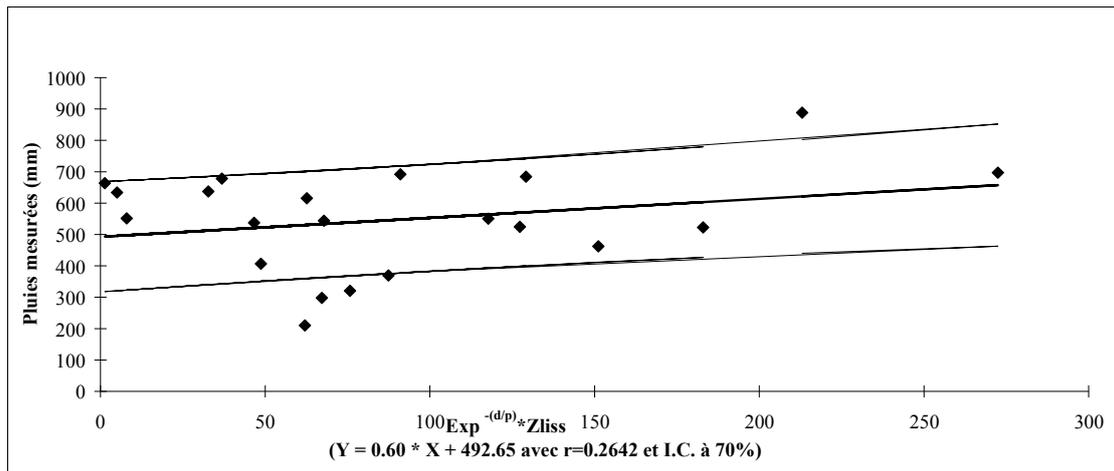


Fig.36: Régression entre le paramètre $E^{d/p} * z$ et les pluies mesurées (1971/1972-1987/1988)

3.3.2. Ajustement des variogrammes théoriques aux données expérimentales. Application aux résidus de régression (1971/1972-1987/1988)

En appliquant les mêmes paramètres, le modèle de variogramme des résidus de régression (1971/1972-1987/1988) adopté est du type sphérique (fig.37).

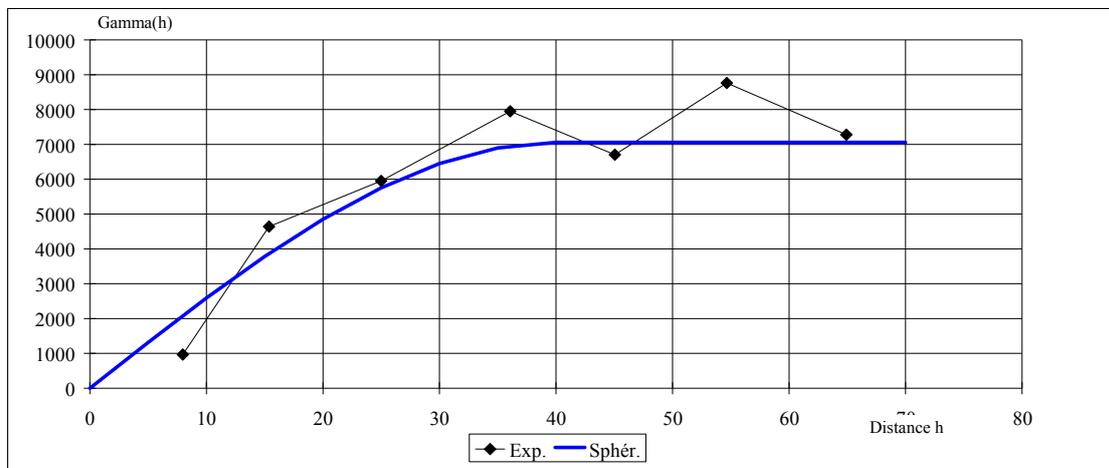


Fig.37: Variogramme des résidus de régression (1971/1972-1987/1988)

Les éléments caractéristiques du variogramme des résidus de régression de 1971/1988 sont (tabl.18):

Tableau 18: Les paramètres d'ajustement du variogramme des résidus de régression des pluies (1971/1972-1987/1988)

Paramètres	Valeurs
Nombre b de valeurs	21
Variance des résidus	7056.42
Nombre b de couples	210
Distance maximum absolue	123,54
Distance maximale dans la direction	69,81
Az0	0
Tolerance	90
Pas	10
Distance maximale d'analyse	70

Tableau 19 : Eléments de comparaison entre les types de variogramme des résidus pour les pluies de (1971/1972-1987/1988)

Type de modèle	Portée	Palier	Pépité	Erreur type
Linéaire	64,92	7926,38	0	1890,36
Sphérique	40,32	7016,94	0	673,21
Exponentiel	64,92	7926,38	0	840,62
Gaussien	64,92	7926,38	0	1918,62

Le variogramme adopté est du type sphérique avec une portée de 40.32 km, un palier de 7016 mm², et une pépité nulle. L'erreur-type produite par cet ajustement est minimale (673,2 mm) (tabl.19).

L'ajustement des résidus de régression à un modèle théorique de type sphérique a permis d'estimer la distance maximale de la variable présentant une structure spatiale et la précision de l'estimation (à travers la variance d'estimation).

3.3.3. Carte pluviométrique (1971/1972- 1987/1988)

La carte pluviométrique de la période (septembre 1971/août 1988) (fig.38) présente une très forte similitude avec celle de la période trentenaire (septembre 1969/août 1999). Les différences sont très faibles entre les deux cartes. Le tableau 20 montre pour deux postes pluviométriques Bou Snib et Ain Babouche les écarts existants entre les pluies moyennes des deux périodes étudiées entre la période trentenaire et la période courte utilisée pour le bilan hydrologique.

Tableau 20 : Différences de données entre les deux cartes (1969/1970-1998/1999 et 1971/1972-/1987/1988)

Paramètre	Valeurs (mm)	Postes
Moyenne des écarts	1.98	////
Ecart-type des écarts	10.90	////
Ecart maximal ponctuel	28.30	Bou Snib
Ecart minimal ponctuel	-24.82	Ain Babouche

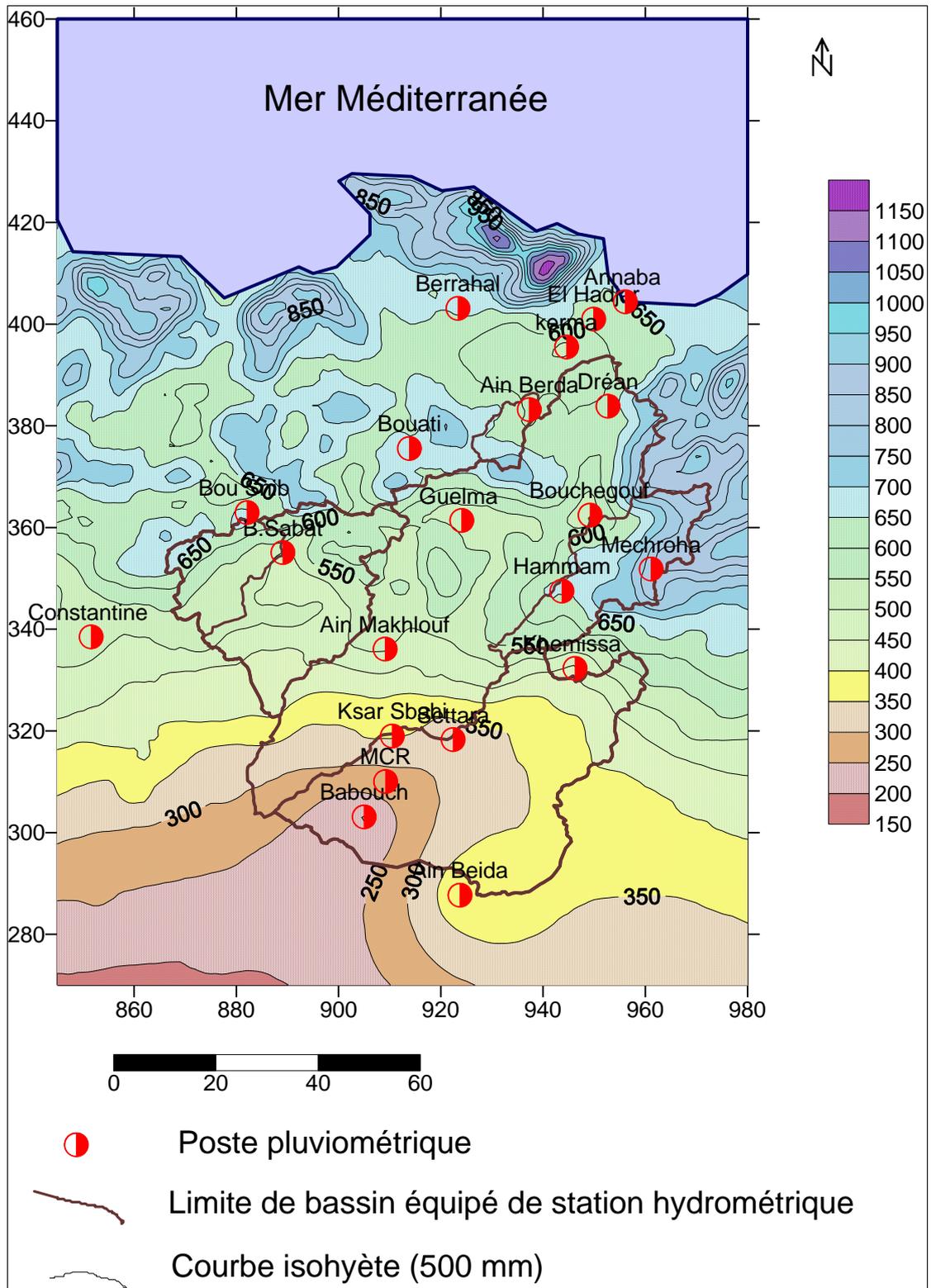


Fig. 38 : Carte pluviométrique moyenne interannuelle du bassin jaugeé de la Seybouse (1971/1972-1987/1988)

3.4. Cartographie des pluies annuelles fréquentielles décennales humides (série de 30 ans)

La récurrence des pluies décennales humides est à mettre en lien avec les problèmes de remplissage des barrages et également avec les problèmes de crues et inondations. Les pluies décennales humides sont à lier aux pluies maximales.

3.4.1. La régression multiple pluie-morphométrie

Pour les pluies fréquentielles décennales humides, la régression multiple retenue intègre 3 facteurs explicatifs: X Lambert, Y Lambert et l'expression $e^{(-d/p)*z}$ (tabl.21).

Tableau 21: régression multiple pour les pluies fréquentielles décennales humides

Variable	Coefficient de regression.	Coefficient de corrélation partielle
X Lambert	2,54	0,506
Y Lambert	3,83	0,76
$E^{(-d/p)} * z$	1,63	0,71
Terme constant	-3133,54	
Coefficient de corrélation multiple	0,849	
F experimental	14,69	ayant moins de 5% de chance d'être du au hasard
Plus petit r	0,506	(2.23/1,96 significatif car ayant moins de 5% de chance d'être du au hasard

La régression retenue est de la forme : Pluies décennales humides (mm)= $A * X \text{ Lambert} + B * Y \text{ Lambert} + C * e^{-d/p} * z + \text{terme constant}$

D'où: Pluies décennales humides (mm)= $2.54 * X \text{ Lambert} + 3.83 * Y \text{ Lambert} + 1.63 * e^{-d/p} * z - 3133.54$

La régression multiple pour les pluies fréquentielles décennales humides intègre X Lambert comme paramètre explicatif.

Les autres paramètres explicatifs de la répartition spatiale des pluies fréquentielles décennales humides se retrouvent pour toutes les régressions: les coordonnées Y Lambert (km) et l'expression $\text{Exp}^{-d/p} * z$, exprimant une exponentielle décroissante de la distance à la mer. Les coordonnées X Lambert constituent également un facteur explicatif des pluies décennales humides.

3.4.2. Variogramme des résidus pour les pluies décennales humides

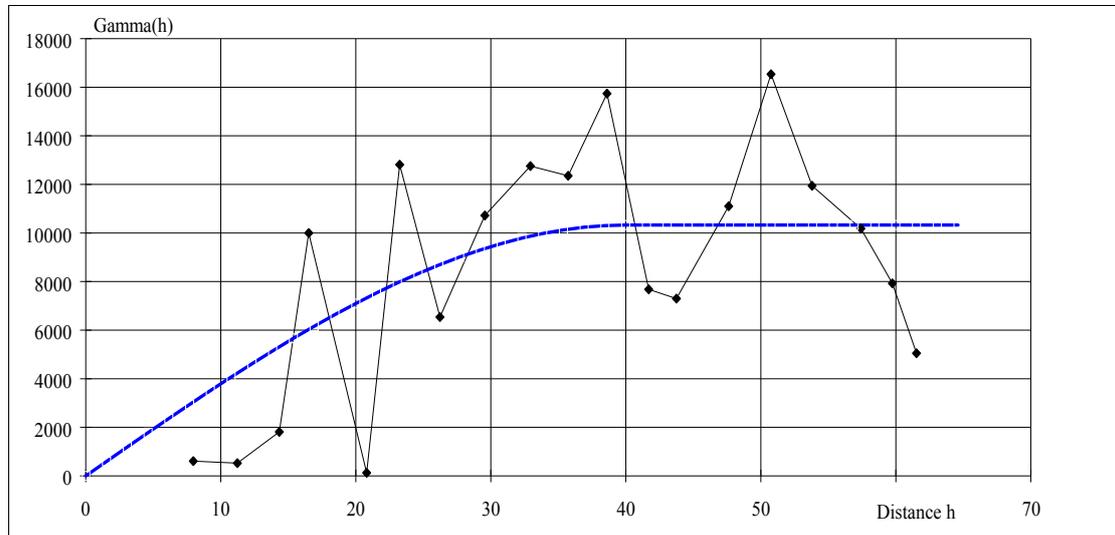


Fig.39: Variogramme des résidus des pluies décennales humides

L'ajustement des résidus de régression pour les pluies décennales humides a été réalisé grâce à un variogramme sphérique, le palier est de 10325.9 mm^2 avec une portée de 40 km, sans effet de pépité (fig.39). L'erreur-type est de 3724.9 mm.

3.4.3. Carte des pluies décennales humides

Les valeurs sont comprises entre 345 mm (poste d'Ain Babouche) et 1222,4 mm à Mechroha. La majeure partie du bassin est sous une pluie comprise entre 600 et 800 mm alors que pour les pluies moyennes, elle est comprise entre 400 et 600 mm. Les valeurs interpolées atteignent 1600 mm dans les Monts de Séraïdi (djebel Edough) (fig.40).

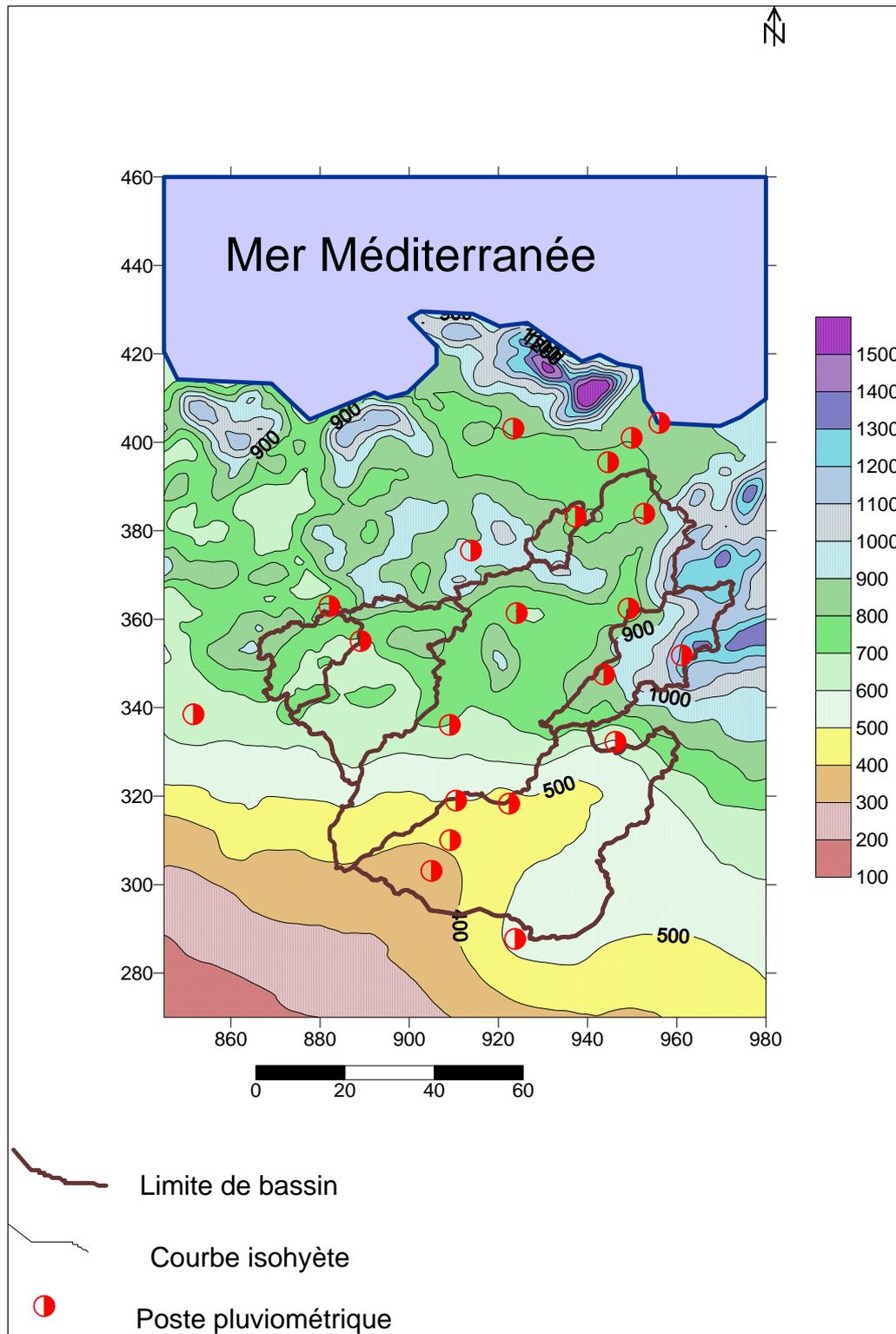


Fig.40: Carte des pluies fréquentielles décennales humides du bassin jauge de la Seybouse (données 1969/1970-1998/1999)

3.5. Cartographie des pluies annuelles fréquentielles décennales sèches (série de 30 ans)

Les études s'intéressent également aux scénarios pessimistes en étudiant les pluies fréquentielles décennales sèches.

3.5.1. Résultats de la régression multiple

Tableau 22: Régression multiple pour les pluies fréquentielles décennales sèches

Variable	Coefficient de régression	Coefficient de corrélation partielle
Y Lambert	3,05	0,87
e-d/p *z	0,71	0,64
Terme constant	-783,39	
Coefficient de corrélation multiple	0,88	
F expérimental	29,72	(4.53/1,645 significatif car ayant moins de 5% de chance d'être du au hasard)
Plus petit r	0,64	(3.16/1,96 significatif car ayant moins de 5% de chance d'être du au hasard)

La régression s'exprime ainsi, pluies décennales sèches (mm)=
 $A * Y \text{ Lambert} + B * e^{-d/p} * z + \text{terme constant.}$

L'application numérique donne pluies décennales humides (mm)=
 $3.05 * Y \text{ Lambert} + 0.71 * e^{-d/p} * z - 783.39.$

La régression multiple pour les pluies fréquentielles décennales sèches est similaire à celle des pluies moyennes interannuelles. Les paramètres explicatifs de la répartition spatiale des pluies fréquentielles décennales sèches sont les coordonnées Y Lambert (km) et l'expression $\text{Exp}^{-d/p} * z$, exprimant une exponentielle décroissante de la distance à la mer (tabl.22).

3.5.2. Variogramme des résidus pour les pluies fréquentielles décennales sèches

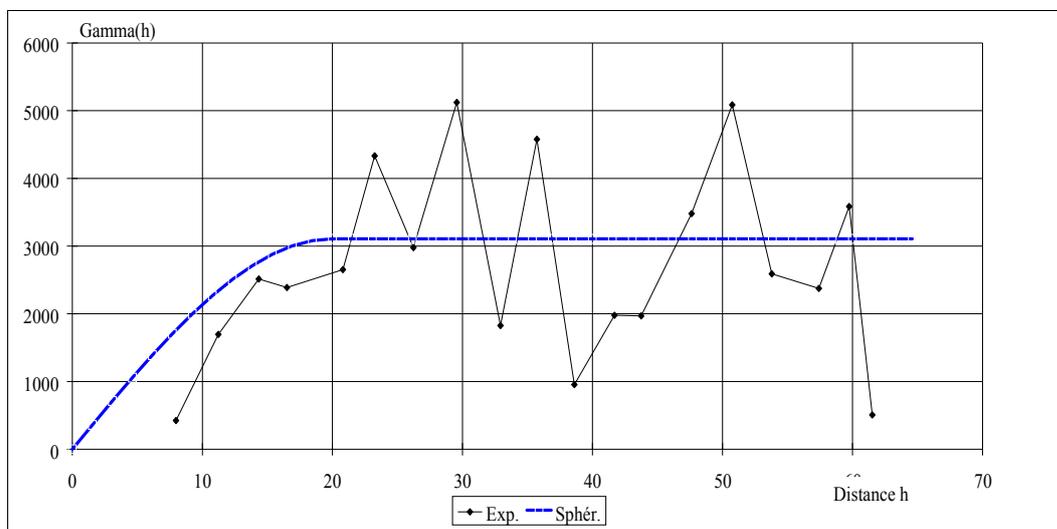


Fig.41: Variogramme des résidus pour les pluies fréquentielles décennales sèches

L'ajustement des résidus de régression a été réalisé grâce à un variogramme sphérique, le palier est de 3108.5 mm^2 avec une portée de 20 km, sans effet de pépite. L'erreur-type est de 1282.6 mm (fig.41). Le palier est bien plus faible que celui obtenu dans le variogramme des pluies fréquentielles humides avec une portée de moitié réduite.

3.5.3. Carte des pluies fréquentielles décennales sèches

Les valeurs sont comprises entre 114 mm (poste d'Ain Babouche) et 511 mm à Mechroha. La zone des monts de Seraïdi (Edough), habituellement très arrosée est à 800 mm.

La majeure partie du bassin de la Seybouse est à moins de 400 mm, Le poste de Kerma, très proche du littoral, a une pluie décennale sèche de 381 mm. Les valeurs interpolées atteignent un maximum de 800 mm dans les Monts de Séraïdi (djebel Edough) (fig.42).

La carte des pluies fréquentielles décennales sèches permet de mettre en lumière une diminution moyenne de -34.01 % avec une très forte diminution pour les postes pluviométriques situés en Hautes Plaines. La diminution la plus forte est celle d'Ain Babouche (-50.10%). Les stations situées à proximité du littoral enregistrent les plus faibles diminutions de pluies (Ain Berda, Annaba, Kerma, Dréan).

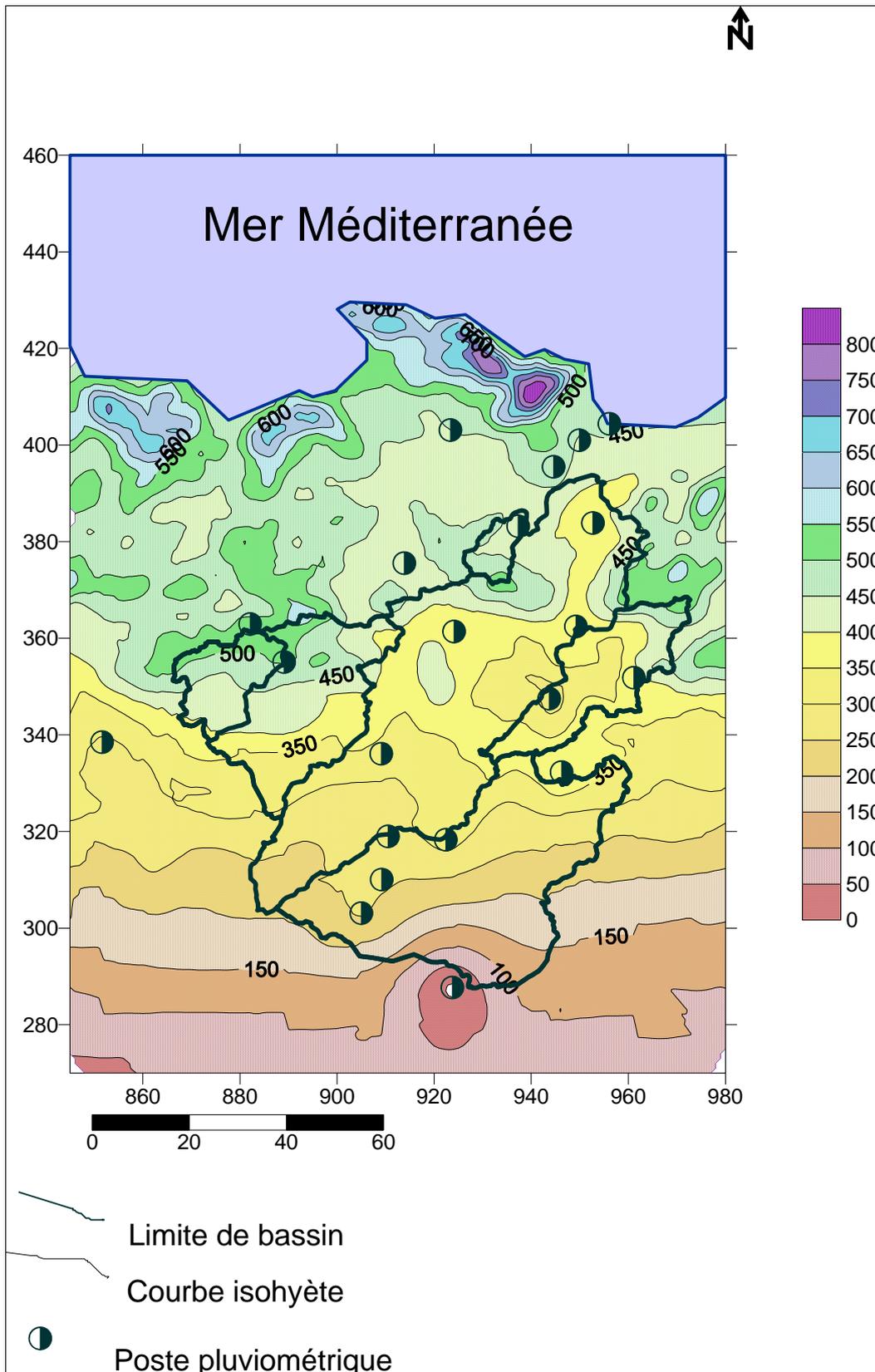


Fig. 42: Carte des pluies fréquentielles décennales sèches du bassin jaugé de la Seybouse (données 1969/1970-1998/1999)

CONCLUSION DU CHAPITRE 2

Ce chapitre dédié à la cartographie des pluies, a permis le passage de l'information ponctuelle à une information couvrant tout l'espace du bassin versant.

L'élaboration des cartes pluviométriques intègre à la fois les techniques de cartographie proprement dites et les méthodes d'interpolation. Le krigeage, qui a été utilisé dans ce travail constitue la méthode d'interpolation la plus élaborée.

La réalisation des cartes pluviométriques interannuelles (septembre 1969 / août 1999 et septembre 1971 / août 1988) et des cartes des pluies fréquentielles décennales sèches et humides ont été détaillées. Elle s'est faite en trois étapes principales: régression morphométrie – pluviométrie, interpolation des résidus de régression et cartographie de la pluie.

Il devient possible à partir de la grille des pluies moyennes annuelles (septembre 1971 à août 1988), de calculer la pluie moyenne par bassin équipé de station hydrométrique pour les bilans hydrologiques (17 années hydrologiques, septembre 1971 à août 1988).

Les quatre régressions multiples calculées ont intégré les paramètres explicatifs suivants: les coordonnées Y Lambert et l'expression $Exp^{-d/p} * z$. Seuls les coefficients de régression varient.

Par contre, les pluies fréquentielles décennales humides intègrent le paramètre X Lambert comme facteur explicatif.

Le variogramme sphérique a permis dans les quatre cas d'ajuster les résidus de régression.

Les grilles et les cartes constituent des documents de base pour l'étude hydrologique.

La carte des pluies fréquentielles décennales humides a mis en valeur des valeurs comprises entre 345 mm (poste d'Ain Babouche) et 1222,38 mm à Mechroha. La majeure partie du bassin est sous une pluie comprise entre 600 et 800 mm alors que pour les pluies moyennes, elle est comprise entre 400 et 600 mm. Les valeurs interpolées atteignent 1600 mm dans les Monts de Séraïdi (djebel Edough).

La carte des pluies fréquentielles décennales sèches a permis de mettre en lumière une diminution moyenne de -34.01 % avec une très forte diminution pour les postes pluviométriques situés en Hautes Plaines. La diminution la plus forte est celle d'Ain Babouche (-50.10%). Les stations situées à proximité du littoral enregistrent les plus faibles diminutions de pluies (Ain Berda, Annaba, Kerma, Dréan).

Les études hydrologiques s'intéressent aux scénarios pessimistes en étudiant les pluies fréquentielles décennales sèches pour quantifier les apports et leurs répercussions sur les volumes disponibles et de simuler des scénarios.

Ces derniers concernent le remplissage insuffisant des barrages, le recours à des volumes plus importants en eaux souterraines, et le recours également aux transferts d'eau de barrages situés plus au Nord et dans les bassins –versants voisins ayant des besoins moins importants que ceux du bassin de la Seybouse.

Selon Laborde (2009), si les pluies annuelles diminuent de 15 %; les écoulements et les apports annuels diminuent jusqu'à 40 %, ce qui implique une

diminution très importante des apports entrant aux barrages (Foum El Khanga pour l'oued Cherf situé en Hautes Plaines, Hammam Debagh, Chéffia).

De même, des études ont montré que les pluies de fréquence décennale ne produisent pas forcément les débits de fréquence décennale (Mébarki, 2005).

Chapitre 3 : Les données thermiques et l'évapotranspiration

INTRODUCTION

A partir des données de 5 stations représentatives du bassin (Oum el Bouagui, Ain Beida, Constantine, Guelma et Annaba), on étudiera les 2 principaux paramètres climatiques (T et E.T.P.), leur répartition spatiale et leur variabilité temporelle.

Les stations utilisées sont représentatives des différents milieux du bassin mais elles présentent des séries de données de longueur inégale (fig. 43).

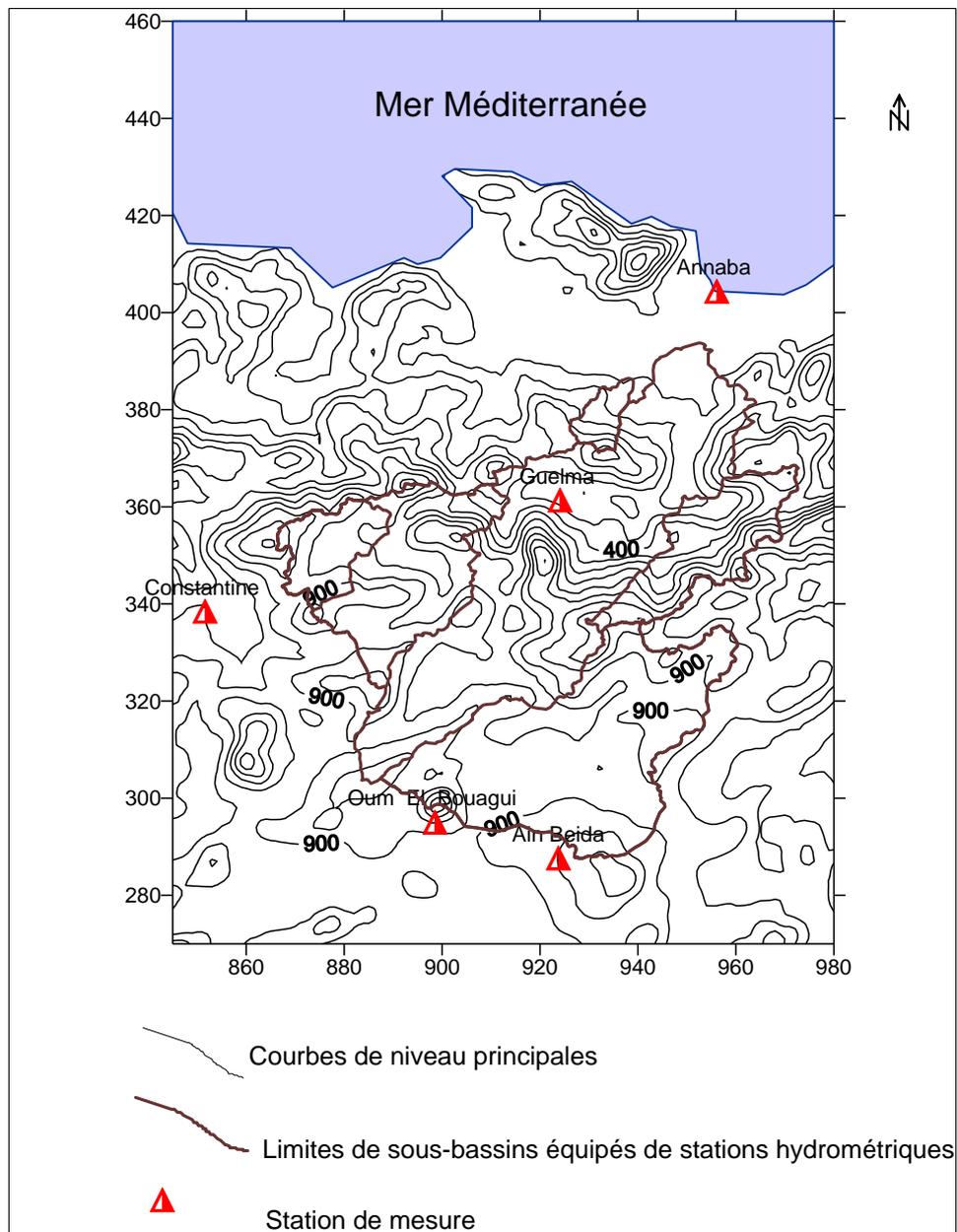


Fig. 43: Localisation des stations thermométriques

1. LES TEMPERATURES ET LEURS VARIATIONS

Les températures de l'air constituent un facteur climatique prépondérant dans l'estimation de l'évapotranspiration, et sont une variable permettant la description du climat d'une région donnée. L'étude des températures est utile, car elles influent sur un grand nombre des facteurs (évapotranspiration, l'enneigement et sa durée). Elles influent très fortement sur la répartition de la végétation,

La thermométrie, fait cependant l'objet de moins de mesures par rapport à la pluviométrie. Les mesures de températures de l'air obéissent à des règles très strictes, à l'instar de celles de la pluviométrie. Comme les températures sont très influencées par la nature et la proximité du sol, leur mesure doit se faire dans des abris météorologiques ventilés. Ces conditions permettent d'éviter tous les effets perturbateurs susceptibles de les affecter et rendent comparables les résultats de mesures d'un pays à un autre, et d'un poste à l'autre.

A partir des données de 5 stations représentatives du bassin (Oum el Bouagui, Ain Beida, Constantine, Guelma et Annaba), on étudiera les températures, leur variabilité spatiale et temporelle.

Seules les stations de Guelma et Annaba sont situées à l'intérieur du bassin (Guelma en secteur de vallée, Annaba en plaine littorale). Celles de Ain Beida et Oum El Bouagui sont représentatives des Hautes Plaines. Constantine Ain El Bey qui est représentative de la zone de contact Tell-Hautes Plaines est proche du bassin de l'oued Bouhamdane.

1.1. Les températures annuelles et leur variabilité interannuelle

Les stations utilisées sont représentatives des différents milieux du bassin; elles présentent également des séries de données de longueur inégale. Les stations d'Annaba Les Salines (aéroport) et Constantine Ain El Bey ont une période d'observation équivalente (1971/1972 -1987/1988). Les stations d'Oum El Bouagui et Ain Beida ont également une période d'observation égale (1986/1987 -1999/2000), la station de Guelma a été observée de 1987/1988 -1999/2000.

La moyenne annuelle est de 15 °C pour les stations d'Ain Beida, Oum El Bouagui et Constantine. Elle est de 18,06 °C pour Guelma et 17 .15°C pour Annaba. La température moyenne interannuelle est plus faible pour les stations continentales (Ain Beida, Oum El Bouagui et Constantine).

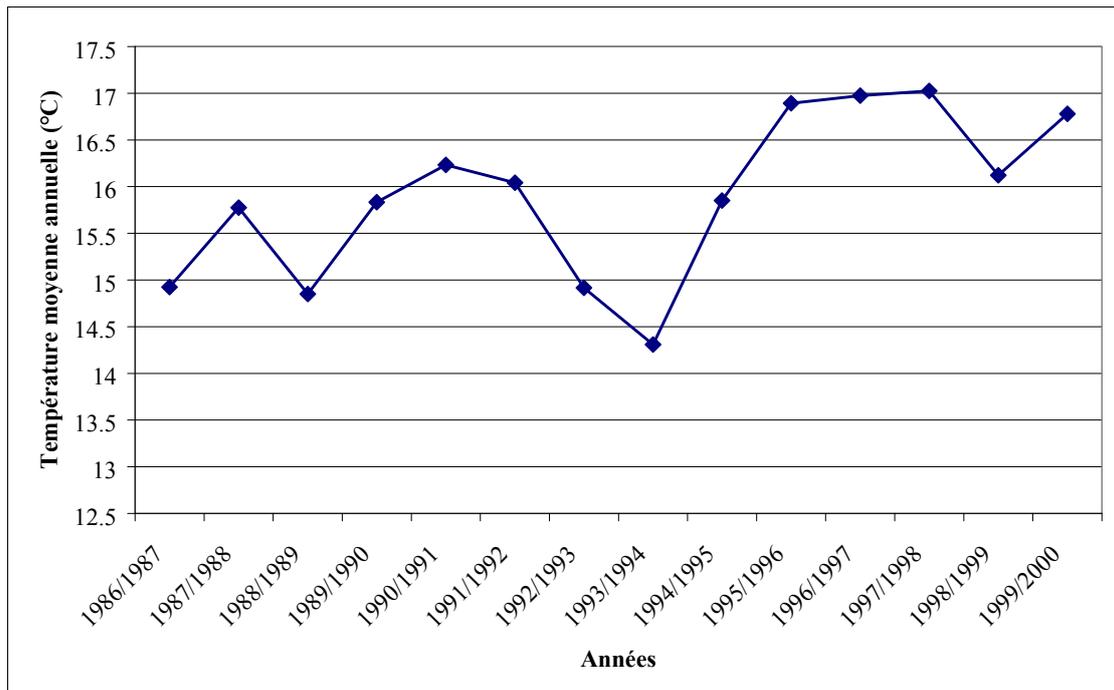


Fig.44: Variations des températures moyennes annuelles de la station d'Ain Beida

La moyenne annuelle des températures de la station d'Ain Beida est de 15.89 °C et l'écart-type est de 0.874 °C (coefficient de variation de 5.50 %).

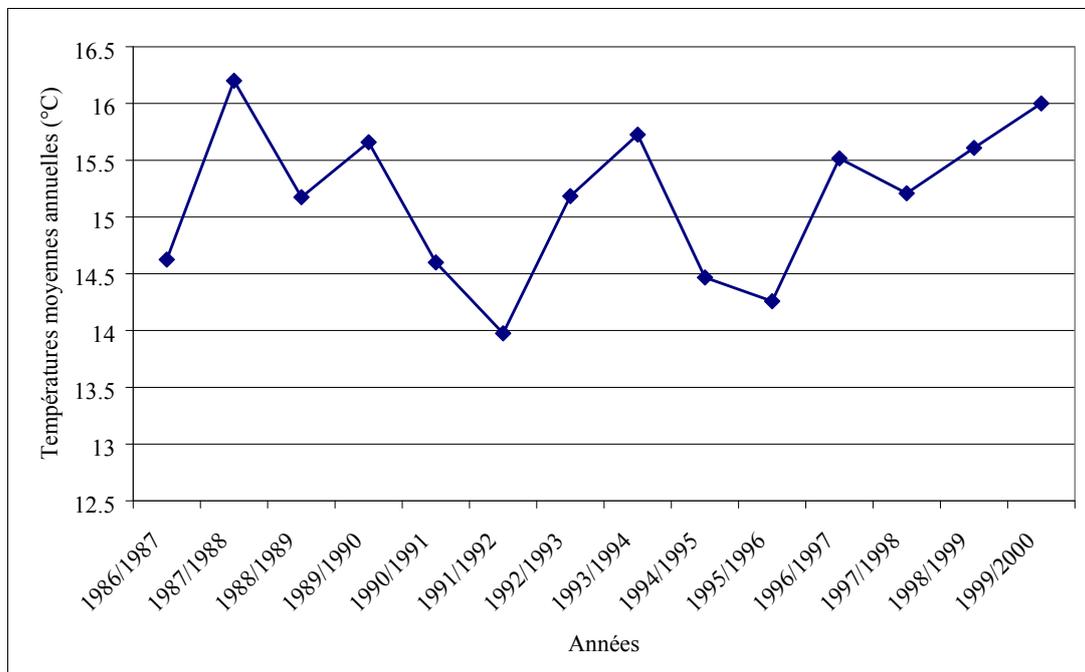


Fig.45 : Variations des températures moyennes annuelles de la station d'Oum El Bouagui

La moyenne annuelle des températures d'Oum El Bouagui est de 15.16 °C, l'écart-type est de 0.68 °C (coefficient de variation de 4.48 %).

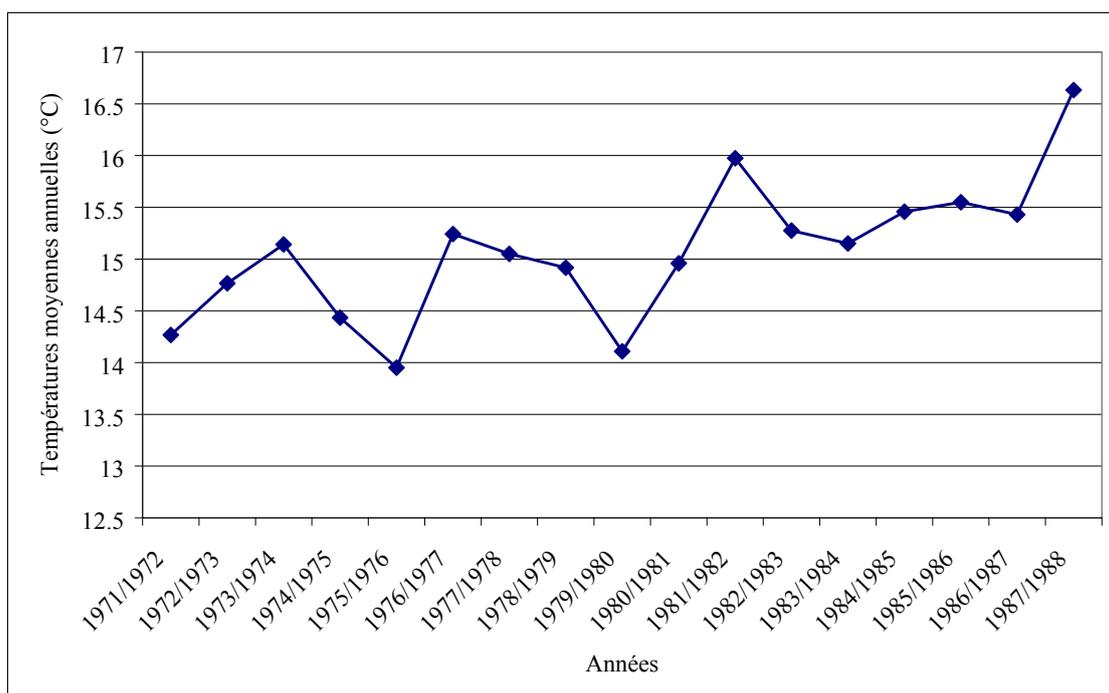


Fig.46: Variations des températures moyennes annuelles de la station de Constantine

La moyenne annuelle de la station de Constantine est de 15.07 °C, l'écart-type est de 0.67 °C (coefficient de variation de 4.4 %).

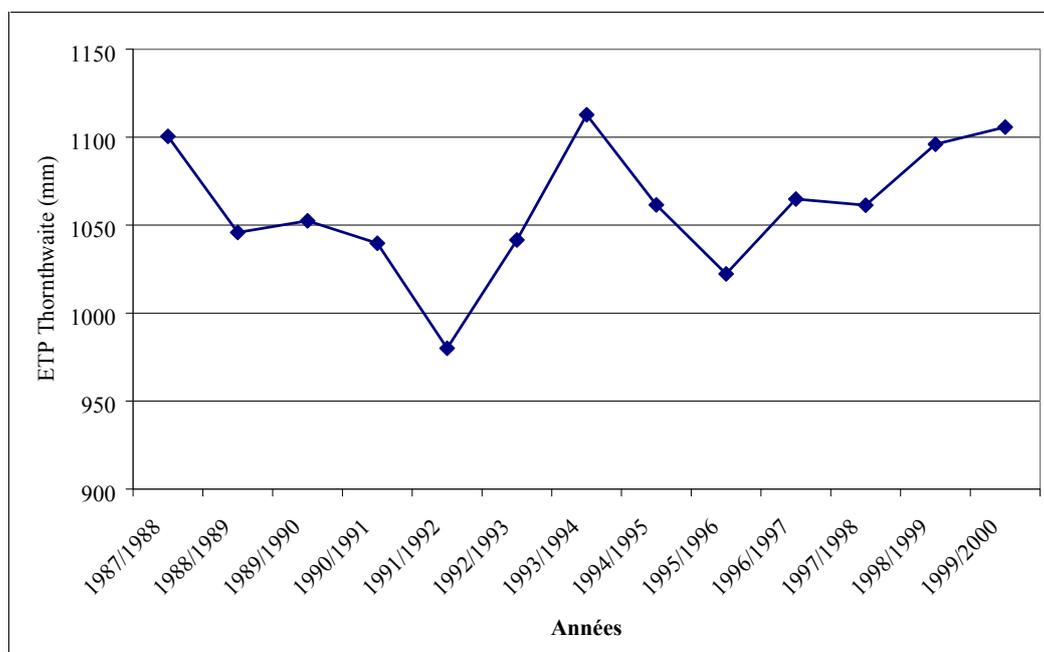


Fig.47: Variations des températures moyennes annuelles, Guelma

La moyenne annuelle de la station de Guelma est de 18.06 °C et l'écart-type de 0.60 °C (coefficient de variation de 3.30 %).

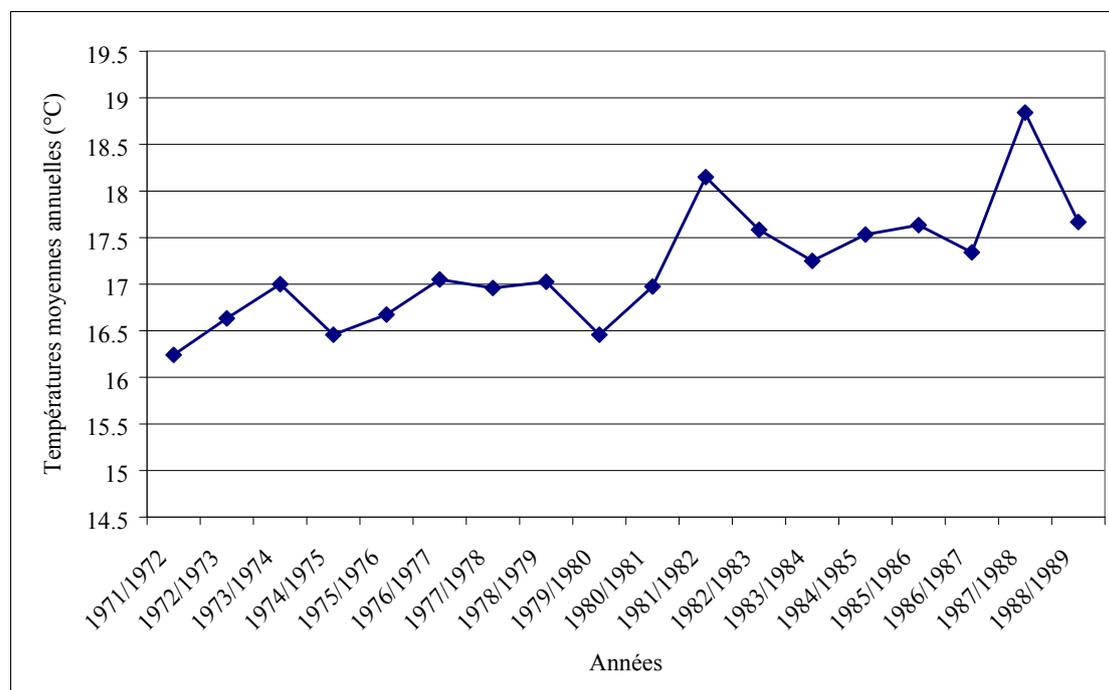


Fig.48: Variations des températures moyennes annuelles, station d'Annaba

La moyenne annuelle de la station de Annaba; 17.19 °C, écart-type : 0.65 °C (coefficient de variation de 3.76 %).

La variabilité interannuelle des températures est très faible, les coefficients de variations se situent entre 3,30 et 5,50% (fig.44 à 48).

1.2. Les températures mensuelles et le régime thermique.

Les courbes des températures moyennes inter-mensuelles permettent de caractériser les régimes thermiques des stations étudiées (fig.49). Les stations de Ain Beida et Oum El Bouagui sont situées dans le domaine des Hautes Plaines (altitude =900 m), Ain El Bey aéroport (Constantine, 694 m) est un site intermédiaire similaire aux Hautes Plaines. Guelma bénéficie d'un site de vallée (cuvette, 280 m) et Annaba est une station littorale (altitude = 23m).

La station de Guelma, avec un site de vallée (cuvette) est la plus chaude (juillet, août et septembre) et elle présente la moyenne la plus tiède en hiver (Janvier).

La station d'Annaba présente globalement les températures mensuelles les plus tièdes en hiver (décembre, janvier et février) et les moins chaudes en été.

Pour les stations d'Oum El Bouagui et Ain Beida, les températures des mois d'hiver sont les plus faibles; 4 valeurs mensuelles sont inférieures à 10°C.

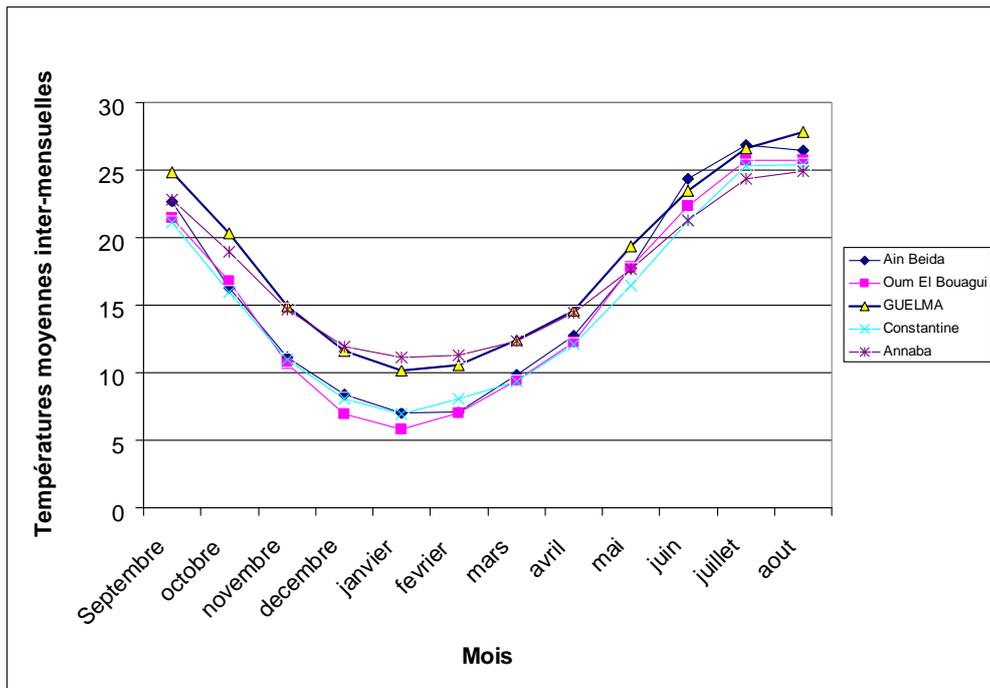


Fig. 49: Variations des températures moyennes inter-mensuelles

Pour l'ensemble des stations, les valeurs maximales dépassent 25°C . Pour les stations continentales (Ain Beida, Oum El Bouagui et Constantine), les températures hivernales sont plus froides que celles de Guelma (site encaissé de vallée) et Annaba (à cause de la proximité de la mer) (fig.49).

2. L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE MENSUELLE ET ANNUELLE

L'évapotranspiration potentielle est une notion dégagée dans les années 1950 par Thornthwaite. Elle exprime la quantité d'eau qui s'évaporerait du sol et serait transpirée par la végétation si aucun problème d'alimentation en eau ne se posait.

Ainsi définie, l'E.T.P. est donc indépendante de la disponibilité réelle du sol en eau et n'est fonction que de la capacité du milieu atmosphérique ambiant à provoquer l'évapotranspiration et fait donc surtout intervenir les facteurs énergétiques.

L'E.T.R. est la quantité d'eau réellement évapotranspirée. Elle dépend donc de la demande (E.T.P.) et de l'offre qui est l'état de la réserve en eau du sol. L'eau est dans ce cas un facteur limitant.

La notion d'E.T.P. a l'avantage de synthétiser les facteurs climatiques qui influent positivement sur le déficit d'écoulement (températures moyennes mensuelles, insolation, radiation, humidité relative). Combinée à la pluie moyenne mensuelle et à la réserve en eau du sol, elle permet d'évaluer l'évapotranspiration réelle qui est assimilée au déficit d'écoulement dans les études hydrologiques.

Les mesures de l'E.T.P. se font grâce aux cases lysimétriques et aux évapotranspiromètres.

Mais l'évapotranspiration potentielle est calculée le plus souvent grâce à des formules. Deux types de formules sont à distinguer:

- les formules « empiriques » issues de l'ajustement statistique de résultats expérimentaux à des facteurs climatiques jugés importants. Ce sont les formules de Thornthwaite et de Turc.
- les formules « physiques » fondées sur le bilan d'énergie, et qui prennent en compte selon une base théorique le rôle respectif de chaque paramètre: le rayonnement global, température, déficit de saturation de l'air en vapeur d'eau, vitesse du vent. Elles regroupent la formule de Penman, et celles qui en dérivent, Bouchet, Brochet – Gerbier.

Les formules du second type sont les plus performantes, mais leur application nécessite la disponibilité de données concernant des paramètres climatiques plus nombreux et plus difficiles à obtenir (durée d'insolation, vent moyen ...).

La formule de Thornthwaite est très utilisée pour deux raisons, bien qu'elle sous-estime l'E.T.P., surtout en été: facilité d'emploi car fondée sur deux paramètres simples: température moyenne mensuelle et insolation théorique exprimée par un coefficient fonction de la saison et de la latitude.

On évaluera l'E.T.P. sur le bassin de la Seybouse à partir des formules très utilisées en domaine méditerranéen, à savoir : Thornthwaite, Turc et la formule dite A.N.R.H.

2.1. Evaluation de l'E.T.P. Thornthwaite

La formule de Thornthwaite s'écrit comme suit :

$E_{tp} \text{ mm} = 16 * (10 t / I)^a * K$. Avec:

T: température moyenne mensuelle.

I = Somme de i, avec $i = (t / 5)^{1.514}$

$a = (0.016 / I) + 0.5$.

K = facteur correctif fonction de la saison et de la latitude de la station.

Calcul de a = $(6.75 * 10^{-7} * I^3) - (7.71 * 10^{-5} * I^2) + (1.79 * 10^{-2} * I) + 0.49$.

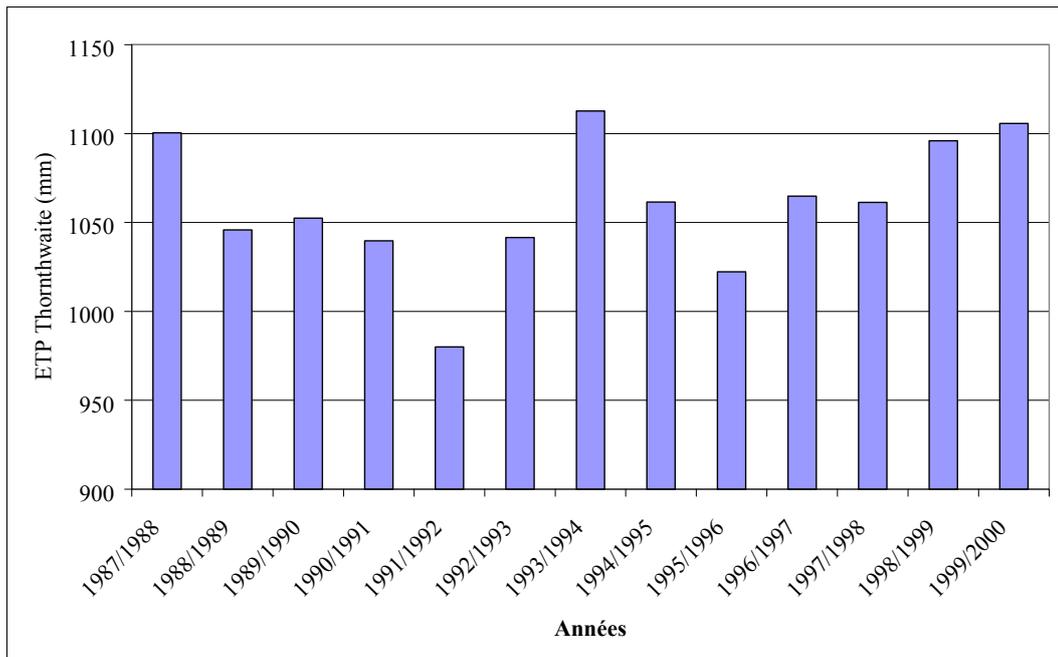


Fig.50 : Evapotranspiration Thornthwaite de la station de Guelma (1987/88 à 1999/2000)

La moyenne de l'E.T.P. Thornthwaite de la station de Guelma est de 1060,34 mm, l'écart-type est de 37.25 mm (CV = 3.512%) (fig.50).

Pour les 5 stations, l'E.T.P. Thornthwaite annuelle varie en annuel de 780 mm à Ain Beida à 1060 mm à Guelma (tabl.26).

2.2. L'E.T.P. Turc

La formule de Turc, (1954) s'écrit comme suit :

$$Etp = \left(\frac{0.4 * t}{15 + t} \right) * (I_g + 50) * K$$

$$I_g = I_{ga} * \left(0.18 + 0.62 * \frac{h}{H} \right)$$

Avec I_g : moyenne mensuelle de la radiation solaire en cal/cm²/jour

I_{ga} : moyenne mensuelle de la radiation solaire aux confins de l'atmosphère. Les valeurs de I_{ga} sont tabulées.

$T^{\circ}c$: température moyenne mensuelle en degrés centigrades.

h : insolation mesurée avec l'héliographe

H : insolation théorique fonction de la latitude et des saisons (heures/mois).

Les valeurs de H sont tabulées

0.40 : mois de 30 jours

0.37 : mois de février.

k : facteur qui dépend de l'humidité relative du mois.

si

$$hr > 50\%, k = 1$$

si

$$hr < 50\%, k = 1 + \left(50 - \frac{hr}{70}\right)$$

Tableau.23: Variabilité de l'E.T.P. TURC pour les stations étudiées

	Guelma	Constantine	Annaba	Ain Beida	Oum El Bouagui
ETP moyenne	1196.7	1092.5	1143.4		
Ecart-type	42.6	42.7	31.8	N.C.	N.C.
CV %	3.56	3.9	2.78	N.C	N.C
Maximum	1266.1	1159.2	1197.5	N.C	N.C
Année	1993/1994	1981/1982	1987/1988	N.C	N.C
Minimum	1123.2	1018.1	1079.9	N.C	N.C
Année	1991/1992	1971/1972	1971/1972	N.C	N.C

N.C.:E.T.P.Turc non calculée car les données d'insolation h, nécessaires ne sont pas disponibles.

Pour les 5 stations, E.T.P. Turc annuelle de varie en annuel de 1092 mm à Constantine à 1197mm à Guelma (tabl.23).

2.3. L'E.T.P. A.N.R.H.

La formule dite E.T.P. "A.N.R.H." a été proposée à la suite d'une étude publiée en 2002 (A.N.R.H., 2002), avec l'expertise de Laborde dont l'objectif était d'évaluer l'évapotranspiration potentielle mensuelle de Penman en se basant sur les mesures de la température moyenne mensuelle, les 2 autres paramètres étant le mois à considérer et la position géographique de la station.

$$E.T.P. ANRH = K_r * K_m * (H - 187) * (0,032 * t + 0,077)$$

K_r : coefficient régional;

K_m : coefficient mensuel (uniforme pour toutes les stations, il varie en fonction des mois);

H: la durée théorique d'insolation du mois i (en heures par mois);

t: température moyenne mensuel en°C. Une relation permet d'exploiter les données thermométriques de Seltzer:

$$t_{\text{récent}} = 1,0069 * t_{\text{Seltzer}} + 0,143.$$

Tableau.24 : Variabilité de l'E.T.P. A.N.R.H. pour les stations étudiées.

	Ain Beida	Oum El Bouagui	Constantine	Guelma	Annaba
E.T.P. moyenne	1311.5	1261.7	1229.9	1288.4	1334.7
Ecart-type	60.6	52.2	48.0	40.4	44.4
CV %	4.6	4.1	3.9	3.1	3.3
Maximum	1407.5	1333.9	1332.0	1347.2	1445.8
Année	1997/1998	1999/2000	1987/1988	1993/1994	1987/1988
Minimum	1211.5	1176.9	1144.7	1200.8	1271.2
Année	1993/1994	1991/1992	1979/1980	1991/1992	1971/1972

Pour les 5 stations, les valeurs de l'E.T.P. A.N.R.H. dépassent en moyenne 1100 mm. La variabilité interannuelle est faible, les coefficients de variation sont compris entre 3.13 et 4.60%. L'écart le plus fort entre la valeur maximale et la valeur minimale est de 175 mm pour la station d'Annaba (13 % par rapport à la moyenne) (tabl.24).

Pour les 5 stations étudiées, l'E.T.P. A.N.R.H. varie de 1230 à Constantine à 1335 à Annaba. La saison chaude représente pour toutes les stations plus des 2/3 du total annuel (tabl.25)

Tableau 25 : Parts saisonnières de l'E.T.P. A.N.R.H.

Station	Oum El Bouagui	Ain Beida	Guelma	Constantine	Annaba
Saison froide	22,9	22,9	26,5	23,9	31,5
Saison chaude	77,1	77,1	73,5	76,1	68,5
Total en %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
ETP annuelle (mm)	1261,6	1311,5	1288,4	1229,9	1334,7

Les figures montrent la variabilité des valeurs moyenne inter-mensuelles de l'E.T.P. A.N.R.H. pour les 5 stations (Oum El Bouagui, Ain El Beida, Constantine, Guelma, Annaba) (fig. 51 à 55).

	<p><i>Fig.51: Valeurs de ETP ANRH moyennes inter-mensuelles, station de Oum El Bouagui (1986/1987-1999/2000)</i></p>
	<p><i>Fig.52: Valeurs de ETP ANRH moyennes inter-mensuelles de la station de Ain Beida (1986/1987-1999/2000)</i></p>
	<p><i>Fig. 53: Valeurs d'ETP ANRH moyennes inter-mensuelles de la station de Constantine (1971/1972 - 1987/1988)</i></p>
	<p><i>Fig.54: Valeurs d'ETP ANRH moyennes inter-mensuelles de la station de Guelma (1987/1988 - 1999/2000)</i></p>
	<p><i>Fig.55: Valeurs d'ETP ANRH moyennes inter-mensuelles de la station d'Annaba (1971/1972-1987/1988)</i></p>

2.4. Comparaison des résultats

Les valeurs de l'E.T.P. Thornthwaite sont sous- estimées par rapport à celles de Turc et à l'E.T.P. A.N.R.H. (tabl.26).

Les valeurs les plus fortes sont celles calculées par l'E.T.P. A.N.R.H. Pour la station de Guelma, l'E.T.P. Turc est légèrement supérieure à celle calculée par la formule A.N.R.H. Ceci s'explique par le contexte géomorphologique (site de cuvette).

Les valeurs mensuelles de l'E.T.P. A.N.R.H. sont bien évidemment très variables selon les saisons. On peut mettre en évidence une saison froide d'octobre à mars et une saison chaude d'avril à septembre (tabl.25).

La saison chaude contribue pour plus de 70 % pour les stations continentales et pour 68.9 % pour la seule station littorale (Annaba) (tabl.25).

La variabilité interannuelle des valeurs d'E.T.P. est moins prononcée que celle des autres paramètres hydro-climatologiques tels que les pluies et les débits par contre à l'échelle mensuelle elle suit la variabilité des températures

Tableau 26 : Résultats du calcul de l'E.T.P. annuelle Thornthwaite, Turc et E.T.P. A.N.R.H.

	ETP THORNTHWAITE mm	ETP TURC mm	ETP ANRH mm	Périodes
Annaba	786.67	1143.4	1334.7	1971/1972- 1987/1988
Guelma	1060.34	1294.4	1288.4	1987/1988- 1999/2000
Constantine	822,86	1092.5	1229.9	1971/1972- 1987/1988
Ain Beida	780,5	non calculé	1311.5	1986/1987- 1999/2000
Oum El Bouagui	834.5	non calculé	1261.7	1986/1987- 1999/2000

3. LES ÉTAGES BIOCLIMATIQUES

La combinaison pluies-températures est utilisée pour définir les étages bioclimatiques. Le bassin de la Seybouse est soumis aux étages bioclimatiques sub-humide au Nord et semi-aride dans sa partie septentrionale intégrant aussi bien la vallée de Guelma que la zone des Hautes Plaines (fig.56).

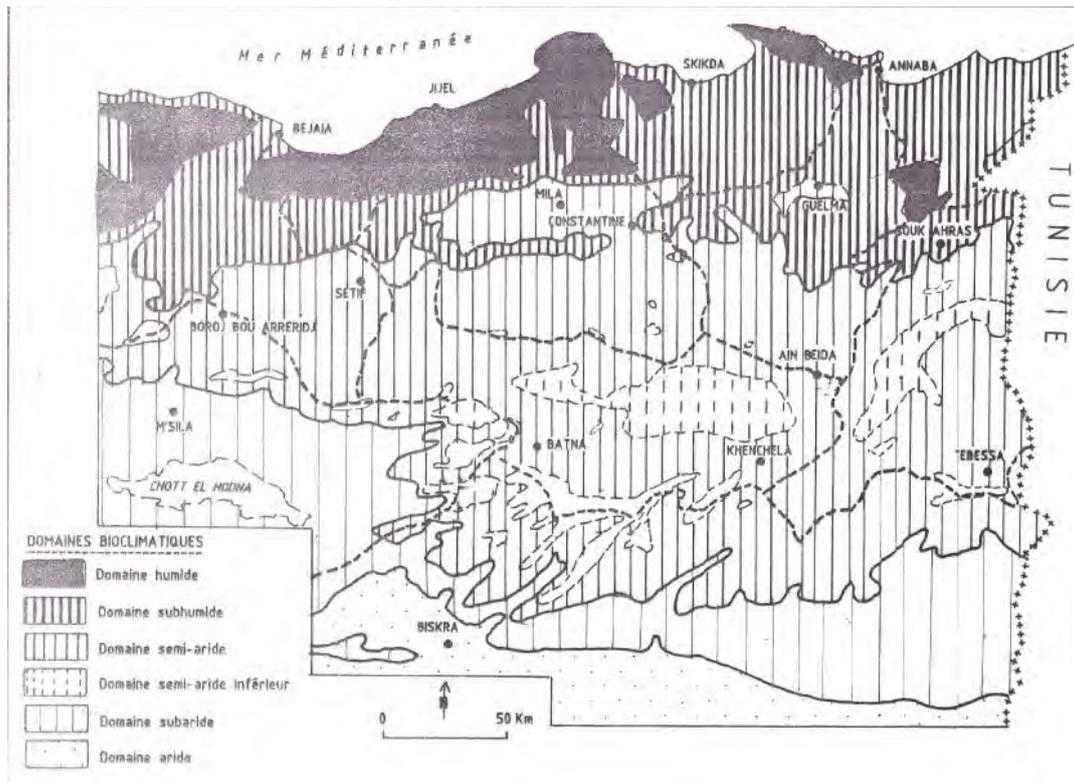


Fig.56: Les étages bioclimatiques dans l'Est algérien. (D'après Côte, 1998)

4. DEFICIT EN EAU ET PERIODE SECHE

Il semble intéressant de terminer ce chapitre consacré à la climatologie par la présentation des zones de déficit hydrique et de la variabilité spatiale de la durée de la saison sèche dans le bassin de la Seybouse. Ces deux paramètres cartographiés sous Surfer, ont un intérêt certain dans le domaine des études hydrologiques et constituent des outils de travail.

4.1. Les zones de déficit en eau agricole

La carte des déficits hydriques est extraite des travaux de Mebarki et Laborde (2012) et de travaux antérieurs (Mebarki, 2007, 2005) (fig. 57). L'exploitation des bases de données mensuelles des précipitations et des évapotranspirations potentielles (ETP) de l'ANRH sur un maillage de 2 km de côté (quadrillage kilométrique Lambert de l'Algérie du Nord) a abouti à la généralisation des bilans hydriques mensuels de l'Algérie du Nord.

La méthode de travail est basée sur la modélisation du passage de l'E.T.P. à l'évapotranspiration réelle (E.T.R.), établie suivant la démarche de Thornthwaite de décroissance linéaire de la réserve facilement utilisable (R.F.U.) du sol. Une deuxième approche adoptée suppose que l'E.T.R. dépend du stress hydrique (décroissance exponentielle).

La carte illustre l'ampleur des déficits hydriques dans la région, liée à l'indigence pluviométrique en saison sèche qui se conjugue à une évapotranspiration élevée. La variabilité spatiale des déficits hydrique se traduit par des valeurs allant de

600 mm au Nord à plus de 1000 mm dans la zone semi-aride des Hautes Plaines, au Sud.

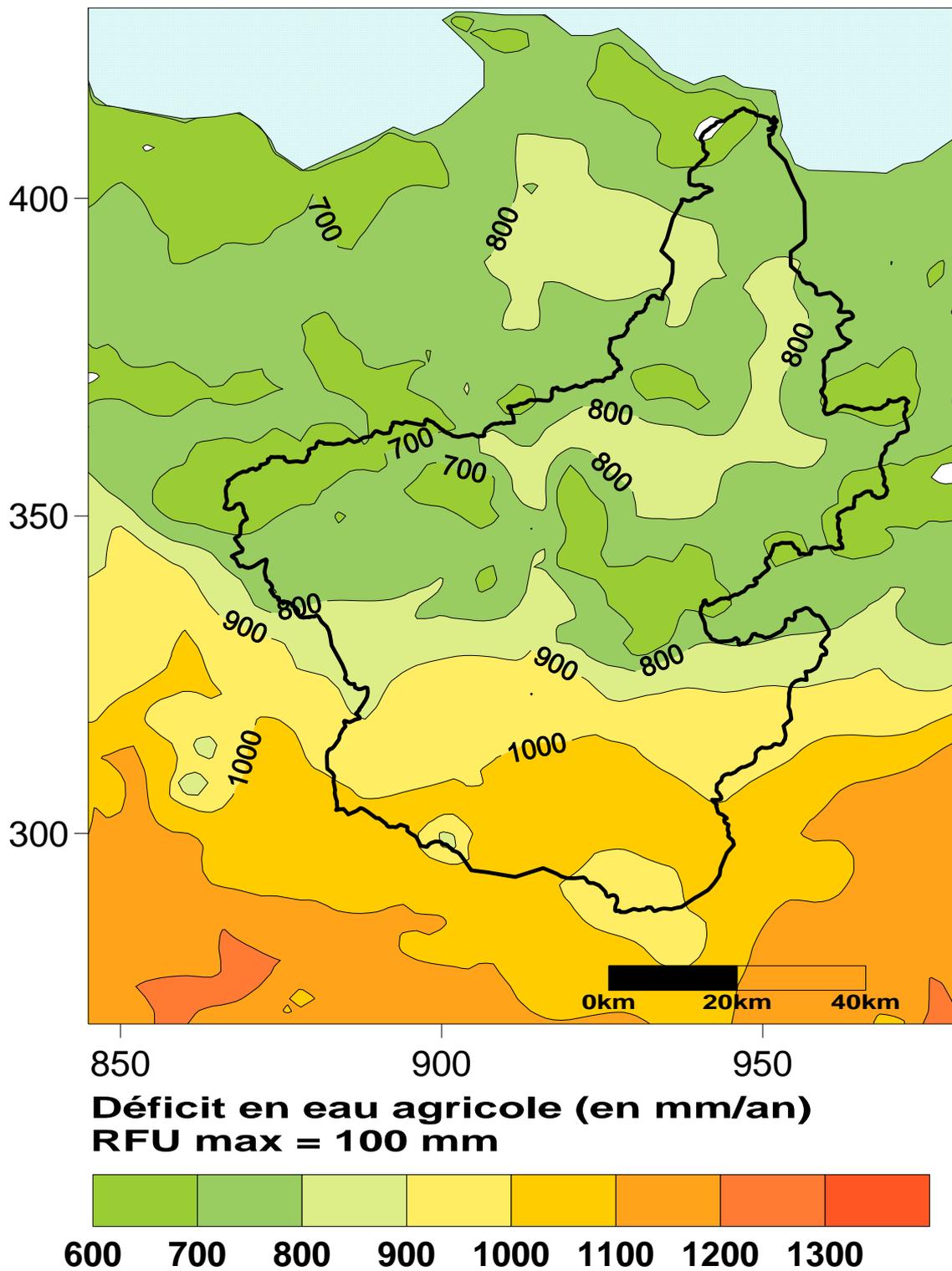


Figure 57: Déficit en eau agricole (en mm/an), R.F.U. max= 100mm.
(D'après Mebarki A. et Laborde JP., 2012)

4.2. Détermination de la période sèche

D'après l'approche cartographique du bilan simplifié de Thornthwaite, les auteurs ont considéré comme « mois sec » tout mois de l'année concerné par un déficit agricole D_a , la réserve hydrique du sol étant totalement épuisée. Le nombre annuel de « mois secs » est totalisé aux nœuds de chaque maille élémentaire, ce qui permet de tracer des zones d'iso-mois secs à travers le territoire de l'Algérie septentrionale (Mebarki et Laborde, 2012).

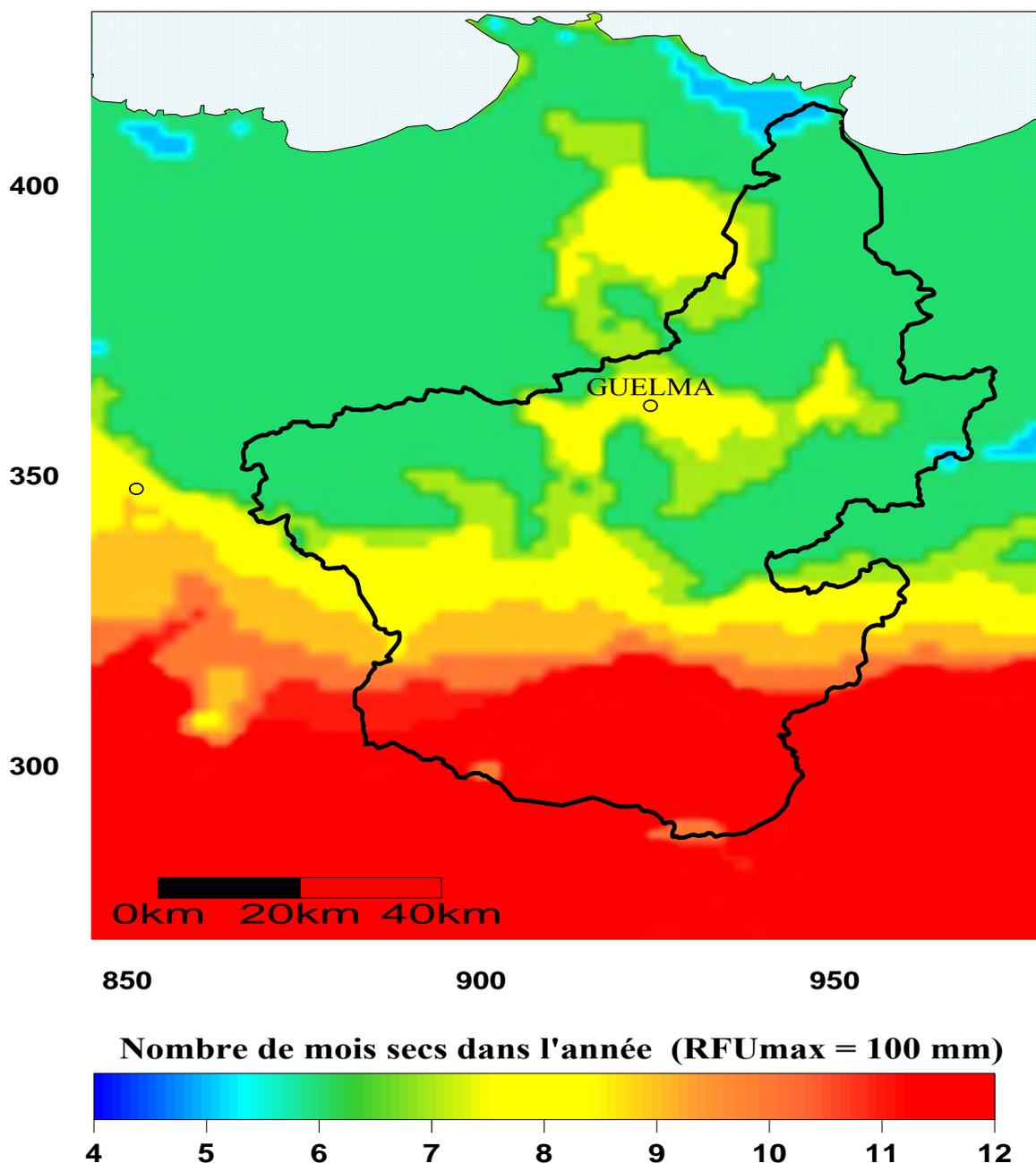


Figure 58: Répartition du nombre de mois secs dans l'année dans le bassin de la Seybouse (D'après Mebarki et Laborde, 2012)

La carte représentant le bassin de l'oued Seybouse montre que le nombre de mois secs dans l'année varie de 6 mois dans l'extrême Nord à 12 mois dans le domaine des Hautes Plaines, en passant par une période de 7 à 8 mois dans la lisière Nord des Hautes Plaines (fig. 58).

CONCLUSION DU CHAPITRE 3

La variabilité spatiale des températures est saisissante dans le bassin de la Seybouse, comme l'ont révélé les données issues de cinq stations thermométriques.

Par ailleurs, il a été montré que la variabilité temporelle à l'échelle des moyennes interannuelles des températures est moins accentuée que celle des pluies alors que l'effet saisonnier des températures est très sensible. La moyenne annuelle est de 15 °C pour les stations d'Ain Beida, d'Oum El Bouagui et de Constantine (effet de l'altitude et de la continentalité). Elle est de 18,06 °C pour Guelma (site de cuvette) et de 17,15°C pour Annaba (proximité de la mer).

Des résultats très intéressants peuvent être tirés de l'étude A.N.R.H. sur les évapotranspirations potentielles en Algérie. Même si les données de mesures thermométriques sont moins nombreuses (peu de postes de mesures et des périodes d'observation assez courtes), l'exploitation de deux périodes de mesures thermométriques (série de Seltzer et période post-indépendance) et la recherche de corrélations entre les données de ces deux périodes a permis d'étoffer l'échantillon de mesures. Une critique des données thermométriques a par ailleurs été réalisée. Le résultat le plus important de cette étude de l'A.N.R.H. est d'avoir validé une formule de calcul de l'ETP, appelée formule "A.N.R.H.", qui est l'équivalent de la formule de Penman sans être aussi exigeante en données d'entrée.

Pour les cinq stations étudiées, l'E.T.P. Turc annuelle varie en valeurs annuelles de 1092 mm à Constantine à 1197 mm à Guelma, alors que l'E.T.P. A.N.R.H. varie de 1230 mm à Constantine à 1335 mm à Annaba. Les valeurs de l'E.T.P. A.N.R.H. sont le plus souvent supérieures à celles de l'E.T.P. Turc, elles-mêmes supérieures à celles calculées par la formule de Thornthwaite, connues par le fait de sous-estimer l'E.T.P. dans cette région.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Le climat, l'une des composantes les plus importantes des bassins versants, constitue le facteur le plus influent sur le phénomène d'écoulement, à la fois annuel et extrême (crues).

Le chapitre 1 a été consacré à l'analyse statistique des séries pluviométriques de 21 postes pluviométriques dont les données ont été collectées auprès de l'A.N.R.H. et de l'O.N.M. Les données présentant des lacunes ont fait l'objet d'une étude d'homogénéisation basée sur l'utilisation des A.C.P. (vecteurs régionaux) et des régressions multiples. La fiabilité des séries pluviométriques a été préalablement testée par la méthode des cumuls des résidus de régressions. L'homogénéisation des séries pluviométriques a été validée grâce au calcul de la période fictive n' .

Le chapitre 2, dédié à la cartographie des pluies, a permis le passage de l'information ponctuelle à une information couvrant tout l'espace du bassin versant. La lame précipitée est estimée à 570,3 mm sur l'ensemble des bassins jaugés de la Seybouse, avec des valeurs estimées par sous-bassin variant de 358,9 mm sur le bassin de l'oued Cherf amont à 741,3 mm sur le bassin de l'oued Ressoul. La réalisation des cartes pluviométriques interannuelles (septembre 1969 -août 1999 et septembre 1971 - août 1988) et des cartes des pluies fréquentielles décennales sèches et humides s'est faite en trois étapes principales: régression morphométrie – pluviométrie, interpolation des résidus de régression et cartographie de la pluie.

Les quatre régressions multiples calculées ont intégré les paramètres explicatifs suivants: Y Lambert et l'expression $e^{-d/p} * z$. Seuls les coefficients de régression varient. Par contre, les pluies fréquentielles décennales humides ont intégré le paramètre X Lambert comme facteur explicatif. Le variogramme sphérique a permis, dans les quatre cas, d'ajuster les résidus de régression.

La carte des pluies fréquentielles décennales humides a mis en valeur des valeurs comprises entre 345 mm (poste d'Ain Babouche) et 1222, 4 mm à Mechroha soit une augmentation respective de 115 à 356 mm. La majeure partie du bassin est sous une pluie comprise entre 600 et 800 mm alors que pour les pluies moyennes, elle est comprise entre 400 et 600 mm. Les valeurs interpolées atteignent 1600 mm dans les Monts de Séraïdi (djebel Edough).

La carte des pluies fréquentielles décennales sèches a permis de mettre en lumière une diminution moyenne de -34,01 % avec une très forte diminution pour les postes pluviométriques situés en Hautes Plaines. La diminution la plus forte est celle d'Ain Babouche (-50,10%). Les stations situées à proximité du littoral enregistrent les plus faibles diminutions de pluies (Ain Berda, Annaba, Kerma, Dréan).

L'intérêt pour l'élaboration des scénarios pessimistes est de quantifier les apports et leurs répercussions sur les volumes disponibles et également de simuler des

scénarios concernant le remplissage insuffisant des barrages, le recours à des volumes plus importants en eaux souterraines, et également aux transferts d'eau de barrages situés dans les bassins-versants voisins, caractérisés par un climat plus arrosé ou ayant des besoins moins importants que ceux du bassin de la Seybouse.

Selon Laborde (2009,2010), des simulations ont montré que si les pluies annuelles diminuaient de 15 %, les écoulements annuels diminueraient jusqu'à 40 %, ce qui implique une diminution très importante des apports entrant aux barrages.

De même, des études ont montré que les pluies de fréquence décennale ne produisent pas forcément les débits de fréquence décennale (Mébarki, 2005).

Cinq stations climatologiques ont été utilisées pour l'étude des températures et l'évapotranspiration potentielle. L'E.T.P. est évaluée à l'aide des formules de Thornthwaite, de l'A.N.R.H. et de Turc. Les bilans hydriques mensuels ont été esquissés à travers en particulier l'exploitation des cartes du déficit hydrique et des zones d'égal mois "secs" développées par Mebarki sur l'Algérie du Nord.

Si l'effet saisonnier est très sensible pour les températures, c'est la variabilité spatiale des températures qui est intéressante à saisir, car il a été prouvé que la variabilité temporelle à l'échelle des moyennes interannuelles des températures est moins accentuée que celle des pluies (A.N.R.H., 2002). Les valeurs de l'E.T.P. A.N.R.H. sont le plus souvent supérieures à celles de l'E.T.P. Turc.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE DES ECOULEMENTS LIQUIDES ET MOBILISATION DES EAUX SUPERFICIELLES

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE

Après l'étude détaillée dans la Première Partie des facteurs qui conditionnent l'écoulement, les caractéristiques climatologiques et les précipitations en particulier, cette Deuxième Partie, articulée autour de trois chapitres, est consacrée aux écoulements liquides de l'oued Seybouse et ses affluents et à la mobilisation des eaux de surface au sein du bassin et ses abords.

Après la présentation dans le chapitre 4 des caractéristiques physiques du bassin-versant (données morphométriques, géologiques et hydrogéologiques, et couverture végétale), le chapitre 5 est dédié aux écoulements liquides (bilans interannuels; variabilité spatio-temporelle des écoulements annuels, mensuels et journaliers; débits maximaux moyens journaliers et instantanés de crue et leurs relations avec les pluies maximales). Le cas du bassin de l'oued Bouhamdane est étudié pour illustrer la méthode de quantification des débits de crue décennaux en se basant sur une cartographie des pluies journalières maximales décennales.

Le chapitre 6 porte sur l'étude de la mobilisation des eaux de surface du bassin de la Seybouse par le biais des barrages et des transferts intra et inter-bassins. Le volet relatif à l'utilisation des eaux des deux grands barrages en exploitation (Hammam Debagh sur l'oued Bouhamdane et Foug El Khanga sur l'oued Cherf amont) complète cette analyse sur les aménagements hydrauliques.

Chapitre 4. Le bassin-versant de la Seybouse

INTRODUCTION

Le bassin-versant de la Seybouse, d'une superficie de 6745 km², présente, à l'instar des bassins à écoulement exoréique de l'Algérie orientale (Kébir-Rhumel, Soummam, etc...), une extension latitudinale importante. Les limites méridionales du bassin sont à 120 km à vol d'oiseau de la mer Méditerranée.

Outre les caractéristiques climatiques et bioclimatiques étudiés dans les deux chapitres précédents, les autres composantes du cadre physique du bassin de la Seybouse lui confèrent une diversité de milieux, depuis le bassin amont situé dans les Hautes Plaines jusqu'au littoral, ce qui entraîne des répercussions aussi bien sur les écoulements que sur les aménagements.

1. L'ORGANISATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE: L'OUED SEYBOUSE ET SES PRINCIPAUX AFFLUENTS

1.1. L'artère principale

Deux zones montagneuses constituent les principales zones d'alimentation en eau du bassin-versant de la Seybouse :

- les Monts de la Medjerdah, avec le djebel Ras El Alia qui culmine à 1317 m, et le djebel Zaoura (1292 m), sur le versant septentrional du Tell. Ils constituent une zone commune de partage des eaux et donnent naissance à trois artères hydrographiques:
- l'oued Cherf formé par la rencontre de l'oued Tiffech-Lahmimime et l'oued Crab;
- l'oued Zouamel dans le bassin amont de la Medjerdah;
- l'oued R'biba pour l'oued Mellah.

Une seconde zone montagneuse est constituée par le djebel Sidi Reghiss et la chaîne des Sellaoua. L'oued Settara de direction Sud-Ouest Nord-Est est issu de la rencontre de deux oueds. Le premier issu de la rencontre des oueds Dhimine et Mebdoua et le second des oueds Ain Babouch et Ousseh. Tous ces cours d'eau sont alimentés à partir de cours d'eau secondaires assez denses issus du Djebel Sidi Reghiss et de la chaîne des Sellaoua.

L'oued Cherf (fig. 59) qui constitue le bassin amont de l'oued Seybouse résulte de la rencontre des oueds Cherf et Settara qui drainent respectivement 1099.4 km² et 668.4 km².

Les oueds Lahmimime et oued Crab prennent leurs sources sur le piémont Sud des monts de la Medjerdah et forment l'oued Cherf après leur rencontre. Celui-ci reçoit des affluents issus des Hautes plaines: Oued Radran, oued Trough et oued Ain Senoub.

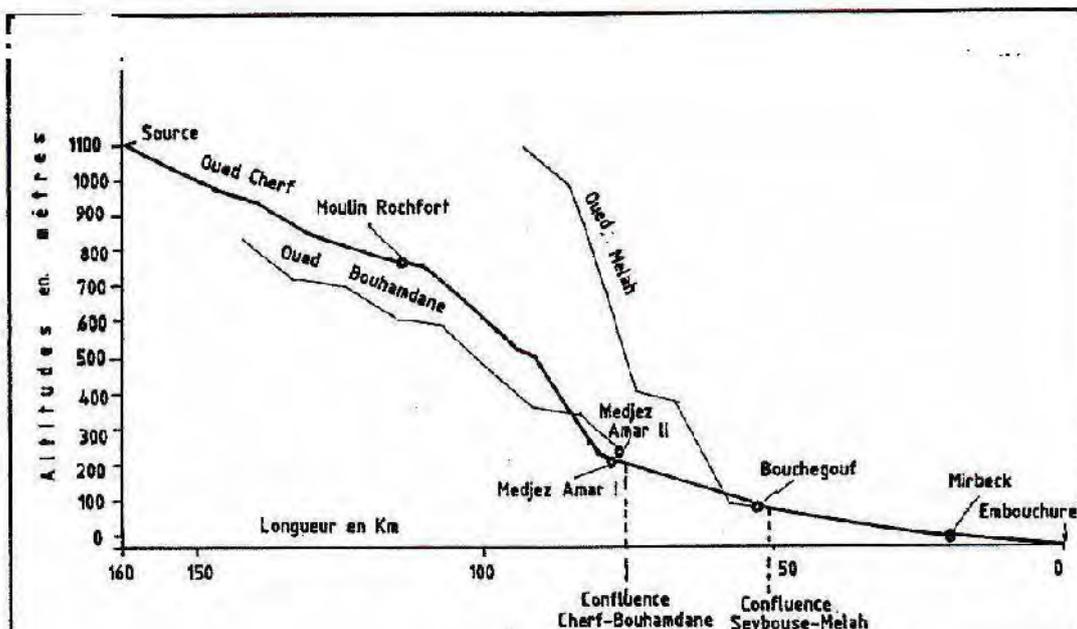


Fig.60: Profil en long de l'oued Seybouse (d'après Ghachi, 1986)

L'oued Cherf résulte de la rencontre des oueds Cherf et Settara qui drainent respectivement 1099.4 km^2 et 668.4 km^2 .

Après sa confluence avec l'oued Mellah à l'aval de Bouhegouf, la Seybouse parcourt dans son cours inférieur une zone de plaine littorale. Les oueds Ressoul, Derdar et Meboudja issus des moyennes montagnes affluent dans la Basse Seybouse.

La Basse Seybouse se caractérise par des pentes faibles et par un faible développement du chevelu hydrographique. Mais les affluents de rive gauche issus de la chaîne numidique sont assez importants (oued Ressoul et oued Dardar).

Les grandes artères de l'oued Seybouse (fig. 59 et 60) présentent une organisation orthogonale liée à la tectonique.

1.2. Les affluents de l'oued Seybouse caractérisés par leurs profils en long

1.2.1. L'oued Cherf

Limité à la station de Aïoun Settara, le bassin de l'oued Cherf est inclus dans sa presque totalité en Hautes Plaines, et draine un bassin de 1743 km^2 . Si on l'étend à sa confluence avec le Bouhamdane à Medjez Ammar, il intègre une zone de transition avec le Tell (fig.59).

1.2.2. L'oued Bouhamdane

C'est un bassin sud-tellien au relief compartimenté. Le réseau hydrographique principal est constitué par les oueds Zenati, Sabath et Bouhamdane proprement dit. Les altitudes sont comprises entre 270 m, à la station de Medjez Ammar II au niveau de la vallée et 1281 m au sommet du djebel Djebel Mzarat Sidi Chagref (fig.61).

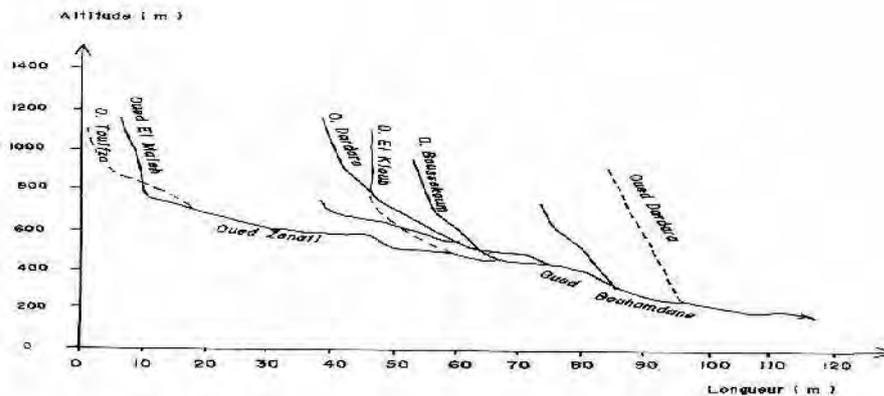


Fig.61: Profil en long de l'oued Bouhamdane et de ses principaux affluents
(D'après mémoires de fin d'études de Boucenna et al, Messaoudi encadrés par Louamri)

1.2.3. La Moyenne Seybouse

Le bassin de la Moyenne Seybouse (14 04) est en fait constitué de bassins de surfaces modestes qui alimentent des oueds avec les écoulements des affluents issus des versants Nord et Sud de la vallée ,perpendiculaires à l'oued principal, l'oued Seybouse (oued Helia, oued Bou Sorra, oued Boumia) (fig.59). Les apports de ces bassins de surfaces modestes ne peuvent pas être négligés. Ils sont très utiles dans le cadre des aménagements des ressources en eau à l'échelle des communes. Certains de ces bassins alimentent des retenues collinaires.

Dans le bassin de la Moyenne Seybouse, les oueds ne pas équipés de stations hydrométriques.

1.2.4. L'oued Mellah

L'oued Mellah est le principal affluent de rive droite de la Seybouse avec laquelle il conflue au débouché de la vallée de Guelma. Il doit son nom à la forte salinité des eaux dans le bassin aval. Celle-ci est due au lessivage des terrains gypsifères du Trias situés dans le bassin moyen. D'une superficie de 551 km² il draine une zone montagneuse du versant septentrional du Tell (les Monts de la Medjerdah) (fig.62).

De par ses caractéristiques topographiques et morphométriques, le bassin peut être décomposé en trois zones différenciées. Le bassin amont est essentiellement montagneux et accidenté, avec des sommets dépassant 1000m (djebel Ras El Alia 1317m, djebel Zaoura 1292 m).

Le bassin moyen est montagneux, mais nettement moins accidenté. Le bassin aval présente des reliefs moins élevés, Djebel Metelek (704m) et djebel El Maza (500m). Cependant, la dénivelée brute du bassin est importante 1222 m. Près de 70% de la surface du bassin se situe à une altitude supérieure à 500m.

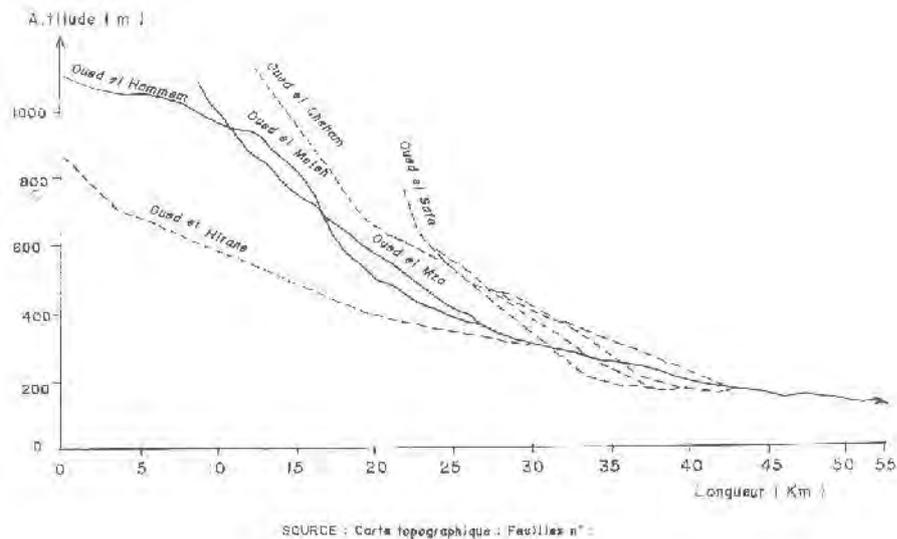


Fig. 62: Profil en long de l'oued Mellah et de ces affluents (D'après mémoire de fin d'études Boucetti et al, encadré par Louamri)

Le réseau de drainage est très développé, se caractérisant par une densité de drainage de 4.0 km/km^2 .

1.2.5. La Basse Seybouse et l'oued Ressoul

Le bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda est localisé au sein de la Chaîne numidique.

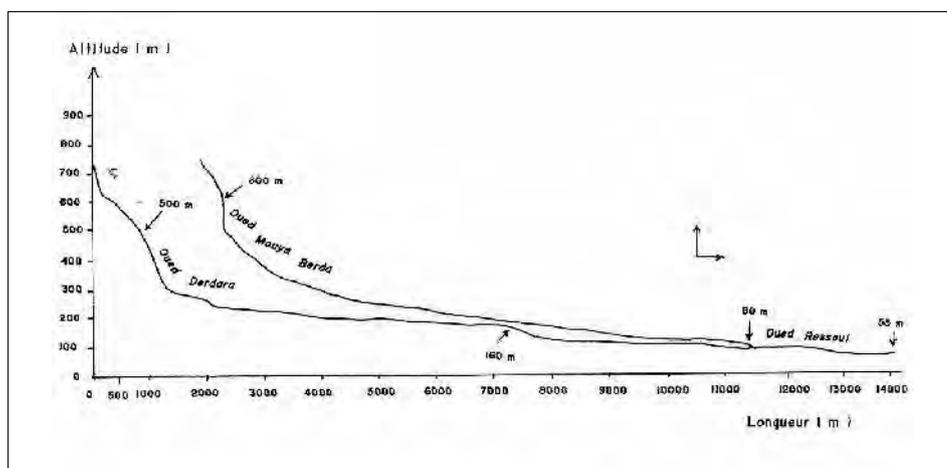


Fig.63 : Profil en long de l'oued Ressoul et de ses affluents (D'après mémoire de fin d'études Khennache encadré par Louamri)

Le dessin du réseau hydrographique du bassin de l'oued Ressoul est très simple. Il est constitué de deux principales artères (oued Mouiya Berda et oued Dardara) (fig.63).

2. ANALYSE MORPHOMETRIQUE

2. I. Intérêt de l'analyse morphométrique

Selon Dubreuil (1974), le milieu physique doit être analysable avec des outils mathématiques pour éviter d'avoir recours à des appréciations qui seront nécessairement subjectives.

Les indices morphométriques élaborés par différents organismes dont l'ORSTOM et certains auteurs (Giandotti) permettent des comparaisons entre les bassins et servent parmi les facteurs explicatifs des processus hydrologiques. Selon les hydrologues (Roche, 1963; Strahler, 1964) ; Dubreuil, 1974), les caractéristiques physiques des bassins-versants dont celles liées à la topographie mais aussi la forme du bassin-versant, influent sur les caractéristiques des écoulements résultant des pluies. Cependant, l'utilisation des indices morphométriques qui ont une valeur globale doit être complétée par l'analyse à partir des cartes. Leur degré de signification dépend de l'échelle des cartes utilisées. Les résultats de mesures effectuées à partir des cartes au 1/50000 (A.N.R.H.) et 1/25000 sont les plus significatifs.

Les différents indices morphométriques de nature surfacique (forme, pentes) ou linéaire (réseau hydrographique) sont très souvent dérivés des Modèles Numériques d'altitude. Leur degré de signification dépend là- aussi de la résolution des M.N.A. et des M.N.T.

La surface du bassin est une grandeur bien définie bien que sa mesure puisse être entachée d'une erreur.

D'autres paramètres morphométriques intéressants concernant la pente transversale et la sinuosité des cours d'eau ont été étudiés par les hydrologues de l'ORSTOM.

L'analyse des indices morphométriques du bassin de la Seybouse est réalisée pour les sous-bassins équipés de stations hydrométriques. Ceux-ci sont de par leurs caractéristiques physiques représentatifs des zones géographiques nettement différenciées du bassin, les Hautes Plaines et la zone sud - tellienne avec des bassins situés en zone de transition, et les bassins telliens.

2.2. Surfaces et altitudes des bassins jaugés

Les données hypsométriques et les altitudes caractéristiques des bassins-versants aux stations hydrométriques sont déterminées à partir des courbes hypsométriques et celles des fréquences altimétriques après la délimitation des bassins et les mesures concernant les surfaces (surface comprises entre les courbes de niveau, surface totale) et périmètre du bassin (tabl.27).

Les mesures sont effectuées soit d'une manière classique à partir des cartes topographiques en utilisant le planimètre et le curvimètre, soit réalisé à partir des bases d'information numérique que représente le M.N.T. (fig. 64).

Tableau 27 : Les données hypsométriques et les altitudes caractéristiques des bassins-versants (D'après Mebarki, 2005 et *Annuaire hydrologiques de l'A.N.R.H.*)

Bassin	Station hydrométrique	Surface Km2	H _{min} (m)	H _{max} (m)	H _{moy} (m)
Oued Cherf à Moulin Rochefort	Moulin Rochefort	1710	710	1635	885
Oued Bouhamdane	Medjez Ammar II	1105	270	1281	785
Oued Sabath	Bordj Sabath		516	1289	880 H50%
Oued Mellah	Bouchegouf	550	95	1317	641
Oued Seybouse	Mirbeck	5955	10	1635	
Oued Ressoul	Ain Berda	103	55	927	305

Hmin: altitude minimale; Hmax: altitude maximale ;Hmoy: altitude moyenne ;

Pour le bassin de l'oued Cherf amont, la classe d'altitudes dominante est celle de 800 à 1100 m, qui couvre 98 % de la surface du bassin. Les zones d'altitude élevées, Djebel Sidi Reghiss qui culmine à 1635 m, et la chaîne des Sellaoua, couvrent des surfaces faibles.

Dans le bassin du Cherf aval, la classe d'altitude 600 à 800 m domine. Elle couvre 56 % de sa surface.

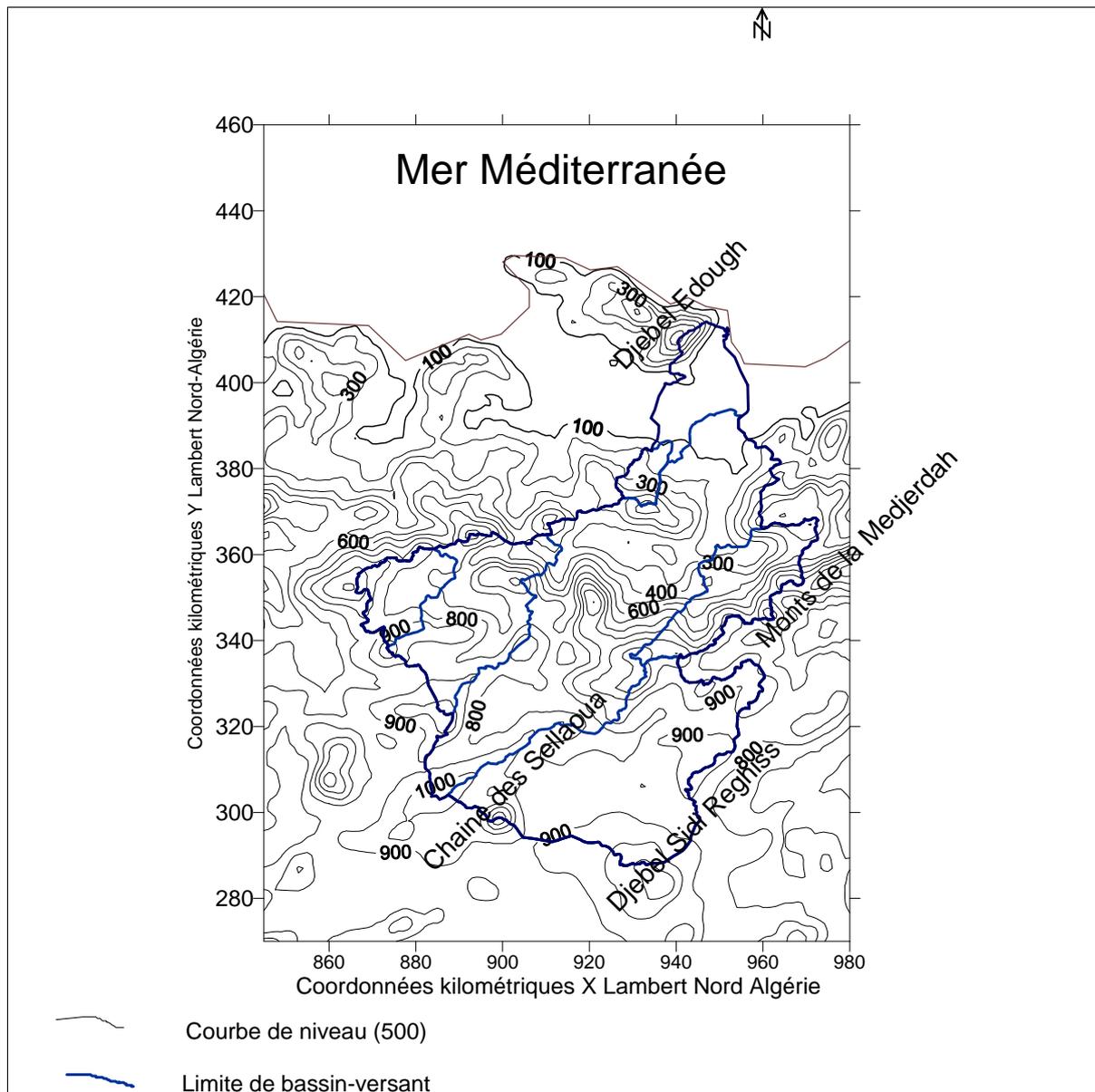


Fig.64: Le bassin-versant de la Seybouse: Modèle numérique de terrain et limites de sous-bassins.

2.3. Indices de compacité (forme des bassins-versants)

Les valeurs de l'indice de compacité montrent que les bassins des oueds, Bouhamdane ($K_c=118$) et Ressoul ($K_c = 1.24$) sont les plus compacts, alors que la forme de bassin allongé correspond à celui de l'oued Mellah à Bouchegouf ($K_c = 1.43$), l'oued Sabath ($K_c = 1.34$) et l'oued Cherf amont ($K_c=1.29$) (tabl. 28).

Tableau 28 : Les caractéristiques morphométriques des bassins-versants aux stations hydrométriques d'après *Annuaire hydrologiques (A.N.R.H.), Mebarki (2005)*

Bassin	Station	Surface Km2	Périmètre (km)	Kc	Lr (km)	Ds (m)	Classe de relief
Oued Cherf	Moulin Rochefort	1710	190	1.29	70.9	125.2	R5 Relief assez fort
Oued Bouhamdane	Medjez Ammar II	1105	140	1.18	46	279.81	R6 Relief fort
Oued Sabath	Bordj Sabath	296.02	82.88	1.34	29.74	254.49	R6
Oued Mellah	Bouchegouf	550	120	1.43	48.7	346.7	R6
Oued Ressoul	Ain Berda	103	45	1.24	16.1	396.60	R6

Lr: Longueur du rectangle équivalent;

Ds: dénivelée spécifique;

Classe de relief: selon la classification de Roche (Dubreuil et Guiscafne, 1971)

2.4. Indices de pente et classes de relief

Le relief étudié à travers la dénivelée spécifique (Dubreuil et al, 1974) permet de classer les bassins dans les classes R5 (Relief assez fort) et R6 (Relief fort) (tabl.28).

Les sous-bassins telliens sont dans la classe "Relief fort" mais ils se scindent en deux sous-classes : les bassins des oueds Mellah et Ressoul sont plus accidentés que ceux des bassins des oueds Bouhamdane et Sabath. Par contre, le bassin de l'oued Cherf, situé dans sa globalité dans le domaine des Hautes Plaines, appartient à la classe "R5, Relief assez fort".

Le bassin de l'oued Mellah, se caractérise par un relief accidenté. Les pentes très fortes (>30%) couvrent 30% de la surface du bassin, la classe 12.5 à 25% prédomine avec 48.2 % de la surface du bassin.

2.5. Caractéristiques du réseau hydrographique

2.5.1. Longueur totale des cours d'eau

Pour donner un ordre de grandeur de la longueur des cours d'eau du bassin-versant, le tableau 29 répertorie les cours d'eau aussi bien temporaires que permanents de plus de dix kilomètres. L'oued principal partant de l'oued Cherf amont jusqu'à l'exutoire mesure 213.4 km.

Tableau 29: Données sur le réseau hydrographique des bassins-versants aux stations hydrométriques d'après Cahiers de l'A.B.H.-C.S.M., (1999)

Bassin	Oued	Longueur (km)	Bassin	Oued	Longueur (km)
Bassin de l'oued Cherf amont	Oued El Mebdoua	15.76	Bassin de l'oued Bouhamdane	Oued Bouhamdane	37.49
	Oued Ain Snob	21.04		Oued Zenati	52.40
	Oued Tiffech	16.76		Oued Dardar	10.53
	Oued Behez	15.82		Oued Sabath	10.86
	Oued Souinia	11.16		Oued El Aria	10.79
	Oued Ouessah	22.07		Oued Boumia	12.70
	Oued Ed Dahimine	10.66		Oued Bou Sorra	16.32
	Oued Trouch	20.84		Oued El Maiz	10.16
	Oued Ain Babouche	17.45		Oued Helia	18.41
	Oued El Khouidjel	10.93		Oued Bou Djedra	10.07
	Oued Lahamimime	19.44		Oued Seybouse	57.15
	Oued Krab	10.13		Oued Maaza	17.83
	Oued Cherf amont	24.13		Oued Bou Rdine	17.65
	Oued Settara	14.14		Oued Mellah	15.94
Bassin de l'oued Cherf aval	Oued Cherf aval	64.48	Bassin de l'oued Mellah	Oued Zouara	10.11
	Oued El Aar	18.73		Oued Cheham	14.12
	Oued Cheniour	13.53		Oued Rhirane	11.14
	Oued Bou El Frais	10.97		Oued Seybouse	77.59
	Oued M'gaisba	15.74		Oued Frarah	12.76
	Oued Nil	12.74		Oued Derdara	25.56
	Oued Melah	10.28		Oued Ressoul	17.86
	Oued El Bgare	12.33			

2.5.2. Densité de drainage, coefficient de torrentialité et temps de concentration

Trois paramètres caractérisent le réseau hydrographique, la densité de drainage, le coefficient de torrentialité et le temps de concentration (tabl. 30).

Tableau 30: Données sur le réseau hydrographique des bassins-versants aux stations hydrométriques d'après *Annuaire hydrologiques (A.N.R.H., 2008 ; Mebarki, 2005)*

Bassin	Station	L (km) (1)	Densité de drainage Km/km ² (2)	Coefficient de torrentialité (Ct)	Tc (heures)
Oued Cherf à Moulin Rochefort	Moulin Rochefort	57		/	23.7
Oued Bouhamdane	Medjez Ammar II	99		10.02	15.5
Oued Sabath *	Bordj Sabath	34		8.27	4.50
Oued Mellah	Bouchegouf	52	4	25.2 (2)	9.19
Oued Ressoul Seybouse	Ain Berda Mirbeck	25	2.8	17.4 (2)	6.17

(1) d'après A.N.R.H.(2008); (2) D'après Demmak (1984);

Ct: Coefficient de torrentialité;

Tc: Temps de concentration calculé d'après la formule de Giandotti;

$$Tc = \frac{4\sqrt{A + 1.5L}}{0.8\sqrt{Dh}} \text{ avec } A = \text{surface du bassin en km}^2,$$

L= Longueur du thalweg le plus long (km),

Dh=différence entre l'altitude moyenne et l'altitude minimale du bassin.

L (km): Longueur du thalweg le plus long (d'après A.N.R.H., 2008)

Le coefficient de torrentialité exprime le degré de dissection du relief à travers les cours d'eau d'ordre 1, donc l'importance des talwegs. En d'autres termes, il exprime l'intensité du chevelu hydrographique et fournit une image réelle de la dissection des bassins. (Demmak, 1982). Les valeurs dans les bassins nord-telliens sont situées entre 17,4 (bassin de l'oued Ressoul) et 25,2 (bassin de l'oued Mellah).

A titre indicatif, la formule utilisée pour estimer le temps de concentration T_c est différente selon les différentes formules proposées. Le temps de concentration T_c représente le temps mis par la particule d'eau la plus éloignée pour gagner l'exutoire. Selon Laborde (in A.N.R.H., 2008), T_c est sensiblement proportionnel à la longueur de ce chemin et inversement proportionnel à la vitesse de l'eau. Il est très utilisé dans l'étude des crues. Il est compris entre 5h (bassin de l'oued Ressoul) et moins de 24 h (bassin de l'oued Bouhamdane) (tabl.30).

3. LES ENSEMBLES LITHOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

3.1. Les grands ensembles lithologiques

On présentera l'organisation morpho-structurale du bassin de la Seybouse (fig. 65). Le Cherf amont est situé en totalité dans les Hautes Plaines. C'est la zone où on rencontre la partie la plus septentrionale du domaine atlasique matérialisée par le massif de Sidi Reghiss, relayé au nord par le domaine écaillé des Sellaoua.

La plaine de Tamlouka (Montcalm) se caractérise par un couvert quaternaire important. La plaine de Sedrata présente un diapir triasique qui peut générer des eaux sulfatées et chlorurées calciques à l'aval.

Les accumulations encroûtées du quaternaire occupent les zones de plaines. Pour passer de cette zone amont du bassin de Guelma qui s'étend de Medjez Ammar à l'Ouest jusqu'à Medjez Sfa à l'Est, on transite par des monticules constitués par des formations d'âge paléogène (paléocène et éocène) recouverts au niveau de la vallée de l'oued Settara par des formations mio-pliocènes (marnes et gypses, calcaire) et oligocènes (argiles, et mélange de formations détritiques moyennes et fines).

Un deuxième grand ensemble est constitué par le prolongement oriental de la chaîne Numidique. Celle-ci est d'orientation sensiblement Est –Ouest et est représentée par les djebels Debagh, djebel Bou Sbaa, djebel Houara. La chaîne numidique est constituée d'Ouest en Est par M'sid Aicha, djebel Sma, Sidi Driss, Kantour, djebel Sesnou, les Toumiettes, djebel Roknia, Taya, Debagh, djebel Houara, kalaa Bou Sbaa.

L'oued Bouhamdane suit l'axe d'un grand graben qui délimite au Sud la chaîne numidique. Celle-ci d'orientation générale, SW-NE, s'étend sur les bassins de l'oued Bouhamdane, la Moyenne Seybouse, l'oued Mellah, et l'amont de la Basse Seybouse. Elle est composée essentiellement de grés avec parfois des conglomérats et comprend également le versant Sud de la Moyenne Seybouse.

Le bassin de Guelma est caractérisé sur le plan géologique de l'extérieur vers l'intérieur par des formations oligocènes détritiques au niveau des piémonts, du mio-pliocène, et dans le lit majeur par des formations quaternaires.

L'importance des méandres dans le bassin de Guelma traduit le rôle joué par le Trias sous l'effet d'une tectonique récente restée active dans la région.

De Mdjez Sfa jusqu'à l'embouchure de l'oued Seybouse, on a deux faciès principaux :
-l'Oligocène de l'amont jusqu'à Mondovi.
-du Quaternaire à l'aval.

L'oued Ressoul prend sa source sur le djebel Houara (altitude:932m) et draine son flanc Nord.

La Basse Seybouse est composée essentiellement de formations récentes. On note la présence de fossés d'effondrement de dimension modeste et d'orientations différentes (fosse BenAhmen et fosse Benmhidi) qui ont influencé le tracé vers l'exutoire de l'oued Seybouse.

Les alluvions quaternaires se caractérisent par une perméabilité importante.

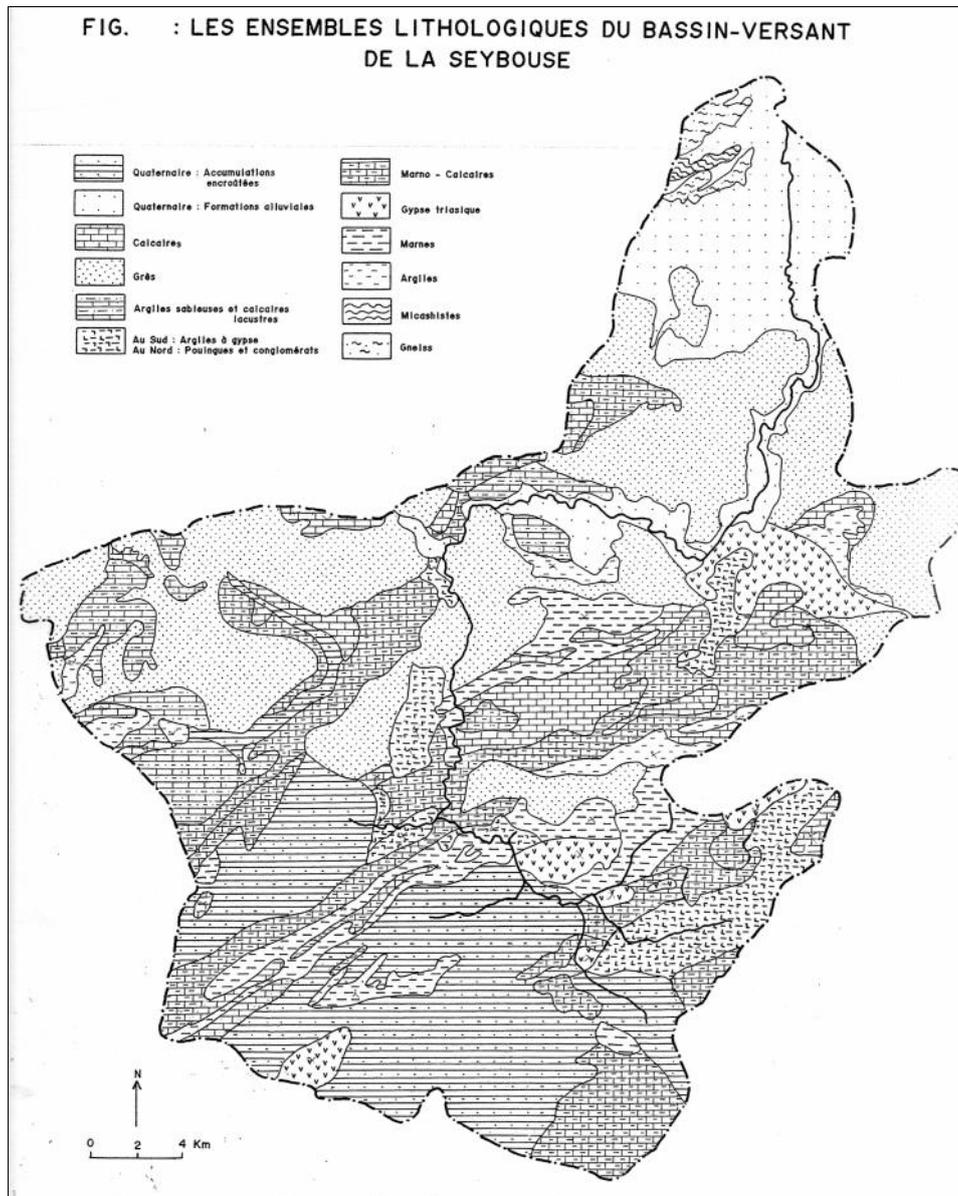


Fig. 65: Les ensembles lithologiques du bassin versant de la Seybouse
(Sources: cartes géologiques 1/200 000, cartes géologiques 1/50 000).

A l'extrême Nord-ouest, formant la ligne de partage des eaux entre le bassin de la Seybouse et celui des Côtiers Constantinois (sous-bassin de Chétaibi), le djebel Edough est un massif ancien composé essentiellement de roches métamorphiques (micaschistes et gneiss).

3.2. Les ensembles hydrogéologiques

La complexité structurale de la zone d'étude ne permet pas une lecture claire du rôle des différentes nappes dans la formation des systèmes aquifères présents à différentes profondeurs dans le bassin-versant de la Seybouse. Néanmoins, on présentera les principales zones aquifères à partir de la documentation existante.

Les principaux aquifères qui sont exploités dans le bassin de la Seybouse sont esquissés d'après la carte établie par le S.E.S., 1967 (in Mebarki, 2005 ; Ghachi, 1983) :

- dans le domaine des Hautes Plaines: des aquifères profonds ont été identifiés et sont exploités; Les principales nappes sont celles du Haut Cherf et celle du bassin de Tamlouka.
- dans la Moyenne Seybouse, de petites nappes de versants ont été identifiées; leur alimentation est limitée. Le long de la vallée de l'oued Seybouse dans la Moyenne Seybouse (bassin de Guelma), une nappe alluviale est exploitée. D'après Ghachi (1983), trois aquifères y ont été identifiés dans les différents niveaux de la vallée.

Dans la Basse Seybouse, deux aquifères localisés dans les alluvions plio-quaternaires et dans le massif dunaire ont été identifiés depuis longtemps.

L'aquifère localisé dans les alluvions plio-quaternaires au niveau de la Basse Seybouse dépasse largement le cadre du bassin hydrologique pour s'inscrire dans une région plus vaste.

Les aquifères des cordons dunaires à l'Est de la ville d'Annaba contiennent des ressources en eau importantes (zone de Bouteldja).

La carte de la figure 66 illustre la répartition dans le bassin de la Seybouse, des principaux forages recensés par l'A.B.H.-C.S.M. (1999), avec une concentration relativement importante de l'exploitation par ces forages des nappes contenues dans les alluvions plio-quaternaires et dans le massif dunaire de la Basse Seybouse. Le total exhauré par le biais des forages est de 15.63hm³.

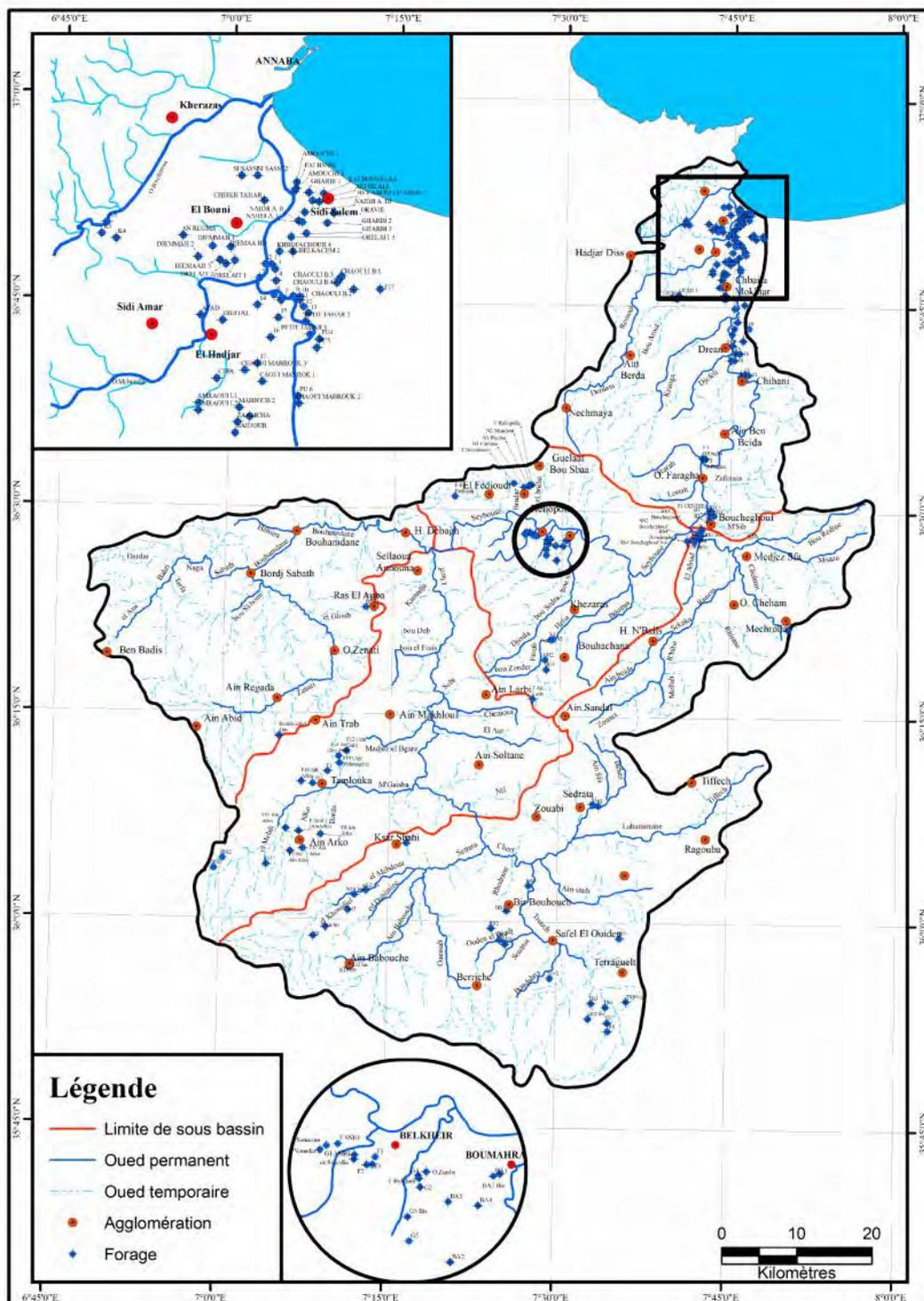


Fig.66 : Carte des forages dans le bassin de la Seybouse (D'après cahiers A.B.H.-C.S.M., 1999)

4. LE COUVERT VEGETAL

Selon Dubreuil et Guiscafre (1974), la végétation intervient sous son aspect de couverture du sol, plus ou moins modifiée sous l'influence de l'homme. Deux classifications sont utilisées pour étudier le taux de recouvrement de la végétation: la classification de Tricart (1968) et celle de Dubreuil et Guiscafre (1974) développée au sein de l'ORSTOM.

La méthode de Tricart (1968) prône la classification du couvert végétal par ordre de densité (ou d'efficacité) décroissante. Celle-ci aboutit pour l'ensemble du bassin de la Seybouse aux résultats suivants, élaborés à partir de la carte internationale du tapis végétal au 1/1000 000 feuilles Tunis-Sfax et Alger sur le bassin de l'oued Seybouse (Mebarki, 2005) (fig.67):

- surfaces bien protégées : le couvert forestier et les prairies.

Les forêts de Chêne liège et de chêne vert se localisent préférentiellement dans la zone nord-tellienne mais également dans le bassin sud-tellien de l'oued Mellah (zone de Mechroha et Ain Seymour). Dans la zone sud-tellienne, c'est le pin d'Alep qui occupe les zones forestières. D'après Mebarki (2005), ces deux formations occupent moins de 20 % de la surface dans les bassins de l'Algérie orientale, mais ce chiffre semble sur-estimé car il inclut les forêts à l'état de maquis dégradé et de broussailles dont la densité est plutôt faible. La majorité de ces surfaces bien protégées est localisée dans les zones formant les reliefs qui constituent les lignes de partage des eaux entre le bassin de la Seybouse et les bassins côtiers constantinois, le bassin inférieur de la Seybouse maritime, le bassin de l'oued Mellah et le bassin de l'oued Bouhamdane ;

- les surfaces mal protégées ou nues (terrains dénudés, steppe, broussailles) représentent autour de 25 % de la superficie totale du bassin ;

- les surfaces incomplètement protégées (terres labourées et arboriculture extensive) occupent la majeure partie des Hautes Plaines, et une grande surface dans tous les bassins. Elles s'élèvent à 56 %.

A titre d'exemple, pour le bassin de l'oued Cherf à la station de Moulin Rochefort, situé en totalité dans le domaine des Hautes Plaines, la répartition des taux de couverture est la suivante :

- surfaces bien couvertes (prairies) : 2.6%
- surface offrant une couverture moyenne (céréales-jachère) : 73.4 %
- surfaces offrant une faible couverture : 24%

Globalement, la zone tellienne est le domaine de la forêt de chêne vert et de chêne liège, plante calcifuge qu'on trouve sur les sommets gréseux alors que le domaine atlasique, est celui du domaine de pin d'Alep et de genévriers rouges.

La zone des Hautes Plaines est le domaine de la céréaliculture associée à l'élevage. Le bassin amont de l'oued Cherf est très dénudé, alors que dans le Bas-Cherf, zone de transition avec le Tell, la végétation est plus diversifiée.

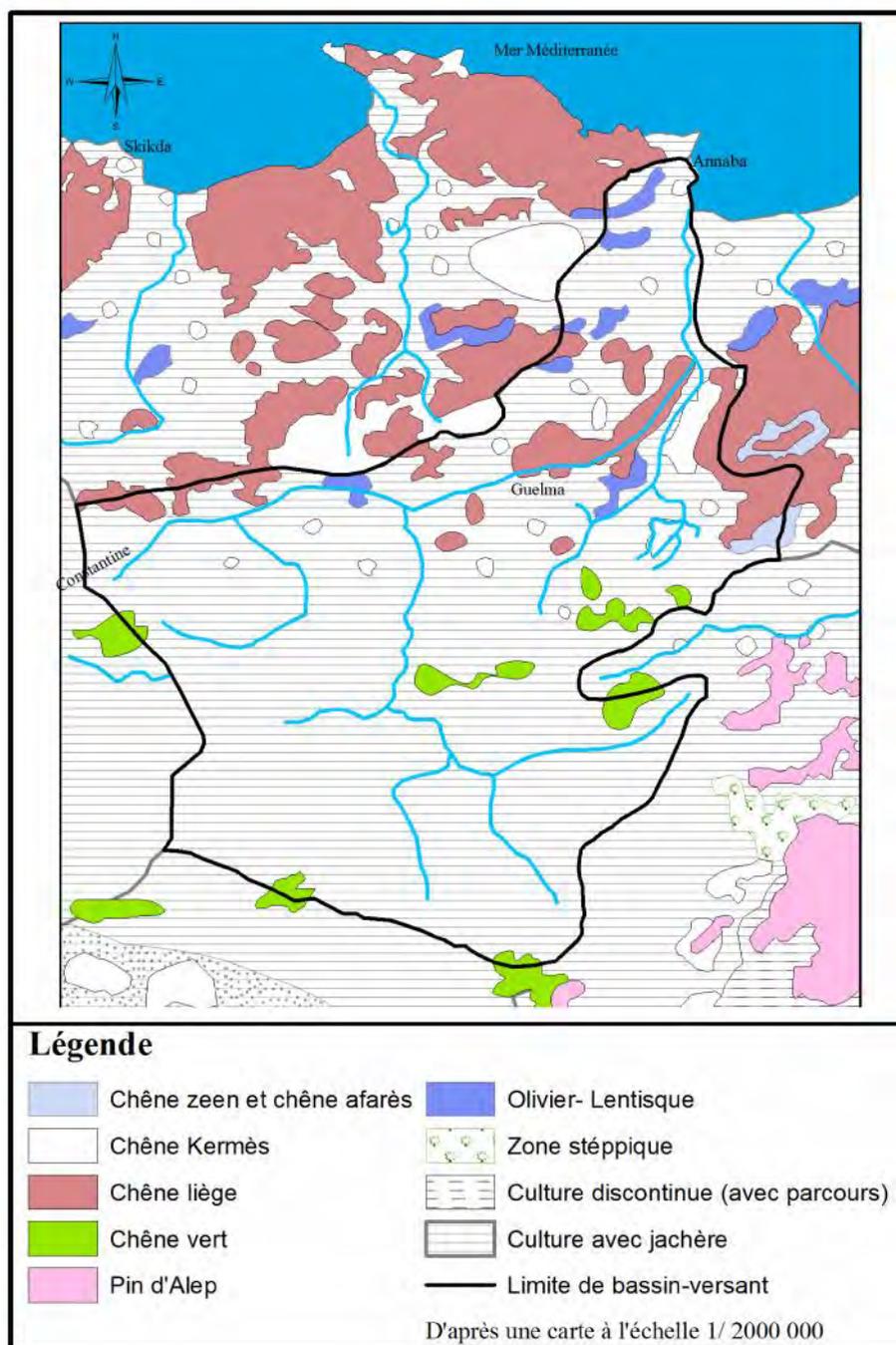


Fig 67: Couvert végétal du bassin de l'oued Seybouse (d'après Mebarki, 2005)

Le bassin de l'oued Mellah est le plus boisé (chêne liège), à cause des effets conjugués de l'altitude et de la pluviométrie. Selon Ghachi (1986), le taux de recouvrement de ce bassin est de 35%. Mais la répartition du couvert végétal est loin d'être simple, le même sous-bassin présente les trois types de couverture qui se différencient de l'amont à l'aval avec une prédominance des zones de cultures (photos 1 à 3).



*Photo 1: Paysage du bassin de l'oued Sabbath, zone tellienne, maquis dégradé et gabionnage sur un thalweg.
Photo mai 2012*



*Photo 2: Paysage du bassin de l'oued Bouhamdane à l'amont du barrage de Hammam Debagh, zone tellienne: maquis discontinu dégradé et céréaliculture, lambeaux de forêts sur les sommets.
Photo mai 2012*



*Photo 3 : Sommet délimitant le sous-bassin de l'oued Sabbath et celui de l'oued Bouhamdane : Chêne vert, et végétation clairsemée.
Photo mai 2012*

Les conditions climatiques et édaphiques sont favorables à la présence d'un couvert végétal dense et continu mais l'action de l'homme a certainement contribué à une dégradation poussée de la forêt qui est souvent remplacée par un maquis dense à dégradé.

Ce type de répartition du couvert végétal et les densités de couverture à travers le bassin de l'oued Seybouse ont pour conséquences hydrologiques la faible résistance à l'érosion à l'exemple de certains secteurs (argiles triasiques du massif du Nador) du bassin de l'oued Mellah, et la faible rétention souterraine, hormis les secteurs montagneux densément boisés qui ont une surface restreinte.

CONCLUSION DU CHAPITRE 4

Le bassin de l'oued Seybouse, qui couvre une superficie de 6745 km², englobe trois grands domaines physiques et bioclimatiques : le domaine des Hautes Plaines au Sud (bassin de l'oued Cherf amont), le domaine sud-Tellien (bassins de l'oued Cherf aval, de l'oued Bouhamdane, la moyenne Seybouse et celui de l'oued Mellah) et enfin, les domaines Tellien du Nord et maritime (Seybouse maritime : bassin de l'oued Ressoul, oued Dardar et la zone des plaines littorales).

Ces grands ensembles physiques présentent des caractéristiques topographiques qui les différencient nettement. Deux zones montagneuses constituent les principales zones d'alimentation en eau du bassin-versant de la Seybouse : les Monts de la Medjerdah, et la zone montagneuse constituée par le djebel Sidi Reghiss et la chaîne des Sellaoua.

Les valeurs de l'indice de compacité montrent que les bassins des oueds Bouhamdane ($K_c=1.18$) et Ressoul ($K_c = 1.24$) sont les plus compacts, alors que la forme de bassin allongé correspond à celui de l'oued Mellah à Bouchegouf ($K_c = 1.43$), l'oued Sabath ($K_c = 1.34$) et l'oued Cherf amont ($K_c = 1.29$). De même, la dénivelée spécifique permet de classer les bassins dans les classes R5 (Relief assez fort) et R6 (Relief fort). Le coefficient de torrentialité le plus développé correspond au bassin de l'oued Mellah. Le temps de concentration est compris entre 5 heures (bassin de l'oued Ressoul) et moins de 24 heures (bassin de l'oued Cherf amont).

Les principales zones lithologiques et hydrogéologiques identifiées et exploitées sont dans le domaine des Hautes Plaines: les principales nappes y sont celles du Haut Cherf et celle du bassin de Tamlouka. Dans la Moyenne Seybouse, de petites nappes de versants ont été identifiées mais leur alimentation est limitée. Le long de la vallée de l'oued Seybouse dans la Moyenne Seybouse (vallée de Guelma), une nappe alluviale est exploitée.

La répartition du couvert végétal et les densités de couverture à travers le bassin de l'oued Seybouse avec prédominance des surfaces offrant une couverture faible à moyenne ont pour conséquences hydrologiques la faible résistance à l'érosion sur les versants à l'exemple du bassin de l'oued Mellah d'une part, et d'autre part la faible rétention souterraine.

Mais certains sous-bassins sont relativement bien protégés comme celui de l'oued Bouhamdane. Dans ce bassin, les zones avec un couvert végétal naturel (chêne liège, maquis,

reboisement) couvrent 31.7% de la surface du bassin dont 19.5% sont exploités comme terrains de parcours.

La résultante de ces caractéristiques physiques et morphométriques qui constituent les facteurs non variables qui se combineront avec les facteurs variables des bassins (pluviométrie) aura des effets sur les écoulements annuels, les crues et les transports solides de ces bassins.

Chapitre 5 : Les apports liquides des oueds aux différents pas de temps

INTRODUCTION

Après l'étude des facteurs qui conditionnent l'écoulement dans le bassin de la Seybouse, à savoir les caractéristiques climatologiques et les paramètres physiographiques, les écoulements liquides sont analysés dans cette partie, essentiellement à partir des données hydrométriques.

Après le comblement des lacunes des séries d'observation, nous étudions les bilans hydrologiques annuels, la variabilité spatiale de l'écoulement et les profils apports-surfaces. La variabilité temporelle des apports est également analysée en plus de leur étude statistique et l'estimation des valeurs fréquentielles.

La cartographie des écoulements annuels est, en dernier ressort, établie sur la base des travaux antérieurs, méthode basée sur la cartographie de la pluie moyenne, du déficit d'écoulement selon le modèle de Turc, et de l'écoulement (Mebarki, 2005 et 2010), et méthode du modèle Loieau adoptée par l'A.N.R.H. pour aboutir à une comparaison à l'échelle globale du bassin de la Seybouse avec les écoulements observés.

Les débits de crues, Q moyens journaliers maximaux et Q max instantanés annuels, font l'objet d'une étude fréquentielle grâce à la loi log-normale. Les débits de crues, plus précisément les débits maximaux annuels, étudiées pour les bassins jaugés sont analysés avec plus de détails au niveau du bassin de l'oued Bouhamdane, en mettant en évidence la statistique et la cartographie des pluies journalières maximales annuelles, éléments nécessaires pour la compréhension des écoulements de crue et de leur variabilité.

1. LE RESEAU HYDROMETRIQUE DU BASSIN ET LE COMPLEMENT DES LACUNES D'OBSERVATION

1.1. L'évolution du réseau hydrométrique du bassin de la Seybouse

Les séries de mesures hydrométriques sont moins longues que les observations pluviométriques. Elles ont subi les répercussions des changements dans la gestion des réseaux, des aménagements hydrauliques ainsi que l'évolution de l'équipement hydrométrique. De nouvelles stations ont été implantées et les stations situées aux sites des barrages ont été soit abandonnées (Moulin Rochefort), soit utilisées pour mesurer les écoulements sortant du barrage (station de Medjez Ammar II) (fig. 68 et tabl.31).

A partir de 1968, quatre (4) stations hydrométriques ont fonctionné dans le bassin de la Seybouse, (Medjez Ammar II sur l'oued Bouhamdane, Bouchegouf, Mirbeck, Ain Berda). En 1971, a été mise en service la station de Moulin Rochefort (au site de Aioun Settara), et en 1973 celle Bordj Sabath.

La mise en eau des barrages de Hammam Debagh sur l'oued Bouhamdane (décembre 1987) a influencé la station de Medjez Ammar II qui mesure depuis cette date les lâchers du barrage en plus des écoulements du bassin intermédiaire (surface = 60 km²) et les eaux thermales de Hammam Debagh. Les services de l'A.N.R.H. prévoient d'installer une station hydrométrique à l'amont de la retenue du barrage de Hammam Debagh.

Selon Ghachi (1983), d'autres stations ont fonctionné pendant des périodes courtes et anciennes, Medjez Ammar I sur l'oued Cherf (1948/1955), Nador dans la vallée de Guelma (1948/1955) et Boudroua sur l'oued Seybouse (1948 /1957).

Tableau 31 : Les stations hydrométriques du bassin-versant de la Seybouse

Bassin	Nom de la station	Surface contrôlée	Période des mesures	Observations
Oued Cherf	Moulin Rochefort	1738	Sept1971/1993	à l'arrêt
Oued Sabath	Bordj Sabath	260	Sept1973/2012	en fonction
Oued Bouhamdane	Medjez Ammar II	1105	Sept1969/ Décembre 1987	Mise en eau du barrage de Hammam Debagh Décembre 1987
		1105	En fonction	à l'aval du barrage de Hammam Debagh
Oued Seybouse	Bentabouche		Sept1988/2012	en fonction
Oued Mellah	Bouchegouf	553	Sept1968/2012	en fonction
Oued Ressoul	Ain Berda	103	Sept 1968/2012	en fonction
Oued Seybouse	Mirbeck	5995	Sept 1968/2005	A l'arrêt depuis 2005

1.2. Comblement des lacunes d'observation à l'échelle mensuelle

La période d'étude choisie, de septembre 1971 à août 1988 permet d'exploiter au mieux les données hydrométriques sur l'ensemble des stations du bassin. Les résultats seront également présentés pour la période septembre 1971-août 1987 pour l'oued Bouhamdane, les écoulements de l'année 1987/88 étant influencés par les lâchers du barrage de Hammam Debagh à partir de décembre 1987.

Le choix de cette série commune se justifie par la possibilité qu'offre cette période d'exploiter les données des stations de Bordj Sabath (mise en fonction en 1973) et celle de

Medjez Ammar II encore en régime naturel avant la mise en eau du barrage de Hammam Debagh sur l'oued Bouhamdane en décembre 1987.

Cependant, même si elles ne sont pas nombreuses, des lacunes d'observation existent. Avant le comblement des lacunes d'observation à l'échelle mensuelle, il est indispensable de s'assurer graphiquement de la normalité de la variable débit mensuel, ou d'appliquer une anamorphose (soit logarithmique ou en racine carrée) pour obtenir un alignement des points sur le papier à probabilité gaussique.

Les ajustements réalisés grâce au logiciel Hydrolab (Laborde, 1998) permettent de s'assurer que les débits mensuels s'ajustent bien à la loi normale et mieux, à la loi log-normale.

1.2.1. Ajustement à la loi log-normale (loi de Galton ou loi de Gibrat-Gauss)

1.2.1.1. Fonction de répartition

La formulation de la loi log-normale qui fait le mieux le parallèle avec la loi de Gauss est la suivante (Laborde, 2000):

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

$$u = a \log(x - x_0) + b$$

$$\text{Intervalle de définition : } x \in]x_0, +\infty[$$

On passe de la loi de Gauss à la loi de Galton en faisant le changement de variable de x en $\log(x - x_0)$. Cette loi fait intervenir trois paramètres dont x_0 est le paramètre de position.

Une autre formulation fait mieux ressentir le rôle des paramètres :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\Pi}} \int_0^u \frac{1}{u} e^{-\frac{\text{Ln}^2(u)}{2\sigma^2}} du$$

$$u = \text{Erreur !}$$

u : variable réduite de Gauss

x_0 : paramètre de position

s : paramètre d'échelle positif différent de zéro

σ : paramètre de forme positif différent de zéro

Le coefficient d'aplatissement β_2 est toujours positif ; la loi de Galton est plus "pointue" que la loi de Gauss.

Le coefficient d'asymétrie β_1 est toujours positif ; la loi de Galton est dissymétrique, étendue vers la droite.

1.2.1.2. Application aux débits moyens annuels et mensuels des stations du bassin de la Seybouse

Pour réaliser les ajustements à la loi de Galton, la méthode graphique a été appliquée (fig. 69 à 78). Le passage de la loi de Gauss à la loi de Galton se réalise par le changement de variable x en $\log(x - x_0)$. Par conséquent, si on connaît x_0 , on peut tracer l'équivalent de la droite de Henry en portant $\log(x_i - x_0)$ en fonction de $F = \frac{i - 0.5}{n}$ sur un papier à probabilité graduée suivant les valeurs de la variable réduite de Gauss. Pour déterminer x_0 , on procède par tâtonnements en se fixant différentes valeurs de x_0 jusqu'à obtenir l'alignement des points expérimentaux. Les ajustements de ce chapitre ont pu être réalisés en portant $x - x_0$ avec $x_0 = 0$ sur l'axe des Y.

	<p><i>Fig.69: Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station de Moulin Rochefort, 1971/72-1987/88</i></p>
	<p><i>Fig.70: Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station de Bordj Sabath, 1973/74-1987/88</i></p>
	<p><i>Fig. 71: Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station de Medjez Ammar II 1971/72-1986/87</i></p>
	<p><i>Fig.72: Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station de Bouchegouf, 1971/72-1987/88</i></p>

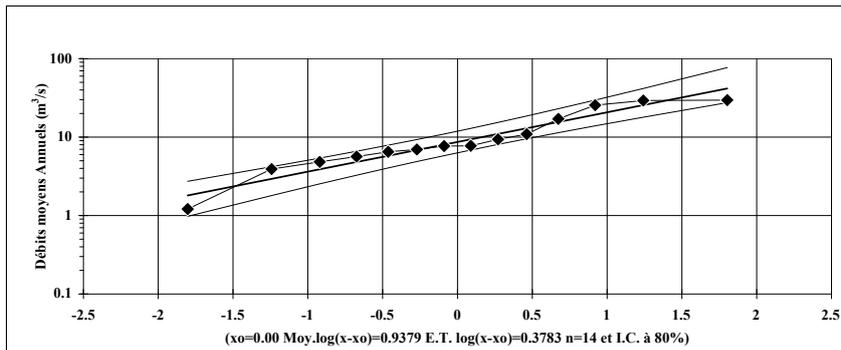


Fig.73: Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station de Mirbeck, 1971/72-1987/88

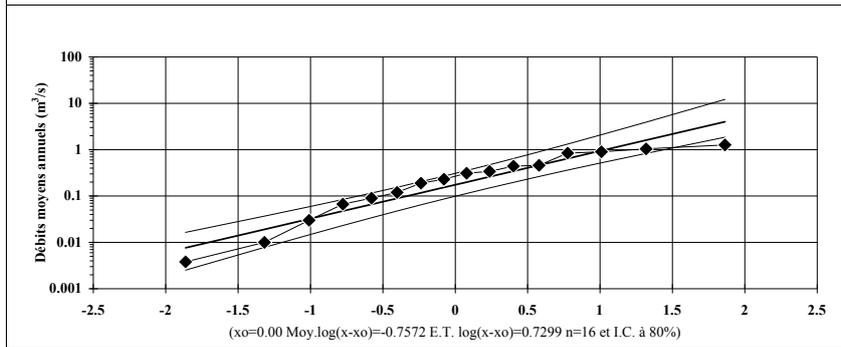


Fig.74: Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station d'Ain Berda, 1971/72-1987/88

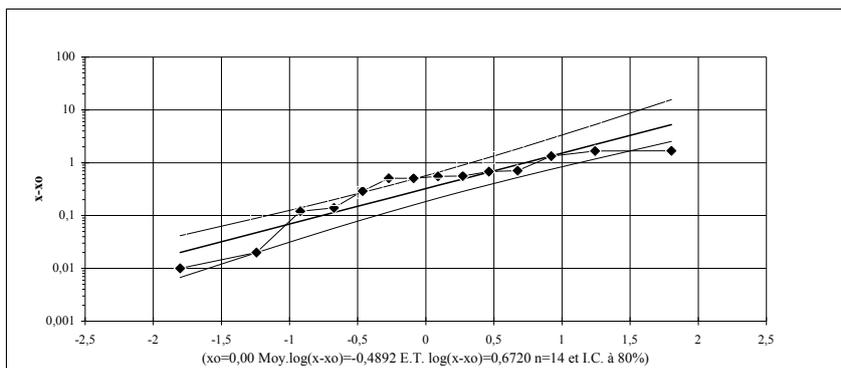


Fig.75: Ajustement à la loi log-normale des débits mensuels de septembre, station de Moulin Rochefort

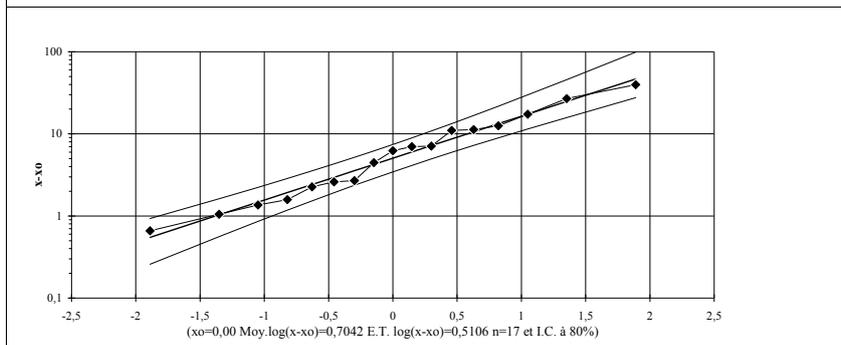


Fig.76: Ajustement à la loi log-normale des débits mensuels de février, station de Bouchegouf

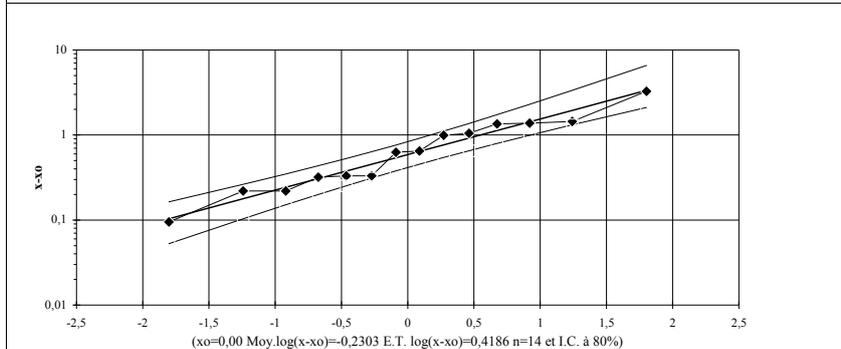


Fig.77: Ajustement à la loi log-normale des débits mensuels de mai, station de Medjez Ammar II

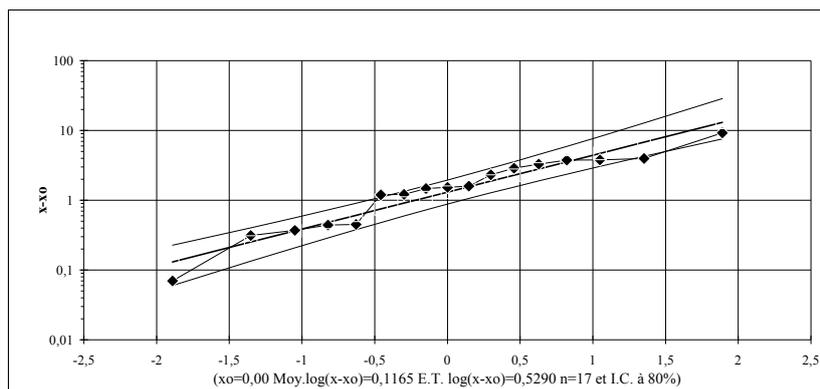


Fig.78: Ajustement à la loi log-normale des débits mensuels de juin, station de Mirbeck

1.2.2. Régressions à deux variables (débits mensuels à la station lacunaire –débits mensuels à la station de référence)

Les lacunes mensuelles seront comblées par des régressions à deux variables en utilisant une anamorphose logarithmique sur les valeurs des débits mensuels. La relation utilisée est du type $Y = b \cdot X^a$, qu'on peut également exprimer par $\text{Log } Y = a \cdot \text{Log } X + \text{Log } b$ avec $Y =$ débit mensuel non connu à la station lacunaire et $X =$ débit connu à la station de référence. On constate que les coefficients de corrélation sont plus forts pour les mois à écoulement élevé (novembre à mai) (tabl. 32 et fig. 79 à 88).

Les débits du mois d'août n'ont pu être comblés par des régressions, les coefficients de corrélation étant inférieurs à 0,5, les lacunes ont été comblées par les moyennes inter-mensuelles aux stations.

Dans une première étape, les lacunes peu nombreuses (hormis le mois d'août), des stations de Mirbeck (2 mois lacunaires) et Bouchegouf (2 lacunes) ont été comblées en choisissant les meilleurs coefficients de corrélation avec les stations d'Ain Berda, et Medjez Ammar II.

Les résultats des régressions sont reportés dans le tableau 32.

Tableau 32 : Régressions entre débits mensuels observés aux stations hydrométriques

Station lacunaire	Station de référence	mois lacunaire	Coefficient de corrélation
Mirbeck	Mellah	1984 Février	939.0=r
Bouchegouf	Mirbeck	1973 Août	mensuelle-Moyenne inter
Bouchegouf	Mirbeck	1982 Novembre	r = 0.55
Bouchegouf	Mirbeck	mars 1982	927.0=r
Mirbeck	Ain Berda	Septembre	1.50=R

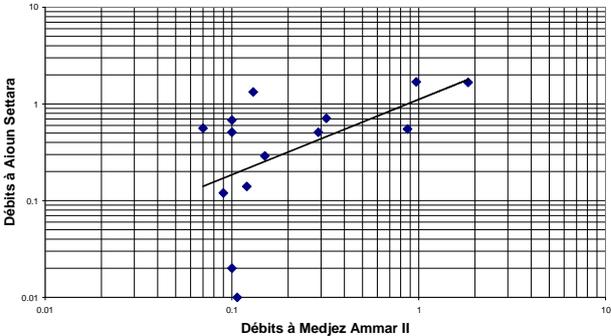
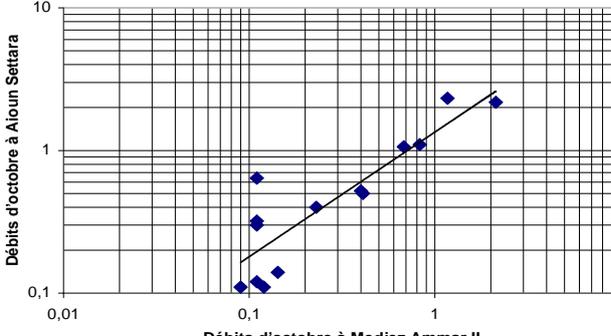
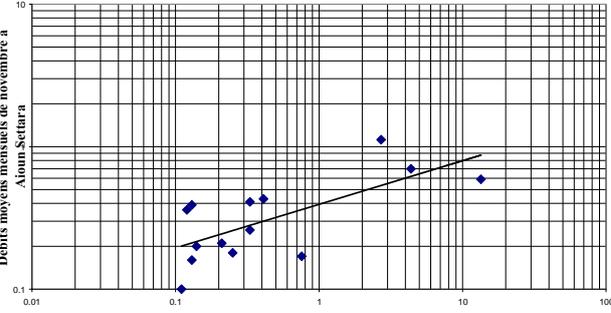
La seconde étape a consisté à combler les lacunes des stations de Moulin Rochefort (Aioum Settara) et Ain Berda :

- comblement des lacunes de Moulin Rochefort par Medjez Ammar II et Bouchegouf.
- comblement des lacunes d'Ain Berda par Medjez Ammar II.

Les coefficients de corrélation qui semblent faibles doivent être testés. Le tableau des ρ limites déduits de la loi de Student montre que pour $v=16-2=14$, $r=0,51$ (Mirbeck par Ain Berda, mois de septembre) et $r=0,55$ (Bouchegouf par Mirbeck, mois de novembre) sont significatifs au seuil de 5 % mais pas aux seuils de 2% ($r=0,57$) et 1% ($r=0,62$).

Le tableau des ρ limites déduits de la loi de Student montre que pour $v=8-2=6$, $r=0,522$ (Moulin Rochefort par Medjez Ammar II, mois de septembre), r n'est pas significatif au seuil de 5 % ($r=0,71$). Pour un degré de liberté de $v=13-2=11$, $r=0,518$ (mois d'août entre les stations de Moulin Rochefort et Medjez Ammar II) n'est pas significatif au seuil de 5% ($r_{\text{tabulé}}=0,55$).

Afin d'illustrer l'opération de comblement des lacunes, les graphes concernant la station de Moulin Rochefort sont présentés.

	<p><i>Fig.79: Régression entre débits mensuels de septembre à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort</i></p> <p>$Q_{\text{Sept M.R.}} = 1.1137 * Q_{\text{sept M.A.II}}^{0.778}$; avec $R^2 = 0,273$ ($r = 0.522$)</p>
	<p><i>Fig.80: Régression entre débits mensuels d'octobre à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort</i></p> <p>$Q_{\text{octobre à M.R.}} = 1,345 * Q_{\text{octobre Bouhamdane}}^{0,8732}$ $R^2 = 0,7714$ ($r = 0.878$)</p>
	<p><i>Fig.81: Régression entre débits mensuels de novembre à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort</i></p> <p>$Q_{\text{novembre à M.R.}} = 0,3938 * Q_{\text{novembre Bouhamdane}}^{0.306}$ $R^2 = 0,4815$ ($r = 0.694$)</p>

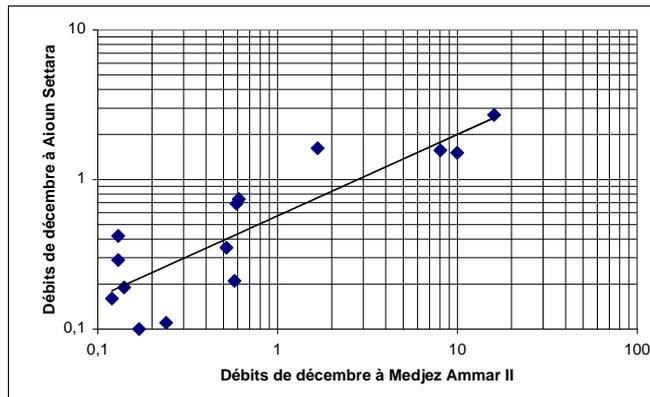


Fig.82: Régression entre débits mensuels de décembre à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort

Q décembre à M.R.= $0,5717 * Q$
 décembre Bouhamdane 0,5441
 $R^2 = 0,7435$ ($r= 0.862$)

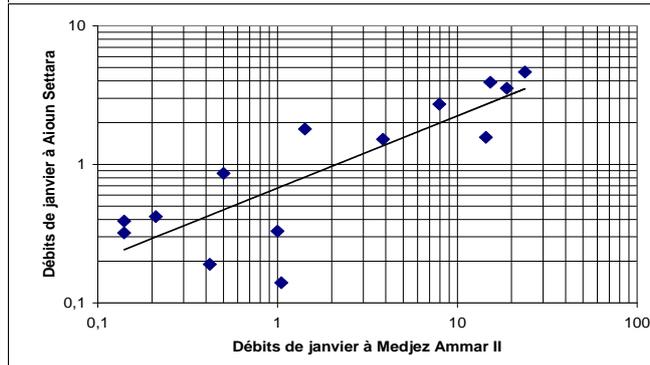


Fig.83: Régression entre débits mensuels de janvier à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort

Q janvier à M.R.= $0,6741 * Q$
 janvier Bouhamdane 0,5211
 $R^2 = 0,6839$ ($r= 0.827$)

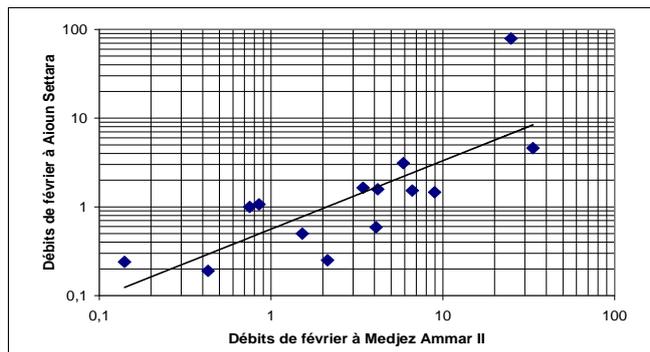


Fig.84: Régression entre débits mensuels de février à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort

Q février à M.R.= $0,5616 * Q$
 février Bouhamdane 0,7707
 $R^2 = 0,5901$ ($r= 0.768$)

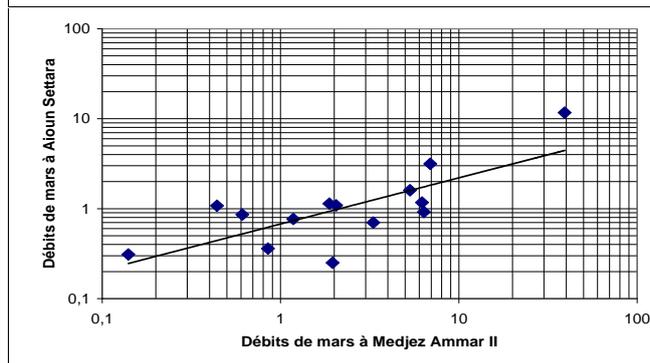
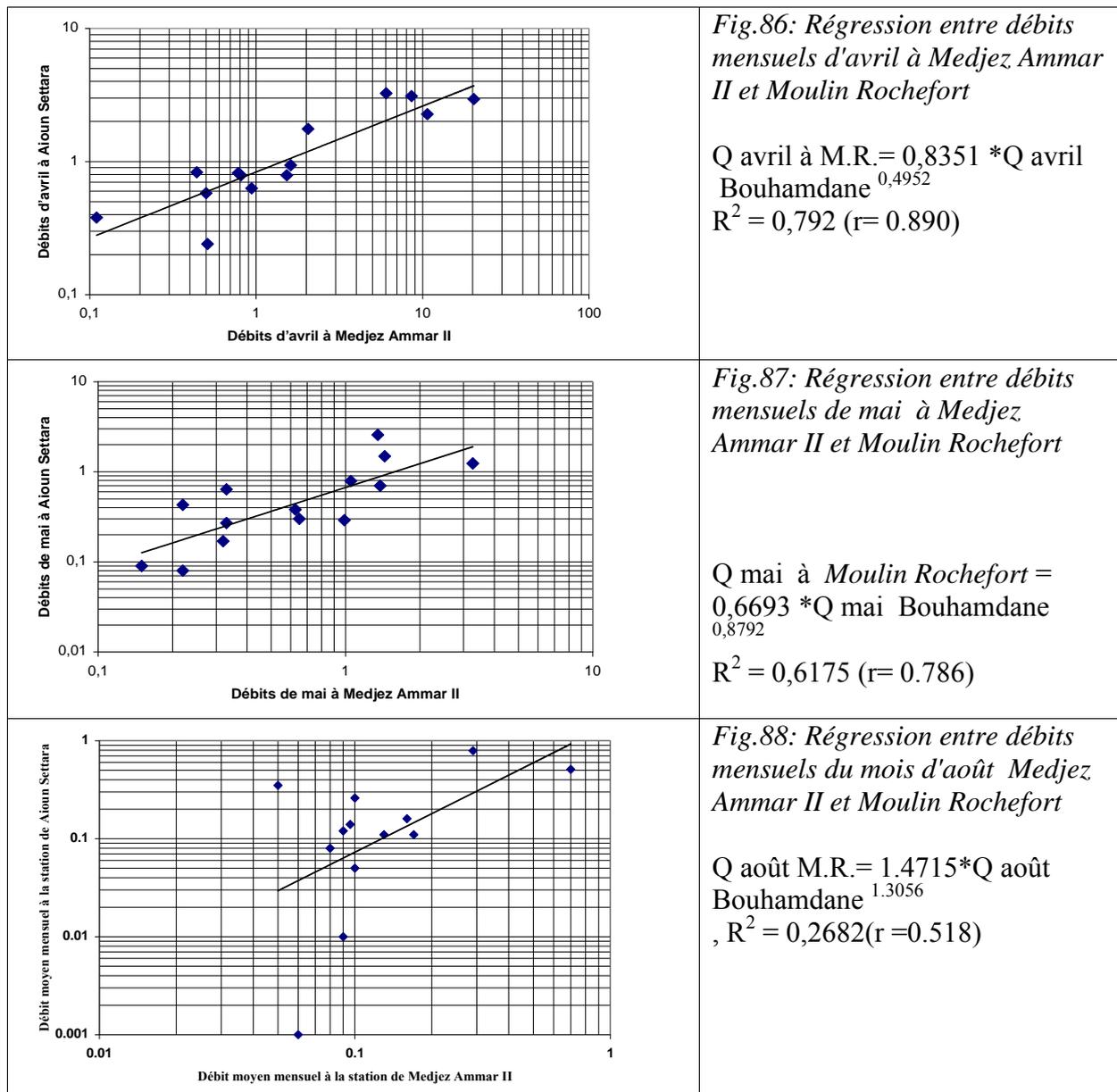


Fig.85: Régression entre débits mensuels de mars à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort

Q mars à Moulin Rochefort =
 $0,6753 * Q$ mars Bouhamdane
 0,5135
 $R^2 = 0,5597$ ($r= 0.748$)



2. LES BILANS HYDROLOGIQUES ANNUELS ET LA VARIABILITE SPATIALE DE L'ÉCOULEMENT

Après le comblement des lacunes dans les séries hydrométriques, les paramètres hydrologiques de base seront analysés sur la série moyenne 1971/1972 à 1987/1988, ainsi que la variabilité spatiale et temporelle de l'écoulement annuel. A noter que la série de la station de Medjez Ammar II a été limitée à la période septembre 1971- août 1987 car les écoulements de l'année hydrologique 1987/1988 sont influencés par les lâchers du barrage de Hammam Debagh à partir de décembre 1987.

2.1. Bilans hydrologiques annuels des bassins jaugés

On étudiera à l'échelle annuelle, les lames écoulées, les coefficients et les déficits d'écoulement. Le tableau 33 résume les résultats des stations hydrométriques étudiées.

2.1.1. Ecoulement et coefficient d'écoulement annuels

On notera la faiblesse de l'écoulement annuel dans le domaine des Hautes Plaines (23 mm pour l'oued Cherf amont). Le bassin de l'oued Bouhamdane qui comprend deux types de milieux physiques (Hautes Plaines et zone sud tellienne) a un écoulement de 81 mm.

Il en est de même pour le bassin de la Seybouse à Mirbeck (63 mm) qui intègre des milieux physiques différenciés, partant des Hautes Plaines aux zones telliennes.

Par contre dans les bassins sud telliens, la lame écoulée est importante; le bassin de l'oued Mellah est le plus productif en termes d'écoulement avec une lame de 196 mm et une lame précipitée moyenne de 741 mm ; les bassins des oueds Sabath et oued Ressoul, de surface modeste ont des écoulements respectifs de 108 et 120 mm.

Le coefficient d'écoulement est faible (6,3 %) pour le bassin de l'oued Cherf situé en totalité en Hautes Plaines. Les valeurs les plus fortes du coefficient d'écoulement sont calculées pour les bassins telliens, oued Mellah à Bouchegouf (26,4 %), oued Ressoul à Ain Berda (18,4 %) et finalement oued Sabath à Bordj Sabath (18,2 %). Les valeurs des bassins de l'oued Bouhamdane (13,4 %) et Seybouse à Mirbeck (11,9 %) sont intermédiaires. Ceci est lié au fait que ces deux bassins intègrent des milieux physiques différenciés, partant des Hautes Plaines aux zones telliennes

Tableau 33: Bilans hydrologiques moyens 1971-1988 des bassins contrôlés par des stations hydrométriques

Bassins	station	Surface (km ²)	Pluie moyenne (mm)	Débits Absolus Q (m ³ /s)	Lame écoulée (mm)	Coefficient d'écoulement (%)	Déficit d'écoulement (mm)	Débits relatifs (l/s/km ²)
Oued Cherf amont	à Moulin Rochefort	1710	358.9	1.23	22.6	6.3	336.3	0.7
Oued Sabath	Bordj Sabath	296	593.1	1.01	108	18.2	485.1	3.4
Oued Bouhamdane (1)	Medjez Ammar II	1105	550.7	2.8	81.3	14.8	469.3	2.6
Oued Mellah	Bouchegouf	550	741.3	3.4	195.6	26.4	545.7	6.2
Seybouse	Mirbeck	5955	528.6	11.9	62.8	11.9	465.8	2
Oued Ressoul	Ain Berda	103	649.4	0.4	119.6	18.4	529.7	3.8

(1) Période septembre 1971 - août 1987

2.1.2. Déficit d'écoulement annuel

L'organisation spatiale des valeurs du déficit d'écoulement est latitudinale : valeurs croissantes du Sud (Hautes Plaines, 336,3 mm pour le bassin de l'oued Cherf) vers le Nord (bassins sud telliens 476,8 mm pour le bassin de l'oued Bouhamdane, et 545,7 mm pour le bassin de l'oued Mellah ; 529,7 mm pour celui de l'oued Ressoul en zone nord-tellienne).

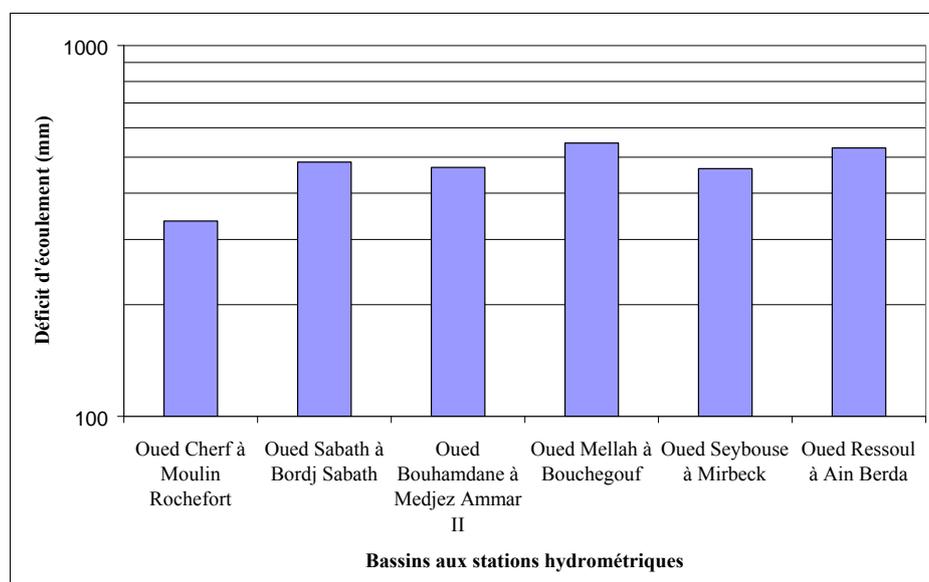


Fig. 89: Le déficit d'écoulement pour les bassins aux stations hydrométriques

Les pluies sont le facteur explicatif le plus important pour le déficit d'écoulement mais les valeurs restent tout de même rapprochées (fig.89). Les écarts sont relativement réduits en pourcentage, -38,4 % entre les deux valeurs extrêmes, par rapport aux autres paramètres hydrologiques.

2.1.3. Comparaison avec les résultats d'autres bassins algériens

Ces résultats concordent avec ceux des auteurs qui ont étudié les éléments du bilan hydrologique pour les stations hydrométriques de la Seybouse, Ghachi (1983) et Demmak (1984)

Les valeurs obtenues par Ghachi (1983) pour la période 1968/69-1975/76 concordent globalement avec celles obtenues dans cette étude (période 1971/72-1987/88). Les valeurs de E_c oscillent entre 18 mm à la station de Moulin Rochefort (pluie = 436 mm) et 198,5 mm à la station de Bouchegouf contrôlant le bassin de l'oued Mellah (pluie = 709,3 mm). L'oued Ressoul est dans une situation intermédiaire avec une pluie moyenne de 635 mm et une lame écoulée de 105 mm. Les bassins des oueds Bouhamdane (E_c = 65 mm, pluie moyenne = 631 mm) et Seybouse à Mirbeck (E_c = 69 mm, pluie moyenne = 533 mm) ont des écoulements proches.

D'après Demmak (1982), les lames écoulées sont respectivement de 97,5 mm pour l'oued Ressoul (pluie moyenne de 601,4 mm) et de 152 mm pour l'oued Mellah (pluie moyenne de 558 mm) pour la période 1972/72 à 1978/79.

Les résultats obtenus pour les sous-bassins de l'oued Seybouse pour la période 1971/72-1987/88 correspondent également à ceux calculés par d'autres chercheurs pour les

bassins à écoulement exoréiques algériens (Mebarki 1982 et 2005; Bouanani, 2005; Khanchoul, 2006).

Les résultats obtenus par Mebarki (1982) pour les bassins équipés de stations hydrométriques du bassin du Kebir Rhumel concordent sur le plan de la répartition géographique des termes du bilan hydrologique interannuel avec ceux de Ghachi (1983) et avec les résultats de la présente étude sur la Seybouse. Dans le domaine des Hautes Plaines, les lames écoulées sont respectivement de 11 et 14 mm pour les stations d'Oued Athmenia et Ain Smara avec des lames précipitées de 335 et 347 mm. La station de Grarem avec 423 mm de pluie moyenne a un écoulement de 31 mm. L'écoulement à la station d'El Ancer est de 99 mm pour une pluie moyenne de 525 mm. La station de Bou Siaba avec un bassin montagneux de 470 km², produit un écoulement très fort (279 mm) pour une pluie moyenne de 830 mm.

Bouanani (2005) a étudié quatre sous-bassins de la Tafna (NW algérien). Les lames écoulées du bassin de l'oued Mouilah sont ($E=20,4$ mm et $P=340,4$ mm), et celles du bassin de l'oued Isser sont (37,3 mm, pour une pluie de 444,8mm). Les lames écoulées des oueds Sebdou et Sikkak, 180,8 mm avec une pluie moyenne de 434,9 mm (1970-98) et 93,7 mm correspondent à des débits spécifiques respectivement de 5,7 et 3 l/s/km². Ces valeurs sont liées au karst très développé qui permet aux circulations d'eaux souterraines de soutenir l'écoulement en période d'étiage.

Khanchoul (2006) a dégagé des résultats concernant les écoulements pour cinq bassins telliens dont trois sont situés dans le bassin de l'oued Seybouse. Pour la période 1975/76-1996/97, les résultats obtenus pour l'oued Bouhamdane, l'oued Ressoul à Ain Berda, et l'oued Mellah à Bouchegouf sont respectivement un écoulement de 67,2 mm pour une lame précipitée de 573,6 mm; pour l'oued Ressoul, $E_c=120,3$ mm pour $P=542,8$ mm; pour l'oued Mellah, $E_c=184,1$ mm pour $P=687,5$ mm.

A titre de comparaison, dans un domaine hydro climatique différent, pour le bassin du Hodna, à écoulement endoréique, les lames écoulées aussi bien que les coefficients d'écoulement et les déficits d'écoulement sont relativement faibles à cause de la faiblesse des précipitations ($E_c =5,6$ mm pour le bassin de l'oued L'ham à la station Rocade Sud pour une lame précipitée de 324 mm; 20,2 mm à la station de Medjez avec une pluie moyenne de 398 mm; $E_c =15,2$ mm pour le bassin de l'oued Loukman à la station de Ced Fagues avec une pluie moyenne de 412 mm; $E_c =22,4$ mm pour le bassin de l'oued Soubella à la station de Sidi Ouadah avec une pluie moyenne de 470 mm; $E_c =2,3$ mm pour le bassin de l'oued Boussaada à la station de Moulin Ferrero avec une pluie moyenne de 240 mm (Nemouchi.2000).

Taibi (1993) classe le bassin de l'oued Seybouse dans la zone Tell Est avec les caractéristiques hydrologiques suivantes: hydrogramme annuel à une pointe, hautes eaux en février –mars, basses eaux en juillet-aout; grande amplitude entre les débits mensuels maximum et minimum (rapport maximum/minimum= 23).

2.2. Corrélation débit-surface, débit –pluie et déficit d'écoulement –pluie

2.2.1. Corrélation débits absolus - surfaces des bassins jaugés

Les valeurs des débits moyens annuels et leur variabilité spatiale correspondent au schéma connu pour les bassins exoréiques en Algérie du Nord (Kébir Rhumel, Soummam).

Les profils hydrologiques ou profil apports –surfaces sont des graphiques mettant en relation les apports et les surfaces drainées. Plusieurs auteurs ont montré l'existence d'une relation significative entre le débit moyen annuel Q (m³/s) et la surface A (km²), celle-ci est du type : $Q = a * S^b$ où le débit varie comme une fonction puissance de la surface. Les deux paramètres a et b ont une signification physique selon les auteurs, ils représentent des paramètres caractéristiques de chaque bassin (Tricart et Hirsch, 1960 ; Corbonnois et al, 1999; Arts et Sary, 2000 ; Corbonnois , 2000 ; Bravard et Petit , 2000).

Pour le bassin de la Seybouse, les profils surfaces - apports des bassins sont établis pour les bassins unitaires équipés de stations hydrométriques et à la confluence des bassins unitaires (valeurs estimées des débits) à leur confluence avec l'oued principal, la Seybouse.

L'importance respective des différentes zones contributives aux écoulements (Hautes Plaines, Tell, et plaines littorales), leurs caractéristiques et leur configuration introduisent des différences notables dans l'organisation amont-aval des écoulements exprimés en débits et les profils surfaces - apports des bassins (fig.90).

Le profil apports-surfaces du bassin de la Seybouse est globalement similaire à ceux des bassins à écoulement exoréique (Kebir-Rhumel, Soummam) établis par Mebarki (2005) mais avec des nuances de détail assez importantes.

Les Hautes Plaines produisent un écoulement relativement faible à cause de la faiblesse des précipitations et l'importance de la perméabilité.

La station de Moulin Rochefort, qui contrôle le Haut Cherf (1738 km², situé en totalité en Hautes Plaines) enregistre un débit de 1,23 m³/s.

A l'aval de la station de Moulin Rochefort, le Cherf aval draine une zone de transition sud-tellienne.

La Seybouse résulte de la rencontre de l'oued Cherf (bassin de 2880 km²) et de l'oued Bouhamdane (1105 km²).

Les débits de la Seybouse se gonflent fortement avec les apports des bassins Sud-Telliens (oueds Bouhamdane, bassins de la Moyenne Seybouse, Mellah).

Les débits s'accroissent d'une façon considérable à la confluence de l'oued Cherf et de l'oued Bouhamdane, ensuite par les apports des petits bassins dans la Moyenne Seybouse (oued Hélia, oued Bou Sorra) et enfin par ceux de l'oued Mellah dont la contribution est importante. Ces apports apparaissent nettement importants à la station de Mirbeck.

Les apports dans la Basse Seybouse sont cependant plus modestes hormis ceux du versant sud du massif de l'Edough, à cause de la lithologie perméable (formations quaternaires) et de la faiblesse des reliefs même si les précipitations sont de 600 à 700 mm.

Dans la Basse Seybouse, la lithologie est perméable (formations quaternaires) et la faiblesse des reliefs favorisent plus l'infiltration dans cette zone qui est par ailleurs fortement urbanisée (conurbation Annaba-Sidi Ammar-El Hadjar).

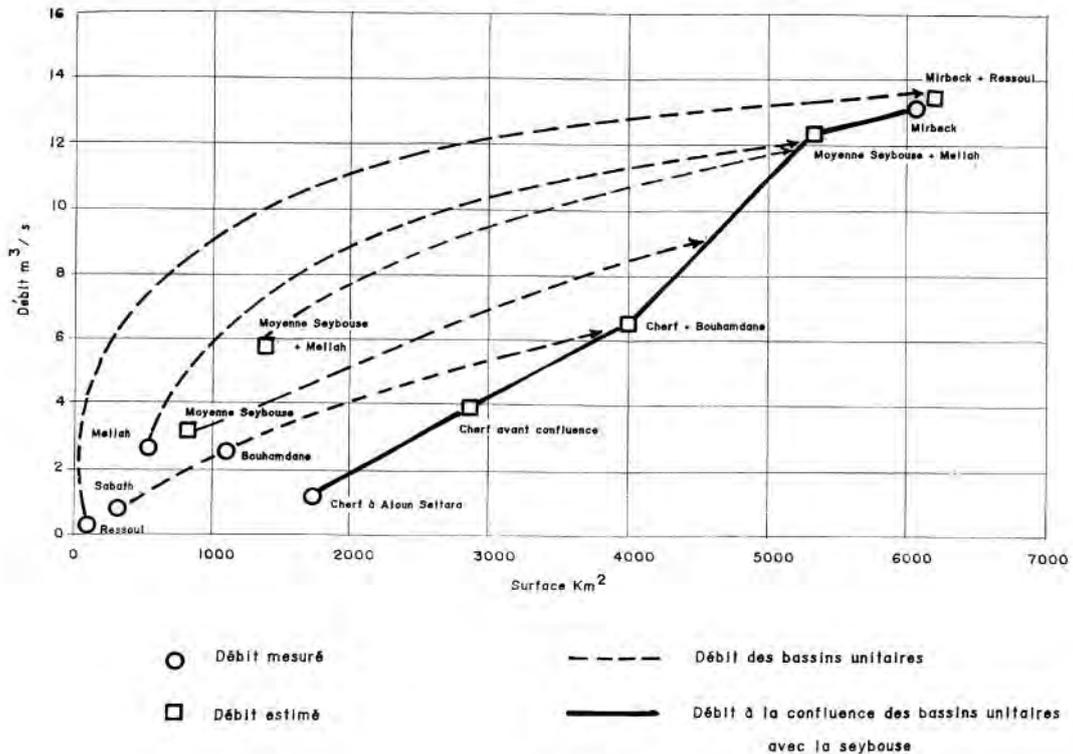


Fig.90: Le profil apports-surfaces du bassin de la Seybouse le long de la vallée principale

La figure 91 établie pour les six stations hydrométriques montre que les débits sont reliés à la surface des bassins avec la relation suivante:

$$Q = 0.0155 * \text{Surface}^{0.7247}$$

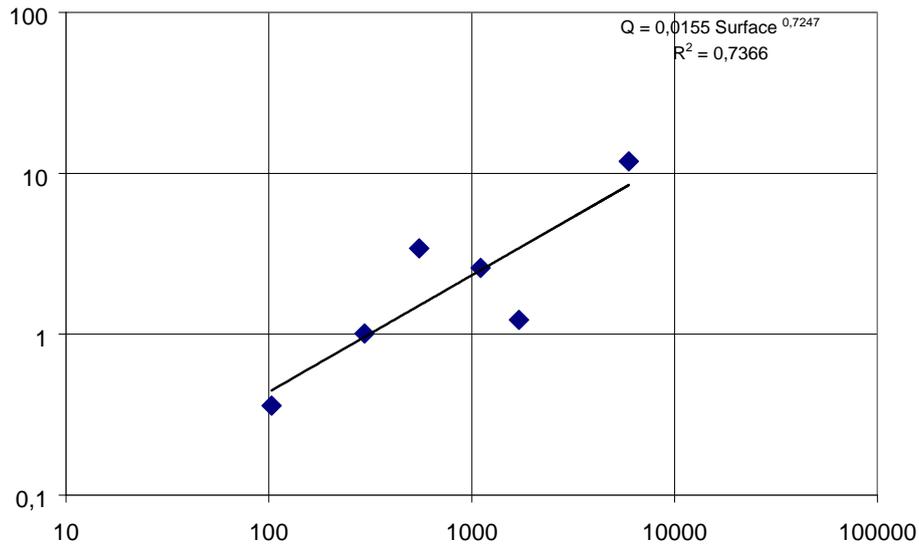


Fig 91: Relation entre la surface des bassins (km²) et les débits absolus (m³/s)

Cette relation est exprimée avec un coefficient de corrélation de (0,858). La variance expliquée est de 73,66 %. La variance résiduelle (26 %) est à relier principalement à la pluviométrie et à la lithologie des bassins versants (degré de perméabilité des roches).

2.2.2. Corrélation écoulement moyen annuel - pluie moyenne annuelle

Les valeurs des lames écoulées (volumes écoulés rapportés à la surface des bassins) mettent mieux en lumière les différences de comportement des bassins. Elles sont très corrélées avec la pluviométrie moyenne.

On notera la faiblesse de l'écoulement annuel dans le domaine des Hautes Plaines (oued Cherf amont). Par contre dans les bassins Telliens, la lame écoulée est importante (oued Mellah, oued Sabath, oued Ressoul).

Pour montrer cette relation, on établira à partir des données aux stations hydrométriques une régression entre la pluie moyenne et la lame écoulée.

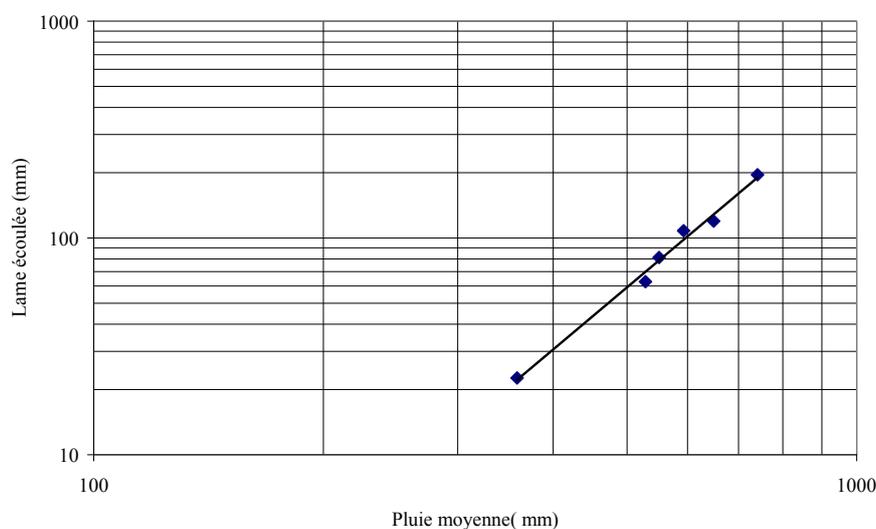


Fig.92 : Relation entre la pluie moyenne des bassins (mm) et les lames écoulées (mm)

La lame écoulée est reliée à la pluie moyenne avec la relation suivante (fig.92):

$$Ec = 0.0000006 * \text{Pluie moyenne}^{2.9609}$$

Cette relation est exprimée avec un coefficient de corrélation de (0,995). La variance expliquée est de 99 %. La variance résiduelle est à relier principalement à la lithologie des bassins versants.

Les résultats obtenus pour les bassins jaugés de la Seybouse correspondent à ceux obtenus par Mebarki pour les bassins de l'Est algérien (tabl.34)

Tableau 34: Relations entre facteurs de l'écoulement et écoulement pour les bassins de l'Est algérien (Mebarki, 2005)

Relation entre variables	Expression numérique
Débits annuels en fonction de la surface	Régression linéaire simple entre les logarithmes des débits annuels moyens et des surfaces $y = 0.67 x - 1.84$ avec $R = 0.7113$
Écoulements annuels en fonction des pluies annuelles	Relation parabolique $y = 0.0004 x^2 - 0.0735 x + 3.1528$; $R^2 = 0.9125$, $R=0.955$
Écoulements annuels en fonction des pluies annuelles	Relation linéaire $y = 0.4388 x - 125.95$; $R^2 = 0.8324$, $R = 0.91$
Coefficients d'écoulements en fonction des lames précipitées	Relation linéaire $C \% = 0.0402 P - 5.1491$; $R^2 = 0.7103$, $R = 0.84$

2.2.3. Corrélation déficit d'écoulement –pluie

Le déficit d'écoulement est très fortement corrélé à la lame précipitée. La relation calculée est $D.E.=5.9434 * P^{0.6901}$, avec un coefficient de corrélation de 0,986 ($R^2=0,973$). La variance expliquée est très forte (97,3%) (fig.93).

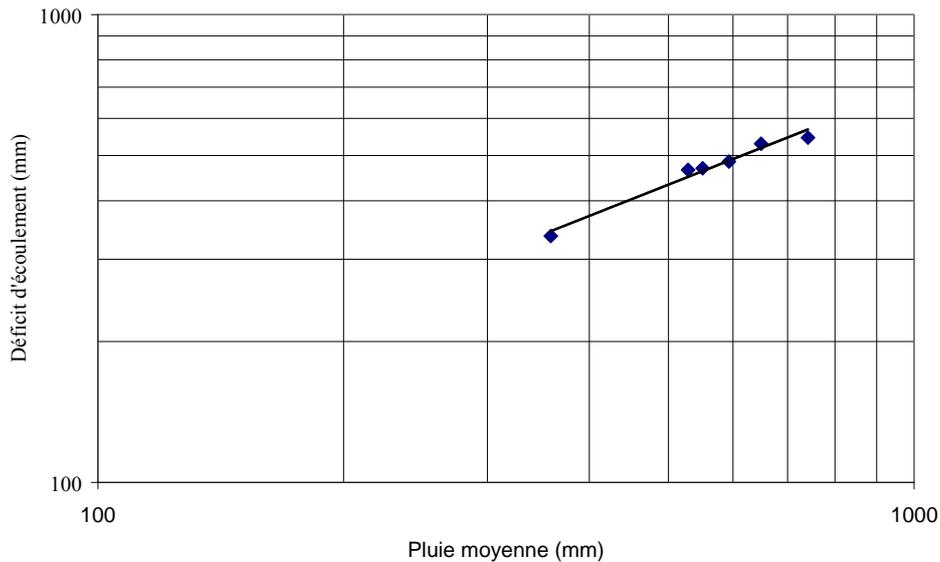


Fig.93 : Relation Pluie-déficit d'écoulement pour les bassins de l'oued Seybouse

2.3. Cartographie de l'écoulement annuel moyen

La cartographie de l'écoulement moyen annuel est réalisée selon deux méthodes, le modèle bilan en tenant compte du déficit d'écoulement de Turc et le modèle LOIEAU (Mebarki, 2005 et 2009).

2.3.1. Cartographie de l'écoulement moyen selon le modèle bilan tenant compte du déficit d'écoulement de Turc (Méthode Mebarki)

La cartographie de l'écoulement moyen annuel s'est basée sur le modèle bilan tenant compte du déficit d'écoulement de Turc (Mebarki, 2005). Après avoir vérifié la bonne corrélation ($R=0,94$) entre l'ETR cartographiée du modèle de Turc et l'E.T.R. déduite des bilans observés dans les bassins jaugeés de l'Est algérien, l'auteur a proposé de cartographier l'écoulement aux nœuds d'une grille de 2 km de côté, en appliquant la formule simple du bilan: $E_c = P - ETR$ en bornant, toutefois, l'écoulement minimal à 5 mm par an.

Les lames écoulées annuelles oscillent entre 5 mm au Sud et 200 mm dans le bassin de l'oued Mellah (zone montagneuse des monts de la Medjerda). Les courbes d'iso-écoulement s'organisent comme suit (fig.94):

- dans la zone Sud du bassin, les zones d'écoulement sont organisées en bandes sensiblement latitudinales au-dessous de la courbe d'iso-écoulement 50 mm, et comprenant les courbes 20, 10 et 5 mm ;
- la courbe de 100 mm couvre une bonne partie du bassin de l'oued Mellah amont et aval, la zone limitrophe avec le djebel Edough, les limites avec les bassins côtiers Constantinois, ainsi que la zone de la Mahouna, dans la Moyenne Seybouse;
- enfin, la courbe de 200 mm est légèrement représentée dans la zone amont du bassin de l'oued Mellah.

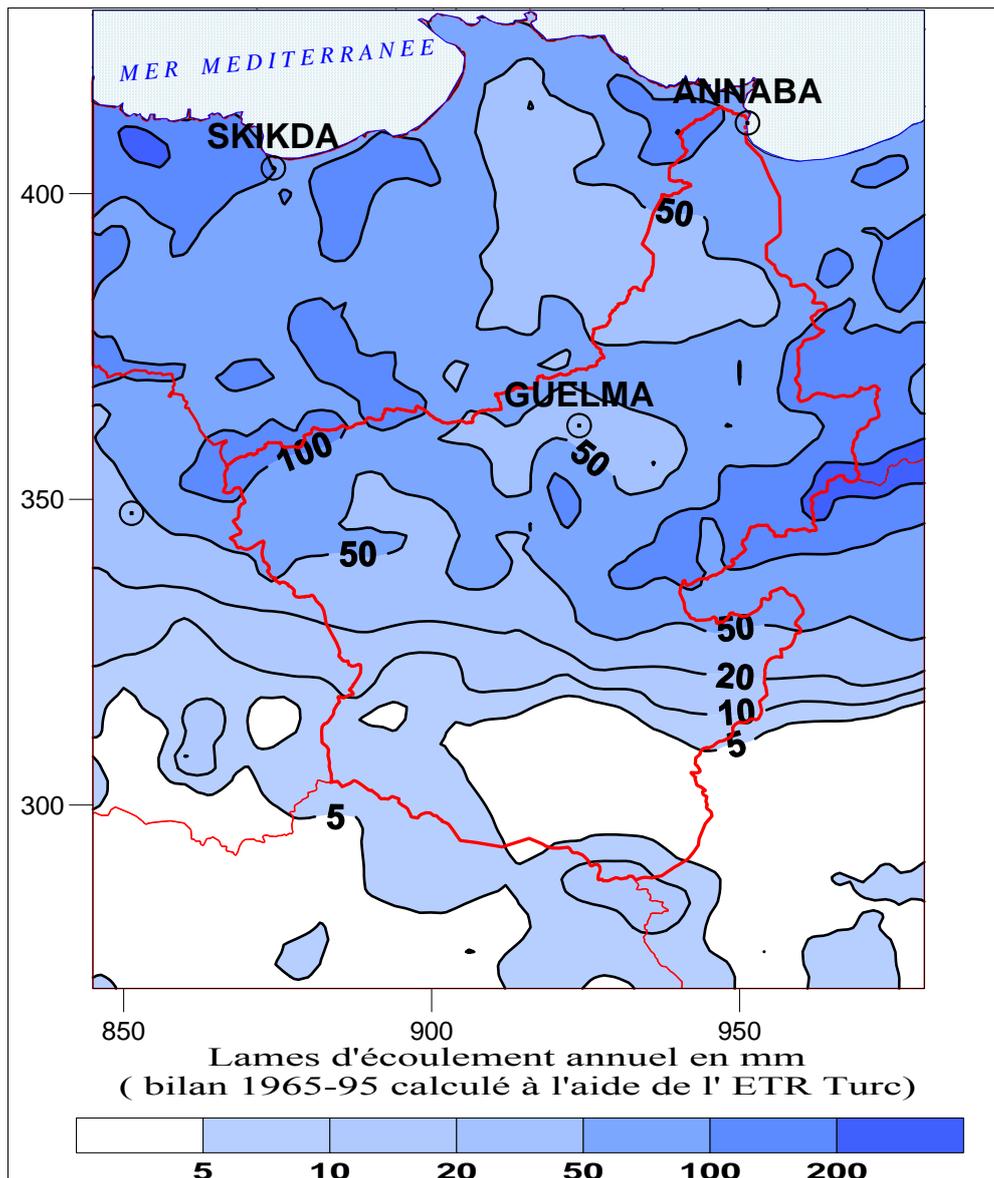


Figure 94: Lames écoulées annuelles en mm (bilan 1965-95).
D'après MEBARKI A., OPU., 2009

2.3.2. Méthode Loieau

Le modèle Loieau est un modèle à réservoirs issu de GR2M du CEMAGREF. Il a été adopté par l'A.N.R.H. pour la simulation des écoulements mensuels aux nœuds d'un maillage kilométrique couvrant le Nord de l'Algérie, en alimentant le modèle de pluies et des ETP connues aux nœuds de ce même maillage. Deux paramètres de calage ont été utilisés pour optimiser les simulations sur les bassins algériens (A.N.R.H., 2003; Assaba, 2004).

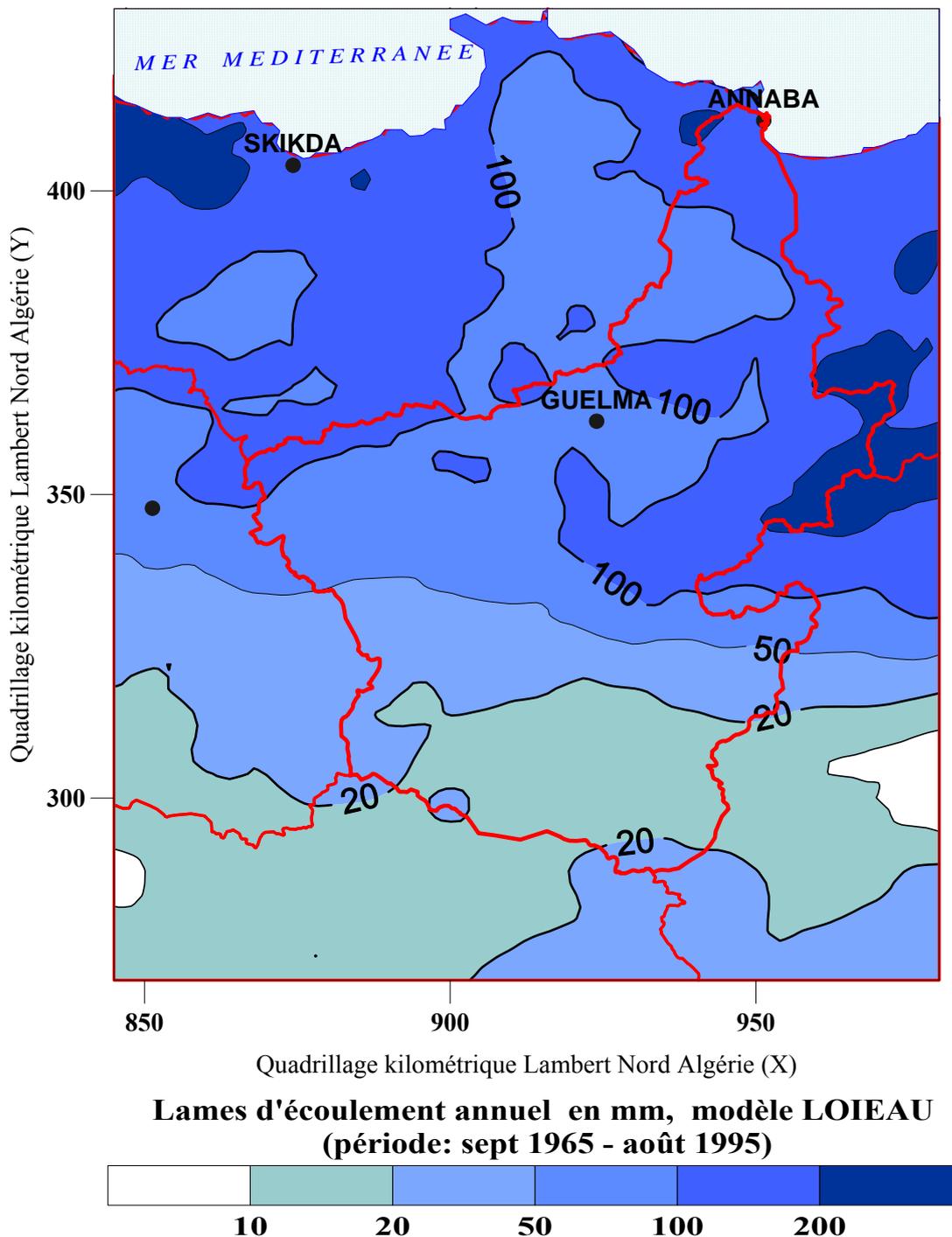


Figure 95: Lames écoulées annuelles en mm, modèle LOIEAU

La carte des écoulements annuels présentée ici (fig.95) est extraite de la carte de l'écoulement annuel de l'Algérie du Nord. La courbe d'iso-écoulement 200 mm est localisée dans les zones les plus élevées du bassin de l'oued Mellah et une petite zone limitrophe avec le djebel Edough.

La courbe 100mm couvre une bonne partie du bassin de l'oued Mellah amont et aval, la zone qui forme la limite avec les bassins côtiers Constantinois, la zone de la Mahouna dans la Moyenne Seybouse et les monts de la Medjerdah.

Les iso-courbes entre 50 et 100 mm couvrent la Moyenne Seybouse et les 2/3 du bassin de l'oued Bouhamdane.

Pour les Hautes Plaines, les valeurs des courbes oscillent entre 50 mm, à moins de 20 mm (bassin de l'oued Cherf amont).

Par comparaison, à l'échelle globale du bassin de la Seybouse, la lame écoulée estimée avec la simulation LOIEAU est de 75,0 mm alors que la lame observée est 62,8 mm.

3. LA VARIABILITE INTERANNUELLE DES ECOULEMENTS

Pour la période septembre 1971 à août 1988, les paramètres hydrologiques aussi bien annuels que mensuels et journaliers ont connu une très grande variabilité. Celle-ci est à mettre en relation directe avec la variabilité des précipitations.

3.1. Variabilité interannuelle des débits moyens annuels

3.1.1. Les modules et leurs fluctuations annuelles

Tableau 35 : Valeurs moyennes et extrêmes des lames écoulées annuelles

Bassin	Lame écoulée (mm)	Ecart-type (mm)	Coefficient de variation %	Ec Maximum		Ec Minimum Année	
				Valeur	Année	Valeur	Année
Cherf à Moulin Rochefort	22.6	30.4	134.2	132.9	1983/1984	4.3	1987/1988
Oued Sabath à Bordj Sabath	108	144.4	133.7	577.4	1984/1985	8.9	1973/1974
Oued Bouhamdane à Medjez Ammar II (2)	81.34	71.84	88.32	240.95	1984/1985	11.78	1973/1974
Oued Mellah à Bouchegouf	195.6	130.1	66.5	429.5	1972/1973	33.6	1987/1988
Oued Seybouse à Mirbeck	62.8	53.9	85.8	178.8	1972/1973	6.3	1979/1980
Oued Ressoul à Ain Berda	119.6	119.6	99.8	387.3	1986/1987	1.2	1987/1988

Oued Bouhamdane à Medjez Ammar II (1) : période commune 1971/72-1986/87 (les écoulements à partir de décembre 1987 sont influencés par les lâchés du barrage de Hammam Debagh).

Les figures 96 à 101 et le tableau 35 montrent bien la variabilité des débits moyens annuels, et leur faiblesse pour les bassins des oueds Sabath et Ressoul, à cause de leurs surfaces réduites.

Pour l'ensemble des stations, les moyennes inter-annuelles sont très fortement influencées par les valeurs extrêmes de la période étudiée et notamment les années 1984/85 et 1972/73.

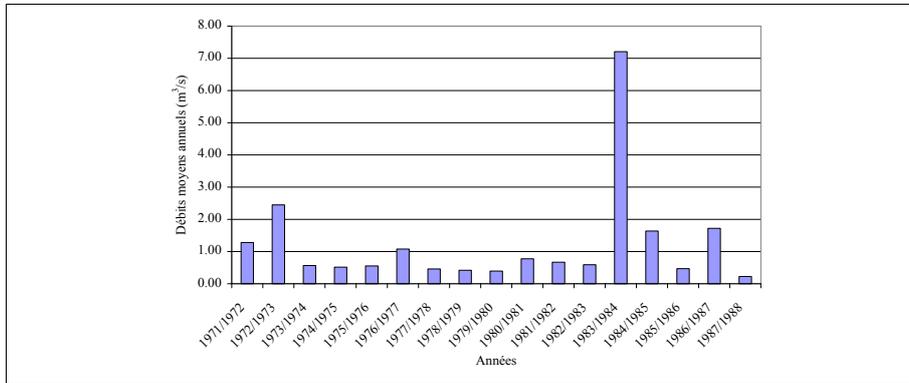


Fig.96 : Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Cherf à la station de Moulin Rochefort

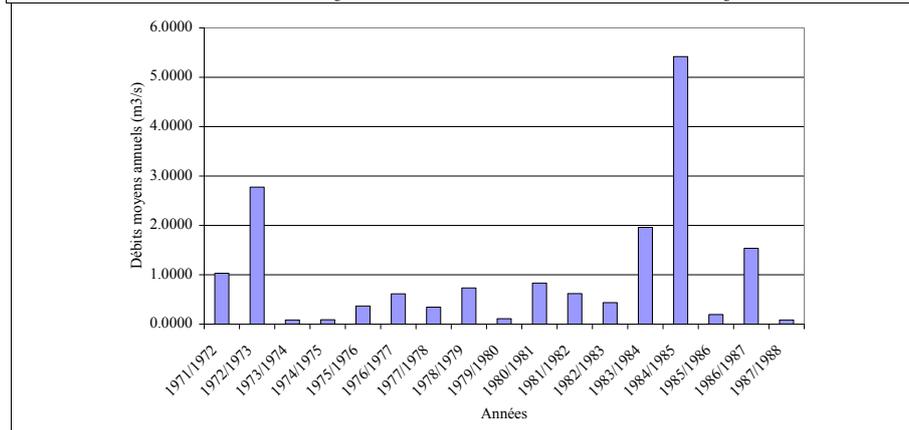


Fig.97 : Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Sabath à la station de Bordj Sabath

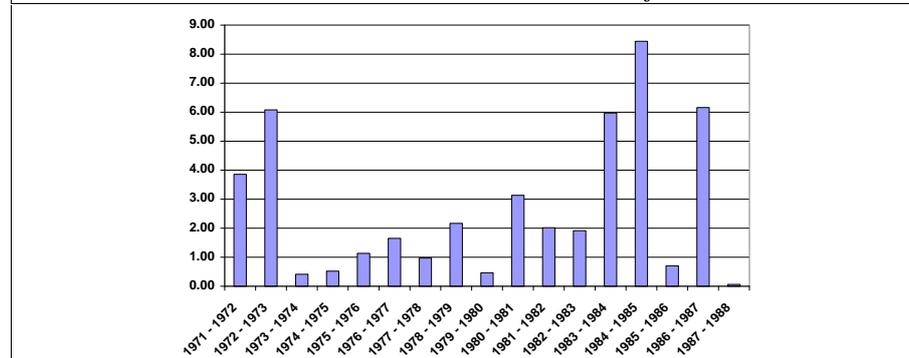


Fig.98 : Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II

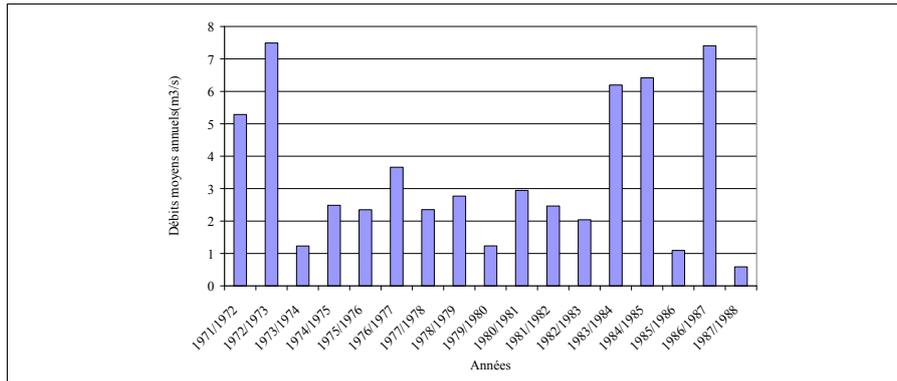


Fig.99 : Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Mellah à la station de l'oued Mellah Bouchegouf

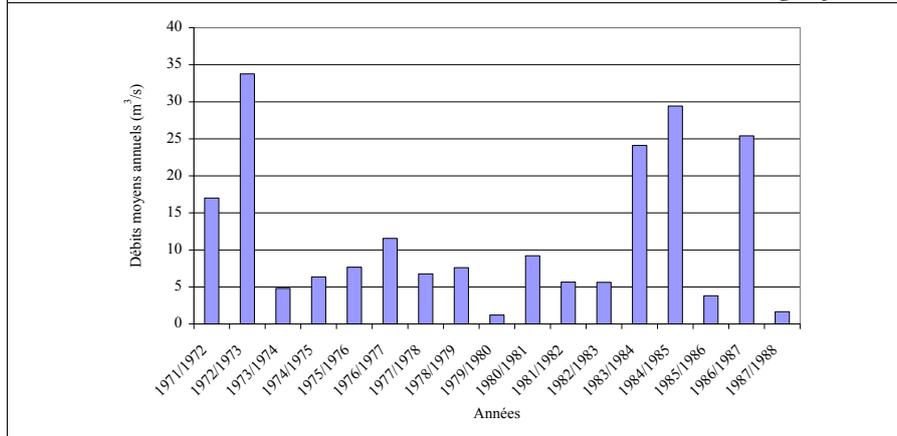


Fig.100 : Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Seybouse à la station de Mirbeck

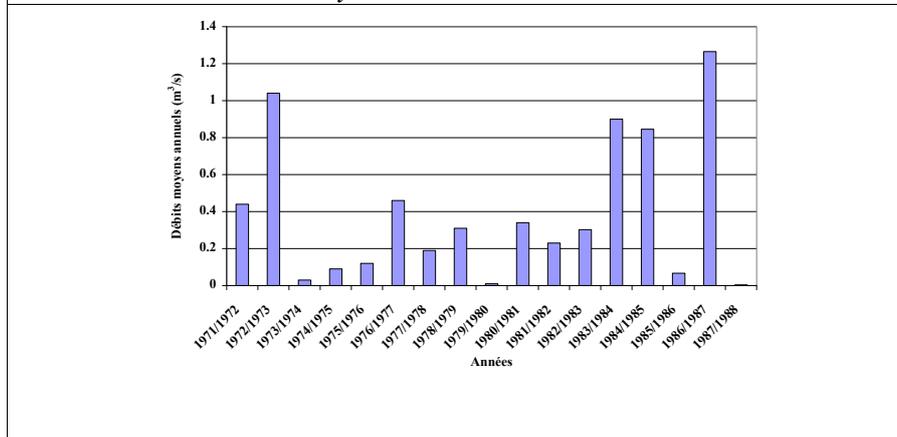


Fig.101 : Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Ressoul à la station d'Ain Berda

Pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort, six valeurs de débits moyens annuels sont supérieures à 1 m³/s.

Les débits moyens inter-annuels sont importants pour les bassins de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II, l'oued Mellah à Bouchegouf et l'oued Seybouse à Mirbeck.

Pour l'oued Seybouse à Mirbeck, 6 valeurs annuelles dépassent 10 m³/s.

On notera la faiblesse des écoulements annuels de l'oued Ressoul à la cause de sa modeste surface. Les débits moyens annuels sont toujours inférieurs à 1,5 m³/s.

Par contre, le bassin de l'oued Sabath, lui aussi de taille modeste, produit des écoulements annuels plus importants (5 valeurs sont supérieures à 1 m³/s). Les deux années 1972/73 et 1984/85 sont exceptionnelles à cause des crues enregistrées.

Pour l'ensemble des bassins, on notera la très grande variabilité interannuelle des débits liés à la très forte variabilité des précipitations.

Les moyennes interannuelles sont très fortement influencées par les valeurs extrêmes de la période étudiée. Les années 1972/73 et 1984/85 sont pour l'ensemble des bassins des années hyper-humides à cause des crues enregistrées.

Les moyennes inter-annuelles sont très fortement influencées par les valeurs extrêmes de la période étudiée.

Les coefficients de variation qui expriment la variabilité relative sont très forts pour les oueds Cherf amont et l'oued Sabath, mais ses valeurs sont fortes pour tous les bassins.

Les valeurs maximales d'Ec mm ne correspondent pas aux mêmes années pour toutes les stations. Elles sont liées à l'importance des crues dans l'année et aux valeurs atteintes par les débits maximaux (exemples : oued Sabath : 1984/1985; oued Cherf amont: oued Mellah et oued Seybouse à Mirbeck : 1972/1973; oued Ressoul: 1986/1987).

3.1.2. Analyse statistique des débits annuels observés

L'information hydrologique doit être complétée par l'estimation des débits dépassés plus fréquemment ou plus rarement.

L'ajustement des débits moyens annuels permettant d'estimer les débits fréquentiels est réalisé grâce à la loi log-normale.

Tableau 36: Débits fréquentiels annuels dans le bassin de l'oued Seybouse

Période de retour (ans)	100	50	20	10	2	10	20	50	100	F0.99/F0.9
	Fréquence sèche					Fréquence humide				
Fréquences au non-dépassement	0.01	0.02	0.05	0.1	0.5	0.9	0.95	0.98	0.99	
Variable réduite de Gauss	-2.33	-2.05	-1.645	-1.28	0	1.28	1.645	2.05	2.33	
Cherf	0.013	0.020	0.035	0.057	0.337	1.979	3.279	5.743	8.461	4.7
Sabath	0.024	0.035	0.057	0.090	0.444	2.185	3.442	5.700	8.079	3.7
Bouhamdane	0.187	0.246	0.368	0.529	1.881	6.692	9.610	14.359	18.954	2.8
Mellah	0.285	0.353	0.480	0.634	1.676	4.436	5.855	7.967	9.857	2.2
Ressoul	0.003	0.006	0.011	0.020	0.175	1.503	2.776	5.484	8.780	5.8
Mirbeck	1.139	1.453	2.068	2.842	8.668	26.434	36.329	51.699	65.981	2.5

En hydrologie, à un événement est associée une durée (Laborde, 2000). La fréquence est définie comme le nombre d'événements favorables sur le nombre total de durées. La période de retour T (ou temps de récurrence) est définie comme l'inverse de la fréquence au non dépassement F (ou de la fréquence au-dépassement F_1 si $F_1 < 0.5$)

$$T = \frac{1}{F_1} \text{ si } (F < 0.5), F_1 = 1 - F$$

$$T = \frac{1}{1 - F} \text{ si } F > 0.5$$

Le débit de fréquence au non-dépassement 0,9 a une période de retour de 10 ans, et correspond à la fréquence décennale humide. Par contre, le débit de fréquence au non-dépassement 0,1 qui a également une période de retour de 10 ans, correspond quant à lui à la fréquence décennale sèche.

A l'instar des pluies annuelles, la faiblesse des valeurs correspondant aux années sèches est bien mise en évidence par les valeurs fréquentielles. Par contre, les débits pour les fréquences humides sont relativement forts pour les bassins des oueds Mellah, Bouhamdane et Seybouse à Mirbeck (tabl.36).

Les rapports $F_{0.99}/F_{0.9}$ présentent des valeurs proches et relativement faibles pour les bassins telliens des oueds Bouhamdane (2,8), Seybouse à Mirbeck(2,5) et Mellah (2,2) alors que ces rapports sont assez forts pour les bassins des oueds Ressoul(5,8), Cherf (4,7), et Sabath (3,7) (tabl.36).

4. LES ECOULEMENTS MENSUELS ET LES REGIMES SAISONNIERS

A travers les coefficients mensuels de débits, on remarque la différence entre le régime des Hautes Plaines à l'exemple de la station de Moulin Rochefort et le reste des stations. Pour les Hautes Plaines, la période des hautes eaux s'étale sur 4 mois (janvier, février, mars et avril), les 8 mois restant constituant la période des basses eaux. Pour les stations telliennes, la période des hautes eaux s'étale sur 5 mois (fig.102 à 107).

Les moyennes inter-mensuelles sont très fortement influencées par les valeurs extrêmes de la période étudiée. Exemple : le débit moyen mensuel de mars 1973 influe fortement sur la moyenne interannuelle du mois de mars pour les stations d'Ain Berda (6,94 m³/s) et Mirbeck (149,93m³/s). Pour le mois de février, le débit moyen inter-mensuel à la station de Moulin Rochefort est fortement influencé par le mois de février 1984 (78,7 m³/s).

On notera l'indigence des écoulements dans les deux bassins de taille modeste, le bassin de l'oued Sabath à la station de Bordj Sabath et le bassin de l'oued Ressoul à la station d'Ain Berda, à cause de l'absence de soutien des écoulements superficiels par les eaux souterraines.

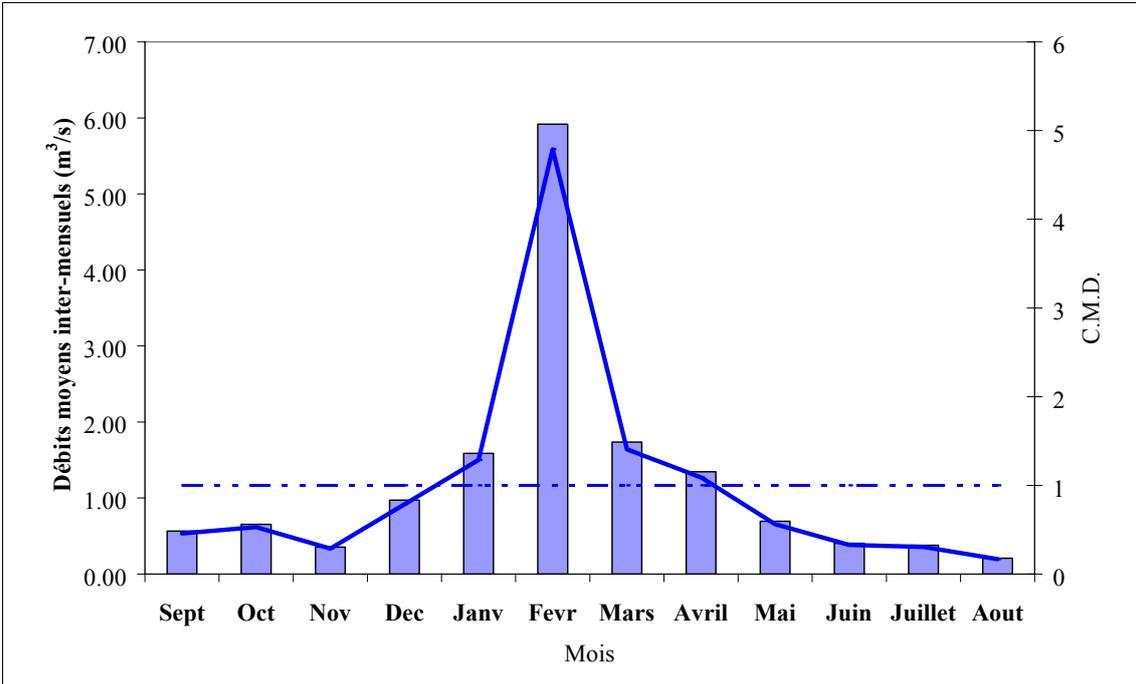


Fig.102: Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels de l'oued Cherf à la station de Moulin Rochefort (1971/72-1987/88)

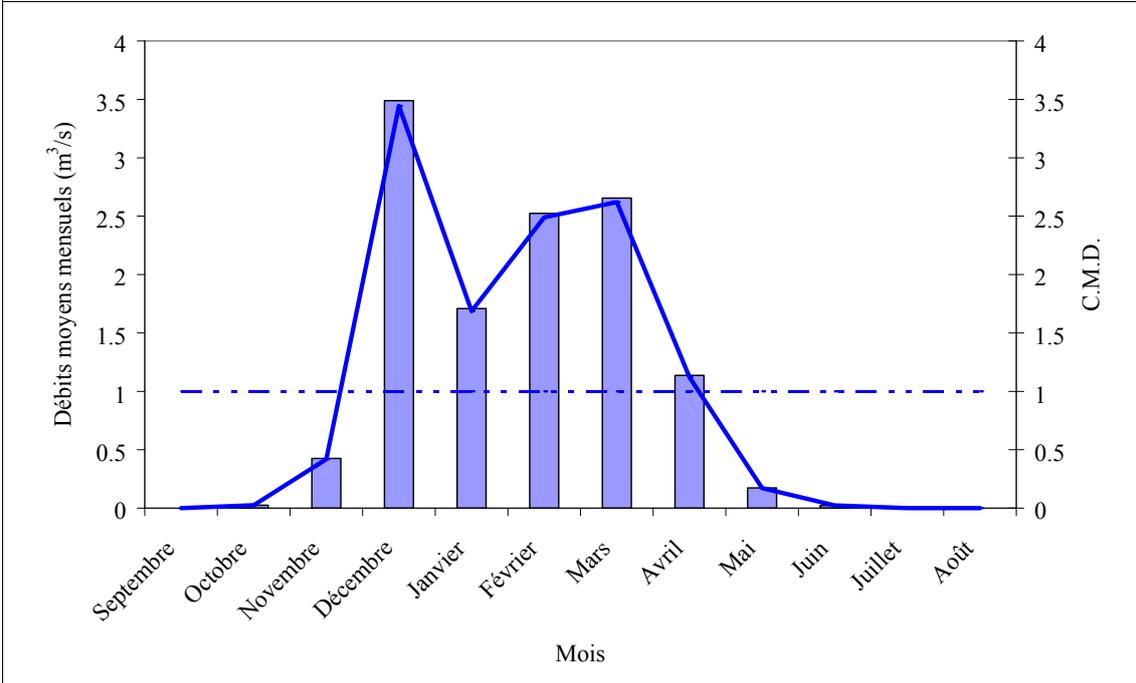


Fig.103: Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels de débits de l'oued Sabath à la station de Bordj Sabath (1971/72-1987/88)

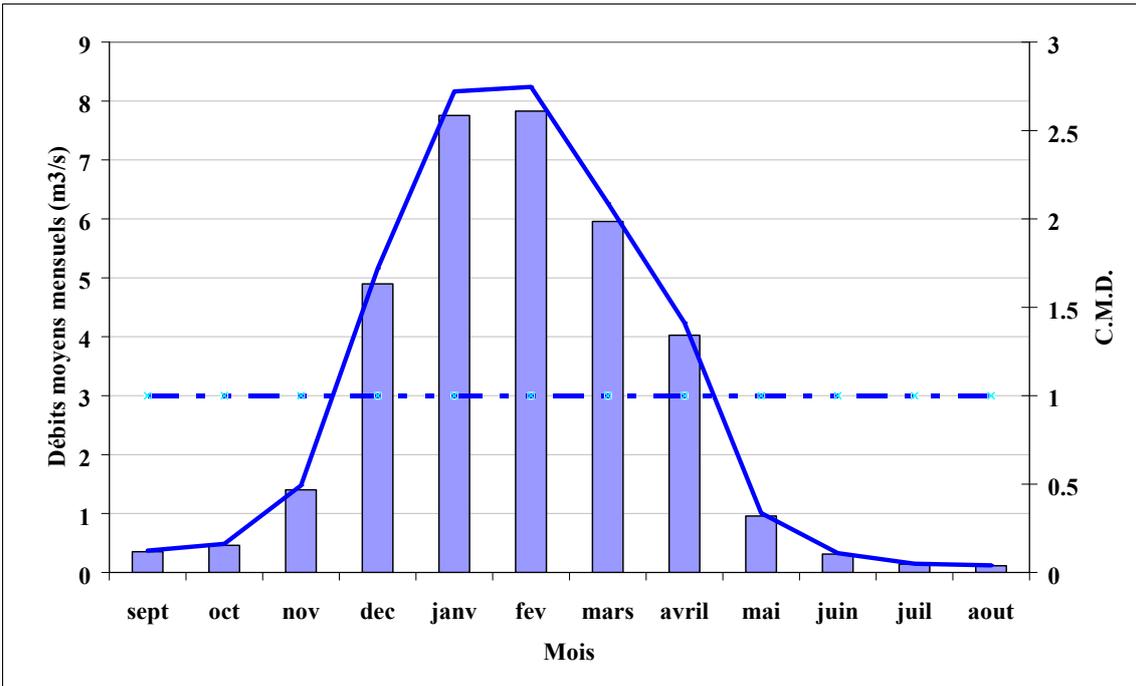


Fig.104: Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels des débits de l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II (1971/72-1986/87)

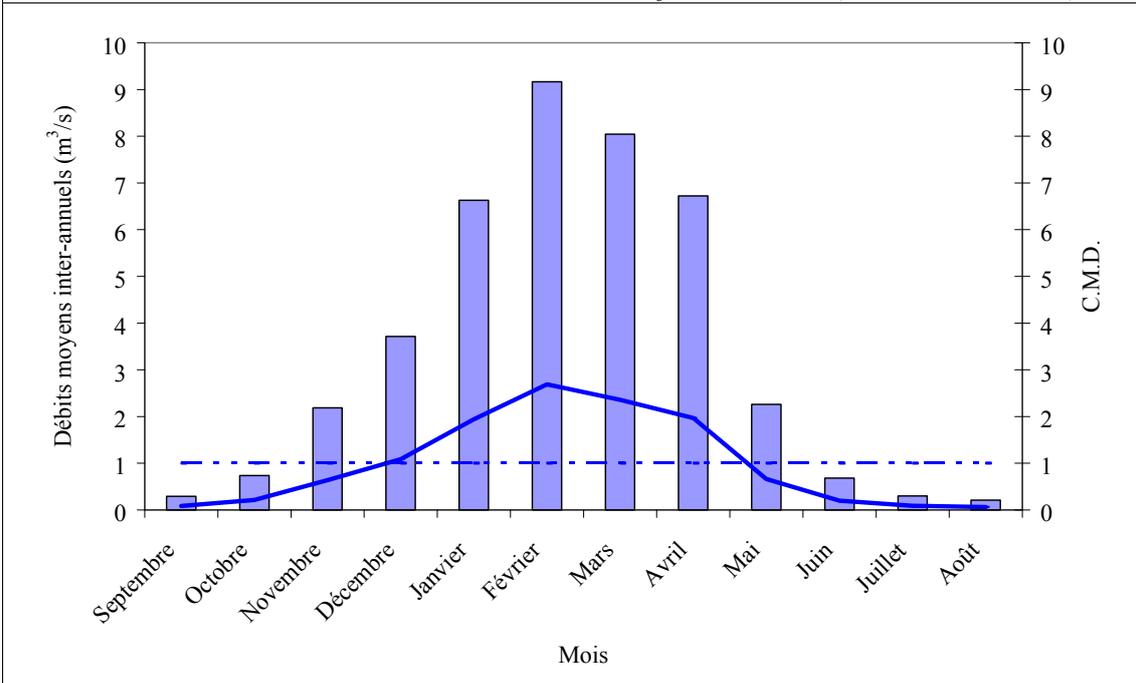


Fig.105: Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels des débits de l'oued Mellah à la station de Bouchegouf (1971/72-1987/88)

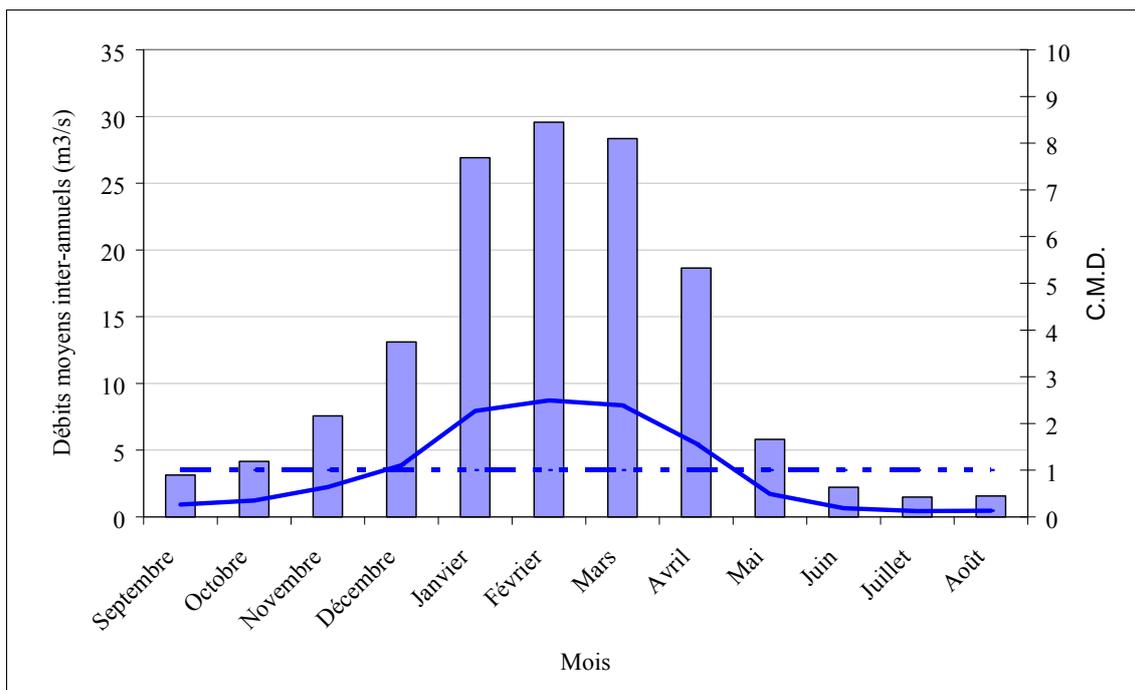


Fig.106: Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels des débits de l'oued Seybouse à la station de Mirbeck (1971/72-1987/88)

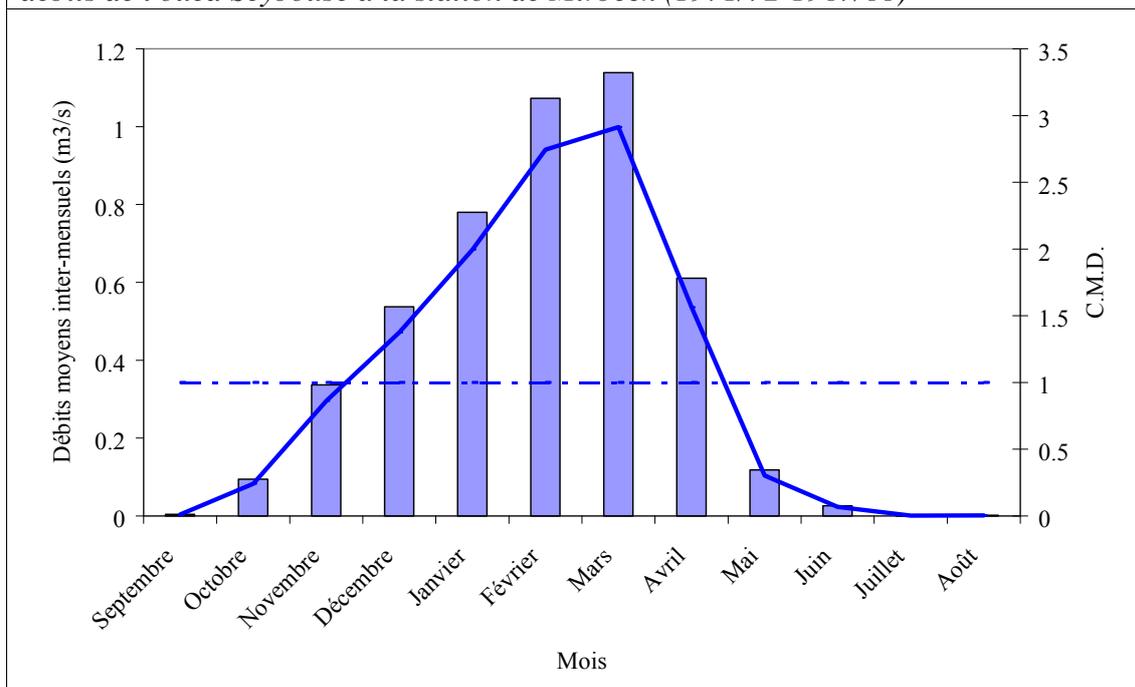


Fig.107: Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels des débits de l'oued Ressoul à la station d'Ain Berda (1971/72-1987/88)

5. LES DEBITS MAXIMAUX MOYENS JOURNALIERS ET INSTANTANES ET LEUR VARIABILITE

5.1. Méthodes d'étude des crues: rappels

Etant donné l'importance des risques de nature hydro-climatologique (pluies maximales journalières, pluies de courte durées, et leurs effets sur les crues et les

inondations), les travaux de recherche universitaires se sont multipliés. De même, l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.) a lancé et réalisé des études sur les pluies extrêmes et les débits de crue en Algérie (A.N.R.H., 2007).

Les crues ont de tout temps provoqué des inondations dans le monde et en Algérie, dans les différents types de milieux, des plus urbanisés aux zones rurales, sous tous les types de climats. Cependant, c'est dans les zones très urbanisées (Bab El Oued, 09 et 10 novembre 2001), vallée du M'zab (Ghardaia, fin 2008/ début 2009), wilaya d'Et Taref (mars 2012) que les dégâts liés aux pluies très intenses et aux inondations sont le plus ressentis.

Certaines crues ont provoqué des inondations sur l'Est algérien (décembre 1984), les plus importantes ont touché à la fois l'Est algérien et la Tunisie (automne 1969).

Les débits qui caractérisent les événements averses-crues ne peuvent être correctement étudiés que dans leur chronologie (Dubreuil, 1973; Mébarki, 1982).

Les méthodes d'étude des crues sont très nombreuses (Laborde, 2000) :

- Méthodes empiriques de prédétermination des crues (méthodes historiques, méthodes basées sur la relation débit-surface, celles basées sur la relation du débit avec la fréquence). Parmi les principales méthodes développées en France, la méthode CRUPEDIX, les abaques SOGREAH, la méthode SOCOSE. Plusieurs méthodes empiriques ont été développées pour l'hydrologie africaine, notamment l'approche permettant le calcul des débits de crues décennales en Afrique (régimes sahéliens et sub-désertiques; régimes tropicaux et tropicaux de transition) et une approche stochastique développée pour les pays de l'Afrique de l'ouest.

- Méthodes statistiques: elles sont utilisables lorsqu'on dispose de données de mesures de débits de crues.

-Méthodes d'études hydrométéorologiques qui font partie de l'hydrologie analytique et qui sont basées sur l'étude fine du passage des précipitations aux débits.

A rappeler également la méthode utilisant les courbes enveloppes permettant de fixer un ordre de grandeur pour les valeurs de débits extrêmes enregistrées par rapport à la surface des bassins (Francou et al, 1967).

Citons également deux groupes de méthodes, basées sur la régionalisation, le premier concerne les pluies (Ouarda et al, 1999) et le second, les débits (Saint Hilaire et al, 2003).

Les phénomènes de pluies extrêmes et d'inondations constituent ce qu'on appelle le risque pluvial (Neppel, 1997). Ce risque résulte d'un aléa qui est d'ordre climatique et d'une vulnérabilité qui est celle des bassins-versants et qui est tributaire de différents facteurs socio-économiques (Carrega, 2003).

Cette étude des débits de crues sur le bassin de la Seybouse est basée sur l'analyse statistique et l'estimation des valeurs fréquentielles des débits maximaux moyens journaliers (Q_j max) et des débits maximaux instantanés journaliers (Q_i max). L'étude du cas de l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II est basée sur une approche statistique et cartographique et la modélisation des débits de crues.

5.2. Les débits maximaux moyens journaliers et instantanés

Le tableau 37 rapporte les valeurs de débits maximaux moyens journaliers et instantanés annuels observés aux stations hydrométriques pour les trois années les plus pluvieuses (1972/73, 1983/84 et 1984/85) de la période de 1971/72 à 1987/88.

Tableau 37: Valeurs de Q max moyens journaliers et instantanés

Bassin	Q moyen journalier max (m ³ /s)	Ec moyen Journalier (mm)	Date	Q instantané max (m ³ /s)	Date
Cherf à Moulin Rochefort	114.02	5.76	<u>1972/73</u> 27 mars 1973	345.00	<u>1972/73</u> 27 mars 1973
	60.62	3.06	<u>1983/84</u> 03 février 1984	74.15	<u>1983/84</u> 03 février 1984
	14.36	0.72	<u>1984/85</u> 01 janvier 1985	23.75	<u>1984/85</u> 01 janvier 1985
Oued Sabath à Bordj Sabath	155.89	45.5	<u>1983/84</u> 03 février 1984	257.00	<u>1983/84</u> 03 février 1984
	274.67	80.2	<u>1984/85</u> 30 décembre 1984	418.78	<u>1984/85</u> 30 décembre 1984
Oued Bouhamdane à Medjez Ammar II	318	24.9	<u>1972/73</u> 27 mars 1973	696.70	<u>1972/73</u> 27 mars 1973
	524.97	41	<u>1983/84</u> 03 Février 1984	1235.66	<u>1983/84</u> 03 Février 1984
	649.11	50.7	<u>1984/85</u> 30 décembre 1984	785.10	<u>1984/85</u> 30 décembre 1984
Oued Mellah à Bouchegouf	268.84	42.2	<u>1972/73</u> 27 mars 1973	401.24	<u>1972/73</u> 27 mars 1973
	192.39	30.2	<u>1983/84</u> 04 février 1984	445.28	<u>1983/84</u> 04 février 1984
	175.31	27.5	<u>1984/85</u> 31 décembre 1984	285.12	<u>1984/85</u> 31 décembre 1984
Oued Seybouse à Mirbeck	1216	17.6	<u>1972/73</u> 28 mars 1973	1306.80	<u>1972/73</u> 28 mars 1973
	452.02	6.5	<u>1983/84</u> 14 Janvier 1984	650.00	<u>1983/84</u> 14 Janvier 1984
	1211.38	17.46	<u>1984/85</u> 31 décembre 1984	1278	<u>1984/85</u> 31 décembre 1984
Oued Ressoul à Ain Berda	73.76	61.9	<u>1972/73</u> 27 mars 1973	137.20	<u>1983/84</u> 03 février 1984
	50.76	42.6	<u>1983/84</u> 03 février 1984	166.00	<u>1983/84</u> 03 février 1984
	35.27	29.6	<u>1984/85</u> 31 décembre 1984	80.00	<u>1984/85</u> 31 décembre 1984

5.3. Les hydrogrammes journaliers observés

Les hydrogrammes journaliers des années caractérisées par de très fortes crues sont donnés à titre d'exemple pour nous éclairer sur la variabilité des écoulements journaliers aux stations hydrométriques: Moulin Rochefort (du 01 janvier au 28 février 1984), Bouchegouf (1972/73), Ain Berda (1986/87) et Mirbeck (1972/73) (fig. de 108 à 111).

Pour l'oued Mellah à la station de Bouchegouf, l'hydrogramme journalier de l'année 1972-1973 a enregistré deux pics, le premier en janvier et le second en mars, les débits journaliers dépassant $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

A la station de Ain Berda, mesurant les débits de l'oued Ressoul, l'hydrogramme journalier de l'année 1972-1973 présente une allure différente, un pic principal avec un débit dépassant $50 \text{ m}^3/\text{s}$ et 2 valeurs $> 10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Par contre, pour l'oued Seybouse à la station de Mirbeck, l'hydrogramme journalier de la même année 1972-1973 est en dents de scie, avec une augmentation très forte des valeurs dépassant $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et des pics $> 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ entre le 27 mars et le 02 avril 1973. Le débit maximal absolu est de $1216,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

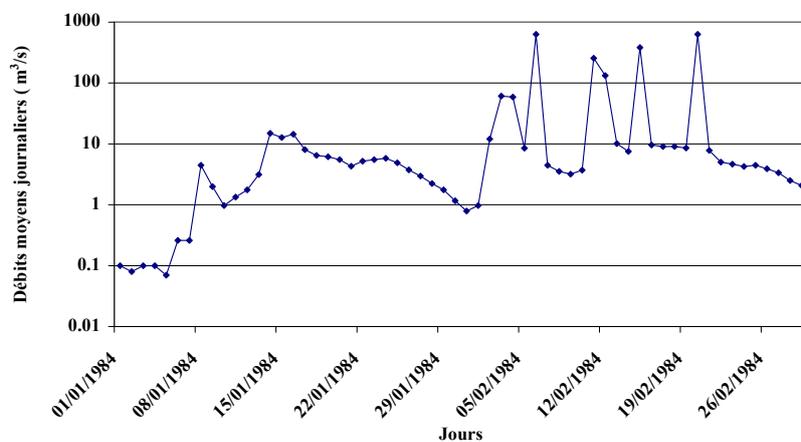
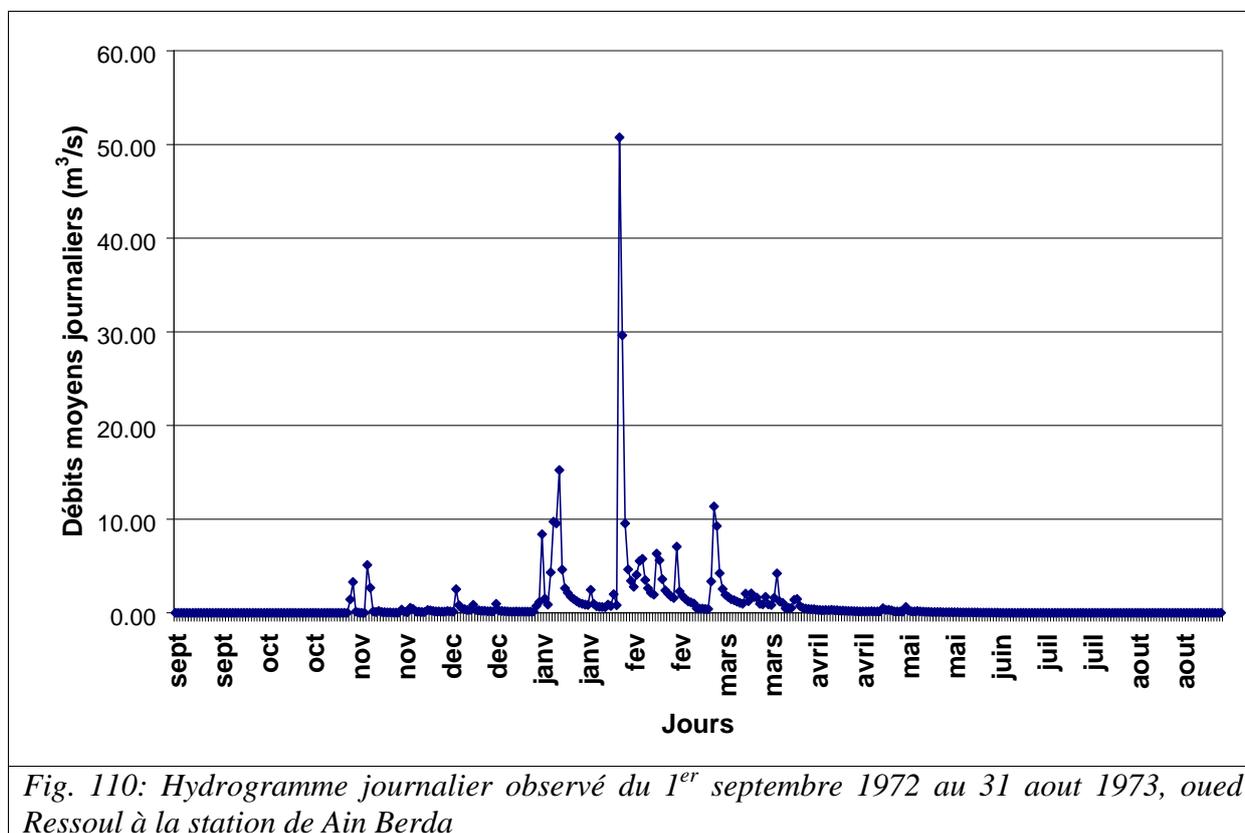
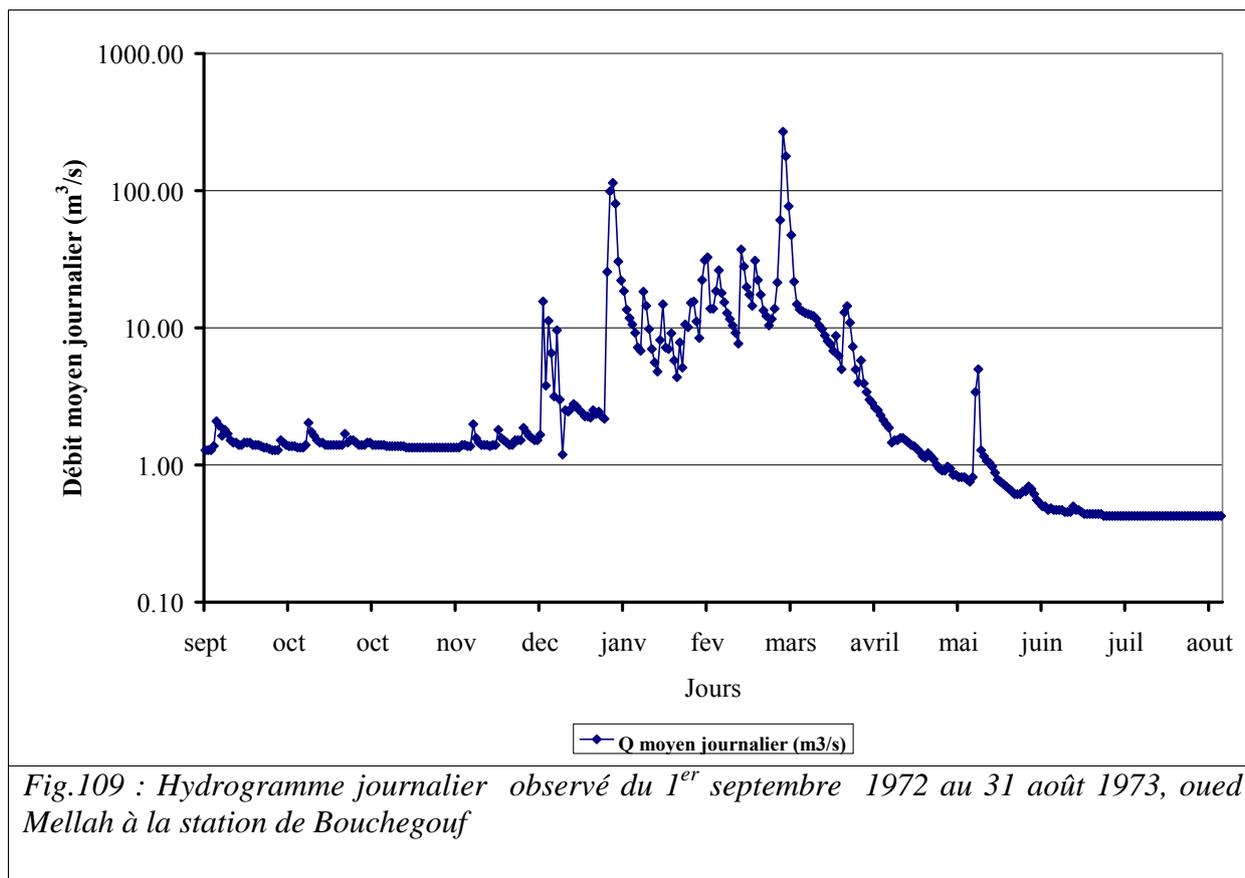
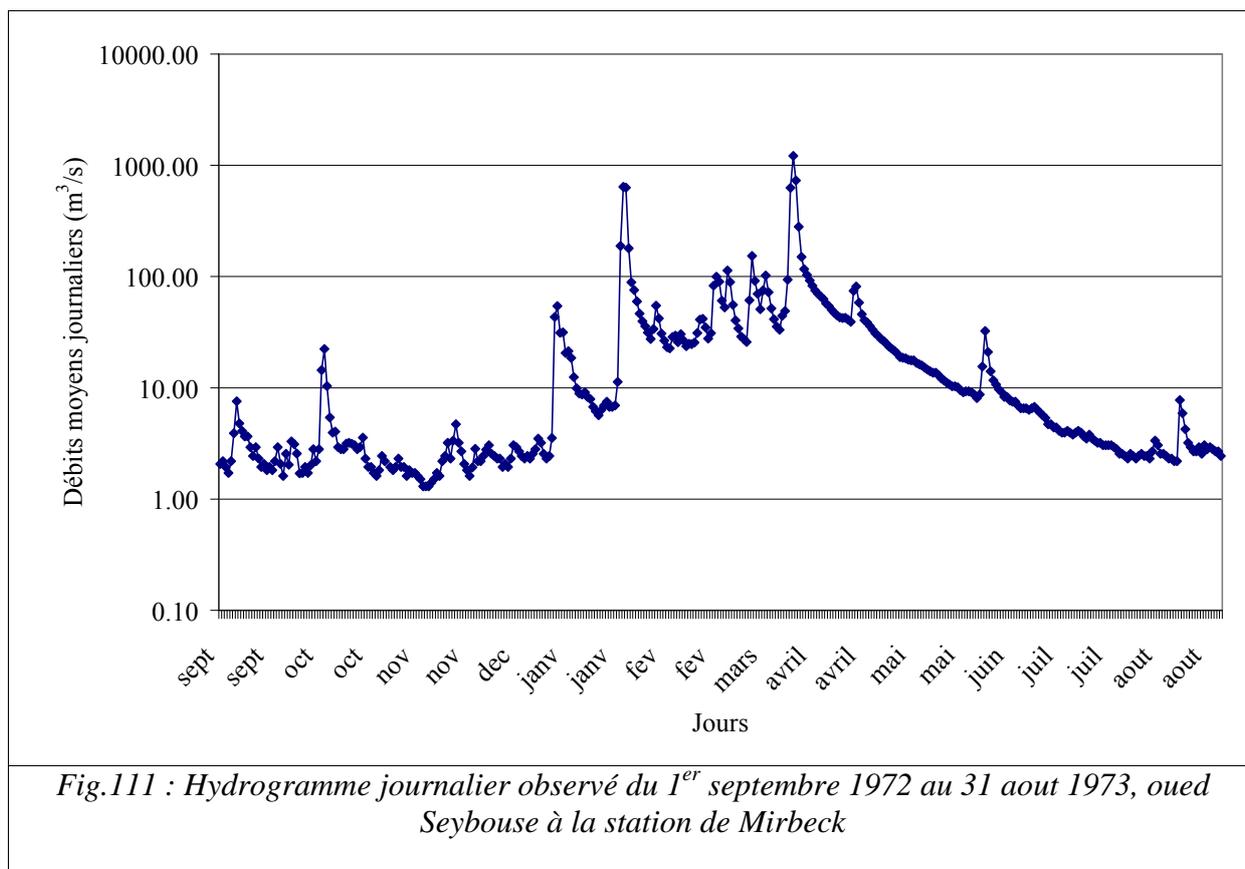


Fig.108 : Hydrogramme journalier observé du 01 janvier au 28 février 1984, oued Cherf à la station de Moulin Rochefort





Sur l'ensemble du bassin, les fortes crues des années particulièrement humides représentent une forte contribution aux apports mensuels et annuels. Cette contribution sera confirmée plus loin (chapitre 8) grâce à l'analyse des courbes bi-fréquentielles qui représentent en % le temps indispensable pour l'évacuation d'un pourcentage de volume d'apport liquide et solide dans l'année.

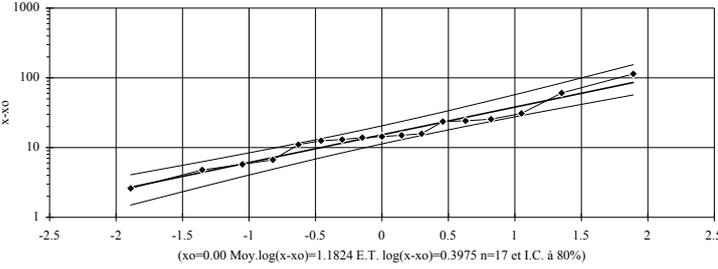
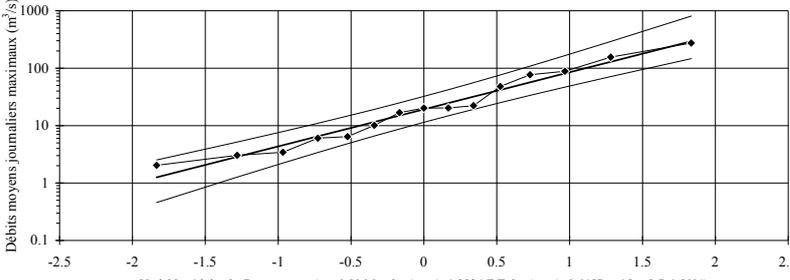
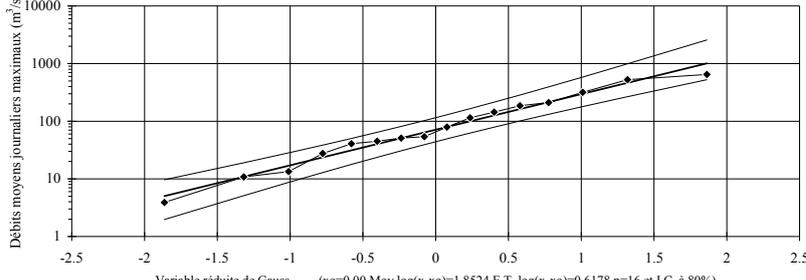
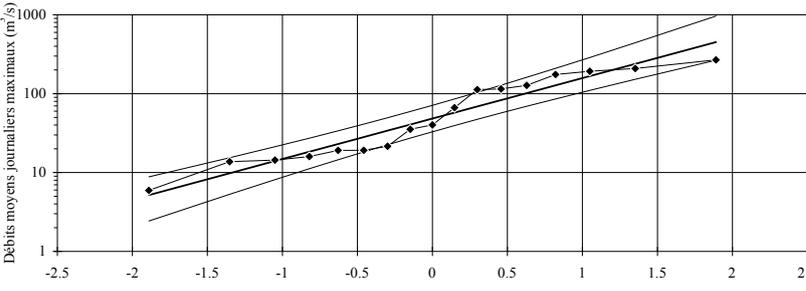
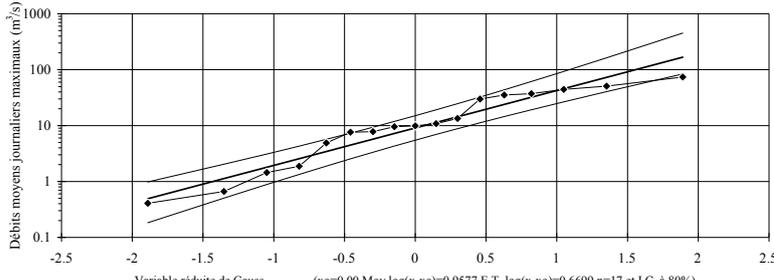
5.4. Etude fréquentielle des Q max journaliers et instantanés

5.4.1. Ajustement des Qmax à la loi de Galton et valeurs fréquentielles

On procédera à l'ajustement à la loi log-normale des débits maximaux moyens journaliers et des débits maximaux instantanés. Les ajustements ont pu être réalisés avec la valeur de $x_0=0$ (fig.112 à 117 et tabl.38).

Des études antérieures (Mebarki, 1982 et Ghachi, 1986) ont montré qu'en Algérie, les débits maximaux moyens journaliers et instantanés pouvaient également être aisément ajustés par la loi de Fréchet, qui a la même fonction de répartition que la loi de Gumbel mais avec une anamorphose logarithmique de la variable à ajuster (axe des X construit d'après la variable réduite de Gumbel et axe des Y en échelle logarithmique).

5.4.1.1. *Q max moyens journaliers*

	<p><i>Fig.112:</i> Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Moulin Rochefort, 1971/72-1987/88</p>
	<p><i>Fig.113:</i> Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Bordj Sabath 1973/74-1987/88</p>
	<p><i>Fig.114:</i> Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Medjez Ammar III 1971/72 - 1986/87</p>
	<p><i>Fig.115:</i> Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Bouchegouf 1971/72-1986/87</p>
	<p><i>Fig.116:</i> Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station d'Ain Berda 1971/72-1987/88</p>

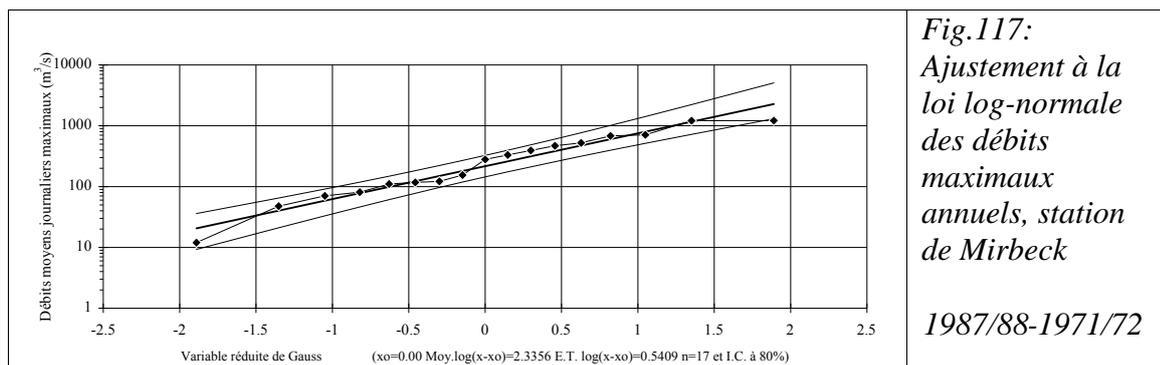


Tableau 38: Débits moyens journaliers maximaux fréquentsiels (m^3/s)

Période de retour	2	5	10	20	50	100	Rapport de fréquence 100/10
Fréquence au non-dépassement	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	
Variable réduite de Gauss	0	0.84	1.28	1.645	2.05	2.33	
Cherf	15.2	32.9	49.2	68.6	99.7	128	2.6
Sabath	19.2	67.1	129.1	221.7	407.1	610.6	4.7
Bouhamdane	71.2	235.6	440.7	739.2	1322.5	1948.9	4.4
Mellah	48.4	130.8	220.1	338.2	548.3	756.8	3.4
Ressoul	9.1	33.2	65.5	114.8	215.7	328.4	5.0
Mirbeck	216.6	617.5	1068.6	1680.4	2796.5	3926.9	3.7

Tableau 39 : Lames écoulées maximales journalières fréquentsielles (mm)

Période de retour	2	5	10	20	50	100
Fréquence au non-dépassement	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
Variable réduite de Gauss	0	0.84	1.28	1.645	2.05	2.33
Cherf	0.8	1.6	2.4	3.4	5.0	6.4
Sabath	6.4	22.3	42.9	73.7	135.3	202.9
Bouhamdane	5.6	18.4	34.5	57.8	103.4	152.4
Mellah	7.6	20.4	34.4	52.8	85.7	118.2
Ressoul	7.6	27.9	54.9	96.3	180.9	275.5
Mirbeck	3.1	8.9	15.4	24.2	40.3	56.6

Les figures montrent l'existence d'une relation significative entre le débit moyen journalier maximal Q (m^3/s) (fig.112 à 117 et tabl.38), et le débit maximal instantané (fig.118 à 123 et tabl.40) avec la surface des bassins jaugés (km^2). Cependant, lorsqu'on exprime les débits maximaux moyens journaliers en lames écoulées, ce sont les deux bassins de taille modeste, le bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda ($103 km^2$) et le bassin de l'oued Sabath à Bordj Sabath ($260 km^2$), qui présentent les plus fortes valeurs de lames écoulées (tabl.39). Par contre, le bassin de l'oued Cherf, situé en Hautes Plaines présente les plus faibles valeurs de lames écoulées. Les lames écoulées reflètent la relation entre la pluie génératrice de l'écoulement et les paramètres physiques du bassin-versant dont les facteurs perméabilité des formations superficielles et les pentes, et un facteur d'état du bassin qui est lui-même en relation avec les pluies antérieures à la crue.

5.4.1.2. *Q max moyens instantanés*

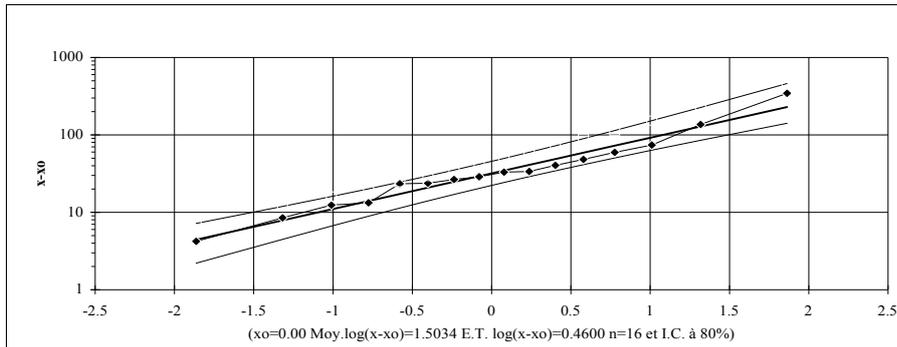


Fig.118: Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Moulin Rochefort, 1971/72-1987/88

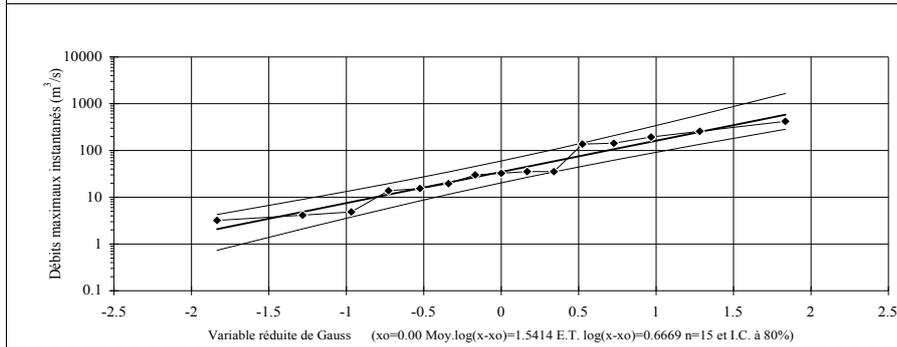


Fig.119: Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Bordj Sabath 1973/74-1987/88

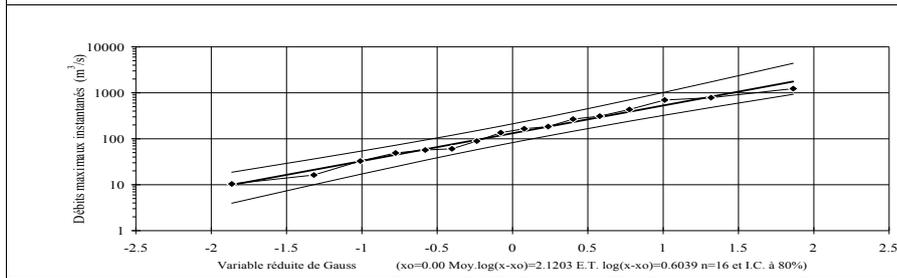


Fig.120: Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Medjez Ammar II 1971/72-1986/87

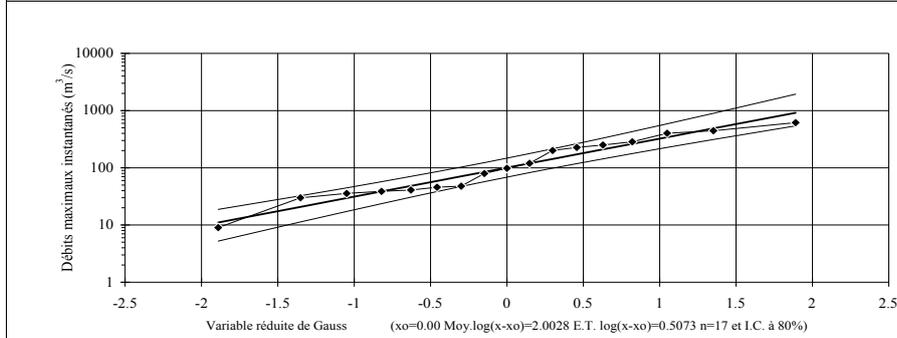


Fig.121: Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Bouchegouf 1971/72-1987/88

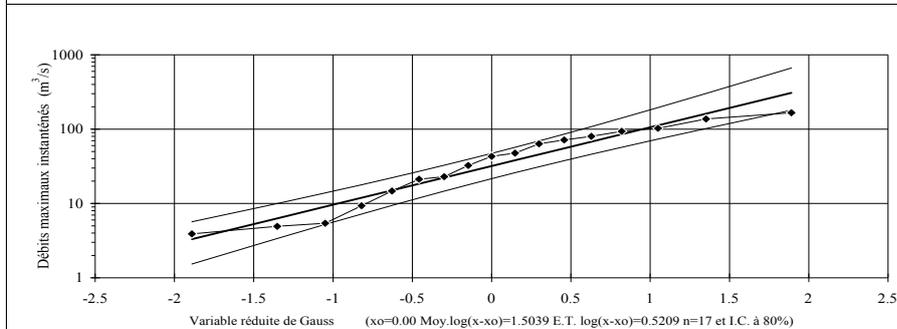


Fig.122: Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Ressoul 1971/72-1987/88

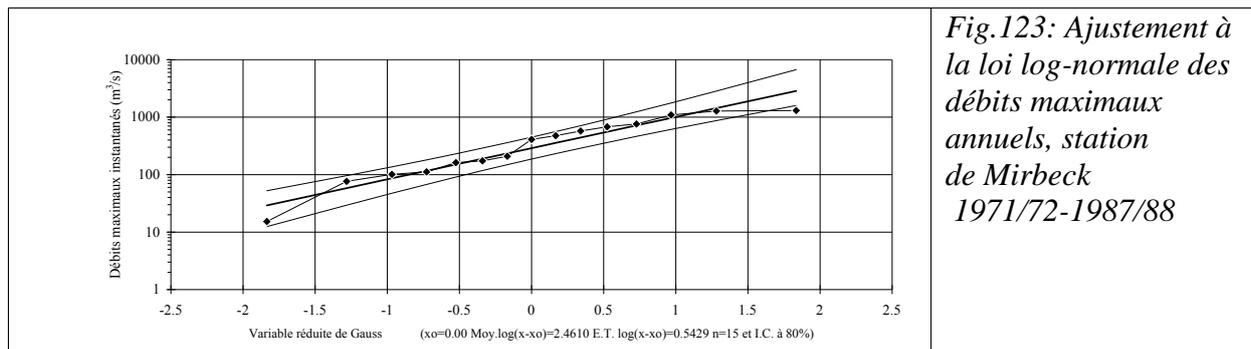


Tableau 40: Débits maximaux instantanés fréquentsiels (m^3/s)

Période de retour	2	5	10	20	50	100	Rapport de fréquence 100/10
Fréquence au non-dépassement	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	
Variable réduite de Gauss	0	0.84	1.28	1.645	2.05	2.33	
Cherf	31.9	77.7	123.9	182	280.7	374.7	3.0
Sabath	34.8	126.6	249.0	435.2	815.5	1239.5	5.0
Bouhamdane	131.9	425.0	783.9	1299.6	2295.0	3352.8	4.3
Mellah	100.6	268.9	449.8	687.8	1109.0	1524.9	3.4
Ressoul	31.9	87.5	148.4	229.5	374.9	519.9	3.5
Mirbeck	289.1	827.5	1434.7	2259.9	3768	5297.7	3.7

Par comparaison avec l'étude initiée par l'A.N.R.H. (2007), les valeurs calculées pour les sous-bassins de l'oued Seybouse semblent correspondre aux résultats obtenus pour les bassins dans d'autres régions d'Algérie, mais avec une sur-estimation des Q max pour les stations de l'oued Seybouse. Les résultats pour l'oued Cherf correspondent par contre à ceux de l'étude A.N.R.H.

Ces différences s'expliquent par la méthode utilisée dans l'étude des crues (A.N.R.H., 2007), basée sur l'ajustement des trois débits les plus forts par année (Méthode Sup-Seuil) et par les différences de périodes étudiées. La méthode sup-seuil aboutit à des valeurs de Q max fréquentsiels inférieures à celle des ajustements réalisés sur les Q max annuels puisqu'elle intègre des échantillons de débits supérieurs à la méthode des Q max annuels.

Les valeurs très fortes calculées pour les fréquences cinquantennales et centennales sont à relier à des événements pluviométriques exceptionnels

5.4.2. Evolution des Qmax fréquentsiels en fonction de la surface des bassins

Il est intéressant d'étudier l'évolution des débits maximaux fréquentsiels en fonction de la surface des bassins. Les figures 124 à 129 et le tableau 41 montrent l'existence d'une

relation significative entre le débit maximal Q (m³/s) et la surface A (km²), du type : $Q = b * S^a$ où le débit varie comme une fonction puissance de la surface. Notons que pour les débits de crues, Laborde (2000) a donné une signification physique aux paramètres a et b de la relation $Q = a * S^b$. Le terme b , inférieur à 1, traduit l'amortissement du débit de pointe de crue en fonction de la surface. Le coefficient a est une variable régionale intégrant essentiellement les facteurs pluviométrie et géologie (perméabilité des roches et des sols).

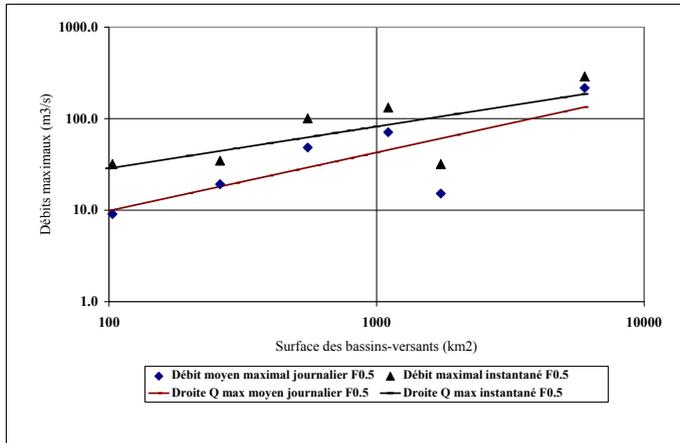


Fig 124a: Relation débits maximaux moyens journaliers - débits maximaux instantanés en fréquence biennale ($F=0,5$), bassins jaugés de l'oued Seybouse

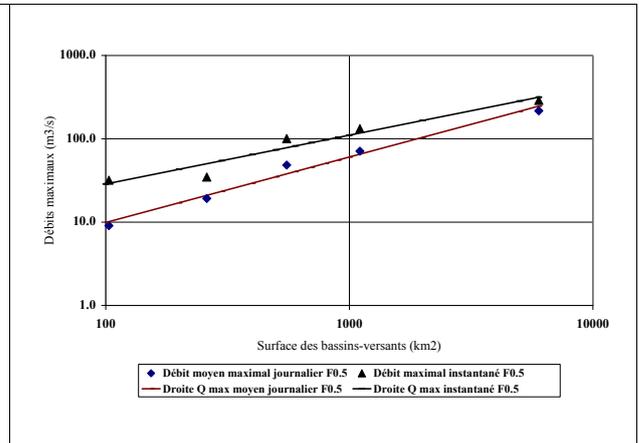


Fig 124b: Relation débits maximaux moyens journaliers - débits maximaux instantanés en fréquence biennale ($F=0,5$), bassins jaugés de l'oued Seybouse, sans le bassin de l'oued Cherrf

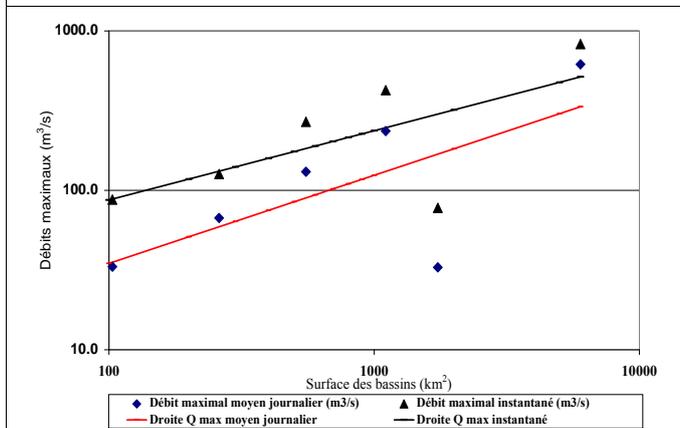


Fig 125 a : Relation débits maximaux moyens journaliers - débits maximaux instantanés en fréquence quinquennale ($F=0.8$), bassins jaugés de l'oued Seybouse

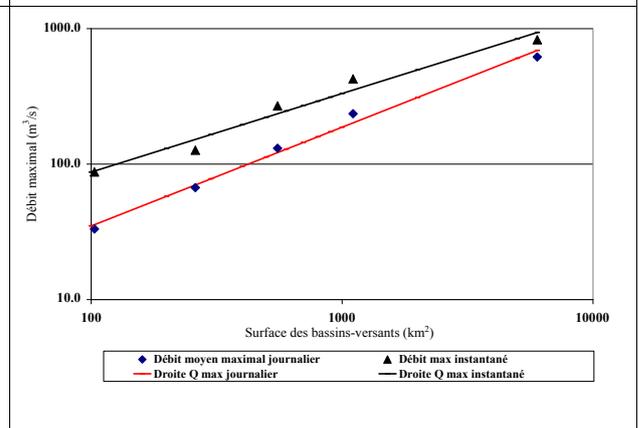


Fig 125b: Relation débits maximaux moyens journaliers - débits maximaux instantanés en fréquence quinquennale ($F=0.8$), bassins jaugés de l'oued Seybouse, sans le bassin de l'oued Cherrf

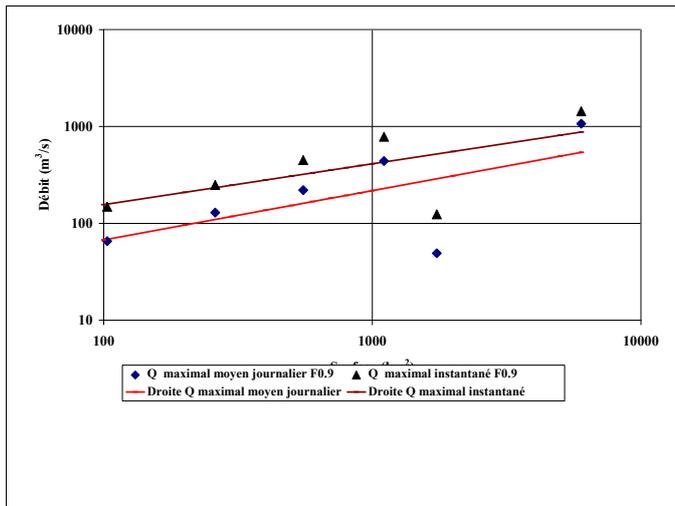


Fig 126a : Relation débits maximaux moyens journaliers - débits maximaux instantanés en fréquence décennale ($F=0.9$), bassins jaugés de l'oued Seybouse

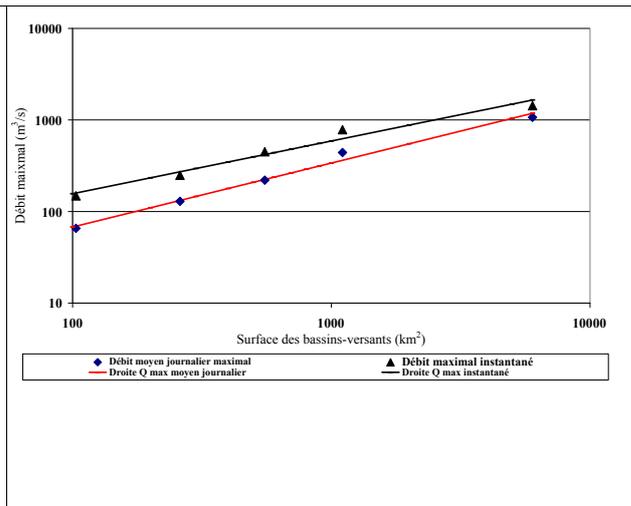


Fig 126b : Relation débits maximaux moyens journaliers - débits maximaux instantanés en fréquence décennale ($F=0.9$), bassins jaugés de l'oued Seybouse, sans le bassin de l'oued Cherf

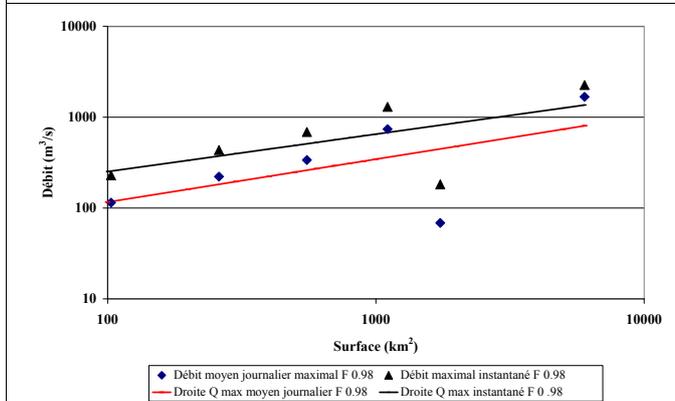


Fig 127a: Relation débits maximaux moyens journaliers - débits maximaux instantanés en fréquence vingtennale ($F=0.95$) bassins jaugés de l'oued Seybouse

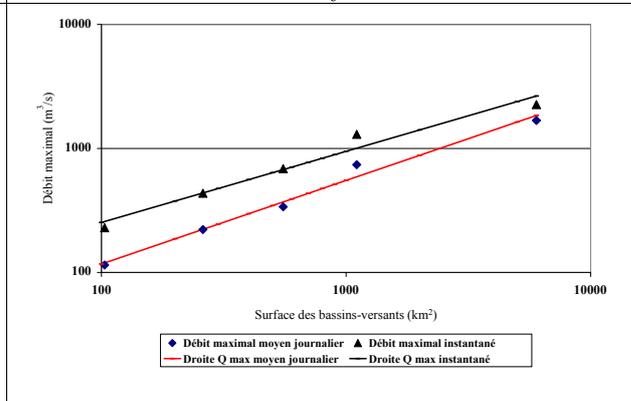


Fig 127b : Relation débits maximaux moyens journaliers - débits maximaux instantanés en fréquence vingtennale ($F=0.95$), bassins jaugés de l'oued Seybouse, sans le bassin de l'oued Cherf

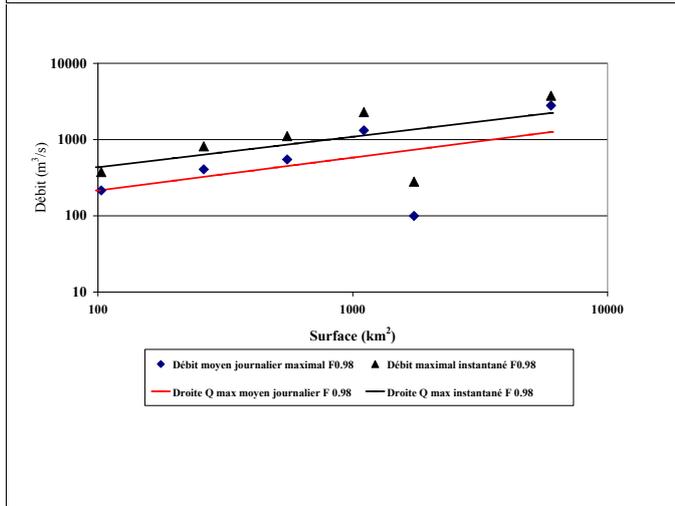


Fig 128a: Relation débits maximaux moyens journaliers - débits maximaux instantanés en fréquence cinquantennale ($F=0.98$), bassins jaugés de l'oued Seybouse

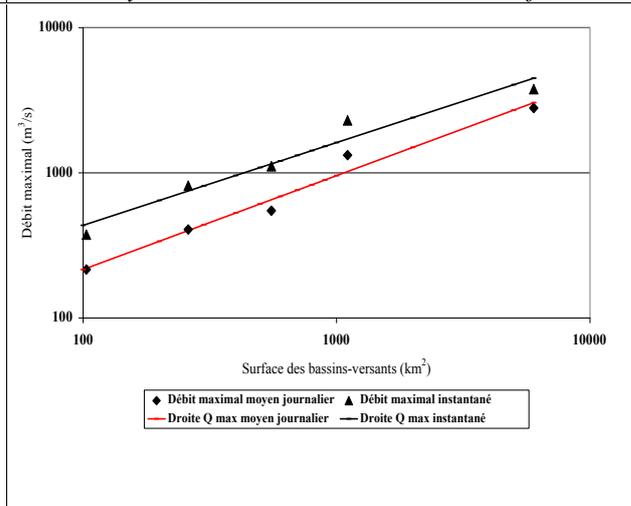
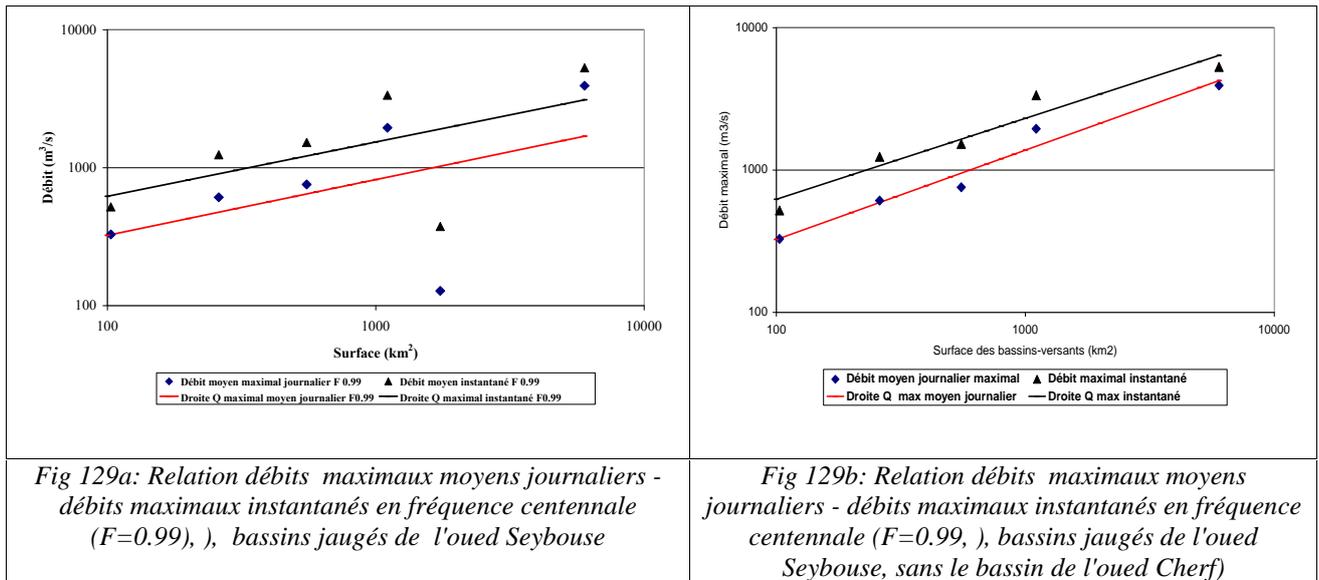


Fig 128b: Relation débits maximaux moyens journaliers - débits maximaux instantanés en fréquence cinquantennale ($F=0.98$), bassins jaugés de l'oued Seybouse, sans le bassin de l'oued Cherf



Les figures représentant les relations entre les débits maximaux moyens journaliers et instantanés des bassins jaugés de l'oued Seybouse avec la surface des bassins pour les fréquences biennales, quinquennales, décennales, vingtennales, cinquantennales et enfin centennales présentent la même forme dans la mesure où la relation est très forte pour 5 stations hydrométriques, hormis la station de Moulin Rochefort qui ne présente pas le même comportement dans la relation entre la surface et les débits maximaux journaliers.

- Le coefficient de corrélation de Q_{max} avec la surface des six bassins jaugés diminue lorsqu'on va de la fréquence biennale vers les fréquences rares.
- Le poids de l'oued Cherf dans la dispersion des points est très important, car c'est un bassin des Hautes Plaines avec beaucoup de crues d'orages.
- La relation s'améliore lorsqu'on supprime le bassin de l'oued Cherf dans toutes les relations et ceci est observé pour toutes les fréquences où le coefficient de corrélation est toujours supérieur à 0,966.

Le bassin de l'oued Cherf, avec une surface nettement plus importante que celle des bassins de l'oued Ressoul à Ain Berda et celui de l'oued Sabath à Bordj Sabath, produit des débits inférieurs. Parmi les facteurs qui peuvent expliquer cette différence de comportement figurent les caractéristiques spécifiques au bassin (pentes, perméabilité des roches et des formations superficielles), et les pluies maximales journalières.

Tableau 41 : Relations débit maximal moyen journalier - débit maximal instantané pour les différentes fréquences

Fréquence	Débit	Régressions pour tous les bassins jaugés de l'oued Seybouse		Régressions pour tous les bassins jaugés de l'oued Seybouse sans le bassin de l'oued Cherf	
		Relation	Coefficient de corrélation	Relation	Coefficient de corrélation
biennale	\bar{Q} max journalier	$Q = 0.5249 * S^{0.6369}$	0.7847	$Q = 0.2656 * S^{0.7857}$	0.9912
	Q inst	$Q = 3.4897 * S^{0.4571}$	0.71	$Q = 1.9357 * S^{0.5857}$	0.9666
Quinquennale	$m\bar{Q}$ max journalier	$Q = 2.7308 * Surf^{0.5528}$	0.6858	$Q = 1.2209 * S^{0.7286}$	0.9902
	Q inst	$Q = 11.801 * Surf^{0.4341}$	0.6616	$Q = 6.0635 * S^{0.5794}$	0.9842
Décennale	\bar{Q} journalier	$Q = 6.4701 * S^{0.5089}$	0.63	$Q = 2.7115 * S^{0.6987}$	0.994
	Q inst	$Q = 22.315 * S^{0.4221}$	0.63	$Q = 11.018 * S^{0.5761}$	0.986
Vingtennale	\bar{Q}	$Q = 13.205 * S^{0.4724}$	0.57	$Q = 5.2453 * S^{0.674}$	0.992
	Q inst	$Q = 37.785 * S^{0.4121}$	0.60	$Q = 18.046 * S^{0.5734}$	0.983
Cinquantennale	\bar{Q}	$Q = 29.424 * S^{0.4316}$	0.51	$Q = 11.004 * S^{0.6463}$	0.987
	Q inst	$Q = 68.326 * S^{0.4009}$	0.57	$Q = 31.442 * S^{0.5703}$	0.976
Centennale	\bar{Q}	$Q = 50.193 * S^{0.4044}$	0.47	$Q = 18.035 * S^{0.6278}$	0.983
	Q inst	$Q = 101.4 * S^{0.3934}$	0.55	$Q = 45.52 * S^{0.5683}$	0.969

\bar{Q} max journalier : Débit maximal moyen journalier (m3/s);

Q inst : Débit maximal journalier instantané (m3/s);

Le schéma des pluies journalières décennales du bassin-versant de l'oued Seybouse présente une organisation latitudinale, elles diminuent du Nord vers le Sud. D'après l'étude de synthèse des crues sur l'Algérie du Nord (A.N.R.H., 2007), les facteurs qui contrôlent les pluies décennales sont ceux-là même qui contrôlent les pluies annuelles, à savoir la distance à la mer, la longitude et l'altitude lissée des postes (A.N.R.H., 1993). Ces facteurs vont jouer pour les pluies de toutes les fréquences.

Selon Laborde (2007), on peut faire une distinction entre les crues ordinaires pour lesquelles les précipitations sont relativement réduites et d'extension spatiale faible. Le ruissellement dépend énormément des paramètres de la fonction de production, qui sont très variables d'un bassin à l'autre et avec l'état initial d'humectation. Les caractéristiques des faibles crues sont dépendantes des spécificités des bassins-versants, les pluies n'en constituent pas le facteur déterminant. Dans le cas présent, les paramètres de la fonction de production sont similaires pour les bassins telliens mais ils en diffèrent nettement pour le bassin de l'oued Cherf situé dans les Hautes Plaines.

Par contre, pour les crues rares, les précipitations fortes et généralisées sur le bassin sont le facteur le plus important. Par ailleurs, le coefficient de ruissellement instantané tend vers 1.

6. CAS DU BASSIN DE L'OUED BOUAMDANE : LES CRUES ET LEURS RELATIONS AVEC LES PLUIES MAXIMALES

6.1. Les crues du bassin de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II

Les crues du bassin de l'oued Bouhamdane seront caractérisées à travers les débits maximaux (débits instantanés et débits moyens journaliers).

On présentera trois hydrogrammes journaliers (débits moyens journaliers) et on procédera à une analyse des crues de saison froide et celles de saison chaude.

6.1.1. Les hydrogrammes journaliers de 3 années humides (1972/73, 1983/84 et 1984/85)

Les crues présentant les débits les plus forts se localisent préférentiellement à l'intérieur de la période décembre-mars. Les trois hydrogrammes journaliers le confirment fortement.

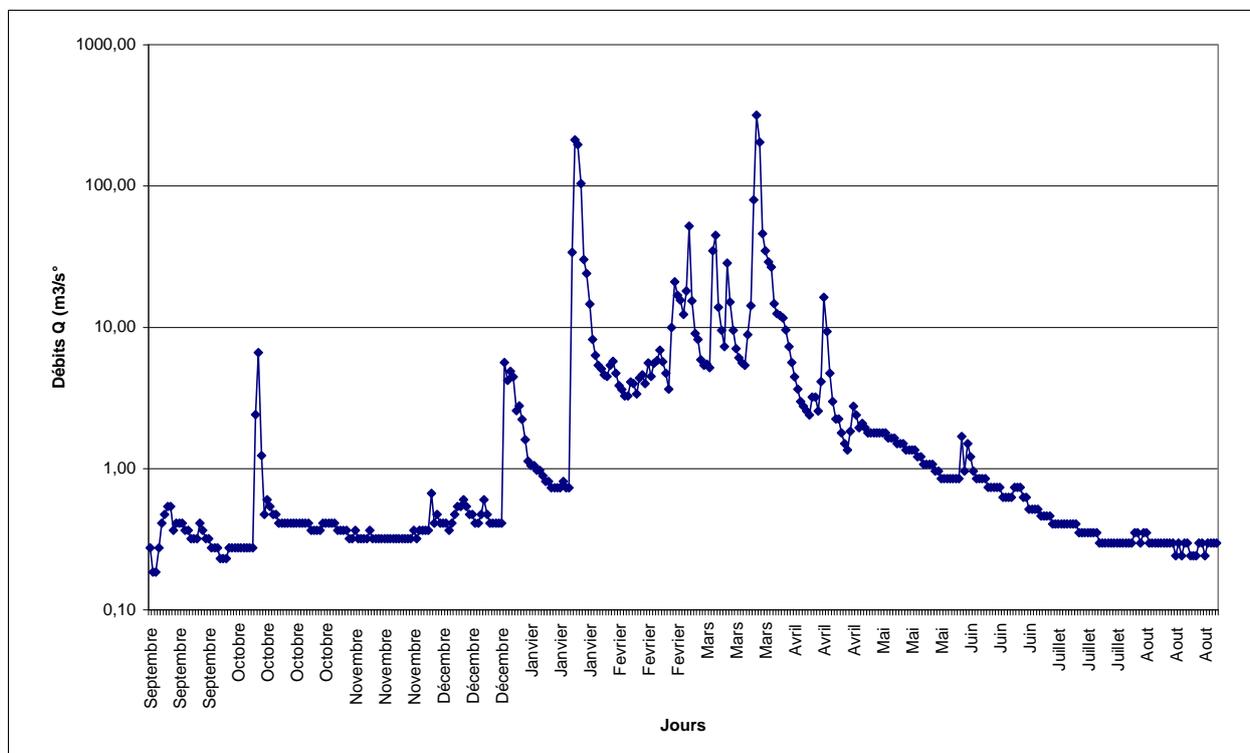


Fig.130: Hydrogramme journalier année 1972-1973, station de Medjez Ammar II

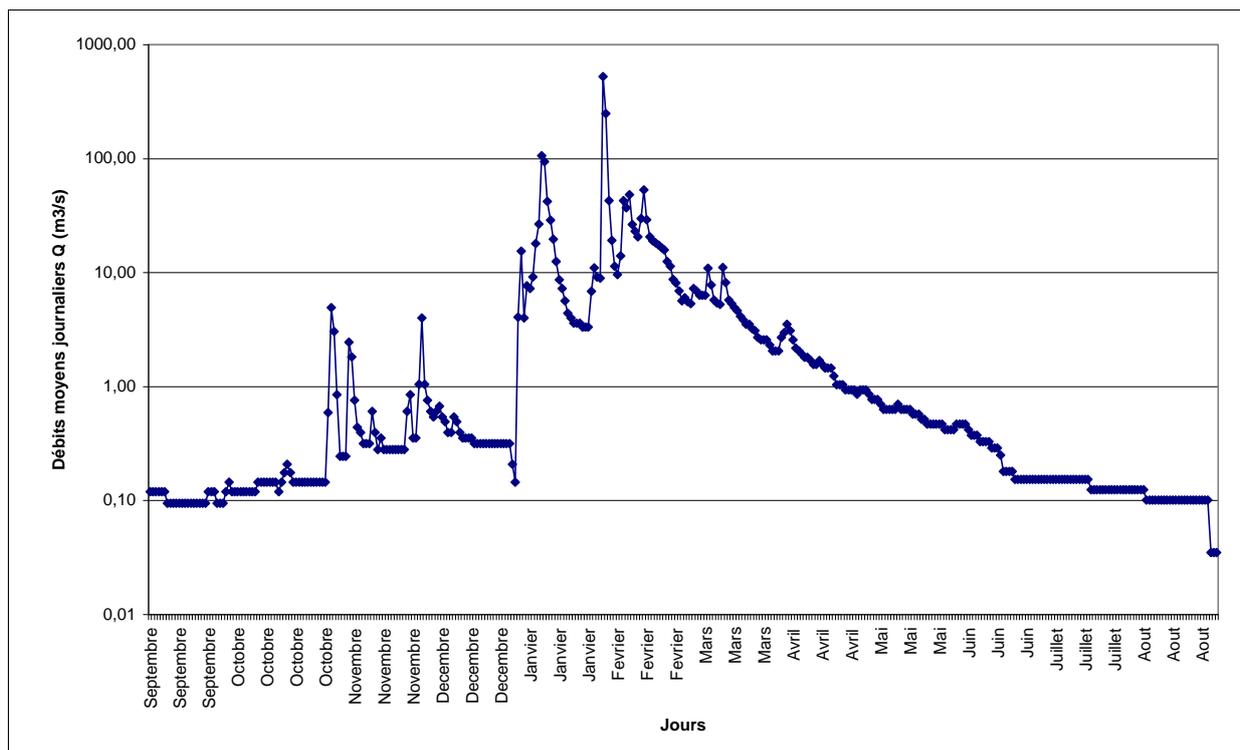


Fig.131: Hydrogramme journalier année 1983-1984, station de Medjez Ammar II

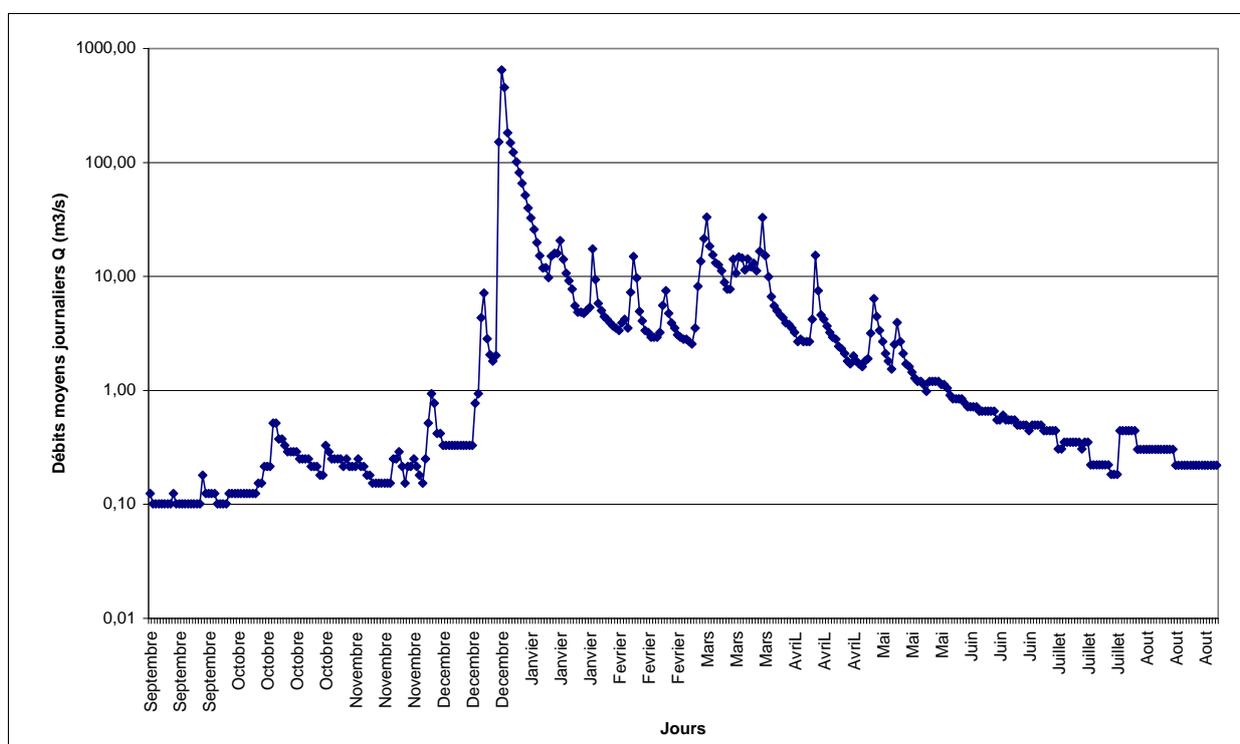


Fig. 132: Hydrogramme journalier année 1984-1985, station de Medjez Ammar II

6. 1. 2. Les crues de saison froide et de saison chaude de la période 1969/70-1987/88

6.1.2.1. Les crues de saison froide

Ce sont les crues qui se sont déroulées de novembre à mars, et se caractérisent par les valeurs élevées de débits, il y a plusieurs facteurs qui contribuent à ce phénomène, la saturation en eau du sol à laquelle se joint une diminution de la température et de l'évaporation, et l'absence de végétation saisonnière dans les zones céréalières.

Les crues observées les plus importantes sont :

- La crue du 24 Janvier 1973:

Cette crue a enregistré plusieurs pointes (valeurs maximales de débit), C'est donc une crue complexe dont la valeur la plus importante est arrivée le 24 Janvier avec un débit moyen de $251,8 \text{ m}^3 / \text{s}$, ce qui correspond à un débit instantané de $330,1 \text{ m}^3 / \text{s}$.

- La crue dans le 18 Novembre 1976:

C'est une crue soudaine. Après un débit $0,22 \text{ m}^3 / \text{s}$, le débit est passé d'une façon très soudaine à $490,2 \text{ m}^3 / \text{s}$ le 18 Novembre. Le débit moyen était de $233,76 \text{ m}^3 / \text{s}$.

La décrue a elle aussi été très soudaine de $490,2 \text{ m}^3 / \text{s}$ à $65,5 \text{ m}^3 / \text{s}$ le 19 novembre.

Cette crue s'est caractérisé par des pluies très fortes, de courte durée, et l'intensité est forte, et ceci est souligné par le rapport A / B (tab 42) qui est le quotient du débit maximal instantané au débit maximum moyen journalier. Ce rapport de 2,10 reflète la force de la crue.

- La crue du 31 Décembre 1984:

La montée de la crue a été très soudaine. Ainsi, après un débit le 27 décembre 1984 de $1,81 \text{ m}^3 / \text{s}$ et $2 \text{ m}^3 / \text{s}$, le débit a subitement augmenté pour s'établir à $200,3 \text{ m}^3 / \text{s}$ et arriver le 31 Décembre à $632,6 \text{ m}^3 / \text{sec}$. On remarque l'absence d'enregistrement après le 1er Janvier 1985 à cause de la force de la crue.

Les crues du 18 Novembre 1976 et du 31 Décembre 1984 sont des crues simples caractérisées par un seul pic.

6.1.2.2. Les crues de saison chaude

Ces crues sont engendrées par des averses limitées dans le temps, et localisées dans l'espace, de moindre intensité et de durée moins longue que les crues de saison froide.

- Crue du 22 avril 1970:

Le débit est passé d'une façon soudaine de $1,22 \text{ m}^3 / \text{s}$ le 12 Avril 1970, à $86,2 \text{ m}^3 / \text{s}$ le 22 avril avec un débit instantané estimé à $254 \text{ m}^3 / \text{s}$, la décrue a duré deux jours avant le retour au débit de base.

- Crue du 19 avril 1979: Le débit maximal a été estimé à 296 m³/s avec un débit moyen journalier au 16 avril 256,8 m³/s, l'hydrogramme est presque symétrique, la décrue est presque aussi longue que la montée.

Tableau 42 : Débits instantanés maximaux et débits moyens journaliers maximaux de la saison froide (m³/s) de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II

Date	A	B	C	Date	A	B	C
02/12/1969	7.18	4.32	1.66	08/04/1978	10.5	8.17	1.29
08/12/1969	10.58	8.26	1.28	27/02/1979	13.7	8.37	1.64
24/12/1969	278	200	1.39	16/04/1979	269	25.23	11.73
03/02/1970	27.6	6.42	4.30	20/12/1980	61.25	44.59	1.37
03/13/1970	45.4	19.52	2.33	23/12/1980	20.4	15.6	1.3
15/03/1970	25.9	5.79	4.47	06/02/1981	30.6	25.45	1.20
13/04/1970	18.54	4.29	4.32	18/02/1981	11.54	10.94	1.05
22/04/1970	254.8	86.2	2.96	22/02/1981	39.3	26.87	1.46
07/01/1971	18.1	6.4	2.83	29/01/1982	57	-	-
16/01/1971	4.84	2.1	2.3	22/02/1982	33.12	-	-
11/02/1971	109.7	63.39	1.73	27/02/1982	47.6	-	-
25/02/0971	18.1	12.39	1.46	07/03/1982	67.4	-	-
29/03/1971	83.4	39.09	2.13	22/03/1982	32.27	-	-
10/04/1971	69	44.52	1.55	01/04/1982	75	-	-
03/03/1972	21.02	25.20	1.04	20/01/1982	62.1	-	-
10/03/1972	69	37.15	1.86	01/11/1982	3.6	-	-
17/03/1972	29.6	3.15	9.40	12/11/1982	24.8	-	-
11/04/1972	43.75	21.35	2.05	18/03/1983	12.5	8.45	1.48
20/04/1972	15.85	13.14	1.21	24/12/1984	7.53	5.43	1.38
28/04/1972	27.9	18.19	31.5	31/12/1984	632.6	200.1	3.16
31/12/1972	11.7	5.7	2.05	30/01/1985	24.96	6.88	3.63
02/01/0973	8.55	4.84	1.77	13/12/1385	15.24	10.63	
24/01/1973	330.1	251.84	1.09	08/03/1985	221	6.3	35.08
27/02/1973	41	20.89	1.96	21/03/1985	21.2	4.15	5.11
04/03/1973	2.64	54.35	1.18	29/03/1985	38	2.57	14.79
12/03/1973	58	35.77	1.62	16/04/1985	18.5	1.57	11.78
17/03/1973	41.55	28.78	1.44	10/01/1986	6.22	-	-
27/03/1973	341	298	1.14	09/03/1986	13.2	-	-
19/04/1973	17.1	16.27	1.05	12/03/1986	10.7	15.43	0.69
24/02/1974	9.6	3.9	2.46	25/11/1986	50.3	48.5	
18/02/1975	94.8	53.2	1.78	27/12/1986	221	189	1.17
08/02/1976	55.4	39.24	1.41	05/01/1987	29.88	24.12	1.24
16/02/1976	9.1	8.33	1.09	11/01/1987	38	13.98	2.72
18/11/1976	490.2	233.76	2.10	18/01/1987	34.7	31.01	1.12
22/01/1978	2.71	1.78	1.52	06/02/1987	246.25	167.1	1.47
25/01/1978	3.38	3.38	1.00	13/02/1987	221	174.4	1.27
02/02/1978	11.5	11.5	1.00	26/02/1987	65	50	1.3
05/02/1978	46.6	27.81	1.68	10/03/1987	31.4	18.07	1.74
07/02/1978	38.7	25.33	1.53	31/03/1987	79.5	38.87	52.0
14/02/1978	14.2	11.64	1.22	13/04/1987	62.9	23.71	2.65
02/12/0969	25.2	8.11	3.11		-	-	-

- A: Le débit instantané maximal (m^3 / s).
 B: débit moyen journalier maximal (m^3 / s).
 C: (A / B): Rapport

Tableau 43 : Débits maximaux instantanés et moyens journaliers des crues de saison chaude (mai à octobre), de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II (m^3/s)

Date	A	B	C
27/09/1969	21.1	16.83	1.25
15/10/1969	18.1	14.27	1.27
23/10/1969	6.5	5.8	1.12
16/10/1970	1.22	1.08	1.13
03/05/1972	11.7	8.7	1.34
07/05/1972	15.86	10.81	1.47
08/10/1972	5.49	4.1	1.33
28/10/1973	1.5	1.21	1.24
03/05/1976	3.62	2.22	1.63
20/05/1976	5.02	4.33	1.16
22/10/1976	33.65	16.18	2.08
18/05/1977	55.4	19.36	2.86
04/09/1979	6.55	4.83	1.36
21/09/1979	4.73	3.4	1.39
01/10/1980	9	8.17	1.10
06/05/1985	8.03	6.39	1.26
30/09/1986	29.12	23.27	1.25
03/10/1986	8.47	3.68	2.30
08/10/1986	2.43	1.9	1.27
28/10/1986	4.73	1.75	2.70

- A: Le débit instantané maximal (m^3 / s).
 B: débit moyen journalier maximal (m^3 / s).
 C: (A / B) : C: (A / B) : Rapport

On notera à partir de ces tableaux la régularité des crues produisant des débits importants, et la différence nette entre les crues de saison chaude et celles de saison froide.

Les crues de saison chaude ont lieu à la suite des pluies orageuses d'automne et d'été sur des sols secs. Leurs débits sont, en règle générale, moins importants mais leurs effets au niveau de l'érosion et des transports en suspension sont indéniables.

Les facteurs qui expliquent ces différences entre les crues de saison froide et celles de saison chaude et qui justifient cette distinction sont en plus des caractéristiques des pluies génératrices de crues (intensité, durée, et extension spatiale), et du degré de perméabilité des roches et des formations superficielles, l'état d'humidité du bassin lié aux pluies antérieures, et l'état du couvert végétal différent selon les saisons.

6.2. Approche cartographique des crues du bassin de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II

6.2.1. Etude et cartographie des pluies journalières maximales (P_{jmax})

Les pluies journalières maximales annuelles sont des valeurs extrêmes (maximum parmi 365) et le plus souvent elles sont très bien distribuées selon une loi de Gumbel. Il est également courant de travailler sur les pluies maximales saisonnières en partageant l'année en deux saisons (l'hiver, et l'été).

Dans cette analyse statistique, il s'agit de déterminer les lois de distribution annuelles. Pour ce faire, les données seront ajustées à la loi de Gumbel grâce au logiciel Hydrolab (Laborde, 2000).

6.2.1.1. Etude statistique des pluies journalières maximales (loi de Gumbel)

La loi de Gumbel a pour expression : $Pr oba(X \leq x) = F(x) = e^{-e^{-\frac{x-x_0}{g}}}$
On définit ainsi U la variable réduite de Gumbel :

$$U = \frac{x - x_0}{g} = -\text{Ln}\{-\text{Ln}(F)\}$$

Les deux paramètres x_0 (le mode) et g (le gradex) s'ajustent par la méthode des moments par les estimateurs suivants :

$$x_0 = \bar{x} - 0.577 g \quad \text{et} \quad g = 0.78 \sigma$$

L'intervalle de variation de x est donc : $x \in] - \infty , + \infty [$

- x_0 est le paramètre de position (mode) : $x_0 = \bar{x} - 0,577 s$
- s est le paramètre d'échelle différent de zéro et positif :
 $s = g = 0,78 \sigma$

Le coefficient d'asymétrie β_1 est constant et égal à 1,139; ce qui correspond à une dissymétrie étendue vers la droite.

Le coefficient d'aplatissement β_2 est constant et égal à 2,4; la loi de Gumbel est donc plus pointue que la loi de Gauss (Laborde, 2000). Neuf postes pluviométriques (fig.133) seront utilisés pour l'étude des pluies maximales journalières qui vont caractériser l'aléa climatique (fig.134 à 141).

Ces postes serviront à la réalisation d'une étude statistique. Les aspects spatiaux seront abordés à travers les esquisses des cartes pour les pluies maximales journalières de fréquence décennale et vingtennale.

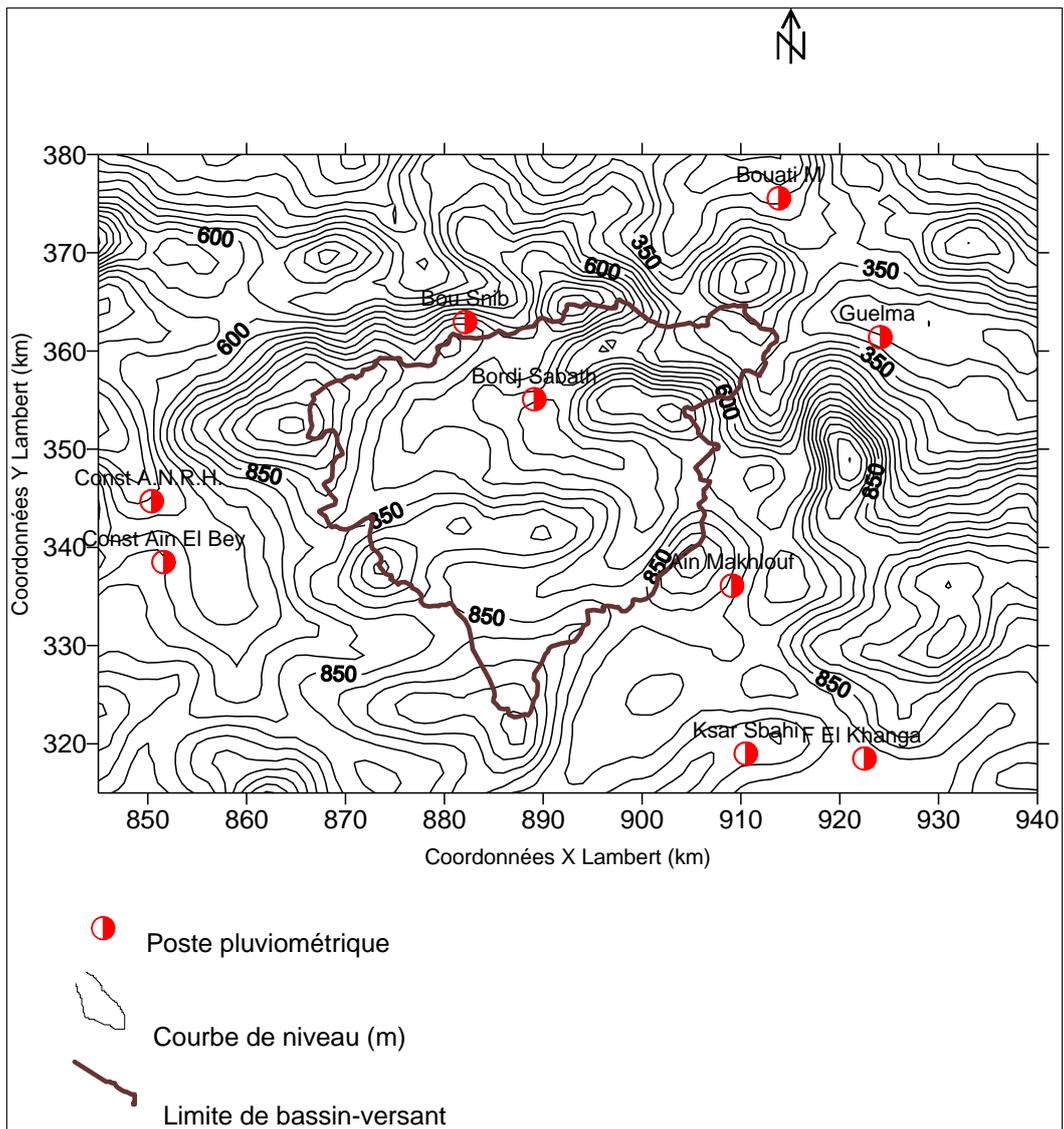


Fig. 133: Bassin-versant de l'oued Bouhamdane : Modèle Numérique de Terrain et postes pluviométriques

Du fait de la relative faiblesse du nombre de postes pluviométriques due surtout à l'importance des lacunes dans les postes de Ras El Akba, Medjez Ammar, et Ben Badis, situés dans le bassin-versant de l'oued Bouhamdane, les postes situés à la périphérie de ce bassin sont utilisés car ils disposent de données fiables sur une longue période (Bouati Mahmoud, Bou Snib, Guelma A.N.R.H., Ain Makhlouf, Constantine Ain El Bey, Constantine A.N.R.H.).

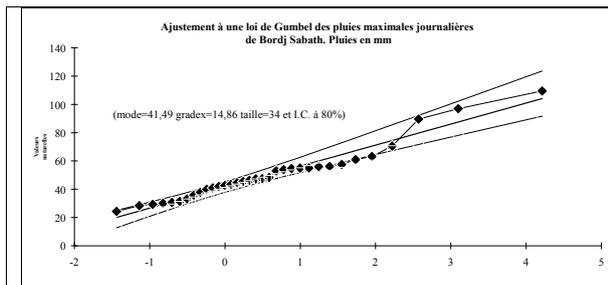


Fig.134: Ajustement des pluies maximales journalières à une loi de Gumbel du poste de Bordj Sabath

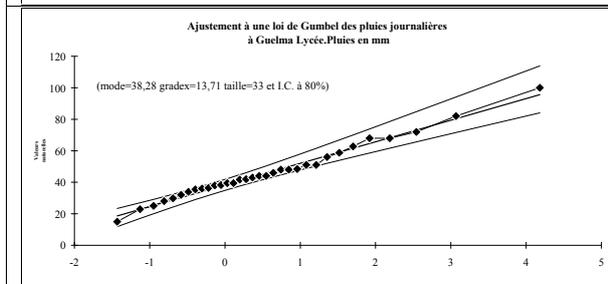


Fig.135 : Ajustement des pluies maximales journalières à une loi de Gumbel du poste de Guelma Lycée

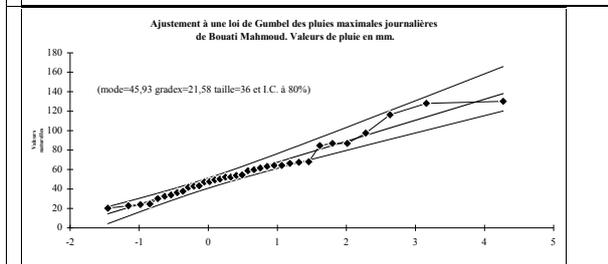


Fig.136 : Ajustement des pluies maximales journalières à une loi de Gumbel du poste de Bouati Mahmoud

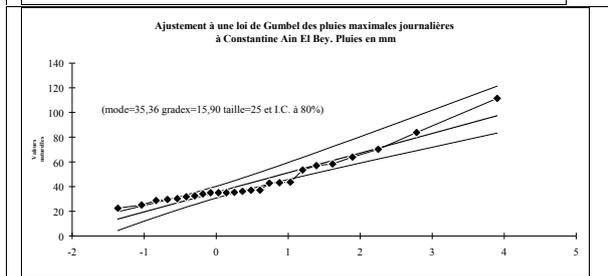


Fig.137 : Ajustement des pluies maximales journalières à une loi de Gumbel du poste de Constantine Ain El Bey

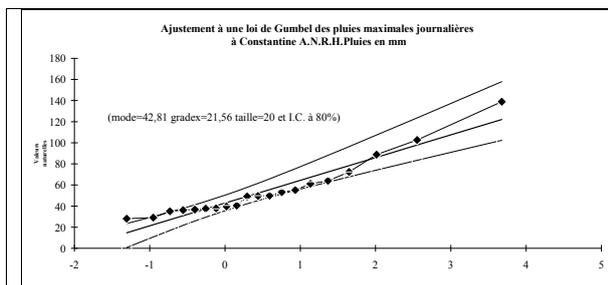


Fig.138 : Ajustement des pluies maximales journalières à une loi de Gumbel l du poste de Constantine A.N.R.H.

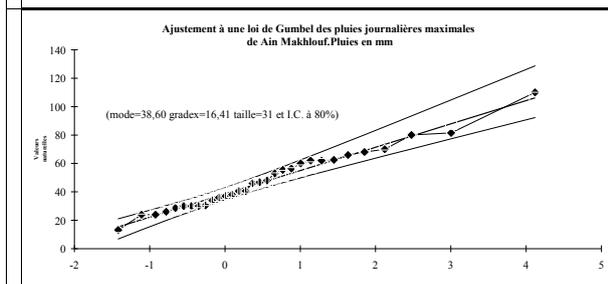
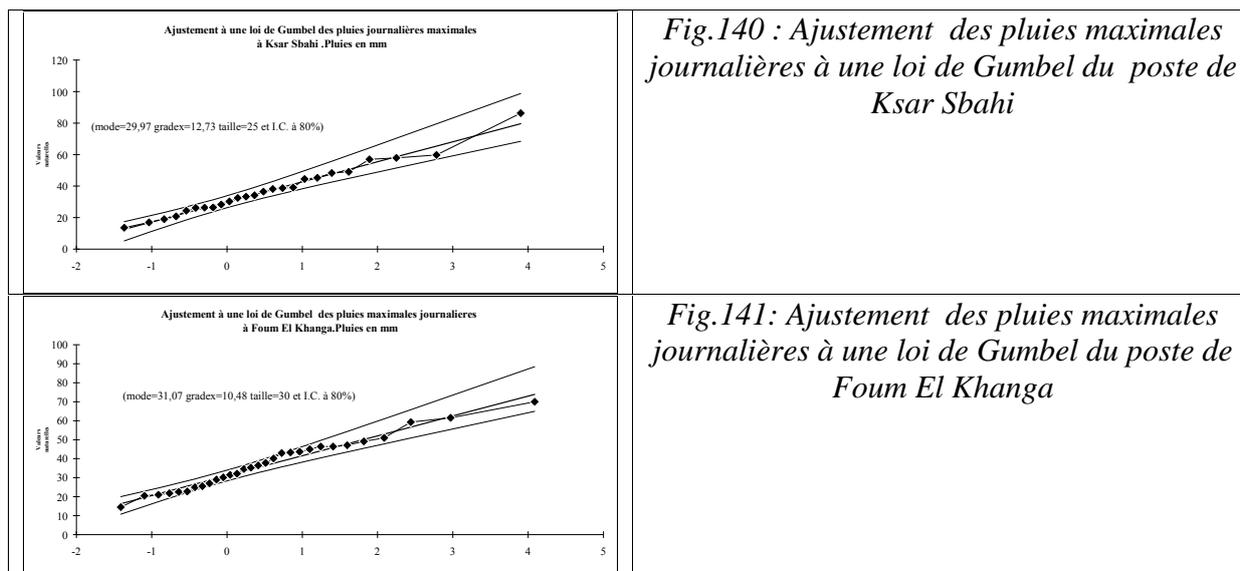


Fig.139 : Ajustement des pluies maximales journalières à une loi de Gumbel du poste de Ain Makhlouf



6.2.1.2. Elaboration des cartes des gradex et pluies journalières maximales décennales et vingtennales

L'analyse statistique des données de pluies maximales et l'ajustement à la loi de Gumbel permettent de cartographier le gradex et les pluies fréquentielles. Le gradex est la contraction de **gradient exponentiel**.

La cartographie des valeurs fréquentielles pour les périodes de retour de 10 ans et 20 ans permettra de cerner les différences spatiales (interpolation réalisée par fonction spline sous Surfer).

Pour cette technique d'interpolation, l'hypothèse de base est que la fonction d'interpolation doit passer par tous les points de mesure (interpolation exacte) tout en étant la plus lisse possible (minimisation de l'énergie de flexion). Les cartes sont esthétiques.

L'inconvénient est l'existence d'une divergence en dehors de la zone de mesure. Cette divergence constitue l'effet de bord qui peut être important.

Tableau 44 : Valeurs de la variable réduite de Gumbel pour les fréquences les plus utilisées

Fréquence au non-dépassement F (x)	Variable réduite de Gumbel	Réurrence (période de retour)
0.9	2.25	10 ans
0.95	2.97	20 ans
0.98	3.90	50 ans
0.99	4.55	100 ans
0.999	6.90	1000 ans

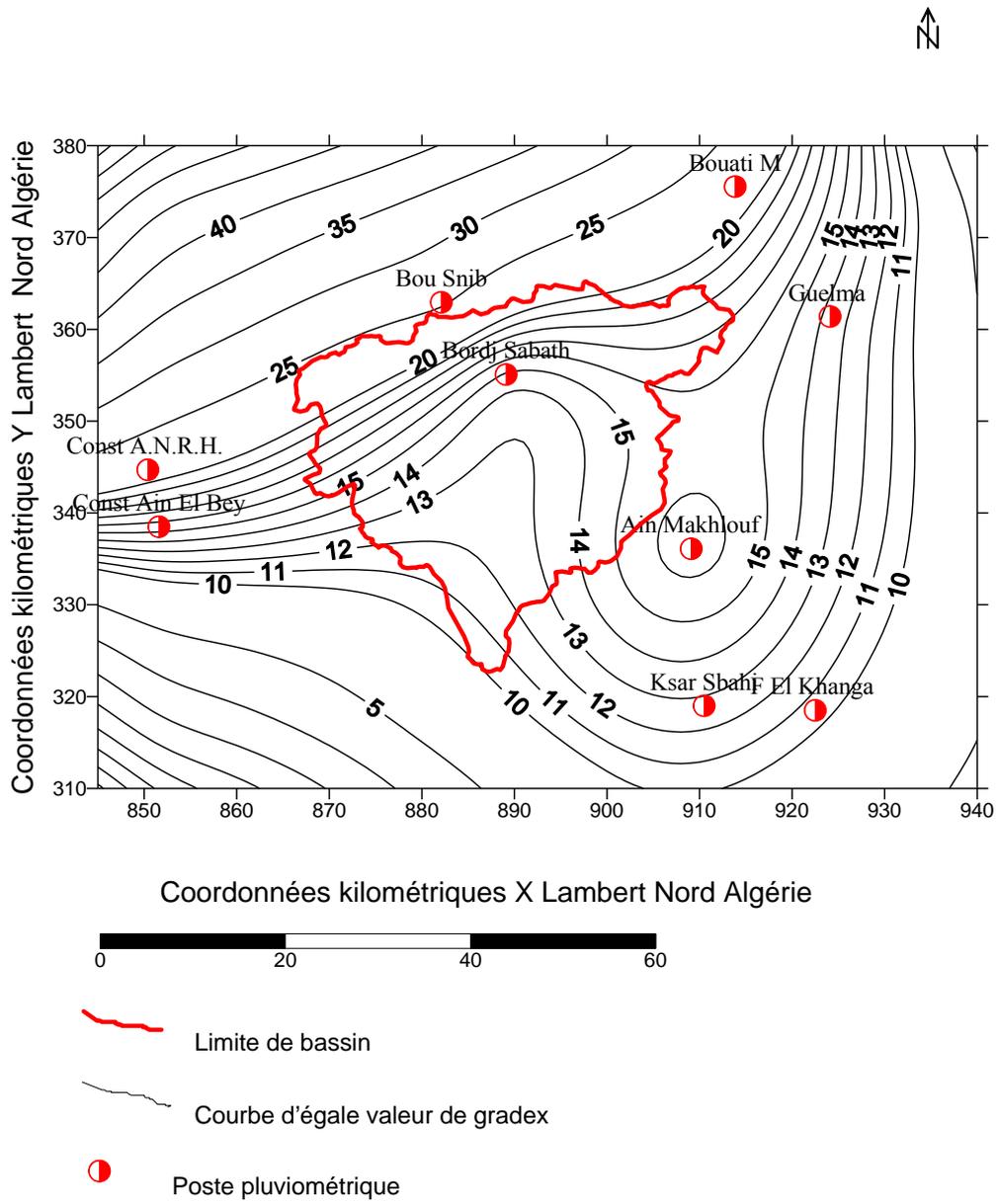


Fig.142 : Valeurs du gradex sur le bassin-versant de l'oued Bouhamdane

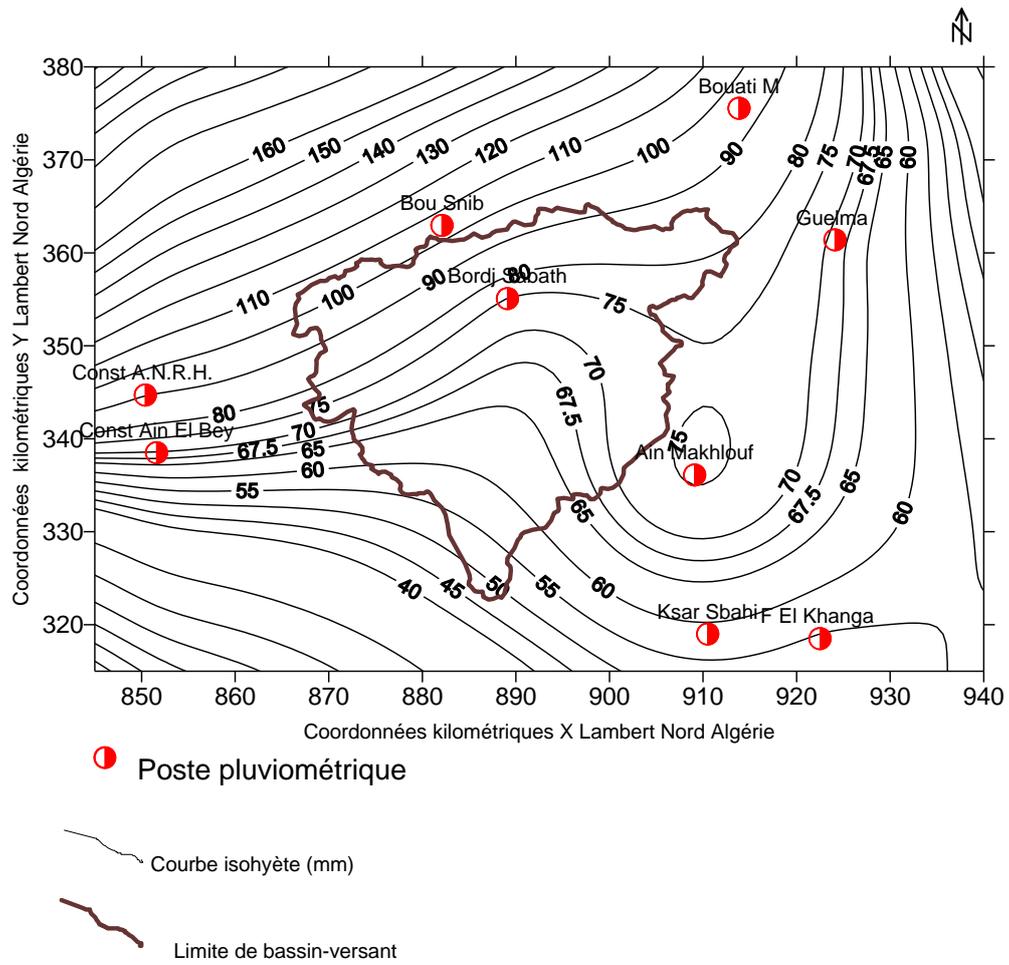


Fig.143: Pluies maximales journalières de fréquence décennale sur le bassin-versant de l'oued Bouhamdane

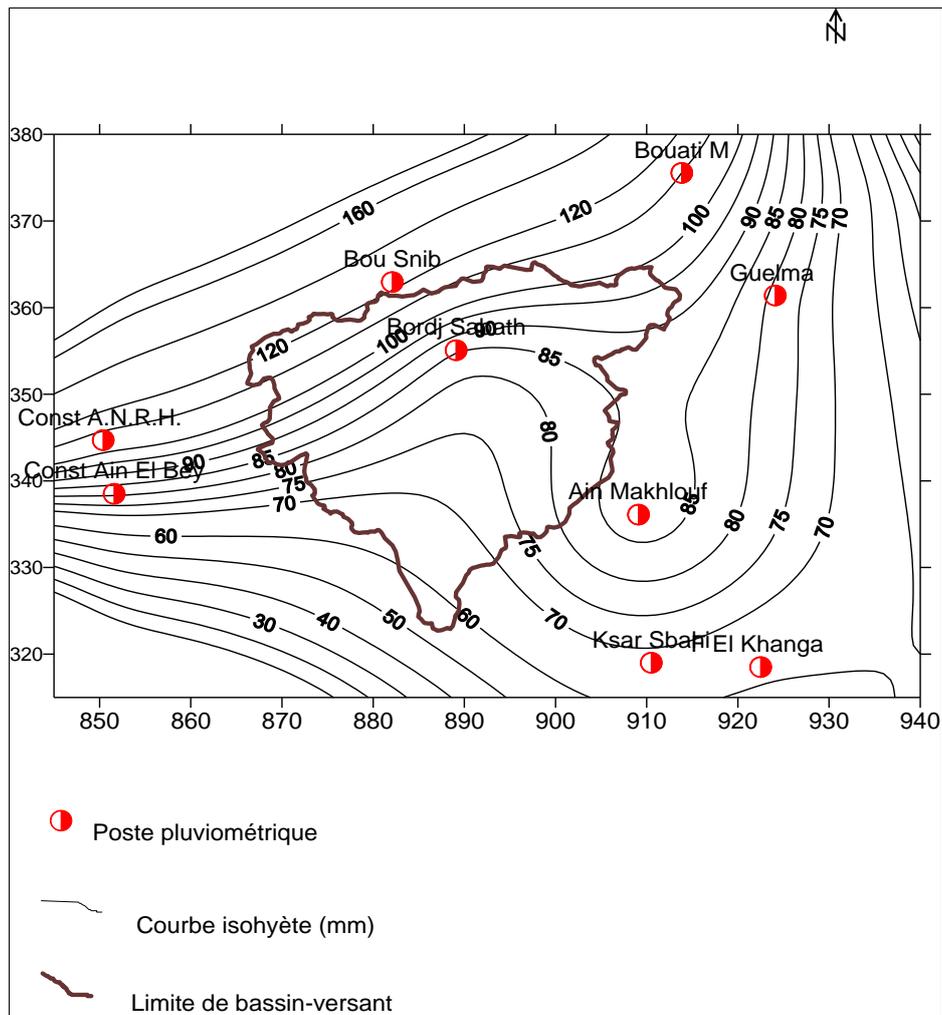


Fig.144: Pluies maximales journalières de fréquence vingtennale sur le bassin-versant de l'oued Bouhamdane

Les valeurs de gradex cartographiées présentent une structure spatiale Nord-Ouest à Sud-Est.

Les valeurs de pluies journalières de fréquences décennale et vingtennale diminuent du nord vers le sud. Pour les postes utilisés, elles diminuent de 100 mm à la station de Bou Snib à 75 mm pour Bordj Sabath. Les valeurs diminuent pour les stations des Hautes Plaines.

L'organisation spatiale des P_j vingtennales est similaire. Les pluies maximales journalières de fréquence décennale et vingtennale sont très importantes pour les postes du versant nord tellien (Bou Snib, Bouati Mahmoud). La station de Bou Snib contribue dans la production des écoulements dans le bassin aval de l'oued Bouhamdane. Dans la zone des Hautes Plaines, les pluies maximales décennales sont certes moins importantes que celles calculées pour la zone tellienne, mais elles produisent des écoulements de crues non négligeables.

6.2.2. Modélisation des Qmax par la formule A.N.R.H.

La prédétermination des débits de crues par la formule A.N.R.H. (2008) pour une période de retour donnée est réalisée grâce à la relation mathématique entre les quantiles de crue et les paramètres explicatifs les plus pertinents. Ceux-ci sont les paramètres morphologiques des bassins versants (surface, pente, altitude), et la pluie (pluie journalière décennale, gradex des pluies journalières). La réalisation d'un hydrogramme de crue qui lie la durée caractéristique aux paramètres morphologiques du bassin versant est également rendue possible.

L'étude de l'A.N.R.H. a permis de faire une distinction entre les crues ordinaires où les précipitations sont relativement réduites et leur extension spatiale faible. Le ruissellement dépend énormément des paramètres de la fonction de production, qui sont très variables d'un bassin à l'autre et avec l'état initial d'humectation. Les caractéristiques des faibles crues sont dépendantes des spécificités des bassins-versants, les pluies n'en constituent pas le facteur déterminant.

Par contre, pour les crues rares, les précipitations fortes et généralisées sur le bassin sont le facteur le plus important. Par ailleurs, le coefficient de ruissellement instantané tend vers 1.

6.2.2.1. Prédétermination des débits moyens journaliers décennaux

- Relations exprimant le débit moyen journalier décennal

La relation qui permet d'exprimer les débits en m³/s est basée sur 3 paramètres explicatifs:

$$Q_j(10) = 0.000215 \text{ Surf}^{0.829} \text{ Pente}^{0.272} P_j(10)^{2.03} \quad (\text{avec } R=0,85)$$

$Q_j(10)$ est exprimé en m³/s, Surf est en km², Pente est sans unité et $P_j(10)$ est en mm

Deux versions simplifiées ont été proposées, basées sur deux paramètres explicatifs.

-Version exprimant le débit décennal en lame écoulée:

$$Q_j(10) = 0.00458 \text{ Surf}^{-0.243} P_j(10)^{2.195} \quad (\text{avec } R= 0.800)$$

$Q_j(10)$ est exprimé en mm, Surf est exprimé en km² et $P_j(10)$ est exprimé en mm

-Version exprimant le débit décennal en m³/s:

$$Q_j(10) = 0.0000530 \text{ Surf}^{0.757} P_j(10)^{2.195}$$

$Q_j(10)$ est exprimé en m³/s, Surf est exprimé en km² et $P_j(10)$ est exprimé en mm

- Application au bassin de l'oued Bouhamdane

Calcul du débit en m³/s : avec $P_j(10)$ de bassin=54 mm, gradex de bassin=11, S=16, So=20 et Ao=2.0.

S: quantité d'eau qui pourrait être infiltré dans le bassin versant; So: interception initiale, c'est la quantité de pluie minimale pour pouvoir observer un ruissellement généralisé et

sensible sur l'ensemble du bassin versant; Ao (ou Ae): $A_o = \frac{\text{Seuil des } Q_i}{\text{Seuil des } Q_j} = \text{rapport de pointe.}$

$$Q_j(10) = 0.000215 \text{ Surf}^{0.829} \text{Pente}^{0.272} P_j(10)^{2.03}$$

$$.032 \cdot 70 * .2720 \cdot 0008 \cdot 0 * .8290 \cdot 1105 * .0002150 = 10(Q_j)$$

$Q_j(10)$ est exprimé en m^3/s , Surf est en km^2 , Pente est sans unité et $P_j(10)$ est en mm
Calcul du débit en m^3/s : $107 m^3/s$, en lame écoulée : 8 mm.

6.2.2.2. Prédétermination des débits de pointe de crue décennaux

- Relations exprimant le débit de pointe de crue décennal

La relation qui permet d'exprimer les débits en m^3/s est basée sur 3 paramètres explicatifs:

$$Q_i(10) = 0.740 \text{ Surf}^{0.678} \text{Pente}^{0.485} P_j(10)^{0.811} \text{ (avec } R=0,77)$$

$Q_i(10)$ est exprimé en m^3/s , Surf est en km^2 , Pente est sans unité et $P_j(10)$ est en mm

L'expression est similaire à la précédente, les coefficients de régression changent.

- Application au bassin de l'oued Bouhamdane

Calcul du débit en m^3/s : $218 m^3/s$, en lame écoulée : 17 mm.

Les valeurs fréquentielles prédéterminées par les formules A.N.R.H. pour les débits maximaux journaliers et les débits de pointe sont inférieures à celles obtenues par ajustements sur les valeurs maximales. Le rapport est de 1 à 4 et s'explique par la différence de méthode utilisée dans les deux estimations : ajustement par les Q max annuels et par les pluies journalières maximales alors que dans l'étude A.N.R.H. les ajustements sur les débits et sur les pluies maximales journalières sont réalisés grâce à la méthode sup-seuil (3 valeurs annuelles).

CONCLUSION DU CHAPITRE 5

Les écoulements liquides ont fait l'objet d'une étude détaillée dans ce chapitre. Après le comblement des lacunes des séries d'observation de débits, ont été analysés les bilans hydrologiques annuels, les profils apports-surfaces, la variabilité spatio-temporelle de l'écoulement aux différents pas de temps.

Les débits de crues ont été étudiés à l'échelle des bassins jaugés en mettant l'accent sur la relation entre les débits fréquentiels et la surface des bassins. L'étude de cas a concerné le bassin de l'oued Bouhamdane avec la cartographie des pluies journalières maximales (F0.9 et F0.95) et la modélisation des Q max décennaux grâce aux modèles mis au point par l'A.N.R.H.

Les écoulements dans le bassin de la Seybouse sont fortement influencés par les aménagements hydrauliques : les grands barrages, les petits barrages, et les retenues collinaires qui régularisent des volumes d'eau importants. Comme le montrera le chapitre suivant (6), l'influence anthropique sur les écoulements va encore s'accroître avec la construction de deux nouveaux grands barrages (Koudiat Haricha dans la Haute Seybouse, et Koudiat Mahcha dans la Basse Seybouse).

Chapitre 6. Mobilisation des eaux de surface du bassin de la Seybouse

INTRODUCTION

Ce chapitre est dédié à l'analyse de la mobilisation des eaux de surface à des fins d'utilisation en eau potable, industrielle et agricole: mobilisation des eaux par les grands barrages, les petits barrages et les retenues collinaires et leurs affectations. Le volet ressources non conventionnelles (stations d'épuration et stations de dessalement) est également abordé de même que les transferts intra-bassin et inter-bassins.

Les données fournies par l'Agence de Bassin Hydrographique du Constantinois-Seybouse-Mellegue (Plan National de l'Eau, 2005) constituent la source principale pour l'étude de la mobilisation et des utilisations de l'eau dans le bassin de la Seybouse.

1. LES GRANDS BARRAGES ET LA REGULARISATION DES EAUX SUPERFICIELLES

A la lueur des résultats obtenus au chapitre 5, nous avons montré que les ressources potentielles superficielles sont très importantes pour le bassin de l'oued Seybouse à la station de Mirbeck ($375,3 \text{ hm}^3/\text{an}$), station la plus proche de l'exutoire. Elles sont également importantes pour les sous-bassins de l'oued Mellah ($107,2 \text{ hm}^3/\text{an}$) à Bouchegouf et l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II ($88,3 \text{ hm}^3/\text{an}$). Par comparaison à la série ANRH que nous avons traitée, ces ressources sont relativement surestimées par l'étude du P.N.E. (Cahiers A.B.H.-C.S.M., 1999): oued Seybouse à Mirbeck ($490 \text{ hm}^3/\text{an}$), oued Mellah à Bouchegouf ($124,4 \text{ hm}^3/\text{an}$) et oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II ($114,8 \text{ hm}^3/\text{an}$).

Sur l'ensemble du bassin de la Seybouse, a été initiée une politique qui a permis la réalisation d'ouvrages hydrauliques permettant la régularisation d'une partie importante des eaux d'écoulement superficiel. Mais cette mobilisation reste encore insuffisante et a obligé les pouvoirs publics à recourir aux transferts entre les bassins limitrophes à travers des barrages existants ou à construire.

Ainsi, deux grands barrages (Hammam Debagh sur l'oued Bouhamdane et Foum El Khanga sur l'oued Cherf) sont en exploitation. Deux autres barrages sont programmés pour 2013 et destinés à l'irrigation : Koudiat Haricha (oued Cherf) et Koudiat Mahcha (Basse Seybouse), avec respectivement une capacité de 80 hm^3 et de $16,8 \text{ hm}^3$, et un volume régularisable respectif de 60 hm^3 et $13 \text{ hm}^3/\text{an}$ (fig.145):

A ces grands ouvrages, s'ajoutent quatre petits barrages (Medjez El Bgar, Sedrata et Tiffech, et El Héria) en exploitation (fig. 145).

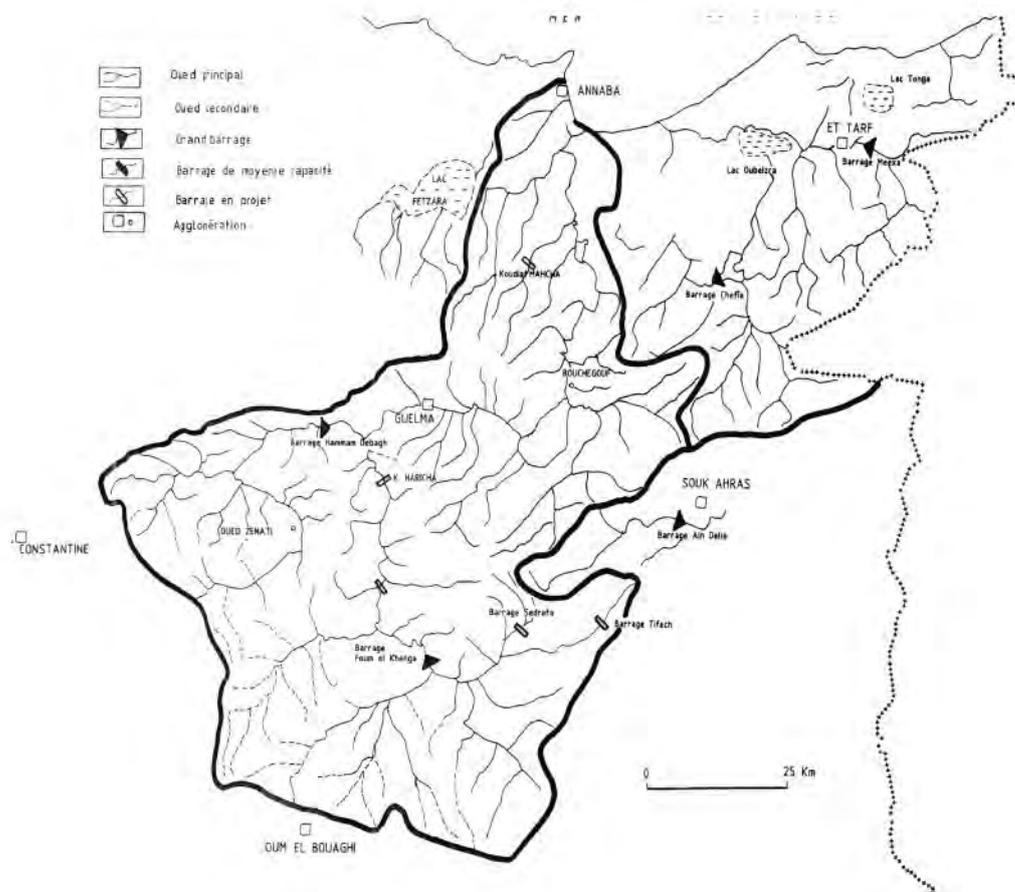


Fig. 145 : Mobilisation des eaux superficielles dans le bassin-versant de la Seybouse et ses abords

1.1. Le barrage de Hammam Debagh sur l'oued Bouhamdane

1.1.1. Caractéristiques techniques

Situé sur le territoire de la wilaya de Guelma, sur l'oued Bouhamdane, le barrage de Hammam Debagh, a été mis en eau en décembre 1987. Il est du type en terre avec noyau central (fig.146). La retenue normale (RN) qui occupe une aire de 643,04 ha, a une capacité, estimée à 200 hm³ en 1988, réévaluée à 184,35 hm³ en 2004 à la suite des levés bathymétriques. La cote de retenue normale est de 360 m; la cote des plus hautes eaux (PHE) est de 370,24 m et celle de la PHEE de 371,28 m.

L'apport moyen annuel estimé dans les études d'avant-projet est de 63 hm³ et le volume régularisé est de 55 hm³. L'envasement moyen annuel a été estimé à 0,53 hm³ dans les études d'avant-projet.

L'évacuateur est du type puits de section circulaire (en forme de tulipe) (photo 04).

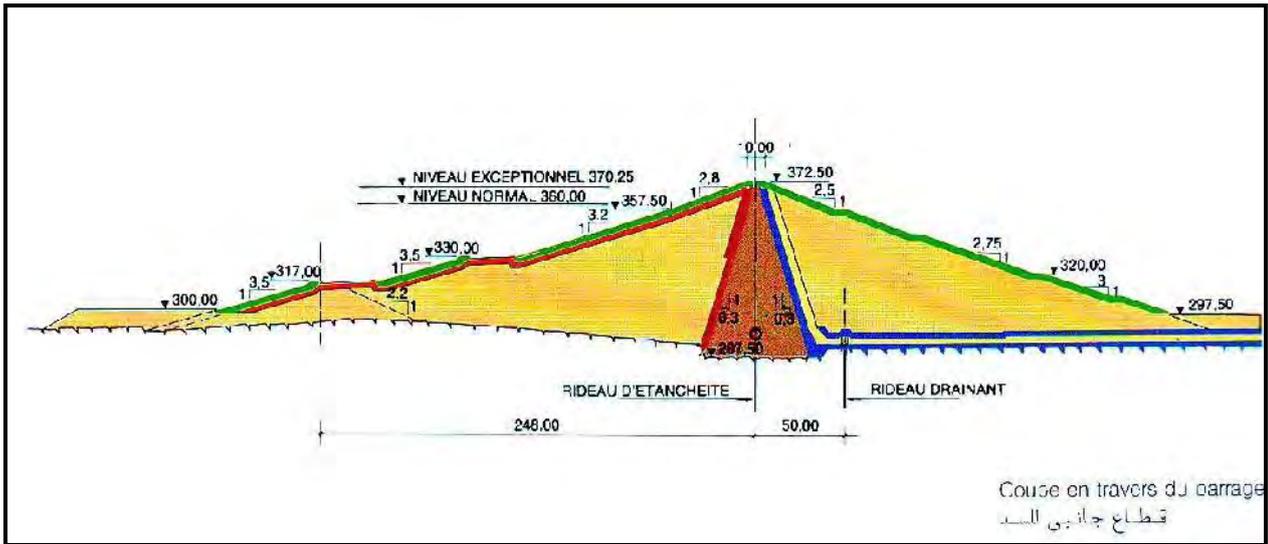


Fig.146: Coupe en travers du barrage de Hammam Debagh (d'après A.N.B.T.)



Photo 04: Le barrage de Hammam Debagh: évacuateur de crues en puits de section circulaire et protection sur la rive gauche (vue à partir de la digue)
Photo : mai 2012

1.1.2. Régularisation des apports

Les données concernant les apports au barrage de Hammam Debagh sont disponibles de 1990/1991 à 2008/2009 (fig.147).

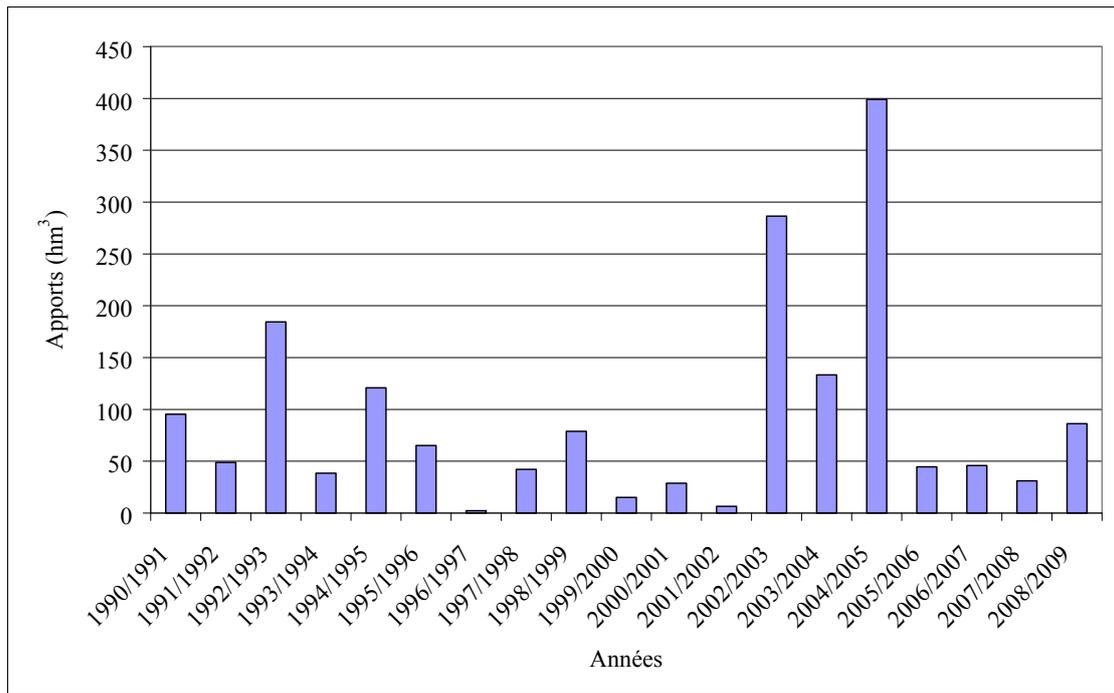


Fig.147: Apports annuels au barrage de Hammam Debagh (1990/1991-2008/2009)

La moyenne interannuelle des apports a été de 92,3 hm³, avec une très forte variabilité (CV=110 %). Cinq années ont dépassé 100 hm³/an, (1992/93,1994/95, 2002/2003, 2003/2004 et 2004/2005). Les années 2002/2003 et 2004/2005 ont présenté une hydraulité particulièrement forte, alors que quatre années ont été particulièrement faibles (1996/97, 1999/2000, 2000/2001 et 2001/2002). Ces fluctuations sont en correspondance avec les années humides et les années sèches abordées plus particulièrement dans le chapitre consacré aux transports solides (chapitre 8).

1.1.3. Affectation des eaux du barrage de Hammam Debagh

Le barrage, fonctionnel depuis 1988, a permis la création d'un périmètre irrigué dans la vallée de Guelma-Boucheouf (12900 ha). Le périmètre qui a connu un retard dans sa réalisation, a été mis en exploitation au fur et à mesure de l'équipement des parcelles par l'Agence Nationale d'Irrigation et de Drainage (AGID). A partir de 1993, les eaux du barrage de Hammam Debagh ont été sollicitées pour l'A.E.P des petits centres proches du barrage et de l'agglomération de Guelma.

1.1.3.1. Le périmètre irrigué de Guelma-Boucheouf (vallée de Guelma)

La décision d'aménager les vallées de Guelma et de Boucheouf a fait partie des préoccupations des années 1970. Ces terres bénéficient d'atouts non négligeables: ressources en eaux superficielles (l'oued Seybouse et son affluent l'oued Mellah caractérisé, toutefois, par une assez forte salinité) et souterraines (nappe alluviale), micro-climat lié à une topographie en cuvette et également sols alluviaux. Dans la plaine de Guelma, la betterave sucrière, à la suite d'essais menés entre 1947 et 1964, s'est révélée une culture adaptée, surtout en système irrigué. Le projet de Guelma – Boucheouf a initialement des objectifs régionaux de développement agricole:

- assurer l'approvisionnement de la ville de Guelma en fruits et légumes ;
- encourager l'assolement betteravier afin d'assurer l'approvisionnement de la sucrerie;
- créer un bassin laitier en développant sur de grandes surfaces les fourrages irrigués;

Parmi les effets attendus du projet, la création d'emplois.

Ces préoccupations ont été à l'origine de la décision de construire un barrage pour régulariser les eaux de l'oued Bouhamdane et équiper un périmètre irrigué de 13000 ha.

Le périmètre d'une surface initiale de 12 900 ha est organisé en secteurs (fig. 148):

- Oued Cherf (Medjez Ammar): 605 ha;
- El Fedjoudj: 2355 ha;
- Guelma: 3500 ha;
- Bou Mahra: 2000 ha;
- Boucheougouf: 880 ha;
- Dréan: 2960 ha (wilaya d'El Tarf).

Le sixième secteur (Dréan), le plus éloigné, a été abandonné en cours de réalisation du périmètre. Il ne correspond pas géographiquement à la vallée de Guelma-Boucheougouf et, par ailleurs, la décision d'alimenter en eau potable l'agglomération de Guelma a provoqué l'annulation de l'équipement du secteur programmé de Dréan.

Ce projet de périmètre, dont les travaux ont commencé en 1987, a connu un retard considérable dans sa réalisation à cause de problèmes multiples: approvisionnement et financement en devises (60 % du matériel étant importé), problèmes fonciers (opposition des propriétaires fonciers).

La distribution de l'eau se fait par des lâchers d'eau à partir du barrage de Hammam Debagh dans l'oued et sa reprise est opérée dans chaque secteur grâce à un seuil, une station de pompage, des dessableurs et des réservoirs (fig.148). La technique d'irrigation utilisée au sein des îlots est l'aspersion et le goutte à goutte pour l'arboriculture fruitière. Le réseau est du type ramifié et l'eau est acheminée dans des canaux principaux et secondaires.

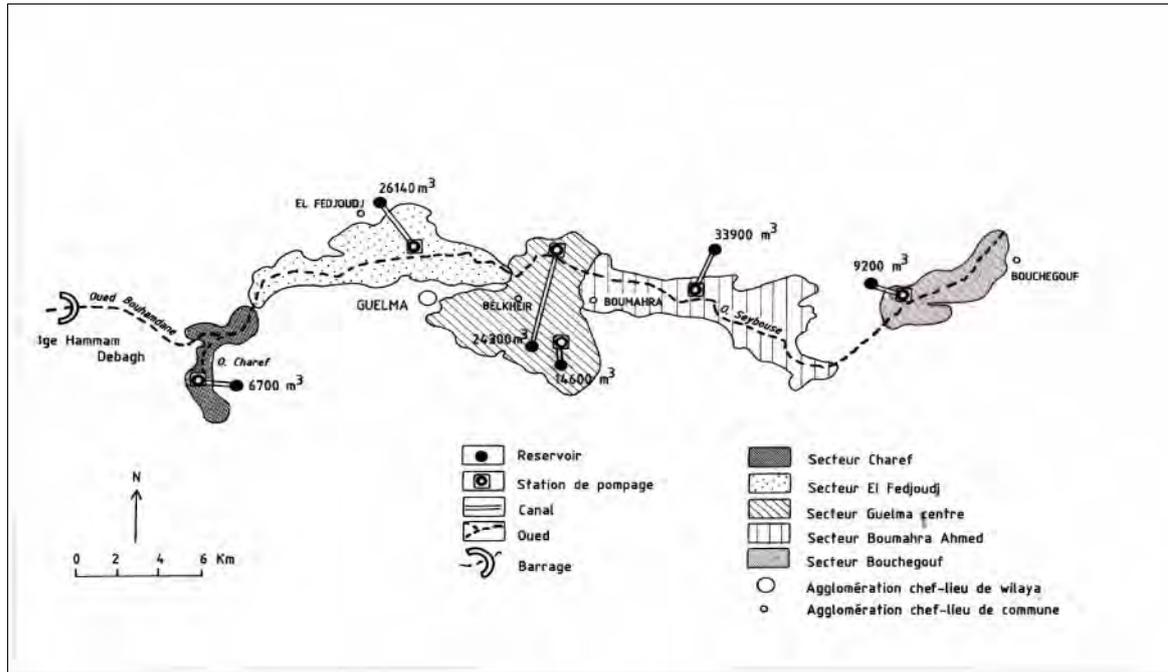


Fig.148 : Le périmètre irrigué Guelma –Boucheougouf, distribution de l'eau (d'après AGID, 2007)

Les capacités des réservoirs et les débits aux stations de pompage diffèrent selon les secteurs (fig. 149). Ils ont été calculés en correspondance avec les surfaces équipées. Les secteurs sont autonomes aussi bien sur le plan de l'aménagement que de celui de la desserte en eau.

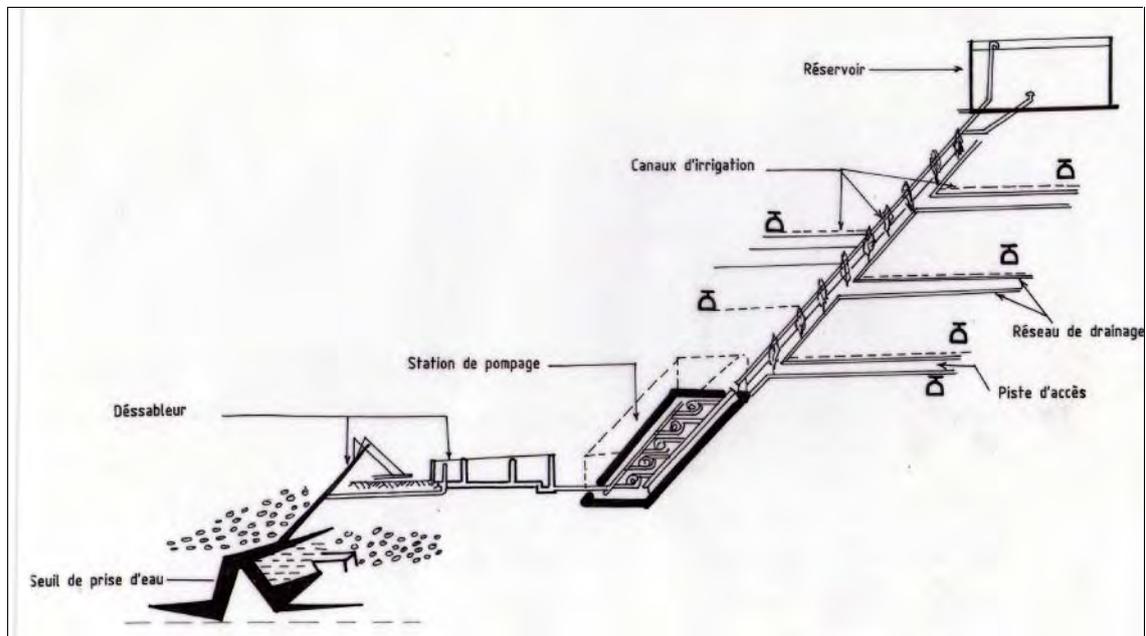


Fig.149: Schéma de distribution de l'eau par secteur irrigué: du seuil de prise au réservoir (d'après AGID, 2007)

La surface équipée est de 9940 ha et celle irrigable de 9250 ha (tabl. 45). Le secteur dont l'équipement s'est achevé le premier est celui de Guelma –Centre qui a été mis en eau en 1995-1996. Durant cette campagne agricole, les cultures intensives n'ont représenté que le quart de la surface équipée.

Tableau 45 : Surfaces équipées et irrigables dans le périmètre de Guelma-Boucheouf (d'après O.N.I.D. Guelma, mai 2012)

Secteur	Superficie équipée (ha)	Superficie irrigable (ha)	Besoins en eau (hm ³)
Cherf	605	565	3.4
El –Fedjouj	2355	2190	13.0
Guelma-Centre	3500	3255	19.4
Boumahra Ahmed	2600	2420	14.4
Boucheouf	880	820	4.9
Total	9940	9250	55.1

Les besoins globaux du périmètre, estimés initialement à 71,5 hm³ ont été revus à la baisse (55,1 hm³). Ils seront assurés principalement par le barrage de Hammam Debagh (55 hm³). Le volume restant est assuré par les écoulements dans le bassin de la Seybouse (oued Cherf et bassins alimentant l'oued Seybouse à partir des versants Nord et Sud dans la vallée de Guelma). Ceci est rendu possible par la technique de distribution de l'eau aux différents secteurs.

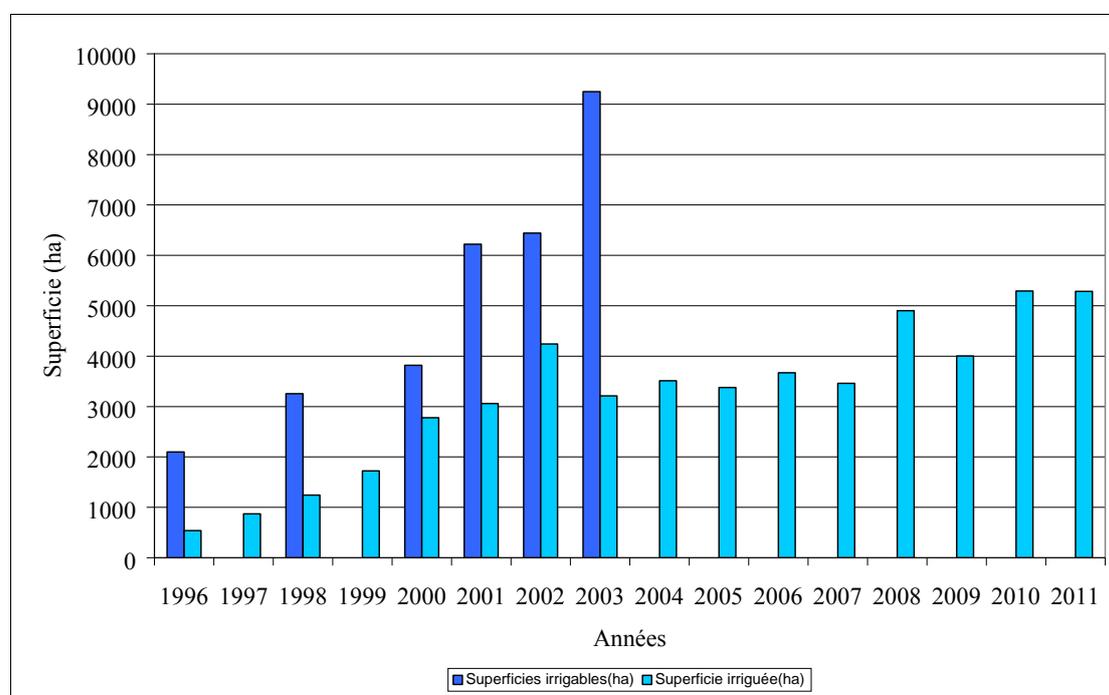


Fig.150: Evolution des superficies équipées et des surfaces irriguées dans le périmètre de Guelma-Boucheouf (d'après O.N.I.D. Guelma, mai 2012).

L'équipement du périmètre a été totalement achevé en 2003. Les surfaces irriguées, après un démarrage lent, se sont stabilisées aux alentours de 5000 ha (fig. 150).

En ce qui concerne les assolements, les objectifs initiaux qui consistaient à encourager l'assolement betteravier afin d'assurer l'approvisionnement de la sucrerie et la création d'un bassin laitier sont loin d'être atteints (tabl. 46).

Tableau 46 : Assolements dans le périmètre de Guelma-Boucheouf (d'après O.N.I.D. Guelma, mai 2012).

Type de cultures	Situation initiale	Assolement 2009
Céréales	20 %	46 %
Maraichages	16 %	24 %
Cultures industrielles	06 %	14 %
Fourrages	54 %	01%
Arboriculture	04 %	5 %

L'eau est payée au forfait en fonction des cultures (4500 D.A. pour 1 hectare de tomates).

Les ressources en eau disponibles à partir du barrage ne sont pas encore exploitées à 100 %, les volumes affectés sont très variables. Le volume consommé représente moins de 50 % du volume initialement prévu (fig. 151).

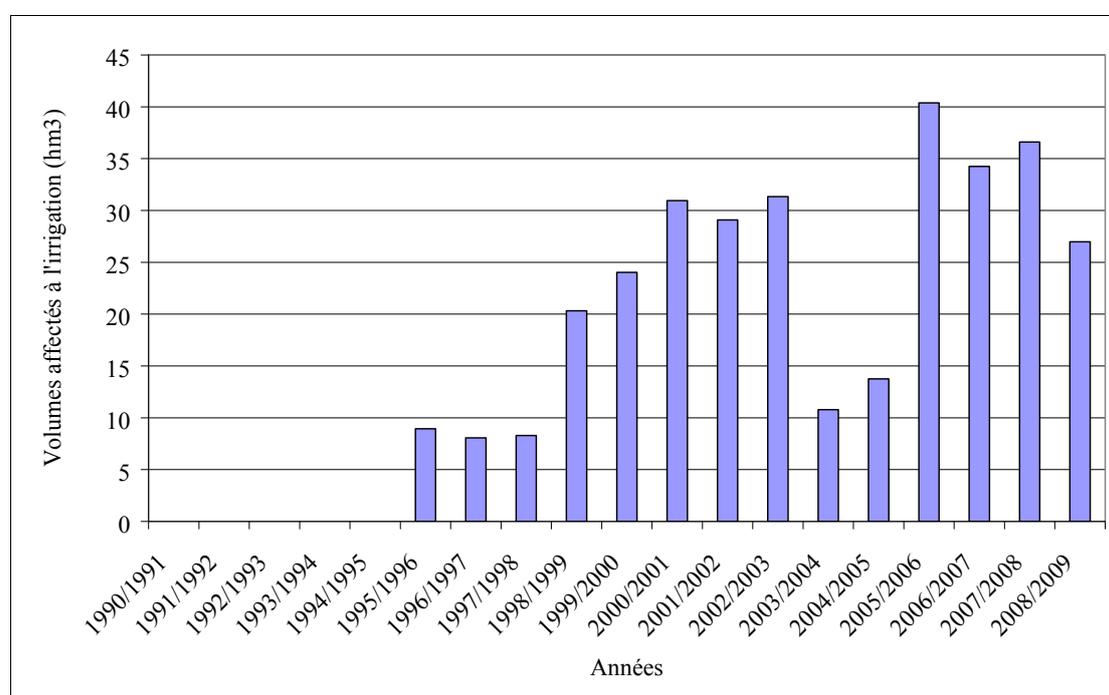


Fig. 151: Volumes affectés à l'irrigation à partir du barrage de Hammam Debagh (1993/1994-2008/2009) (d'après O.N.I.D. Guelma, mai 2012).

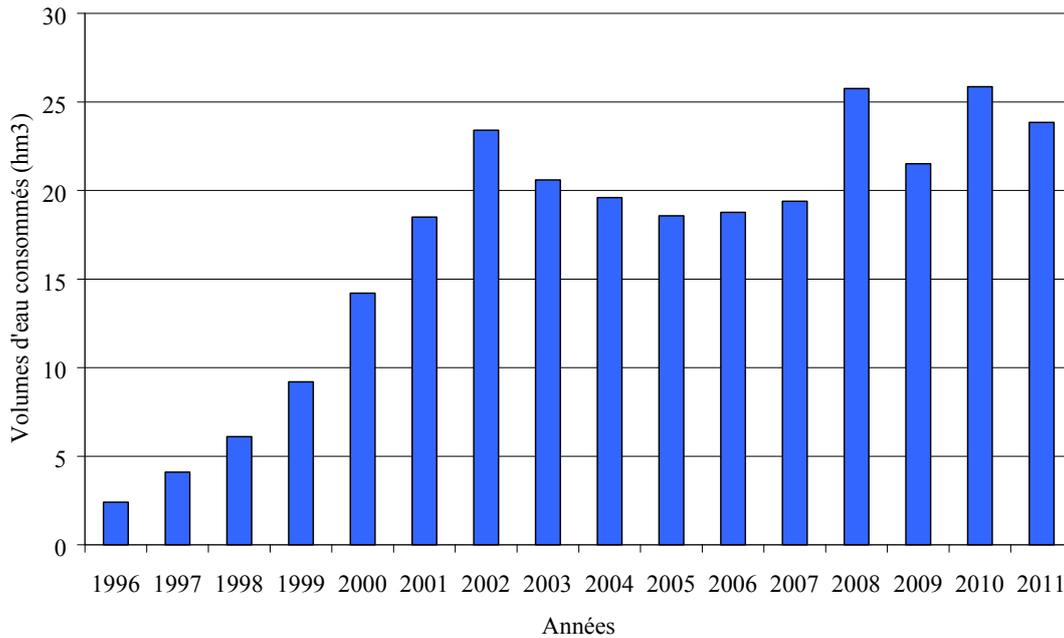


Fig. 152: Evolution des volumes d'eau consommés dans le périmètre de Guelma-Bouchehouf (d'après O.N.I.D. Guelma, mai 2012).

La distribution des eaux du barrage a commencé progressivement (8 hm³ durant l'année 1995/1996). Les années 2003/2004 et 2004/2005 ont enregistré une baisse du volume affecté à l'irrigation à cause du faible nombre des souscriptions des fellahs. Le volume maximal affecté au périmètre irrigué à partir du barrage a été de 40,376 hm³ durant l'année agricole en 2005/2006 (fig.152). Des problèmes techniques ont été relevés par les services de l'O.N.I.D., concernant l'usure des équipements (pompes d'exhaure, pompes de surface, bornes d'irrigation) et les fuites dans le réseau de canalisation.

En conclusion, la vallée de Guelma-Bouchehouf, qui recevait des volumes d'eau d'irrigation très irréguliers par pompages directs dans l'oued et dans la nappe alluviale, est désormais alimentée d'une façon plus ou moins régulière par des lâchers d'eau à partir du barrage de Hammam Debagh. Cependant, l'aménagement du périmètre a mis en lumière la longueur des délais de réalisation du projet: barrage, équipement des secteurs composant le périmètre irrigué, mise en fonction effective de l'irrigation.

Ce projet permet de poser les problèmes d'aménagement de l'amont à l'aval. Le secteur dont l'équipement était le plus avancé a commencé à fonctionner durant l'année 1995/1996 et la surface effectivement irriguée peine à dépasser 5000 ha par an. Aussi, les impacts des rejets polluants de l'agglomération de Guelma et des centres urbains avoisinants, ont été ressentis sur le périmètre à l'aval de la ville, jusqu'à la mise en fonction en 2008 d'une station d'épuration (STEP), traitant un débit constant de 7000 m³/j (81 l/s) avant de le restituer dans l'oued Seybouse. Ceci a des effets bénéfiques aussi bien sur la qualité des eaux d'écoulement dans l'oued Seybouse et des nappes alluviales que sur le périmètre de Bouchehouf.

1.1.3.2. L'alimentation en eau potable et industrielle

L'alimentation des centres urbains de la vallée de Guelma par le barrage de Hammam Debagh a commencé en 1993/94 et les volumes affectés à l'A.E.P. à partir du barrage de Guelma ont augmenté progressivement jusqu'à atteindre 16 hm³ en 2008 (fig.153).

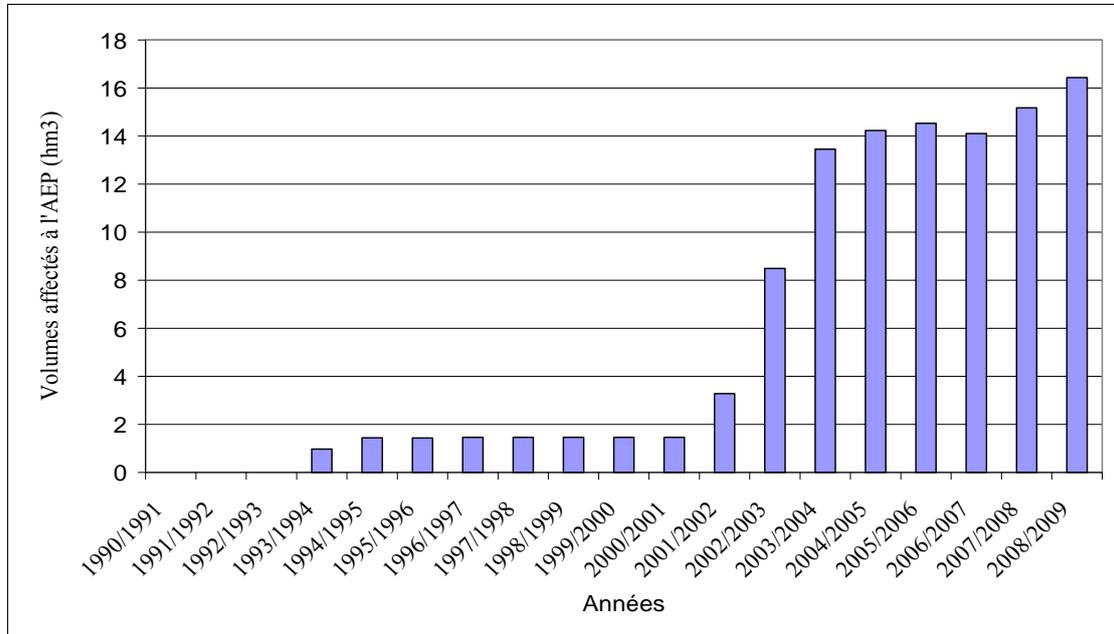


Fig.153: Volumes affectés à l'A.E.P. à partir du barrage de Hammam Debagh (1993/1994 - 2008/2009)

Dans la Moyenne Seybouse, la ville de Guelma (78676 hab.) représente la part prépondérante des besoins en A.E.P. Les besoins en eau industrielle de la Moyenne Seybouse sont évalués à 9600 m³/j (3,504 hm³/an), représentant 12,1 % des besoins globaux.

1.2. Le barrage de Foum El Khanga sur l'oued Cherf amont

1.2.1. Caractéristiques techniques et régularisation des apports

Le barrage de Foum El Khanga est construit sur le haut Cherf, à proximité d'Aioun Settara, à l'emplacement même de la station hydrométrique Moulin Rochefort (1738 km²).

L'étude d'avant-projet détaillé (APD) a été confiée au bureau d'études belge TRACTEBEL. Le bureau d'études d'exécution étant COBA (Portugal). Les travaux ont débuté au mois de juin 1988, et la mise en eau s'est effectuée en novembre 1995.

D'une capacité de 157 hm³, le barrage régularise un volume de 55 hm³/an, destiné à l'irrigation dans la plaine de Ksar Sbahi.

Le barrage est du type Remblai compacté avec noyau en silts argileux et recharges amont et aval stabilisatrices en enrochements calcaire. La hauteur au-dessus

du fond de vallée est de 60 m, le niveau de la crête est de 752 m, la longueur en crête est de 397 m et la largeur en crête de 9 m (fig.154 et tabl.47).

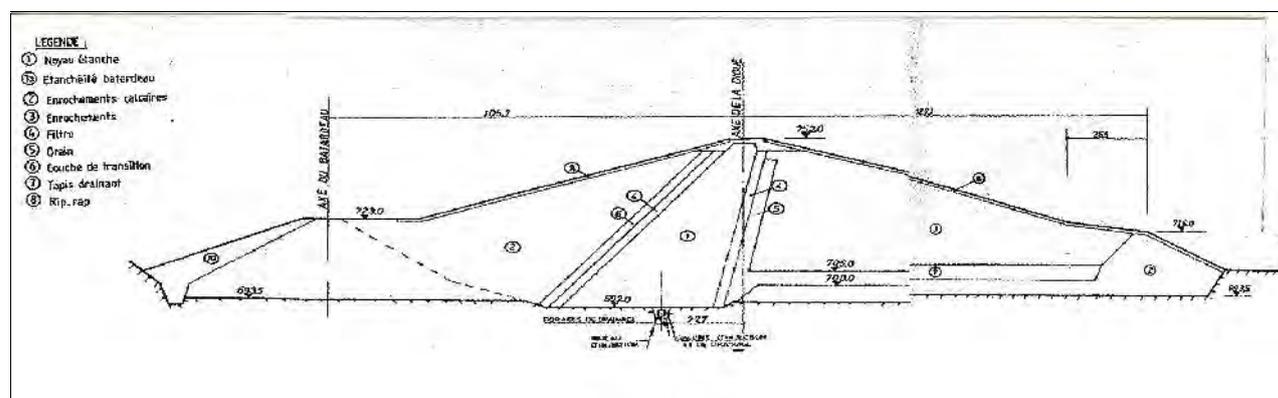


Fig.154: Coupe du barrage de Fom El Khanga d'après A.N.B.T.

Tableau 47: Caractéristiques de la retenue d'eau de Fom El Khanga D'après A.N.B.T.

Caractéristiques	Valeurs
Cote de retenue normale (NNR)	745.00 m
Capacité initiale à la RN	157.00 hm ³
Surface de la retenue à la cote normale	1287.18 ha
Cote de retenue maximum (PHE)	750.00 m
Capacité de la retenue à la PHE	229.85 hm ³
Surface de la retenue à la PHE	1820.07 ha
Capacité après levés bathymétrique en 2004	152.650 hm ³
Capacité utile	141.00 hm ³
Volume annuel régularisable	30h hm ³
Apport moyen annuel	33 hm ³

Les principaux résultats des études hydrologiques indiquent que la pluie moyenne est de 480 mm/an et l'apport moyen interannuel se situe autour de 33 hm³. D'après l'étude d'Avant Projet détaillé (A.P.D.), l'apport solide est 20 500 m³/an; le levé bathymétrique effectué en 2004 a montré que cette valeur était nettement sous-estimée, l'apport solide mesuré étant de 483 300 m³/an. Les pertes par envasement cumulées en 2012 sont estimées à 6,283 hm³.

Sur la période de 10 années pour lesquelles les données sont disponibles (fig.155), les apports annuels ont fluctué entre 136,3 hm³ en 2002/2003 et 14,3 hm³ en 2007/2008. La moyenne a été de 57,2 hm³ et l'écart-type de 43,3 hm³ (CV=75%).

Trois années ont enregistré des apports annuels très importants : 2002/2003 avec 136,3 hm³ et un volume déversé de 25,915 hm³ (23,4 au mois d'avril et 2,5 hm³ au mois de mai), 2004/2005 avec 122,2 hm³ et un volume déversé de 32,5 hm³ (22,3 en février et 10,24 au mois de mars) et enfin 2011/2011 avec un apport annuel de 96,97 hm³ dont 11,2 hm³ déversé en février 2012(fig.155).

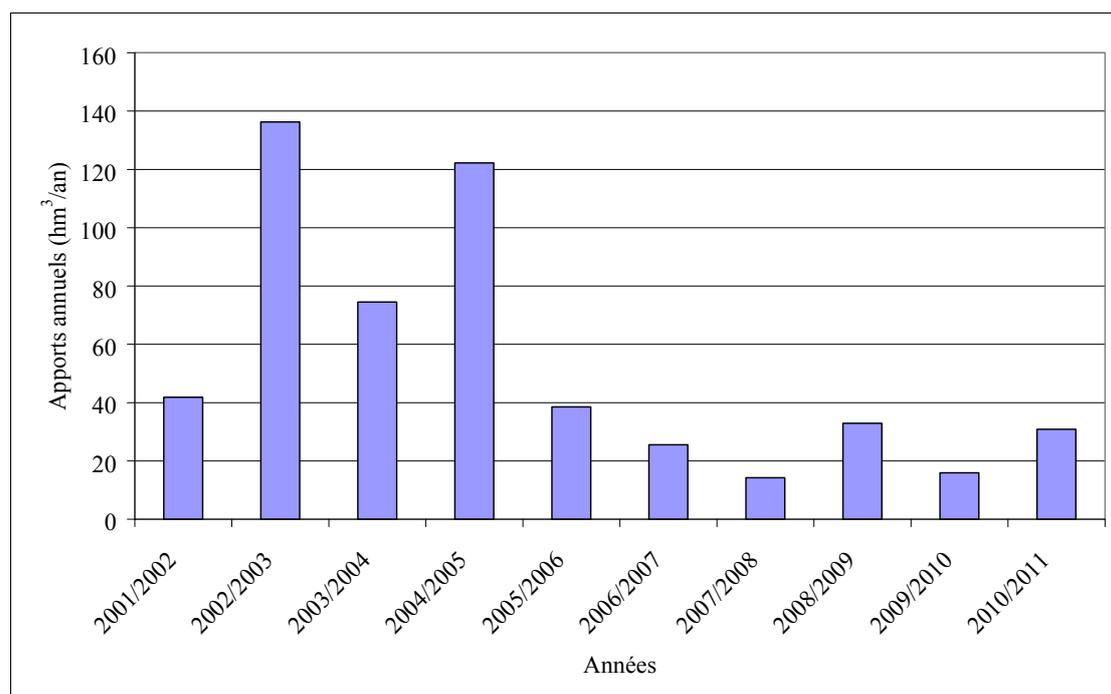


Fig.155: Apports annuels au barrage de Foum El Khanga (2001/2002-2011/2012)

1.2.2. Affectation des eaux du barrage de Foum El Khanga

L'objet du barrage de Foum El Khanga sur l'oued Cherf est la régularisation interannuelle des eaux d'écoulement de l'oued Cherf amont, et la fourniture de 30 hm³ d'eau à l'irrigation de 3742 ha de terres agricoles localisées sur les territoires des wilayas de Souk –Ahras (périmètres de Sedrata, Zouabi et Bir Bouhouche) et d'Oum El Bouaghi (périmètre de Ksar Sbahi) (fig. 156).

Bien que la mise en eau du barrage se soit effectuée en novembre 1995, les débuts effectifs de l'irrigation se sont effectués au mois de mai 2010. Les délais entre la mise à disposition des ressources en eau et les débuts de l'irrigation sont très importants comme pour le périmètre de Guelma–Boucheouf à cause des retards dans les études, et des délais indispensables pour l'équipement des terres irrigables.

Les zones irriguées dans le Haut Cherf sont au mois de mai 2010 totalement équipées. L'opération d'irrigation a débuté en juin 2010.

La zone de Tiffech-Sedrata (Sedrata : 2000 ha) sera irriguée à partir du barrage de Sedrata qui est également utilisé pour l'A.E.P.

Une zone d'irrigation dans le bassin de l'oued Cherf aval, à proximité de Ain Makhlouf (300 ha) est alimentée par un petit barrage (M'djez Bgar), d'une capacité de 2,86 hm³.

Malgré la réalisation et la mise en fonction de ces deux grands barrages, Hammam Debagh sur l'oued Bouhamdane (capacité de 184,347 hm³ en 2004 et volume régularisé de 55 hm³) et Foug El Khanga sur l'oued Cherf (capacité de 153 hm³ en 2004 et volume régularisé de 55 hm³/an), la satisfaction des besoins en eau dans le bassin de la Seybouse n'est pas pleinement assurée, même avec le recours aux eaux souterraines.

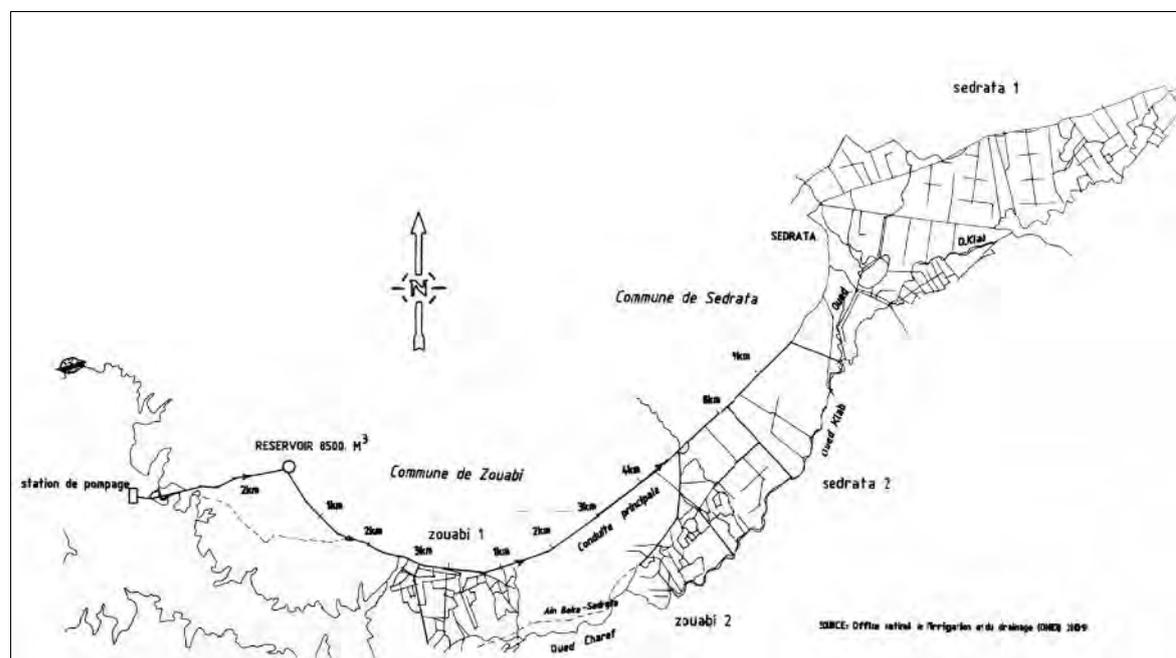


Fig.156: Périmètre irrigable de Ksar Sbahi–Sedrata (d'après ONID Guelma, mai 2010)

2. LES PETITS BARRAGES ET LES RETENUES COLLINAIRES

2.1. Les petits barrages

Trois petits barrages ont été réalisés dans le bassin du Cherf et un barrage dans le bassin de l'oued Bouhamdane à des fins d'irrigation (tabl. 48 et fig. 157).

Tableau 48: Petits barrages dans le bassin de l'oued Seybouse

Barrage	Oued	Capacité (hm ³)	Utilisation
Medjez ElBgar	Medjez El Bgar	2.86	Irrigation
Sedrata	l'oued Lahmimime	5.80	Irrigation
Tiffech	Tiffech	3.90	Irrigation
El Héria	El Héria	1.8	Irrigation

(D'après Cahiers A.B.H.C.S.M., 2002)

Le barrage de Medjez El Bgar est situé sur l'oued Medjez El Bgar dans le Bas Cherf alors que les barrages de Sadrata et Tiffech sur les oueds Cherf et sur l'oued Lahmimime dans le Haut Cherf régularisent 5,80 hm³ et 3,90 hm³ annuellement.

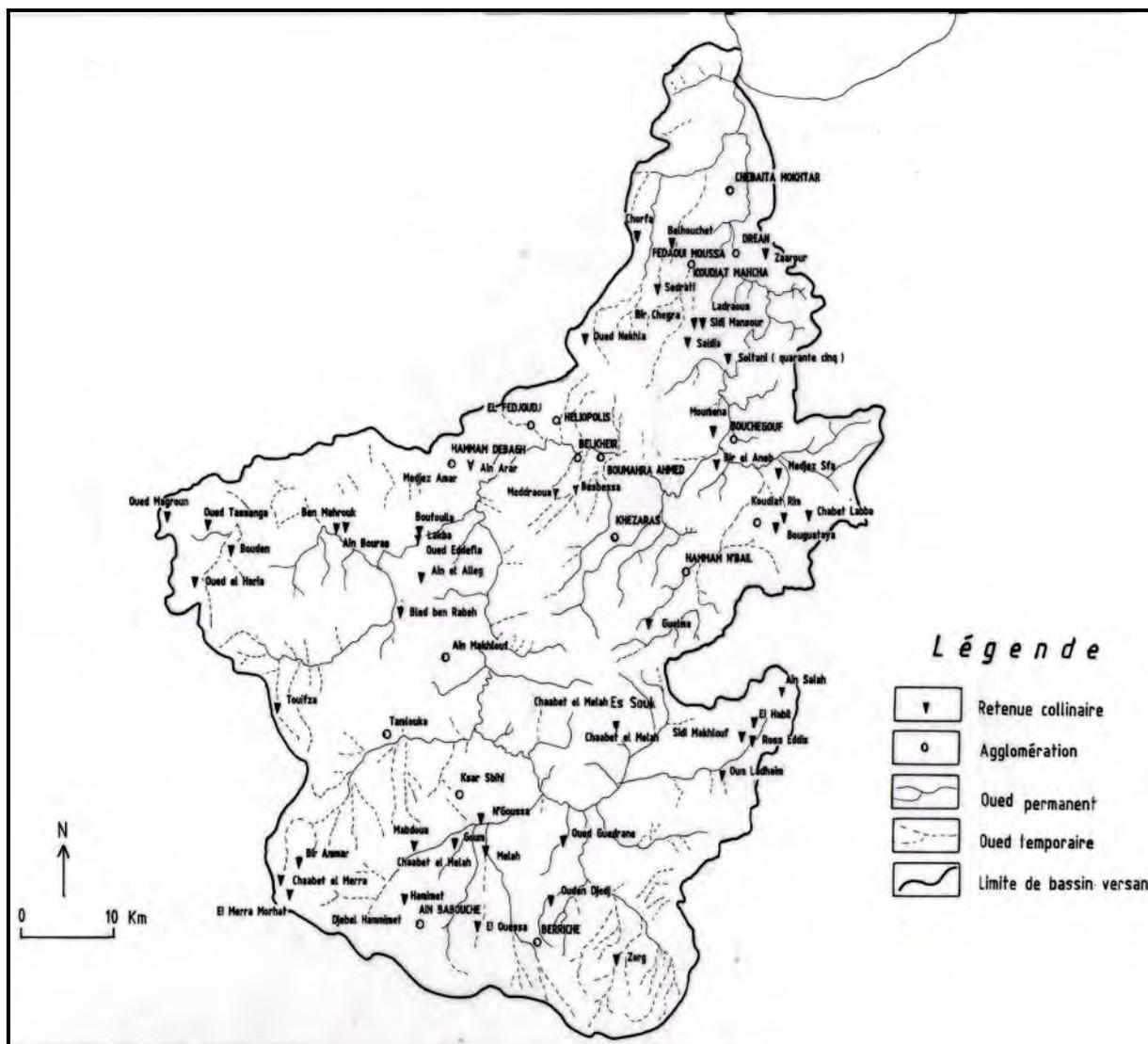


Fig. 157 : Retenues collinaires dans le bassin-versant la Seybouse

2.2. Les retenues collinaires

Les retenues collinaires ont été développées en Algérie dans les décennies 1970 et 1980. Elles présentent l'avantage d'être réalisables dans des délais très courts et d'être peu coûteux. Les retenues collinaires sont spécialement affectées à l'irrigation et au cheptel.

Le bassin de la Seybouse a connu un développement considérable des retenues collinaires (fig. 157). Soixante-dix (70) retenues collinaires ont été recensées sur l'ensemble des communes du bassin-versant d'après l'inventaire établi par l'Agence de

bassin hydrographique du Constantinois-Seybouse-Mellegue, mobilisant un volume d'eau annuel de: 12,79 hm³, destiné à l'irrigation.

D'après Côte (1996) et Mebarki (2005), ce type d'aménagements a eu un impact assez faible dans le domaine de la mise en valeur hydro-agricole et l'aménagement. Cependant, on peut penser que les retenues collinaires apportent un revenu ou un complément de revenu pour les familles paysannes.

L'érosion et les transports solides sont les problèmes qui se posent à l'amont de ces ouvrages alors qu'à l'aval, se pose le problème de la gestion des aires d'irrigation.

Pour allonger la durée de vie des retenues collinaires, trois opérations sont indispensables: une conception optimale (dimensionnement de la digue et des ouvrages annexes), un entretien des ouvrages hydrauliques et la protection des bassins amont.

Selon Benlaoukli et al. (2004), les organismes algériens ont acquis après des échecs, une expérience dans le domaine des retenues collinaires. Une méthodologie de réalisation des études a été élaborée par les ingénieurs de l'A.N.R.H. en collaboration avec les organismes du Maroc et de la Tunisie (Guide maghrébin, 1986). On pouvait en 2004 concevoir un ouvrage pour 1200 000 D.A. en respectant des délais serrés (moins de 6 mois). 80 % des retenues sont fonctionnelles et les échecs sont maintenant plus liés aux facteurs anthropiques qu'aux erreurs de calculs dans les études.

Les retenues collinaires subissent une forte sédimentation et un nombre important de retenues collinaires a été déclassé.

3. LES TRANSFERTS HYDRAULIQUES

3.1. Les transferts intra –bassin

Les transferts intra-bassins concernent principalement (fig.158):

- le couloir AEP du barrage de Hammam Debagh vers les centres de la vallée de Guelma jusqu'à Bouchegouf.
- le transfert à partir de Guelaat Bou Sbaa dans la Moyenne Seybouse vers Ain Berda dans la Basse Seybouse.
- les transferts d'Ain Arko jusqu'à Oued zenati

3.1.1. Du barrage de Hammam Debagh vers la vallée de Guelma

Le barrage de Hammam Debagh constitue la principale ressource en eau dans la zone du bassin de l'oued Bouhamdane et la Moyenne Seybouse (vallée de Guelma).

Le barrage alimente principalement un couloir vers l'Est constitué par les agglomérations situées dans la vallée de Guelma : Hammam Debagh (18,29 l/s), Medjez Ammar (4,14 l/s), Ben Djarah (5,04 l/s). La conduite débite par la suite 300 l/s pour alimenter Guelma et la zone à l'aval (Oued Maiz).

En plus des eaux superficielles, les forages de Hammam Bradaa avec un débit de 40 l/s alimentent le centre d'Héliopolis, et la ville de Guelma; ceux de la commune de Belkheir alimentent les centres de Djeballah Khemisti et Bouchegouf (20,8 l/s).

3.1.2. Les adductions vers les centres du versant nord de la vallée de Guelma et vers l'extérieur du bassin

Dans les communes du versant Nord de la vallée de Guelma, deux systèmes d'alimentation en eau existent:

- le barrage de Hammam Debagh alimente la localité de Roknia, située hors-Seybouse, avec un débit de 9,77 l/s;

- les forages d'Ouled Ali alimentent le centre d'El Fedjoudj (11,23 l/s) et une seconde conduite alimente le centre Bouati Mahmoud situé hors-Seybouse (8,69 l/s). Une seconde batterie de forages alimente à partir de Hammam Bradaa et Heliopolis, vers le nord, les centres de Guelaat Bou Sbaa (55 l/s) et Nechmeya (30 l/s). Un champ captant à Guelaat Bou Sbaa alimente le centre d'Ain Berda (70 l/s). Dans les communes du versant sud de la vallée de Guelma, le centre de Khezzara reçoit les eaux du forage de Khezzara (14 l/s).

3.1.3. D'Ain Arko vers l'agglomération d'Oued Zenati

Le champ captant de Ain Arko , dans les Hautes Plaines alimente à la fois les centres de Ain Arko (5,55 l/s), Tamlouka (7,93 l/s) et une adduction d'une quinzaine de kilomètres alimente le centre de Oued Zenati (débit de 9,61 l/s).

Le centre d'Ain Makhoulf reçoit un débit de 23 l/s à partir du forage F12 de Ain Trab. Les autres centres situés dans le Haut Cherf sont alimentés à partir des eaux souterraines, Bir Bouhouche (35 l/s), Oum Ladheim par la source d'Ain Snob et des forages, et Terraguel (34 l/s).

Les transferts intra-bassins concernent des volumes d'eau, qui, loin d'être négligeables, assurent les besoins des populations rurales dans des zones où l'accès à l'eau est très difficile.

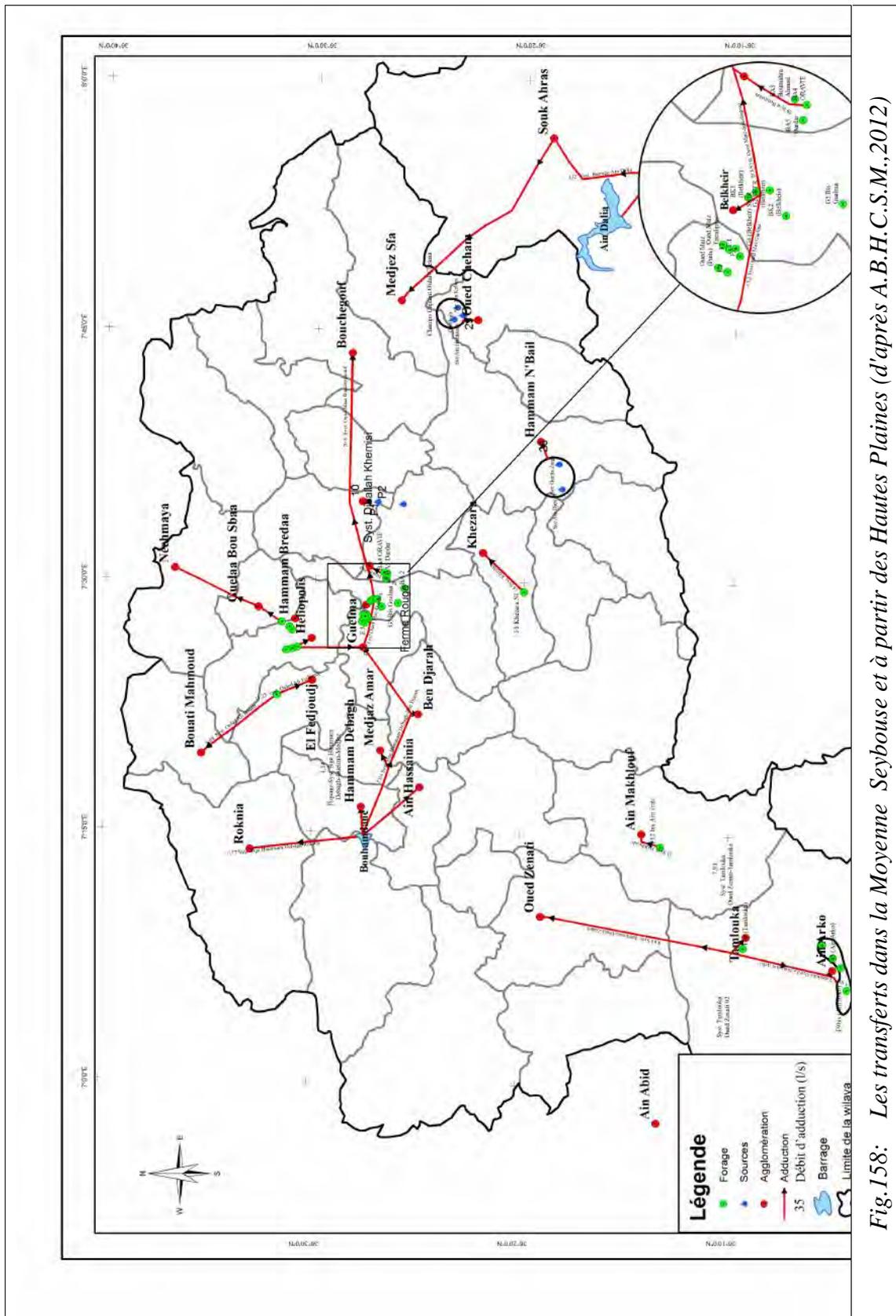


Fig.158: Les transferts dans la Moyenne Seybouse et à partir des Hautes Plaines (d'après A.B.H.C.S.M.,2012)

Fig.158: Les transferts dans la Moyenne Seybouse et à partir des Hautes Plaines

3.2. Les transferts inter-bassins

Les transferts d'eau des bassins limitrophes vers le bassin de la Seybouse mettent en jeu des volumes d'eau nettement plus importants.

L'Algérie a opté pour les transferts d'eau à l'instar de beaucoup de pays dans le monde car les zones fortes consommatrices d'eau ne sont pas nécessairement productrices d'abondantes ressources en eau.

Les schémas de transfert des eaux vers le bassin de la Seybouse sont complexes, ils sont représentés dans les figures 158 à 162.

Deux transferts d'eau sollicitent les bassins limitrophes à la Seybouse.

3.2.1. Transferts à partir des ouvrages des Côtiers Constantinois

Le premier transfert vers le bassin de la Seybouse a été réalisé au lendemain de l'indépendance à partir du barrage de la Cheffia sur l'oued Bounamoussa qui alimente la sidérurgie d'El Hadjar, le périmètre de la Bounamoussa et la ville d'Annaba. Ce système était soutenu également par les forages de Bouteldja débitant 400 l/s à partir de 31 forages, le volume annuel étant de 11,56 hm³.

3.2.1.1. Transfert du barrage de Cheffia vers Chaiba (Annaba)

Il concerne un volume très important (1388,88 l/s, soit 43,8 hm³). L'agglomération d'Annaba est alimentée avec un débit de 654,81 l/s (20,6 hm³). Actuellement, le schéma du transfert est complexe (fig. 159).

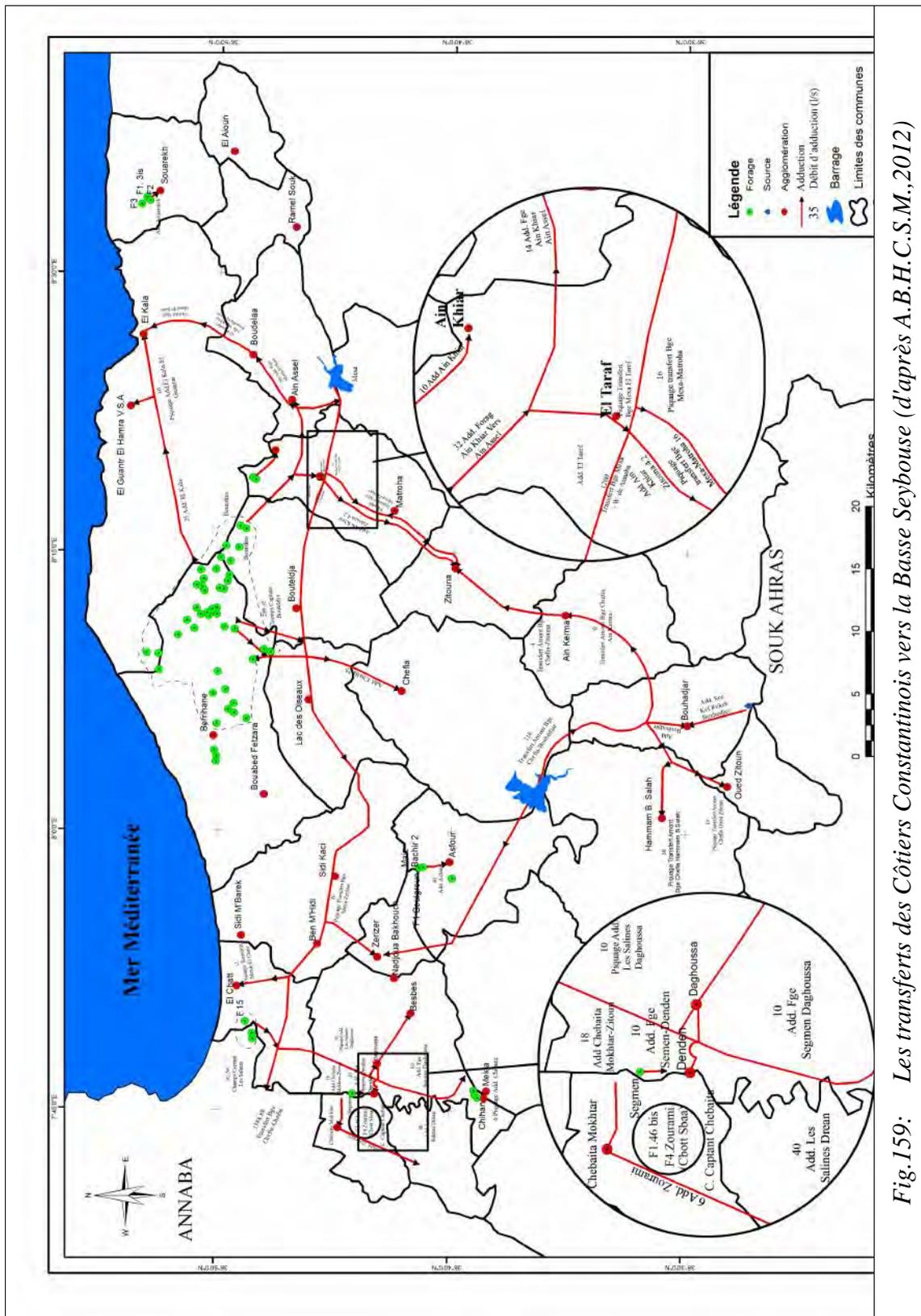


Fig.159: Les transferts des Côtiers Constantinois vers la Basse Seybouse (d'après A.B.H.C.S.M., 2012)

Fig.159: Les transferts des Côtiers Constantinois Est vers la Basse Seybouse

Les besoins en eau potable au niveau de la Basse Seybouse (14 06) qui sont les plus importants sont assurés conjointement par le barrage de la Cheffia, et les forages dans la nappe des Salines et surtout les massifs dunaires de Bouteldja (400 l/s).

Le barrage de Mexa (capacité 60 hm³) contribue également dans ce système. Pour l'année 2010-2011, 53 hm³ ont été affectés vers les secteurs de l'A.E.P. et l'industrie et 16,29 hm³ vers le secteur de l'agriculture.

Le périmètre de la Bounamoussa d'une surface équipée de 16500 ha dont 14800 ha irrigables est situé sur les terres des communes de Ben M'hidi et Drean; il a été mis en eau en 1977 et est alimenté à partir du barrage de la Cheffia. La technique d'irrigation pratiquée est l'aspersion.

Les volumes d'eau alloués à partir du barrage de Cheffia varient d'une façon assez importante et les surfaces irriguées connaissent également des variations importantes.

L'année 2002 a été une année particulière, les eaux du barrage de Cheffia n'ont pas été distribuées au périmètre. Les principales cultures sont l'arboriculture (30 %), les fourrages, les maraîchages (18 %), les cultures industrielles (49 %).

Les besoins en eau potable les plus importants sont localisés dans la Basse Seybouse et la Moyenne Seybouse. Dans la Basse Seybouse, les besoins en eau potable se concentrent essentiellement dans les agglomérations de Annaba, chef-lieu de wilaya, El Bouni, Sidi Amar et El Hadjar. Ces besoins sont assurés conjointement par le barrage de la Cheffia et les forages dans la nappe des Salines et surtout les massifs dunaires de Bouteldja (dans le bassin côtier 03 17).

Le sous-bassin de la Basse Seybouse accapare la part la plus importante des eaux industrielles avec un volume quotidien de 66900m³/j (24,41 hm³/an), ce qui représente 84 % de l'ensemble des besoins. Les activités industrielles sont implantées dans les communes d'El Hadjar, El Bouni et Annaba (wilaya de Annaba) et EcChatt, Chbaita, Dréan et Besbes pour la wilaya d'Et Tarf.

3.2.1.2. Transferts à partir des ouvrages des Côtiers Constantinois- Centre

Les volumes transférés proviennent du champ captant Boumaiza vers El Eulma –Cheurfâ , 49 l/s sont destinés à Oued Ennil via Berrahal. Une adduction partant de Boumaiza dessert Berrahal et l'agglomération côtière de Chetaibi.

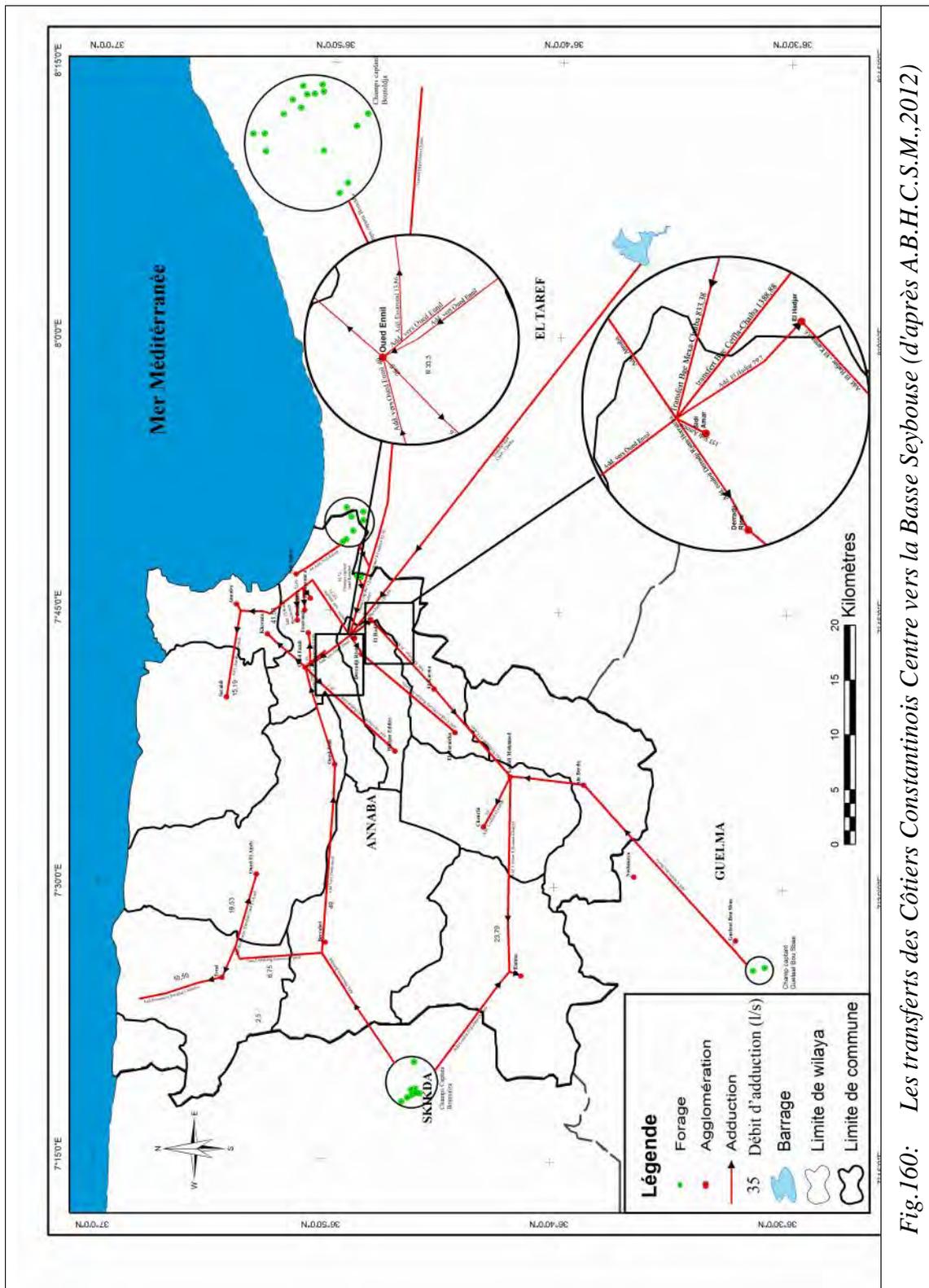


Fig.160: Les transferts des Côtiers Constantinois Centre vers la Basse Seybouse (d'après A.B.H.C.S.M.,2012)

Fig.160: Les transferts des Côtiers Constantinois Centre vers la Basse Seybouse

3.2.2. Le couloir Ain Délia-Foum El Khanga vers les Hautes Plaines

Le second transfert et le plus récent concerne le barrage de Ain Délia sur l'oued Medjerdah pour l'A.E.P. des centres urbains dans le bassin de l'Oued Cherf et pour les centres de Ain Beida et Oum el Bouagui (fig.161).

A partir du barrage de Ain Délia, deux conduites principales, l'une de 432 l/s vers Souk Ahras qui est alimenté avec un débit de 306 l/s. Une conduite dirigée vers le Nord alimente les agglomérations d'Ain Seynour (6 l/s), Mechroha (16 l/s) et Mdjez Sfa (3 l/s).

La seconde conduite importante à partir du barrage d'Ain Délia, est orientée vers le Sud-Est. Elle se partage en deux adductions principales, l'une vers la wilaya de Tebessa et la seconde vers la wilaya d'Oum El Bouagui en traversant le bassin de l'oued Cherf amont et desservant par la même occasion l'agglomération de Sedrata (52 l/s).

Les centres de Mechroha, Oued Cheham et Mdjez Sfa, dans le sous-bassin de l'oued Mellah sont alimentés à partir du barrage d'Ain Délia situé dans le bassin de l'oued Medjerdah.

Le barrage d'Ain Délia dans le bassin de la Medjerdah est sollicité pour alimenter plusieurs centres situés dans le bassin du Haut Cherf. Le centre de Sedrata reçoit un débit de 52 l/s.

L'alimentation est réalisée par des piquages dans la conduite principale qui est destinée à la wilaya d'Oum El Bouaghi.

3.2.3. Zone du Bassin de l'oued Mellah

Les sources d'Ain Djernel et Guelta Zerga (26 l/s) alimentent le centre de Hammam N'bails. Le système de captage Oued Cheham et les sources de Ain Hamma , Ourelegh et Ain Kebira débitent 25 l/s pour le centre de Oued Cheham.

Le centre de Mdjez Sfa est alimenté par un transfert à partir du barrage de Ain Délia dans le bassin de la Medjerdah .



Fig 162 : Les transferts hydrauliques vers le bassin de la Seybouse

CONCLUSION DU CHAPITRE 6

La mobilisation des eaux d'écoulement superficiel dans le bassin-versant de la Seybouse s'est traduite par la construction et l'exploitation de deux grands barrages et la mise en œuvre très proche de deux autres ouvrages d'une capacité non négligeable. Le barrage de Hammam Debagh est fortement sollicité alors que celui de Foum El Khanga l'est moins. Mais avec la mise en œuvre de l'irrigation dans les Hautes Plaines (plaines de Tamlouka, de Ksar Sbahi et de Sedrata), les eaux du barrage de Foum El Khanga vont être intensément exploitées,

A titre complémentaire, les petits barrages (Mdjez El Bgar, Tiffech, Sedrata et El Heria) et les retenues collinaires contribuent à la mobilisation des eaux de surface dans le bassin de la Seybouse.

Les ressources en eau non conventionnelles sont appelées également à être fortement développées. La station d'épuration à l'aval de Guelma recycle déjà les eaux usées avec une capacité de 200 000 éq/hab/jour. Une station de dessalement de l'eau de mer est prévue à Et Tarf, pour alimenter partiellement les industries de l'agglomération d'Annaba.

Les besoins actuels en eau potable et industrielle sont fortement concentrés :

- dans la Basse Seybouse: AEP de Annaba et des centres urbains dans les plaines de Annaba, industries de El Hadjar et zone industrielle de Pont Bouchet, périmètre irrigué de la Bou Namoussa,
- dans la Moyenne Seybouse: la vallée de Guelma est le deuxième utilisateur des eaux,
- dans les Hautes Plaines: les centres urbains (Sedrata) et le développement des surfaces irriguées.

Le niveau actuel des besoins en eau et son accroissement dans le futur, exige une interconnexion des barrages existants et futurs. Aussi, pour le développement des surfaces irriguées, faut-il explorer les possibilités offertes par les retenues collinaires qui présentent l'avantage d'être réalisables par les moyens des communes.

Avec l'exemple du bassin de la Seybouse et de ses abords, il apparaît clairement que la technique des transferts d'eau et la mise en connexion des barrages est bien engagée. Le transfert le plus ancien est celui effectué à partir du barrage de la Cheffia vers la zone d'Annaba et celui plus récent, prélevé à partir de l'oued Medjerdah (barrage de Ain Délia) et alimentant à la fois la zone des Hautes Plaines semi-arides (Haut Cherf, Oum El Bouagui et Ain Beida) et vers les agglomérations du sous- bassin de l'oued Mellah.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Le bassin de l'oued Seybouse, qui couvre une superficie de 6745 km², englobe trois grands domaines physiques et bioclimatiques : le domaine des Hautes Plaines au Sud (bassin de l'oued Cherf amont), le domaine sud-Tellien (bassins de l'oued Cherf aval, de l'oued bouhamdane, la moyenne seybouse et celui de l'oued Mellah) et enfin, les domaines Tellien du Nord et maritime (Seybouse maritime : bassin de l'oued Ressoul, oued Derdar et la zone des plaines littorales).

Ces grands ensembles physiques présentent des caractéristiques topographiques qui les différencient nettement. Deux zones montagneuses constituent les principales zones d'alimentation en eau du bassin-versant de la Seybouse : les Monts de la Medjerdah, et la zone montagneuse constituée par le djebel Sidi Reghiss et la chaîne des Sellaoua.

Les valeurs de l'indice de compacité montrent que les bassins des oueds, Bouhamdane ($K_c=1.18$) et Ressoul ($K_c = 1.24$) sont les plus compacts, alors que la forme de bassin allongé correspond à celui de l'oued Mellah à Bouchegouf ($K_c = 1.43$), l'oued Sabath ($K_c = 1.34$) et l'oued Cherf amont ($K_c = 1.29$). La dénivellation spécifique permet de classer les bassins dans les classes R5 (Relief assez fort) et R6 (Relief fort). Le coefficient de torrentialité le plus développé correspond au bassin de l'oued Mellah. Le temps de concentration est compris entre 5 heures (bassin de l'oued Ressoul) et moins de 24 heures (bassin de l'oued Cherf amont).

Les principales zones lithologiques et hydrogéologiques identifiées et exploitées dans le domaine des Hautes Plaines sont les nappes du Haut Cherf et celle du bassin de Tamlouka.

Dans la Moyenne Seybouse, de petites nappes de versants ont été identifiées mais leur alimentation est limitée. Le long de la vallée de l'oued Seybouse dans la Moyenne Seybouse (vallée de Guelma), une nappe alluviale est exploitée.

Dans la Basse Seybouse, deux aquifères localisés dans les alluvions plio-quaternaires et dans le massif dunaire ont été identifiés depuis longtemps.

La répartition du couvert végétal et les densités de couverture à travers le bassin de l'oued Seybouse avec prédominance des surfaces offrant une couverture faible à moyenne ont pour conséquences hydrologiques la faible résistance à l'érosion sur les versants à l'exemple du bassin de l'oued Mellah d'une part, et d'autre part la faible rétention souterraine.

Mais certains sous-bassins sont relativement bien protégés comme celui de l'oued Bouhamdane. Dans ce bassin, les zones avec un couvert végétal naturel (chêne liège, maquis, reboisement) couvrent 31.7% de la surface du bassin dont 19.5% sont exploités comme terrains de parcours. La région connaît une forte activité agricole,

essentiellement la céréaliculture qui occupe 58.1% de la surface du bassin et l'olivier autour de 1%.

La résultante de ces caractéristiques physiques et morphométriques qui constituent les facteurs non variables qui se combineront et se conjugueront avec les facteurs variables des bassins (pluviométrie) aura des effets sur les écoulements annuels, les crues et les transports solides de ces bassins.

Les écoulements liquides ont fait l'objet d'une étude détaillée dans ce chapitre. Après le comblement des lacunes des séries d'observation de débits, ont été analysés les bilans hydrologiques annuels, les profils apports-surfaces, la variabilité spatio-temporelle de l'écoulement aux différents pas de temps. Les débits de crues ont été étudiés à l'échelle des bassins jaugés en mettant l'accent sur la relation entre les débits fréquentiels et la surface des bassins. L'étude de cas a concerné le bassin de l'oued Bouhamdane avec la cartographie des pluies journalières maximales (F0.9 et F0.95) et la modélisation des Q_{max} décennaux grâce aux modèles mis au point par l'A.N.R.H.

- **Les débits absolus** : Les débits moyens annuels absolus sont fortement corrélés avec la surface des bassins jaugés. Seul, le bassin de l'oued Cherf amont ne correspond pas au schéma valable pour les bassins telliens.

Les calculs montrent l'indigence des écoulements dans les deux bassins telliens de surfaces modestes, le bassin de l'oued Sabath à la station de Bordj Sabath et le bassin de l'oued Ressoul à la station d'Ain Berda, à cause également de l'absence de soutien des écoulements superficiels par les eaux souterraines (forte récurrence des débits nuls durant la période de juin à octobre).

-**L'organisation spatiale de la lame écoulée, du déficit d'écoulement et du coefficient d'écoulement est latitudinale.** On a noté la faiblesse de l'écoulement annuel dans le domaine des Hautes Plaines à cause de la faiblesse des précipitations et l'importance de la perméabilité. Les bassins de l'oued Bouhamdane et celui de la Seybouse à Mirbeck qui intègrent des milieux physiques différenciés, partant des Hautes Plaines aux zones telliennes, ont un écoulement inférieur à 100 mm. Par contre, dans les bassins sud-telliens, la lame écoulée est importante; le bassin de l'oued Mellah est le plus productif avec une lame écoulée de 196 mm pour une lame précipitée moyenne de 741 mm ; les bassins des oueds Sabath et oued Ressoul, de surface modeste ont un écoulement respectivement de 108 et 120 mm.

L'importance respective des différentes zones contributives aux écoulements (Hautes Plaines, Tell, et plaines littorales), leurs caractéristiques et leur configuration introduisent des différences notables dans l'organisation amont-aval des écoulements, fidèlement représentés par les profils apports- surfaces des bassins.

Le profil apports-surfaces du bassin de la Seybouse est globalement similaire à ceux des bassins à écoulement exoréique dans l'Est algérien (Kebir-Rhumel, Soummam) mais avec des nuances de détail liés aux apports des affluents (Mebarki , 2005) .

- **La très grande variabilité temporelle des débits annuels.** Sur la période septembre 1971 à août 1988, les paramètres hydrologiques aussi bien annuels que

mensuels et journaliers ont connu une très grande variabilité, à mettre en relation directe avec la variabilité des précipitations. Les moyennes interannuelles sont très fortement influencées par les valeurs extrêmes de la période étudiée. Les années 1972/73 et 1984/85 sont pour l'ensemble des bassins des années hyper-humides à cause des crues enregistrées. Les coefficients de variation qui expriment la variabilité relative sont très forts pour les oueds Cherf amont (134 %) et l'oued Sabath (138%), leurs valeurs sont relativement fortes pour tous les bassins (de 85 à 100 %) mis à part le bassin de l'oued Mellah (66%).

Les valeurs maximales de lames écoulées E_c (mm) ne correspondent pas aux mêmes années pour toutes les stations. Elles sont liées à l'importance des crues dans l'année et aux valeurs atteintes par les débits maximaux (exemples : oued Sabath : 1984/1985; oued Cherf amont: oued Mellah et oued Seybouse à Mirbeck : 1972/1973; oued Ressoul: 1986/1987).

L'ajustement des débits moyens annuels permettant d'estimer les débits fréquentiels a été réalisée grâce à l'application de la loi log-normale. Les rapports des débits fréquentiels de fréquence centennale à ceux de fréquence décennale ($F_{0.99}/F_{0.9}$) présentent des valeurs proches pour les bassins telliens des oueds Bouhamdane, Mellah et Seybouse à Mirbeck alors que ces rapports sont assez forts pour les bassins des oueds Cherf, Sabath et Ressoul.

- **La cartographie des écoulements annuels** a été réalisée grâce à la méthode appliquée par Mebarki en procédant à l'utilisation de grilles d'information climatologique dans la cartographie du déficit hydrique de l'Est algérien et généralisée à l'Algérie du Nord, de même que l'application de la méthode du modèle à réservoirs Loieau qui a permis à l'A.N.R.H.(2003) de simuler, à l'échelle mensuelle, les apports des oueds des bassins algériens.

La cartographie de l'écoulement moyen annuel basée sur le modèle bilan tenant compte du déficit d'écoulement de Turc a permis de mettre en lumière l'organisation spatiale des courbes d'iso-écoulement :

- les lames écoulées annuelles oscillent entre 5 mm au Sud et 200 mm dans le bassin de l'oued Mellah (zone montagneuse des monts de la Medjerda);
- la courbe de 200 mm est légèrement représentée dans la zone amont du bassin de l'oued Mellah;
- la courbe de 100 mm couvre une bonne partie du bassin de l'oued Mellah amont et aval, la zone limitrophe avec le djebel Edough, les limites avec les bassins côtiers Constantinois, ainsi que la zone de la Mahouna, dans la Moyenne Seybouse;
- enfin, dans la zone Sud du bassin, les zones d'iso-écoulement sont organisées en bandes sensiblement latitudinales au-dessous de la courbe d'iso-écoulement 50 mm, et comprenant les courbes 20, 10 et 5 mm.

La carte extraite de la carte de l'écoulement annuel de l'Algérie du Nord, réalisée grâce au modèle Loieau présente les valeurs suivantes :

- la courbe d'iso-écoulement 200 mm est localisée dans les zones les plus élevées du bassin de l'oued Mellah et une petite zone limitrophe avec le djebel Edough;

-la courbe 100mm couvre une bonne partie du bassin de l'oued Mellah amont et aval, la zone qui forme la limite avec les bassins côtiers Constantinois, la zone de la Mahouna dans la Moyenne Seybouse et les monts de la Medjerdah;

-les iso-courbes entre 50 et 100 mm couvrent la Moyenne Seybouse et les 2/3 du bassin de l'oued Bouhamdane.

-pour les Hautes Plaines, les valeurs des courbes oscillent entre 50 mm, à moins de 20 mm (bassin de l'oued Cherf amont).

A l'échelle globale du bassin de la Seybouse, la lame écoulée estimée avec la simulation LOIEAU est de 75,0 mm alors que la lame observée est 62,8 mm.

- **Deux types de régimes mensuels** apparaissent à travers les coefficients mensuels de débits. Pour les stations des Hautes Plaines à l'exemple de la station de Moulin Rochefort, le régime se caractérise par une période de hautes eaux qui se limite à 4 mois (janvier, février, mars et avril), les 8 mois restant constituant la période des basses eaux, avec des valeurs des CMD atteignant 5 pour le mois de février.

. Pour les stations telliennes, la période des hautes eaux s'étale sur 5 mois (de décembre à avril) avec les valeurs des CMD inférieures à 3,5 (valeur atteinte par l'oued Sabath au mois de décembre).

- **Les débits de crues** (Q maximaux annuels aussi bien moyens journaliers qu'instantanés) ont été analysés et ont fait l'objet d'une étude fréquentielle à l'aide de la loi log-normale. Ces débits extrêmes ont été observés pour l'ensemble des bassins au cours des années hydrologiques 1972/73, 1983/84 et 1984/85.

Il a été montré que les valeurs de débits de crues, débits moyens journaliers maximaux et débits instantanés des différentes fréquences calculées sont étroitement corrélées avec la surface des bassins jaugés, mis à part le bassin de l'oued Cherf situé en Hautes Plaines. Les pluies journalières décennales du bassin de la Seybouse ont une structure spatiale latitudinale, diminuant vers le Sud et sont donc dépendantes de la distance à la mer, mais aussi de la longitude et de l'altitude lissée des postes (A.N.R.H., 2008).

Lorsqu'on exprime les écoulements de crue en lames écoulées moyennes journalières, ce sont les deux bassins de taille modeste, le bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda (103 km²) et le bassin de l'oued Sabath à Bordj Sabath (260 km²), qui présentent les plus fortes valeurs de lames écoulées de crue.

Les valeurs des débits fréquentiels (loi log-normale) calculées pour les sous-bassins de l'oued Seybouse semblent, hormis l'oued Cherf, surestimées par rapport aux résultats obtenus sur les bassins d'autres régions d'Algérie dans le cadre de l'étude de l'A.N.R.H. (2008). Ces différences s'expliquent par la méthode utilisée dans l'étude des crues de l'A.N.R.H., basée sur l'ajustement des trois débits les plus forts par année (Méthode Sup-Seuil) et par les différences des périodes étudiées.

Les pluies journalières maximales et les débits de crues ont été analysés avec plus de détails au niveau du bassin de l'oued Bouhamdane, avec mise en évidence de la statistique et la cartographie des Pj max (pluies journalières maximales annuelles). Les valeurs de gradex ainsi cartographiées présentent une structure spatiale Nord-Ouest à Sud-Est. Les valeurs de pluies journalières de fréquences décennale et

vingtennale diminuent du Nord vers le Sud. Pour les postes utilisés, elles diminuent de 100 mm à la station de Bou Snib à 75 mm pour Bordj Sabath. Les valeurs diminuent pour les stations des Hautes Plaines.

Les pluies maximales journalières de fréquence décennale et vingtennale sont très importantes pour les postes du versant nord tellien (Bou Snib, Bouati Mahmoud). Dans la zone des Hautes Plaines, les pluies maximales décennales sont certes moins importantes que celles calculées pour la zone tellienne, mais elles produisent des écoulements de crues non négligeables.

La modélisation des débits de crues sur le bassin de l'oued Bouhamdane a été réalisée par la formule mise au point par l'A.N.R.H., concernant la prédétermination des débits de crue pour une période de retour donnée. Ce modèle exprime la relation mathématique entre les quantiles de crue et les paramètres explicatifs les plus pertinents (surface, pente, pluie journalière décennale, gradex des pluies journalières). Le débit moyen journalier maximal est estimé à 107 m³/s alors que le débit de pointe est de 218 m³/s.

Les écoulements dans le bassin de la Seybouse sont fortement influencés par les aménagements hydrauliques : les grands barrages, les petits barrages, et les retenues collinaires qui régularisent des volumes d'eau importants. L'influence anthropique sur les écoulements va encore s'accroître avec la construction de deux nouveaux grands barrages (Koudiat Haricha dans la Haute Seybouse, et Koudiat Mahcha dans la Basse Seybouse).

La mobilisation des eaux d'écoulement superficiel dans le bassin-versant de la Seybouse s'est traduite par la construction et l'exploitation de deux grands barrages et la mise en œuvre très proche de deux autres ouvrages d'une capacité non négligeable. Le barrage de Hammam Debagh est fortement sollicité alors que celui de Foug El Khanga l'est moins. Mais avec la mise en œuvre de l'irrigation dans les Hautes Plaines (plaines de Tamlouka, de Ksar Sbahi et de Sedrata), les eaux du barrage de Foug El Khanga vont être intensément exploitées,

A titre complémentaire, les petits barrages (Mdjez El Bgar, Tiffech, Sedrata et El Heria) et les retenues collinaires contribuent à la mobilisation des eaux de surface dans le bassin de la Seybouse.

Les ressources en eau non conventionnelles sont appelées également à être fortement développées. La station d'épuration à l'aval de Guélma recycle déjà les eaux usées avec une capacité de 200 000 éq/hab/jour. Une station de dessalement de l'eau de mer est prévue à Et Tarf, pour alimenter partiellement les industries de l'agglomération d'Annaba.

Les besoins actuels en eau potable et industrielle sont fortement concentrés :

- dans la Basse Seybouse: AEP de Annaba et des centres urbains dans les plaines de Annaba, industries de El Hadjar et zone industrielle de Pont Bouchet, périmètre irrigué de la Bou Namoussa,

- dans la Moyenne Seybouse: la vallée de Guelma est le deuxième utilisateur des eaux,
- dans les Hautes Plaines: les centres urbains (Sedrata) et le développement des surfaces irriguées.

Le niveau actuel des besoins en eau et son accroissement dans le futur, exige une interconnexion des barrages existants et futurs. Aussi, pour le développement des surfaces irriguées, faut-il explorer les possibilités offertes par les retenues collinaires qui présentent l'avantage d'être réalisables par les moyens des communes.

Avec l'exemple du bassin de la Seybouse et de ses abords, il apparaît clairement que la technique des transferts d'eau et la mise en connexion des barrages est bien engagée. Le transfert le plus ancien est celui effectué à partir du barrage de la Cheffia vers la zone d'Annaba et celui plus récent, prélevé à partir de l'oued Medjerdah (barrage de Ain Délia) et alimentant à la fois la zone des Hautes Plaines semi-arides (Haut Cherf, Oum El Bouagui et Ain Beida) et vers les agglomérations du sous bassin de l'oued Mellah.

TROISIEME PARTIE

APPORTS SOLIDES DE L'OUED SEYBOUSE ET LEURS RELATIONS AVEC LES ECOULEMENTS

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE

Le transport solide des oueds constitue un problème majeur dans les pays du Maghreb en raison de son impact sur l'envasement accéléré des barrages (principale ressource en eau avec les nappes souterraines), conduisant à une perte du volume utile des retenues et à une réduction de leur durée d'exploitation. Cette problématique est complexe à la fois dans l'espace et dans le temps, car elle combine des facteurs multiples : extrinsèques (précipitation, température, variation du niveau de base) et intrinsèques au bassin versant (relief, nature et occupation du sol, aménagements...) (Meybeck *et al.* 2003, Laignel *et al.* 2006), impliquant également les activités humaines.

Avec la constitution progressive par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.) d'une banque de données de mesures hydrologiques, les études sur les transports solides des oueds algériens et l'envasement des barrages se sont multipliées au cours de ces trois dernières décennies (Demmak 1982, Kassoul 1999, Terfous *et al.* 2001, Benkhaled et Remini 2003, Achite et Meddi 2004, Achite et Meddi 2005, Bouanani 2005, Khanchoul 2006, Achite et Ouillon 2007, Megnounif *et al.* 2007, Ghenim *et al.* 2007, Remini *et al.* 2009, Touaibia 2010). A l'échelle du Maghreb, nous retenons les travaux de Heusch et Milliès-Lacroix (1971), de SOGREAH (1983) et de Probst et Amiotte-Suchet (1992).

Grâce à ces bases d'informations, on procédera à une analyse des apports solides aux stations hydrométriques, réparties de l'amont à l'aval du bassin de la Seybouse, et ayant fonctionné sur la période commune de Septembre 1971 à Août 1988.

Par ailleurs, une étude détaillée des transports solides du bassin de l'oued Bouhamdane est réalisée à la station de Medjez Ammar II (Septembre 1971 - août 1987) et au barrage de Hammam Debagh (Septembre 1995 - août 2010). L'objet en sera l'analyse de la variabilité interannuelle et intra-annuelle des apports solides et également l'étude de l'impact de ces apports solides sur le barrage (envasement).

Chapitre 7. Les transports solides en suspension et leur variabilité spatio-temporelle à l'échelle du bassin de l'oued Seybouse

INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude régionale et comparative des transports solides en suspension à l'échelle du bassin de l'oued Seybouse en exploitant les données de mesures disponibles dans quatre (4) stations hydrométriques:

L'étude a été réalisée par le biais de régressions débits liquides-débits solides à l'échelle saisonnière sur des périodes qui varient d'une station à l'autre.

1. PROBLEMATIQUE ET METHODES D'ETUDE DES TRANSPORTS SOLIDES DES COURS D'EAU

1.1 Etat de l'art : études sur la turbidité réalisées en Algérie

Les transports solides des cours d'eau constituent l'un des thèmes d'étude les plus ardues en hydrologie. L'intérêt pour l'étude des transports solides se manifeste à cause de leurs répercussions sur les infrastructures économiques : envasement des retenues de barrages, des ports, rehaussement des lits des oueds, colmatage des réseaux d'irrigation. Dans les différentes études, des chiffres alarmants concernant à la fois la perte en terres exprimées en tonnes ou en hauteur de sols perdus (cm) sont cités.

En Algérie, certains barrages (Cheurfas I, Beni Amrane, Zardézas, Ksob, Foum El Gueiss, Foum El Gherza) sont connus pour leur envasement relativement rapide. Ainsi, selon Remini et Avenard (1999), la quantité de sédiments déposée dans les 107 barrages algériens était évaluée à 560.10^6 m^3 en 1995 ce qui correspond à un taux de comblement de 12,5%. Selon Remini et *al.* (2005), l'Algérie disposait en 2005 d'une capacité de stockage de 5,2 milliards de m^3 et de 114 barrages en exploitation. L'envasement annuel représente 32 millions de m^3 .

Beaucoup de chercheurs et de gestionnaires craignent un envasement qui risque d'être rapide pour les barrages construits à la faveur de la politique hydraulique mise en application à partir de 1977 et mis en eau dans les années 1980 et 1990 (Foum El Khanga sur l'oued Cherf amont, Hammam Debagh sur l'oued Bouhamdane, Medjez Bgar à proximité de Oued Zenati, barrages de Tiffrech et de Sedrata).

Pour les universitaires algériens, il y a intérêt à étudier les régimes des écoulements solides et à tester les outils de recherche utilisés dans le monde. Il est intéressant d'étudier le phénomène de l'amont à l'aval aussi bien sur le plan spatial que sur le plan des facteurs en lien avec le déroulement du phénomène.

En exploitant les données de mesure, il est possible de tenter une approche quantitative des transports solides et de chercher des corrélations avec les facteurs en lien avec sa genèse et ses variations, les pluies à forte intensité, les crues et l'importance des débits écoulés, le rôle prépondérant du milieu physique.

On abordera pour cette étude des transports solides des cours d'eau, les difficultés existant sur le plan méthodologique, elles sont liées à la nature du phénomène et à la méthode de mesure.

Après un bref aperçu bibliographique, on tentera une application numérique exploitant les données de mesures des stations hydrométriques en fonction ou ayant fonctionné dans le bassin de la Seybouse.

En Algérie, les données de mesure de débits et de transports solides en suspension sont disponibles à partir des années 1968-1970 grâce au réseau installé par l'A.N.R.H. D'après Demmak (1982), de nombreux auteurs se sont intéressés depuis longtemps aux transports solides et aux problèmes d'envasement des barrages (Medinger 1960, Tixeront 1960, Sogreah 1967).

L'étude de synthèse réalisée par la Sogreah (1983) regroupe les évaluations faites par Listicri, Heusch et Demmak.

Cependant, la première étude universitaire d'envergure est celle de Demmak (1982).

Exploitant les données de mesures de concentration de la période 1972/1973 à 1978/1979, l'auteur établit les courbes de régression saisonnières débits liquides –débits solides et calcule les différents paramètres caractérisant les transports de sédiments.

1. 2. Aspects méthodologiques

Il est indispensable de bien situer les difficultés liées à ce type de recherche afin de cerner aussi bien les approches possibles, celles applicables en fonction des données disponibles en Algérie, et la fiabilité à accorder aux résultats.

Les transports solides des cours d'eau intègrent trois types :

- les transports en solution;
- les transports en suspension : ce sont les éléments fins qui sont maintenus en suspension;
- les transports de fond ou transports par charriage;

Les auteurs, Tricart (1965 et 1978), Frécaut (1980), Bravard (1997), Touaibia (2004), distinguent pour les différents types de transports, en plus de la granulométrie, le processus de migration, la fréquence des transports et les distances parcourues.

Si les ions sont transportés en solution, d'une façon permanente, sur la totalité des cours d'eau, les transports en suspension le sont sur quelques kilomètres avec une fréquence saisonnière liée aux crues. Par contre, les sables grossiers et les galets transportés par traction sur le fonds, saltation et charriage en masse ne sont transportés

que sur quelques hectomètres au maximum, le plus souvent quelques décimètres ou quelques mètres, au cours des crues et des crues très fortes.

La granulométrie des différents types de matériaux est la suivante (Frécaut, 1980):

- matériaux grossiers de fond : dimension maximale $>0,5$ mm.
- matériaux de taille intermédiaire : entre 0,05 et 0,5 mm.
- Transports en suspension : dimension maximale $<0,062$ mm.

Ces matériaux constituent les transports de fond.

Les matériaux fins, limons et argiles, dont le diamètre maximal est inférieur à 0,062 mm (ou "phase" fine de Tricart) constituent l'essentiel des transports en suspension. Ce sont les limons grossiers de 0,031 à 0,062 mm, limons moyens de 0,016 à 0,031 mm, limons fins de 0,008 à 0,016 mm, limons très fins de 0,004 à 0,008 mm, grains argileux grossiers de 0,002 à 0,004 mm, grains argileux moyens de 0,001 à 0,002 mm et grains argileux fins de 0,00024 à 0,0001 mm.

En fonction de la puissance des forces tractrices, les sables moyens (de 0,2 à 0,5 mm de dimension maximale), les sables fins (de 0,125 à 0,2 mm) et même les sables très fins (de 0,062 à 0,125 mm) circulent tantôt en suspension, tantôt à proximité du fond.

Ce qui apporte une incertitude importante en ce qui concerne les tonnages totaux transportés effectivement en suspension.

Les difficultés liées à la quantification des transports solides des cours d'eau sont de plusieurs types dont deux peuvent être considérées comme essentielles.

- difficultés liées à la nature même du phénomène.
- difficultés liées à la représentativité des mesures.

1. 3. Problèmes liés à la nature même du phénomène

De nombreux auteurs ont mis en lumière le caractère discontinu du processus érosion- transport- sédimentation, Frécaut (1980), Tricart (1962 et 1978), Demmak (1982), et Bravard (1997). Ces idées ont été reprises par plusieurs auteurs (Williams, 1989; Benkhaled et Remini, 2003; Khanchoul, 2005) pour l'étude des phénomènes d'hystérésis qui caractérisent l'évolution temporelle des concentrations pendant les crues.

Les transports solides des cours d'eau sont soumis à une triple discontinuité spatiale et temporelle.

La discontinuité se manifeste dans l'enchaînement des processus qui vont de la mobilisation des matériaux sur les versants, à leur passage aux cours d'eau, enfin à leur transport par ces derniers. Cette discontinuité n'inclut pas les matières dissoutes, mais les matériaux grossiers ou fins.

La discontinuité se manifeste surtout dans la grande irrégularité des débits liquides qui sont le vecteur de transport des matériaux issus de l'érosion une fois arrivés à proximité des cours d'eau.

Tricart (1962, 1978) a émis plusieurs critiques concernant les mesures des transports solides, et leur signification physique. Deux de ces critiques paraissent essentielles:

- Les différents types de transports solides ne sont pas mesurés de manière équivalente. Si la turbidité et les transports en solution sont mesurés avec des fréquences qui ne sont pas assez importantes, les transports de fond sont rarement mesurés d'une façon directe.

Ceci est lié aux processus de transport des différents types de transports solides par les cours d'eau.

Les transports en solution couvrent la totalité de la section mouillée et parcourent la totalité du cours d'eau. Les transports de fonds ont une faible fréquence liée aux crues. Les transports en suspension se font sur des distances intermédiaires (quelques kilomètres) et la fréquence de leur transport est saisonnière donc irrégulière.

- La signification réelle des mesures. En effet, à partir de la mesure des matériaux transitant par une section donnée, on cherche à évaluer l'érosion moyenne du bassin drainé Or, d'une part, les produits issus de l'érosion sur le bassin-versant ne sont pas évacués d'une façon régulière et continue par le cours d'eau principal. Il y a donc des phénomènes de dépôts.

D'autre part, ces produits sont fournis le plus souvent par une zone bien délimitée du bassin.

Les mesures coïncident donc mal avec la réalité géomorphologique.

Ce que l'on considère comme une valeur moyenne (ou globale) pour le bassin n'est en réalité produit que par une partie de ce dernier. Mais il est très souvent difficile de localiser la zone du bassin qui produit les transports solides sans une étude des phénomènes d'érosion sur le terrain.

1. 4. Problèmes liés à la mesure des transports en suspension

Les mesures de turbidité s'intègrent aux techniques qui sont appliquées au niveau des stations hydrométriques. La méthode de mesure telle qu'elle est pratiquée en Algérie est simple.

Elle consiste en une prise unique d'échantillon d'eau dans une bouteille en plastique de 500 cl sur le bord de l'oued. L'échantillon d'eau sera filtré et on déterminera la concentration qui correspond à un litre.

La technique de mesure a fait l'objet de critiques sévères de la part des chercheurs algériens.

Pour Demmak, (1982), la principale difficulté est la non-uniformité des concentrations en sédiments dans la section de mesure et sa variabilité temporelle très importante. Si on procède à un prélèvement en surface du cours d'eau, la teneur de l'échantillon sera nettement inférieure à la teneur de la verticale sauf si l'écoulement est

très turbulent. La seconde source d'erreur est l'absence de tube d'échappement de l'air du flacon utilisé pour la mesure. Une bonne technique de mesure est l'utilisation d'une turbidimètre qui permettrait d'échantillonner l'oued en différents points selon les verticales de mesure et les différentes profondeurs.

Touat (1993) émet des critiques qui rejoignent celles de Demmak (1982). Un échantillon ponctuel ne reflète pas la répartition des concentrations sur toute la section mouillée. Touat propose une méthode qui permet de revaloriser les mesures anciennes de concentration.

1. 5. L'exploitation des mesures bathymétriques pour estimer les apports solides des oueds

La mesure du colmatage des réservoirs et l'exploitation des données de mesures bathymétriques sont une technique utilisée pour évaluer les transports solides des cours d'eau à l'amont de la retenue.

Elles sont parfois utilisées à cause du manque de données de mesures de la charge de fond.

Cependant, Demmak (1982) note que par la mesure du taux de remplissage des retenues, on obtient des valeurs globales de transports solides. Ces valeurs incluent les transports de fond très difficiles à mesurer. Les techniques de mesure et de dépouillement de ces mesures sont décrites (Claude et Chartier, 1977). L'estimation des transports solides en vue de la mesure de l'envasement pour les retenues de sept barrages en Tunisie a été réalisée par Ghorbel et Claude (1977).

Demmak (1982) a cité les avantages et les inconvénients de la bathymétrie. Cette méthode, intégrant les charriages de fond, mesure des quantités totalisées, et les erreurs sur un relevé sont pratiquement négligeables. Cependant, elle ne quantifie que rarement les sédiments déversés (soutirage). Une comparaison intégrant trois (3) barrages et les stations hydrométriques amont a montré des écarts importants qui varient entre -31 (Ksob), -54 % (Foum El Gherza) et -71 % (Gueiss). Les mesures aux stations sous-estiment les apports solides totaux. Ces écarts doivent être interprétés en lien avec les différences entre les techniques utilisées (charriage non pris en compte, incertitudes sur les densités, volumes soutirés ou déversés non connus).

Elles ont été critiquées car elles négligent les sédiments déversés en période de crues.

La densité des matériaux est très mal connue et elle est très difficile à mesurer en profondeur.

Remini (2005, b) note que pour 50 barrages maghrébins étudiés, le "trap efficiency" est situé dans l'intervalle 90 -98 %, ceci représente le pourcentage de sédiments piégés dans les retenues, seule une faible partie des sédiments passe à travers la digue.

Ce phénomène a deux répercussions importantes: le volume des sédiments qui se déposent dans les retenues de barrages est très important, correspondant pratiquement au

volume entrant dans les barrages; et, à partir de ce volume de vase, on peut calculer le T.S.S. des bassins de barrages.

2. LES DONNEES DISPONIBLES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES (MESURES DES CONCENTRATIONS)

Les périodes de mesures et les tailles des échantillons sont différentes pour les stations hydrométriques et sont synthétisées dans le tableau suivant (tabl.49).

Tableau 49 : Les mesures de concentrations disponibles

Bassin	Station hydrométrique	Code	Période de mesures	Taille de l'échantillon	Observations
Oued Cherf amont	Moulin Rochefort	14 01 01	1985/1994	142	Avant mise en eau du barrage de Foum El Khanga
Oued Bouhamdane	Medjez Ammar II	14 03 01	1969/1987	2210	Avant mise en eau du barrage de Hammam Debagh
Oued Sabath	Bordj Sabath	14 03 02	1973/1976	135	
Oued Mellah	Bouchegouf	14 05 01	Janvier 1980/août 1998	995	
Oued Ressoul	Ain Berda	14 06 02	Mars 1980/octobre 2000	1134	

La station hydrométrique de Mirbeck ne figure pas dans ce tableau car la concentration n'y a jamais été mesurée.

L'analyse des données de mesures aux stations de Medjez Ammar II et Aioun Settara sera réalisée sur les périodes allant de septembre 1969 à août 1987 pour la première et septembre 1985 –août 1994 pour la seconde.

Les mesures après cette date correspondent à la mise en eau des barrages de Hammam Debagh à l'amont de la station hydrométrique et Foum El Khanga.

De ce fait, les données seront influencées par les lâchés du barrage.

Pour le bassin-versant de l'oued Sabath à Bordj Sabath, une période de trois années de mesures est utilisée. Ce bassin contribue aux transports solides qui aboutissent au barrage de Hammam Debagh.

L'analyse pour les sous- bassins de la Seybouse des données de concentrations permet de mettre en lumière et comprendre le problème des fréquences des mesures soulevé maintes fois par les chercheurs, Demmak (1982).Ce qui permet l'évaluation du

T.S.S. pour 4 stations hydrométriques, la station de Bordj Sabath présentant trop de lacunes pour permettre des évaluations fiables

2.1. Bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort

L'échantillon des mesures à la station de Moulin Rochefort, sans être très fourni peut néanmoins être exploité (fig. 163 et tabl.50).

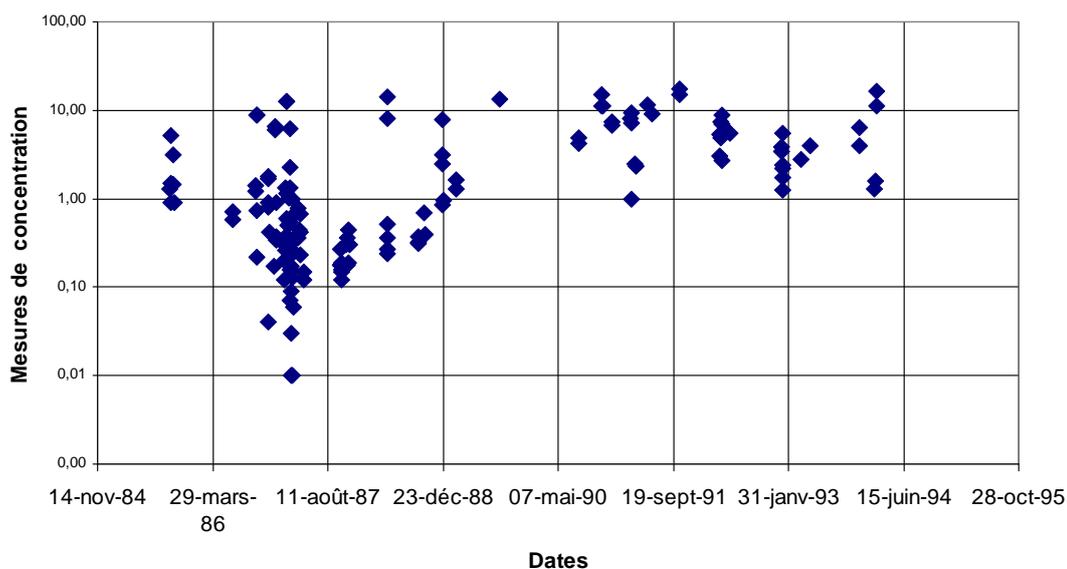


Fig. 163: Position dans l'année des mesures de concentration, station de Moulin Rochefort, oued Cherf amont (1985/1994)

Tableau 50 : Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés à la station d'Aioun Settara (1985/1994)

Saisons	Taille de l'échantillon	Valeur de concentration maximale mesurée	Date (m3/s)	Débit (m3/s)
Automne	43	17.7	16 octobre 1991	0.96
hiver	48	16.43	19 février 1994	23
Printemps	44	14.02	24 avril 1988	7.68
Eté	7			

2.2. Bassin de l'oued Sabath à Bordj Sabath

On dispose de mesures de concentration sur trois années (1973 à 1976).

Les mesures de concentrations se caractérisent par une très faible fréquence, plus que pour les autres bassins. Trois périodes de mesures apparaissent: décembre 1973 à avril 1974; février à mai 1975; janvier à février 1976 (fig.163).

Les valeurs de concentrations mesurées sont très faibles (tabl.50).

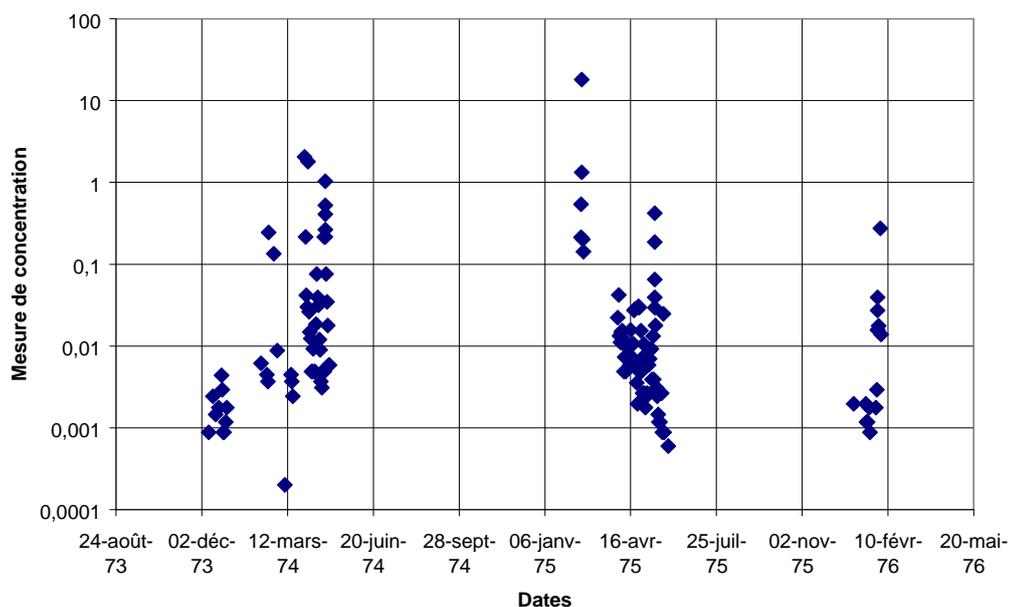


Fig.164: Position dans l'année des mesures de concentration, station de Bordj Sabath , oued Bouhamdane amont (1974/1976)

Tableau 51 : Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés à la station de Bordj Sabath (1974/1976)

Saisons	Taille de l'échantillon	Valeur de concentration maximale mesurée	Débit (m3/s)	Date
Automne				
hiver	37	2,00	0.122	18/02/1974
Printemps	98	8,00	0.223	05/04/1974
Eté				

Ces données de concentrations sont trop limitées pour permettre une étude intéressante. Ce bassin ne sera donc pas étudié.

2.3. Bassin de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II

Les données de concentrations de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar constituent un échantillon qui permet une étude intéressante (fig.165 et tabl.52).

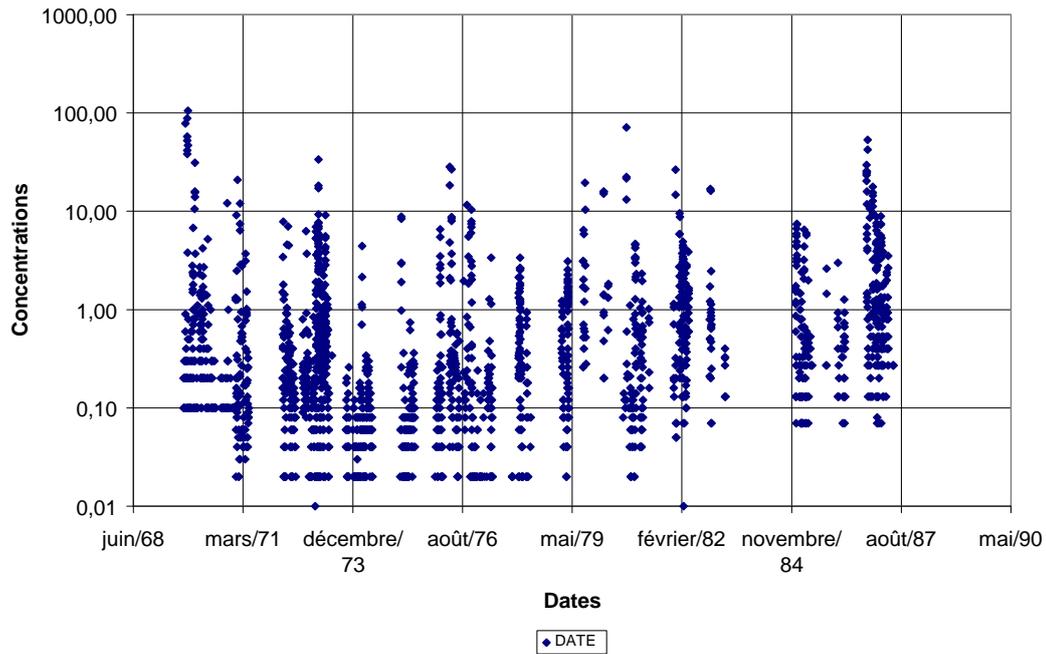


Fig.165: Position dans l'année des mesures de concentration, station de Medjez Ammar II (bassin de l'oued Bouhamdane)

Tableau 52: Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés à la station de Medjez Ammar II

Saisons	Valeur de concentration maximale mesurée	Date	Débit (m3/s)
Automne	105.7	23 octobre 1969	6.50
hiver	33.76	25 janvier 1973	244.4
Printemps	28.42	04 mai 1976	1.8
Eté	0.58	12 juin 1972	1.05

2.4.. Bassin de l'oued Mellah à Bouchegouf

Les données de concentrations de l'oued Mellah à la station hydrométrique de Bouchegouf (1980 à 1999) contiennent des valeurs fortes de concentrations (fig. 166 et tabl.53). Il est intéressant de noter qu'à la confluence de l'oued Mellah avec l'oued Seybouse, un grand diapir triasique au niveau de Medjez Sfa confère un enrichissement en sels (eaux sulfatées, carbonates de calcium, etc...).

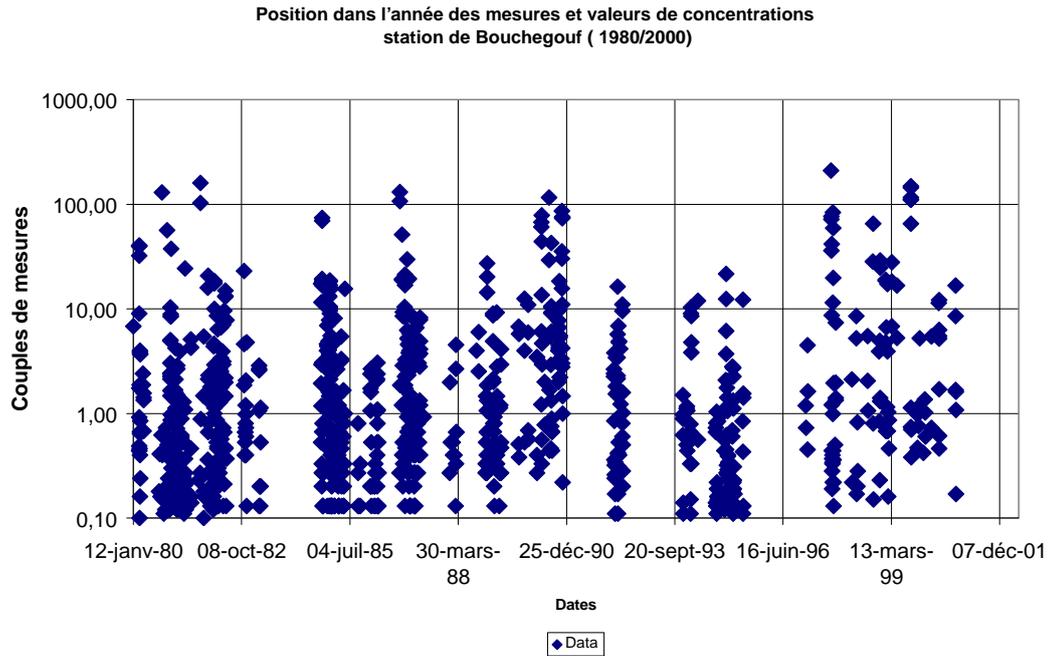


Fig.166: Position dans l'année des mesures et valeurs de concentration, oued Mellah station de Bouchegouf (1980/2000)

Tableau 53 : Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés à la station de Bouchegouf (1980/2000)

Saisons	Valeur de concentration maximale mesurée	Date	Débit (m ³ /s)
Automne	159.41	22 septembre 1981	3.61
hiver	37.5	26 décembre 1980	3.3
Printemps	78.37	11 mai 1990	2.93
Eté			

La valeur la plus forte mesurée à la station de Bouchegouf est de 159.4 g/l mesurée le 22 septembre 1981 pour un débit de 3.61 m³/s.

Au cours des crues de Décembre 1984, à la station de Bouchegouf sur l'oued Mellah, la concentration qui était de 10.51 g/l le 29 décembre (débit correspondant 23.5 m³/s) a atteint 16.89 g/l le jour suivant avec un débit liquide de 235 m³/s.

Les valeurs mesurées à la station de Bouchegouf (159.4 g/l mesurés le 22 septembre 1981 pour un débit de 3.61 m³/s) sont les plus fortes mesurées dans le bassin-versant de la Seybouse.

2.5. Bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda

L'échantillon de mesures de concentrations du bassin de l'oued Ressoul à la station d'Ain Berda est très étoffé (1134 mesures concomitantes de débits liquides et de concentrations) (fig. 167 et tabl.54).

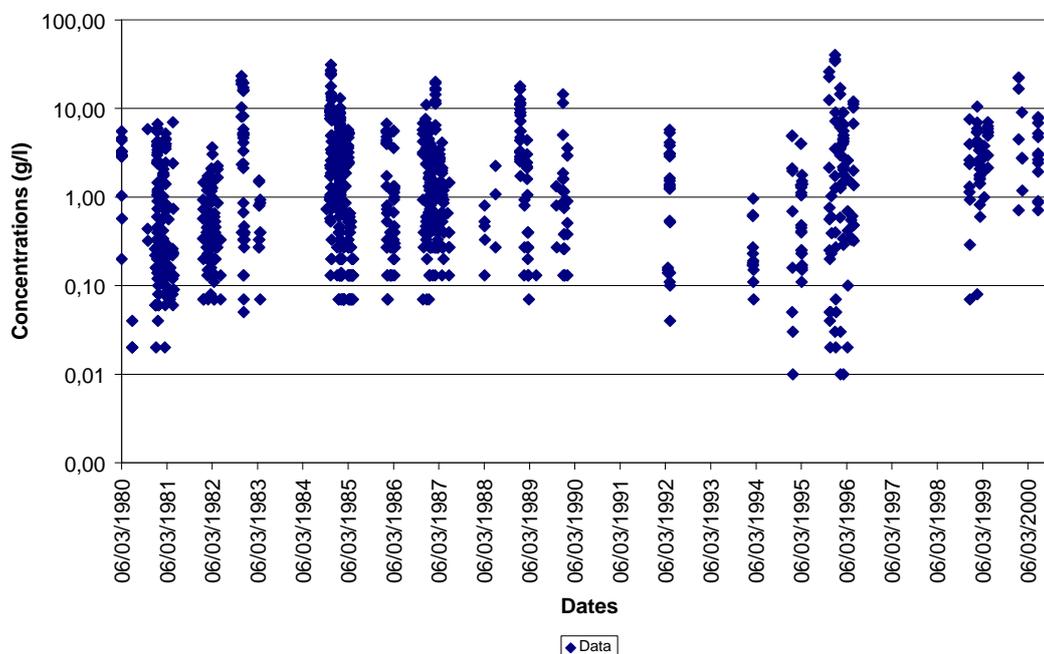


Fig .167 : Position dans l'année des mesures et concentrations mesurées, oued Ressoul, station d'Ain Berda (1980/2000)

Tableau 54: Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés à la station Ain Berda (1980/2000)

Saisons	Valeur de concentration maximale mesurée	Date	Débit (m3/s)
Automne	31.12	18 octobre 1984	18.96
hiver	40.49	02 décembre 1995	2.14
Printemps	12	29 avril 1996	109
Eté			

2.6. Synthèse sur les données de concentration

Sur les données de mesures des stations hydrométriques des sous-bassins de la Seybouse, on note une très forte variabilité des valeurs de concentrations mesurées : les concentrations sont très fortes pour la station de Bouchegouf sur l'oued Mellah, 9 valeurs mesurées sont supérieures à 100 g/l ; elles sont à relier aux terrains triasiques. A la station de Medjez Ammar II sur l'oued Bouhamdane, 2 valeurs sont supérieures à 50 g/l.

Les concentrations mesurées à la station de Aioun Settara ne dépassent pas 20 g/l et pour le bassin de l'oued Ressoul, les concentrations instantanées ne sont pas très fortes; On peut lier cette faiblesse à la lithologie (grès numidiens pour le bassin de l'oued Ressoul).

Les facteurs qui contrôlent les concentrations selon Jansson (2002), Asselmann (2000), Bravard (1997) sont :

- les écoulements;
- la lithologie;
- la saison et l'état du couvert végétal;
- la disponibilité des sédiments résultant de l'érosion;
- la remise en mouvement de sédiments disponibles.

Les concentrations sont liées à la fois à l'intensité des pluies, à la saison (les pluies d'automne), à la lithologie (roches tendres, argiles et marnes)...

Les concentrations les plus fortes sont le plus souvent enregistrées en automne. Elles sont liées aux pluies orageuses d'automne qui trouvent des matières disponibles au transport.

Cette très forte variabilité des concentrations permet de poser le problème des mesures.

-Technique de mesure des concentrations dans les oueds : l'échantillonnage est insuffisant à la fois par rapport aux abscisses (largeur de l'oued) et par rapport aux ordonnées (les profondeurs).

- Fréquence des mesures
- Périodicité : organisation dans le temps par rapport aux saisons.

Il est très légitime de penser que pour beaucoup d'événements hydrologiques importants, les concentrations ne sont pas mesurées même si les hauteurs le sont (limnigraphes).

Pour les bassins- versants algériens, les valeurs instantanées de concentration mesurées aux stations hydrométriques peuvent être très élevées, ainsi Demmak (1982) cite des valeurs de 407 g/l sur l'oued El Abiod à M'chounech (le 24 septembre 1975), 387g/l sur l'oued Isser à Lakhdaria (le 26 /09/1971). Ces concentrations très fortes, sont exceptionnelles et correspondent à des crues liées aux averses orageuses de début d'automne.

On peut également citer des valeurs fortes à partir d'autres études.

Ainsi, des valeurs supérieures à 100 g/l sont citées pour l'oued Berd par Remini (1997) et pour la Haute Tafna par Megnounif et al (2007). Ces concentrations atteignent même 250 g/l pour l'oued Isser (Remini, 1997).

Par contre, les crues d'hiver avec des débits très importants venant après une période de plusieurs jours de pluie, ne produisent pas des concentrations très élevées, par contre, les apports solides sont très importants à cause des volumes écoulés.

3. LES COURBES D'ETALONNAGE DES SEDIMENTS

L'exploitation des couples de mesures concomitantes de débits liquides instantanés (m^3/s) et des concentrations (g/l) permet de calculer les différentes expressions des transports solides en suspension : débits solides (kg/s), apports solides (tonnes), transport solide spécifique ($t/km^2/an$). Elle peut se faire de deux manières:

3.1. Calcul des débits moyens journaliers: turbidigrammes (débits solides moyens journaliers)

On trace pour chaque crue, les courbes de débits et de concentrations correspondantes (turbidigramme) en fonction du temps. Le tracé est obtenu en joignant les valeurs mesurées, aucune interpolation n'étant justifiée, Demmak, (1982).

Cette méthode pour être mise en œuvre exige une fréquence élevée de mesures pendant le déroulement des crues.

3.2. Elaboration de relations saisonnières

Cette méthode est basée sur l'élaboration de relations débits liquides – concentrations et débits liquides -débits solides (courbes d'étalonnage des sédiments).

Elle est utilisée lorsque la fréquence des mesures n'est pas très importante, ce qui est clairement le cas pour les mesures de concentrations en Algérie.

Mais ici se pose le problème du choix de l'échelle de temps appropriée (échelle annuelle, saisonnière, mensuelle, crues).

Deux approches sont alors possibles:

3.2.1. Relation concentrations en fonction des débits liquides

En écriture anglo-saxonne: $C = a * QL^b$

En écriture française: $C = b * QL^a$

Parmi les auteurs ayant utilisé ces courbes, on peut citer Achitte (2007), Hasnain (1996), Ferguson (1987).

C : concentrations instantanées mesurées (g/l),

QL : débits liquides mesurés (m^3/s).

3.2.2. Relation débits solides en fonction des débits liquides

En écriture anglo-saxonne: $Q_s = a * QL^b$

En écriture française: $Q_s = b * QL^a$

Parmi les auteurs ayant utilisé ces courbes, on peut citer Restrepo et Kjerfve (2000), Demmak (1982), Benkhaled et Remini (2003).

Calcul du débit solide :

$$Q_s = QL * C$$

Avec Q_s : débit solide (kg/s),
 Q_L : débit liquide (m^3/s),
 C : concentration (g/l).

Les courbes $C = f(Q_L)$ et $Q_s = f(Q_L)$ expriment des relations moyennes entre d'une part les concentrations et les débits liquides et d'autre part entre les débits solides et les débits liquides.

Les courbes $C = f(Q_L)$ et $Q_s = f(Q_L)$ peuvent être élaborées soit à partir des données instantanées issues des mesures, soit en calculant un débit moyen journalier pour les journées ou une mesure est effectuée (Achitte, 2007), soit en constituant des classes de débits (Jansson, 1996; Khanchoul, 2005).

Le choix de l'échelle saisonnière se justifie par la taille des échantillons (recherche de couples de valeurs débits liquides –débits solides) et par la composante saisonnière des écoulements et du climat.

Les courbes $C = f(Q_L)$ et $Q_s = f(Q_L)$ seront élaborées en utilisant les valeurs de mesures (débits et concentrations instantanés). On comparera l'efficacité des courbes d'étalonnage en utilisant les M.N.B. et les R.M.S.

3.3. Relations débits liquides –concentration (valeurs instantanées)

On constate une très forte dispersion des points lorsqu'on exprime les concentrations instantanées en fonction des débits.

Ceci s'explique par le fait que les concentrations sont contrôlées par plusieurs facteurs (Asselman, 2003). La fourniture des sédiments est très variable à cause de leur disponibilité.

Celle-ci dépend des effets saisonniers, des conditions d'état du bassin-versant (état antécédent). Les différences de disponibilité sont très importantes entre les saisons et pour les événements hydrologiques extrêmes (les crues) entre le début, la montée et la décrue.

On donnera comme exemple la relation débits liquides –concentration pour la station de Aioun Settara (ex Moulin Rochefort).

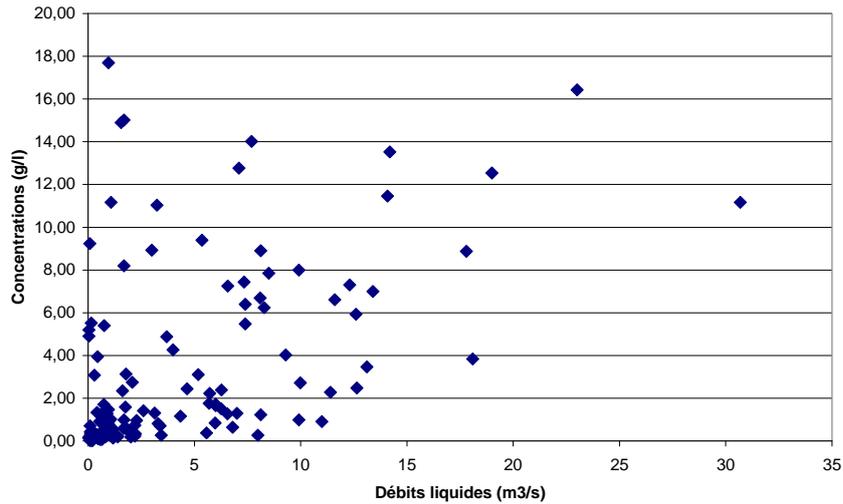


Fig. 168: Relation débits liquides –concentrations, station de Aioun Settara (1985/1994) (échelle arithmétique)

Exprimée en coordonnées arithmétiques, la relation débits liquides –concentrations est très lâche ($R=0.531$) (fig.168).

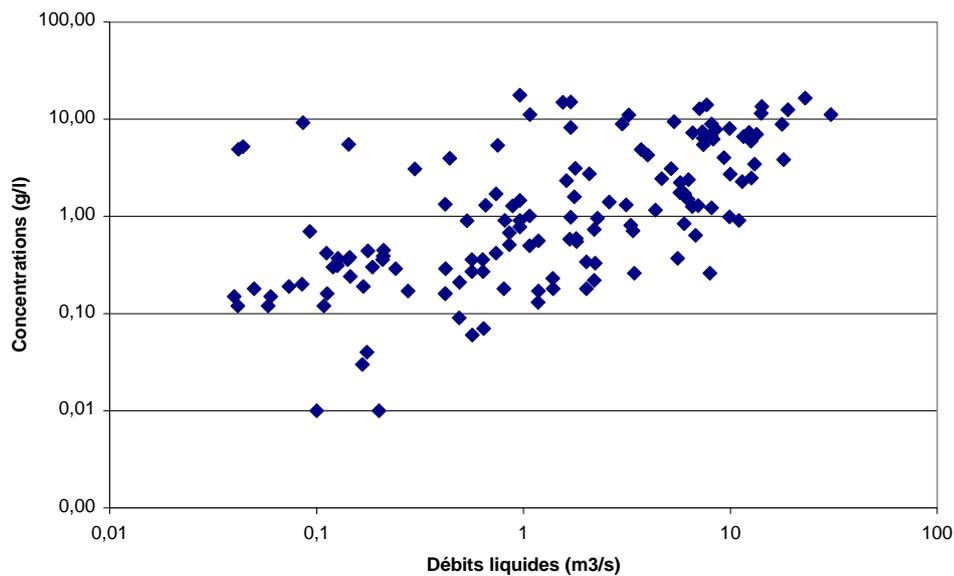


Fig.169: Relation débits liquides –concentrations, station de Aioun Settara (1985/1994) (échelle bi-logarithmique)

En coordonnées logarithmiques (fig.169), la dispersion des points diminue et le coefficient de corrélation s'améliore ($R=0.6097$). La relation puissance s'exprime par:

$$C = 0.8809 * QI^{0.5784}$$

On testera le plus faible des deux coefficients de corrélation ($r = 0.531$ pour $n = 142$), en utilisant le tableau des p limites déduits de la loi de Student. Pour $v = 140$ ($142-2$), la valeur limite de p est de 0.25 au seuil de 1 %. On déduira donc que $r = 0.531$ est significativement différent de zéro au seuil de 1 % (il l'est à plus forte raison au seuil de 5 %, 0.19 et au seuil de 2 %, 0.23).

4. ETABLISSEMENT DES RELATIONS DEBITES LIQUIDES –DEBITES SOLIDES A L'ECHELLE SAISONNIERE

Les courbes d'étalonnage saisonnières sont utilisées comme outil pour combler les données sur les concentrations, les débits et les apports solides du bassin de l'oued Bouhamdane.

Les relations puissance ont été privilégiées (Demmak, 1982; Achite et Meddi, 2005; Benkhaled et al, 2003); elles sont du type: $Q_s = B \cdot Q_L^A$ avec: Q_s : débits solides (kg/s); Q_L : débits liquides (m^3/s).

Exprimée en logarithmes décimaux la relation devient: $\text{Log } Q_s = A \cdot \text{Log } Q_L + \text{Log } B$, avec A: la pente, et B: l'ordonnée à l'origine. La relation est de ce fait linéarisée.

Sur une échelle bi-logarithmique, la dispersion des points est peu importante. On établit des relations entre les débits liquides et les débits solides calculés à partir des concentrations mesurées.

Calcul du débit solide :

$$Q_s = Q_L \cdot C$$

Avec Q_s : débit solide (kg/s),

Q_L : débit liquide (m^3/s),

C : concentration (g/l).

Dans une seconde étape, on calcule les débits solides (kg/s) à l'échelle journalière. Les valeurs mensuelles et annuelles sont obtenues en intégrant par le temps les résultats obtenus à l'échelle journalière, elles peuvent servir par ailleurs à l'extension de courtes séries de débits solides grâce aux séries de débits liquides en général plus longues.

Différentes échelles de temps sont proposées dans les études. En Algérie, les courbes d'étalonnage saisonnières sont très utilisées, elles permettent de disposer d'échantillons suffisamment étoffés. Néanmoins, les échelles annuelles et mensuelles sont aussi exploitées dans les études. Les courbes d'étalonnage crue par crue ont fait l'objet de plusieurs travaux (Benkhaled et Remini 2003, Achite et Ouillon 2007).

Plusieurs auteurs ont étudié la relation puissance et ont prouvé sa supériorité par rapport aux autres types de relations. La relation puissance est du type $Y = b \cdot X^a$ ou $Q_s = b \cdot Q_L^a$ avec a et b paramètres de la régression à calculer par la méthode des moindres carrés. Le paramètre a représente la pente, et b représente l'ordonnée à l'origine; pour les anglo-saxons, le paramètre b représente la pente, et a est l'ordonnée à l'origine.

Certains auteurs ont proposé une signification physique à ces deux paramètres. Ainsi, selon Benkhaled et Remini (2003), le paramètre b (ordonnée à l'origine) représente un indice d'érodibilité. Selon Asselmann, (2000), la pente a représente la puissance érosive du cours d'eau.

4.1. Bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort

Les courbes d'étalonnage et les régressions Ql-Qs du bassin-versant de l'oued Cherf sont établies pour trois saisons (fig.170 à 172 et tabl.55).

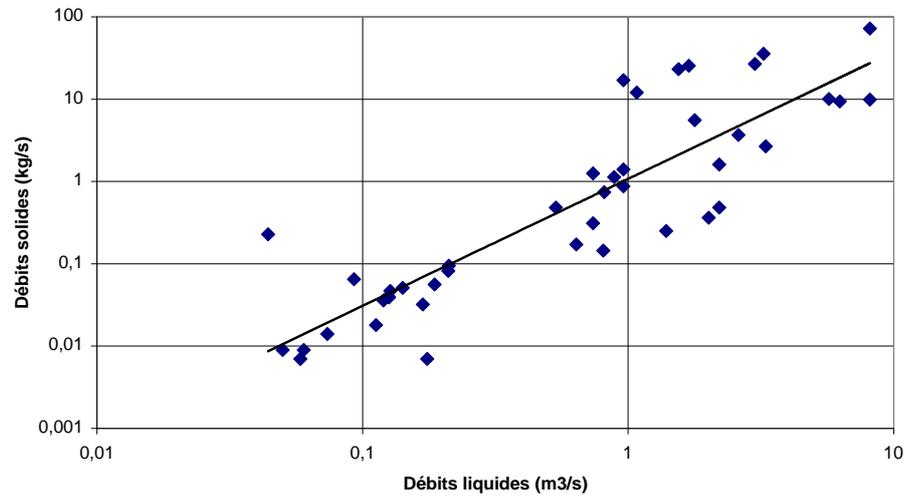


Fig .170: Relation débits liquides –débits solides, station de Moulin Rochefort, automne

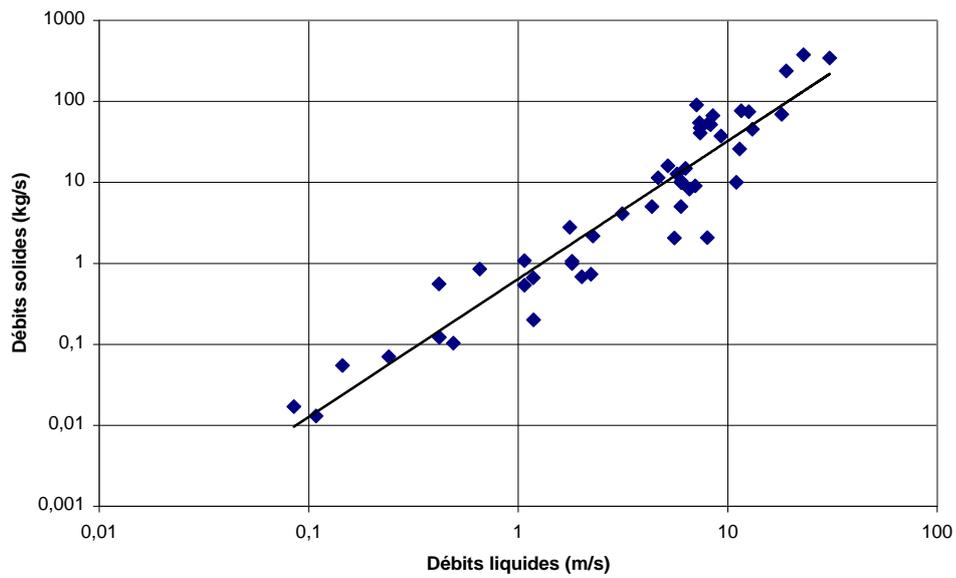


Fig.171: Relation débits liquides –débits solides, station de Moulin Rochefort, hiver

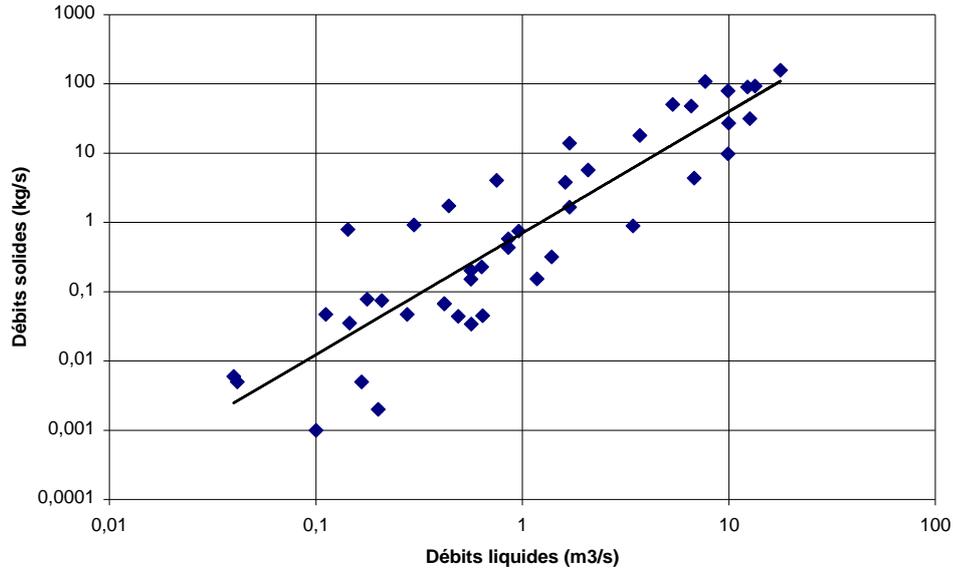


Fig 172: Relation débits liquides –débits solides, station de Moulin Rochefort , printemps

Tableau 55 : Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin – versant de l'oued Cherf à Moulin Rochefort

Saisons	n	A (Pente)	B (Ordonnée à l'origine, Constante)	R	R ²
Automne	43	1.544	1.075	0.875	0.766
Hiver	48	1.703	0.642	0.944	0.892
Printemps	44	1.755	0.702	0.897	0.804
Été	7				

4.2. Bassin de l'oued Sabath à Bordj Sabath

Les courbes d'étalonnage et les régressions Q1-Qs du bassin-versant de l'oued Sabath sont établies pour deux saisons (fig.173 et 174 et tabl.56).

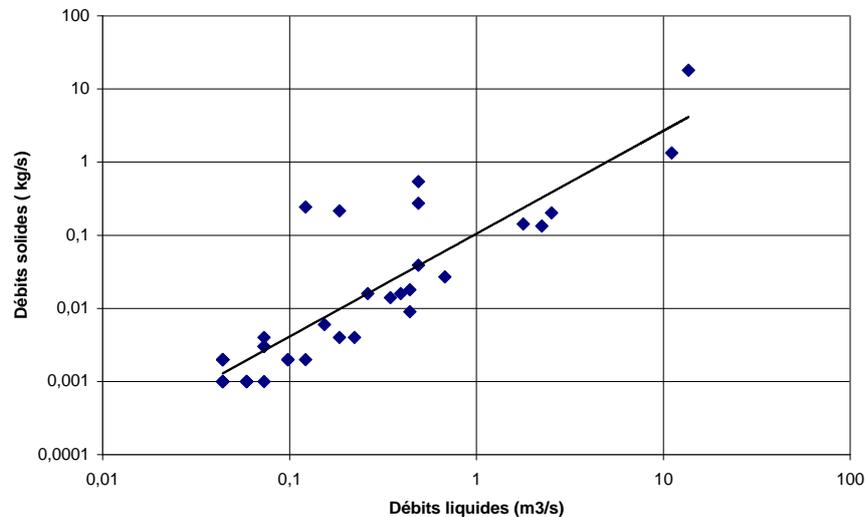


Fig.173: Relation débits liquides-débits solides, station de Bordj Sabath, hiver

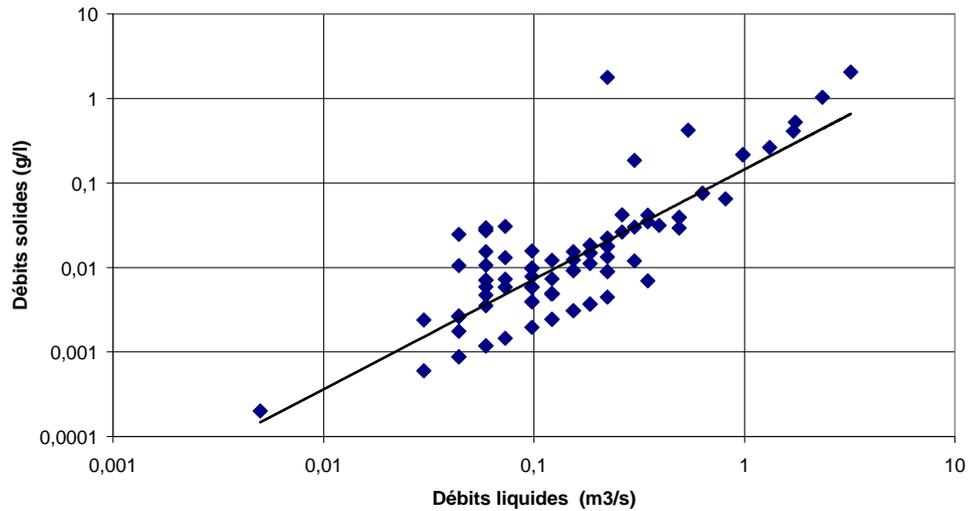


Fig.174 : Relation débits liquides-débits solides, station de Bordj Sabath, printemps

Tableau 56: Paramètres des courbes de régression saisonnières, oued Sabath à la station de Bordj Sabath.

Saisons	n	A (Pente)	B (Ordonnée à l'origine)	R	R ²
Automne					
Hiver	37	1.406	0.105	0.878	0.771
Printemps	98	1.301	0.145	0.813	0.662
Eté					

Les données de mesures du bassin de l'oued Sabath à Bordj Sabath ne permettent pas une étude significative.

4.3. Bassin de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II

On établira les courbes d'étalonnage du bassin-versant de l'oued Bouhamdane pour les quatre saisons (fig.175 à 178). Les résultats des régressions Q1-Qs sont reportés au tableau 57.

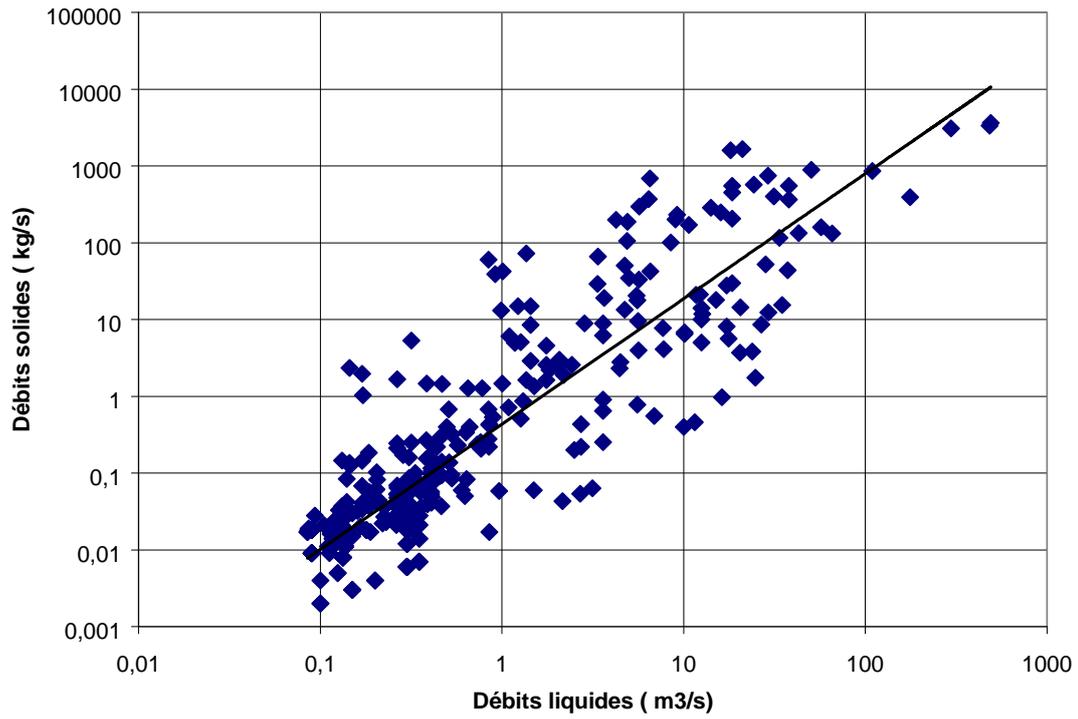


Fig.175: Relation débits liquides –débits solides, station de Medjez Ammar II, automne

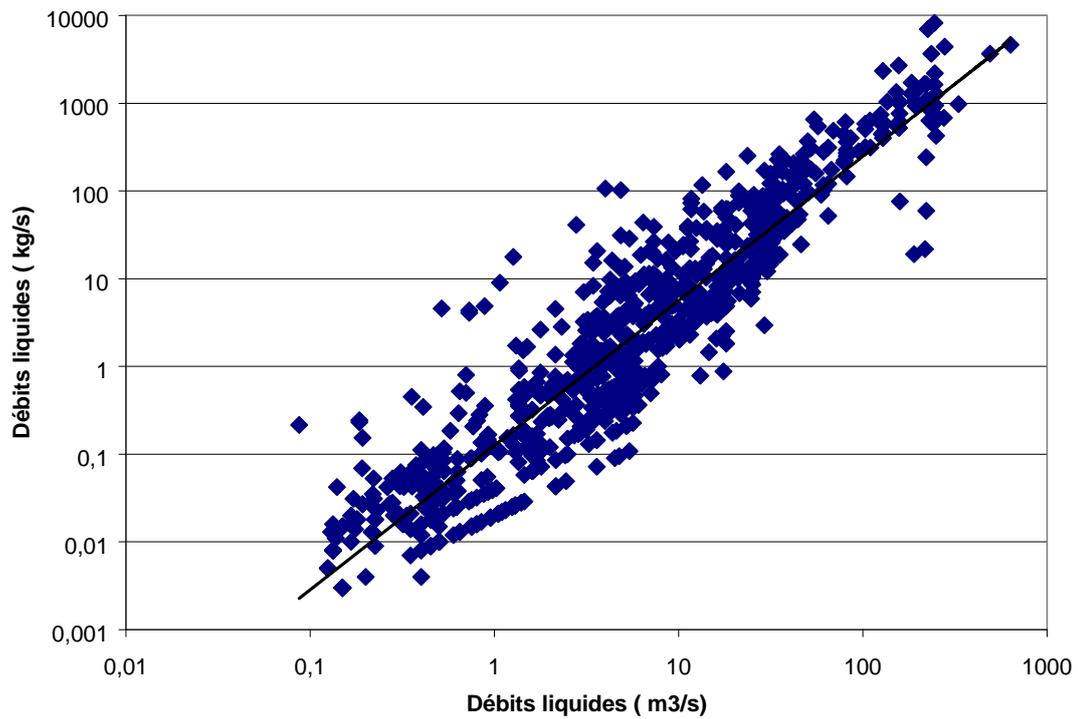


Fig.176: Relation débits liquides –débits solides, station de Medjez Ammar II, hiver

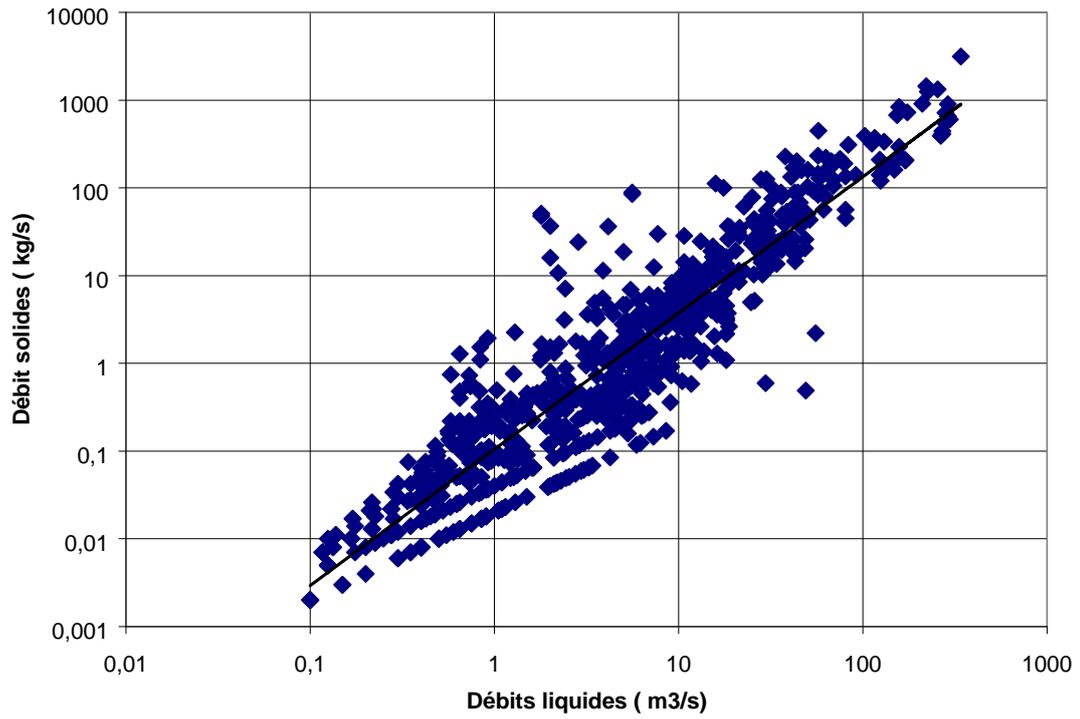


Fig.177: Relation débits liquides –débits solides, station de Medjez Ammar II, printemps

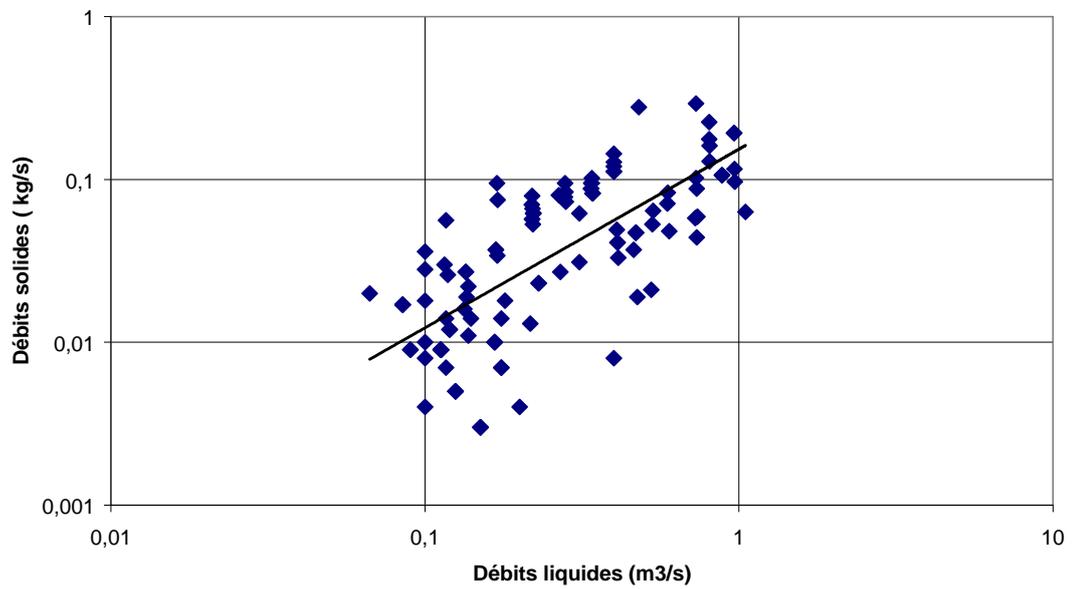


Fig.178: Relation débits liquides –débits solides, station de Medjez Ammar II, été

Tableau 57: Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin – versant de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II

	n	A (pente)	B (ordonnée)	R	R2
Automne	379	1.631	0.435	0.887	0.786
Hiver	883	1.646	0.127	0.934	0.872
Printemps	829	1.552	0.105	0.928	0.862
Eté	119	1.097	0.153	0.718	0.515

4.4. Bassin de l'oued Mellah à Bouchegouf

Les données disponibles permettent d'établir les courbes d'étalonnage du bassin- versant de l'oued Mellah pour trois saisons (fig.179 à 181 et tabl.58).

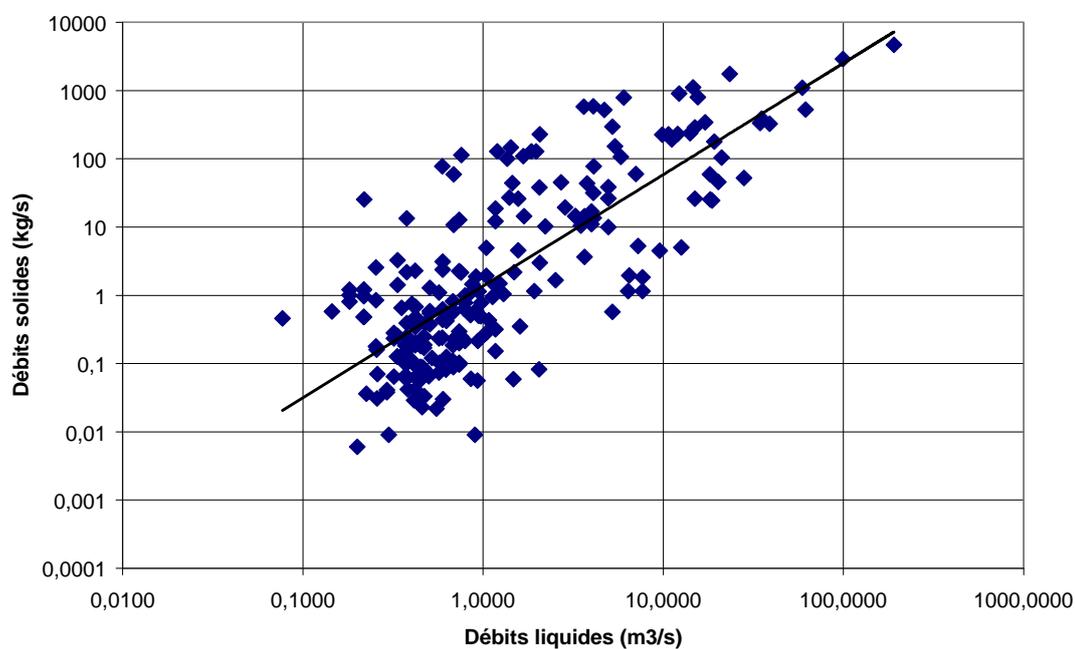


Fig.179: Relation débits liquides –débits solides, station de Bouchegouf, automne

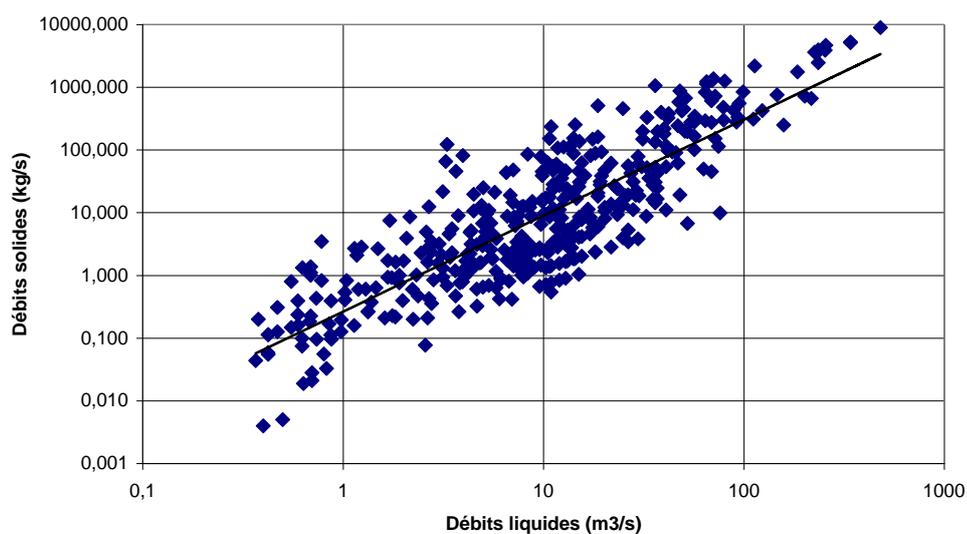


Fig.180: Relation débits liquides –débits solides, station de Bouchegouf, hiver

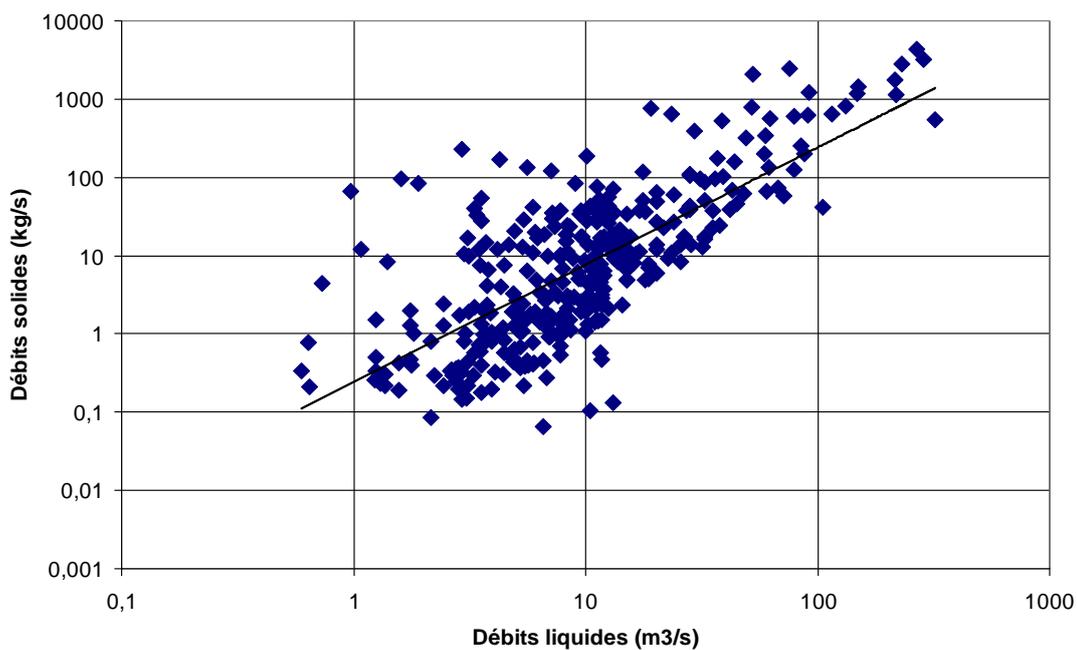


Fig. 181: Relation débits liquides –débits solides, station de Bouchegouf, printemps

Tableau 58 : Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin – versant de l'oued Mellah à Bouchegouf.

	n	A	B	R	R ²
Automne	223	1.634	1.363	0.774	0.6
Hiver	420	1.531	0.266	0.765	0.586
Printemps	352	1.499	0.243	0.730	0.719
Eté					

4.5. Bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda

Les données disponibles permettent d'établir les courbes d'étalonnage du bassin-versant de l'oued Ressoul pour trois saisons (fig.182 à 184), ainsi que les résultats des régressions Q1-Qs (tabl.59).

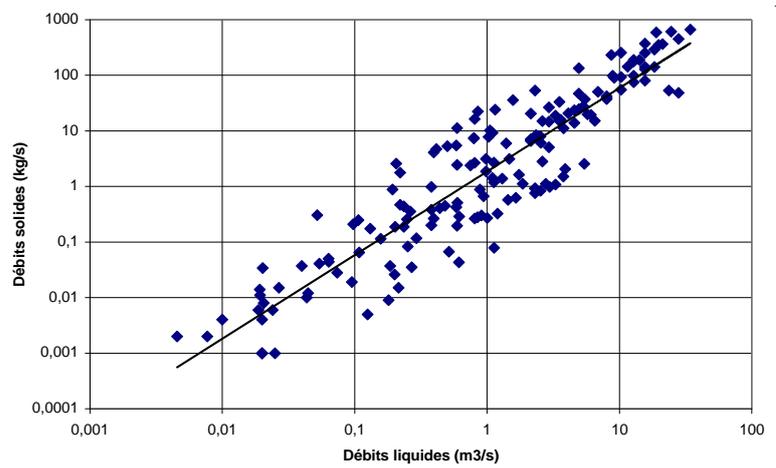


Fig.182: Relation débits liquides-débits solides, station de Ain Berda, automne

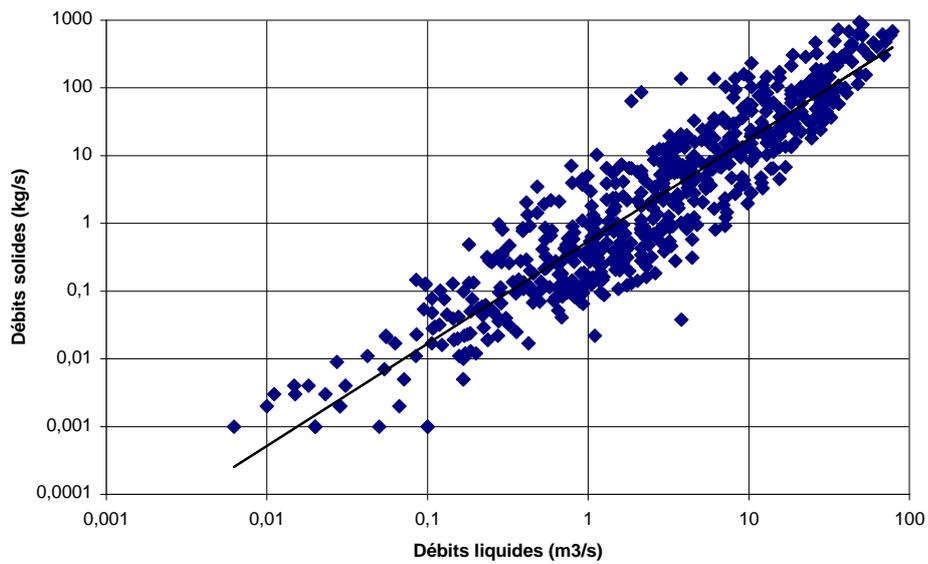


Fig.183: Relation débits liquides-débits solides, station d'Ain Berda, hiver

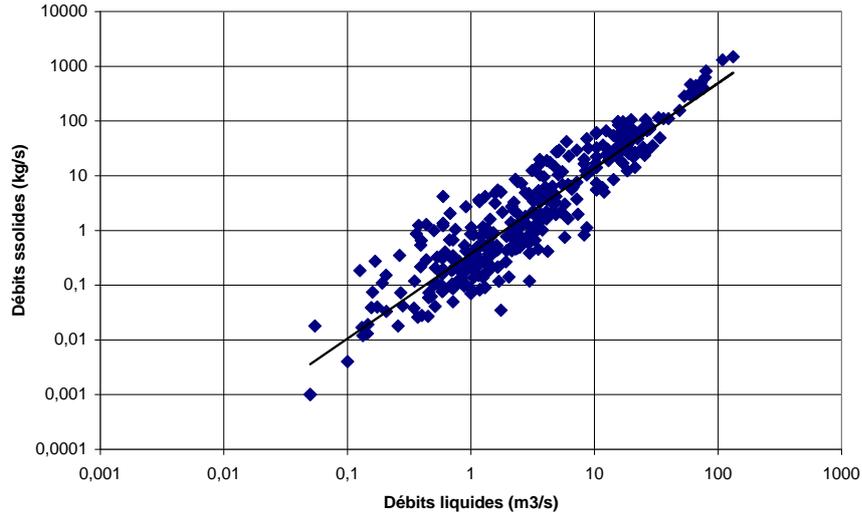


Fig.184: Relation débits liquides-débits solides, station d'Ain Berda, printemps

Tableau 59 : Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin – versant de l'oued Ressoul à Ain Berda.

	n	A	B	R	R ²
Automne	165	1.503	1.855	0.918	0.843
Hiver	624	1.510	0.544	0.916	0.839
Printemps	345	1.556	0.379	0.916	0.839
Eté					

Pour l'ensemble des stations hydrométriques, la régression puissance ou régression logarithmique aboutit à des coefficients de corrélation significatifs.

4.6. Comparaison des performances statistiques des relations

Un indicateur de l'erreur systématique (M.N.B., The mean Normalized Bias) et un indicateur de l'erreur aléatoire (R.M.S., random error) seront calculés pour les relations saisonnières entre débits liquides -débits solides et débits liquides –concentrations (courbes d'étalonnage des sédiments) pour la comparaison des performances statistiques des deux relations Achite (2007) (tabl.60).

Ces deux indicateurs s'expriment par :

M.N.B. = The mean Normalized Bias en %, (indicateur de l'erreur systématique).

M.N.B. = Mean ((Ycalc-Yobs)/Yobs)*100

R.M.S. = the normalized root mean square %, (R.M.S., indicateur de l'erreur aléatoire, random error).

R.M.S. = Stdev((Ycalc-Y obs)/Yobs)*100

Tableau 60 : Synthèse des valeurs de M.N.B. et R.M.S. pour les relations saisonnières $C=f(Ql)$ et $Qs=f(Ql)$ pour les stations hydrométriques du bassin de la Seybouse

Bassin	Saison	M.N.B.	R.M.S.	M.N.B.	R.M.S.
		C=f(QL)	C=f(QL)	Qs=f(QL)	Qs=f(QL)
Oued Cherf	Automne	-59.66	96.12	-46.24	79.43
	Hiver	-31.76	74.52	-38.86	58.27
	Printemps	-44.32	79.94	-31.29	54.23
	Eté				
	Année	-47.71	87.41	-44.34	61.85
Oued Sabath	Automne				
	Hiver	30.31	99.46	-83.68	90.68
	Printemps	-58.21	99.75	-55.04	78.82
	Eté				
	Année				
Oued Bouhamdane	Automne	-75.63	98	35.53	161.04??
	Hiver	-47.40	86	-37.76	73.22
	Printemps	-50.87	95.84	-38.09	63.69
	Eté	/	/	-17.43	75.33
	Année	-67.83	98.47	-55.72	77.72
Oued Mellah	Automne	-78.49	99.23	-23.95	58.95
	Hiver	-59.79	66.75	-58.54	92.22
	Printemps	-71.65	99.45	-62.18	76.35
	Eté	???	???	???	????
	Année				
Oued Ressoul	Automne	-46.24	85.85	-40.30	62.66
	Hiver	-47.57	92.33	-43.91	67.76
	Printemps	-34.76	73.80	-35.28	49.95
	Eté				
	Année				

Globalement, pour l'ensemble des bassins et pour les toutes les saisons, les valeurs de M.N.B. (indicateur de l'erreur systématique) et de R.M.S. (indicateur de l'erreur aléatoire) sont plus faibles pour les relations saisonnières Qs en fonction de Ql que pour les relations C en fonction de Ql .

Seul, le bassin de l'oued Bouhamdane présente une anomalie (la valeur de R.M.S. pour l'automne est plus forte pour $Qs = f(Ql)$).

Par ailleurs, les valeurs de MNB et de RMS sont plus faibles pour les relations saisonnières que pour les relations annuelles.

Tableau 61 : Relations saisonnières, coefficients de corrélation et de détermination entre les concentrations et les débits liquides

Bassin – versant	Station hydrométrique	Relation C=f(QI)	R ²	R	R tabulé 5%	R tabulé 2%	R tabulé 1%
bassin de l'oued Cherf	station de Aioun Settara						
	43	$C = 1.0754 * QI^{0.5441}$	0,286	0.537	0.285	0.34	0.37
	48	$C = 0,6421 * QI^{0.7031}$	0,585	0.765	0.285	0.34	0.37
Printemps n=44	44	$C = 0,7018 * QI^{0.7549}$	0,432	0.657	0.285	0.34	0.37
bassin de l'oued Bouhamdane,	station de Medjez Ammar II						
	379	$C = 0,435QI^{0.6307}$	0,355	0.596	0.19	0.23	0.25
	883	$C = 0,1266QI^{0.6464}$	0,513	0.716	0.19	0.23	0.25
Printemps n= 829	829	$C = 0,1051QI^{0.5525}$	0,442	0.665	0.19	0.23	0.25
bassin de l'oued Mellah,	station de Bouchegouf						
	223	$C = 1,3621QI^{0.6336}$	0,184	0.429	0.19	0.23	0.25
	420	$C = 0,2661QI^{0.531}$	0,235	0.485	0.19	0.23	0.25
Printemps n= 352	352	$C = 0,2426QI^{0.4989}$	0,112	0.335	0.19	0.23	0.25
bassin de l'oued Ressoul,	station d'Ain Berda						
	165	$C = 1,855QI^{0.5032}$	0,376	0.613	0.19	0.23	0.25
	624	$C = 0,5437QI^{0.5105}$	0,373	0.611	0.19	0.23	0.25
Printemps n= 345	345	$0,3793QI^{0.556}$	0,401	0.633	0.19	0.23	0.25

La relation entre les débits solides et les débits liquides qui expriment les courbes d'étalonnage saisonnières présente toujours un coefficient de corrélation plus fort que la relation entre les concentrations et les débits liquides mais celles-ci sont néanmoins significatives sur le plan statistique (tabl.61).

Le test de r est fait utilisant la relation $v = n-2$, avec n =taille de l'échantillon et 2 degrés de liberté.

Pour toutes les relations saisonnières entre les concentrations et les débits liquides, si les coefficients de corrélation sont inférieurs à ceux obtenus par la relation Q_s en fonction de Q_l , ils sont cependant tous significatifs aux seuils de 1%. Le tableau des r limites déduits de la loi de Student permet d'extraire les valeurs citées dans le tableau 61 (seuils de 5%, 2% et 1%).

5. EVALUATION DES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION ET DE LEUR VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE

Disposant de données de mesures de concentrations pour des périodes différentes, on évaluera les débits solides, les apports solides annuels, et les valeurs de transports solides en suspension (le T.S.S.). Les courbes d'étalonnage saisonnières ont permis de combler les données sur les concentrations, les débits et les apports solides des bassins équipés de stations hydrométriques.

Pour l'élaboration des courbes d'étalonnage saisonnières, les relations puissance ont été privilégiées Demmak (1982), Walling (1981), Jansson (1996), Benkhaled et al, (2003), Meddi (2005).

Ces relations sont du type: $Q_s = B \cdot Q_l^A$ avec: Q_s : débits solides (kg/s); Q_l : débits liquides (m^3/s). On procédera à l'étude des écarts entre les valeurs de T.S.S. calculées sans facteur de correction et après application du facteur de correction.

On étudiera les fluctuations des apports solides. Ces fluctuations sont très liées aux apports liquides eux-mêmes fortement corrélés avec les précipitations, à toutes les échelles de temps, qui en sont le facteur générateur.

Les caractéristiques physiques des bassins-versants qui donnent aux bassins leur facultés de réaction par rapport à l'érosion hydrique (lithologie dominante, couverture végétale, systèmes de pentes), aussi bien que les données hydro-climatologiques, qui permettent d'appréhender la variabilité temporelle des transports solides, en plus des activités humaines, constituent les facteurs explicatifs et les facteurs de différenciation des apports solides entre les sous-bassins de la Seybouse.

Pour l'oued Bouhamdane, on abordera la quantification des transports solides en suspension à la station hydrométrique de Medjez Ammar II et des apports solides au barrage de Hammam Debagh (1995/2010). On étudiera également une longue période (1969/1970 à 1987/1988-1995/1996 à 2009/2010).

5.1. Les apports solides annuels, mensuels et saisonniers et leur variabilité

L'évaluation se base sur l'utilisation des courbes d'étalonnage saisonnières $Q_s = b \cdot Q_l^a$ et des débits mensuels par station. Les paramètres à calculer sont:

$$\text{Les débits solides : } Q_s \text{ (kg / s)} = Q_l \text{ (m}^3\text{/ s)} * C \text{ (g / l)}$$

Les apports solides mensuels:

$$\text{Apports solides mensuels} = Q_s \text{ mensuels} * \text{Temps (s)}$$

Temps: nombre de secondes dans le mois;

$$\text{Les T.S.S.mensuels} = TSS \text{ mensuel} = \frac{\text{Apport solide mensuel (tonnes)}}{\text{Surface du bassin - versant (km}^2\text{)}} \text{ (t / km}^2\text{ / an)}$$

Les T.S.S. annuels = $TSS \text{ annuel} = \sum TSS \text{ mensuels } (t / km^2 / an)$

$$TSS \text{ annuel} = \frac{\text{Apport solide annuel (tonnes)}}{\text{Surface du bassin – versant (km}^2\text{)}} (t / km^2 / an)$$

Tableau 62 : Paramètres statistiques des T.S.S. pour la période commune (1971-1972/1987-1988).

Bassins	Moyenne 1971/1987	Ecart-type	CV%	Valeur maximale	Valeur minimale	Observations
Oued Cherf	114,23	393,24	344,25	1636,63 (1983/1984)	0,877 (1987/1988)	
Oued Bouhamdane	54,84	77,01	140,42	289,08 (1984-1985)	0,754 (1987-1988)	Régime influence par le barrage mis en eau en décembre 1987
Oued Bouhamdane	58,22	78,22	134,34	289,08 (1984-1985)	1,443 (1973-1974)	Période 1971/72-1986/87
Oued Mellah	237,89	250,73	105,39	898,72 (1976/1977)	11,18 (1987/1988)	
Oued Ressoul	103,29	125,28	121,29	330,97 (1986/1987)	0,043 (1987/1988)	

Les valeurs de T.S.S., calculées sans application du coefficient de correction (CF), sont faibles pour les bassins de l'oued Bouhamdane, Cherf et Ressoul . La valeur la plus forte est celle du bassin de l'oued Mellah (tabl.62).

Par comparaison avec les bassins algériens étudiés, ces valeurs se situent en-deçà de 500 t/km²/an.

Les valeurs annuelles connaissent une variabilité forte pour les bassins Bouhamdane ,Mellah et Ressoul (CV > 100%); Le coefficient de variation est très fort pour le bassin de l'oued Cherf (344 %).

Cette très forte variabilité des T.S.S. est liée à la très forte variabilité des écoulements annuels liés eux-mêmes aux variations aux échelles de temps plus fines des écoulements et de leur facteur générateur, les pluies.

Ces fluctuations entraînant une très forte variabilité exprimée par l'écart-type (variabilité absolue) et le coefficient de variation (variabilité relative), sont très liées aux apports liquides eux-mêmes fortement corrélés avec les précipitations, à toutes les échelles de temps, qui en sont le facteur générateur.

Les caractéristiques physiques des bassins-versants qui donnent aux bassins leur facultés de réaction par rapport à l'érosion hydrique (lithologie dominante, couverture végétale, systèmes de pentes), aussi bien que les données hydro-climatologiques, qui permettent d'appréhender la variabilité temporelle des transports solides, en plus des activités humaines, constituent les facteurs explicatifs et les facteurs de différenciation des apports solides entre les sous-bassins de la Seybouse.

5.1.1. Le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort

On notera à partir des figures 185 et 186 la très forte variabilité inter-annuelle et inter-mensuelle des T.S.S. pour le bassin de l'oued Cherf. L'année 1983/1984 est exceptionnellement forte (1636,63 t/km²) en lien avec des écoulements également exceptionnels (le débit moyen annuel a été de 7. 21 m³/s).

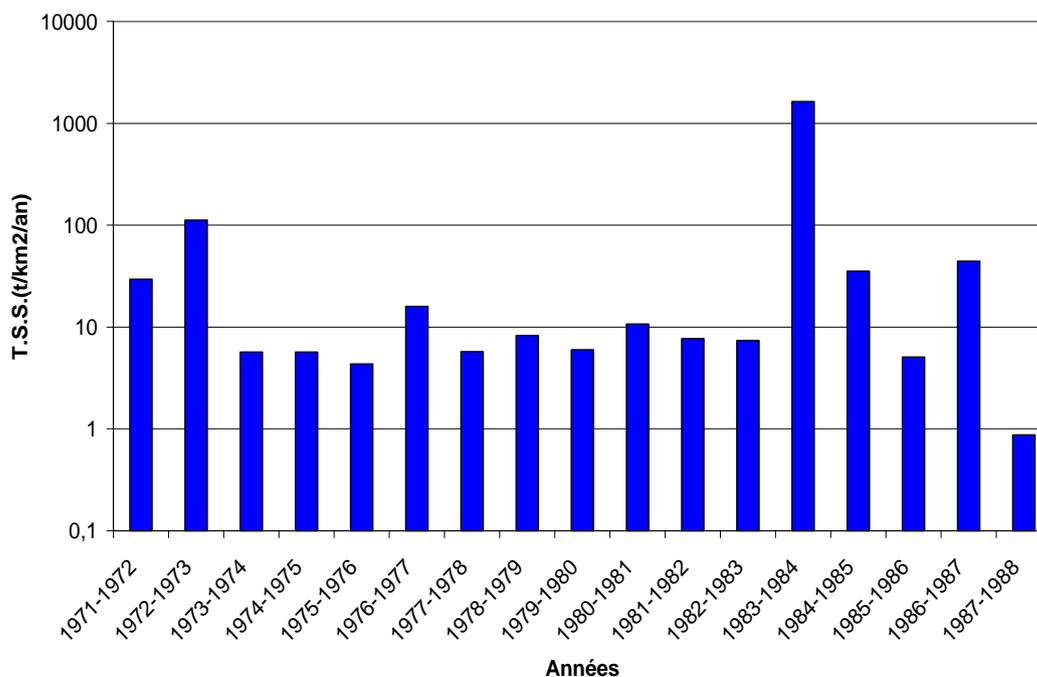


Fig.185: Variabilité des T.S.S.annuels pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort (1971/1972-1987/1988), calculs sans CF

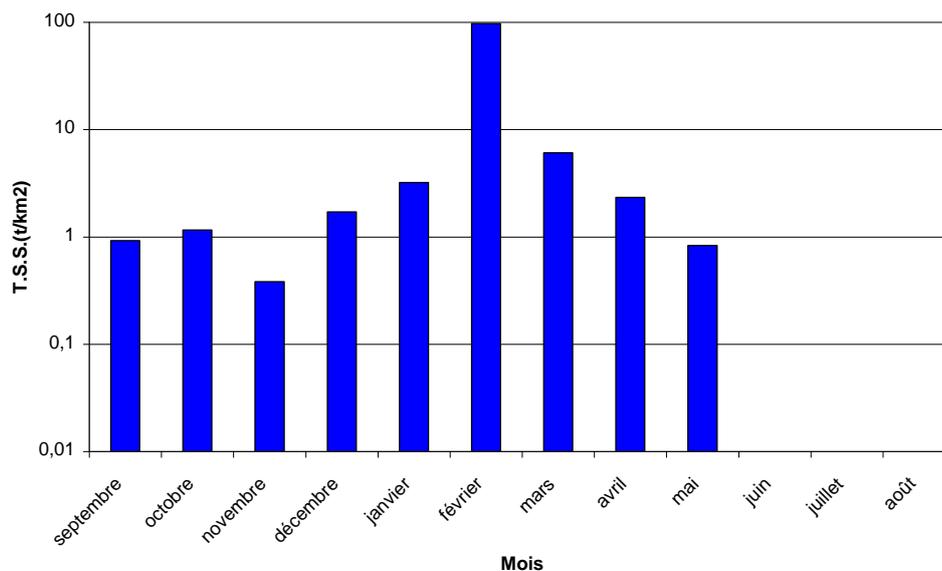


Fig.186: Variabilité des T.S.S. mensuels moyens pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort (1971/1972-1987/1988), calculs sans CF

Tableau 63 : Répartition saisonnière des T.S.S. pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort (1971/1972-1987/1988), calculs sans CF

Saisons	T.S.S.(t/km ²)	%	Observations
Automne	2,468	2,16	
Hiver	102,5	89,71	
Printemps	9,256	8,10	
Eté	///////	///////	Pas de courbe d'étalonnage
Total	114,23	100	

La répartition saisonnière des valeurs d'apports est très fortement influencée par le mois de février 1984 (1623,3 t/km²) avec un débit moyen mensuel de 78.7 m³/s; Ce débit moyen mensuel a été fortement influencé par des débits moyens journaliers très forts 632 m³/s le 06 février et le 20 Février 1984 (tabl.63).

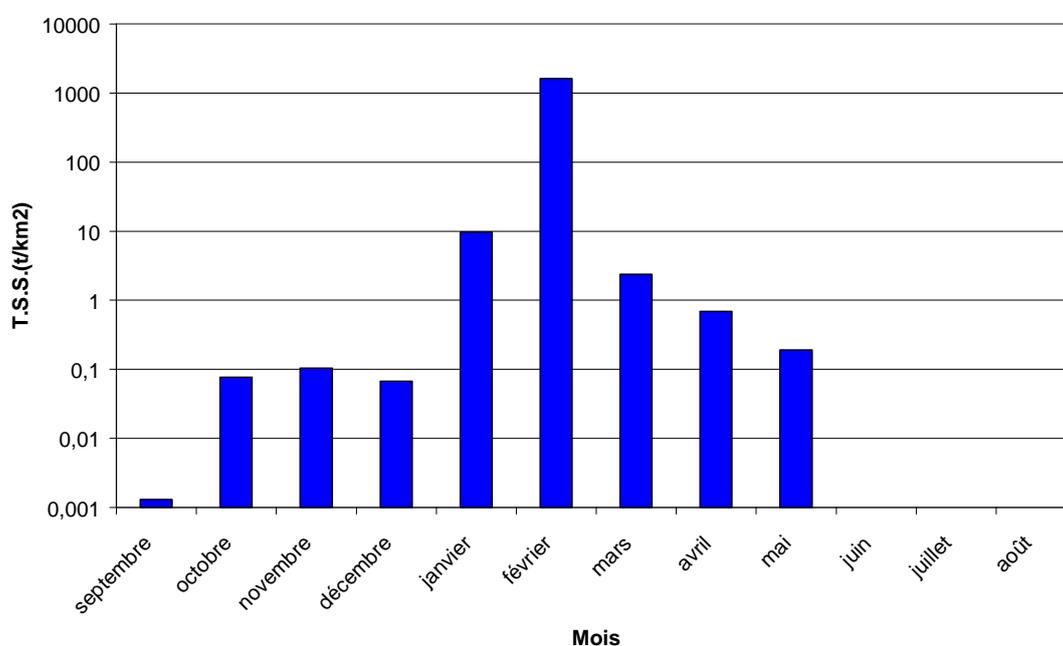


Fig.187: Variabilité des T.S.S. mensuels pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort, année (1983/1984), calculs sans CF

Le graphe de l'année 1983/1984 (fig.187) montre que pour les années les plus fortes, la contribution des événements exceptionnels est très élevée. Le mois de février 1984 accapare à lui seul 99.2 % des T.S.S. de l'année 1983/1984 alors que pour les années à faibles apports solides comme l'année 1987/1988 (fig.188) et 1973/74, les contributions mensuelles et saisonnières sont assez équilibrées en l'absence d'événements hydrologiques exceptionnels.

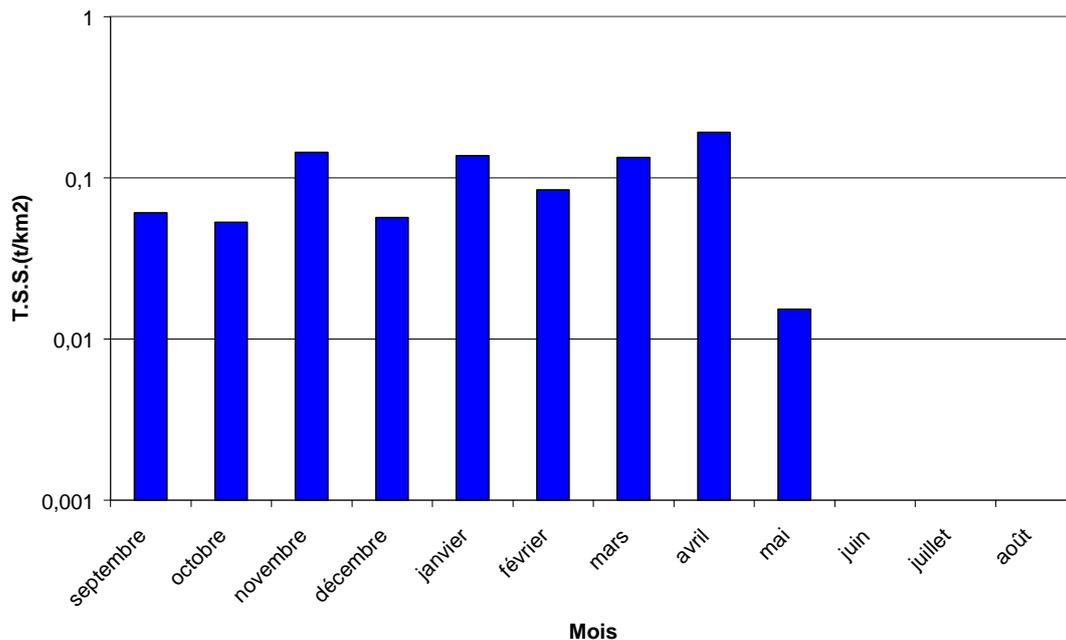


Fig. 188: Variabilité des T.S.S. mensuels pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort, année (1987/1988), calculs sans CF

5.1.2. Le bassin de l'oued Bouhamdane

La moyenne inter-annuelle des T.S.S. est relativement faible (54,84 t /km²/an), avec une variabilité assez forte (écart-type=77,01, coefficient de variation =140,42%).

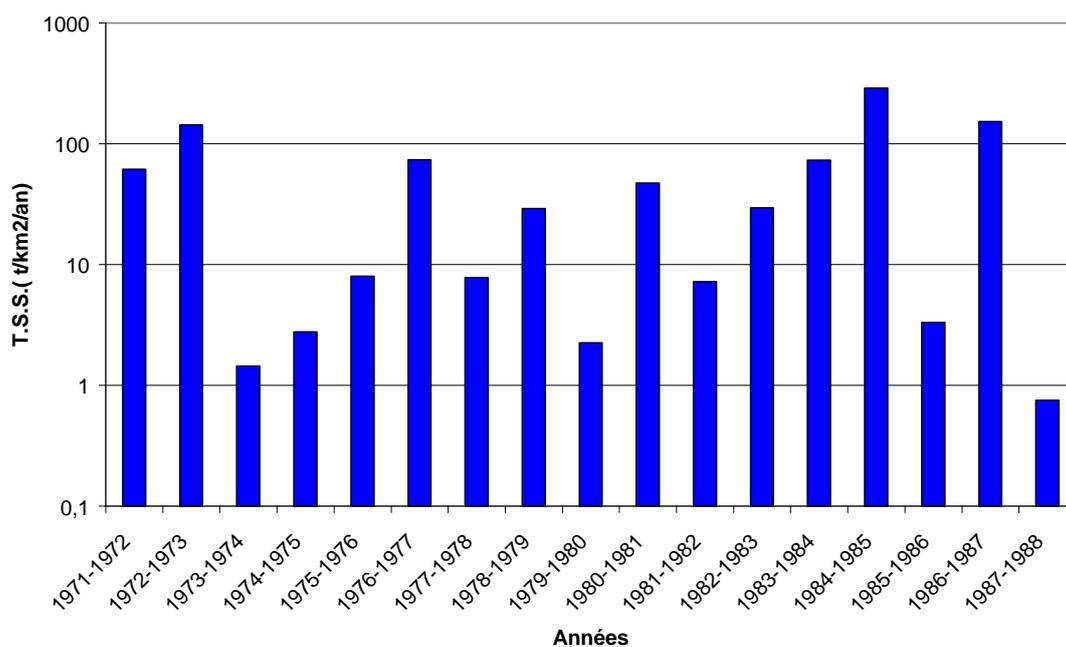


Fig. 189: Variations des T.S.S. annuels pour le bassin de l'oued Bouhamdane

Les valeurs des T.S.S. ont fluctué entre une valeur maximale de 289,08 t /km²/an, (1984-1985) et une valeur minimale de 0,754 t /km²/an, (1987-1988) (fig.189).

Le régime hydrologique de l'année (1987-1988) est influence par le barrage mis en eau en décembre 1987.

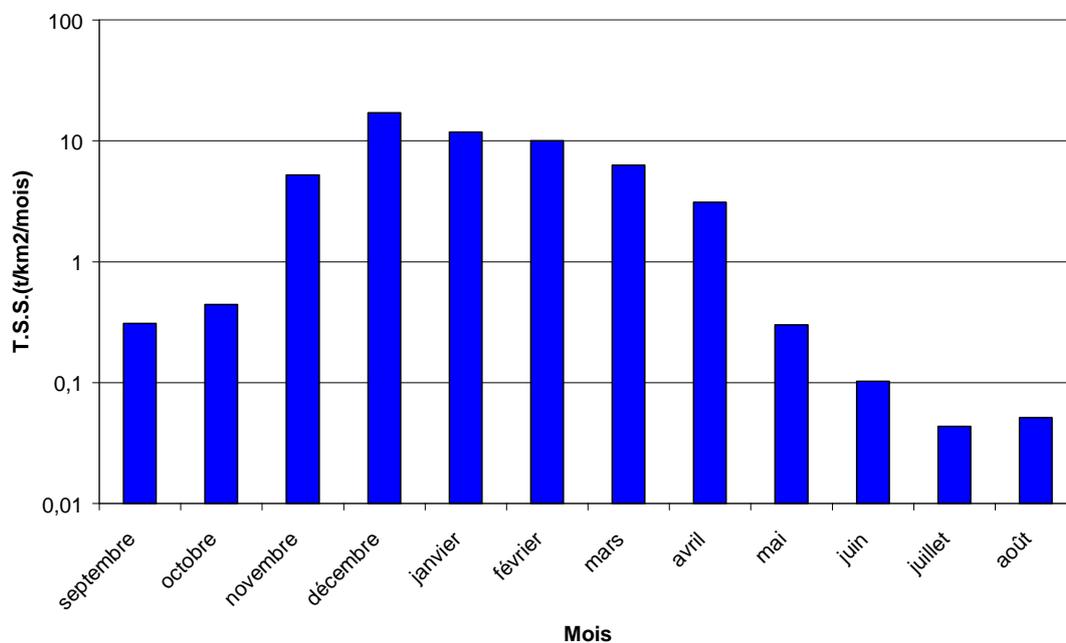


Fig. 190: Variations des T.S.S. moyens mensuels pour le bassin de l'oued Bouhamdane

A l'échelle mensuelle, les valeurs maximales sont enregistrées en décembre (17.1 t/km²/an), Janvier (11.9 t/km²/an) et février (10.0 t/km²/an) alors que les valeurs les plus faibles le sont aux mois de juin, juillet et août en lien avec les écoulements et les pluies (fig.190).

Les contributions saisonnières sont les suivantes: Hiver : 71%, printemps : 17.7 %, automne : 10.9 %.

Si on exclut l'année 1987/1988 dont le régime hydrologique a été influencé par les lâchés du barrage de Hammam Debagh, la valeur moyenne des T.S.S.est de 58.2 t/km²/an, avec une variabilité forte (écart-type =78.22, et CV =134.34%). L'année la plus productive en sédiments est 1984/85(289.1 t/km²/an) et l'année la plus faible 1973/74 a produit 1.4 t/km²/an.

5.1.3. Le bassin de l'oued Mellah à Bouchegouf

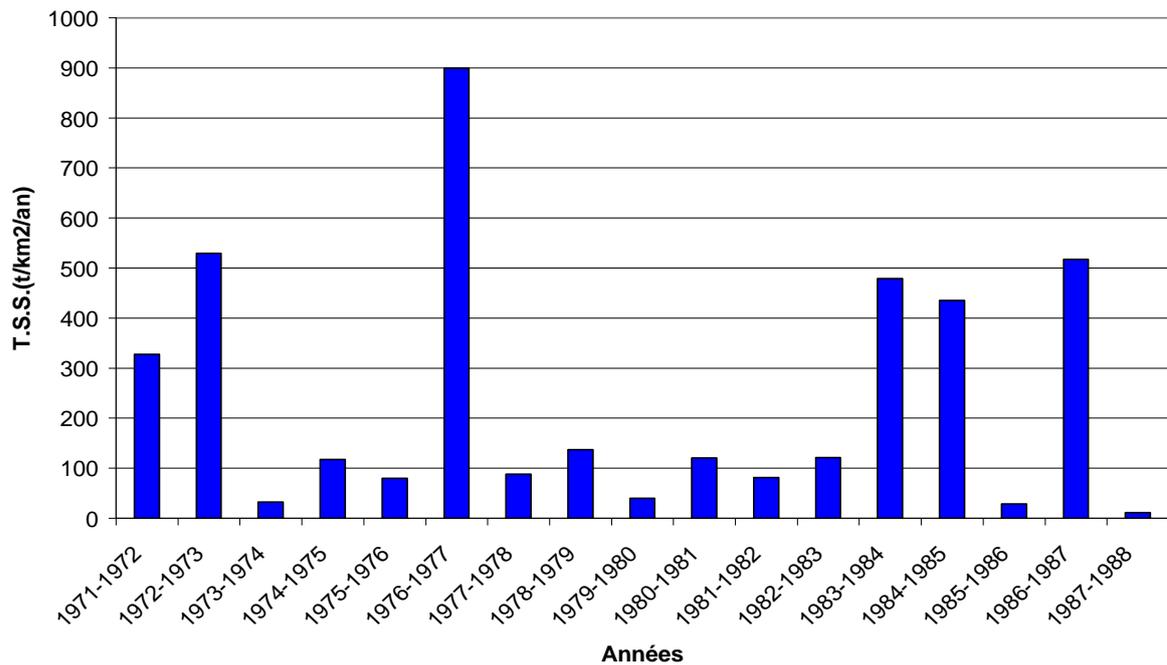


Fig.191: Variations des T.S.S. annuels pour le bassin de l'oued Mellah, 1971/1972 - 1987/1988

Dix valeurs annuelles dépassent 100 t/km²/an et la moyenne inter-annuelle des T.S.S. est de 237.89 t/km²/an avec une forte variabilité (écart-type=250,73 et un CV=105,40%) (fig.191).

L'année la plus forte 1976/77 a enregistré 898.72 t/km²/an et l'année 1987/88 a été la plus faiblement productive avec 11.18 t/km²/an.

Pour l'année où l'apport a été maximal, le mois de novembre a accaparé 92.34 % de cet apport.

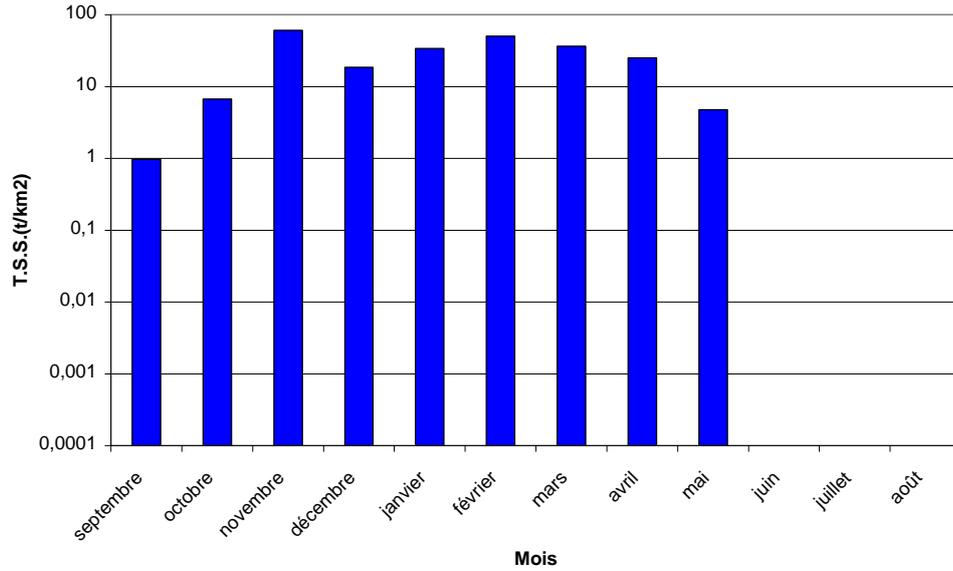


Fig.192: Variations des T.S.S. mensuels pour le bassin de l'oued Mellah, 1971/1972 - 1987/1988

La répartition des parts saisonnières est la suivante:Automne=28.87%, hiver=43.26% et printemps=27.86% (fig.192).

5.1.4. Le bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda

La moyenne inter-annuelle est de 103.29 t/km²/an, avec une variabilité forte (écart-type = 125,28 et un coefficient de variation = 121,29 %).

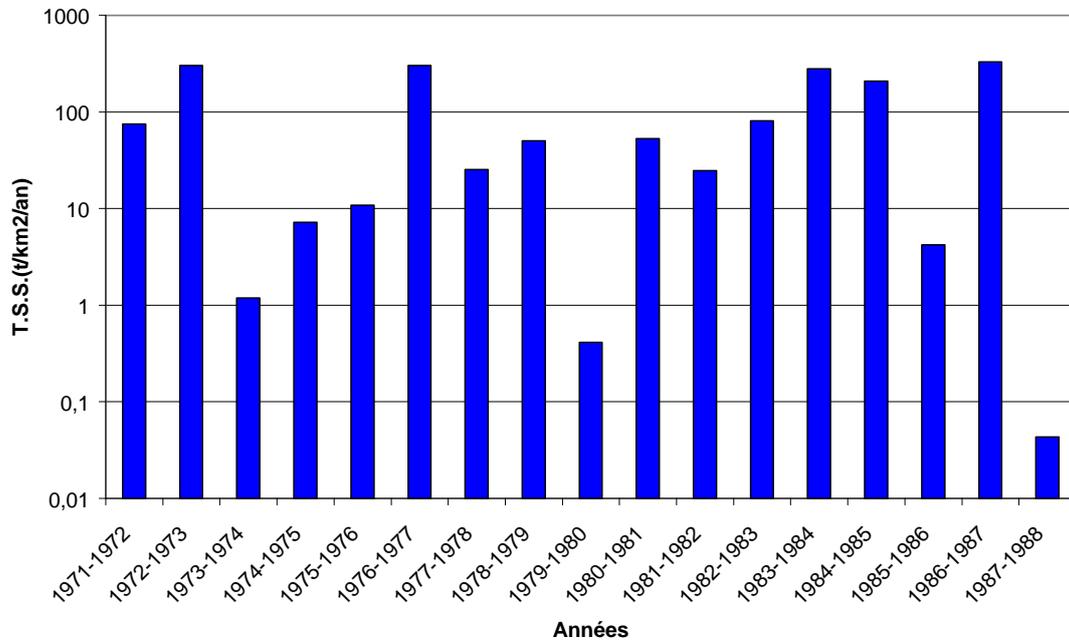


Fig. 193: T.S.S.annuels (1971/1972-1987/1988), bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda, sans cf

La valeur la plus forte est 330.97 t/km² pour l'année 1986/1987 et la valeur la plus faible est 0,043 t/km² (1987/1988). Cinq valeurs annuelles dépassent 100 t/km²/an.

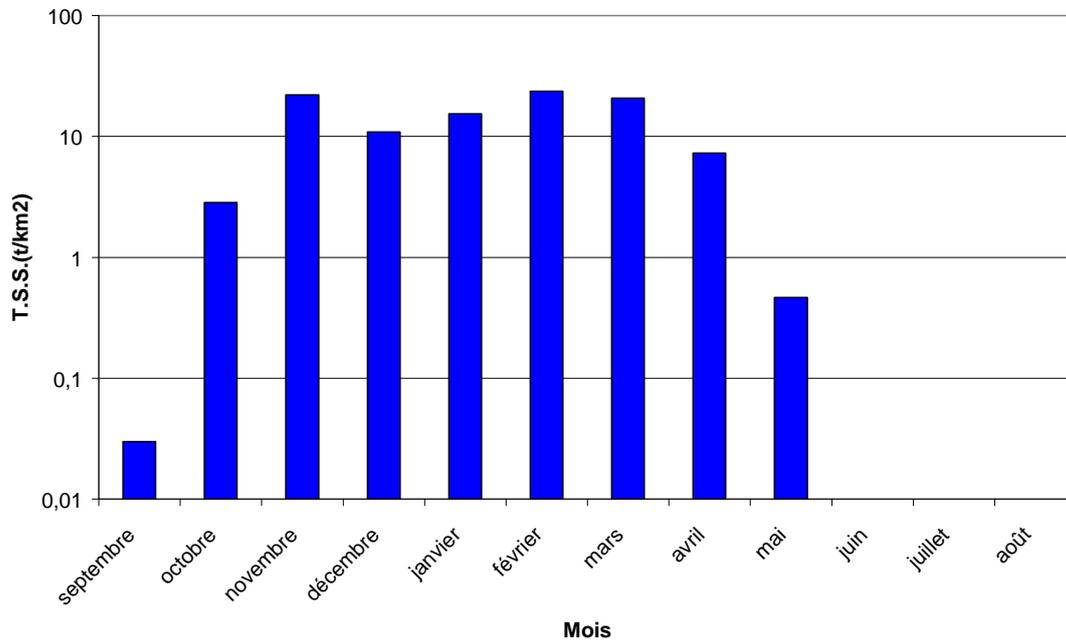


Fig.194: T.S.S.mensuels (1971/1972-1987/1988), bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda, sans cf

Les mois de juin, juillet, août et septembre se caractérisent par une très forte fréquence des valeurs nulles de débits. Les contributions saisonnières sont de : 24,92 % pour l'automne, 49,84 % pour l'hiver et 28,52 % pour le printemps.

5.2. Les apports solides et les T.S.S. annuels, mensuels et saisonniers calculés en appliquant les facteurs de correction saisonniers

Les problèmes de l'utilisation des courbes d'étalonnage pour l'évaluation des transports solides ont été soulevés par plusieurs auteurs (Walling, 1977a et 1977b; Phillips et al, 1999 ; Ferguson 1986,1987 et Jansson 1985 ,1996 et Asselman, 2007).

Ainsi, Phillips et al (1999) ont soulevé les problèmes relatifs à l'estimation des charges de sédiments à partir des échantillonnages présentant une faible fréquence.

Parmi les auteurs ayant proposé un facteur de correction, on citera Ferguson et Jansson, Duan (1983, the 'smearing estimate' correction factor).

Les relations statistiques couvrent toute la panoplie des concentrations et des débits observés en hautes, moyennes et basses eaux. En général, la charge en sédiment d'un cours d'eau est sous-estimée (jusqu'à 60 %, voire plus) lorsque les débits solides sont calculés à partir des débits liquides en utilisant la méthode des moindres carrés et en appliquant une anamorphose logarithmique aux variables (Jansson, 1985 ; Ferguson, 1986, 1987; Phillips et al., 1999; Asselman, 2000; Verstraeten et Poesen, 2002).

On peut objectivement penser que les remarques et les résultats auxquels ont abouti ces études sont transposables aux mesures telles qu'elles sont appliquées en Algérie.

Auparavant, on exprimera le degré de sous-estimation (ou de sur-estimation) en calculant l'erreur (formule in Phillips ,1999; Horowitz, 2003).

$$\text{Erreur \%} = \left(\frac{\text{Apport estimé}}{\text{Apport mesuré}} - 1 \right) * 100$$

Les résultats sont reportés au tableau 64.

Tableau 64 : Erreurs commises lors du calcul des apports en appliquant les courbes d'étalonnage

Bassin	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Bouhamdane	35.50	-37.76	-38.09	-17.43
Cherf	-46.24	-38.86	-13.76	/
Mellah	-23.96	-58.54	-71.64	/
Ressoul	-40.31	-43.91	-35.28	/

Pour parer à la sous-estimation de l'apport de sédiments par les courbes d'étalonnage, calculée pour les régressions saisonnières et pour les quatre stations hydrométriques, le facteur de correction CF de Jansson, est appliqué (tabl.65).

Le facteur de correction de Jansson est calculé à partir de l'erreur quadratique de la régression logarithmique entre C_i et Q_{li} : $CF = 10^{(1.1513\sigma^2)}$
 où CF, facteur de correction et $\sigma^2 = 1/(N-1) \sum (\log_{10} C_i - \log_{10} C'_i)^2$, variance des logarithmes des écarts entre les concentrations mesurées C_i et les concentrations estimées C'_i par la courbe de régression C_i - Q_{li} .

Tableau 65 : Valeurs des coefficients de correction saisonniers (CF)

Bassin	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Bouhamdane	3.27	2.04	1.83	/
Cherf	2.34	1.43	2.90	/
Mellah	6.26	2.55	3.20	/
Ressoul	2.41	2.04	1.70	/

Le facteur de correction CF de Jansson, est appliqué à l'ensemble des débits solides mensuels $Q_{S_{mens}}$ obtenus:

$$Q_{S_j} = b \times Q_{l_{mens}}^a \times FC$$

Tableau 66 : Paramètres statistiques des T.S.S. pour la période commune (1971-1972/1987-1988).

Bassins	Moyenne 1971/1987	Ecart-type	CV%	Valeur maximale	Valeur minimale
Oued Cherf	179,20	562,43	313,85	2345.3 (1983/1984)	2.00 (1987/1988)
Oued Bouhamdane(1)	116,95	158,63	135,63	587,31 (1984/1985)	1,543 (1987/1988)
Oued Bouhamdane(2)	124,17	160,93	129,60	587,31 (1984/1985)	3,55 (1973/1974)
Oued Mellah	899,86	1287,11	143,03	5396,07 (1976/1977)	43,247 (1987/1988)
Oued Ressoul	210,74	259,72	123,24	725,61 (1976/1977)	0,0755 (1987/1988)

(1) Régime influence par le barrage mis en eau en décembre 1987

(2) Période 1971/72-1986/87

Tableau 67 : Ecarts entre les valeurs calculées sans corrections et en appliquant les corrections saisonnières

Bassins	T.S.S.calculé avec facteurs de correction (t/km ² /an)	T.S.S.calculé sans facteurs de correction (t/km ² /an)	Ecarts absolus t/km ² /an	Ecarts relatifs %
Oued Cherf	179,20	114,23	-64,97	156.87
Oued Bouhamdane	116,95	54,84	-62,11	213.26
Oued Bouhamdane	124,17	58.22	-65.95	213.28
Oued Mellah	899,86	237.89	-661,97	378.27
Oued Ressoul	210,74	103.29	-107,45	204.03

Ecart absolu = T.S.S. calculé sans CF – T.S.S. calculé avec CF (tonnes /km²)

Ecart relatif % = ((T.S.S. calculé sans FC / T.S.S. calculé avec FC)*100

Les calculs avec facteurs de correction de Jansson ont permis de corriger une sous-estimation qui varie entre 156.87 % (bassin de l'oued Cherf), 204.03 % (bassin de l'oued Ressoul), 213.26% (bassin de l'oued Bouhamdane) et 378.27% (bassin de l'oued Mellah).

CONCLUSION DU CHAPITRE 7

L'exploitation des couples de mesures concomitantes de débits liquides instantanés (m^3/s) et des concentrations (g/l) a permis de calculer les régressions saisonnières débits liquides –débits solides et d'estimer les différentes expressions des transports solides en suspension : débits solides (kg/s), apports solides (tonnes), transport solide spécifique ($\text{t}/\text{km}^2/\text{an}$) sur la période commune de Septembre 1971 à Août 1988.

Les valeurs de T.S.S., calculées par le biais des régressions saisonnières débits liquides –débits solides sont faibles pour les bassins de l'oued Cherf ($114,2 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$), Bouhamdane ($58,2 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$) et Ressoul ($103,3 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$) sans application du coefficient de correction (CF). La valeur la plus forte est celle du bassin de l'oued Mellah ($237,9 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$). Par comparaison avec les bassins algériens étudiés, ces valeurs se situent en-deçà de $500 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$.

Les calculs avec facteurs de correction de Jansson ont permis de corriger une sous-estimation qui varie entre 156.87 % (bassin de l'oued Cherf), 204.03 % (bassin de l'oued Ressoul), 213.26% (bassin de l'oued Bouhamdane) et 378.27% (bassin de l'oued Mellah).

Les paramètres hydro-climatologiques contrôlent la variabilité temporelle des transports solides, alors que les caractéristiques physiques des bassins-versants (lithologie dominante, couverture végétale, systèmes de pentes) constituent les facteurs explicatifs et les facteurs de différenciation des débits solides et des apports solides entre les sous-bassins de la Seybouse. Les activités humaines ont un effet aggravant sur les phénomènes d'érosion.

Chapitre 8. Etude de cas: Les transports solides de l'oued Bouhamdane, et leur impact sur l'envasement du barrage Hammam Debagh

INTRODUCTION

Ce chapitre consacré également aux transports solides en suspension, complète le chapitre précédent, en abordant l'étude de la variabilité interannuelle et intra-annuelle des transports solides de l'oued Bouhamdane, à l'amont du barrage Hammam Debagh (Louamri et al, Journal des Sciences Hydrologiques, à paraître).

L'Oued Bouhamdane fait partie du bassin de la Seybouse, l'une des grandes artères hydrographiques de l'Algérie orientale tributaires de la mer Méditerranée (Mebarki 2009, 2010) (Fig.195). Il draine une surface de 1105 km² à la station hydrométrique de Medjez Ammar 2 et de 1070 km² au droit du barrage Hammam Debagh. Au-delà de son contexte physique contrasté, ce bassin se prête à une étude fine de la variabilité interannuelle et intra-annuelle des flux sédimentaires ou flux solides : disponibilité d'une chronique longue (Septembre 1969-Août 1987) de mesures directes de la concentration en MES et du débit liquide, de données d'apport journalier au barrage (Septembre 1995-Août 2010) et enfin, de données bathymétriques de la campagne effectuée sur la retenue du barrage en 2004 (Louamri 2010).

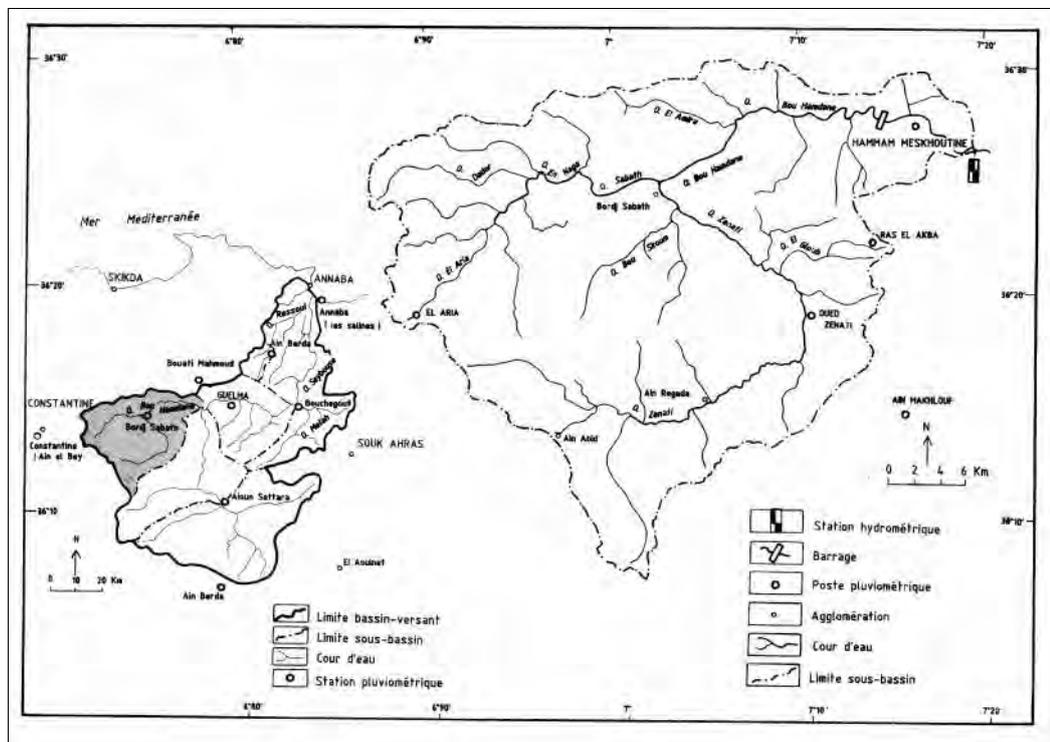


Fig. 195: Situation géographique (a) et contexte topographique (b) du bassin de l'Oued Bouhamdane (Oued Seybouse, Algérie)

Pour appréhender la variabilité, au pas de temps journalier, de la charge solide de l'oued, il était nécessaire de mettre au point un modèle statistique liant les données de mesures de la turbidité aux débits liquides. Deux séries (Septembre 1969-Août 1987 et Septembre 1995-Août 2010) de débits solides journaliers (Q_{sj}) ont été générées, respectivement au droit de la station hydrométrique et au site du barrage. Pour la seconde série, nécessaire à la prédiction de l'envasement probable du barrage, les apports liquides journaliers utilisés pour l'estimation des débits solides sont déduits du bilan d'eau du réservoir.

1. CONTEXTE, DONNEES ET METHODES

1.1. Le bassin versant de l'Oued Bouhamdane et le barrage Hammam Debagh

1.1.1. Le bassin versant

Il présente un relief de moyenne montagne dont l'altitude moyenne est de 785 m (270 - 1281 m) et l'indice de pente est de 0.13. La densité de drainage permanente est de 0.53 km^{-1} et temporaire est de 1.90 km^{-1} . La longueur du talweg principal est de 99 km, avec une pente moyenne de 0.8% (A.N.R.H. 2008). La lithologie est variée, constituée de formations superficielles (32.4%), grès, conglomérats, marno-calcaires et marnes schisteuses (40.5%), argiles et marnes (23.1%) et calcaires (4.0%).

L'Oued Bouhamdane est formé par deux principales artères, l'Oued Zenati et l'Oued Sabath qui drainent respectivement une zone semi aride des Hautes Plaines (pluie moyenne : 450-550 mm) et une zone sub-humide du Tell méridional (pluie moyenne 550-650 mm). A la station de Guelma, la moyenne annuelle de la température de l'air est de 18.1°C (10°C en Janvier et 27.8°C en Août) et l'ETP (formule A.N.R.H.) s'élève à 1288 mm par an.

Les zones avec un couvert végétal naturel (chêne liège, maquis, reboisement) couvrent 31.7% de la surface du bassin dont 19.5% sont exploités comme terrains de parcours. La région connaît une forte activité agricole, essentiellement la céréaliculture qui occupe 58.1% de la surface du bassin et l'olivier autour de 1%.

1.1.2. Le barrage

Il est destiné principalement à l'irrigation du périmètre de la vallée de Guelma–Boucheougouf (12 900 ha) et à l'alimentation en eau potable de la ville de Guelma, située à 20 km à l'aval du barrage. La digue, d'une hauteur totale de 93 m, est construite en terre avec un noyau central argileux vertical. Sa longueur en crête est de 430 m et sa largeur de 9 m. Le barrage est équipé de deux évacuateurs de crue en puits de section circulaire, d'une vidange de fond et d'une tour de prise verticale.

Le lac de retenue a une capacité initiale de 200 hm^3 correspondant à une cote de Retenue Normale de 360 m. Le plan d'eau à la Retenue Normale s'étend sur une superficie de 6.43 km^2 , ce qui donne une profondeur moyenne du lac de 31 m.

Pour un apport interannuel de l'oued de 69 hm^3 , le volume régularisé retenu par l'étude d'Avant Projet Détaillé (APD) du barrage est de $55 \text{ hm}^3 \text{ an}^{-1}$. La crue maximale est estimée à $3500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

1.2. Les données de mesures hydrologiques

Les mesures directes de la concentration en MES effectuées à la station hydrométrique de Medjez Ammar 2 sont disponibles sur la période allant de Septembre 1969 à Août 1987, à l'exception de l'année 1983/1984, marquée par l'absence de données. Les mesures de concentration effectuées après Décembre 1987, date de mise en eau de la retenue, ne sont pas prises en compte car influencées par les lâchers du barrage.

En concomitance avec les mesures du débit liquide, l'A.N.R.H effectue des prélèvements journaliers d'eau (sous forme de flacons de 1 litre) pour la mesure des transports solides, avec une fréquence de prélèvement plus élevée (infra-journalière) en périodes de crues. Les échantillons sont traités au laboratoire : décantation, filtrage, séchage à l'étuve et pesée pour aboutir à la masse des résidus secs (concentration en $g L^{-1}$). Cependant, il faut noter que la technique de mesure de transport solide, basée sur un prélèvement unique à proximité de la berge, ne reflète pas la répartition réelle des concentrations dans la rivière. Touat (1989) signale une sous-estimation de 35 % par rapport à des prélèvements effectués sur plusieurs verticales et à différentes profondeurs de la section mouillée de l'un des oueds des Côtiers algérois.

L'évaluation des flux solides à partir des suivis discrets nécessite de prendre en compte les incertitudes inhérentes à la fréquence des mesures. Moatar et Meybeck (2007) proposent un abaque pour la prédiction a priori des quantiles des erreurs, comparant les flux estimés à partir des suivis discrets et les flux de référence (calculés avec l'ensemble des données journalières). Pour différentes fréquences de suivi des flux, l'abaque relie le biais (erreur systématique ou médiane des erreurs relatives) et l'imprécision (dispersion des erreurs relatives ou différence entre les quantiles 10 et 90%) à un indicateur annuel de variabilité des flux (m_2 , % du flux de MES transporté en 2% du temps ou année).

Pour le bassin de l'Oued Bouhamdane, l'intervalle de variation de m_2 se situe entre 17 et 97% (avec $m_2 > 40$ % pendant 30 années sur 33) alors que la moyenne interannuelle de l'indicateur de durée à 2% du temps (M_2) s'élève à 69%. Pour une fréquence mensuelle de suivi, l'abaque utilisé donne les résultats suivants : décile inférieur (e_{90}) : -90%; décile supérieur (e_{10}) : 100%; biais (e_{50}) : -55 % ; imprécision : 190%. Ces valeurs élevées s'expliquent par la distribution fortement asymétrique des flux journaliers de MES. Selon Moatar et Meybeck (2007), la prédiction du décile inférieur (e_{90}) est très difficile lorsque m_2 est > 40 %.

Les moyennes annuelles des concentrations, les valeurs maximales et les quantiles 98% sont calculés à partir des données disponibles; les lacunes concernant les prélèvements en saison d'été sont sans grande influence sur les paramètres calculés, en raison de la faiblesse voire l'absence de la turbidité durant la période d'étiage (tabl. 68).

Tableau 68: Répartition par année des prélèvements et valeurs caractéristiques des concentrations à la station de Medjez Ammar 2 (période: 1969/1970-1986/1987)

Année	Nombre de prélèvements	Moyenne C (g L ⁻¹)	Max C (g L ⁻¹)	Quantile 98% C (g L ⁻¹)	Moyenne C par saison (g L ⁻¹)			
					S.O.N.	D.J.F.	M.A.M.	J.J.A.
1969/1970	174	3.99	105.7	55.17	9.69	2.51	0.64	0.13
1970/1971	137	0.82	20.97	9.96	0.67	1.19	0.37	N.O.
1971/1972	119	0.48	7.82	4.56	N.O.	N.O.	0.59	0.13
1972/1973	331	1.18	33.76	7.25	0.32	1.69	0.94	N.O.
1973/1974	193	0.12	4.44	0.76	0.07	0.19	0.09	N.O.
1974/1975	128	0.30	8.82	2.96	N.O.	2.04	0.08	0.14
1975/1976	127	1.08	28.42	8.72	N.O.	0.52	3.20	0.22
1976/1977	118	0.79	11.58	7.73	1.58	0.05	0.25	N.O.
1977/1978	93	0.57	3.36	2.64	0.02	0.67	0.28	N.O.
1978/1979	86	0.67	3.1	2.34	N.O.	0.64	0.67	N.O.
1979/1980	31	3.29	19.48	17.3	3.25	N.O.	3.37	N.O.
1980/1981	122	1.59	71.24	18.13	3.05	0.78	0.60	N.O.
1981/1982	131	1.72	26.48	9.04	N.O.	2.32	1.07	N.O.
1983/1983	30	1.68	16.82	16.4	2.11	N.O.	0.24	N.O.
1983/1984	N.O.	N.O.	N.O.	N.O.	N.O.	N.O.	N.O.	N.O.
1984/1985	116	1.24	7.45	6.60	N.O.	1.46	0.96	N.O.
1985/1986	43	0.52	2.99	2.66	1.15	0.50	0.44	N.O.
1986/1987	201	3.36	53.33	25.3	8.16	1.87	0.99	N.O.

N.O.: Non Observé

Les concentrations en MES mesurées oscillent entre 0.01 et 105 g L⁻¹ pour une gamme de débits jaugés de 0.1 à 636 m³ s⁻¹ (tabl.69 et fig. 196, 197). La classe des concentrations en MES inférieure à 1 g L⁻¹ représente 78.6% des mesures ; 99.95% des valeurs mesurées sont inférieures à 100 g L⁻¹. La concentration des matières en suspension est variable d'une saison à l'autre, avec une fréquence des valeurs les plus fortes en automne, en liaison avec les pluies orageuses qui érodent les sols et transportent les particules érodées.

Tableau 69: Répartition par saison des intervalles de C et de Q mesurés à la station de Medjez Ammar 2

Saison	Intervalle des concentrations C (g L ⁻¹)	Intervalle des débits Q (m ³ s ⁻¹)	Date de la concentration maximale C max	Débit (m ³ s ⁻¹) correspondant à C max
Automne	0.02 à 105.7	0.085 à 490.2	23 Octobre 1969	6.5
hiver	0.01 à 33.8	0.087 à 632.6	25 Janvier 1973	244.4
Printemps	0.01 à 28.4	0.1 à 341	04 Mai 1976	1.8
Eté	0.02 à 0.58	0.066 à 1.05	12 Juin 1972	1.05

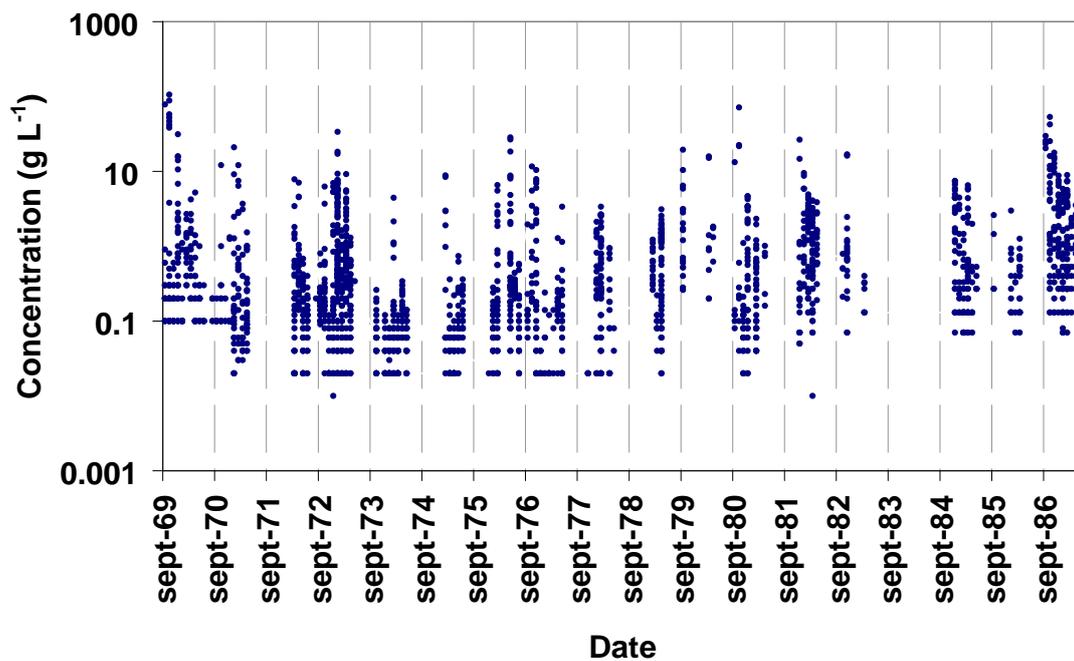


Fig. 196: Position dans l'année des mesures de concentration en MES et magnitude des concentrations à la station de Medjez Ammar 2

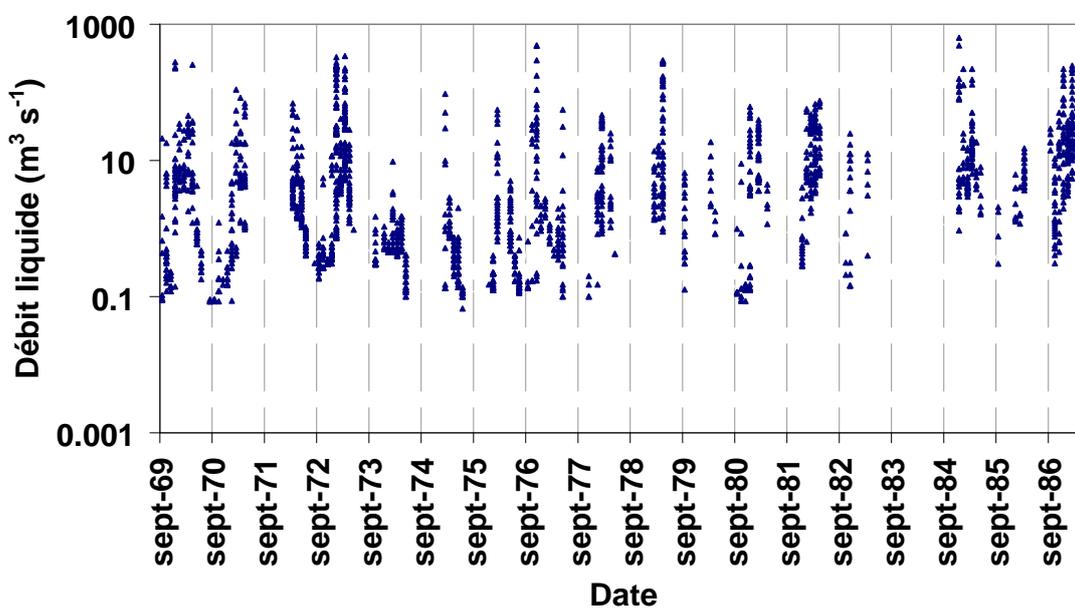


Fig. 197: Position dans l'année des mesures de débits liquides et magnitude des débits à la station de Medjez Ammar 2

Pour l'ensemble de l'échantillon des couples de mesures des concentrations C (g L^{-1}) et des débits liquides QL ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), la relation est statistiquement significative (avec $R=0.61$) au seuil de 1% (R tabulé=0.25 pour $N=100$ et plus). Il demeure toutefois possible qu'aux valeurs maximales de C ne correspondent pas forcément les valeurs de QL les plus élevées, (Liéno *et al.* 2009) (fig. 196 et 197).

1.3. Valorisation des données de mesures disponibles

1.3.1. Régression des données Qs_i - QL_i issues de la station hydrométrique

Des relations statistiques sont généralement établies entre les concentrations et les débits liquides (ou entre débits liquides et débits solides) lorsque les mesures de concentration sont réalisées avec une fréquence non continue dans le temps, (Phillips *et al.* 1999, Achite et Ouillon 2007). L'importante dispersion des points caractérisant les graphiques de régression, s'explique par le fait que les concentrations sont contrôlées par plusieurs facteurs (fourniture très variable des sédiments en fonction de leur disponibilité résultant de l'érosion et de leur remise en mouvement, effets saisonniers, conditions d'état du bassin-versant); les différences de disponibilité sont très importantes entre les saisons et pour les événements de crue (Asselman 2000).

Des modèles statistiques entre deux variables peuvent être élaborés : à partir des données instantanées issues des mesures, en calculant un débit moyen journalier pour les journées où une mesure est effectuée (Achite et Ouillon 2007), ou enfin en constituant des classes de débits (Jansson 1996, Khanchoul 2006).

Dans l'étude du bassin de Bouhamdane, la meilleure régression obtenue (avec un coefficient de corrélation $R=0.91$) est celle liant les débits solides Qs_i (kg s^{-1}) aux débits liquides QL_i ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), réalisée sur un échantillon de 2210 couples de valeurs de mesures instantanées (Fig. 198). La fonction calculée, de type puissance, est la suivante:

$$Qs_i = 0.1668 \times QL_i^{1.4999}$$

Cette corrélation est utilisée pour l'évaluation des débits solides au pas de temps journalier (Qs_j) à partir de la chronique des débits moyens journaliers (QL_j), disponible sur la période de Septembre 1969 à Août 1987.

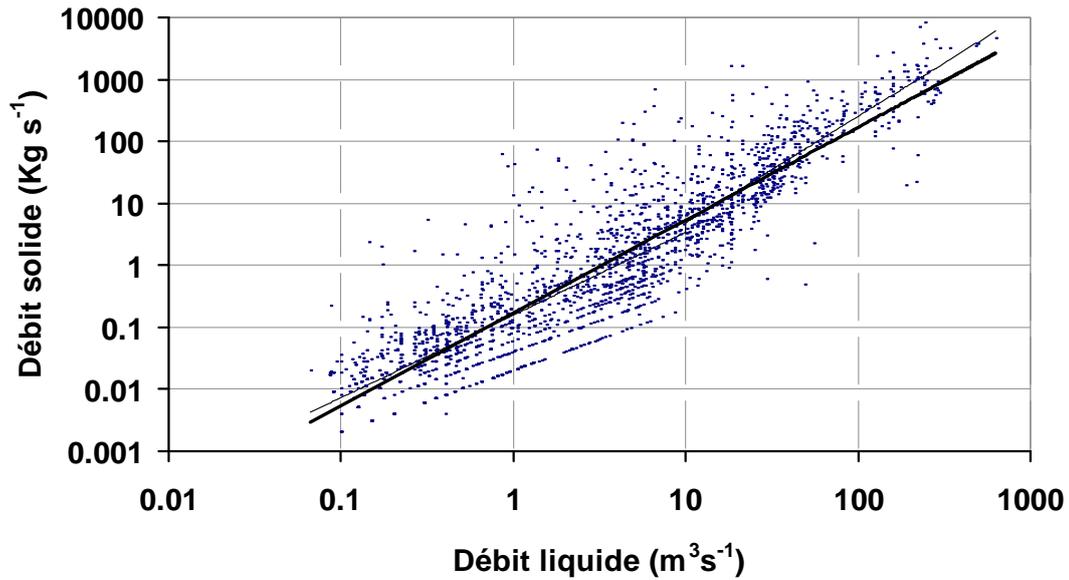


Fig. 198: Relation débits liquides instantanés–débits solides

Deux comportements différents entre $QL < 10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et $QL > 10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ont été mis en évidence sur l'échantillon des couples de mesures où 2 droites différentes (pente plus forte au-delà de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) peuvent être ajustées (Fig. 198). Ainsi, l'apport solide spécifique interannuel moyen (affecté du coefficient de correction CF calculé plus loin) augmente de $35.8 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (+13%) pour la période de suivi des mesures par la station hydrométrique (Septembre 1969-Août 1987) et de $40.3 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (+14%) pour la période d'exploitation du barrage (Septembre 1995-Août 2010). L'écart peut devenir important pour les années hydrologiques marquées par de fortes crues (+27.5% en 1984/1985 ; +19% en 2002/2003).

1.3.1.1. Facteur de correction

Les relations statistiques couvrent toute la panoplie des concentrations et des débits observés en hautes, moyennes et basses eaux. En général, la charge en sédiments d'un cours d'eau est sous-estimée (jusqu'à 60%, voire plus) lorsque les débits solides sont calculés à partir des débits liquides en utilisant la méthode des moindres carrés et en appliquant une anamorphose logarithmique aux variables, (Jansson 1985, Ferguson 1986 et 1987, Phillips *et al.* 1999, Asselman 2000, Verstraeten et Poesen 2002). Pour parer à la sous-estimation de l'apport de sédiments par les courbes d'étalonnage (de l'ordre de 55% dans le cas de l'Oued de Bouhamdane), le facteur de correction CF de Jansson, d'une valeur de 2.365, est appliqué à l'ensemble des débits solides journaliers Q_{s_j} obtenus:

$$Q_{s_j} = 0.1668 \times QL_j^{1.4999} \times 2.365$$

Le facteur de correction de Jansson est calculé à partir de l'erreur quadratique de la régression logarithmique entre C_i et QL_i :

$$CF = 10^{(1.1513t^2)}$$

où CF , facteur de correction et $\sigma^2 = 1/(N-1) \sum (\log_{10} C_i - \log_{10} C'_i)^2$, variance des logarithmes des écarts entre les concentrations mesurées C_i et les concentrations estimées C'_i par la courbe de régression $C_i - QL_i$.

1.3.1.2. Extension de la série de débits solides journaliers au barrage

Sur la base de la régression calculée, une seconde série de débits solides journaliers (Q_{sj}), étalée sur 15 ans (de Septembre 1995 à Août 2010), a été générée au site du barrage Hammam Debagh à partir des apports liquides journaliers. Les débits liquides sont estimés par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (A.N.B.T.) en appliquant le bilan de régularisation de la retenue. Le facteur de correction affecté aux Q_{sj} de cette seconde série du barrage est celui mis au point pour la série de données issue de la station hydrométrique.

Pour rappel, le bilan d'eau du réservoir s'obtient par la relation suivante :
 $Q(t, t+dt) = [\text{Capacité}(t+dt) - \text{Capacité}(t) - \text{Volume Entrant} + \text{Volume Sortant}] / dt$

La précision du calcul du Volume Entrant ("affluent", selon l'A.N.B.T.) dépend de la fiabilité de la courbe de remplissage du barrage [$\text{Capacité}(t) = f(\text{cote du plan d'eau à } t)$] dont la stabilité dans le temps est influencée par l'envasement.

2. VALEURS ANNUELLES, VARIABILITE ET FACTEURS CONDITIONNELS DU TRANSPORT SOLIDE

2.1. A l'échelle de l'Oued Bouhamdane

La moyenne interannuelle du transport solide spécifique (TSS) est estimée à la station hydrométrique à $237.5 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Pour cette première série, en moyenne interannuelle, la lame d'eau écoulée (E) observée est de 81 mm pour une hauteur précipitée (P) de 589 mm, soit un coefficient d'écoulement C_e de 13.8%. La valeur de TSS la plus faible observée pendant l'année hydrologique particulièrement sèche 1973/1974 (P=363 mm ; E=12 mm) est de $3.66 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$, et la valeur la plus forte enregistrée pendant l'année très pluvieuse 1984/1985 (P=786 mm ; E=241 mm) atteint $1250 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (Tableau 70).

La moyenne interannuelle de TSS correspondant à la période d'exploitation du barrage n'est pas significativement différente ($281.4 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) de celle de la précédente série. Les valeurs annuelles extrêmes sont respectivement de $0.57 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ en 1996/1997 (année également hyper sèche: P=347 mm ; E=2 mm) et de $1396 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ en 2004/2005, année dont l'abondance hydrologique (E=380 mm) dépasse celle de 1984/85.

Tableau 70: Valeurs du transport solide spécifique et des paramètres hydrologiques à la station hydrométrique et au barrage

Paramètre	Station hydrométrique Medjez Amar 2 (Septembre 1969- Août 1987)			Barrage Hammam Debagh (Septembre 1995- Août 2010)		
	TSS (t km ⁻² an ⁻¹)	P1 (mm)	E (mm)	TSS (t km ⁻² an ⁻¹)	P2 (mm)	E (mm)
Moyenne	237.5	588.8	80.6	281.4	608.5	85.2
Ecart-type	327.6	124.9	67.9	445.9	170.9	110.3
Cv%	137.9	21.2	84.2	158.5	28	129.5
Maximum (année)	1250 (1984/1985)	785.8 (1984/1985)	240.9 (1984/1985)	1396 (2004/2005)	887.1 (2002/2003)	379.5 (2004/2005)
Minimum (année)	3.66 (1973/1974)	362.7 (1973/1974)	11.8 (1973/1974)	0.57 (1996/1997)	346.8 (1996/1997)	2.04 (1996/1997)

TSS: transport solide spécifique

P1 : lame d'eau précipitée annuelle calculée à partir des observations de six postes pluviométriques (Bordj Sabath, Guelma, Constantine, Bou Snib, Ain Makhlouf, Bouati Mahmoud)

P2 : lame d'eau précipitée annuelle calculée à partir des observations de six postes pluviométriques (Bordj Sabath, Barrage Hammam Debagh, Ras El Akba, Bou Snib, Ain Makhlouf, Bouati Mahmoud)

E : Ecoulement moyen annuel

La variabilité de la charge solide en suspension est remarquable (coefficient de variation supérieur à 100 %), bien supérieure à celle de la pluie (tabl. 70). En général, les variations annuelles du transport solide de l'Oued Bouhamdane suivent étroitement celles de l'écoulement, avec une répartition statistique dissymétrique autour de la moyenne des 2 séries (257 t km⁻² an⁻¹), 25 valeurs lui sont inférieures et 8 lui sont supérieures (fig.199):

- 4 valeurs annuelles sont inférieures à 10 t km⁻² an⁻¹, correspondant aux années sèches (1996/1997, 2001/2002, 1973/1974, 1979/1980) où P se situe entre 347 et 476 mm an⁻¹ et E entre 2 et 13 mm an⁻¹;
- 12 valeurs sont comprises entre 10 et 100 t km⁻² an⁻¹, avec P situé entre 411-676 mm an⁻¹ et E entre 13-58 mm an⁻¹;
- 9 valeurs sont comprises entre 100 et 250 t km⁻² an⁻¹ avec P oscillant entre 547 et 730 mm an⁻¹ et E entre 42 et 110 mm an⁻¹;
- 8 valeurs sont supérieures à 250 t km⁻² an⁻¹ dont 3 valeurs particulièrement fortes, supérieures à 1000 t km⁻² an⁻¹, ont été observées en 1984/1985 (1250), en 2002/2003 (1281) et en 2004/2005 (1396) pour un apport pluviométrique respectif de 786, 887 et 662 mm an⁻¹.

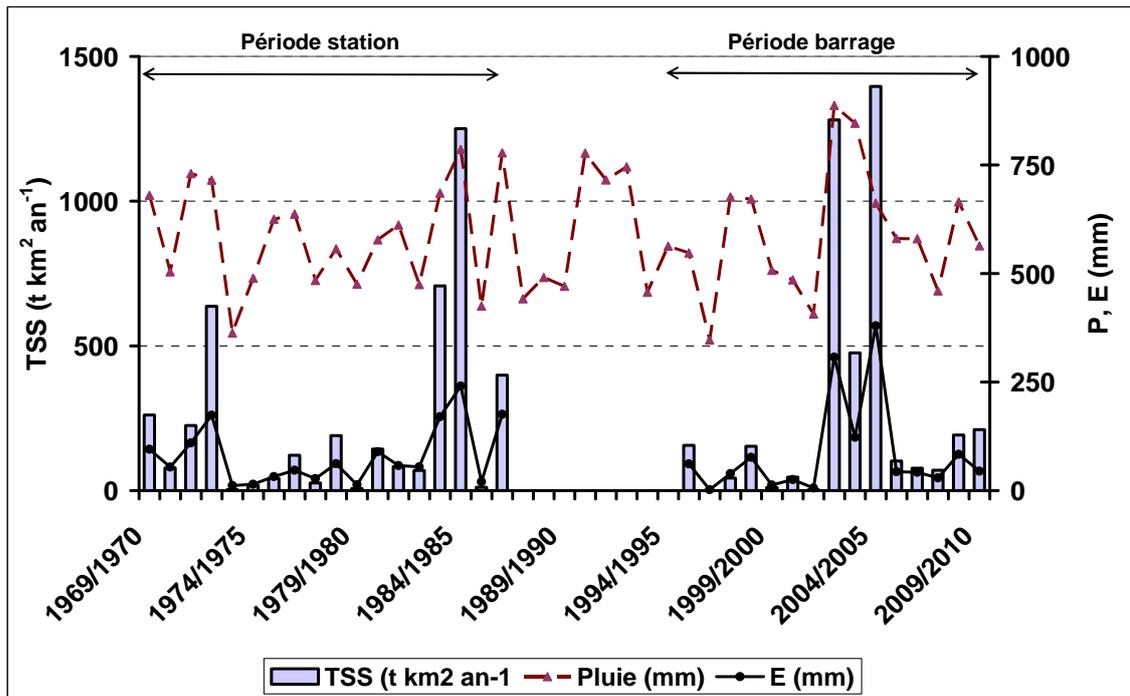


Fig. 199: Variations annuelles du transport solide spécifique (TSS), de l'écoulement (E) et des précipitations (P) (période: 1969/1970 - 2009/2010)

2.2. Comparaison avec les bassins d'Algérie du Nord

Le transport solide spécifique, calculé sur l'Oued Bouhamdane, correspond en ordre de grandeur aux résultats obtenus sur les bassins de la Seybouse et des Côtiers constantinois (Est algérien), respectivement par Demmak (1982) et Khanchoul (2006) (tabl.71).

Dans le bassin du Chéelif, la charge solide mesurée sur deux bassins semi-arides de l'Oued Mina ($65 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ sur l'Oued Abd ; $212 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ sur l'Oued Haddad) connaît une variabilité interannuelle respective de 62 et 113 % (Achite et Meddi 2005). Dans le bassin de la Tafna, le TSS est très variable dans l'espace et dans le temps, allant de $170 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour l'Oued Sikkak ($4\text{-}745 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) à $938 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour l'Oued Sebdu ($107\text{-}3700 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) (Bouanani 2005). Une valeur moyenne plus importante, de l'ordre de $1330 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$, est signalée sur la Haute Tafna (Ghenim *et al.* 2007).

Sur le piémont Sud de l'Aurès (Atlas saharien), la charge solide spécifique moyenne est de $401 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour l'Oued El Abiod et de $539 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour l'Oued El Arab ; elle est de $344 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour l'Oued Ksob dans le Chott Hodna (Demark, 1982).

Tableau 71: Résultats de TSS obtenus sur des bassins d'Algérie du Nord

Oued (Bassin)	Station	Période de mesure	Méthode de calcul des flux	Erosion spécifique $t\ km^{-2}\ an^{-1}$	Auteur, Année
Ressoul (Seybouse)	Ain Berda	Septembre 1972 -Août 1979	Régressions Saisonnières $Q_s=b*Q_L^a$	214.1	Demmak, 1982
El Hammam (Côtiers Constantinois)	Zit Emba	Septembre 1972 -Août 1979	Régressions Saisonnières $Q_s=b*Q_L^a$	197.5	Demmak, 1982
Kébir-Ouest (Côtiers Constantinois)	Ain Cherchar	Septembre 1972 -Août 1979	Régressions Saisonnières $Q_s=b*Q_L^a$	91.6	Demmak, 1982
Ressoul (Seybouse)	Ain Berda	Septembre 1975 - Août 1997	2 équations (montée et décru) $Q_s=b*Q_L^a$	210	Khanchoul, 2006
Bouhamdane (Seybouse)	Medjez Ammar 2	Septembre 1975 - Août 1997	2 équations (montée et décru) $Q_s=b*Q_L^a$	256.8	Khanchoul, 2006
Kebir-Est (Côtiers Constantinois)	Ain Assel	Septembre 1975 - Août 1997	2 équations (montée et décru) $Q_s=b*Q_L^a$	236.4	Khanchoul, 2006
Saf-Saf (Côtiers Constantinois)	Khemakhem	Septembre 1975 - Août 1997	2 équations (montée et décru) $Q_s=b*Q_L^a$	533	Khanchoul, 2006
Abd Mina (Chélif)	Takhmart	Septembre 1973 - Août 1995	Régression unique $Q_s=b*Q_L^a$	65	Achite et Meddi, 2005
Haddad Mina (Chélif)	Sidi Abdelkader Djillali	Septembre 1973 - Août 1995	Régression unique $Q_s=b*Q_L^a$	212	Achite et Meddi, 2005
Oued Seb dou (Tafna)	Beni Bahdel	Septembre 1985 -Août 1998	Régression unique $Q_s=b*Q_L^a$	1330	Ghenim <i>et al.</i> , 2007
Seb dou (Tafna)	Beni Bahdel	Septembre 1985 - Août 1998	Régressions saisonnières $Q_s=b*Q_L^a$	938	Bouanani, 2005
Mouilah (Tafna)	Sidi Belkhir	Septembre 1977 - Aout1995	Régressions saisonnières $Q_s=b*Q_L^a$	364	Bouanani, 2005
Isser (Tafna)	Sidi Aissa	Septembre 1988 Août 1998	Régressions saisonnières $Q_s=b*Q_L^a$	180	Bouanani, 2005
Sikkak (Tafna)	Ain Youcef	Septembre 1972 - Août 1990	Régressions saisonnières $Q_s=b*Q_L^a$	170	Bouanani, 2005
El Abiod (Chott Melghir)	M'chounech	Septembre 1972 -Août 1979	Régressions saisonnières $Q_s=b*Q_L^a$	401.2	Demmak, 1982
El Arab (Chott Melghir)	Khangat Sidi Nadji	Septembre 1972 -Août 1979	Régressions saisonnières $Q_s=b*Q_L^a$	539.1	Demmak, 1982
Ksob (Chott Hodna)	Medjez	Septembre 1972 -Août 1979	Régressions saisonnières $Q_s=b*Q_L^a$	344	Demmak, 1982

Le bassin de l'Oued Bouhamdane se range dans la plus faible des quatre classes de valeurs de turbidité et de TSS définies par Kouti et Taabni (1989) à partir des travaux de Demmak (1982) et de SOGREA (1983) (tabl. 72). Il s'oppose aux bassins à forte dégradation spécifique comme celui de l'Oued Agrioun dans la Kabylie de Béjaia (5000 t km⁻² an⁻¹). Le taux d'érosion modéré du bassin étudié s'explique principalement par la lithologie (présence notable de formations gréseuses et faible surface occupée par les marnes), et également le couvert végétal (forêt, maquis, cultures annuelles) qui assure une protection relativement efficace des sols et des versants.

Tableau 72: Valeurs annuelles moyennes du transport solide en suspension dans quelques oueds algériens à l'amont des barrages (d'après Kouti et Taabni, 1989)

Turbidité (g L ⁻¹)	TSS (t km ⁻² an ⁻¹)	Bassins
16 à 28	>2000	Oued Agrioun, Bou Roumi, Fodda, Hamiz, Djen Djen, Sly.
1.2 à 20	1000 à 2000	Oued Rhiou, Cheliff, Saf-Saf, Rouina, Fergoug.
3.2 à 16	500 à 1000	Oued Sarno, Boudouaou, El Abiod
0.1 à 9	20 à 500	Oued Mina, Bou Namoussa, Deurdeur, Tafna, Isser, Guir, Mabtouh, Maffrouch, Bou Hamdane, Ksob, El Hammam.

3. LA VARIABILITE INTRA-ANNUELLE DES APPORTS SOLIDES

3.1. Le régime moyen saisonnier

Les débits mensuels de l'Oued Bouhamdane observés à la station de Medjez Ammar 2, se caractérisent par l'opposition nette entre une période de hautes eaux et une période de basses eaux (tabl. 73).

En régime moyen, les flux solides s'élèvent par ordre d'importance à 70.1 t km⁻² mois⁻¹ en Décembre, à 52.7 t km⁻² mois⁻¹ en Février, à 49.9 t km⁻² mois⁻¹ en Janvier, à 33.1 t km⁻² mois⁻¹ en Mars, à 20.6 t km⁻² mois⁻¹ en Avril et à 7.4 t km⁻² mois⁻¹ en Novembre. Les coefficients de variation les plus élevés sont enregistrés en Novembre (350%), Décembre (290%) et Février (270%).

La part majoritaire (72.7% dont 29.5% en Décembre) du total annuel des sédiments véhiculés par l'Oued Bouhamdane est enregistrée pendant les mois d'hiver, générée par 60% de l'écoulement annuel. La saison de printemps vient en seconde position avec 23.2% de la charge solide annuelle produite par 33.7% des écoulements. La part respective de TSS des saisons d'automne (4%) et d'été (0.1%) est extrêmement faible, en raison de la faiblesse des écoulements, marqués par des étiages sévères en Juillet et Août.

Tableau 73: Répartition mensuelle et saisonnière des débits et de TSS à la station hydrométrique de Medjez Ammar 2 (période moyenne:1969/1970-1986/1987)

Mois	Q moyen m ³ s ⁻¹	% mois	% saison	TSS moyen t km ² mois ⁻¹	% mois	% saison
S	0.4	1.1		1.0	0.4	
O	0.5	1.5		1.1	0.5	
N	0.6	1.8	44	7.4	3.1	4.0
D	5.2	15.9		70.1	29.5	
J	7.1	21.6		49.9	21.0	
F	7.5	22.8	60.3	52.7	22.2	72.7
M	6.0	18.2		33.1	13.9	
A	4.2	12.7		20.6	8.7	
M	0.9	2.8	33.7	1.4	0.6	23.2
J	0.3	0.9		0.2	0.1	
J	0.1	0.4		0.1	0.0	
A	0.1	0.3	1.6	0.0	0.0	0.1
% année		100	100		100	100

3.2. Variabilité du régime : années humides et années sèches

Le régime des transports solides en suspension n'est pas identique d'une année à l'autre. Les courbes mensuelles d'apport solide renseignent sur la forte variabilité du régime saisonnier pendant les années à forte hydraulicité (Fig. 200 a, b, c, d) :

- (a) en 1984/1985, un pic principal hivernal est enregistré en Décembre, avec un apport en sédiments de 970×10^3 tonnes (soit $877 \text{ t km}^{-2} \text{ mois}^{-1}$) contribuant à 70% du total annuel. Après un maximum secondaire modéré en mars (51.7×10^3 tonnes), les écoulements solides et liquides s'amenuisent considérablement;
- (b) en 2004/2005, l'apport solide estimé au site du barrage (comparable à celui mesuré en 1984/1985 à la station hydrométrique) se traduit par un régime nettement bimodal : un premier maximum automnal (612.7×10^3 tonnes, soit $573 \text{ t km}^{-2} \text{ mois}^{-1}$) en Novembre et un second maximum hivernal (310×10^3 tonnes, soit $290 \text{ t km}^{-2} \text{ mois}^{-1}$) en Février. Il épouse fidèlement le régime d'écoulement. Les apports liquides au barrage ont été exceptionnels en Novembre (109 hm^3) et Février (104 hm^3), contribuant avec respectivement 27.5% et 26% à l'apport total de l'année ;
- (c) la courbe de l'apport solide de 2002/2003 (1370×10^3 tonnes, soit $1281 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) présente une allure identique (pic principal en Janvier), le deuxième pic étant reporté au mois d'Avril ;
- (d) l'année 1972/1973 (703.4×10^3 tonnes, soit $636 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) se distingue par une correspondance entre les apports mensuels solides et liquides et, par ailleurs, le décalage du pic principal qui devient printanier en Mars (403.2×10^3 tonnes), alors que le pic secondaire se situe en Janvier (259.6×10^3 tonnes).

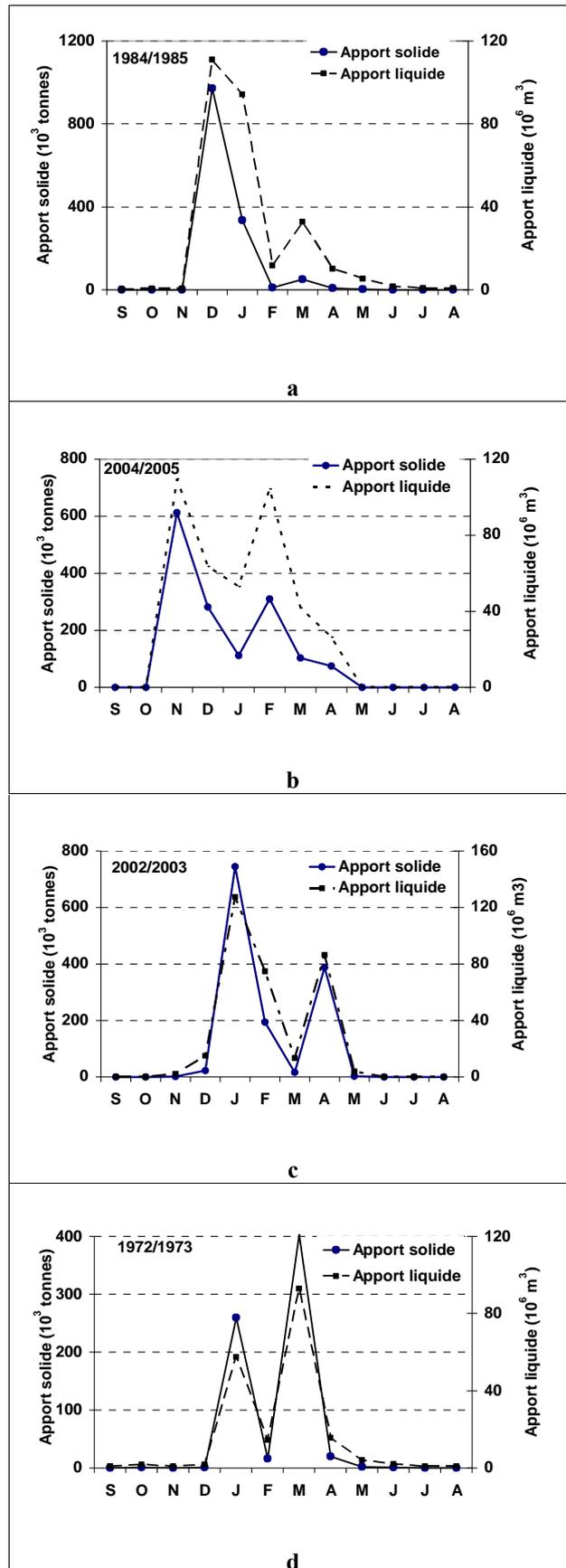


Fig. 200: Régime des transports solides et des écoulements des années pluvieuses (a: 1984/1985 ; b: 2004/2005 c : 2002/2003, d : 1972/1973)

Pendant les années sèches 1973/1974 et 1996/1997, caractérisées par une réduction exceptionnelle de l'écoulement annuel (11.8 et 2.04 mm), l'Oued Bouhamdane a enregistré les apports solides les plus faibles (fig. 201). L'apport solide a été nul pendant les 5 premiers mois (de Septembre à Janvier) de l'année 1996/1997, lié à l'absence ou faiblesse notable des précipitations ; après le redressement de la courbe en Mars, on constate un amenuisement sévère des apports solides et liquides à partir du mois de Mai.

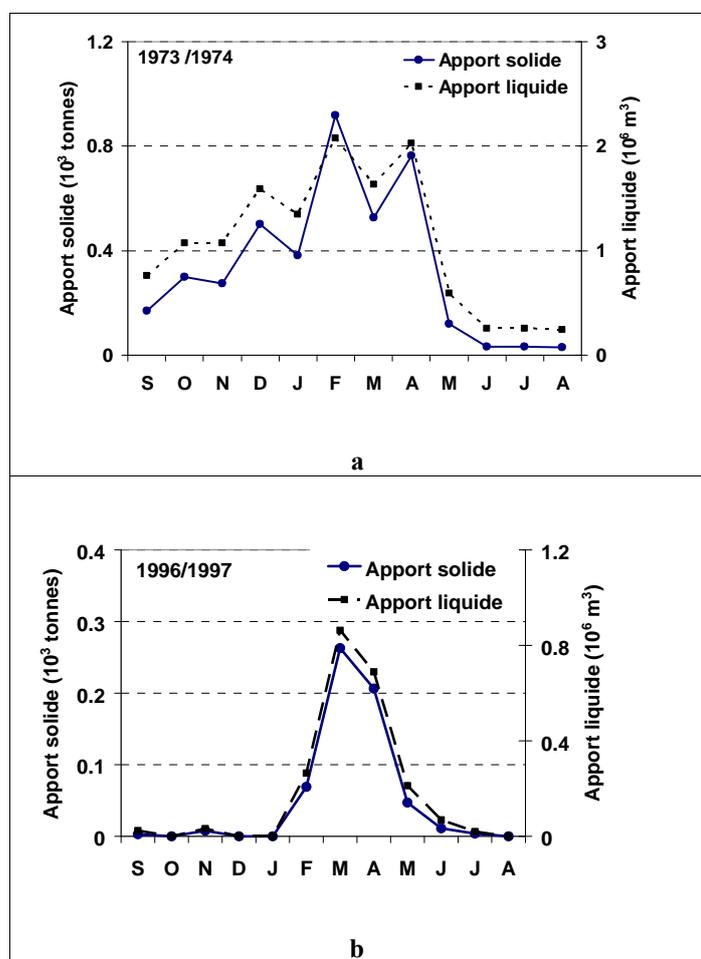


Fig. 201: Régime des transports solides et des écoulements des années sèches (a: 1973/1974 ; b: 1996/1997)

3.3. Variabilité journalière des flux solides et liquides

L'exemple de l'année pluvieuse 1972/1973 montre que l'hydrogramme et la courbe des débits solides suivent globalement les mêmes variations journalières (fig.202). Succédant à une longue période de faibles écoulements, le premier pic du débit solide moyen journalier du 24 Janvier (521 kg s^{-1} pour un débit liquide moyen journalier de $212 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) est suivi d'un second pic plus important (957 kg s^{-1} correspondant à un débit de $318 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) enregistré le 27 Mars. La décroissance des écoulements journaliers, entamée en Avril, se prolonge jusqu'à Juillet et Août, période où les concentrations en MES sont faibles ou quasiment nulles, seul QL contrôle l'allure de la courbe de Qs en étiage. Dans le détail, à cause des variations dans la disponibilité et la fourniture des sédiments alimentant la charge solide des oueds, la variabilité journalière (et infra-journalière) des

débites solides ne se calque pas étroitement sur celle des débits liquides, comme le montrent les deux épisodes pour lesquels on dispose à la fois des mesures de Q_s et de Q_L (fig. 202).

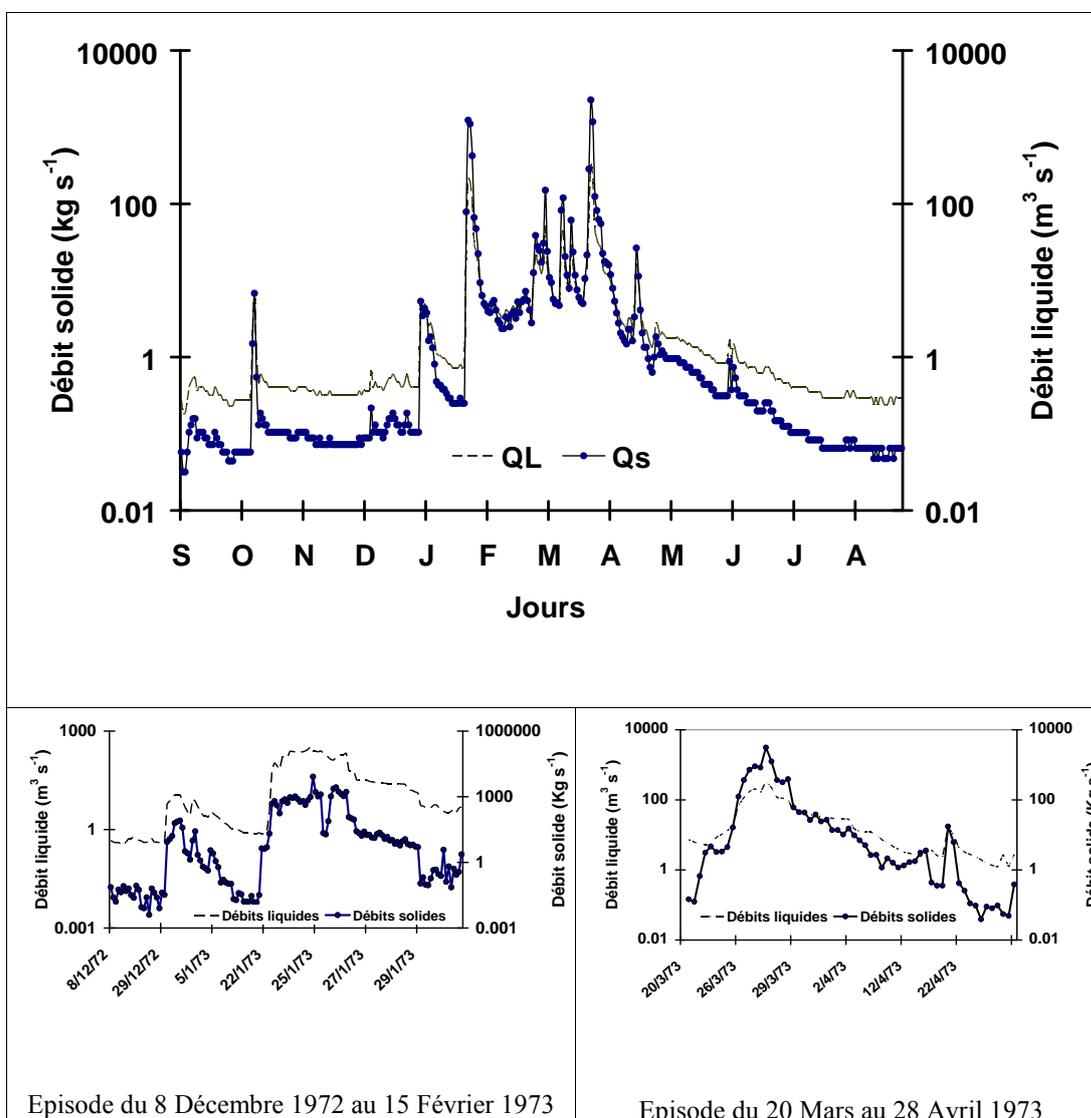


Fig. 202 : Débits liquides et débits solides journaliers (1972/1973)

Pour 2004/2005, les crues journalières maximales à l'origine des apports solides de l'année ont été enregistrées par ordre d'importance : en Novembre 2004 (avec un pic de $390 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ enregistré le 14 Novembre, engendrant un débit solide de 3076 kg s^{-1}), en Décembre 2004 ($314 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 31 Décembre avec $Q_s = 2226 \text{ kg s}^{-1}$) et en Février 2005 ($127 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 10 Février avec $Q_s = 570 \text{ kg s}^{-1}$). Ces valeurs sont à relier aux épisodes pluvieux ayant affecté le bassin : pour un total mensuel de 190.5 mm enregistré en Novembre 2004 à la station de Bordj Sabath, 131.5 mm de pluie ont été cumulés en 3 jours successifs, avec un maximum journalier de 97 mm atteint le 13 du même mois. En Février 2005, le total mensuel a été de 110 mm avec un maximum journalier de 23 mm enregistré le 9 du même mois.

Pour l'ensemble des chroniques de la période retenue (Septembre 1969-Août 1987 et Septembre 1995- Août 2010), la variabilité journalière des flux de MES et des flux liquides est étudiée grâce aux courbes de durée (Moatar *et al.* 2006). Celles-ci permettent de déterminer les flux solide et liquide véhiculés en 1%, 2%, 10% du temps. On retient comme descripteur principal m_2 , le pourcentage du flux solide atteint en 2% du temps (approximativement 7 jours dans l'année). Dans le bassin de l'Oued Bouhamdane, la moyenne interannuelle (M_2) est de 69%, avec une amplitude des valeurs annuelles de m_2 , allant de 17% (1973/1974) à 97% (2009/2010). L'indicateur de variabilité des flux liquides (vw_2 , % du flux d'eau transporté en 2% du temps), varie de 9% (1973/1974) à 77% (2009/2010) ; la moyenne interannuelle (Vw_2) est de 44 %.

Pour les années caractérisées par de fortes crues, m_2 et vw_2 prennent des taux très élevés : respectivement 81.3 et 52% pour l'année 1972/1973; 87 et 58% pour l'année 1984/1985 (fig. 203). Cependant, pour l'année 2004/2005, les flux de matière (54%) et d'eau (32.1%) transportés en 2% du temps sont moins élevés en raison de l'étalement des événements hydrologiques (débits liquides et solides) sur trois mois de l'année (Novembre, Décembre 2004 et Février 2005).

4. CONSEQUENCES SUR L'ENVASEMENT DU BARRAGE

4.1. Envasement calculé et envasement mesuré

La valeur de TSS calculée au barrage Hammam Debagh est de $281.4 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (période moyenne : 1995/1996 – 2009/2010). Si on doit tenir compte du charriage, généralement estimé à 15 % du transport en suspension (Remini *et al.* 2004, PNUD 1987), la dégradation spécifique du bassin versant atteint $323.6 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

Partant de ces données et considérant une densité moyenne des sédiments de 1.2, l'envasement pour les 15 années d'exploitation du barrage est de 4.33 hm^3 , soit un envasement annuel moyen de $0.29 \text{ hm}^3 \text{ an}^{-1}$. Pour une densité de 1.6, le taux de sédimentation descend à $0.22 \text{ hm}^3 \text{ an}^{-1}$. Il est à noter que d'autres sources d'apport solide peuvent alimenter la retenue du barrage: apports éoliens, apports sableux non pris en compte dans les MES et dans le charriage, production de sédiments à partir du plancton dans la retenue, apports par érosion rivulaire due au batillage, apports de débris végétaux aquatiques ou aériens...

Par ailleurs, la campagne bathymétrique réalisée en 2004 par l'A.N.B.T. a abouti à un volume de sédimentation de 15.65 hm^3 , soit un envasement moyen de $0.98 \text{ hm}^3 \text{ an}^{-1}$. Pour une densité de 1.6, la dégradation spécifique s'élève à $914 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$, valeur bien plus forte que celle calculée à l'aide des mesures hydrométriques ($323.6 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$). L'étude d'APD a retenu $0.53 \text{ hm}^3 \text{ an}^{-1}$ comme valeur d'envasement moyen, soit une dégradation moyenne de $792 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$, alors que les calculs de Touaibia (2004, 2010) fixent l'érosion spécifique à $505 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

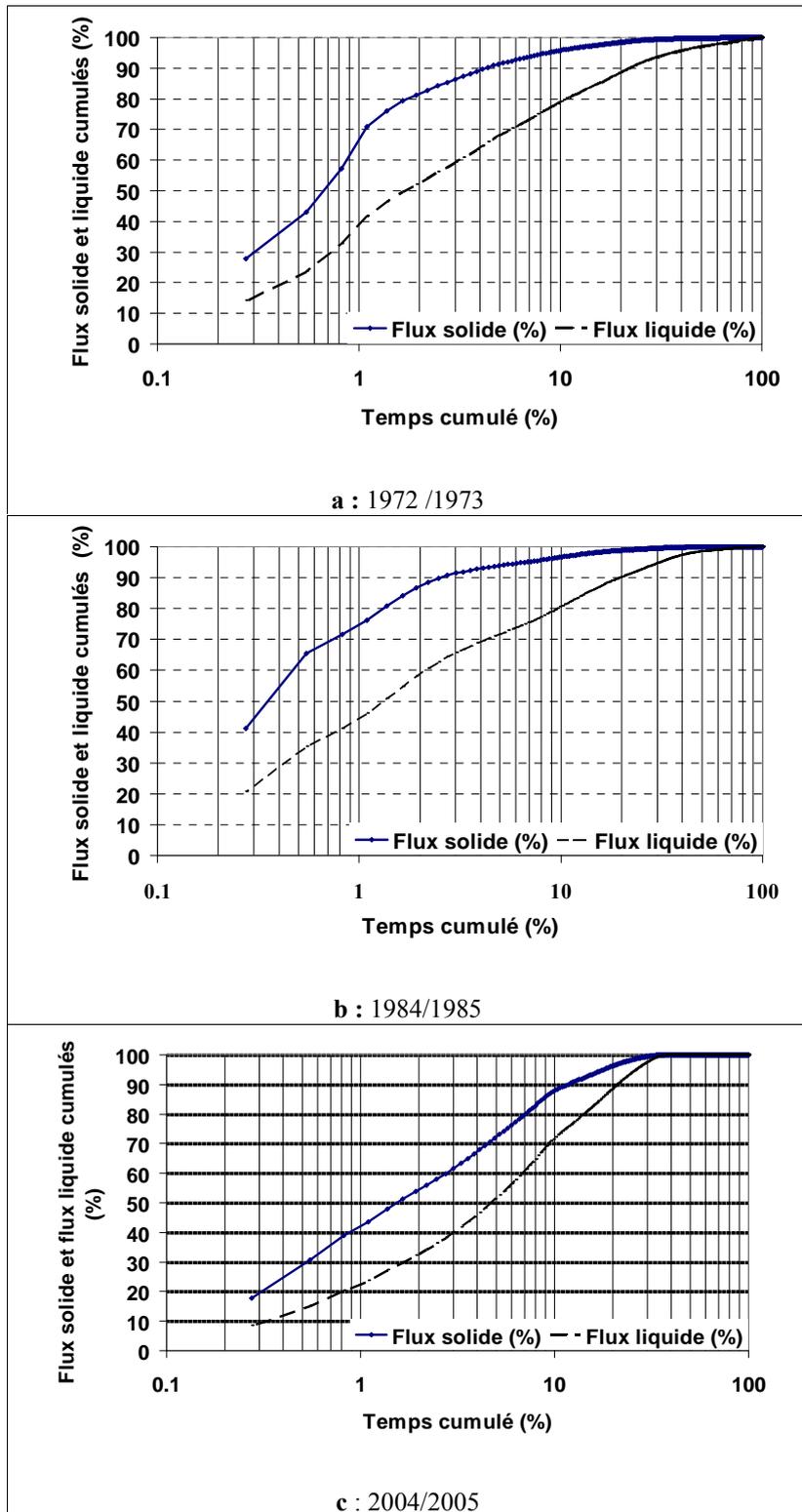


Fig. 203 : Courbes de durée de flux solides et liquides de l'Oued Bouhamdane :
a: 1972/1973, b: 1984/1985, c: 2004/2005

En général, les mesures aux stations hydrométriques sous-estiment les apports solides des oueds. En comparant les apports solides mesurés aux stations hydrométriques et les calculs d'envasement aux barrages qu'elles contrôlent, Demmak (1982) a mis en évidence des écarts importants : -31% (barrage du Ksob), -54% (barrage de Foum El Gherza) et -71% (barrage de Foum El Gueiss).

Les écarts sont à lier aux techniques de mesures spécifiques aux stations hydrométriques et à celles relatives à la bathymétrie : charriage non mesuré dans les stations, incertitudes sur la détermination de la densité des sédiments accumulés dans les retenues, volumes soutirés ou déversés par les barrages et sédiments associés... (Demmak 1982, Abdellaoui *et al.* 2002, Remini et Hallouche 2004).

4.2. Pertes de capacité du barrage

En 2004, la perte de capacité du barrage Hammam Debagh représente 7.8% de la capacité initiale, soit une perte moyenne de près de 0.5% par an. Il se classe dans la catégorie des retenues de faible envasement (Remini et Avenard 1999).

Pour les barrages algériens, Kassoul (1999) cite des pertes de capacité allant de 1.52% pour le barrage de Sarno (entre 1954 et 1986 soit 32 ans) à 62.94% pour le barrage de Boughzoul (entre 1934 et 1986 soit 52 ans).

A titre de comparaison, en Tunisie les barrages perdent chaque année entre 0.5 et 1% de leur capacité initiale (Ben Mammou et Louati, 2007). Les pertes de capacité rapportées par Badraoui et Hadji (2001) et Lahlou (2005) pour le Maroc sont très variables, allant de 0.05% pour le barrage de Abdelmoumen à 5.71% pour le barrage de Sidi Driss, la moyenne étant de 1.09%.

CONCLUSION DU CHAPITRE 8

La valorisation des données (débits liquides et concentrations) du bassin de l'Oued Bouhamdane a été réalisée par l'application d'un modèle statistique de type puissance (régression unique). En valeurs moyennes, la charge solide spécifique calculée sur deux séries distinctes (237.5 et 281.4 t km⁻² an⁻¹) est relativement modeste.

La variabilité des transports solides est très forte à l'échelle interannuelle, les extrêmes variant de 0.57 t km⁻² an⁻¹ en 1996/1997 à 1396 t km⁻² an⁻¹ en 2004/2005. A l'échelle intra-annuelle, cette variabilité est encore plus fortement influencée par les facteurs hydroclimatiques, particulièrement en saison de hautes eaux. La quasi-totalité de l'apport solide est réalisée pendant les saisons d'hiver et de printemps. Le descripteur principal (M₂) de la variabilité journalière établi à partir des courbes bi-fréquentielles, situe à 69% la moyenne interannuelle des flux de MES transportés en 2% du temps, avec une forte amplitude d'une année à l'autre. Il montre le fort taux de contribution des événements de crues à la production des flux de MES. L'indicateur de variabilité des flux liquides (Vw₂), quant à lui, situe à 44 % la moyenne interannuelle du débit véhiculé en 2% du temps.

D'après les résultats de la bathymétrie, l'envasement annuel moyen du barrage Hammam Debagh se situe autour de 0.98 hm³ an⁻¹, soit en termes de dégradation spécifique 914.3 t km⁻² an⁻¹, valeur bien supérieure à celle calculée à partir des mesures de transport en suspension de l'A.N.R.H.

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Avec la constitution progressive par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.) d'une banque de données de mesures hydrologiques, les études sur les transports solides des oueds algériens et l'envasement des barrages se sont multipliées au cours de ces trois dernières décennies.

L'étude des transports solides en suspension dans les bassins algériens est conditionnée par les limites liées aux mesures hydrométriques (prélèvement unique à proximité de la berge, faible fréquence des mesures).

Grâce aux bases d'informations, on a procédé à une analyse des apports solides aux quatre stations hydrométriques, réparties de l'amont à l'aval du bassin de la Seybouse, et ayant fonctionné sur la période commune de Septembre 1971 à Août 1988.

Les concentrations les plus fortes ont été enregistrées aux stations de Bouhegouf sur l'oued Mellah, et Medjez Ammar II sur l'oued Bouhamdane. Par contre, les concentrations mesurées aux stations d'Aioun Settara sur l'oued Cherf et d'Ain Berda sur l'oued Ressoul sont relativement faibles.

Sur les données de mesures des stations hydrométriques contrôlant les sous-bassins de la Seybouse, on a noté une très forte variabilité des valeurs de concentrations mesurées qui a permis de poser le problème des mesures:

- technique de mesure des concentrations dans les oueds :
- échantillonnage insuffisant à la fois par rapport aux abscisses (largeur de l'oued) et par rapport aux ordonnées (les profondeurs);
- faible fréquence des mesures et organisation de leur périodicité.

L'exploitation des couples de mesures concomitantes de débits liquides instantanés (m^3/s) et des concentrations (g/l) a permis de calculer les régressions saisonnières débits liquides –débits solides et d'estimer les différentes expressions des transports solides en suspension : débits solides (kg/s), apports solides (tonnes), transport solide spécifique ($t/km^2/an$).

Les valeurs de T.S.S., calculées par le biais des régressions saisonnières débits liquides –débits solides sans application du coefficient de correction (CF), sont faibles pour les bassins de l'oued Cherf ($114,2 t/km^2/an$), Bouhamdane ($58,2 t/km^2/an$) et Ressoul ($103,3 t/km^2/an$). La valeur la plus forte est celle du bassin de l'oued Mellah ($237,9 t/km^2/an$). Par comparaison avec les bassins algériens étudiés, ces valeurs se situent en-deçà de $500 t/km^2/an$.

Les calculs avec facteurs de correction de Jansson ont permis de corriger une sous-estimation qui varie entre 156.87 % (bassin de l'oued Cherf), 204.03 % (bassin de l'oued Ressoul), 213.26% (bassin de l'oued Bouhamdane) et 378.27% (bassin de l'oued Mellah).

Les paramètres hydro-climatologiques contrôlent la variabilité temporelle des transports solides, alors que les caractéristiques physiques des bassins-versants (lithologie dominante, couverture végétale, systèmes de pentes) donnent aux bassins leurs facultés de réaction par rapport à l'érosion hydrique et constituent les facteurs explicatifs et les

facteurs de différenciation des débits solides et des apports solides entre les sous-bassins de la Seybouse. Les activités humaines ont un effet aggravant sur les phénomènes d'érosion.

La variabilité spatiale de l'intensité de l'érosion hydrique qui s'exprime dans les transports solides des cours d'eau constitue une réponse aux caractères très contrastés du climat, et à son agressivité, la dégradation du couvert végétal, et l'énergie du relief. Parmi l'ensemble des facteurs, la lithologie joue un rôle primordial dans le domaine de l'érosion hydrique.

D'après Roose, les risques d'érosion dépendent de deux principaux groupes de facteurs : le premier groupe regroupe la source d'énergie, pluie ou ruissellement et le second groupe la résistance du milieu qui est l'érodabilité des terrains. L'érodabilité des terrains est un facteur clé de l'érosion mais elle reste très difficile à quantifier. Elle est dépendante de plusieurs facteurs, de l'érodabilité des sols, du couvert végétal, de la pente, des techniques culturales et des aménagements existants des sols.

La valorisation des données (débits liquides et concentrations) du bassin de l'Oued Bouhamdane a été réalisée par l'application d'un modèle statistique de type puissance. En valeurs moyennes, la charge solide spécifique calculée sur deux séries distinctes (237.5 et 281.4 t km⁻² an⁻¹) est relativement modeste, comparée aux résultats obtenus sur des bassins algériens plus érosifs.

Une très forte variabilité des transports solides est montrée à l'échelle interannuelle, les extrêmes variant de 0.57 t km⁻² an⁻¹ en 1996/1997 à 1396 t km⁻² an⁻¹ en 2004/2005. A l'échelle intra-annuelle, la variabilité est encore plus fortement influencée par les facteurs hydroclimatiques, particulièrement en saison de hautes eaux. La quasi-totalité de l'apport solide est réalisée pendant les saisons d'hiver et de printemps : en régime moyen, 95.2% de l'apport solide annuel sont générés par 93.7% de l'écoulement annuel. C'est aux événements de crue qu'il faut attribuer le fort taux de contribution à la production des flux de MES, comme le montre le descripteur principal (M₂) de la variabilité journalière (courbes bi-fréquentielles) situant à 69% la moyenne interannuelle des flux de MES transportés en 2% du temps (avec une forte amplitude d'une année à l'autre) alors que l'indicateur de variabilité des flux liquides (Vw₂) situe à 44 % la moyenne interannuelle du débit véhiculé en 2% du temps.

D'après les résultats de la bathymétrie, l'envasement annuel moyen du barrage Hammam Debagh se situe autour de 0.98 hm³ an⁻¹, soit en termes de dégradation spécifique 914.3 t km⁻² an⁻¹, valeur bien supérieure à celle calculée à partir des mesures de transport en suspension de l'A.N.R.H.

Comme pour beaucoup de barrages algériens, le risque d'accélération de l'envasement de la retenue de Hammam Debagh est à redouter. Il faut noter également que les aménagements hydrauliques réalisés de l'amont à l'aval du bassin-versant de la Seybouse ont un impact aussi bien sur le bilan hydrologique des bassins que sur le bilan sédimentaire en arrêtant la continuité des transports de sédiments à l'aval des ouvrages hydrauliques.

Le risque d'envasement rapide des retenues de barrages oblige à prédire leur durée de vie, et à établir une stratégie pour leur protection.

CONCLUSION GENERALE

Cette recherche contribue à approfondir la connaissance de l'hydrologie algérienne, à travers l'exemple d'un important bassin exoréique de l'Est algérien, la Seybouse. Ceci, en particulier dans les domaines de la modélisation de la pluviométrie et des débits liquides et solides, permettant de caractériser les paramètres hydroclimatiques du bassin à partir de données ponctuelles mesurées.

Au cours de ce travail, ont été abordés successivement l'étude statistique des variables climatiques (pluies annuelles moyennes et fréquentielles, températures et E.T.P.), la cartographie automatique des pluies interannuelles moyennes et fréquentielles, l'étude statistique des apports annuels, mensuels, journaliers et instantanés maximaux de crues et enfin les transports solides en suspension et leur variabilité spatio-temporelle. Dans le cadre particulier du sous-bassin de l'oued Bouhamdane, la cartographie des pluies journalières maximales fréquentielles et de leur gradex a été réalisée en vue de la modélisation des débits maximaux décennaux. Aussi, sur ce même sous-bassin, l'analyse des apports solides de l'oued a été approfondie dans le but d'évaluer leur impact sur l'envasement du barrage, à l'aval.

Le bassin de l'oued Seybouse, qui couvre une superficie de 6745 km², englobe trois grands domaines physiques et bioclimatiques : le domaine des Hautes Plaines au Sud, le domaine sud-Tellien et enfin, les domaines Tellien du Nord et maritime qui présentent des caractéristiques topographiques qui les différencient nettement. Deux zones montagneuses constituent, à l'amont, les principales zones d'alimentation en eau du bassin-versant de la Seybouse : les Monts de la Medjerdah, et la zone montagneuse constituée par le djebel Sidi Reghiss et la chaîne des Sellaoua.

Les principaux résultats de cette recherche peuvent être résumés comme suit :

- **les précipitations** : L'analyse statistique des séries pluviométriques a été réalisée sur 21 postes dont les données présentaient des lacunes et qui ont fait l'objet d'une étude d'homogénéisation et dont la cartographie, a permis le passage de l'information ponctuelle à une information couvrant tout l'espace du bassin versant.

La lame précipitée est estimée à 570,3 mm sur l'ensemble des bassins jaugés de la Seybouse, avec des valeurs estimées par sous-bassin variant de 358,9 mm sur le bassin de l'oued Cherf amont à 741,3 mm sur le bassin de l'oued Ressoul.

La réalisation des cartes pluviométriques interannuelles (septembre 1969 - août 1999 et septembre 1971 - août 1988) et des cartes des pluies fréquentielles décennales sèches et humides s'est faite en trois étapes principales: régression morphométrie – pluviométrie, interpolation des résidus de régression et cartographie de la pluie.

Les quatre régressions multiples calculées ont intégré les paramètres explicatifs suivants: Y Lambert, l'expression $e^{-d/p} * z$, et X Lambert (carte des pluies

fréquentielles décennales humides). Seuls les coefficients de régression varient. Dans les quatre cas, le variogramme sphérique a permis d'ajuster les résidus de régression.

Pour la carte des pluies fréquentielles décennales humides, la majeure partie du bassin est sous une pluie comprise entre 600 et 800 mm alors que pour les pluies moyennes, elle est comprise entre 400 et 600 mm.

La carte des pluies fréquentielles décennales sèches a permis de mettre en lumière une diminution moyenne de -34,01 % avec une très forte diminution pour les postes pluviométriques situés en Hautes Plaines.

Selon Laborde, des simulations ont montré que si les pluies annuelles diminuaient de 15 %, les écoulements annuels diminueraient jusqu'à 40 %, ce qui impliquerait une diminution très importante des apports entrant aux barrages.

De même, des études ont montré que les pluies de fréquence décennale ne produisent pas forcément les débits de fréquence décennale.

Cinq stations climatologiques ont été utilisées pour l'étude des températures et de l'évapotranspiration potentielle. L'E.T.P. a été évaluée à l'aide des formules de Thornthwaite, Turc et de l'A.N.R.H. Les valeurs de l'E.T.P. A.N.R.H. sont le plus souvent supérieures à celles de l'E.T.P. Turc. Les bilans hydriques mensuels ont été esquissés à travers l'exploitation des cartes du déficit hydrique et des zones d'égal mois "secs".

- La résultante des caractéristiques physiques et morphométriques qui constituent les facteurs non variables qui se combineront entre eux et se conjugueraient avec les facteurs variables des bassins (pluviométrie) a des effets sur les écoulements annuels, les crues et les transports solides des bassins.

Les écoulements liquides ont été analysés à travers les bilans hydrologiques annuels, les profils apports-surfaces, la variabilité spatio-temporelle de l'écoulement aux différents pas de temps. Les débits de crues ont été étudiés à l'échelle des bassins jaugés en mettant l'accent sur la relation entre les débits fréquents et la surface des bassins. L'étude de cas qui a concerné le bassin de l'oued Bouhamdane avec la cartographie des pluies journalières maximales (F0.9 et F0.95) a permis la modélisation des Q max décennaux grâce aux modèles mis au point par l'A.N.R.H.

- **Les débits absolus** : Les débits moyens annuels absolus sont fortement corrélés avec la surface des bassins jaugés. Seul, le bassin de l'oued Cherf amont ne correspond pas au schéma valable pour les bassins telliens.

-L'organisation spatiale de la lame écoulée, déficit d'écoulement et coefficient d'écoulement est latitudinale.

Le profil apports-surfaces du bassin de la Seybouse est globalement similaire à ceux des bassins à écoulement exoréique dans l'Est algérien (Kebir-Rhumel, Soummam) mais avec des nuances de détail liés aux apports des affluents.

- **La très grande variabilité temporelle des débits annuels.** Sur la période septembre 1971 à août 1988, les paramètres hydrologiques aussi bien annuels que mensuels et journaliers ont connu une très grande variabilité, à mettre en relation directe avec la variabilité des précipitations. Les moyennes interannuelles sont très fortement influencées par les valeurs extrêmes de la période étudiée.

- **La cartographie des écoulements annuels** a été présentée grâce à deux cartes extraites des travaux de Mebarki sur l'Est algérien.

La cartographie de l'écoulement moyen annuel basée sur le modèle bilan tenant compte du déficit d'écoulement de Turc a permis de mettre en lumière l'organisation spatiale des courbes d'iso-écoulement : les lames écoulées annuelles oscillent entre 5 mm au Sud et 200 mm avec une organisation latitudinale influencée par les reliefs. Dans la zone Sud du bassin, les zones d'iso-écoulement sont organisées en bandes sensiblement latitudinales au-dessous de la courbe d'iso-écoulement 50 mm, et comprenant les courbes 20, 10 et 5 mm.

La carte extraite de la carte de l'écoulement annuel de l'Algérie du Nord, réalisée grâce au modèle Loieau présente sensiblement la même organisation. A l'échelle globale du bassin de la Seybouse, la lame écoulée estimée avec la simulation LOIEAU est de 75,0 mm alors que la lame observée est 62,8 mm.

- **Deux types de régimes mensuels** apparaissent à travers les coefficients mensuels de débits: régime des Hautes Plaines (station de Moulin Rochefort) et régime tellien.

- **Les débits de crues** (Q maximaux annuels aussi bien moyens journaliers qu'instantanés) ont été analysés et ont fait l'objet d'une étude fréquentielle à l'aide de la loi log-normale. Ces débits extrêmes ont été observés pour l'ensemble des bassins au cours des années hydrologiques 1972/73, 1983/84 et 1984/85.

Les valeurs de débits de crues, débits moyens journaliers maximaux et débits instantanés des différentes fréquences calculées sont étroitement corrélées avec la surface des bassins jaugés, mis à part le bassin de l'oued Cherf situé en Hautes Plaines. Les pluies journalières décennales du bassin de la Seybouse ont une structure spatiale latitudinale, diminuant vers le Sud et sont donc dépendantes de la distance à la mer, mais aussi de la longitude et de l'altitude lissée des postes (A.N.R.H., 2008).

Les valeurs des débits fréquentiels (loi log-normale) calculées pour les sous-bassins de l'oued Seybouse semblent, hormis l'oued Cherf, surestimées par rapport aux résultats obtenus sur les bassins d'autres régions d'Algérie dans le cadre de l'étude de l'A.N.R.H. (2008). Ces différences s'expliquent par la méthode utilisée dans l'étude des crues de l'A.N.R.H., basée sur l'ajustement des trois débits les plus forts par année (Méthode Sup-Seuil) et par les différences des périodes étudiées.

- **L'étude de cas a concerné le bassin de l'oued Bouhamdane** : les pluies journalières maximales et les débits de crues ont été analysés avec plus de détails avec mise en évidence de la statistique et la cartographie des Pj max (pluies journalières maximales annuelles). Les valeurs de gradex ainsi cartographiées présentent une structure spatiale Nord-Ouest à Sud-Est. Les valeurs de pluies journalières de fréquences décennale et vingtennale diminuent du Nord vers le Sud.

La modélisation des débits de crues sur le bassin de l'oued Bouhamdane a été réalisée par la formule mise au point par l'A.N.R.H., permettant la prédétermination des débits de crue pour une période de retour donnée, en exploitant la relation mathématique entre les quantiles de crue et les paramètres explicatifs les plus pertinents (surface, pente, pluie journalière décennale, gradex des pluies journalières). Le débit moyen journalier maximal est estimé à $107 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que le débit de pointe est de $218 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Les écoulements dans le bassin de la Seybouse sont fortement influencés par les **aménagements hydrauliques** : les grands barrages, les petits barrages, et les retenues collinaires qui régularisent des volumes d'eau importants.

La mobilisation des eaux d'écoulement superficiel a été mise en œuvre sur une grande échelle dans le bassin de la Seybouse et ses abords depuis 1965, année de mise en eau du barrage de la Cheffia et son affectation aux besoins de la ville de Annaba, la sidérurgie d'El Hadjar et le périmètre de la Bounamoussa dont une grande partie est localisée dans le bassin de la Seybouse. Depuis, deux grands barrages ont été construits. Le barrage de Hammam Debagh est fortement sollicité alors que celui de Foum El Khanga l'est moins. Mais avec la mise en œuvre de l'irrigation dans les Hautes Plaines (plaines de Tamlouka, de Ksar Sbahi, de Sedrata) et Mdjez El Bgar, le barrage de Foum El Khanga va être fortement sollicité.

L'influence anthropique sur les écoulements va encore s'accroître avec la construction de deux nouveaux grands barrages (Koudiat Haricha dans la Haute Seybouse, et Koudiat Mahcha dans la Basse Seybouse).

Les ressources en eau non conventionnelles sont appelées également à être fortement développées.

Les besoins actuels en eau potable et industrielle sont fortement concentrés dans la Basse Seybouse, dans la Moyenne Seybouse et dans les Hautes Plaines.

Le niveau actuel des besoins en eau et leur développement dans le futur (aussi bien immédiat qu'antérieur), amène à penser qu'un développement des transferts d'eau est indispensable pour assurer les besoins énormes que va exiger le développement du périmètre irrigué s'étendant d'Annaba à El Kala.

Les transports solides en suspension ont été analysés en exploitant les données de 4 stations hydrométriques et en appliquant les régressions saisonnières entre les débits liquides et les débits solides. L'étude des transports solides en suspension dans les bassins algériens est conditionnée par les limites liées aux mesures hydrométriques (prélèvement unique à proximité de la berge, faible fréquence des mesures).

Les valeurs de T.S.S., calculées par le biais des régressions saisonnières débits liquides – débits solides sans application du coefficient de correction (CF), sont faibles pour les bassins de l'oued Cherf ($114,2 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$), Bouhamdane ($58,2 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$) et Ressoul ($103,3 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$). La valeur la plus forte est celle du bassin de l'oued Mellah ($237,9 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$). Par comparaison avec les bassins algériens étudiés, ces valeurs se situent en-deçà de $500 \text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$.

Les calculs ont été également réalisés en appliquant les facteurs de correction proposés dans la littérature scientifique. Les calculs avec facteurs de correction de Jansson ont permis de corriger une sous-estimation supérieure à 150 % dans les quatre sous-bassins. Lorsqu'on applique les facteurs de correction saisonniers au calcul des débits solides, les valeurs de T.S.S. augmentent mais restent dans la catégorie des valeurs faibles par comparaison avec les bassins cités dans la littérature scientifique algérienne, mise à part celle du bassin de l'oued Mellah.

Si les paramètres hydro-climatologiques contrôlent la variabilité temporelle des transports solides, les caractéristiques physiques des bassins-versants (lithologie dominante, couverture végétale, systèmes de pentes) donnent aux bassins leurs facultés de réaction par rapport à l'érosion hydrique, et constituent les facteurs explicatifs et les facteurs de différenciation des débits solides et des apports solides entre les sous-bassins de la Seybouse. Les activités humaines aggravent encore plus l'érosion.

La variabilité spatiale de l'intensité de l'érosion constitue une réponse au caractère très contrasté du climat, à l'agressivité du climat, la dégradation du couvert végétal, et l'énergie du relief. Parmi l'ensemble des facteurs, la lithologie joue un rôle primordial dans le domaine de l'érosion hydrique.

D'après Roose (2006), les risques d'érosion dépendent de deux principaux groupes de facteurs : le premier groupe regroupe la source d'énergie, pluie ou ruissellement et le second groupe la résistance du milieu qui est l'érodabilité des terrains.

Les transports solides du bassin de l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II et au barrage de Hammam Debagh ont été étudiés en détail. Les apports solides en suspension ont été évalués pour deux périodes, la période correspondant à la station hydrométrique et celle correspondant à la période de fonctionnement du barrage de Hammam Debagh.

En valeurs moyennes, la charge solide spécifique calculée par le biais d'une régression unique débits liquides –débits solides, sur les deux séries distinctes (237.5 et 281.4 t km⁻² an⁻¹) est relativement modeste, comparée aux résultats obtenus sur des bassins algériens plus érosifs ou à ceux cités pour les pays du Maghreb

Dans le contexte méditerranéen semi-aride, une très forte variabilité des transports solides est montrée à l'échelle interannuelle, et intra-annuelle. La quasi-totalité de l'apport solide est réalisée pendant les saisons d'hiver et de printemps : en régime moyen, 95.2% de l'apport solide annuel sont générés par 93.7% de l'écoulement annuel. C'est aux événements de crue qu'il faut attribuer le fort taux de contribution à la production des flux de MES, comme le montre le descripteur principal (M₂) de la variabilité journalière (courbes bi-fréquentielles) situant à 69% la moyenne interannuelle des flux de MES transportés en 2% du temps (avec une forte amplitude d'une année à l'autre) alors que l'indicateur de variabilité des flux liquides (Vw₂) situe à 44 % la moyenne interannuelle du débit véhiculé en 2% du temps.

D'après les résultats de la bathymétrie, l'envasement annuel moyen du barrage Hammam Debagh se situe autour de $0.98 \text{ hm}^3 \text{ an}^{-1}$, soit en termes de dégradation spécifique $914.3 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$, valeur bien supérieure à celle calculée à partir des mesures de transport en suspension de l'A.N.R.H. Alors que la bathymétrie permet d'obtenir des valeurs globales des transports solides incluant les transports de fond et d'autres apports de sédiments, très difficiles à mesurer, les stations de jaugeage sous-estiment les apports solides des oueds.

Comme pour beaucoup de barrages algériens, le risque d'accélération de l'envasement de la retenue de Hammam Debagh est à redouter au regard des effets du changement climatique (Remini et Bensafia, 2009).

Le volume de la vase déposée dans 57 grands barrages en exploitation en Algérie (situation de 2005) avoisine 1.1 km^3 , soit une perte de capacité de 16% de la réserve totale (Remini *et al*, 2009). Dans le souci d'établir une stratégie pour leur protection, la prédiction de la durée de vie des barrages est nécessaire.

Nous formulons ci-après quelques pistes de réflexions afin d'améliorer et approfondir cette connaissance :

1. La cartographie des pluies moyenne interannuelles et des pluies moyennes fréquentielles a porté sur la période de 1969-1998. Les cartes élaborées ont permis une connaissance globale de leurs distributions dans le bassin. Toutefois, certaines zones du bassin sont sous-instrumentées. Par conséquent, une densité supérieure du réseau de mesures et une meilleure répartition des postes pluviométriques est souhaitable pour avoir des informations plus précises aux échelles journalières, mensuelle et annuelle. Il est préférable d'équiper les zones d'altitude pour accéder à des données fiables permettant de conforter les résultats obtenus dans les études pluviométriques (relation pluie-altitude et calcul des gradients altimétriques).

2. Les pluies extrêmes constituent une source d'informations très précieuse en hydrologie. Leur caractère bref et orageux particulièrement en automne provoque souvent des crues très fortes qui contribuent aux crues et aux apports solides. Il est également indispensable de densifier le réseau de pluviographes et d'en équiper les zones d'altitude.

3. Le réseau hydrométrique dans le bassin de la Seybouse a connu une évolution dans le sens de la diminution à cause de la mise en eau de deux barrages. Il serait souhaitable de garder des stations hydrométriques en fonction dans des sites proches de ceux ayant déjà fonctionné : à l'amont des barrages de Hammam Debagh et Foug El Khanga, au site de l'ancienne station de Medjez Ammar I, et dans la Basse Seybouse pour remplacer la station de Mirbeck qui n'est plus en exploitation depuis 2005.

4. L'étude des transports solides en suspension dans les bassins algériens est conditionnée par les limites liées aux mesures hydrométriques (prélèvement unique à

proximité de la berge, faible fréquence des mesures). Il est indispensable d'améliorer à la fois la technique de mesure et la fréquence de celles-ci.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdellaoui, B., Merzouk, A., Aberkan, M., et Albergel, J. (2002) Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc). *Rev. Sci. Eau* **15** (4): 737-748
- Achite. M., et Meddi, .M. (2004) Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse* **15**: 367/373
- Achite, M., et Meddi.M. (2005) Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (nord-ouest algérien) *Rev. Sci. Eau* **18** : 37-56
- Achite, M., et Ouillon, S. (2007) Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995). *J. Hydrol.* **343** (3-4): 187-202.
- Aissani B. et Laborde J.P., 1983: Les pluies extrêmes et leur cartographie automatique dans la région algéroise. Document préliminaire. *Conférence sur le climat méditerranéen et les ressources en eau, Eau verte – Eau bleue*, Marseille, 8 p.
- A.N.R.H., 1993, *Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000* (2 feuilles, une notice de 49 p.), Ministère de l'Équipement, Alger, Ed. I.N.C.
- A.N.R.H., 2002, *Carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie au 1/500 000* (2 feuilles, notice de 42 p.), Ministère des Ressources en Eau, Alger, Ed. I.N.C.T.
- A.N.R.H.-G.T.Z., 2003, Etude de synthèse sur les ressources en eaux de surface de l'Algérie du Nord, Alger, A.N.R.H., Rapport technique, 36 p.
- A.N.R.H., (2006) Etude de synthèse des crues sur l'Algérie du Nord-Documents provisoire Juin 2006 –Rapport Pluvio, 60p.
- A.N.R.H., (2008) Etude générale des crues du Nord de l'Algérie, Modélisation des débits de crue, Juillet 2008, 73 p.
- Anser A., 1998, la pluviométrie en Algérie du Nord: évolution et variabilité (1931-1995), *Thèse de doctorat d'état*, Université de Constantine, Institut des Sciences de la terre, 260 p.
- Arrus R., 1985, *L'eau en Algérie. De l'impérialisme au développement (1830-1962)*, Alger, O.P.U, 388 p.
- Asselman, N.E.M. (2000) Fitting and interpolation of sediment rating curves. *J. Hydrol.* **234**: 228-248
- Badraoui, A, et Hadji, A. (2001). Envasement des retenues de barrages. *La Houille Blanche*, n°6/7, pp. 72-75.

Baulig H., La morphométrie, Ann.Géogr., Paris, n° 365, pp135-156

Bencheikh-lehocine M. et mebarki A., 1999, Débits de rejets et vulnérabilité à la pollution des eaux des bassins du Kébir-Rhumel et de la Seybouse (Algérie orientale), Actes des Journées d'information et d'étude sur *La nouvelle politique de l'Eau, les Agences de bassins hydrographiques et le Bassin Constantinois-Seybouse-Méllègue* », Constantine, 20-21 oct. 1998, A.B.H.-C.S.M, pp. 69-79.

Benchetrit, M. L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. Paris. P.U.F. ,1972.

Bendjoudi (H), Hubert (P), 2002, Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants, Hydrological Sciences –Journal- des Sciences Hydrologiques. 47 (6) décembre 2002, p921-930

Benichou P. et Le Breton O. - "*Prise en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques*"- La Météorologie 7^e série- 1987- N° 19 - p. 23-35.

Benkhalel, A., et Remini B. (2003) Analyse de la relation puissance débit solide – débit liquide à l'échelle du bassin-versant de l'oued Wahrane (Algérie). *Rev. Sci Eau* 16(3): 333-356.

Ben Mammou, A., et Louati, M. H. (2007) Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie, *Rev. Sci. Eau* **20** (2): 201-210.

Benmouffok B. (2004), Efforts de l'Algérie en matière d'économie de l'eau et de modernisation de l'irrigation, Projet INCO-WADEMED. Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée. Rabat du 19 au 23 avril 2004, 7 pages.

Bois Ph., 1986. *Contrôle des séries hydrologiques corrélées par étude du cumul des résidus*. Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM p 89-100.

Bois Ph., 1991, *Hydrologie générale*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 175 p.

Bouanani A, (2005) Hydrologie, transport solide et modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie), Thèse pour l'obtention du titre de Doctorat d'Etat en Géologie appliquée: Option hydrogéologie, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 250 p.

Boucenna R., Mohamed Anouar R., 1997, Ressources en eau et aménagement dans le bassin de l'oued Bouhamdane (Seybouse). Mémoire d'ingénieur en aménagement des milieux physiques. F.S.T.G.A., Constantine.

Boucetti S., Lakhdar A., Belhadj Mostefa S., 2000, Evaluation des transports solides en suspension et relations avec la pluviométrie et les écoulements. Mémoire d'ingénieur en Aménagement des milieux physiques. F.S.T.A.G., Constantine.

Bravard J.-P., Petit F., 2000, *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*, Paris, A. Colin, Collection U. Géographie, 222 p.

Brunet Moret Y., (1971), Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses, Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Hydrol., vol. VIII, no 4, 1971, p3-31

Brunet Moret Y. - "*Homogénéisation des précipitations*" - Cahiers ORSTOM, série hydrologie - 1979 - Vol.I6 (3 et 4) - p. 147-170.

Brunsdon C., McClatchey J. et Unwin D.J., 2001 - "*Spatial variations in the average rainfall-altitude relationship in Great Britain: an approach using geographically weighted regression*" - International Journal of Climatology - 2001 - Vol. 21 - p. 455-466.

Carrega P., 2003 Les risques naturels liés à la pluie et à la sécheresse : Elaboration de cartes des pluies extrêmes et des risques d'incendies de forêt dans une région Méditerranéenne : La Toscane (Italie). In « Riscuri si catastrofe », vol. II, 2003, Edit V. Sorocovschi ; Université de Cluj-Napoca (Roumanie), pp 271-286

Chabaca M. N., Isberie C., Messahel M., 2007 La politique de gestion de la ressource en eau d'irrigation face à l'aléa climatique, aux contraintes sociales et économiques: Cas de l'Algérie. La Houille Blanche/ N° 04-2007, p131-136

Chabour N., 2012, Connaissance des systèmes aquifères en Algérie. Incertitudes des mesures, fiabilité et manque de données. Laboratoire de Géologie et Environnement. UMC Colloque international : «Gestion intégrée des ressources en eau : rôle, organisation et traitement de la mesure». ABH-CSM 2012.

Chahed J, Besbes M., Hamdane A., 2007 Stress hydrique et sécurité alimentaire: une vision intégrale des ressources en eau *Water stress and food safety: an integral water vision*, European Water Resources Association (EWRA 2005), 10.1051/lhb:2007035, La Houille Blanche/ N° 03-2007, p52-57.

Chaumont et Paquin C, 1971, *Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord*, échelle 1/500 000 (4 feuilles et notice), Société de l'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, Alger

Cherrad S.-E., 1979, La plaine de la Bou Namoussa, irrigation, mise en valeur et organisation de l'espace, *Thèse de doctorat 3è cycle*, Université Montpellier 3, 242 p.

Cosandey C., Robinson M., 2000, *Hydrologie continentale*. Paris, Armand Colin, Collection U. Géographie, 360 p.

Côte, M. 1983, L'espace algérien. Les prémices d'un aménagement. Alger: O.P.U., 1983.

Côte M., 1983, L'eau en Algérie, mise en œuvre et utilisation. Essai de mise au point, Colloque: *L'eau en Algérie: ressources et utilisations*, Constantine, Institut des Sciences de la terre, 10-13 avril 1983, 16 p.

Côte M., 1988, L'Algérie ou l'espace retourné, Paris, Géographes-Flammarion, 362 p.

Côte M., 1996, L'Algérie, espace et société, Paris, Masson -Armand Colin, 253 p.

Côte M., 1998, Les régions bioclimatiques de l'Est algérien, *Rhumel*, n° 6, pp. 57-71.

Dagnélie P. (1986), Analyse statistique à plusieurs variables, Les Presses Universitaires de Gembloux. 359 p, fig

Davtian G., 1998, Analyse des données et cartographie automatique: application aux principales variables climatiques du versant méditerranéen du Maghreb, *Thèse de doctorat*, Université de Nice-Sophia Antipolis, 328 p.

Debieche Taha- Hocine (2002), Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. Thèse de Docteur de l'Université de Franche -Comté (France) Spécialité: Sciences de la Terre (Hydrogéologie et Environnement), 235 p.

De Lagarde Jean, 1983, Initiation à l'analyse des données. Bordas, Paris, 1983. 158 p, fig.

Delhomme J.P.- "*Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau*"- Bulletin BRGM - 1978- section III, N°4, - p. 341-375

Demmak A., 1982, *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale*, Thèse de docteur-ingénieur, Université de Paris VI, 323 p.

Derradji F., Bousnoubra H., Kherici N., Romeo M., Caruba R., (2007), Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le Nord-Est algérien, *Sécheresse* 2007; 18 (1): 23-7

Djebou A. - "*Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les Alpes Franco-Italienne, prévision quantitative des pluies journalières par la méthode des analogues*" - Thèse de doctorat - 2001 - LTHE-INPG – 426 pages.

Douvinet (J), Delahaye(D), Langlois (P), De la morphométrie à un champ de mesure de l'efficacité structurelle du bassin versant, Sageo 2007

Droge G., Humbert J., Deraisme J., Mahr N. et Freslon N. - "*A statistical topographical model using an omnidirectional parametrization of the relief for mapping orographic rainfall*"- International journal of climatology- 2002 - N° 22- p. 599-613.

Dubreuil P. et Guiscafne J., 1971, La planification du réseau hydrométrique minimal, Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Hydrol., vol. VIII, no 2, 1971

Dubreuil P., 1974, *Initiation à l'analyse hydrologique*, Paris, Masson-ORSTOM, 216 p.

- Dumolard P., (2007), Analyse multivariée de données géographiques.
- Ferguson, R.I. (1986), River loads underestimated by rating curves. *Water Res.* **22**:74–76
- Ferguson, R.I. (1987), Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth Surf Proc Landf* **12**: 95–104
- François D. et Humbert J.- "*Quantification spatiale des précipitations. Application au Nord-Est de la France*"- Revue géographique de l'Est - 2000 - N° 1-2/mars- p. 11-22.
- Frécaut R., 1975, Contribution à l'étude statistique des étiages. Application au domaine tempéré océanique, *Revue géographique de l'Est*, T.XV, n°1-2, pp. 89-99.
- Frécaut R., 1980, Les transports solides fluviaux: leurs mesures, leurs caractères et leur signification dans les divers domaines morphoclimatiques du globe. Séminaire de recherche n° 1, D.E.A., Troisième cycle "Eau et aménagement".
- Gausson H. et Vernet A., 1958, *Carte internationale du tapis végétal et des conditions écologiques*, feuille de Tunis-Sfax au 1/1000000, Bull. Serv. Carte Phytogéographique, Toulouse.
- Ghachi A., 1986, *Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie: le bassin de la Seybouse*, Alger, O.P.U., 508 p.
- Ghenim, A., Terfous. A., et Seddini. A (2007) Etude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes: cas du bassin-versant de l'oued Sebdou (Nord-Ouest algérien). *Revue Sécheresse*, **18**(1) ,39-44
- Guide maghrébin pour l'exécution des études et des travaux de retenues collinaires (1987), Mai 1987, Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord (Projet RAB/80/011), P.N.U.D. /O.P.E., Algérie-Maroc-Tunisie.
- Heusch B., Milles-Lacroix A., 1971, Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin du Maghreb, *Mines et Géologie*, n° 33, Rabat, pp. 21-39.
- Heusch B., Cinquante ans de banquettes de D.R.S. - C.E.S. en Afrique du Nord : un bilan, *Cah. ORSTOM, Ser. Pédol*, vol. XXII, no 2. 1986: 153-162
- Hiez G. (1977) L'homogénéité des données pluviométriques. Cahiers Orstom, Série hydrologie XIV(2): 129- 172. Paris
- Humbert J., Drogue G. et Mahr N. - "*Cartographie des précipitations par paramétrisation omnidirectionnelle du relief: la méthode Pluvia*"- Association Internationale de Climatologie - 1998 – Lille - Vol. 11 – p. 259–266.
- Jansson, M. B. (1996) Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. *J. Hydrol.* **183**, 227-241

Jansson, M.B., (1985). A comparison of detransformed logarithmic regressions and power function regressions. *Geogr. Ann.*, 67A (1-2): 61-70.

Kassoul M., Abdelgader A., Belorgey M., (1997) Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie, *Revue des Sciences de l'eau, Rev Sci. Eau* 3(1997) 339-358

Kassoul, M., (1999) Prédétermination de la durée de vie des barrages en Algérie. *La Houille Blanche*, 3-4 89/94.

Khanchoul, K., (2006) Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants du nord-est algérien. Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Doctoirat d'Etat en Géologie, Option Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar de Annaba, Algérie, 278 p

Khennache N., 2005 Etude des précipitations et des écoulements et de leurs relations avec les transports solides en suspension. Bassin –versant de l'oued Ressoul à Ain Berda (Seybouse). Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en aménagement des Milieux Physiques.

Kieffer Weisse A. - "Etude des précipitations exceptionnelles de pas se temps court en relief accidenté (Alpes française), Méthodes de cartographie des précipitations extrêmes. Relation avec le contexte topographique, Utilisation de l'information au pas de temps de la journée" - Thèse de doctorat - 1998 - LTHE-INPG - 314 pages.

Kouti, A, et Tabni, M. (1989) Mobilisation des eaux de surface et gestion des bassins versants en Algérie, *Revue Eaux et sols d'Algérie*, 2, A.N.R.H, Alger, juillet 1994, p68-78.

Laborde J.P.- "*Cartographie automatique des caractéristiques pluviométriques: prise en compte des relations pluviométrie-morphométrie*"- La Houille Blanche– 1982– N° 4 - p. 331-338.

Laborde J.P.- "*Analyse des données et cartographie automatique en hydrologie: élément d'hydrologie lorraine*"- Thèse de doctorat d'Etat-es-science- 1984- Institut National Polytechnique de Lorraine- 484 pages.

Laborde J.P. et Lempereur R. - "*Les pluies sur des petits bassins versants: une fonction aléatoire dont peut estimer le variogramme*"- Hydrologie continentale- 1986 -Vol. I - p. 3-13.

Laborde J.P. et Alexandre C.- "*Les précipitations extrêmes en Mauritanie: Approche par l'analyse statistique des valeurs supérieures à un seuil*"- *Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée (Mélanges Maurice JULIAN)*- 1996 - N° 38/39 - p. 191- 202.

Laborde J.P.- "*Méthodes d'interpolation et géostatistique pour la cartographie automatique à l'usage des géographes et de quelques autres*"- Cours polycopié de l'Université de Nice- Sophia Antipolis - 1997 - Nice - 27 pages.

Laborde J-P., 1997, Les différentes étapes d'une cartographie automatique: exemple de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 8, p. 37-46.

Laborde J.P.- "*Eléments d'hydrologie de surface*"- Cours polycopié de l'Université de Nice-Sophia Antipolis- 1998 - Nice- 195 pages.

Laborde J.-P., 2000a, *Hydrologie de surface*, Cours Université de Nice– Sophia Antipolis, 191 p.

Laborde J-P., 2000b, *Hydrolab*. Logiciel de traitement statistique des données hydrologiques, Université de Nice- Sophia Antipolis.

Laborde J-P., Assaba, M. et Belhouli L., 2003, Les chroniques mensuelles de pluies de bassin: un préalable à l'étude des écoulements en Algérie, Colloque SHF, *Gestion du risque en eau en pays semi-arides*, Tunis, 21-22 mai 2003, 10 p.

Laborde J.P., Gourbesville P., Assaba M., Demmak A., et Belhouli L., 2010 ,Climate evolution and possible effects on surface water resources of North Algeria, *Current Science*, Vol. 98, N°. 8, 25 April 2010, special section

Lahlou, A. (2005) Socio-economic impacts of the erosion and silting– up of large dams in North Africa countries. Congrès International: «De l'Eau pour le développement durable dans le bassin méditerranéen »21 -22 mai 2005, DZ

Laignel, B., Dupuis, E., Durand, A., Dupont, J.P., Hauchard, E. et Massei, N. (2006) Erosion balance in the watersheds of the western Paris Basin by high-frequency monitoring of discharge and suspended sediment in surface water. *C.R. Geoscience* 338, 556-564.

Letreuch Belarouci N., 1991, *Les reboisements en Algérie et leurs perspectives d'avenir*, Alger, O.P.U., 2 volumes, 641 p.

Lhotellier et Patriche, (2007), Dérivation de paramètres topographiques et influence sur la spatialisation statistique de la température, XXème Colloque International de Climatologie Climat, Tourisme et Environnement Actes du colloque de Carthage (Tunisie) CENAFFE 3-8 septembre 2007

Liénoùl, G., Mahé, G., Paturel. J.E., Servat, E., Ekodeck, G. E., et Tchoua, F (2009) Variabilité climatique et transport de matières en suspension sur le bassin de Mayo-Tsanaga (Extrême-Nord Cameroun) *Sécheresse* 2009; **20** (1): 139-44

Louamri A., 2008, Les pluies annuelles dans le bassin-versant de l'oued Seybouse (Nord-est algérien), interpolation et cartographie, p405/408
XXIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie Université Paul Valéry Montpellier III, 9 au 13 septembre 2008, ISBN 9782953323207

Louamri A., 2009, Contribution à l'évaluation des transports solides de l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II et au barrage de Hammam Debagh.

1^{er} Colloque International sur La Gestion Intégrée des Ressources en Eau. Université de Batna, le 10 et 11 Novembre 2009

Louamri A., 2009, Cartographie des pluies annuelles dans le bassin-versant de l'oued Seybouse (Nord-est algérien) Sciences et Technologie D – N°30, Décembre (2009), pp. 43-52, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2009.

Louamri A., 2010, Contribution a l'évaluation des transports solides de l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II et au barrage de Hammam Debagh Journal International Network Environmental Management Conflicts, Santa Catarina – Brazil, 1(1), pp. 23-29, Dez. 2010. <http://www.igetecon.org/revista>

Louamri A., Mebarki A., Laignel B., et Bahri K., Variabilité interannuelle et intra-annuelle des transports solides de l'oued Bouhamdane, à l'amont du barrage Hammam Debagh (Algérie orientale). Atelier scientifique International "Relations homme/environnement et transports solides : une approche spatialisée" Mardi 7 et Mercredi 8 Juin 2011 Alger- Algérie

Ludwig W., Probst JL., River sediment discharge to the ocean: present-day controls and global budgets, American journal of Science, avril 1998, 265-295

Marand C., Zumstein J.-F., La modélisation des précipitations moyennes annuelles appliquée au Massif vosgien, Hydrol. Continent, 5, no 1, 1990: 29-39

Marre A., 1992, *Le Tell oriental algérien: de Collo à la frontière tunisienne. Etude géomorphologique*. O.P.U., Alger, Vol 1 et 2, 624 p.

Marre A., 1998, Rythmes et bilans de l'érosion en domaine méditerranéen, in *L'érosion, entre nature et société*, Paris, Sedes.

Matheron G, (1965) Les variables régionalisées et leur estimation, Masson Ed., Paris, 305 p

Mebarki A., 1982, *Le bassin du Kébir-Rhumel (Algérie). Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau*, thèse doctorat de 3^e cycle, Université de Nancy II, 304 p. (Edition: MEBARKI A., 1984, *Ressources en eau et aménagement en Algérie. Le bassin du Kébir-Rhumel*, Office des Publications Universitaires, Alger, 302 p.)

Mebarki A., 2005 : Hydrologie des bassins de l'Est algérien: ressources en eau, aménagement et environnement. *Thèse d'Etat*, Université Mentouri de Constantine, 360 p.

Mebarki A., 2007 Une Nouvelle Cartographie du Déficit Hydrique : Application à l'Est Algérien (et l'Algérie du Nord), Bulletin des Sciences Géographiques N°20,(Octobre 2007) pp39-45

Mebarki A., 2009 La région du Maghreb face à la rareté de l'eau. L'exemple du défi algérien : mobilisation et gestion durable des ressources, ICID+18 2nd International Conference: Climate, Sustainability and Development in semi-arid regions August 16-20, 2010, Fortaleza - Ceará, Brazil.

Mebarki A., 2009 : Ressources en eau et aménagement en Algérie. Les bassins hydrographiques de l'Est. Office des Publications Universitaires (OPU), Alger, 389p.

Mebarki A., 2009 Apport des cours d'eau et cartographie du bilan hydrologique : cas des bassins de l'Algérie orientale, "Flow Regimes and Water Resources: Assessment of Global Changes " Atelier MED FRIEND, Rabat 2009

Mebarki A., Laborde J.P., 2012, La cartographie, outil de valorisation des données de mesures. Application aux bilans d'eau de l'Algérie du nord
Colloque international : « Gestion intégrée des ressources en eau : rôle, organisation et traitement de la mesure » ABH-CSM, Constantine, 4-5 juin 2012

Mebarki A., Laborde J.P., 2012, Synthèse cartographique des bilans hydriques de l'Algérie du Nord, Colloque International de Rouen, Regards croisés Nord-Sud, Université de Rouen 25-26 sept 2012.

Meddi M., khaldi A., Meddi H., 1998 Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord, *Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes* (Proceedings of a symposium held at Vienna, July 1998). IAHS Publ. no. 249, 1998, p393-397..

Meddi.H, Meddi.M, Mahr.N et Humbert.J , 2007
Quantification des précipitations. Application au Nord Ouest de l'Algérie– La méthode Pluvia, *Geographia Technica*, 46 No. 1, 2007, p44-62.

Meddi M., Talia A., et Martin C., 2009 Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie), *Phsio-Geo*, Vol 3, n° 9, p. 61-84

Medjerab, A., et Henia, L., (2005), Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale, *Revue Géographique de l'Est*, Numéro vol. 45 / 2 (2005). Climat, sécheresse et canicule

Megnounif, A., Terfous, A., Ghenaim, A., et Poulet. J-B. (2007) Key processes influencing erosion and sediment transport in a semi-arid Mediterranean area: the Upper Tafna catchment, Algeria / Processus clefs influençant l'érosion et le transport des sédiments dans une région semi-aride Méditerranéenne: le bassin versant de la Haute Tafna, Algérie *Hydrol Sci. J.* **52**(6), 1271-1284

Mentre Hildebrandt (A.) (1986), - Contribution à l'étude des phénomènes hydro-climatiques : le cas du bassin Lorrain de la Meuse. Thèse Doct Nancy. 338 p

Messaoudi M.E.F., 2006 Contribution à l'évaluation des transports solides en suspension du bassin de l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II. Mémoire d'ingénieur d'Etat en Aménagement des Milieux Physiques. Juin 2006.

Meybeck, M., Laroche, L., Dürr, H.H. et Syvitski, J.P.M. (2003) Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and Planetary Change* 39 (1-2), 65-93.

Moatar, F., Person, G., Meybeck, M., Coynel, A., Etcheber, H. et Crouzet, P. (2006) The influence of contrasting suspended particulate matter transport regimes on the bias and precision of flux estimates. *Science of the Total Environment* **370**, 515-531.

Moatar, F. et Meybeck, M. (2007) Riverine fluxes of pollutants: Towards predictions of uncertainties by flux duration indicators. *C.R. Geoscience*, **339**, 367-82.

Mouhous N., 1997, Etude des précipitations extrêmes journalières en Algérie du Nord. Mémoire de D.E.A. « Milieux physiques méditerranéens », Université de Nice-Sophia Antipolis, 100 p.

Nemouchi A, Géographie hydrologique du bassin-versant endoréique du Chott El Hodna, Thèse d'Etat, Université de Constantine, 2000,295 p,fig.

Neppel L, Bouvier C , Vinet F, Desbordes M, (2003), Sur l'origine de l'augmentation apparente des inondations en région méditerranéenne, Revue des Sciences de l'Eau , Rev.Sci.Eau 16/(2003) , 475-494

Obled C., 1986, Introduction au krigeage à l'usage des hydrologues, Actes des Deuxièmes journées hydrologiques de l'O.R.S.T.O.M., Montpellier, pp. 174-222.

Ouarda, T.B.M.J., Lang M, B. Bobee , Bernier J, et Bois P ,(1999). Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisés en France et au Québec. *Rev. Sci. Eau*, 12, 155-182.

Phillips, J.M., Webb, B.W., Walling, D.E., et Leeks G.J.L. (1999) Estimating the suspended loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. *Hydrol. Process.* **13**, 1035-1050 (1999).

Prenant., A, Semmoud., B. 1997, Maghreb et Moyen-Orient, espaces et sociétés, ellipses, 256p,

Probst, J.L. et Amiotte-Suchet,P. (1992) Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrol.Sci.J.* **37**: 621-637.

Remini, B., et Hallouche, W. (2004) La sédimentation dans les barrages algériens. Gestion du risque Eau en pays semi-aride, *La Houille Blanche*, 1

Remini, B., et Bensafia, D. (2009) Le problème de la sédimentation dans les barrages des zones arides: Cas algériens, Atelier scientifique MED - FRIEND Rabat 11-12 décembre 2009 Université Mohamed V-Agdal, Faculté des Science

Remini B., 2010, La problématique de l'eau en Algérie du Nord, Office des Publications Universitaires, 2005, 162 p, fig.

Remini B, Leduc C, Hallouche W., 2010, Evolution des grands barrages en régions arides: quelques exemples algériens, Article de recherche, Sécheresse 2009; 20 (1): 96-103

Roose E., Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive : la GCES *Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVI, no 2, 1991: 145-181 145*

Roose E., Erodibilité des sols érodabilité des terrains .Cartographie des risques d'érosion, Introduction aux thèmes de la 45^{ème} Journée du Réseau Erosion ORSTOM, Fonds Documentaire

Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazour M., et Morsli B., 1993, Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion *Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVIII, no 2, 1993 : 289-308 289*

Saadaoui M. (1991). — Erosion et transport solide en Tunisie. Impact sur l'infrastructure. Colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages. Alger 1-3 décembre 1991.

St-Hilaire A, Ouarda T.B.M.J., Lachance M, Bobée B , Barbet M, Bruneau P, (2003), La régionalisation des précipitations : une revue bibliographique des développements récents, *Revue des Sciences de l'Eau, Rev.Sci.Eau 16/(2003) , 27-54*

Sari A., 2009, Initiation à l'hydrologie de surface .Cours .Editions distributions Houma.224 p, fig

Sari A., 2009, Initiation à l'hydrologie de surface .Exercices et corrigés .Editions distributions Houma. 153 p, fig

Scherer J.-C., 1977. - Une méthode d'extrapolation dans l'espace de données pluviométriques moyennes. Application à une partie des Vosges et de leur bordure. *Recherches géographiques à Strasbourg, no 4 : 69-85, 5 fig*

Seltzer P., 1946, *Le climat de l'Algérie*, Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carbonnel, 219 p.

Semmoud. B, 2010, Maghreb et Moyen-Orient dans la mondialisation, Collection U, Géographie, Armand Colin, 318 p.

SOGREAH, (1983), Erosion et transport solide au Maghreb. Analyse bibliographique, PNUD Projet RAB/80/011, 1982, 45 p.

Taibi R., 1993, « Contribution à l'étude de l'écoulement des cours d'eau de l'Algérie septentrionale » DEA National d'Hydrologie, Université Montpellier II- Sciences et Techniques du Languedoc, 114 p.

Taibi R., 2012, Une agence au service du développement du secteur de l'eau *Colloque international : « Gestion intégrée des ressources en eau : rôle, organisation et traitement de la mesure » ABH-CSM, Constantine, 4-5 juin 2012*

- Terfous, A., Meghounif, A. et Bouanani, A. (2001) Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouilah (Nord ouest algérien). *Rev. Sci. Eau* **14**(2): 175-185
- Touaibia, B. (2004) *Manuel Pratique d'Hydrologie*, Presses Madani Frères, Guerrouaou, Blida, 166 p.
- Touaibia B. Inegliz S., et Ould Amara A., 2006: Couplage d'une analyse en composantes principales et d'une approche géostatistique pour l'élaboration de cartes pluviométriques du centre de l'Algérie du Nord. *Revue des Sciences de l'Eau* **19**(3) 2006, 213-219
- Touaibia, B. (2009) Erosion et transport solide en Algérie septentrionale Atelier scientifique MED - FRIEND Rabat 11-12 décembre 2009 Université Mohamed V-Agdal, Faculté des Sciences
- Touat S., (1989) Contrôle de la représentativité des échantillons des transports solides en suspension. *Revue Eaux et sols d'Algérie* **2** A.N.R.H., Bir Mourad Rais, Alger, Janvier 1989, p48-54.
- Touazi M. et Laborde J-P., 2000, Cartographie des pluies annuelles en Algérie du Nord. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol 13, pp. 191-199.
- Tricart J. et Hirsch F., 1960, Relations entre le débit et la superficie des bassins fluviaux. Paris, *Annales de géographie*, n° 375, LXIX è année, pp. 451-461.
- Tricart J., 1962, Les discontinuités dans les phénomènes d'érosion. Sym de Bari, Assoc. Int. Hydrol.Scient. Publ.n°61, p.198-217, 3 fig.
- Tricart J., 1968, Méthode de cartographie au 1/1 000 000 du contexte hydrologique élaborée au Centre de géographie appliquée de Strasbourg, *Mélanges M. Pardé*, Gap, pp. 671- 682
- Tricart J, 1978. Géomorphologie applicable, Paris, Masson, 704p, 7 fig, 17 planches.
- Verstraeten, G. et Poesen, J. (2002) Using sediment deposits in small ponds to quantify sediment yield from small catchments: possibilities and limitations. *Earth Surface Processes and Landforms* **27**, 1425-1439.
- Vila J.M., 1980, La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens, *Thèse doctorat d'état ès Sciences*, Université de Paris VI, 2 tomes, 586 p.
- Walling D. E, 1977, Assessing the accuracy of suspended Sediment Rating Curves for a small Basin, *Water Resources Research*, Vol.13, no .3, 531-538.
- Walling D. E., (1983), The sediment delivery problem, *Journal of hydrology*, **65**(1983), 209-237, Elsevier Sciences Publishers.

Walling D. E., webb B. W. (1996), Erosion and sediment yield: a global overview, *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives* (Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996). IAHS Publ.no. 236, 1996. 3, 3-19

Walling D.E., Fang D., (2003), Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers, *Global and Planetary Change* 39 (2003) 111– 126

Walling D.E. (2006), Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers, *Geomorphology* 79 (2006) 192–216

Wildi W., 1983, la chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie): structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène, *Revue de géologie dynamique et de géographie physique*, Paris, Masson, vol. 24, 3, pp. 201-297.

Wotling, G., 1999. Caractérisation et modélisation de l'alea hydrologique à Tahiti. Thèse de doctorat, Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, 308pp.

	LISTE DES FIGURES	Pages
Figure 1	Position du bassin-versant de la Seybouse en Algérie	3
Figure 2	Le bassin versant de la Seybouse : Modèle numérique de terrain et limites de sous bassins.	5
Figure 3	Localisation des postes pluviométriques dans le bassin de l'oued Seybouse, vu sous modèle numérique de terrain	13
Figure 4	Localisation des postes pluviométriques de référence	15
Figure 5	Ajustement à une loi normale des pluies annuelles des postes pluviométriques de référence (période 1969/1970-1998/1999)	16
Figure 6	Modifications des écarts entre les itérations (écart moyen, écart-types des écarts, écart maxima).	22
Figure 7	Valeurs prises par la composante 1 (projections des observations actives)	23
Figure 8	Valeurs prises par la composante 2 (projections des observations actives)	24
Figure 9	Comportement des postes pluviométriques de référence avec la première composante C1	25
Figure 10	Comportement des postes pluviométriques de référence avec la seconde composante C ₂	26
Figure 11	Ajustement à une loi normale des projections des observations actives sur la première composante (n=30)	27
Figure 12	Ajustement à une loi normale des projections des observations actives sur la seconde composante (n=30)	27
Figure 13	Détection des anomalies systématiques de Mechtat Cheikh Rabah par rapport à C1C2	30
Figure 14	Détection des anomalies systématiques de Hammam N'Bails par rapport à C1C2	30
Figure 15	Détection des anomalies systématiques d'El Hadjar par rapport à C1C2	30
Figure 16	Détection des anomalies systématiques de Mechroha par rapport à C1C2 (n=23)	31
Figure 17	Détection des anomalies systématiques de Khemissa par rapport à C1C2	31
Figure 18	Détection des anomalies systématiques de Kerma par rapport à C1C2	32
Figure 19	Détection des anomalies systématiques de Dréan par rapport à C1C2	32
Figure 20	Détection des anomalies systématiques d'Ain Babouche par rapport à C1C2	33
Figure 21	Détection des anomalies systématiques d'Ain Makhoul par rapport à C1C2	33
Figure 22	Détection des anomalies systématiques de Ksar Sbahi par rapport à C1C2	34
Figure 23	Détection des anomalies systématiques de Ouled Habeba (Bou Snib) par rapport à C1C2	34
Figure 24	Détection des anomalies systématiques de Berrahal par rapport à C1C2	34

Figure 25	Pluies mesurées et pluies estimées par régression double à Hammam N'Bails	40
Figure 26	Eléments caractérisant un variogramme	52
Figure 27	Comportements à l'origine et principaux types de variogrammes	53
Figure 28	Méthode de calcul de l'altitude lissée	58
Figure 29	les étapes de la réalisation de la carte pluviométrique	59
Figure 30	Régression pluies mesurées et pluies estimées par régression multiple (1969/1970-1998/1999)	60
Figure 31	Régression entre les coordonnées Y Lambert (km) et les pluies mesurées (1969/1970-1998/1999)	61
Figure 32	Variogramme des résidus de régression (1969/1970-1998/1999)	62
Figure 33	Carte pluviométrique interannuelle du bassin de la Seybouse (1969/1970-1998/1999)	63
Figure 34	Régression pluies mesurées et pluies estimées par régression multiple (1971/1972-1987/1988)	65
Figure 35	Régression entre coordonnées Y Lambert des postes pluviométriques et pluies mesurées (1971/1972-1987/1988)	65
Figure 36	Régression entre le paramètre $E^{d/p*z}$ et les pluies mesurées (1971/1972-1987/1988)	66
Figure 37	Variogramme des résidus de régression (1971/1972-1987/1988)	66
Figure 38	Carte pluviométrique moyenne interannuelle du bassin de la Seybouse (1971/1972-1987/1988)	68
Figure 39	Variogramme des résidus des pluies décennales humides	70
Figure 40	Carte des pluies fréquentielles décennales humides du bassin de la Seybouse (données 1969/1970-1998/1999)	71
Figure 41	Variogramme des résidus pour les pluies fréquentielles décennales sèches	73
Figure 42	Carte des pluies fréquentielles décennales sèches du bassin de la Seybouse (données 1969/1970-1998/1999)	74
Figure 43	Localisation des stations thermométriques dans le bassin de la Seybouse	77
Figure 44	Variations des températures moyennes annuelles de la station d'Ain Beida	79
Figure 45	Variations des températures moyennes annuelles de la station d'Oum El Bouagui	79
Figure 46	Variations des températures moyennes annuelles de la station de Constantine	80
Figure 47	Variations des températures moyennes annuelles, Guelma	80
Figure 48	Variations des températures moyennes annuelles, station d'Annaba	81
Figure 49	Variations des températures moyennes inter-mensuelles	82
Figure 50	Evapotranspiration Thornthwaite de la station de Guelma (1987/88 à 1999/2000)	84
Figure 51	Valeurs de l'E.T.P. A.N.R.H. moyennes inter-mensuelles, station de Oum El Bouagui (1986/1987-1999/2000)	87
Figure 52	Valeurs de l'E.T.P. A.N.R.H. moyennes inter-mensuelles de la station d'Ain Beida (1986/1987-1999/2000)	87
Figure 53	Valeurs l'E.T.P. A.N.R.H. moyennes inter-mensuelles de la station de Constantine (1971/1972 -1987/1988)	87

Figure 54	Valeurs l'E.T.P. A.N.R.H. moyennes inter-mensuelles de la station de Guelma (1987/1988 -1999/2000)	87
Figure 55	Valeurs l'E.T.P. A.N.R.H. moyennes inter-mensuelles de la station d'Annaba (1971/1972-1987/1988)	87
Figure 56	Les étages bioclimatiques dans l'Est algérien.	89
Figure 57	Déficit en eau agricole (en mm/an), RFU max= 100mm.	90
Figure 58	Répartition du nombre de mois secs dans l'année dans le bassin de la Seybouse	91
Figure 59	Le réseau hydrographique du bassin- versant de la Seybouse	98
Figure 60	Profil en long de l'oued Seybouse	99
Figure 61	Profil en long de l'oued Bouhamdane et de ses principaux affluents	100
Figure 62	Profil en long de l'oued Mellah et de ces affluents	101
Figure 63	Profil en long de l'oued Ressoul et de ces affluents	101
Figure 64	Le bassin-versant de la Seybouse: Modèle numérique de terrain et limites de sous-bassins.	104
Figure 65	Les ensembles lithologiques du bassin versant de la Seybouse	109
Figure 66	Carte des forages dans le bassin de la Seybouse	111
Figure 67	Couvert végétal de l'Est algérien	113
Figure 68	Equipement hydrométrique du bassin-versant de l'oued Seybouse	118
Figure 69	Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station de Moulin Rochefort, 1971/72-1987/88	121
Figure 70	Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station de Bordj Sabath, 1973/74-1987/88	121
Figure 71	Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station de Medjez Ammar II 1971/72-1986/87	121
Figure 72	Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station de Bouchegouf, 1971/72-1987/88	121
Figure 73	Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station de Mirbeck, 1971/72-1987/88	122
Figure 74	Ajustement à la loi log-normale des débits annuels, station d'Ain Berda, 1971/72-1987/88	122
Figure 75	Ajustement à la loi log-normale des débits mensuels de septembre, station de Moulin Rochefort	122
Figure 76	Ajustement à la loi log-normale des débits mensuels de février, station de Bouchegouf	122
Figure 77	Ajustement à la loi log-normale des débits mensuels de mai, station de Medjez Ammar II	122
Figure 78	Ajustement à la loi log-normale des débits mensuels de juin, station de Mirbeck	123
Figure 79	Régression entre débits mensuels de septembre à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort	124
Figure 80	Régression entre débits mensuels d'octobre à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort	124
Figure 81	Régression entre débits mensuels de novembre à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort	124
Figure 82	Régression entre débits mensuels de décembre à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort	125
Figure 83	Régression entre débits mensuels de janvier à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort	125

Figure 84	Régression entre débits mensuels de février à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort	125
Figure 85	Régression entre débits mensuels de mars à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort	125
Figure 86	Régression entre débits mensuels d'avril à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort	126
Figure 87	Régression entre débits mensuels de mai à Medjez Ammar II et Moulin Rochefort	126
Figure 88	Régression entre débits mensuels du mois d'août Medjez Ammar II et Moulin Rochefort	126
Figure 89	Le déficit d'écoulement pour les bassins aux stations hydrométriques	128
Figure 90	Le profil apports-surfaces du bassin de la Seybouse le long de la vallée principale	131
Figure 91	Relation entre la surface des bassins (km ²) et les débits absolus (m ³ /s)	132
Figure 92	Relation entre la pluie moyenne des bassins (mm) et les lames écoulées (mm)	132
Figure 93	Relation Pluie-Déficit d'écoulement pour les bassins de l'oued Seybouse	134
Figure 94	Lames écoulées annuelles en mm (bilan 1965-95).	135
Figure 95	Lames écoulées annuelles en mm, modèle LOIEAU	136
Figure 96	Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Cherf à la station de Moulin Rochefort	138
Figure 97	Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Sabath à la station de Bordj Sabath	138
Figure 98	Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II	138
Figure 99	Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Mellah à la station de l'oued Mellah Bouchegouf	139
Figure 100	Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Seybouse à la station de Mirbeck	139
Figure 101	Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'oued Ressoul à la station d'Ain Berda	139
Figure 102	Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels de l'oued Cherf à la station de Moulin Rochefort (1971/72-1987/88)	142
Figure 103	Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels de débits de l'oued Sabath à la station de Bordj Sabath (1971/72-1987/88)	142
Figure 104	Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels des débits de l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II (1971/72-1986/87)	143
Figure 105	Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels des débits de l'oued Mellah à la station de Bouchegouf (1971/72-1987/88)	143
Figure 106	Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels des débits de l'oued Seybouse à la station de Mirbeck (1971/72-1987/88)	144

Figure 107	Variations des débits moyens intermensuels et coefficients mensuels des débits de l'oued Ressoul à la station d'Ain Berda (1971/72-1987/88)	144
Figure 108	Hydrogramme journalier du 01 janvier au 28 février 1984, oued Cherf à la station de Moulin Rochefort	147
Figure 109	Hydrogramme annuel année 1972-1973, oued Mellah à la station de Bouchegouf	148
Figure 110	Hydrogramme annuel année 1972-1973, oued Ressoul à la station de Ain Berda	148
Figure 111	Hydrogramme annuel année 1972-1973, oued Seybouse à la station de Mirbeck	149
Figure 112	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Moulin Rochefort, 1971/72-1987/88	150
Figure 113	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Bordj Sabath 1973/74-1987/88	150
Figure 114	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Medjez Ammar II 1971/72 -1986/87	150
Figure 115	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Bouchegouf 1971/72-1986/87	150
Figure 116	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station d'Ain Berda 1971/72-1987/88	150
Figure 117	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Mirbeck 1971/72-1987/88	151
Figure 118	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Moulin Rochefort, 1971/72-1987/88	152
Figure 119	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Bordj Sabath 1973/74-1987/88	152
Figure 120	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Medjez Ammar II 1971/72-1986/87	152
Figure 121	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Bouchegouf 1971/72-1987/88	152
Figure 122	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux annuels, station de Ressoul 1971/72-1987/88	152
Figure 123	Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux instant annuels, station de Mirbeck 1971/72-1987/88	153
Figure 124a	Relation des débits maximaux moyens journaliers avec les débits maximaux instantanés en fréquence biennale ($F=0,5$), bassins jaugés de l'oued Seybouse	154
Figure 124b	Relation des débits maximaux moyens journaliers avec les débits maximaux instantanés en fréquence biennale ($F=0,5$), bassins jaugés de l'oued Seybouse, sans le bassin de l'oued Cherf	154
Figure 125a	Relation débit maximal moyen journalier avec le débit maximal instantané, sous-bassins de l'oued Seybouse, fréquence quinquennale ($F=0.8$), bassins jaugés de l'oued Seybouse	154
Figure 125b	Relation des débits maximaux moyens journaliers avec les débits maximaux instantanés en fréquence quinquennale ($F=0.8$), bassins jaugés de l'oued Seybouse, sans le bassin de l'oued Cherf	154

Figure 126a	Fig 126 a : Relation débit maximal moyen journalier avec le débit maximal instantané, sous-bassins de l'oued Seybouse, fréquence décennale (F=0.9), bassins jaugés de l'oued Seybouse	155
Figure 126b	Relation débit maximal moyen journalier avec le débit maximal instantané, sous-bassins de l'oued Seybouse, fréquence décennale (F=0.9), bassins jaugés de l'oued Seybouse, sans le bassin de l'oued Cherf	155
Figure 127a	Relation débit maximal moyen journalier avec le débit maximal instantané, sous-bassins de l'oued Seybouse, fréquence vingtennale (F=0.95) 20ans	155
Figure 127b	Relation débit maximal moyen journalier avec le débit maximal instantané, fréquence vingtennale (F=0.95), bassins jaugés de l'oued Seybouse, sans le bassin de l'oued Cherf	155
Figure 128a	Relation débit maximal moyen journalier avec le débit maximal instantané, sous-bassins de l'oued Seybouse, fréquence cinquantenale (F=0.98)	155
Figure 128b	Relation débit maximal moyen journalier avec le débit maximal instantané, fréquence cinquantenale(F=0.98) , bassins jaugés de l'oued Seybouse, sans le bassin de l'oued Cherf	155
Figure 129a	Relation débit maximal moyen journalier avec le débit maximal instantané, sous-bassins de l'oued Seybouse, fréquence centennale (F=0.99)	156
Figure 129b	Relation débit maximal moyen journalier avec le débit maximal instantané, fréquence centennale (F=0.99), sous-bassins de l'oued Seybouse sans le bassin de l'oued Cherf	156
Figure 130	Hydrogramme journalier année 1972-1973, station de Medjez Ammar II	158
Figure 131	Hydrogramme journalier année 1983-1984, station de Medjez Ammar II	159
Figure 132	Hydrogramme journalier année 1984-1985, station de Medjez Ammar II	159
Figure 133	Bassin-versant de l'oued Bouhamdane : Modèle Numérique de Terrain et postes pluviométriques	164
Figure 134	Ajustement des pluies maximales journalières du poste de Bordj Sabath à une loi de Gumbel	165
Figure 135	Ajustement des pluies maximales journalières du poste de Guelma Lycée à une loi de Gumbel	165
Figure 136	Ajustement des pluies maximales journalières du poste de Bouati Mahmoud à une loi de Gumbel	165
Figure 137	Ajustement des pluies maximales journalières du poste de Constantine Ain El Bey à une loi de Gumbel	165
Figure 138	Ajustement des pluies maximales journalières du poste de Constantine A.N.R.H.à une loi de Gumbel	165
Figure 139	Ajustement des pluies maximales journalières du poste de Ain Makhlouf à une loi de Gumbel	165
Figure 140	Ajustement des pluies maximales journalières du poste de Ksar Sbahi à une loi de Gumbel	166
Figure 141	Ajustement des pluies maximales journalières du poste de Foum El Khanga à une loi de Gumbel	166

Figure 142	Valeurs du gradex sur le bassin-versant de l'oued Bouhamdane	167
Figure 143	Pluies maximales journalières de fréquence décennale sur le bassin-versant de l'oued Bouhamdane	168
Figure 144	Pluies maximales journalières de fréquence vingtennale sur le bassin-versant de l'oued Bouhamdane	169
Figure 145	Mobilisation des eaux superficielles dans le bassin-versant de la Seybouse et ses abords	174
Figure 146	Coupe en travers du barrage de Hammam Debagh	175
Figure 147	Apports annuels dans le barrage de Hammam Debagh (1990/1991-2008/2009)	176
Figure 148	Le périmètre irrigué Guelma –Boucheougouf, distribution de l'eau	178
Figure 149	Schéma de distribution de l'eau par secteur irrigué: du seuil de prise au réservoir	178
Figure 150	Evolution des superficies équipées et des surfaces irriguées dans le périmètre de Guelma-Boucheougouf	179
Figure 151	Volumes affectés à l'irrigation à partir du barrage de Hammam Debagh (1993/1994-2008/2009)	180
Figure 152	Evolution des volumes d'eau consommés dans le périmètre de Guelma-Boucheougouf	181
Figure 153	Volumes affectés à l'A.E.P. à partir du barrage de Hammam Debagh (1993/1994-2008/2009)	182
Figure 154	Coupe du barrage de Foug El Khanga	183
Figure 155	Apports annuels au barrage de Foug El Khanga (2001/2002-2011/2012)	184
Figure 156	Périmètre irrigable de Ksar Sbahi –Sedrata	185
Figure 157	Retenues collinaires dans la Seybouse	186
Figure 158	Les transferts dans la Moyenne Seybouse et à partir des Hautes Plaines	189
Figure 159	Les transferts des Côtiers Constantinois vers la Basse Seybouse	191
Figure 160	Les transferts des Côtiers Constantinois Centre vers la Basse Seybouse	193
Figure 161	Les transferts Ain Délia –Cherf –Oum El Bouagui	195
Figure 162	Les transferts hydrauliques vers le bassin de la Seybouse	196
Figure 163	Position dans l'année des mesures de concentration, station de Moulin Rochefort, oued Cherf amont (1985/1994)	212
Figure 164	Position dans l'année des mesures de concentration, station de Bordj Sabath, oued Bouhamdane amont (1974/1976)	213
Figure 165	Position dans l'année des mesures de concentration, station de Medjez Ammar II (bassin de l'oued Bouhamdane)	214
Figure 166	Position dans l'année des mesures et valeurs de concentration, oued Mellah station de Boucheougouf (1980/2000)	215
Figure 167	Position dans l'année des mesures et concentrations mesurées, oued Ressoul, station d'Ain Berda (1980/2000)	216
Figure 168	Relation débits liquides –concentrations, station de Aïoun Settara (1985/1994) (échelle arithmétique)	220
Figure 169	Relation débits liquides –concentrations, station de Aïoun Settara (1985/1994) (échelle bi-logarithmique)	220

Figure 170	Relation débits liquides –débits solides, station de Moulin Rochefort, automne	222
Figure 171	Relation débits liquides –débits solides, station de Moulin Rochefort, hiver	222
Figure 172	Relation débits liquides –débits solides, station de Moulin Rochefort, printemps	223
Figure 173	Relation débits liquides-débits solides, station de Bordj Sabath, hiver	223
Figure 174	Relation débits liquides-débits solides, station de Bordj Sabath, printemps	224
Figure 175	Relation débits liquides –débits solides, station de Medjez Ammar II, automne	225
Figure 176	Relation débits liquides –débits solides, station de Medjez Ammar II, hiver	225
Figure 177	Relation débits liquides –débits solides, station de Medjez Ammar II, printemps	226
Figure 178	Relation débits liquides –débits solides, station de Medjez Ammar II, été	226
Figure 179	Relation débits liquides –débits solides, station de Bouchegouf, automne	227
Figure 180	Relation débits liquides –débits solides, station de Bouchegouf, hiver	228
Figure 181	Relation débits liquides –débits solides, station de Bouchegouf, printemps	228
Figure 182	Relation débits liquides-débits solides, station de Ain Berda, automne	229
Figure 183	Relation débits liquides-débits solides, station d'Ain Berda, hiver	229
Figure 184	Relation débits liquides-débits solides, station d'Ain Berda, printemps	230
Figure 185	Variabilité des T.S.S.annuels pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort (1971/1972-1987/1988), calculs sans CF	235
Figure 186	Variabilité des T.S.S. mensuels moyens pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort (1971/1972-1987/1988), calculs sans CF	235
Figure 187	Variabilité des T.S.S. mensuels pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort, année (1983/1984), calculs sans CF	236
Figure 188	Variabilité des T.S.S. mensuels pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort, année (1987/1988), calculs sans CF	237
Figure 189	Variations des T.S.S. annuels pour le bassin de l'oued Bouhamdane	237
Figure 190	Variations des T.S.S. moyens mensuels pour le bassin de l'oued Bouhamdane	238
Figure 191	Variations des T.S.S. annuels pour le bassin de l'oued Mellah, 1971/1972 -1987/1988	239
Figure 192	Variations des T.S.S. mensuels pour le bassin de l'oued Mellah, 1971/1972 -1987/1988	240
Figure 193	T.S.S.annuels (1971/1972-1987/1988), bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda, sans cf	240

Figure 194	T.S.S.mensuels (1971/1972-1987/1988), bassin de l'oued Ressoul à Ain Berda, sans cf	241
Figure 195	Situation géographique (a) et contexte topographique (b) du bassin de l'Oued Bouhamdane (Oued Seybouse, Algérie)	245
Figure 196	Position dans l'année des mesures de concentration en MES et magnitude des concentrations à la station de Medjez Ammar 2	249
Figure 197	Position dans l'année des mesures de débits liquides et magnitude des débits à la station de Medjez Ammar 2	249
Figure 198	Relation débits liquides instantanés-débits solides	251
Figure 199	Variations annuelles du transport solide spécifique (TSS), de l'écoulement (E) et des précipitations (P) (période: 1969/1970 - 2009/2010)	254
Figure 200	Régime des transports solides et des écoulements des années pluvieuses (a: 1984/1985 ; b: 2004/2005 c: 2002/2003, d: 1972/1973)	258
Figure 201	Régime des transports solides et des écoulements des années sèches (a: 1973/1974 ; b: 1996/1997)	259
Figure 202	Débits liquides et débits solides journaliers (1972/1973)	260
Figure 203	Courbes de durée de flux solides et liquides de l'Oued Bouhamdane :a: 1972/1973, b: 1984/1985, c: 2004/2005	262

	TABLEAUX LISTE DES	Pages
Tableau 1	Postes pluviométriques et pourcentage d'information pluviométrique disponible (période 1969/70 -1997/98)	12
Tableau 2	Stations pluviométriques de base	18
Tableau 3	Données pour le comblement des lacunes pluviométriques annuelles par A.C.P., programme "Bouche trous"	19
Tableau 4	Moyennes et écarts-types des variables actives des stations de base en racines de dixièmes de mm	23
Tableau 5	Projection des variables actives sur les pluies annuelles	24
Tableau 6	Détails de la régression double pluies annuelles à Hammam N'Bails avec C1C2	37
Tableau 7	Moyennes et écarts-types des 3 variables (z, x, et y)	38
Tableau 8	Coefficients de corrélation totale entre les 3 variables (z, x, et y)	38
Tableau 9	Coefficients de corrélation partielles et coefficient de corrélation multiple R	38
Tableau 10	Récapitulatif des résultats du comblement des lacunes. (r, période fictive n', erreur-type, variance résiduelle)	41
Tableau 11	Valeur expérimentale de F et valeur théorique de F pour trois postes pluviométriques	41
Tableau 12	Incertitude à 70 % sur l'estimation de la moyenne s'exprime en %	42
Tableau 13	Valeurs de U de Gauss, fréquences et périodes de retour	43
Tableau 14	Régression pluies fréquentielles avec la variable réduite de Gauss U	44
Tableau 15	Détails des calculs des fréquences de pluies pour la station de Hammam N'Bails	45
Tableau 16	Résultats de la régression multiple linéaire avec (1969/1970-1998/1999)	60
Tableau 17	Régression linéaire avec 2 variables explicatives, pluies 1971/1972-1987/1988	64
Tableau 18	Les paramètres d'ajustement du variogramme des résidus de régression des pluies (1971/1972-1987/1988)	67.
Tableau 19	Eléments de comparaison entre les types de variogramme des résidus pour les pluies de (1971/1972-1987/1988)	67
Tableau 20	Différences de données entre les deux cartes (1969/1970-1998/1999 et 1971/1972-/1987/1988)	67
Tableau 21	régression multiple pour les pluies fréquentielles décennales humides	69
Tableau 22	Régression multiple pour les pluies fréquentielles décennales sèches	72
Tableau 23	Variabilité de l'ETP TURC pour les stations étudiées	85
Tableau 24	Variabilité de l'ETP ANRH pour les stations étudiée	86
Tableau 25	Parts saisonnières de l'E.T.P. A.N.R.H.	86
Tableau 26	Résultats du calcul de l'E.T.P. annuelle Thornthwaite, Turc et E.T.P. A.N.R.H.	88
Tableau 27	Les données hypsométriques et les altitudes caractéristiques des bassins-versants	103

Tableau 28	Les caractéristiques morphométriques des bassins-versants aux stations hydrométriques	105
Tableau 29	Données sur le réseau hydrographique des bassins-versants aux stations hydrométriques d'après Cahiers de l'A.B.H.C.S.M., (1999)	106
Tableau 30	Données sur le réseau hydrographique des bassins-versants aux stations hydrométriques d'après Annales hydrologiques (A.N.R.H., 2008 ; Mebarki, 2005)	107
Tableau 31	Les stations hydrométriques du bassin-versant de la Seybouse	119
Tableau 32	Régressions entre débits mensuels observés aux stations hydrométriques	123
Tableau 33	Bilans hydrologiques moyens 1971-1988 des bassins contrôlés par des stations hydrométriques	127
Tableau 34	Relations entre facteurs de l'écoulement et écoulement pour les bassins de l'Est algérien	133
Tableau 35	Valeurs moyennes et extrêmes des lames écoulées annuelles	137
Tableau 36	Débits fréquentiels annuels dans le bassin de l'oued Seybouse	140
Tableau 37	Valeurs de Q max moyens journaliers et instantanés	146
Tableau 38	Débits moyens journaliers maximaux fréquentiels (m^3/s)	151
Tableau 39	Lames écoulées maximales fréquentielles journalières (en mm)	151
Tableau 40	Q max fréquentiels instantanés	153
Tableau 41	Relations du débit maximal moyen journalier avec le débit maximal instantané pour les différentes fréquences	157
Tableau 42	Le débit instantané maximal (m^3/s) et débit moyen journalier maximal (m^3/s) de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II	161
Tableau 43	Débits maximaux instantanés et moyens journaliers des crues de saison chaude (mai à octobre), de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II (m^3/s)	162
Tableau 44	Valeurs de la variable réduite de Gumbel pour les fréquences les plus utilisées	166
Tableau 45	Surfaces équipées et irrigables dans le périmètre de Guelma-Boucheougouf	179
Tableau 46	Assolements dans le périmètre de Guelma-Boucheougouf	180
Tableau 47	Caractéristiques de la retenue d'eau de Foug El Khanga	183
Tableau 48	Petits barrages dans le bassin de l'oued Seybouse	185
Tableau 49	Les mesures de concentrations disponibles	211
Tableau 50	Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés à la station d'Aioun Settara (1985/1994)	212
Tableau 51	Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés à la station de Bordj Sabath (1974/1976)	213
Tableau 52	Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés à la station de Medjez Ammar II	214
Tableau 53	Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés à la station de Boucheougouf (1980/2000)	215
Tableau 54	Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés à la station Ain Berda (1980/2000)	216
Tableau 55	Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin –versant de l'oued Cherf à Moulin Rochefort	223
Tableau 56	Paramètres des courbes de régression saisonnières, oued Sabath à la station de Bordj Sabath	224

Tableau 57	Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin –versant de l'oued Bouhamdane à Medjez Ammar II	227
Tableau 58	Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin –versant de l'oued Mellah à Bouchegouf	228
Tableau 59	Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin –versant de l'oued Ressoul à Ain Berda	230
Tableau 60	Synthèse des valeurs de M.N.B.et R.M.S.pour les relations saisonnières $C=f(QI)$ et $Qs=f(QI)$ pour les stations hydrométriques du bassin de la Seybouse	231
Tableau 61	Relations saisonnières, coefficients de corrélation et de détermination entre les concentrations et les débits liquides	232
Tableau 62	Paramètres statistiques des T.S.S. pour la période commune (1971-1972/1987-1988)	234
Tableau 63	Répartition saisonnière des T.S.S. pour le bassin de l'oued Cherf à Moulin Rochefort (1971/1972-1987/1988), calculs sans CF	236
Tableau 64	Erreurs commises lors du calcul des apports en appliquant les courbes d'étalonnage	242
Tableau 65	Valeurs des coefficients de correction saisonniers (CF)	242
Tableau 66	Paramètres statistiques des T.S.S. pour la période commune (1971-1972/1987-1988).	243
Tableau 67	Ecart entre les valeurs calculées sans corrections et en appliquant les corrections saisonnières	243
Tableau 68	Répartition par année des prélèvements et valeurs caractéristiques des concentrations à la station de Medjez Ammar 2 (période: 1969/1970-1986/1987)	248
Tableau 69	Répartition par saison des intervalles de C et de Q mesurés à la station de Medjez Ammar 2	248
Tableau 70	Valeurs du transport solide spécifique et des paramètres hydrologiques à la station hydrométrique et au barrage	253
Tableau 71	Résultats de TSS obtenus sur des bassins d'Algérie du Nord	255
Tableau 72	Valeurs annuelles moyennes du transport solide en suspension dans quelques oueds algériens à l'amont des barrages (d'après Kouti et Taabni, 1989)	256
Tableau 73	Répartition mensuelle et saisonnière des débits et de TSS à la station hydrométrique de Medjez Ammar 2 (période moyenne:1969/1970-1986/1987)	257

	LISTE DES PHOTOS	Pages
Photo 1	Paysage du bassin de l'oued Sabath, zone tellienne, maquis dégradé et gabionnage sur un thalweg	114
Photo 2	Paysage du bassin de l'oued Bouhamdane à l'amont du barrage de Hammam Debagh, zone tellienne: maquis discontinu dégradé et céréaliculture, lambeaux de forets sur les sommets	114
Photo 3	Sommet délimitant le sous-bassin de l'oued Sabath et celui de l'oued Bouhamdane : Chêne vert, et végétation clairsemée.	114
Photo 4	Le barrage de Hammam Debagh: évacuateur de crues en puits de section circulaire et protection sur la rive gauche (vue à partir de la digue)	175

(: الشرق الجزائري) الحوض التجميحي لواد السيوس هيدرولوجية وتهيئة الموارد المائية

ملخص

تتناول الهيدرولوجية السطحية دراسة كمية ونوعية لمياه الأحواض التجميحية. تم تناول ثلاثة محاور في هذا البحث الذي اهتم بهيدرولوجية الحوض التجميحي لواد السيوس في الشرق الجزائري.

الأمطار (الأمطار السنوية و الأمطار اليومية القصوى) ورسم خرائط أوتوماتيكية cartographie automatique.

الجريان السائل للمجاري المائية بتناول المعطيات المسجلة في المحطات الهيدرومترية. وتمت دراسة عناصر الموازنة الهيدرولوجية، تغيرات أحجام التغذية على عدة مستويات زمنية وكذلك أهمية ظواهر الفيضانات. تم كذلك تناول تهيئة المياه السطحية عن طريق السدود وتحويلات المياه.

في الأخير النقل الصلب للمجاري المائية ، ونمدجتها بالإرتباط مع الجريان السائل وتأثيرها على توحد السدود.

يتكون حوض السيوس ، ذو مساحة 6745 كلم² من أوساط مناخية و فيزيائية متباينة شبه جاف في الجنوب (السهول العليا) وشبه رطب في الشمال (التل) وهو يقوم بصرف مجاري مائية ذات صبيبات مختلفة.

الأمطار المقاسة تتراوح بين 230 ملم في محطة عيون سطارة و 867 ملم في محطة المشروحة في حوض واد المالح. وتمتاز الأمطار بقيم قصوى التي تم رسم خرائط أو توماتيكية لتمثيلها.

إن تحليل المعطيات ، الجيو إحصاء Géostatistique ، و النماذج الرقمية للميدان (T.N.M) سمحت بتمثيل خرائط مطرية لعدة فترات دراسة.

سمحت الصبيبات المسجلة في المحطات الهيدرومترية في الفترة 1971/7219 – 1987/8819 بإستخراج جريان سنوي يتراوح بين 23 ملم في محطة مولان روسفور في السهول العليا و 196 ملم في محطة بوسقوف في المنطقة الجنوب تلية، يتراوح معامل الجريان بين 6,3 و 26,4% وعجز الجريان بين 336,3 و 545,7 ملم سنويا بالنسبة لنفس الأحواض.

وصل الصبيب الفيضي لحوض واد السيوس في محطة ميرباك إلى 1236م³/ثا يوم 31 ديسمبر 1984.

سمحت النمذجة ، إنطلاقا من خرائط الأمطار اليومية القصوى، بتقدير الصبيبات اليومية القصوى و الحدية للحوض الجزئي لواد بوحمدان.

إن تعبئة المياه السطحية محققة عن طريق السدود (سدين كبيرين، 4 سدود صغيرة و ستين سد ترابي). لكن الحاجيات المتزايدة لهذا الحوض لن يمكن تلبيتها إلا بتحويل أحجام كبيرة من أحواض مجاورة.

سمحت دراسة مقارنة للأحواض الجزئية بتناول النقل الصلب و تغيراته بين سنوية وبين شهرية. وتمت دراسة حالة حوض واد بوحمدان. وقد إستخرجت علاقات (قوانين) صبيب صلب – صبيب سائل و منحنيات تمثل تغير أحجام التغذية الصلبة و السائلة السنوية.

وتمت كذلك دراسة نسبة الترسبات لسد حمام دباغ إنطلاقا من ديسمبر 1987.

سمح هذا البحث بالمساهمة في تعميق معرفة الهيدرولوجية الجزائرية عبر حوض مهم ذو تصريف خارجي في الشرق الجزائري (حوض السيوس). وسمح كذلك بتطبيق طرق إحصائية، وطرق جيو إحصائية لإنجاز خرائط أوتوماتيكية.

الكلمات المفتاحية: أمطار، صبيبات سائلة، نقل صلب، نمذجة، خرائط، تهيئة، حوض واد السيوس.

THE BASIN OF WADI SEYBOUSE (EASTERN ALGERIA) : HYDROLOGY AND PLANNING OF WATER

Abstract

The surface hydrology deals with problems of both quantitative and qualitative runoff. Three major themes were addressed in this research on the hydrology of the watershed of the river in eastern Algeria (Seybouse):

- Rainfall (annual rainfall and maximum daily rainfall) and automatic mapping;
- The liquid flows in wadis observed at hydrometric stations highlighting the terms of the water balance, the variability of inflow at different timescales and the importance of flood events. Also, water management is studied through dams and water transfers;
- Finally, the sediment transport wadis, modeling in relation to liquid flows and their impact on siltation of dams.

The basin, with an area of 6745 km², consists of very different physical and climatic environments: semi-arid in south (High Plains) and sub-humid north (Tell) draining rivers with very different flows. Rains, punctually known vary from 230 mm at Aioun Settara raining station in the High Plains to 867 mm at Mechroha raining station in the basin of the Oued Mellah with extremes that mapping helped to develop. Data analysis, geostatistics, and the digital terrain model (DTM), have allowed spatialization (automatic mapping) information "rain" over several periods.

Rates observed at gauging stations over the period 1971/72-1987/88 shows the variations of annual runoff ranging from 23 mm to Station Moulin Rochefort in the High Plains to 196 mm at Bouchegouf gauging station in the south- Tellian, the flow rate ranging from 6.3 to 26.4% and the flow deficit from 336.3 to 545.7 mm per year for the same basins. In times of flood for the river basin to Seybouse Mirbeck, the instantaneous flow rate reached 1236 m³ / s at December 31, 1984. Modeling, starting from the maximum daily rainfall mapping has allowed the estimation of maximum daily flows and peak flows leading to the sub-basin of the Bouhamdane River.

Mobilization of surface water is carried by dams (two large dams, four small dams and sixty dams). But the very growing water needs in the basin can be satisfied by transfer involving very large volumes of water.

The study of sediment transport and their interannual variability and inter-monthly is realized by a comparative analysis of the sub-basins. The case study of the river basin Bouhamdane allowed proposing laws Qs-QL and bi-frequency curves and quantification of sedimentation dam Hammam Debagh inflow since December 1987.

This research helped contribute to deepen the knowledge of Algerian hydrology of an important exoréic watershed in Eastern Algeria (Oued Seybouse). It was an opportunity to apply statistical methods, interpolation (kriging) and automatic mapping.

Keywords: rain, liquid flow, sediment transport modeling, mapping, planning, Seybouse wadi basin.

LE BASSIN-VERSANT DE LA SEYBOUSE (Algérie orientale) : HYDROLOGIE ET AMENAGEMENT DES EAUX

Résumé

L'hydrologie de surface traite de problèmes à la fois quantitatifs et qualitatifs des écoulements de surface. Trois grands axes ont été abordés dans ce travail de recherche portant sur l'hydrologie du bassin-versant de l'oued Seybouse dans l'Est algérien :

- les précipitations (pluies annuelles et journalières maximales) et leur cartographie automatique ;

- les écoulements liquides des oueds observés aux stations hydrométriques mettant en valeur les termes du bilan d'eau, la variabilité des apports aux différentes échelles temporelles ainsi que l'importance des événements de crue. Aussi, l'aménagement des eaux est-il abordé à travers les barrages et les transferts hydrauliques;

- enfin les transports solides des oueds, leur modélisation en relation avec les écoulements liquides et leur impact sur l'envasement des barrages.

Le bassin, d'une surface de 6745 km², se compose de milieux climatiques et physiques très différenciés : semi-aride au Sud (Hautes Plaines) et sub-humide au Nord (Tell) drainant des cours d'eau aux débits très différenciés. Les pluies, connues ponctuellement, varient de 230 mm à Aïoun Settara dans les Hautes Plaines à 867 mm à la station de Mechroha dans le bassin de l'oued Mellah, avec des extrêmes que la cartographie a permis de mettre en valeur. L'analyse de données, la géostatistique, le modèle numérique de terrain (M.N.T.), ont permis la spatialisation (cartographie automatique) de l'information « pluie » sur plusieurs périodes.

Les débits observés aux stations sur la période 1971/72-1987/88 ont permis de faire ressortir des écoulements annuels variant de 23 mm à la station de Moulin Rochefort dans les Hautes Plaines à 196 mm à la station de Bouchegouf dans la zone sud-tellienne ; le coefficient d'écoulement variant de 6,3 à 26,4 % et le déficit d'écoulement de 336,3 à 545,7 mm par an pour les mêmes bassins. En périodes de crues, pour le bassin de l'oued Seybouse à Mirbeck, le débit instantané a atteint 1236 m³/s le 31 décembre 1984. La modélisation, partant de la cartographie des pluies journalières maximales, a permis l'estimation des débits journaliers maximaux et des débits maximaux de pointe sur le sous-bassin de l'oued Bouhamdane.

La mobilisation des eaux superficielles est réalisée par barrages (2 grands barrages, 3 petits barrages et une soixantaine de retenues collinaires). Mais les besoins en eau très croissants dans ce bassin ne peuvent être satisfaits que par des transferts mettant en jeu des volumes d'eau très importants.

L'étude des transports solides et de leur variabilité interannuelle et inter-mensuelle s'est faite par une analyse comparative des sous bassins. Les valeurs moyennes inter-annuelles de T.S.S., oscillent entre 124,17 t/km²/an pour le bassin de l'oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II et 899,86 t/km²/an pour le bassin de l'oued Mellah à la station de Bouchegouf. L'étude du cas du bassin de l'oued Bouhamdane a permis de proposer des lois Qs -Ql et des courbes bi-fréquentielles ainsi que la quantification de la sédimentation du barrage de Hammam Debagh mis en eau depuis décembre 1987. La variabilité est très forte, 0.5 t/km²/an pour l'année à 1396 t/km²/an en 2004/2005.

Cette recherche a permis de contribuer à approfondir la connaissance de l'hydrologie algérienne à travers un important bassin exoréique de l'Est (Oued Seybouse). Elle a été l'occasion de mettre en application les méthodes statistiques, d'interpolation (krigeage) et de cartographie automatique.

Mots-clés: pluies, débits liquides, transports solides, modélisation, cartographie, aménagement, bassin de l'oued Seybouse.