

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de Technologie



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle

En : **Hydraulique**

Spécialité : **Hydraulique**

Par : **BOUGUERRA Hamza**

Sujet

Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risques d'érosion hydrique par utilisation d'un SIG: application aux bassins de Bouhamdane et Ressoul (Nord-Est Algérien).

Soutenue publiquement le 25/11/2018, devant le jury composé de :

Mme ADJIM BENSAOULA Fouzia	Professeur	UABB - Tlemcen	Président
Mr BOUANANI Abderrazak	Professeur	UABB - Tlemcen	Directeur de thèse
Mr KHANCHOUL Kamel	Professeur	UBM - Annaba	Co- Directeur de thèse
Mr DJEMILI Lakhdar	Professeur	UBM - Annaba	Examineur 1
Mr GHENIM Abderrahmane Nekkache	Professeur	UABB - Tlemcen	Examineur 2
Mr TACHI Salah Eddine	M.C.B.	ENP - Alger	Invité

Résumé :

En Algérie du Nord et jusqu'à aujourd'hui, l'érosion hydrique reste un problème majeur qui réduit en amont des bassins versants la productivité des terres cultivables par les pertes des sols, des engrais, des éléments nutritifs,... etc., et qui diminue en aval des bassins versants la durée de vie des barrages-réservoirs par la sédimentation accélérée dans leurs retenues. Cette érosion est causée par la réunion de plusieurs facteurs physico-climatiques à savoir la pluviométrie, le relief, les pratiques culturales, l'occupation et les caractéristiques des sols. Dans les bassins versants des oueds Bouhamdane et Ressoul (nord-est algérien) ces facteurs sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène érosif.

La présente étude vise à évaluer les pertes en sol provoquées par le phénomène érosif et cartographier les secteurs potentiellement sensibles à l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane ; Pour ce faire, la version révisée de l'équation universelle de perte en sol (RUSLE) a été utilisée. L'application de cette dernière prend en considération cinq facteurs à savoir l'érosivité des pluies, la topographie, l'érodibilité du sol, le couvert végétal et les pratiques antiérosives. Le produit de ces facteurs sous un système d'information géographique (ArcGIS) à l'aide de l'équation mathématique du modèle RUSLE, nous a permis d'établir une carte des pertes en sol sur l'ensemble du bassin versant et de mettre en évidence les zones à sensibilité critique nécessitant des interventions urgentes et ce, pour réduire les apports solides à la retenue du barrage Hammam Debagh située à l'exutoire du bassin.

Les résultats obtenus par l'application du modèle RUSLE montrent que la perte moyenne des sols par l'érosion hydrique de l'ordre de 11,18 t/ha/an au bassin versant de l'oued Bouhamdane dépasse la limite moyenne de tolérance des sols vis-à-vis de l'érosion hydrique (7 t/ha/an). 14,33 % de la zone étudiée marquée par un taux d'érosion supérieur ou égal 20 t/ha/an, sont sérieusement menacées par le phénomène érosif et sont caractérisées par des terres à fortes pentes et plus érodées. Contre 40,15 % des terres qui montrent une perte de sol tolérable inférieur à 7 t/ha/an, ces terres sont bien protégées par une couverture végétale et reposent sur des pentes douces.

L'un des principaux objectifs de cette étude est l'élaboration d'un modèle précis pour prédire les flux de matières en suspension (MES) transportées par l'oued Ressoul pendant les événements extrêmes (crues). La complexité du transport de MES avec leur non-linéarité durant ces événements nécessite l'utilisation de méthodes non linéaires pour leur prévision. Dans ce travail, les MES ont été modélisées par l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) sous MATLAB sur la base des mesures instantanées des concentrations de MES et des débits liquides (Q) à l'échelle de crues pour une longue période de 31 ans d'observation. L'apprentissage du réseau neuronal à rétro-propagation (RNRP) a été effectué en utilisant deux algorithmes différents; l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) et l'algorithme de Quasi-Newton (BFGS).

Les résultats obtenus indiquent que les deux RNA ont fournis des simulations satisfaisantes selon les critères de performance Nash-Sutcliffe (NS) et l'erreur moyenne quadratique (RMSE), avec une meilleure performance de l'algorithme BFGS qui a donné une précision de 93 % contre 90 % par l'algorithme LM avec une amélioration de l'erreur d'environ de 1,8 %. L'estimation des transports solides en suspension à l'échelle des crues a été faite par l'emploi du RNA avec l'algorithme BFGS pour la période 1968/69-2011/12 ; Sur une période de 42 ans et pendant 621 crues, environ 1,8 million de tonne de MES ont été véhiculées par l'oued Ressoul à la station hydrométrique de Ain Berda.

Mots clés :

Érosion hydrique, cartographie, sensibilité, oued Bouhamdane, RUSLE, SIG, modélisation, transport de MES, oued Ressoul, RNA, algorithme LM, algorithme BFGS.

Abstract :

Up to today in northern Algeria, the water erosion remains a major problem in the upstream of watersheds, it reduces the productivity of arable land by the soil losses, fertilizer, nutrients elements,... etc., and in downstream of watersheds it decreases the lifespan of storage dams by the accelerated sedimentation in their water reserves. This erosion is caused by the Meeting of several physico-climatic factors namely the rainfall, the relief, the cultivation methods, the occupation and the characteristics of the soils. In the watersheds of the Bouhamdane and Ressoul Wadis (North-East of Algeria), the physico-climatic factors are particularly susceptible to the triggering and the acceleration of the erosive phenomenon.

The study presented herein aims to assess the soil losses caused by the erosive phenomenon and mapping of the sectors that are potentially susceptible to water erosion in the Wadi Bouhamdane watershed. In order to prove this, the revised version of the universal soil loss equation (RUSLE) has been used. The application of this model takes into account five factors namely the rainfall erosivity, the topography, the soil erodibility, vegetation cover and conservation practice. The product of these factors under a Geographic Information System (ArcGIS) using the mathematical equation of the model RUSLE, has allowed us to establish a map of soil losses in the whole catchment and to highlight the critical sensitivity areas requiring urgent interventions in order to reduce the sediment yield to the Hammam Debagh reservoir, located at the watershed downstream.

The results obtained by the application of RUSLE model show that the average loss of soil by water erosion in the order of 11.18 t/ha/year in the watershed exceeds the average limit of soil tolerance with (7 t/ha/year). 14.33 % of the study area marked by a rate of erosion equal to or above 20 t/ha/year are seriously threatened by the erosive phenomenon and are characterized by strong slopes and more eroded soils. On the other hand, 40.15 % of the catchment area show a tolerable soil loss lower than 7 t/ha/year. These lands are protected by vegetation cover and are based on gentle slopes.

One of the main objectives of this study is to develop a specific model to predict the suspended sediment (SS) transported by the Ressoul Wadi during extreme flood events. The complexity of suspended sediment transport with their non-linearity during these events requires the use of the non-linear methods for their forecast. In this work, the Suspended sediment have been modeled by the use of artificial neural networks (ANN) on the basis of instantaneous measures of sediment concentrations and water discharge during floods events for a period of 31 years. The training of the back-propagation neural network (BPNN) has been performed using two different algorithms; the Levenberg-Marquardt algorithm (LM) and the Quasi-Newton algorithm (BFGS).

The results indicate that the two algorithms have provided satisfactory simulations according to the performance criteria of Nash-Sutcliffe (NS) and the root mean square error (RMSE), with a better performance of the BFGS algorithm with an accuracy of 93 % against 90 % by the LM algorithm with an error improvement approximately 1.8 %. The estimation of suspended sediment discharge during floods events was done by the employment of the best neural network trained by quasi-newton algorithm for a period of 42 years between 1968/69-2011/12, with 621 flood events, approximately 1.8 million tons of sediment yield were transported by the Ressoul Wadi to the hydrometric station of Ain Berda.

Key words :

Water erosion, cartography, sensitivity, Bouhamdane wadi, RUSLE, GIS, modeling, suspended sediment transport, Ressoul wadi, ANN, LM algorithm, BFGS algorithm.



Dédicaces

À la mémoire de mon père

Pour ma mère,

mon épouse,

ma fille,

ma sœur,

mes frères,

ma famille,

et tous mes amis.



Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens d'abord à exprimer mes vifs remerciements à mon directeur de thèse monsieur le professeur **BOUANANI Abderrazak** de la faculté de technologie de Tlemcen et à mon co-directeur monsieur le professeur **KHANCHOUL Kamel** de la faculté des sciences de la terre d'Annaba, qui m'ont bien dirigé pour la réussite et la finalisation de ce travail.

C'est avec un grand plaisir que je remercie également madame **ADJIM BENSAOULA Fouzia**, professeur au département d'hydraulique de Tlemcen, d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance et de juger ce travail.

Je tiens à remercier cordialement les membres de jury, messieurs **DJEMILI Lakhdar** professeur au département d'hydraulique d'Annaba et **GHENIM Abderrahmane Nekkache** professeur au département d'hydraulique de Tlemcen, qui ont accepté d'examiner et de juger mon travail de thèse.

Je n'oublierai pas d'adresser mes sincères remerciements à messieurs **TACHI Salah Eddine** maître conférence de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, **DERDOUS Oussama** maître de conférence à l'université d'Ouargla, **BOUZERIA Housseyn** maître assistant à l'université de Blida, pour leurs aides et leurs soutiens scientifiques.

Enfin, un grand merci à tous mes chers amis qui m'ont encouragé tout le long de la réalisation de cette thèse, je cite spécialement : **BOUCHEHED Hamza**, **BOUHADEB Chemss-Eddine**, **BENAMARA Abdelwaheb**, **CHAHMAT Farid**, **HERAGMI Ali**, ...

Sommaire :

Résumé.....	i
Abstract.....	iii
Dédicaces.....	v
Remerciements.....	vi
Sommaire.....	vii
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xiii
Introduction générale.....	1
1. Contexte et problématique.....	1
2. Objectifs de l'étude.....	6
3. Plan de la thèse.....	6

Chapitre I: Présentation générale de la zone d'étude.

I-1 Situation géographique.....	8
I-1.1 Bassin versant de l'oued Bouhamdane.....	10
I-1.2 Bassin versant de l'oued Ressoul.....	11
I-2 Description du milieu physique.....	12
I-2.1 Courbes hypsométriques.....	12
I-2.2 Altitudes caractéristiques.....	15
<i>a. Altitude minimale.....</i>	15
<i>b. Altitude à 95% de surface.....</i>	15
<i>c. Altitude médiane.....</i>	15
<i>d. Altitude à 5% de surface.....</i>	15
<i>e. Altitude maximale.....</i>	16
<i>f. Altitude moyenne.....</i>	16
I-2.3 Intégrale hypsométriques.....	16
I-3 Les indices morphologiques.....	17
I-3.1 Indice de compacité de Gravelius.....	17
I-3.2 Rectangle équivalent.....	17
<i>a. Longueur du rectangle équivalent.....</i>	18
<i>b. Largeur du rectangle équivalent.....</i>	18
I-3.3 La dénivelée.....	18
I-3.4 Indice de pente de Roche.....	18
I-3.5 Indice de pente global.....	20
I-3.6 Dénivelée spécifique.....	20
I-4 Caractéristiques physiographiques.....	21
I-4.1 Densité de drainage.....	22
I-4.2 Fréquence des talwegs élémentaires.....	23
I-4.3 Coefficient de torrentialité.....	23
I-4.4 Rapport de confluence des talwegs.....	24
I-4.5 Rapport des longueurs des talwegs.....	24
I-4.6 Temps de concentration du bassin versant.....	24

I-4.7	Vitesse d'écoulement.....	25
I-5	Pentes.....	25
I-5.1	Pentes du bassin versant de l'oued Bouhamdane.....	26
I-5.2	Pentes du bassin versant de l'oued Ressoul.....	27
I-6	Lithologie.....	28
I-6.1	Lithologie du bassin versant de l'oued Bouhamdane.....	28
I-6.2	Lithologie du bassin versant de l'oued Ressoul.....	30
I-7	Occupation des sols.....	31
I-8	Synthèse des caractéristiques des deux bassins étudiés.....	34

Chapitre II: Hydroclimatologie.

II-1	Introduction.....	35
II-2	Climatologie.....	35
II-2.1	Précipitation.....	35
	<i>a. Précipitations moyennes mensuelles.....</i>	<i>36</i>
	<i>b. Précipitations moyennes saisonnières.....</i>	<i>37</i>
	<i>c. Précipitations moyennes annuelles.....</i>	<i>38</i>
	<i>d. Variabilité interannuelle des précipitations.....</i>	<i>39</i>
II-2.2	Température.....	41
II-2.3	Diagramme ombro-thermique de Gaussen.....	44
II-2.4	Humidité relative de l'air.....	45
II-2.5	Vent.....	46
II-2.6	Indice d'aridité de DE-MARTONNE.....	47
	<i>a. Indice d'aridité annuel.....</i>	<i>47</i>
	<i>b. Indice d'aridité mensuel.....</i>	<i>48</i>
II-2.7	Etages bioclimatiques.....	49
II-2.8	Indice d'EMBERGER.....	49
II-3	Bilan hydrologique.....	51
II-3.1	Evapotranspiration.....	51
	<i>a. Evapotranspiration potentielle.....</i>	<i>51</i>
	<i>b. Evapotranspiration réelle.....</i>	<i>53</i>
II-3.2	Ruissellement.....	53
II-3.3	Interprétation des résultats du bilan hydrique.....	54
II-4	Régime d'écoulement aux stations hydrométriques.....	56
II-4.1	Variation mensuelle de l'écoulement.....	57
II-4.2	Variation interannuelle de l'écoulement.....	60
II-5	Synthèse.....	64

Chapitre III: Quantification et Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE sous SIG : application au bassin versant de l'oued Bouhamdane.

III-1	Introduction.....	66
III-2	Méthodologie.....	67

III-2.1 Facteur d'érosivité des pluies.....	69
III-2.2 Facteur topographique.....	71
III-2.3 Facteur d'érodibilité du sol.....	72
III-2.4 Facteur du couvert végétal.....	75
III-2.5 Facteur des pratiques antiérosives.....	76
III-3 Résultats et discussions.....	77
III-3.1 Facteur R.....	77
III-3.2 Facteur LS.....	78
III-3.3 Facteur K.....	79
III-3.4 Facteur C.....	80
III-3.5 Facteur P.....	82
III-3.6 RUSLE.....	83
III-3.7 Envasement du barrage Hammam Debagh.....	87
III-4 Synthèse.....	92
Chapitre IV: Prédiction des transports solides à l'aide des réseaux de neurones artificiels	
‘RNA’ : application au bassin versant de l’oued Ressoul.	
IV-1 Introduction.....	93
IV-2 Méthodologie.....	94
IV-2.1 Utilisation des données.....	94
IV-2.2 Matrice de corrélation.....	95
IV-2.3 Normalisation de données.....	95
IV-2.4 Structure du réseau de neurones.....	96
IV-2.5 Les algorithmes d'apprentissage.....	97
<i>a. Algorithme de Levenberg-Marquardt.....</i>	97
<i>b. Algorithme par descente de gradient.....</i>	97
<i>c. Algorithme de gradient conjugué.....</i>	98
<i>d. Algorithme de Quasi-Newton.....</i>	98
IV-2.6 Evaluation statistique.....	98
<i>a. Critère de Nash-Sutcliffe.....</i>	98
<i>b. Erreur moyenne quadratique.....</i>	99
IV-3 Résultats et discussion.....	99
IV-3.1 RNRP avec l'algorithme LM.....	101
IV-3.2 RNRP avec l'algorithme BFGS.....	104
IV-3.3 Amélioration de l'erreur par l'algorithme BFGS.....	107
IV-3.4 Estimation des apports solides.....	108
IV-4 Synthèse.....	112
Conclusion générale.....	113
Perspectives.....	116
Références bibliographiques.....	117
Annexes.....	126

Liste des figures :

Chapitre I: Présentation générale de la zone d'étude.

- Figure I.1- Situation géographique de la zone d'étude.
- Figure I.2- Découpage administratif du bassin versant de la Seybouse.
- Figure I.3- Bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure I.4- Bassin versant de l'oued Ressoul.
- Figure I.5- Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure I.6- Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Ressoul.
- Figure I.7- Ordre d'écoulement selon la classification de STRAHLER ; (a) : bassin versant de l'oued Bouhamdane, (b) : bassin versant de l'oued Ressoul.
- Figure I.8- Carte des pentes du bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure I.9- Répartition des classes de pentes sur le bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure I.10- Carte des pentes du bassin versant de l'oued Ressoul.
- Figure I.11- Carte lithologiques du bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure I.13- Carte lithologiques du bassin versant de l'oued Ressoul.
- Figure I.14- Répartition des ensembles lithologiques sur le bassin versant de l'oued Ressoul.
- Figure I.15- Carte d'occupation des terres du bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure I.16- Répartition des terres dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane [%].
- Figure I.17- Carte d'occupation des terres du bassin versant de l'oued Ressoul.
- Figure I.18- Répartition des terres dans le bassin versant de l'oued Ressoul [%].

Chapitre II: Hydroclimatologie.

- Figure II.1- Répartition des précipitations moyennes mensuelles interannuelles des deux stations météorologiques de Guelma et Annaba.
- Figure II.2- Portions des précipitations moyennes saisonnières ; a) Station de Guelma, b) Station d'Annaba.
- Figure II.3- Répartition de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane (1921-1989).
- Figure II.4- Répartition de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'oued Ressoul (1921-1989).
- Figure II.5- Répartition annuelle des précipitations à la station de Guelma (1987-2017).
- Figure II.6- Répartition annuelle des précipitations à la station d'Annaba (1989-2017).
- Figure II.7- Courbes des moyennes mensuelles de températures enregistrées à la station de Guelma (1987-2017).
- Figure II.8- Courbes des moyennes mensuelles de températures enregistrées à la station d'Annaba (1989-2017).
- Figure II.9- Diagramme ombro-thermique de la station de Guelma (1987-2017).
- Figure II.10- Diagramme ombro-thermique de la station de Annaba (1989-2017).

- Figure II.11- Répartition mensuelle de l'humidité relative de l'air aux stations de Guelma et d'Annaba.
- Figure II.12- Rose des vents à la station de Guelma (2004-2013), source ONM.
- Figure II.13- Degré d'aridité mensuel selon DE-MARTONNE.
- Figure II.14- Carte simplifiée des domaines bioclimatiques du Nord-Est de l'Algérie, d'après COTE 1998.
- Figure II.15- Climagramme pluviothermique d'EMBERGER.
- Figure II.16- Représentation graphique de la variation temporelle du bilan hydrique au cours de l'année, à la station de Guelma.
- Figure II.17- Représentation graphique de la variation temporelle du bilan hydrique au cours de l'année, à la station d'Annaba.
- Figure II.18- Représentation graphique des coefficients d'hydraulicité mensuels aux stations hydrométriques.
- Figure II.19- Apports et débits moyens mensuels à la station de Medjez Amar II (données calculées sur la période 1968/69 – 1986/87).
- Figure II.20- Apports et débits moyens mensuels à la station d'Ain Berda (données calculées sur la période 1964/65 – 2011/12).
- Figure II.21- Représentation graphique des coefficients d'hydraulicité annuels aux stations hydrométriques.
- Figure II.22- Évolution des débits moyens journaliers durant l'année la plus humide pour les deux stations hydrométriques.
- Figure II.23- Évolution des débits moyens journaliers durant l'année la plus sèche pour les deux stations hydrométriques.

Chapitre III: Quantification et Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE sous SIG : application au bassin versant de l'oued Bouhamdane.

- Figure III.1- Photo du barrage Hammam Debagh ; cliché ANBT.
- Figure III.2- Organigramme de la méthodologie utilisée.
- Figure III.3- Carte des précipitations moyennes annuelles du bassin de l'oued Bouhamdane.
- Figure III.4- Répartition des profils pédologiques analysés au niveau du bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure III.5- Semi-variogramme expérimental du facteur K.
- Figure III.6- Carte de répartition du facteur R dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure III.7- Répartition des classes du facteur d'agressivité des pluies. Fig. III.8- Carte de répartition du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure III.8- Carte de répartition du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure III.9- Carte de répartition du facteur K dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.
- Figure III.10- Carte de répartition du facteur C dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Figure III.11- Répartition des classes de l'indice du couvert végétal.

Figure III.12- Carte de répartition du facteur P dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Figure III.13- Carte du risque érosif dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Figure III.14- Distribution des classes de risques érosifs dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Figure III.15- Sous bassins du bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Figure III.16- Courbes capacité-hauteur de la retenue du barrage Hammam Debagh.

Figure III.17- Relations entre les concentrations moyennes des sédiments et les débits moyens, station Medjez Amar II (1988-2004).

Chapitre IV: Prédiction des transports solides à l'aide des réseaux de neurones artificiels 'RNA' : application au bassin versant de l'oued Ressoul.

Figure IV.1- La courbe d'étalonnage à la station d'Ain-Berda.

Figure IV.2- Structure d'un réseau de neurones artificiel multi-couches.

Figure IV.3- Représentation des valeurs observées et celles simulées par l'algorithme LM.

Figure IV.4- Représentation des valeurs observées et celles simulées par l'algorithme BFGS.

Figure IV.5- Exemple de la crue du 06 au 09 Février 1996.

Figure IV.6- Evolution de débits solides transportés et des débits liquides en fonction du temps, durant quelques importantes crues de l'automne.

Figure IV.7- Evolution de débits solides transportés et des débits liquides en fonction de temps, durant quelques importantes crues de l'hiver.

Figure IV.8- Evolution des débits solides transportés et des débits liquides en fonction du temps, durant quelques importantes crues de printemps.

Liste des tableaux :Chapitre I: Présentation générale de la zone d'étude.

- Tableau I.1- Sous bassins versants de la Seybouse.
- Tableau I.2- Répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Bouhamdane.
- Tableau I.3- Répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Ressoul.
- Tableau I.4- Indices de forme des deux bassins versants étudiés. Tab. I.5- La dénivelée (D) entre les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ des bassins versants étudiés.
- Tableau I.6- Détermination de l'indice de pente de ROCHE I_p (B. V. d'oued Bouhamdane).
- Tableau I.7- Détermination de l'indice de pente de ROCHE I_p (B. V. d'oued Ressoul).
- Tableau I.8- Nature du relief selon l'indice de pente global (I_g) par l'ORSTOM.
- Tableau I.9- Nature du relief selon la dénivelée spécifique (D_s) par l'ORSTOM.
- Tableau I.10- Résultats de la classification du réseau hydrographique des deux bassins versants selon la méthode de STRAHLER.
- Tableau I.11- Classification des pentes.
- Tableau I.12- Distribution des classes de pentes sur le bassin versant de l'oued Ressoul.
- Tableau I.13- Classification lithologique retenue pour les deux bassins versants.
- Tableau I.14- Synthèse des caractéristiques des bassins versant de l'oued Bouhamdane et de l'oued Ressoul.

Chapitre II: Hydroclimatologie.

- Tableau II.1- Localisation, altitude et période d'observation des stations météorologiques retenues.
- Tableau II.2- Caractéristique des précipitations moyennes mensuelles des deux stations météo.
- Tableau II.3- Répartition saisonnière de la précipitation au niveau des stations de Guelma et Annaba.
- Tableau II.4- Précipitations annuelles aux stations météorologiques de Guelma et d'Annaba.
- Tableau II.5- Variation temporelle des températures aux stations de Guelma et d'Annaba.
- Tableau II.6- Répartition mensuelle des vitesses du vent aux stations de Guelma (1987-2017) et d'Annaba (1989-2017).
- Tableau II.7- Indice d'aridité annuel de DE-MARTONNE aux stations de Guelma d'Annaba.
- Tableau II.8- Variation des facteurs de corrections 'K' aux stations météorologiques de Guelma d'Annaba.
- Tableau II.9- Evapotranspiration potentielle non corrigée en fonction de la température moyenne.
- Tableau II.10- Bilan hydrique de la station de Belkhir (Guelma) selon la méthode de THORNTHWAITE.

Tableau II.11- Bilan hydrique de la station les salines (Annaba) selon la méthode de THORNTHWAITE.

Tableau II.12- Caractéristiques des stations hydrométriques utilisées.

Tableau II.13- Variation mensuelle de débits et de coefficients d'hydraulicité aux stations hydrométriques.

Tableau II.14- Variation interannuelle des débits et des apports liquides à la station de Medjez Amar II (1968/1969 – 1986/1987).

Tableau II.15- Variation interannuelle des débits et des apports liquides à la station d'Ain Berda (1964/1965 – 2011/2012).

Chapitre III: Quantification et Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE sous SIG : application au bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Tableau III.1: Valeurs du facteur K en fonction de la texture du sol et de la matière organique.

Tableau III.2: Valeurs du facteur C choisies pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Tableau III.3: Classification de la résistance des sols du bassin versant de l'oued Bouhamdane selon Bollinne et Rosseau.

Tableau III.4: Perte moyenne des sols par érosion en nappe distribuée par sous bassin versant.

Tableau III.5: Erreurs relatives entre les débits solides obtenus à l'aide des courbes d'étalonnages et ceux calculés issus des concentrations de MES mesurées.

Tableau III.6: Résultats des apports solides obtenus par l'application des équations de l'option 02 à la station de Medjez Amar II, sur la période de Décembre 1988 à Mars 2004.

Chapitre IV: Prédiction des transports solides à l'aide des réseaux de neurones artificiels 'RNA' : application au bassin versant de l'oued Ressoul.

Tableau IV.1 : Matrice de corrélation entre les variables.

Tableau IV.2 : Différents paramètres statistiques des données.

Tableau IV.3 : Résultats de la performance du RNRP par l'utilisation de l'algorithme LM.

Tableau IV.4 : Résultats de la performance du RNRP par l'utilisation de l'algorithme BFGS.

Tableau IV.5 : Amélioration des critères d'évaluation (NS et RMSE) entre les deux algorithmes utilisés (LM et BFGS).

Tableau IV.6 : Répartition en pourcentage du nombre des crues enregistrées à la station hydrométrique d'Ain Berda (1968/69-2011/12).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Contexte et problématique :

L'érosion des sols par l'eau est un phénomène naturel très répandu en Afrique du Nord, particulièrement dans les pays du Maghreb (Algérie, Tunisie, Maroc,...). Le taux d'érosion spécifique dans la partie septentrionale de ces pays dépasse les seuils de tolérance ; En 1982 DEMMAK a observé un taux d'érosion au niveau de l'oued Agrioum (Nord-Est Algérien) de l'ordre de 50 t/ha/an. En Tunisie, le problème de l'érosion hydrique et de ses conséquences reste posé ; En effet, environ 3 millions d'hectares de terres sont vraiment touchés par ce phénomène dont la moitié sont gravement affectés par une érosion moyenne à forte (ACHOURI et al. 1995). Au Maroc, la dégradation spécifique de terres est souvent supérieure à 35 t/ha/an a été observée aux niveaux des bassins versants de l'oued Telata, de l'oued Lebène et de l'oued Ourgha (BENBRAHIM et al. 2004).

En Algérie, la réserve en eau des 80 barrages en exploitation se réduit d'une manière significative et inquiétante en raison des flux sédimentaires générés par le processus d'érosion dans les bassins versants et l'accumulation de sédiments dans les réservoirs. Selon les derniers levés bathymétriques (2004-2005) réalisés par l'agence nationale des barrages et transferts (ANBT) ; la perte moyenne de la capacité de stockage représente environ 13 % de la capacité initiale. Parmi les barrages sérieusement touchés par l'envasement figure le barrage-réservoir de Hammam Debagh (Guelma) qui a perdu environ 16 million de mètre cube de sa capacité entre 1988 et 2004.

Vue la complexité du processus de l'érosion hydrique et la gravité de ses conséquences, de telle sorte que la lutte contre ce phénomène nécessite une hiérarchisation des zones menacées pour implanter des plans d'aménagement antiérosifs visant à réduire surtout la dégradation et la fertilité des terres agricoles ainsi que l'envasement des ouvrages hydrauliques. Actuellement nombreux chercheurs ont utilisé différentes méthodes de prévisions ; parmi ces méthodes, la cartographie des facteurs intervenant dans le processus érosif par l'utilisation des outils d'aide à la décision, auquel s'ajoute l'intelligence artificielle sous l'appellation des réseaux neuronaux artificiels.

D'abord le modèle empirique de Wischmeier et Smith USLE (Universal Soil Loss Equation) avec sa version révisée RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), qui ont été développés pour évaluer les pertes en sols causées par l'érosion hydrique (WISCHMEIER et SMITH 1978, RENARD et al. 1997), afin d'identifier les zones exposées aux risques érosifs. Le modèle nécessite une cartographie des différents paramètres intervenant directement ou

indirectement dans l'érosion hydrique : l'agressivité des pluies, la pente et sa longueur, l'érodibilité du sol, le couvert végétal et les pratiques culturales. La connaissance de ces paramètres physiques et anthropiques est indispensable dans les études de l'évaluation de la gravité de la situation des terres vis-à-vis à l'érosion hydrique. Dans un premier temps le modèle USLE a été développé sur la base des parcelles standards, après a été généralisé par plusieurs chercheurs sur l'ensemble des bassins versants. En effet, l'usage du modèle empirique avec sa version révisée (RUSLE) à l'échelle des bassins versants dans le monde est très remarquable notamment dans les pays d'Afrique (ANYS 1991 ; ANYS et al. 1994 ; BONN 1998 ; SMITH 1999 ; MATI et VEIHE 2001 ; ANGIMA et al. 2003 ; CHEN et al. 2008 ; EL-GAROUANI et al. 2008 ; ADEDJI et al. 2010 ; MHANGARA et al. 2012 ; LIGONJA et SHRESTHA 2013 ; BENKADJA et al. 2015 ; MEDDI et al. 2016 ; BOUHADEB et al. 2018 ;...). Dans la plupart des études, l'application de l'RUSLE a donné des résultats significatifs.

ALKHARABSHEHA et al. (2013) ont étudié l'impact de changement de la couverture végétale (facteur C) sur l'érosion dans les zones à vocation agricoles dans la partie Nord Jordanien, par l'application du modèle RUSLE combiné avec le SIG entre les deux années 1992 et 2009. La perte moyenne annuelle de sol été de l'ordre de 9,53 t/ha/an et 8,97 t/ha/an respectivement pour les années suscitées. Ils ont considéré que la différence entre les deux périodes indique que le changement du couvert végétal affecte de manière significative le taux d'érosion de sols.

BENKADJA et al. (2015) ont appliqué trois modèles différents : RUSLE, GRAVILOVIC et ICONA pour l'évaluation des pertes en sols et l'identification des zones exposées aux risques de dégradation par l'érosion hydrique dans le bassin versant K'sob au Nord-Est de l'Algérie, en vue de réaliser une gestion appropriée. Ils ont trouvé que 90 % de la surface totale du bassin est soumise à un risque d'érosion faible à modéré et le reste est vulnérable à l'érosion avec une perte moyenne annuelle de sédiments estimée à 4,6 t/ha/an. Ils ont montré qu'il existe une bonne relation entre les méthodes RUSLE et ICONA qui présentent les 3/4 du bassin avec une sensibilité à l'érosion faible à très faible, quelle que soit l'échelle spatiale considéré. Par contre, la méthode GRAVILOVIC considère 70 % du bassin comme moyennement sensible à très sensible à l'érosion. En conclusion, les différences spatiales dans les taux d'érosion dans le bassin versant étudié par les auteurs sont principalement causées par des différences dans le type de couverture terrestre et dans le relief.

BISWAS et PANI (2015) ont utilisé le modèle RUSLE et les techniques de l'information géographique pour estimer la perte de sol dans le bassin de Barakar, Jharkhand en Inde où

l'érosion de sol est significative. Les données de pluies acquises de 6 stations pluviométriques pour la période allant de 1994 à 2006 ont été utilisées pour générer la carte de facteur d'érosivité basée seulement sur les pluies moyennes mensuelles. La carte de l'érosion dérivée a été multipliée par la densité de drainage pour identifier les effets de cette dernière sur la dégradation des sols. Les auteurs ont résulté que la densité de drainage a influence sur l'érosion hydrique car elle est liée fortement aux altitudes et pentes.

BOUHADEB et al. (2018) dans leurs travaux visent à estimer le taux annuel d'érosion de sol et sa distribution spatiale dans le bassin versant de l'oued Bou-Namoussa située dans le Nord-Est de l'Algérie par l'application de l'équation universelle révisée de perte en sols (RUSLE) généré dans un système d'information géographique (SIG). La combinaison des facteurs de modèle RUSLE résulte un taux moyen annuel d'érosion de 7,8 t/ha/an. Les domaines, montrant des taux d'érosion modéré, élevé à très élevé représentent plus de la moitié de la superficie du bassin versant, et ils ont été trouvés généralement situés dans les régions où l'érodabilité des sols est très élevée, les pentes raides et une faible couverture végétale.

Plus que la cartographie, le réseau de neurone artificiel est un système de traitement de l'information massivement d'une façon parallèle (ZHU et al. 2007). Il est considéré comme une machine d'apprentissage non-linéaire d'un phénomène compliqué. Son utilisation dans la modélisation hydrologique a commencé en 1993 (HALFF et al. 1993), d'où il a été appliqué pour la première fois dans le modèle pluie-débit (SAVIC et al. 1999 ; RIAD 2003, RIAD et al. 2004, KISI 2004 ; WANG et al. 2009 ; BOULMAIZ et al. 2016 ;...), débit du cours d'eau (KANG et al. 1993 ; MUTTIAH et al. 1997 ; KAMP et al. 2007 ;...), réservoirs d'eau (GOLOB et al. 1998 ;...), qualité de l'eau (CLAIR et EHRMAN 1998 ; SAHOO et al. 2006 ; ELGAALI et GARCIA 2007 ;...) et dans le transport des sédiments solides (JAIN et al. 1999 ; NAGY et al. 2002 ; ALP et CIGIZOGLU 2007 ; MUSTAFA et al. 2012 ; KHANCHOUL et al. 2014 ; AFAN et al. 2015 ; TACHI et al. 2016 ; BOUZERIA et al. 2017 ;...).

Récemment, certains travaux de recherches ont utilisé l'apprentissage automatique pour la prédiction des transports solides à l'exutoire de quelques bassins versants Algériens. Parmi eux, on cite à titre d'exemple : l'étude de LEFKIR et al. (2006) qui ont comparé le système d'Inférence Neuro-Floue Adaptif (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System; ANFIS) et la méthode de régression dans la prédiction de matières en suspension (MES) dans le bassin versant Isser-Est ; L'étude a été réalisée à l'échelle instantanée à partir des données observées en deux années. Les résultats ont indiqué que le modèle ANFIS donne de très bons résultats par rapport à la méthode de régression.

KHANCHOUL et al. (2014) ont modélisé les transports solides dans 39 bassins versants non jaugés au Nord-Est algérien par l'application des réseaux de neurone artificiels à rétro-propagation avec l'emploi de l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) dans la phase d'apprentissage. Ils ont pris en considération différents paramètres d'entrée à savoir la pluie moyenne annuelle, lame écoulée, coefficient de torrentialité, indice lithologique, ainsi que la morphométrie. Les auteurs ont approuvé que l'utilisation d'une structure de réseau composée de trois neurones dans la couche cachée via l'algorithme LM améliore la performance de la prédiction des matières en suspensions.

TACHI et al. (2016) ont comparé la rétro-propagation régularisée en utilisant la technique d'arrêt précoce et la rétro-propagation standard dans le bassin versant d'Isser-Est sur une période de 30 ans. Ils ont confirmé l'efficacité du réseau de neurone artificiel (RNA) dans la prédiction des transports solides en suspension. Cela dit, il est impératif d'utiliser des techniques de régularisation dans les RNA traitant de phénomènes complexes tels que le transport solide.

BOUZERIA et al. (2017) ont utilisé un modèle de RNA de type feed-forward à trois couches pour prédire le débit de sédiments à l'aide de différentes combinaisons d'entrée à différent pas de temps reflétant des informations sur les sédiments en suspensions et le lit de la rivière. Ils ont suggéré que le modèle MLP était meilleur et prédit très étroitement la charge solide dans le bassin versant de l'oued Mellah (Nord-Est algérien).

Entre autres, dans la majorité des études ayant utilisé les réseaux de neurones de rétro-propagation (RNRP) pour la prédiction de MES dans les cours d'eau, l'emploi de l'algorithme de Levenberg-Marquardt dans la phase d'apprentissage était le plus fréquent.

La modélisation de l'érosion hydrique et de transports solides dans les bassins versants de l'oued Bouhamdane et de l'oued Ressoul a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs ; DEMMAK en 1982 dans sa thèse, a étudié le transport solide des 30 bassins versants de l'Algérie septentrionale, parmi ces bassins figure le bassin versant de l'oued Ressoul. L'étude est basée sur l'analyse par régressions multiples entre l'apport solide spécifique annuel (variable à expliquer) et les paramètres physico-climatiques des bassins versants (l'indice lithologique, l'indice d'énergie du ruissellement et le coefficient de torrentialité) sur la période 1970-1980. L'objectif de l'étude est de proposer une relation multiple avec des variables faciles à obtenir et existants sur l'ensemble du territoire national pour étudier les

bassins versants non jaugés. Le transport solide spécifique moyen estimé au bassin versant de l'oued Ressoul par DEMMAK est de l'ordre de 214 t/km²/an.

KHANCHOUL en 2006 dans sa thèse de doctorat, a modélisé et quantifié les matières solides en suspension transportées par les cours d'eau dans cinq bassins versants de l'extrême Nord-Est algérien par la méthode de régression entre les débits liquides et solides à différentes échelles temporelles sur la période 1975/1976-1996/1997, dont deux bassins sont l'objet de notre étude (oued Bouhamdane et oued Ressoul). Il a trouvé que le meilleur modèle est de type puissance et la dégradation spécifique moyenne est estimée à 257 t/km²/an dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane et 210 t/km²/an dans le bassin versant d'oued Ressoul.

BENCHAIBA en 2006, dans sa thèse de Magister a évalué l'apport solide spécifique dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane d'une part par l'utilisation des formules empiriques de TIXERONT et de DEMMAK ; et d'autre part par la méthode de régression (puissance) entre les débits liquides et solides pour une série de données de 18 ans d'observation (1969/70-1986/87). Elle a trouvé que l'apport solide spécifique est égal 169 t/km²/an par la formule de TIXERONT, 295 t/km²/an par l'application de la formule de DEMMAK est 111 t/km²/an par la méthode de régression.

LOUAMRI et al. (2013), ont étudié le transport solide en suspension avec leur variabilité spatiotemporelle dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane sur deux périodes d'observation ; la première avant la mise en eau du barrage Hammam Debagh (1969-1987) et la deuxième concerne la période 1995-2010 où les débits sont régularisés par le barrage. Ils ont élaboré des relations reliant les données instantanées de débits liquides et solides par l'application de la méthode de régressions entre ces derniers à l'échelle saisonnière. Les relations obtenues sont de type puissances ; les apports solides spécifiques estimés par le biais de ces relations sont de 238 t/km²/an pour la première période d'observation et de 281 t/km²/an pour la deuxième.

2. Objectifs de l'étude :

Les objectifs visés dans cette thèse sont multiples, on cite :

Quantification des pertes en sol sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Bouhamdane situé au Nord-Est de l'Algérie, par l'utilisation du modèle empirique RUSLE sous un système d'information géographique (ArcGIS). Hiérarchisation de différents secteurs du bassin versant selon leur sensibilité à l'érosion hydrique afin de mettre à la disposition des autorités responsables un support de base pour l'élaboration d'un plan d'aménagements anti érosif, et d'identifier les zones de forte dégradation nécessitant des interventions urgentes afin d'éviter la sédimentation totale du barrage Hammam Debagh qui se trouve à l'exutoire du bassin versant ; c'est pour cette raison que l'on s'est intéressé à choisir le bassin versant de l'oued Bouhamdane comme site d'étude.

Elaboration des modèles précis pour la prédiction des sédiments en suspension à l'exutoire du bassin versant de l'oued Ressoul au niveau de la station hydrométrique de Ain Berda à l'échelle des événements extrêmes (crues), par la modélisation à l'aide des réseaux de neurones artificiels avec deux différents algorithmes d'apprentissages ; l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) et l'algorithme de Quasi-Newton (BFGS) sous MATLAB. Et la quantification des matières solides en suspension transportées par l'oued Ressoul en période de crues par l'utilisation des résultats de la modélisation neuronale.

3. Plan de la thèse :

La présente étude se décline en quatre chapitres dont :

✓ Le premier est consacré à une description générale de la zone d'étude ; ce chapitre comprend également un diagnostic sur l'état du milieu physique (morphométrie, occupation des sols, lithologie,...) des deux bassins étudiés de l'oued Bouhamdane et de l'oued Ressoul. Et ce pour présenter la résistance du milieu à l'érosion hydrique.

✓ Le deuxième chapitre est une étude hydroclimatique des deux bassins versants ; présentant d'une part les principales caractéristiques climatiques enregistrées aux stations météorologiques d'Annaba et celle de Guelma durant la période 1987 – 2017, et d'autre part l'évolution temporelle des débits liquides observés aux stations hydrométriques de Medjez Amar II (1968/69 – 1986/87) et de Ain Berda (1964/65 – 2011/12).

✓ Le troisième concerne la quantification de la perte en sol par l'érosion hydrique au bassin versant de l'oued Bouhamdane par l'utilisation du modèle empirique RUSLE sous ArcGIS. Il est aussi consacré à la cartographie des différents indices intervenant directement ou indirectement dans le processus érosif, et l'élaboration de la carte de la vulnérabilité à l'érosion hydrique sur l'ensemble du bassin versant.

✓ Le quatrième chapitre s'attache à la modélisation des transports solides en suspension durant les épisodes de crues, à l'aide des réseaux de neurones artificiels dans l'oued Ressoul par l'utilisation de deux différents algorithmes d'apprentissages ; l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) et l'algorithme de Quasi-Newton (BFGS), où seront comparés les différents résultats de simulation obtenus par ces deux algorithmes. Ensuite, l'estimation des apports solides à la station d'Ain Berda a été faite pour la période 1968/69-2011/12, par l'emploi des réseaux de neurones avec le meilleur algorithme d'apprentissage.

✓ Enfin, une conclusion générale qui récapitule l'essentiel des résultats obtenus dans les chapitres précédents.

CHAPITRE I :

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA ZONE D'ÉTUDE

I-1 Situation géographique

Les bassins versants des oueds Bouhamdane et Ressoul objet de notre étude appartiennent au grand bassin de la Seybouse. Ce dernier situé au Nord-Est du territoire national, entre $06^{\circ}47'02''$ et $07^{\circ}58'47''$ de longitude Est et entre $35^{\circ}47'49''$ et $36^{\circ}55'43''$ de latitude Nord (figure I.1). Selon l'agence de bassin hydrographique (ABH), il appartient à l'ensemble Constantinois-Seybouse-Mellegue (CSM) sous le numéro 14.

Il est limité par :

- La mer méditerranéenne au Nord ;
- Le bassin versant des côtières constantinois Est au Nord-Est ;
- Le bassin versant des côtières constantinois centre au Nord-Ouest ;
- Le bassin versant Medjerda au Sud-Est ;
- Le bassin versant Kebir Rhumel au Sud-Ouest ;
- Le bassin versant des hauts plateaux constantinois au Sud.

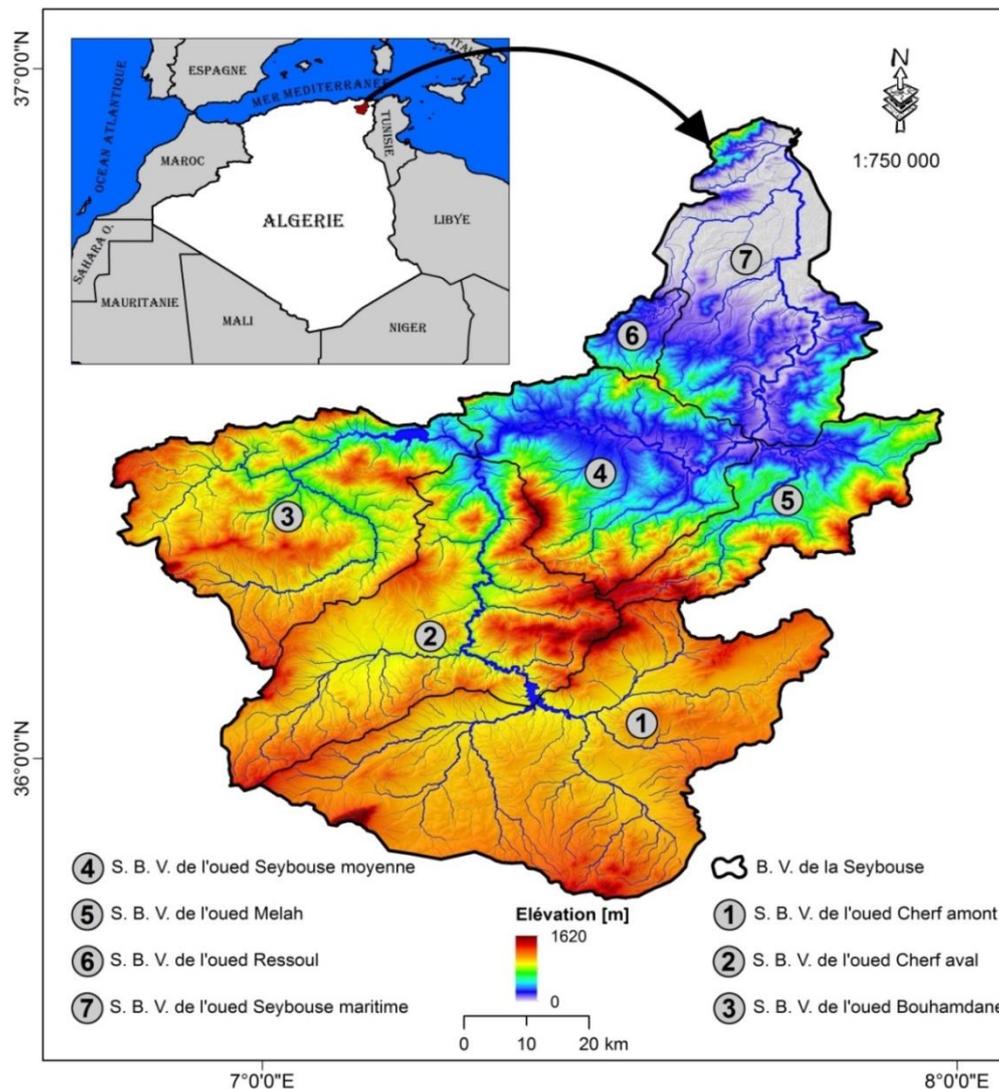


Fig. I.1- Situation géographique de la zone d'étude.

Sur le plan administratif, le bassin versant de la Seybouse touche soixante-huit communes sur sept wilayas du Nord-Est du pays (Annaba, Guelma, El-Tarf, Souk Ahras, Constantine, Oum El-Bouaghi, et Skikda), dont deux principales agglomérations; Annaba et Guelma (figure I.2). Ce bassin s’allonge dans la direction Sud-Nord sur 243 Km de longueur et sur 26,6 Km de largeur, son altitude est comprise entre 0 m et 1620 m. Il s’étend sur une superficie de 6471 km², et il est découpé en six sous bassins versants répartis de façon inégale sur la haute, la moyenne et la base Seybouse (tableau I.1).

Tab. I.1- Sous bassins versants de la Seybouse.

Région	Code	Nom	Superficie [km ²]	Périmètre [km]
Haute Seybouse	14-01	O. Cherf amont	1734	259
	14-02	O. Cherf aval	1197	224
	14-03	O. Bouhamdane	1105	203
Moyenne Seybouse	14-04	O. Seybouse moyenne	820	157
	14-05	O. Melah	553	169
Base Seybouse	14-06	O. Seybouse maritime	1062	200

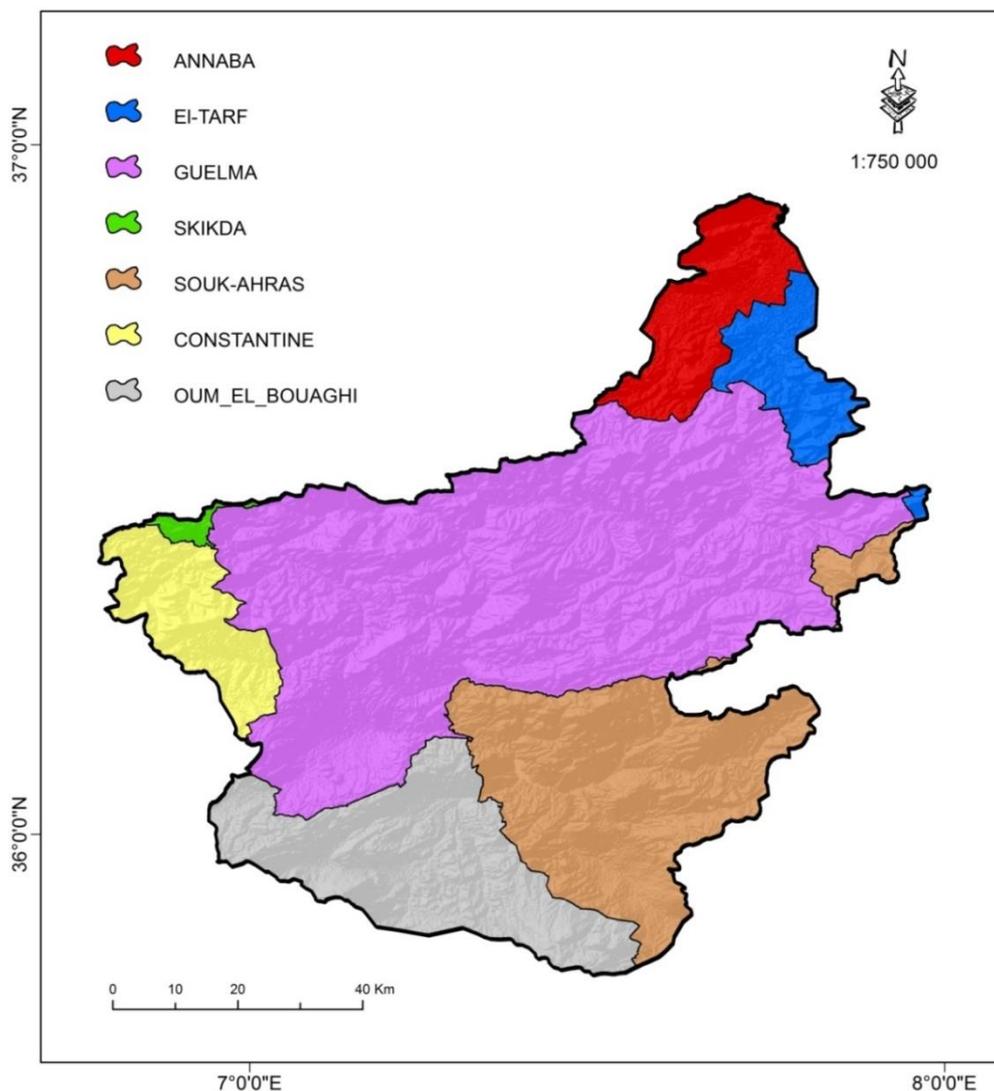


Fig. I.2- Découpage administratif du bassin versant de la Seybouse.

Le bassin versant de la Seybouse présente un réseau hydrographique de plus de 4000 km, la longueur totale de l'oued Seybouse est de 138 km. Ce cours d'eau coule sur une pente relativement faible (1,9 ‰), il aboutit à la mer méditerranéenne dans le golfe de Bône (Annaba) après avoir suivi des directions diverses.

Sur l'ensemble du bassin versant, les précipitations annuelles varient en moyenne de 330 mm/an à l'exutoire du sous bassin versant Cherf amont, à 1030 mm/an au Sud-Est du sous bassin versant Melah.

I-1.1 Bassin versant de l'oued Bouhamdane :

Sous bassin de la Seybouse, le bassin versant de l'oued Bouhamdane est situé au Nord-Est de l'Algérie, à 150 km environ de la frontière Algéro-Tunisienne entre 06°47'02" et 07°19'04" de longitude Est, et entre 36°07'49" et 36°30'28" de latitude Nord (figure I.3). Il est couvert par les cartes d'état-major suivantes : Azzaba-Ouest (NJ-32-II-3), Guelma-Est (NJ-32-II-5), Guelma-Ouest (NJ-32-II-5), Constantine-Est (NJ-32-I-6), Tamlouka-Ouest (NJ-32-II-7) et Ain M'lila-Est (NJ-32-I-8) au 1/50.000e.

Ce bassin draine une superficie de 1105 km², soit 17,08 % de la superficie totale du bassin de la Seybouse pour un périmètre de 203 km, ce qui lui confère une forme allongée ($K_c = 1,72$). Il est contrôlé par la station hydrométrique de Medjez Amar II qui est située à 5 kilomètres à l'aval du barrage de Hammam Debagh. L'altitude à l'exutoire est de 260 m alors que le point le plus haut se trouve au sommet de Djebel Oum Settas à 1325 m, donc une dénivelée totale de 1065 m.

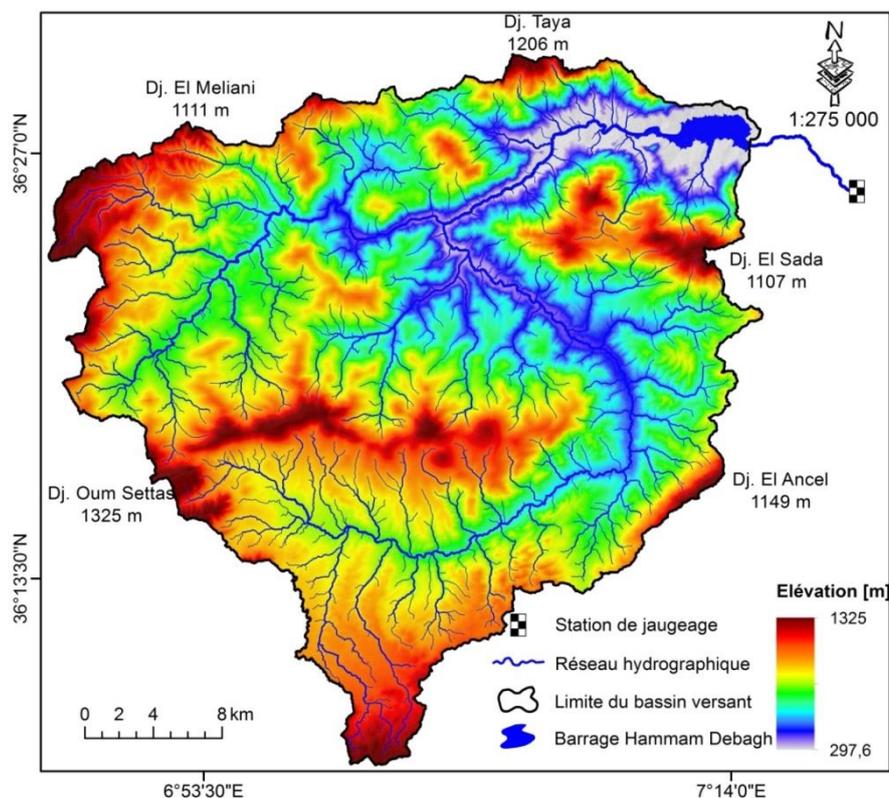


Fig. I.3- Bassin versant de l'oued Bouhamdane.

La réunion de l'oued Sabath et l'oued Zenati donne naissance de l'oued Bouhamdane à moins de 2 km de la localité de Bordj Sabath, l'un des principaux affluents de l'oued Seybouse. L'oued Zenati qui recueille les eaux provenant de la partie Sud du bassin versant (582 km², soit 53% de la superficie totale), coule d'abord du Sud-Ouest au Nord-Est jusqu'au village d'oued Zenati puis prend la direction Sud-Est – Nord-Ouest. Le cours de l'oued Sabath est de direction Sud-Ouest – Nord-Est. Alors que, l'oued Bouhamdane élémentaire coule nettement dans la direction Ouest – Est, entre le massif du Djebel Taya au Nord et le massif du Djebel Sebaa M'zaer au Sud. La longueur totale du thalweg principale de l'oued Bouhamdane est de 92 km.

Le chevelu hydrographique de l'oued Bouhamdane prend sa source d'un ensemble de reliefs montagneux à savoir, Dj. Oum Settas (1325 m), Dj. El-Ancel (1149 m), Dj. El-Meliani (1111 m), Dj. El-Sada (1107 m) et Dj. Taya (1206 m).

I-1.2 Bassin versant de l'oued Ressoul :

Fait partie du sous bassin versant de l'oued Seybouse maritime, le bassin versant de l'oued Ressoul est situé au Nord-Est de l'Algérie, entre 07°27'51" et 07°36'51" de longitude Est, et entre 36°32'56" et 36°40'51" de latitude Nord (figure I.4). Ce bassin s'étend sur une superficie de 103 km² pour un périmètre de 50 km. Il s'allonge dans la direction Sud-Sud-Ouest – Nord-Nord-Est sur une longueur de 20 Km et une largeur de 5 km.

Il est couvert par les deux feuilles de la carte topographique : Drean-Ouest (NJ-32-II-4) et Azzaba-Est (NJ-32-II-3) au 1/50.000e.

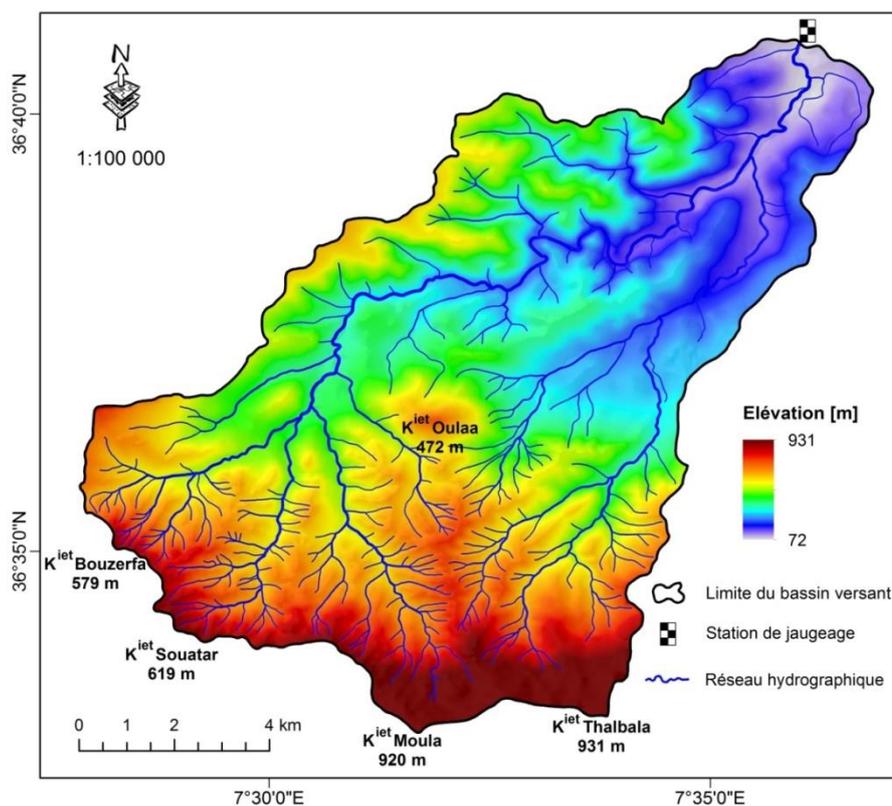


Fig. I.4- Bassin versant de l'oued Ressoul.

Le réseau hydrographique du bassin versant est contrôlé à son exutoire par la station hydrométrique d'Ain Berda, située à 28 Km au Sud de la ville d'Annaba et à 25 Km de la mer, son cours d'eau principal mesure 25 km de longueur. L'oued Ressoul est formé par la réunion de deux cours d'eau principaux ; l'oued Mouya à l'Est de Ain Berda de direction presque Sud-Nord et qui draine la partie Sud-Est du bassin versant, et l'oued Guis à l'Ouest de Ain Berda de direction Sud-Ouest - Nord-Est, et qui reçoit les eaux provenant du versant Sud-Ouest.

I-2 Description du milieu physique

I-2.1 Courbes hypsométriques:

Le relief joue un rôle fondamental dans le comportement hydrologique d'un bassin versant. Il a une forte influence sur le régime d'écoulement, car la pente du bassin influe fortement sur le ruissellement, l'infiltration, l'évaporation,... etc (BOUANANI 2004).

Le relief d'un bassin versant est souvent indiqué par les courbes de niveau. Il est caractérisé par la courbe hypsométrique, celle-ci donne la répartition des surfaces comprises entre les différentes courbes de niveau en fonction des altitudes correspondantes. Elle porte en abscisses les fractions cumulées des surfaces comprises entre deux courbes de niveau successives (C_i et C_{i-1}) en pourcentage, et en ordonnées les altitudes correspondantes exprimées en mètre. Cette courbe reste un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin versant (MUSY 2005).

Les fractions des surfaces comprise entre les différentes courbes de niveau ont été obtenues après la délimitation des bassins versants, par l'application d'un modèle numérique de terrain de type SRTM et d'1 arc second de résolution à l'aide d'un système d'information géographique (ArcGIS). Les surfaces partielles, les surfaces cumulées et les altitudes correspondantes pour les deux sous bassins sont reportées dans les tableaux I.2 et I.3.

Ces résultats nous ont permis de tracer les courbes hypsométriques pour chaque sous bassin versant, en choisissant l'échelle de telle sorte qu'elle soit d'utilisation facile.

Tab. I.2- Répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Bouhamdane.

N° Classe	Classe d'altitude	Altitude moy.	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
	$H_i - H_{i-1}$	H_i [m]	S_i [km ²]	S_i [%]	ΣS_i [km ²]	ΣS_i [%]
1	1325 - 1300	1312,50	0,125	0,011	0,125	0,011
2	1300 - 1250	1275	0,488	0,044	0,614	0,056
3	1250 - 1200	1225	1,007	0,091	1,621	0,147
4	1200 - 1150	1175	2,110	0,191	3,731	0,338
5	1150 - 1100	1125	6,856	0,620	10,587	0,958
6	1100 - 1050	1075	20,115	1,820	30,701	2,778
7	1050 - 1000	1025	39,426	3,568	70,127	6,346
8	1000 - 950	975	64,881	5,872	135,009	12,218
9	950 - 900	925	106,219	9,613	241,228	21,831
10	900 - 850	875	149,158	13,498	390,386	35,329
11	850 - 800	825	167,413	15,150	557,799	50,480
12	800 - 750	775	156,223	14,138	714,022	64,617
13	750 - 700	725	119,437	10,809	833,459	75,426
14	700 - 650	675	92,544	8,375	926,003	83,801
15	650 - 600	625	55,865	5,056	981,867	88,857
16	600 - 550	575	35,257	3,191	1017,124	92,047
17	550 - 500	525	20,383	1,845	1037,507	93,892
18	500 - 450	475	16,277	1,473	1053,785	95,365
19	450 - 400	425	18,302	1,656	1072,087	97,021
20	400 - 350	375	15,873	1,436	1087,959	98,458
21	350 - 300	325	12,333	1,116	1100,293	99,574
22	300 - 260	280	4,707	0,426	1105	100

D'après l'analyse de la courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Bouhamdane (figure I.5), la classe d'altitude dominante est celle de 600 à 1000 m. Elle occupe environ 83% de la superficie totale du bassin versant. Les zones d'altitudes très élevées (supérieur à 1100m) comme: Djebel Oum Settas, Djebel Taya et Djebel El-Ancel, couvrent une faible surface ne dépassant pas 1%.

La courbe hypsométrique présente une pente forte vers les hautes altitudes ce qui indique la présence d'un plateau qui se termine par une falaise. Alors que vers les basses altitudes la pente de la courbe est forte ce qui dénote la présence d'une pénéplaine (figure I.5).

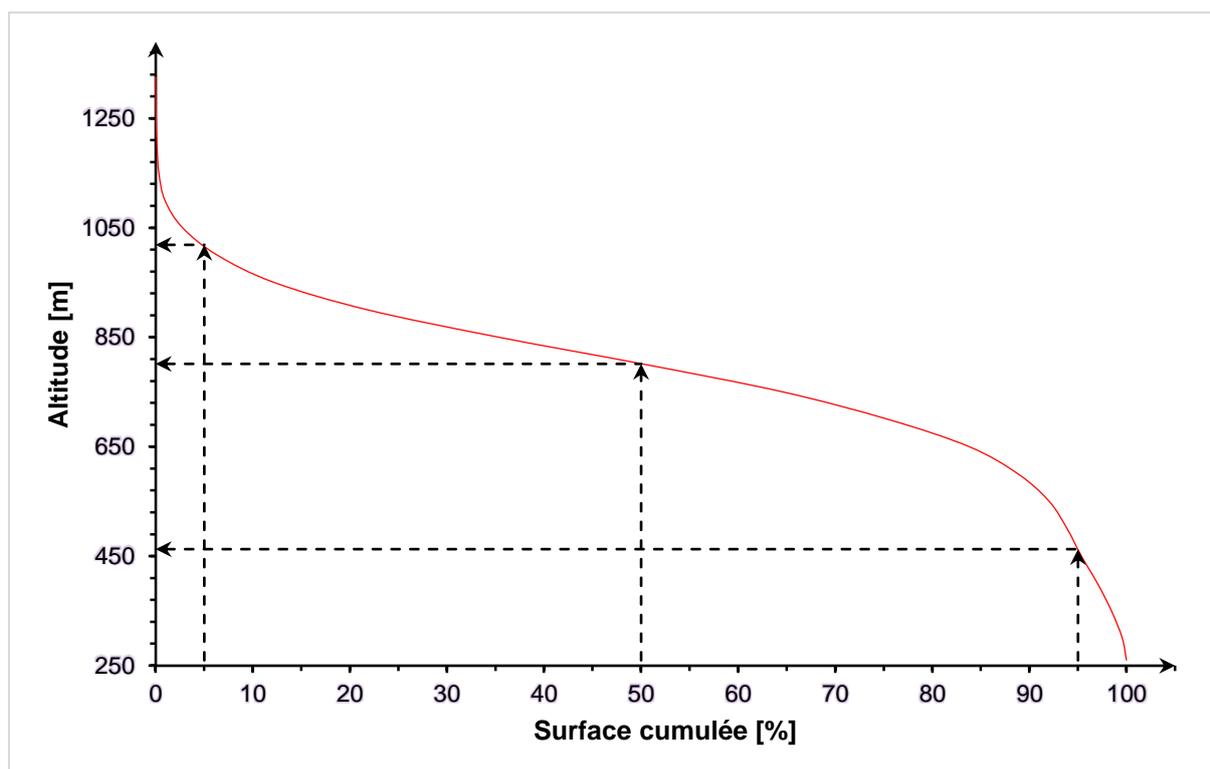


Fig. I.5- Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Tab. I.3- Répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Ressoul.

N° Classe	Classe d'altitude	Altitude moy.	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
	$H_i - H_{i-1}$	H_i [m]	S_i [km ²]	S_i [%]	ΣS_i [km ²]	ΣS_i [%]
1	931 - 900	915,5	0,019	0,019	0,019	0,019
2	900 - 850	875	0,100	0,097	0,119	0,116
3	850 - 800	825	0,404	0,392	0,523	0,508
4	800 - 750	775	0,784	0,761	1,307	1,269
5	750 - 700	725	0,859	0,834	2,167	2,104
6	700 - 650	675	0,907	0,881	3,074	2,984
7	650 - 600	625	1,082	1,050	4,156	4,034
8	600 - 550	575	2,307	2,240	6,463	6,275
9	550 - 500	525	4,186	4,064	10,649	10,339
10	500 - 450	475	5,483	5,324	16,133	15,663
11	450 - 400	425	7,975	7,742	24,107	23,405
12	400 - 350	375	9,719	9,436	33,827	32,841
13	350 - 300	325	11,879	11,533	45,706	44,374
14	300 - 250	275	14,714	14,285	60,419	58,659
15	250 - 200	225	15,318	14,872	75,737	73,532
16	200 - 150	175	14,842	14,410	90,580	87,942
17	150 - 100	125	9,116	8,850	99,695	96,792
18	100 - 72	86	3,305	3,208	103	100

Le bassin versant de l'oued Ressoul présente un relief moins accentué, il est montagneux dans sa partie Sud. Plus de la moitié (53%) de la surface du bassin versant est située entre les altitudes 100 m et 300 m (figure I.6), ces zones représentent les plaines et les versants.

La courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Ressoul présente une pente forte vers les hautes altitudes indiquant la présence d'un plateau. La faible pente de la courbe hypsométrique aux basses altitudes indique la présence d'une vallée encaissée à l'exutoire du bassin versant (figure I.6).

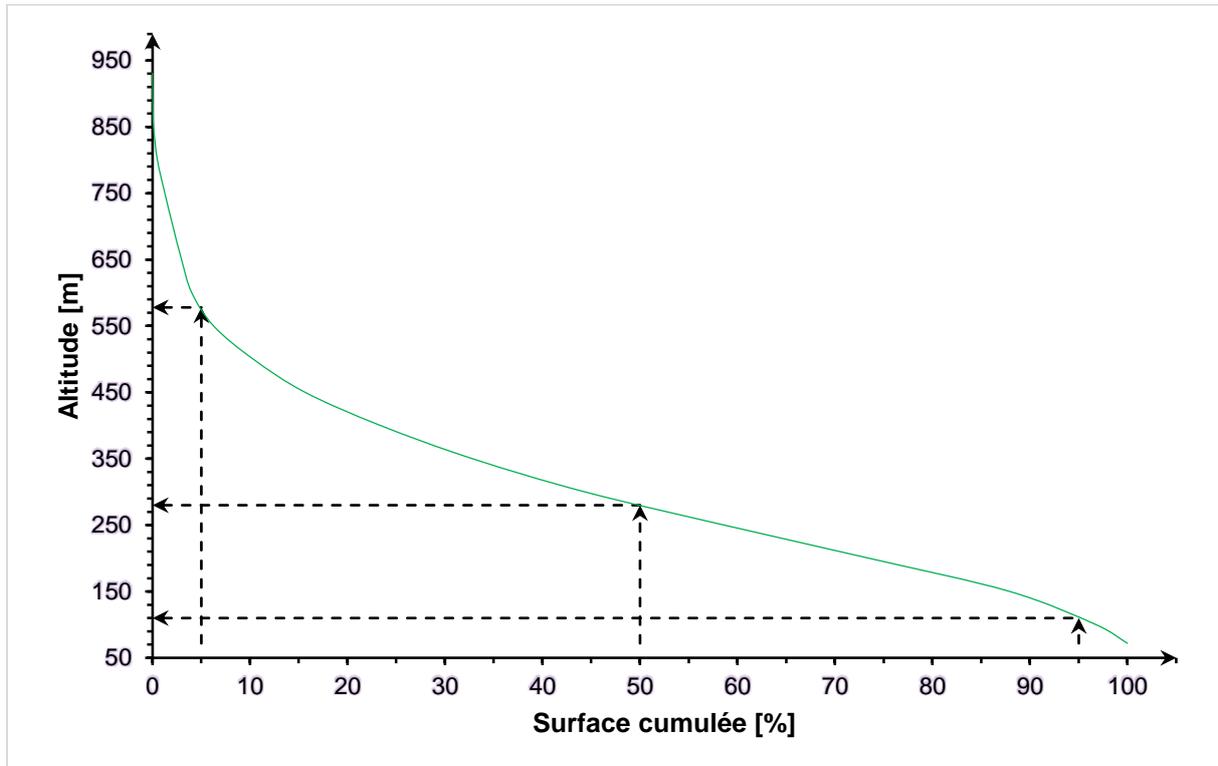


Fig. I.6- Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Ressoul.

I-2.2 Altitudes caractéristiques :

Les altitudes les plus utilisées dans les études hydrologiques des bassins versants, et qui sont lues à partir des courbes hypsométriques sont :

- Altitude minimale (H_{min})** : Cette altitude représente le point le plus bas du bassin versant généralement à l'exutoire, elle est égale 260 m pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane et 72 m pour le bassin versant de l'oued Ressoul.
- Altitude à 95% de surface ($H_{95\%}$)** : Celle-ci est obtenue directement à l'aide de la courbe hypsométrique, elle correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 95% de la superficie totale du bassin versant. Les altitudes à 95% de surfaces sont de 463 m pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane et de 110 m pour le bassin versant de l'oued Ressoul.
- Altitude médiane ($H_{50\%}$)** : Elle correspond à l'altitude qui inclut 50% de la superficie totale du bassin versant sur la courbe hypsométrique. Elle est de 802 m pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane et de 280 m pour le bassin de l'oued Ressoul.
- Altitude à 5% de surface ($H_{5\%}$)** : Elle correspond à l'altitude lue sur la courbe hypsométrique au point d'abscisse 5% de la superficie totale du bassin versant. Elle est de 1019 m pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane et de 578 m pour le bassin versant de l'oued Ressoul.

- e. **Altitude maximale (H_{max})** : Cette altitude considère le point le plus haut du bassin versant, elle est égale 1325 m pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane au sommet de Djebel Oum Settas et 931 m pour le bassin versant de l'oued Ressoul à Koudiet Thalbala.
- f. **Altitude moyenne (H_{moy})** : Elle est calculée à partir de la relation suivante (Eq. I.1):

$$H_{moy} = \frac{1}{S} * \sum_{i=1}^n S_i * \left(\frac{H_i + H_{i-1}}{2} \right) \quad \dots \text{Eq. I.1}$$

Où:

H_{moy} est l'altitude moyenne du bassin versant exprimée en m ;

S est la superficie totale du bassin versant exprimée en km² ;

S_i est la superficie partielle comprise entre deux altitudes successives H_i et H_{i-1} exprimée en km² ;

n est le nombre de courbes de niveau.

Les altitudes moyennes des deux bassins étudiés sont donc de 785 m pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane et de 306 m pour le bassin versant de l'oued Ressoul. Le résultat de calcul de l'altitude moyenne se rapproche de l'altitude médiane dans le cas où l'hypsométrie du bassin versant expose une pente nettement régulière.

I-2.3 Intégrale hypsométriques :

L'intégrale hypsométrique (IH) exprime le volume actuel du relief qui n'est pas encore consommé par l'érosion, elle est proche de 0 pour les bassins versants très érodé (profil concave) et tend vers le 1 pour les bassins très peu érodé (profil convexe). La valeur de l'intégrale hypsométrique est donc déterminée à l'aide de la relation (2) développée en 1971 par PIKE et WILSON (Eq. I.2) :

$$IH = \frac{H_{moy} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} \quad \dots \text{Eq. I.2}$$

Une intégrale hypsométrique forte (supérieure à 0,60) avec une courbe hypsométrique fortement convexe traduit un stade de non-équilibre (jeunesse). Une intégrale hypsométrique moyenne (entre 0,35 et 0,60) associée à une courbe hypsométrique concavo-convexe correspond à une phase d'équilibre (maturité). Une intégrale hypsométrique basse (inférieure à 0,35) avec une courbe extrêmement concave explique un stade de fin maturité c.-à-d. la phase de monadnock (STRAHLER 1952).

La courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Bouhamdane à une forme sigmoïdale avec une intégrale hypsométrique de 0,49 montre que le relief du bassin est peu évolué où environ la moitié du relief initial a été consommé par l'érosion, c'est un bassin en équilibre dynamique son potentiel érosif est moyen.

Le bassin versant de l'oued Ressoul présente une faible intégrale hypsométrique (0,27) et un profil concave et régulier ce qui correspond à un relief considérablement érodé où près de $\frac{3}{4}$ du relief initial a été perdu. C'est un bassin marqué par un stade d'évolution de fin maturité avancé où il atteint la phase monadnock. Son potentiel érosif est faible.

I-3 Les indices morphologiques

Les indices morphologiques permettent de caractériser le milieu physique d'un bassin versant et de comparer plusieurs bassins entre eux. La détermination de ces indices s'appuie sur la connaissance de la répartition hypsométrique sur la totalité du bassin versant.

I-3.1 Indice de compacité de GRAVELIUS (K_G) :

L'indice de compacité de GRAVELIUS (K_G), est un indice morphologique permettant de caractériser le milieu physique et de comparer plusieurs bassins versants entre eux. Cet indice est défini comme le rapport du périmètre du bassin versant considéré (P) au périmètre du cercle (P') ayant la même superficie (ROCHE 1963, MUSY 2005 et LABORDE 2013). Il est obtenu par la formule suivante (Eq. I.3) :

$$K_G = \frac{P}{P'} = \frac{P}{2\sqrt{\pi*S}} \approx 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \dots \text{Eq. I.3}$$

Avec:

P : Périmètre du bassin versant [km] ;

P' : Périmètre du cercle équivalent [km] ;

S : Superficie du bassin versant [km²].

L'indice de compacité offre une idée sur la forme du bassin, il est proche de 1 pour les bassins versants ayant une forme quasiment circulaire et supérieur à 1 pour les bassins versants ayant une forme allongée. La forme du bassin versant influe immédiatement sur les hydrogrammes de crues, par exemple, une forme ramassée favorise la concentration rapide des eaux et augmente les débits de pointes à l'exutoire du bassin versant.

I-3.2 Rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent correspond à un rectangle qui a le même périmètre, la même superficie et donc par conséquent le même indice de compacité que le bassin versant réel. Les courbes de niveaux deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle (ROCHE 1963).

Son périmètre est défini par (Eq. I.4):

$$P = 2 * (L + l) \quad \dots \text{Eq. I.4}$$

La superficie du rectangle équivalent égale (Eq. I.5) :

$$S = L * l \quad \dots \text{Eq. I.5}$$

Où: L et l sont respectivement la Longueur et la largeur du rectangle équivalent [km].

a. Longueur du rectangle équivalent (L) :

La longueur du rectangle équivalent est donnée par l'expression suivante (Eq. I.6) :

$$L = \frac{K_G \sqrt{S}}{1,12} * \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right) \quad \dots \text{Eq. I.6}$$

b. Largeur du rectangle équivalent (l) :

La largeur du rectangle équivalent est obtenue par la relation suivante (Eq. I.7) :

$$l = \frac{K_G \sqrt{S}}{1,12} * \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right) \quad \dots \text{Eq. I.7}$$

Après l'application numérique on trouve les résultats suivants (tableau I.4) :

Tab. I.4- Indices de forme des deux bassins versants étudiés.

Bassin versant	S [km ²]	P [km]	K_G	L [km]	l [km]
Oued Bouhamdane	1105	202,87	1,72	89,90	12,29
Oued Ressoul	103	50,05	1,39	20,08	5,13

Les deux indices de compacités sont supérieurs à 1 ; ce qui correspond à une forme allongée pour les deux bassins versants.

I-3.3 La dénivelée (D) :

On définit la dénivelée D entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ comme étant la différence des altitudes ayants 5% et 95% de la superficie totale du bassin versant dont 90% de la superficie s'inclut (Eq. I.8).

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \quad \dots \text{Eq. I.8}$$

Avec:

$H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ sont respectivement les altitudes ayants 5% et 95% de la superficie totale du bassin versant.

Les résultats de la dénivelée entre les altitudes ayants 5% et 95% de surface sont représentées au tableau I.5.

Tab. I.5- La dénivelée (D) entre les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ des bassins versants étudiés.

Bassin versant	Altitude $H_{5\%}$ [m]	Altitude $H_{95\%}$ [m]	Dénivelée D [m]
Oued Bouhamdane	1019	463	556
Oued Ressoul	578	110	468

I-3.4 Indice de pente de ROCHE (I_p) :

Cet indice (I_p) proposé par ROCHE en 1963, a pour objectif de caractériser le régime hydrologique et de comparer et de classer plusieurs bassins entre eux. Il représente la

somme des racines carrées des pentes mesurées sur le rectangle équivalent pondérée par toutes les surfaces élémentaires comprises entre les courbes de niveau C_i et C_{i-1} . Il est donné par (Eq. I.9) :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} * \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i * D_i} \quad \dots \text{Eq. I.9}$$

D'où :

L : Longueur du rectangle équivalent exprimée en km ;

D_i : La différence d'altitude entre H_i et H_{i-1} exprimée en km ;

S_i : La fraction de la superficie totale du bassin versant comprise entre deux courbes de niveau successives C_i et C_{i-1} donnée par les tableaux I.6 et I.7.

Tab. I.6- Détermination de l'indice de pente de ROCHE I_p (B. V. d'oued Bouhamdane).

Classe	D_i [km]	S_i	$\sqrt{S_i * D_i}$	Classe	D_i [km]	S_i	$\sqrt{S_i * D_i}$
260 à 300 m	0,04	0,0043	0,013	800 à 850 m	0,05	0,1515	0,087
300 à 350 m	0,05	0,0112	0,024	850 à 900 m	0,05	0,1350	0,082
350 à 400 m	0,05	0,0144	0,027	900 à 950 m	0,05	0,0961	0,069
400 à 450 m	0,05	0,0166	0,029	950 à 1000 m	0,05	0,0587	0,054
450 à 500 m	0,05	0,0147	0,027	1000 à 1050 m	0,05	0,0357	0,042
500 à 550 m	0,05	0,0184	0,030	1050 à 1100 m	0,05	0,0182	0,030
550 à 600 m	0,05	0,0319	0,040	1100 à 1150 m	0,05	0,0062	0,018
600 à 650 m	0,05	0,0506	0,050	1150 à 1200 m	0,05	0,0019	0,010
650 à 700 m	0,05	0,0838	0,065	1200 à 1250 m	0,05	0,0009	0,007
700 à 750 m	0,05	0,1081	0,074	1250 à 1300 m	0,05	0,0004	0,005
750 à 800 m	0,05	0,1414	0,084	1300 à 1325 m	0,025	0,0001	0,002
$I_p = 0,092$							

Tab. I.7- Détermination de l'indice de pente de ROCHE I_p (B. V. d'oued Ressoul).

Classe	D_i [km]	S_i	$\sqrt{S_i * D_i}$	Classe	D_i [km]	S_i	$\sqrt{S_i * D_i}$
72 à 100 m	0,028	0,0321	0,030	500 à 550 m	0,05	0,0406	0,045
100 à 150 m	0,05	0,0885	0,067	550 à 600 m	0,05	0,0224	0,033
150 à 200 m	0,05	0,1441	0,085	600 à 650 m	0,05	0,0105	0,023
200 à 250 m	0,05	0,1487	0,086	650 à 700 m	0,05	0,0088	0,021
250 à 300 m	0,05	0,1429	0,085	700 à 750 m	0,05	0,0083	0,020
300 à 350 m	0,05	0,1153	0,076	750 à 800 m	0,05	0,0076	0,020
350 à 400 m	0,05	0,0944	0,069	800 à 850 m	0,05	0,0039	0,014
400 à 450 m	0,05	0,0774	0,062	850 à 900 m	0,05	0,0010	0,007
450 à 500 m	0,05	0,0532	0,052	900 à 931 m	0,031	0,0002	0,002
$I_p = 0,178$							

I-3.5 Indice de pente global (I_g) :

L'indice de pente global déterminant le relief d'un bassin versant est défini comme étant le rapport entre la dénivelée D qui sépare les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ sur la courbe hypsométrique et la longueur du rectangle équivalent L (DUBREUIL 1966), soit (Eq. I.10):

$$I_g = \frac{D}{L} \quad \dots \text{Eq. I.10}$$

L'indice de pente global (I_g) est très bien corrélé avec l'indice de pente de Roche (I_p), ces indices sont étroitement liés à la surface du bassin versant, ils augmentent lorsqu'elle diminue (DUBREUIL 1975).

L'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.), a fourni une première classification du relief basée sur l'indice de pente global (I_g). Cette classification est applicable pour les bassins versants de petites tailles d'environ 25 km² de surface (DUBREUIL 1971). Elle est représentée dans le tableau I.8 :

Tab. I.8- Nature du relief selon l'indice de pente global (I_g) par l'ORSTOM.

Classe	I_g exprimé en [‰]	Nature du relief
R ₁	< 2	Relief très faible
R ₂	2 - 5	Relief faible
R ₃	5 - 10	Relief assez faible
R ₄	10 - 20	Relief modéré
R ₅	20 - 50	Relief assez fort
R ₆	50 - 100	Relief fort
R ₇	> 100	Relief très fort

Les surfaces de deux bassins étudiés dépassent les 25 km², donc ne sont pas incluses dans la classification précédente. Le bassin versant de l'oued Bouhamdane présente un indice de pente global relativement faible ($I_g = 6,18$ ‰). Tandis que le bassin versant de l'oued Ressoul donne une valeur de 23,31 ‰.

I-3.6 Dénivelée spécifique (D_s) :

La dénivelée spécifique D_s est le produit de l'indice de pente global (I_g) par la racine carrée de la superficie totale du bassin versant (S), soit (Eq. I.11):

$$D_s = I_g * \sqrt{S} \quad \dots \text{Eq. I.11}$$

Une deuxième subdivision en sept classes de nature du relief selon la dénivelée spécifique (D_s) a été établie par le service hydrologique de l'O.R.S.T.O.M. (tableau I.9). Cette classification ne tient pas compte de la superficie du bassin versant, elle est applicable à tout bassin quel que soit sa superficie (DUBREUIL 1971) :

Tab. I.9- Nature du relief selon la dénivelée spécifique (D_s) par l'ORSTOM.

Classe	D_s exprimé en [m]	Nature du relief
R ₁	< 10	Relief très faible
R ₂	10 – 25	Relief faible
R ₃	25 – 50	Relief assez faible
R ₄	50 – 100	Relief modéré
R ₅	100 – 250	Relief assez fort
R ₆	250 – 500	Relief fort
R ₇	> 500	Relief très fort

Les bassins versants étudiés de l'oued Bouhamdane et de l'oued Ressoul possèdent respectivement une dénivelée spécifique de 205,59 m et 236,54 m, ce qui leur permet de se classer dans la classe R₅ ($100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$), correspondant à un relief assez fort.

I-4 Caractéristiques physiographiques

La détermination des paramètres physiographiques tels-que : la densité de drainage, la fréquence des talwegs élémentaires, le coefficient de torrentialité, les rapports de confluence et de longueurs des cours d'eau, le temps de concentration et la vitesse d'écoulement d'un bassin versant nécessite une classification du réseau de drainage selon la classification de STRAHLER (1957). Cette dernière a été obtenue pour les deux bassins (figure I.7, tableau I.10) après le traitement d'un modèle numérique de terrain (MNT) sous un système d'information géographique (ArcGIS).

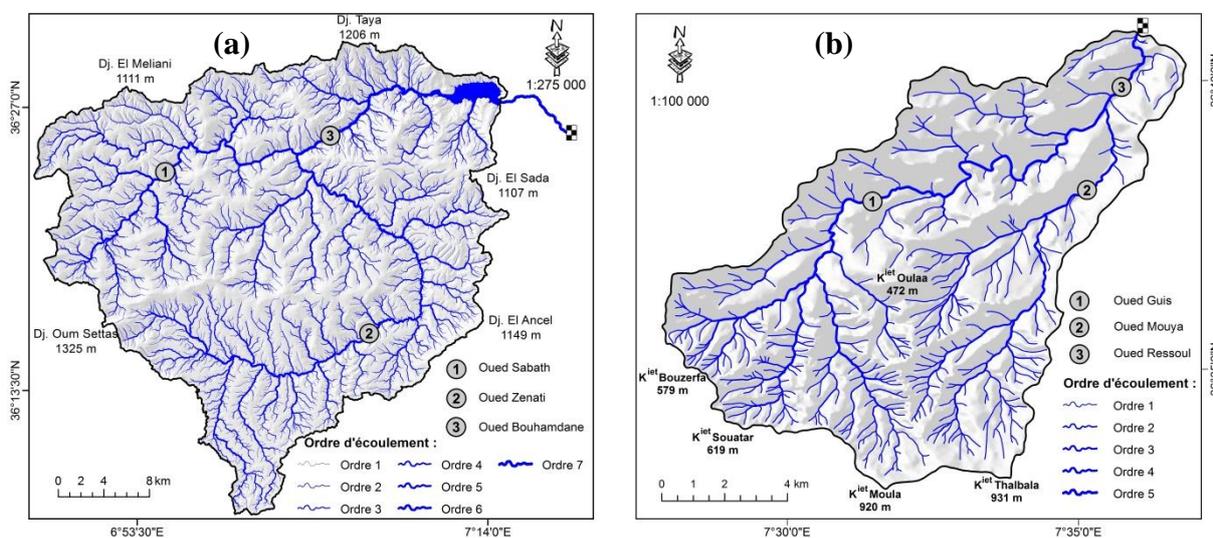


Fig. I.7- Ordre d'écoulement selon la classification de STRAHLER ; (a) : bassin versant de l'oued Bouhamdane, (b) : bassin versant de l'oued Ressoul.

Tab. I.10- Résultats de la classification du réseau hydrographique des deux bassins versants selon la méthode de STRAHLER.

Ordre d'écoulement	B. V. de l'oued Bouhamdane		B. V. de l'oued Ressoul	
	Nombre des talwegs	Longueur des talwegs [km]	Nombre des talwegs	Longueur des talwegs [km]
1	3778	1606,12	401	172,91
2	827	730,43	66	39,17
3	193	453,71	18	27,13
4	47	229,96	4	19,29
5	9	84,03	1	16,85
6	2	36,86	-	-
7	1	38,64	-	-
Total	4857	3179,75	490	275,34

Il faut signaler que le talweg d'ordre 1 codifié sous une carte topographique d'échelle 1/20.000e correspond à un talweg d'ordre 2 et sous une carte d'échelle 1/50.000e correspond à un talweg d'ordre 3 dans la réalité (LABORDE 2013).

I-4.1 Densité de drainage (D_d) :

La densité de drainage d'un bassin versant est définie comme étant la longueur totale de tous les cours d'eau ramenée à l'unité de surface, elle est étroitement liée à la longueur de l'écoulement superficiel (HORTON 1932 et 1945). Ce paramètre s'exprime par la relation suivante (Eq. I.12) :

$$D_d = \frac{1}{S} * \sum_{i=1}^n L_i \quad \dots \text{Eq. I.12}$$

Avec:

D_d La densité de drainage [km/km²] ;

L_i La longueur des cours d'eau [km] ;

S La superficie du bassin versant [km²] ;

i L'ordre d'écoulement de 1 à n .

La densité de drainage dépend essentiellement des conditions topographiques, géologiques-lithologiques (la perméabilité) et climatologiques ainsi qu'aux activités anthropiques. Elle reflète la dynamique du bassin versant, la stabilité du réseau hydrographique et le type d'écoulement en surface.

Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Bouhamdane a une longueur totale de 3180 km, ce qui donne une densité de drainage relativement élevée de 2,88 km/km². Alors que le bassin versant de l'oued Ressoul est doté d'une densité de drainage de 2,67 km/km² pour une longueur totale de 275 km.

La densité de drainage est généralement homogène sur la totalité du bassin versant de l'oued Bouhamdane, ce qui montre un bon drainage (figure I.7-a). Elle est relativement dense au Sud du bassin versant de l'oued Ressoul où la perméabilité du sol est limitée, l'écoulement devient alors plus rapide. La partie Nord du bassin est marquée par une densité généralement faible (figure I.7-b), cette zone serait caractérisée par des infiltrations assez élevées.

I-4.2 Fréquence des talwegs élémentaires (F_1) :

C'est le rapport entre le nombre de talwegs d'ordre 1 et la superficie totale du bassin versant. Elle est donnée par la formule suivante (Eq. I.13) :

$$F_1 = \frac{N_1}{S} \quad \dots \text{Eq. I.13}$$

Où :

F_1 : Fréquence des talwegs élémentaires [km^2] ;

N_1 : Nombre des talwegs d'ordre 1 ;

S : Superficie du bassin versant [km^2].

Les valeurs de la fréquence des talwegs élémentaires des bassins versants de l'oued Bouhamdane et de l'oued Ressoul sont de $3,42 \text{ km}^2$ et $3,89 \text{ km}^2$ respectivement. Ces résultats montrent que le bassin versant de l'oued Bouhamdane possède un nombre plus important de talwegs d'ordre 1 par rapport à sa superficie (plus de 3750 talwegs), que le bassin versant de l'oued Ressoul qui en environ de 400.

I-4.3 Coefficient de torrentialité (C_t) :

Le coefficient de torrentialité (C_t), est un coefficient sans dimension reflétant la nature de l'écoulement superficiel sur les versants du bassin. Il est fonction de la géologie du substratum, la classe de pente et l'intensité de la pluie. Un coefficient de torrentialité très fort indique que la perméabilité du bassin est médiocre, les pentes sont élevées et les précipitations sont considérables. Ce coefficient est obtenu à l'aide de la formule suivante (Eq. I.14) :

$$C_t = F_1 * D_d \quad \dots \text{Eq. I.14}$$

Où:

C_t : Coefficient de torrentialité ;

F_1 : Fréquence des talwegs élémentaires [km^2] ;

D_d : Densité de drainage [km/km^2] ;

Les deux bassins étudiés présentent en général un coefficient de torrentialité assez fort, il passe de 9,85 pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane à 10,39 pour le bassin versant de l'oued Ressoul.

I-4.4 Rapport de confluence des talwegs (R_c) :

Le rapport de confluence des talwegs représente le rapport des nombres des talwegs d'ordre n et celui d'ordre $n + 1$. Il est donné par la relation suivante (Eq. I.15) :

$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}} \quad \dots \text{Eq. I.15}$$

Avec :

R_c : Rapport de confluence ;

N_n : Nombre des talwegs d'ordre n ;

N_{n+1} : Nombre des talwegs d'ordre suivant ($n + 1$).

En se basant sur les résultats de la classification du réseau hydrographique déjà obtenue (tableau I.10), les rapports moyens de confluences pour les bassins versants de l'oued Bouhamdane et l'oued Ressoul sont respectivement 4,54 et 4,75. Ces valeurs sont relativement élevées, s'expliquent par la bonne répartition du réseau hydrographique ainsi que les formes allongées des deux bassins versants.

I-4.5 Rapport des longueurs des talwegs (R_l):

Le rapport de longueurs des talwegs est défini comme le quotient de la longueur moyenne des talwegs d'ordre n à la longueur moyenne des talwegs d'ordre $n + 1$. Il est défini par (Eq. I.16) :

$$R_l = \frac{L_n}{L_{n+1}} \quad \dots \text{Eq. I.16}$$

Où :

R_l : Rapport des longueurs ;

L_n : Longueur des talwegs d'ordre n [km] ;

L_{n+1} : Longueur des talwegs d'ordre suivant ($n + 1$) [km].

Les valeurs moyennes des rapports de longueurs obtenus sont 2,16 pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane et 2,42 pour le bassin versant de l'oued Ressoul.

I-4.6 Temps de concentration du bassin versant (T_c) :

On peut définir le temps de concentration (T_c) comme le temps nécessaire que prend une goutte d'eau du point le plus éloigné du bassin versant pour aboutir à son exutoire, il est fonction de la topographie du bassin et ne dépend pas de crues. Ce paramètre est estimé par plusieurs relations empiriques, pour notre cas nous avons préféré la relation de Giandotti qui s'écrit comme suit (Eq. I.17) :

$$T_c = \frac{4*\sqrt{S}+1,5*L}{0,8*\sqrt{H_{moy}-H_{min}}} \quad \dots \text{Eq. I.17}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration [heures] ;

S : Superficie du bassin versant [km²] ;

L : Longueur du talweg principal [km] ;

H_{min} : Altitude minimale du bassin [m] ;

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin [m].

L'application de la formule précédente pour les deux bassins versants, donne un temps de concentration de ruissellement de 14,62 heures pour le bassin de l'oued Bouhamdane et de 6,38 heures pour le bassin de l'oued Ressoul.

I-4.7 Vitesse d'écoulement (V) :

Ce paramètre caractérise la vitesse moyenne d'écoulement des oueds par gravité suivant les pentes du bassin versant. Elle est exprimée par la relation suivante (Eq. I.18) :

$$V = \frac{L}{T_c} \quad \dots \text{Eq. I.18}$$

Où :

V : Vitesse d'écoulement [km/h] ;

L : Longueur du talweg principal [km] ;

T_c : Temps de concentration [h].

Le cours d'eau principal du bassin versant de l'oued Bouhamdane coule avec une vitesse moyenne de 6,16 km/h, alors que la vitesse d'écoulement des eaux superficielle pour le bassin versant de l'oued Ressoul vaut 3,92 km/h.

I-5 Pentes :

La répartition des pentes sur l'ensemble du bassin versant a été obtenue par le traitement d'un modèle numérique de terrain (MNT) sous un système d'information géographique (ArcGIS). Nous avons ensuite adopté la classification suivante (tableau I.11) :

Tab. I.11- Classification des pentes.

N° de classe	Classe de pente	Pente [%]
1	Très faible	0 à 5
2	Faible	5 à 10
3	Modérée	10 à 20
4	Forte	20 à 35
5	Très forte	+ 35

I-5.1 Pentas du bassin versant de l'oued Bouhamdane :

Le bassin versant de l'oued Bouhamdane présente un relief hétérogène, accidenté où prédominent des pentes de classes moyennes à fortes. En moyenne sur son ensemble le bassin versant à une valeur de pente de 14,86 %, ce qui est relativement modérée. Les plus fortes valeurs sont localisées aux alentours de la cuvette (plan d'eau) du barrage Hammam Debagh où les pentes peuvent atteindre les 60 % (ce sont des pentes raides). Au Sud du bassin versant les pentes sont généralement faibles à modérées (figure I.8).

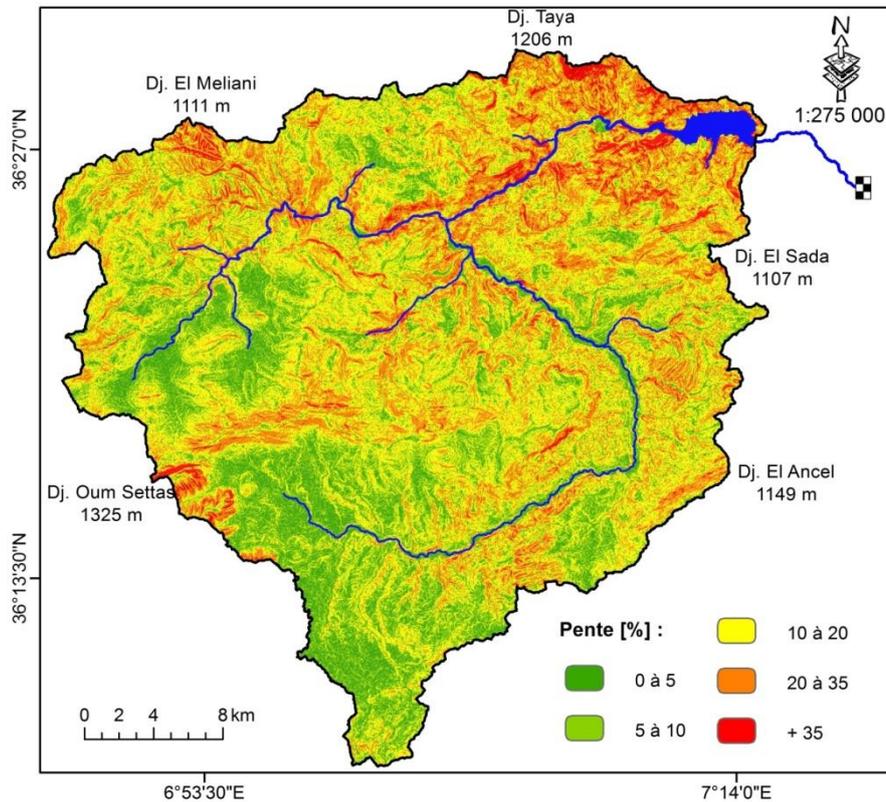


Fig. I.8- Carte des pentes du bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Environ 35 % de la superficie du bassin versant présente une classe de pente faible à très faible (inférieure à 10 %). Quand 25 % de la superficie du bassin marqué par des pentes fortes à très forte (supérieures à 20 %), est localisée essentiellement au niveau du sous bassin versant de l'oued Bouhamdane élémentaire. La classe dominante est celle entre 10 et 20 % c'est la classe modérée, elle occupe presque 40 % de la superficie totale du bassin versant (figure I.9).

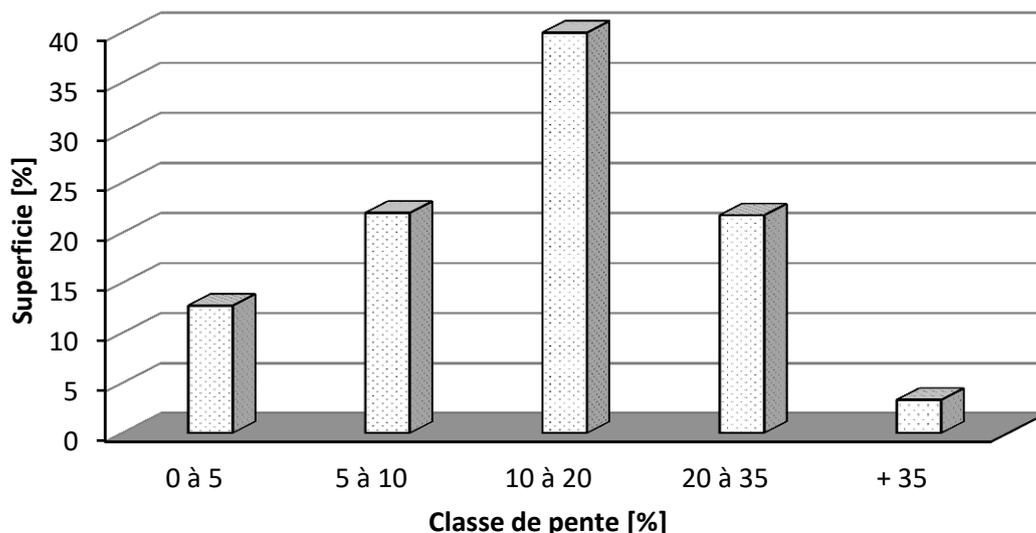


Fig. I.9- Répartition des classes de pentes sur le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

I-5.2 Pentes du bassin versant de l'oued Ressoul :

Dans son ensemble, le bassin versant de l'oued Ressoul montre une pente moyenne relativement modérée avec une valeur de 15,54 %. Au Sud et au Nord-Ouest du bassin les pentes sont très accentuées (forte à très forte) correspondant à la chaîne montagneuse. La partie Nord-Est du bassin versant est marquée par un relief relativement faible où prédominent les pentes douces entre 0 et 10 % (figure I.10).

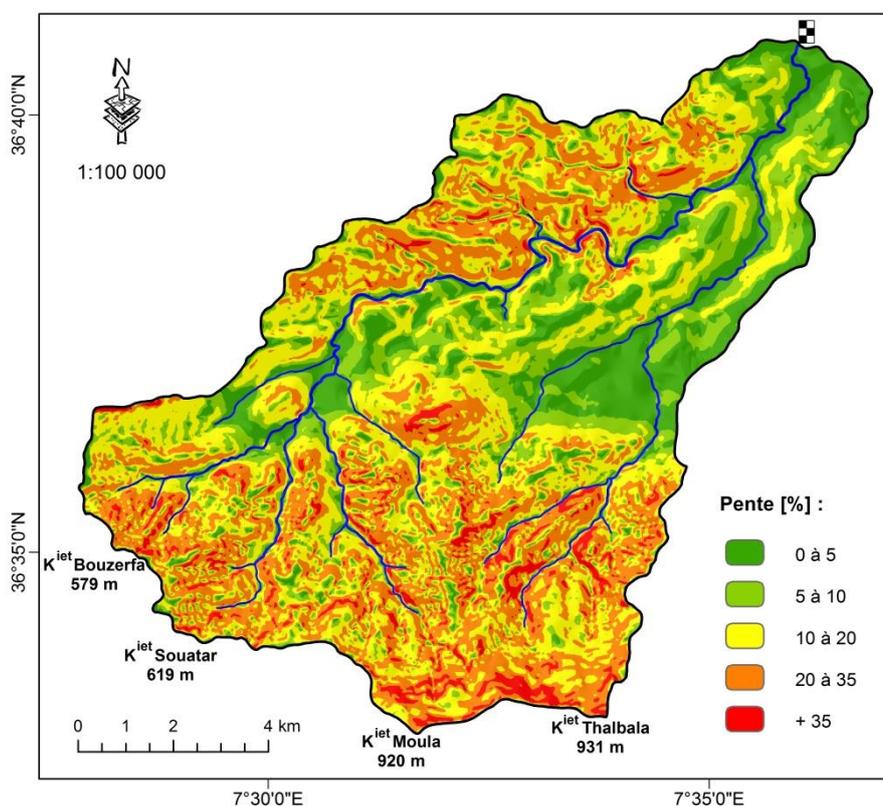


Fig. I.10- Carte des pentes du bassin versant de l'oued Ressoul.

Les classes de pentes 0-5 et 5-10 occupent environ 3672 Ha soit 36 % de la superficie totale du bassin versant. La classe de pente entre 10 et 20 % représente presque 1/3 de la superficie du bassin. Alors que les valeurs de pente supérieure à 20 % touchent une partie plus importante du bassin versant avec 32 % de sa superficie totale (tableau I.12).

Tab. I.12- Distribution des classes de pentes sur le bassin versant de l'oued Ressoul.

N° de classe	Classe de pente	Pente [%]	Superficie [Ha]	Taux [%]
1	Très faible	0 à 5	1810,04	17,57
2	Faible	5 à 10	1861,27	18,07
3	Modérée	10 à 20	3367,17	32,69
4	Forte	20 à 35	2800,25	27,19
5	Très forte	35	461,27	4,48

I-6 Lithologie

La distribution lithologique sur les deux bassins versants étudiés a été obtenue à l'aide des cartes géologiques dressées au 1/50.000e, dessinées et publiées par le service géographique de l'armée. Selon ces cartes, nous avons retenue pour les deux bassins les faciès suivants (tableau I.13) :

Tab. I.13- Classification lithologique retenue pour les deux bassins versants.

Bassin versant de l'oued Bouhamdane		Bassin versant de l'oued Ressoul	
Faciès	Âge	Faciès	Âge
- Grés numidiens	- Oligocène	- Grés numidiens	- Oligocène
- Marnes	- Crétacé	- Grés micacés	- Oligocène
- Calcaires	- Crétacé	- Grés argilo-calcaireux	- Crétacé inférieur
- Schistes	- Sénonien supérieur	- Grés argilo-schisteux	- Crétacé supérieur
- Marno-Calcaires	- Eocène	- Marnes	- Lutétien
- Argiles	- Oligocène-Crétacé	- Marno-Calcaires	- Crétacé supérieur
- Conglomérats	- Mio-Pliocène	- Conglomérats	- Mio-Pliocène
- Formations superficielles		- Microbrèches	- Crétacé supérieur
		- Formations superficielles	

I-6.1 Lithologie du bassin versant de l'oued Bouhamdane :

Le bassin versant de l'oued Bouhamdane englobe une multitude de formations lithologiques qui comprend principalement : les grés numidiens, les marnes, les calcaires, les schistes, les marno-calcaires, les argiles, les conglomérats et les formations de surfaces (alluvions actuelles, éboulis de pentes, glacis,...) ; Ces faciès allant du quaternaire au trias.

Les formations fortement érodables ; les marnes du crétacé, les marno-calcaires de l'éocène et les argiles de l'oligocène et du crétacé, se rencontrent essentiellement dans la partie Est du bassin versant (figure I.11). Elles occupent une superficie importante soit un tiers de la superficie totale de ce bassin versant. Quant aux roches moyennement résistantes ; les grés de l'oligocène, les calcaires du crétacé et les marnes schisteuses du sénonien supérieur composent environ 40 % du bassin versant.

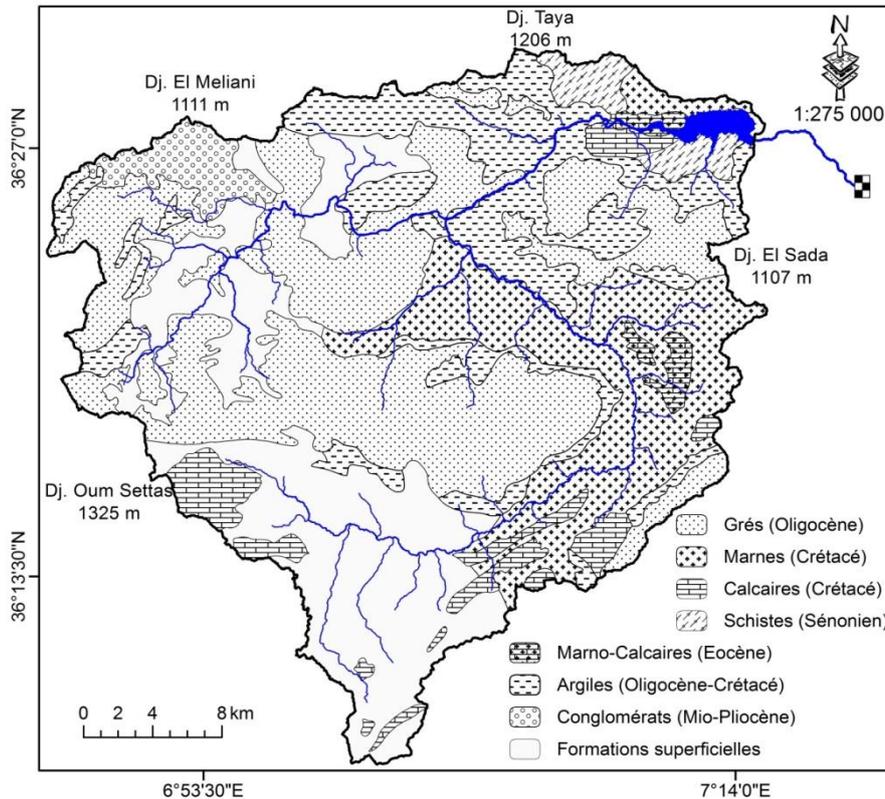


Fig. I.11- Carte lithologiques du bassin versant de l'oued Bouhamdane.

La partie Ouest du bassin versant de l'oued Bouhamdane est constituée majoritairement de formations superficielles et de conglomérats du Mio-pliocène, soit 26 % de sa superficie (figure I.12). Ce bassin versant est donc composé en gros d'une composition lithologique moyennement résistante à l'érosion hydrique.

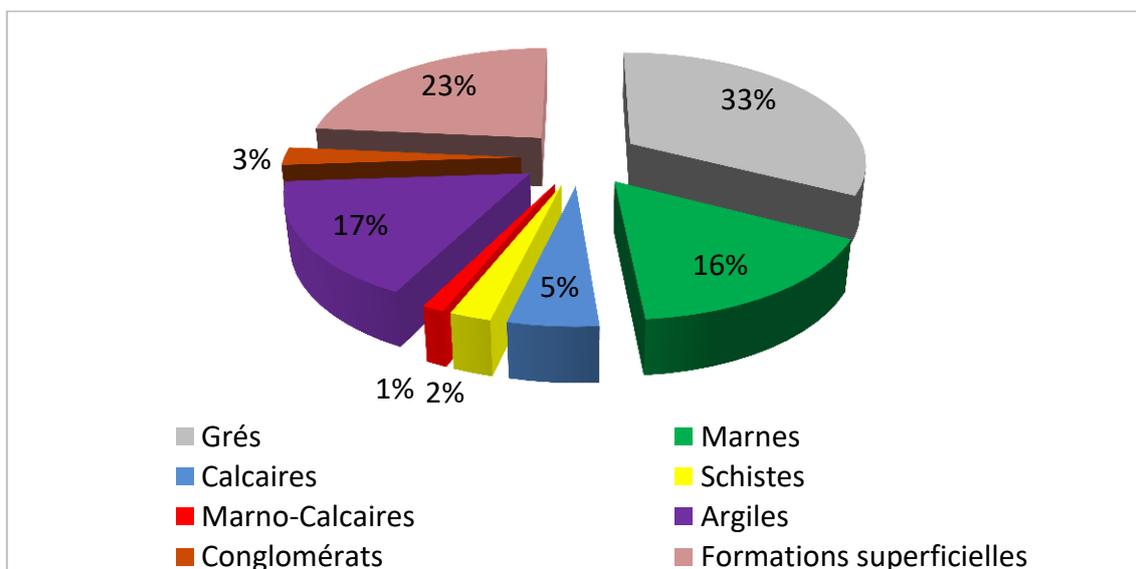


Fig. I.12- Répartition des ensembles lithologiques sur le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

I-6.2 Lithologie du bassin versant de l'oued Ressoul :

Le bassin versant de l'oued Ressoul expose une répartition lithologique très diversifiée (figure I.13). Les surfaces facilement érodables (les marnes et les marno-calcaires d'âge Lutétien et Crétacé supérieur), sont localisées essentiellement dans la partie Sud du bassin. Elles occupent plus de 3710 Ha de la superficie totale soit 36 % du bassin versant (figure I.14).

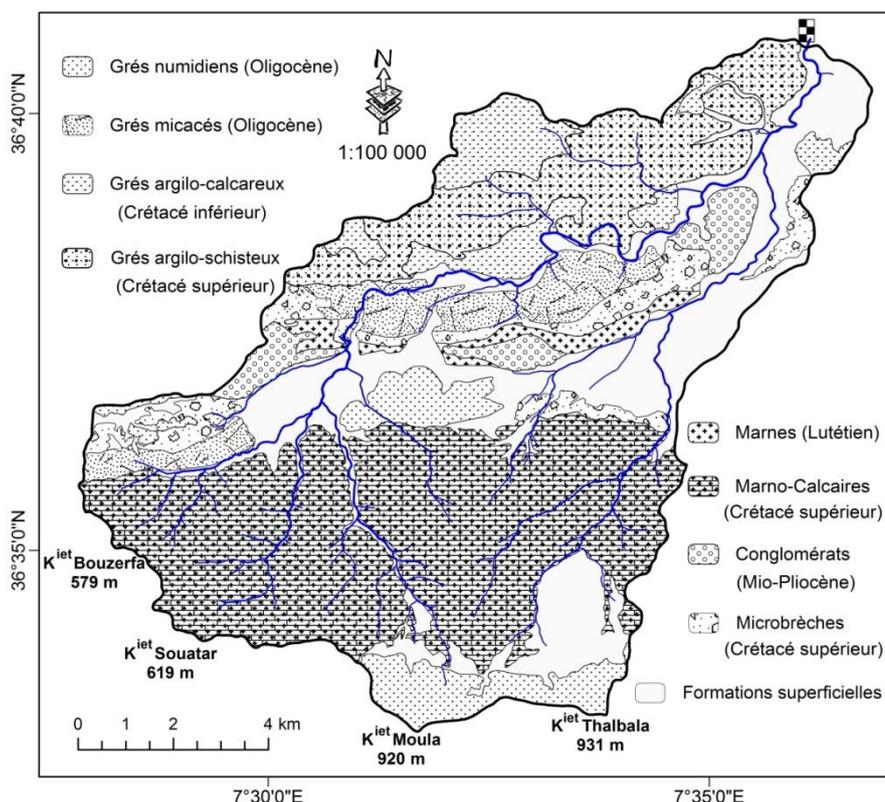


Fig. I.13- Carte lithologiques du bassin versant de l'oued Ressoul.

Les grès numidiens et micacés de l'oligocène et les grès argilo-calcaires et argilo-schisteux du Crétacé inférieur et supérieur, sont difficilement érodables (moyennement résistantes). Ces formations se rencontrent surtout dans la partie Nord du bassin versant, elles occupent environ de 32 % de la superficie totale (figure I.14).

Les formations superficielles ont été observées au niveau de fonds de vallées des principaux oueds ; Mouya, Guis et Ressoul et aussi dans la plaine d'Ain Berda. Elles couvrent 2370 Ha soit 23 % de la superficie du bassin versant. Alors que, les conglomérats du Mio-pliocène et les microbrèches du Crétacé supérieur n'occupent que 9 % de la superficie totale.

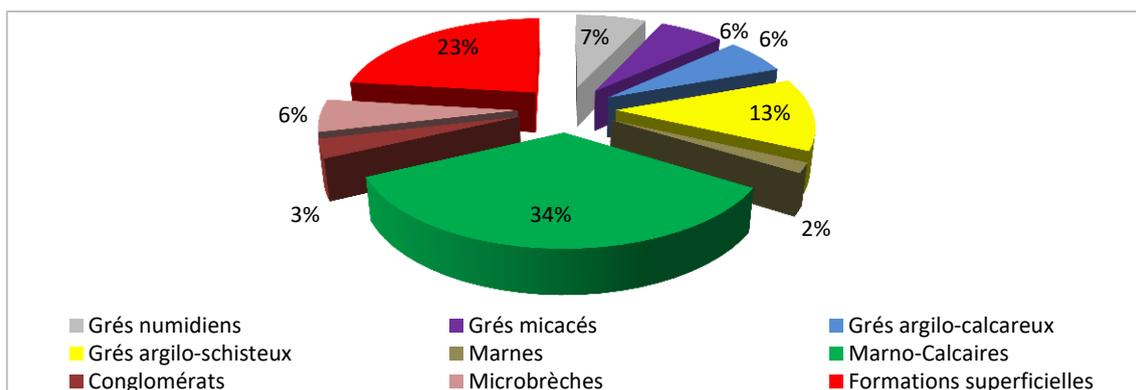


Fig. I.14- Répartition des ensembles lithologiques sur le bassin versant de l'oued Ressoul.

I-7 Occupation des sols

Les cartes d'occupations des sols de la zone d'étude ont été établies sur une base des cartes thématiques de formations forestières et d'occupations des sols, déjà élaborées par le Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural (BNEDR) en 2008 sur une échelle de travail de 1/25.000e. Ces cartes ont été numérisées sous ArcGIS et ensuite actualisées et vérifiées à l'aide des images satellitaires récentes de 15 à 30 m de résolution (LandSat8).

La répartition spatiale de l'occupation des sols au niveau de bassin versant de l'oued Bouhamdane indique plusieurs domaines d'occupation ; les terres agricoles (cultures, cultures associées aux parcours et oléiculture) dominent sur ce bassin (figure I.15), elles occupent un espace très important de 68535 Ha soit environ 65 % de la superficie du bassin versant au barrage Hammam Debagh.

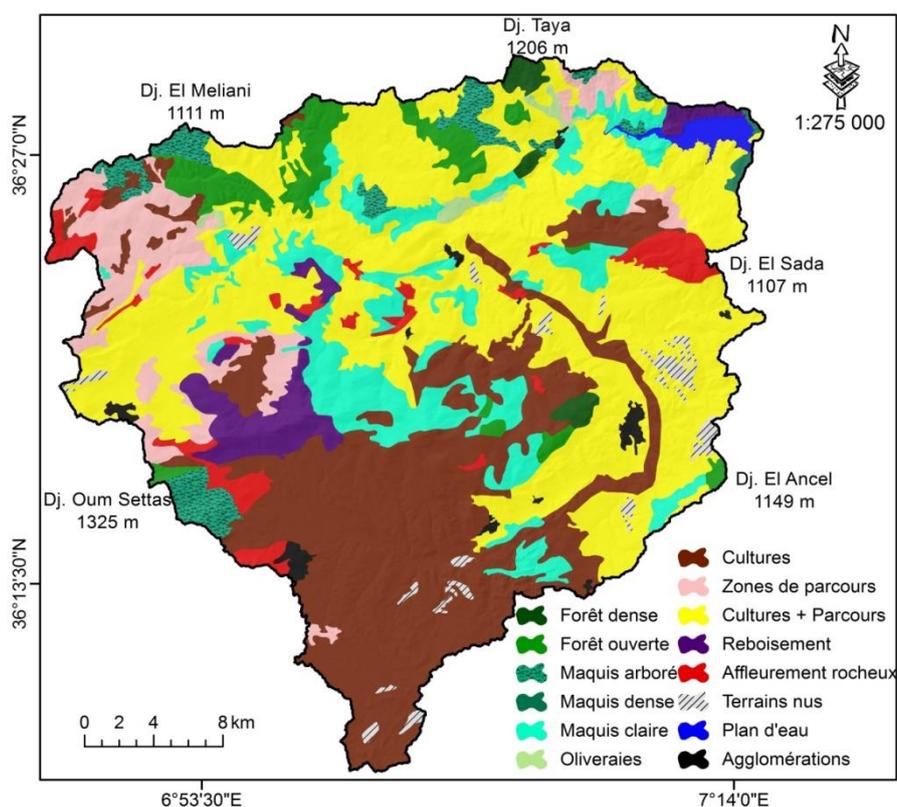


Fig. I.15- Carte d'occupation des terres du bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Les formations forestières (forêts dense et claire, maquis dense et claire et reboisements) couvrent un taux de boisement autour de 22 % de la superficie totale (figure I.16) et se trouvent essentiellement dans les régions du relief plus au moins accidenté où les précipitations sont abondantes.

Les zones de parcours totalisent une superficie de 6812 Ha soit 6,5 % du bassin, elles sont réparties sur des pentes moyennes à fortes. Le reste de la superficie du bassin est occupé par des terres improductives (terrains rocheux, terrains nus, plan d'eau et terres urbanisées), ces domaines se trouvent un peu partout dans le bassin versant.

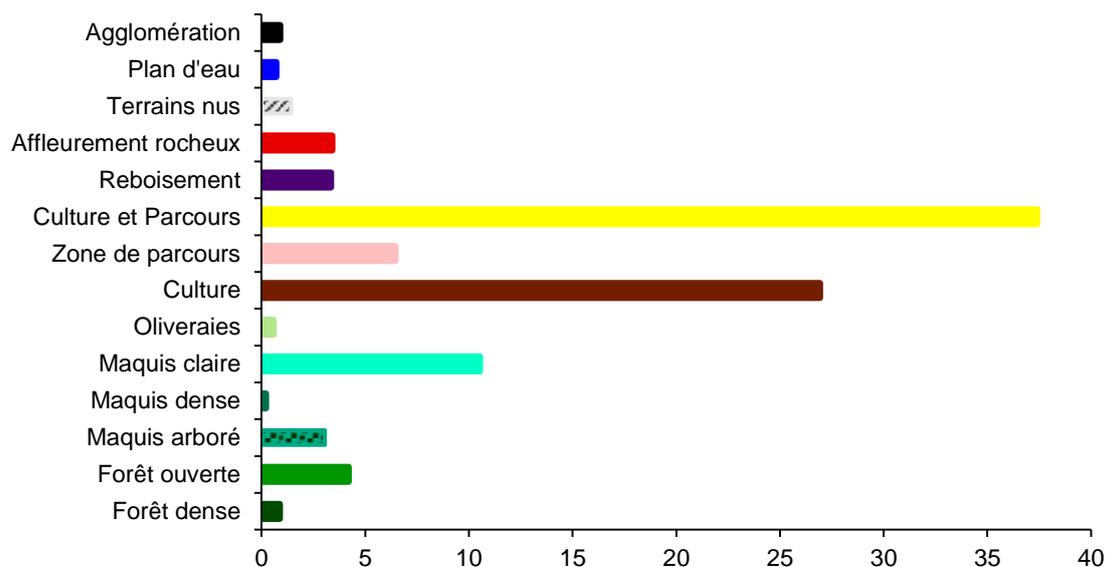


Fig. I.16- Répartition des terres dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane [%].

Selon la figure I.17, le bassin versant de l'oued Ressoul occupe divers domaines (forestier, agricole,...). Les formations forestières occupent 3677 Ha soit 35,70 % de la superficie totale du bassin versant. Environ la moitié de cette formation est formée essentiellement de forêts domaniales (88 % de Draa El-Arch qui couvre le versant Nord et 12 % de Beni Ahmed située au Sud du bassin versant), le reste (1993 Ha) est occupé par des maquis claires et des maquis arborés de Chêne liège.

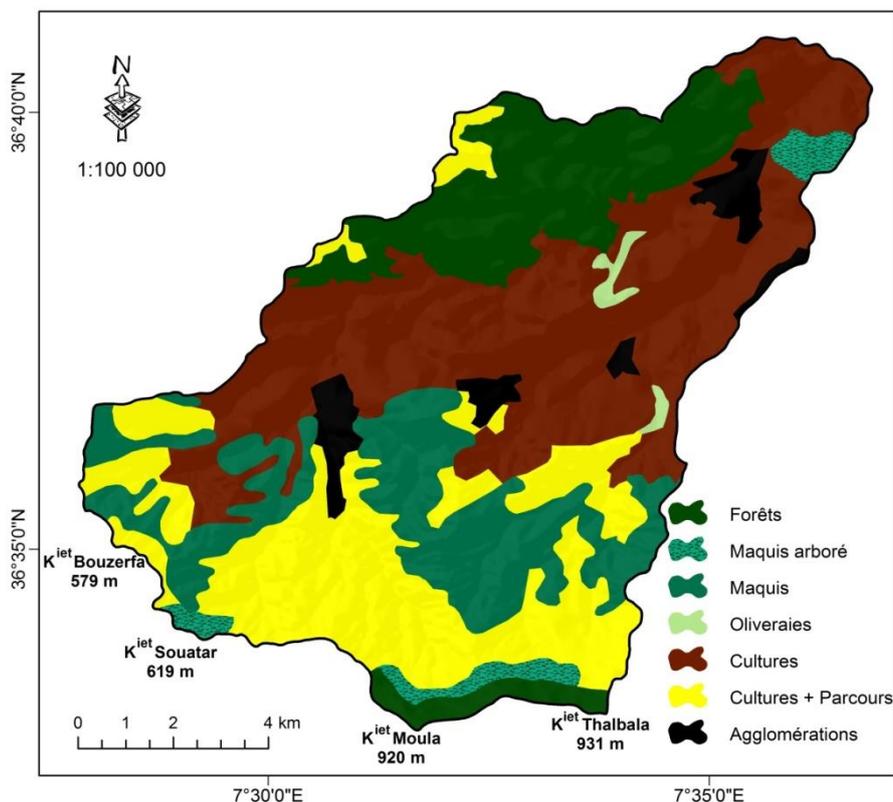


Fig. I.17- Carte d'occupation des terres du bassin versant de l'oued Ressoul.

Les espaces agricoles (cultures, cultures associées aux parcours et oléiculture) totalisent une superficie de 6223 Ha soit 60,42 %. Alors que les terres improductives (agglomérations) couvrent une superficie de 400 Ha correspondant à 3,9 % de la superficie totale du bassin versant de l'oued Ressoul (figure I.18).

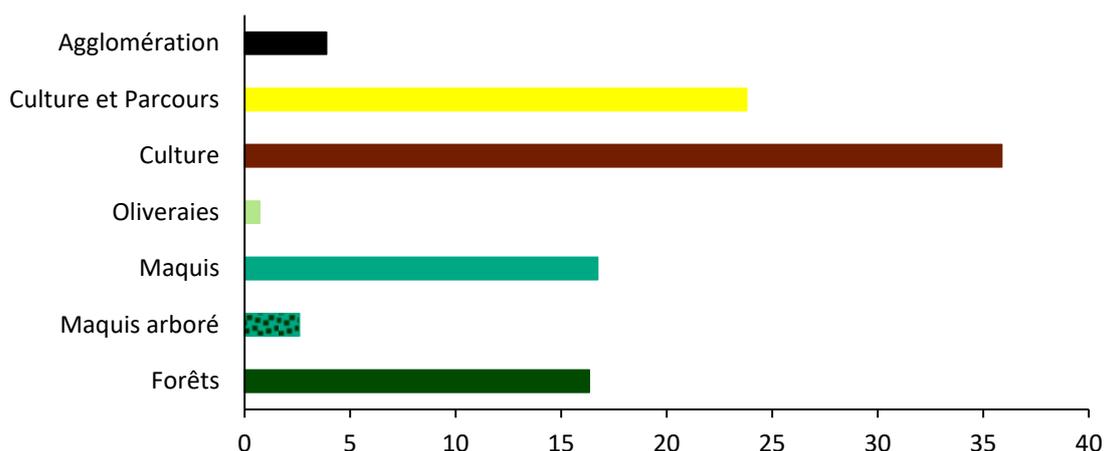


Fig. I.18- Répartition des terres dans le bassin versant de l'oued Ressoul [%].

En conclusion les bassins versants de l'oued Bouhamdane et de l'oued Ressoul occupent respectivement 82140 Ha et 6623 Ha de surfaces non protégées, ces zones sont exposées aux activités anthropiques (cultures, pâturages, construction d'ouvrages d'arts,...), quant aux 23460 Ha et 3677 Ha restantes formées essentiellement par des végétations naturelles ils sont certainement protégés. Ceci indique la gravité de la situation de deux bassins versants.

I-8 Synthèse des caractéristiques des deux bassins étudiés

Le tableau I.14 synthétise les principales caractéristiques des bassins versants de l'oued Bouhamdane et de l'oued Ressoul.

Tab. I.14- Synthèse des caractéristiques des bassins versant de l'oued Bouhamdane et de l'oued Ressoul.

CARACTERISTIQUES		SYMBOLE	UNITE	BASSIN VERSANT		
				Oued Bouhamdane	Oued Ressoul	
Hydrographiques	Superficie	S	km ²	1105	103	
	Périmètre	P	km	203	50	
	Talweg principal	-	-	Oued Bouhamdane	Oued Ressoul	
	Principaux affluents	-	-	Oued Zenati, Oued Sabath	Oued Guis, Oued Mouya	
	Longueur du talweg principal	L	km	92	25	
Topographiques	Altitudes	minimale	H_{min}	m	260	72
		à 95% de surface	$H_{95\%}$	m	463	110
		médiane	$H_{50\%}$	m	802	280
		moyenne	H_{moy}	m	785	306
		à 5% de surface	$H_{5\%}$	m	1019	578
		maximale	H_{max}	m	1325	931
	Intégrale hypsométrique	IH	-	0,49	0,27	
Pente moyenne		-	%	14,86	15,54	
Morphométriques	Indice de compacité		K_G	-	1,72	1,39
	Rectangle équivalent	Longueur	L	km	89,90	20,08
		Largeur	l	km	12,29	5,13
	Indice de pente de ROCHE		I_p	-	0,092	0,178
	Indice de pente global		I_g	‰	6,18	23,31
	Dénivelée spécifique		D_s	m	205,59	236,54
	Densité de drainage		D_d	Km/km ²	2,88	2,67
	Fréquence des talwegs élémentaires		F_1	Km ⁻²	3,42	3,89
	Rapport de confluence		R_c	-	4,54	4,75
	Rapport de longueurs		R_l	-	2,16	2,42
	Coefficient de torrentialité		C_t	-	9,85	10,39
	Temps de concentration		T_c	h	14,62	6,38
Vitesse d'écoulement		V	Km/h	6,16	3,92	

CHAPITRE II:

HYDROCLIMATOLOGIE

II-1 Introduction

La connaissance des régimes d'écoulement des eaux superficielles et souterraines est d'une importance primordial, notamment sur l'exploitation et la gestion de ces eaux. Elle est basée certainement sur l'analyse de différentes composantes du bilan hydrologique, tant dans des conditions météorologiques exceptionnelles que dans des conditions normales. Pour cette fin, il est nécessaire de quantifier et d'estimer tous les paramètres qui interviennent dans le processus hydrologique ; L'interprétation de ces paramètres nous permettra également de bien cerner les variations des apports superficiels et des recharges souterraines.

L'étude est subdivisée en deux parties ; la première concerne l'étude du climat où on s'intéresse à l'identification du climat de la zone d'étude à partir de différents agents climatiques (précipitation, température, humidité, vents,...), et la deuxième englobe l'étude de variations des termes du bilan d'eau d'une part et les régimes des cours d'eau d'autre part.

II-2 Climatologie

Les conditions météorologiques influent beaucoup sur le fonctionnement du régime hydrique. La connaissance de ces conditions (précipitation, température, insolation, humidité, évaporation, vents,...) nous permettra également de connaître la situation du climat de la zone qui nous occupe.

L'analyse de facteurs climatologiques basée essentiellement sur les données issues des stations météorologiques de Belkhir à Guelma pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane et les Salines à Annaba pour le bassin versant de l'oued Ressoul, qui sont les plus proches des deux bassins étudiés. Les séries utilisées correspondent aux longues périodes d'observation allant de 1987 jusqu'à 2017 pour la station de Guelma et entre 1989 et 2017 pour celle d'Annaba, leurs données ont été acquises auprès de l'Office National de la Météorologie (ONM). Les caractéristiques de ces stations météorologiques sont données au tableau II.1.

Tab. II.1- Localisation, altitude et période d'observation des stations météorologiques retenues.

Station météorologique	Longitude	Latitude	Altitude [m]	Période d'observation
Guelma	07°28'46" E	36°27'22" N	225	1987 - 2017
Annaba	07°48'09" E	36°49'21" N	3	1989 - 2017

II-2.1 Précipitation :

La précipitation est l'agent le plus important dans les études hydroclimatiques, elle joue un rôle fondamental dans l'estimation de différents facteurs du bilan hydrologique à savoir ; ruissèlement, infiltration, évaporation,... régissant d'une façon directe sur l'écoulement des cours d'eau (BOUANANI 2004). Les précipitations exceptionnelles durant les événements extrêmes provoquent des dégâts catastrophiques notamment sur un sol nu à forte pente par le déclenchement du processus érosif. Il est donc indispensable d'étudier la variabilité des précipitations aux différentes échelles de temps.

a. Précipitations moyennes mensuelles :

L'analyse statistique de la variabilité spatio-temporelle des précipitations moyennes mensuelles enregistrées aux stations météorologiques de Guelma et d'Annaba (tableau II.2, figure II.1), nous a permis de détecter les observations suivantes :

- Les pluies mensuelles se concentrent essentiellement sur les mois de Septembre à Mai, avec un cumul d'environ 95% de la pluviométrie moyenne qui tombe au cours de l'année ;
- Les mois de Juin, Juillet et Août présentant les mois les plus secs de l'année, avec des précipitations insignifiantes soit un total de 24 mm dans la station d'Annaba et 35 mm dans la station de Guelma, pour un minimum enregistré au mois de Juillet de 3,7 mm à la station de Guelma et de 2,5 mm à la station d'Annaba ;

Tab. II.2- Caractéristique des précipitations moyennes mensuelles des deux stations météo.

Station \ Mois		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Guelma	P [mm]	87,9	68,3	66	58	47,1	16,5	3,7	14,4	40,2	44,8	73,1	77,9
	σ_x [mm]	53,8	49,5	43,5	44,9	34,4	19,7	3,9	17,3	31,9	37,5	61,6	50,6
	C_v	0,61	0,73	0,66	0,77	0,73	1,20	1,06	1,20	0,79	0,84	0,84	0,65
Annaba	P [mm]	96,0	80,5	61,2	57,4	33,8	12,4	2,5	9,1	40,4	56,8	93,9	104,8
	σ_x [mm]	49,9	52,4	35,5	30,9	25,9	14,3	3,9	13,7	32	31,5	61,3	53,3
	C_v	0,52	0,65	0,58	0,54	0,77	1,15	1,55	1,51	0,79	0,55	0,65	0,51

σ_x et C_v sont respectivement l'écart type et le coefficient de variation.

- Les mois les plus pluvieux sont Janvier, Novembre et Décembre avec un cumul de 239 mm (un maximum d'ordre de 88 mm, enregistré en Janvier) à la station de Guelma et 295 mm (dont le maximum en Décembre de 105 mm) à celle d'Annaba ;
- Les valeurs des coefficients de variation montrent que les précipitations moyennes mensuelles sont souvent caractérisées par une forte variabilité où le coefficient de variation dépasse 1,5 pour les mois de Juillet et d'Août à la station d'Annaba et atteint 1,2 en Juin et Août à la station de Guelma.

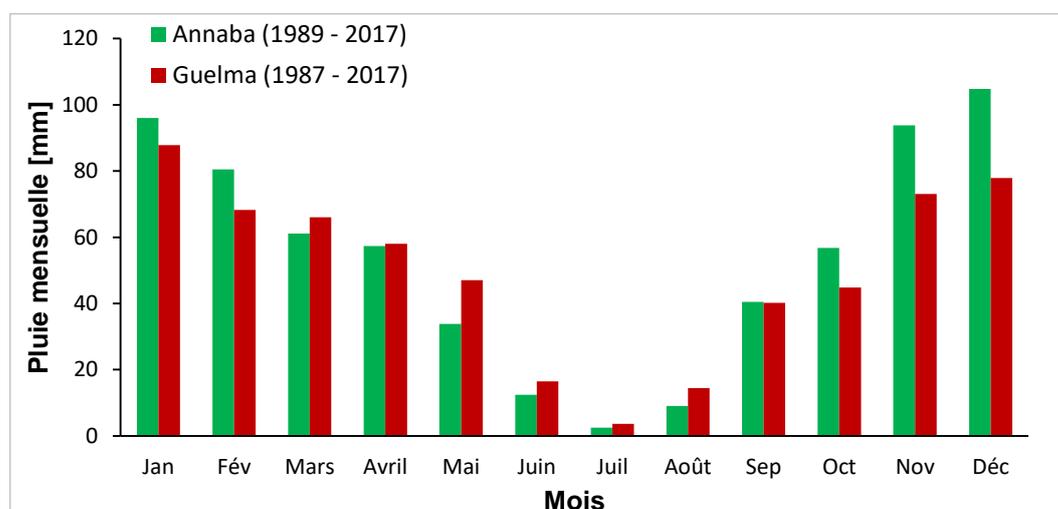


Fig. II.1- Répartition des précipitations moyennes mensuelles interannuelles des deux stations météorologiques de Guelma et Annaba.

b. Précipitations moyennes saisonnières :

La répartition des précipitations moyennes saisonnières interannuelles aux stations de Guelma et d'Annaba (tableau II.3) fait ressortir les observations suivantes :

- La saison la plus pluvieuse pour les deux stations est l'hiver avec plus de 39 % et 43 % de précipitation respectivement pour la station de Guelma et celle d'Annaba ;
- La saison estivale étant la plus sèche ne reçoit que 5,8 % des précipitations à la station de Guelma et seulement 3,7 % à la station d'Annaba, ces pluies sont généralement violentes caractérisées par une forte intensité, elles deviennent agressives notamment pour les sols qui ont une forte pente ;

Tab. II.3- Répartition saisonnière de la précipitation au niveau des stations de Guelma et Annaba.

Station \ Saison		Automne	Hiver	Printemps	Été	Totale
Guelma	P [mm]	158,1	234,0	171,1	34,6	597,8
	P [%]	26,4	39,1	28,6	5,8	100
Annaba	P [mm]	191,1	281,3	152,4	24,0	648,9
	P [%]	29,5	43,4	23,5	3,7	100

- Les saisons d'automne et de printemps reçoivent à peu près la même quantité de pluies, soit environ d'un quart de la précipitation totale ;
- Généralement il y'a une différence appréciable entre les saisons notamment pour la station d'Annaba (figure II.2).

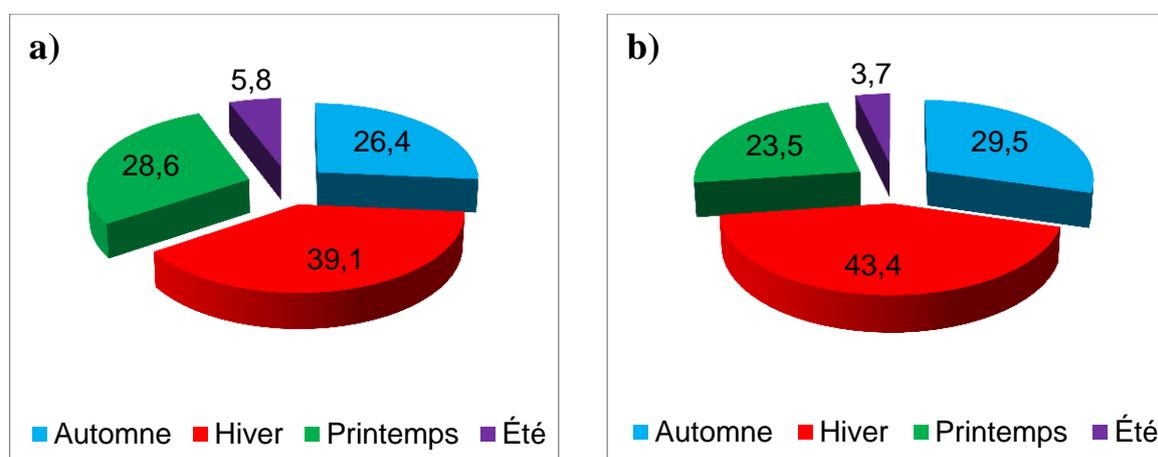


Fig. II.2- Portions des précipitations moyennes saisonnières ; a) Station de Guelma, b) Station d'Annaba.

c. Précipitations moyennes annuelles :

L'étude de la répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles dans les bassins versants de l'oued Bouhamdane et de l'oued Ressoul est basée essentiellement sur les résultats de l'étude des précipitations moyennes annuelles du Nord du pays effectuée par le service hydrologique de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) en 1993, sur une période d'observation qui s'étend de Septembre 1921 à Août 1989. Ces résultats ont été fournis par l'ANRH sous forme de carte thématique numérisée. Cette carte a permis de spatialiser les précipitations annuelles sur la totalité des bassins versants par une interpolation de type "Topo to Raster" des isohyètes de pluies à l'aide du logiciel ArcGIS.

Sur le bassin versant de l'oued Bouhamdane les précipitations moyennes annuelles varient entre 433 et 728 mm, avec une moyenne de 572 mm/an (figure II.3). Les plus fortes valeurs sont localisées au Nord, alors que les plus faibles moyennes annuelles sont rencontrées au Sud du bassin versant. Donc, d'une manière générale ; une tendance à la baisse du Nord vers le Sud (selon la loi de l'éloignement par rapport à la mer de la pluviosité en Algérie).

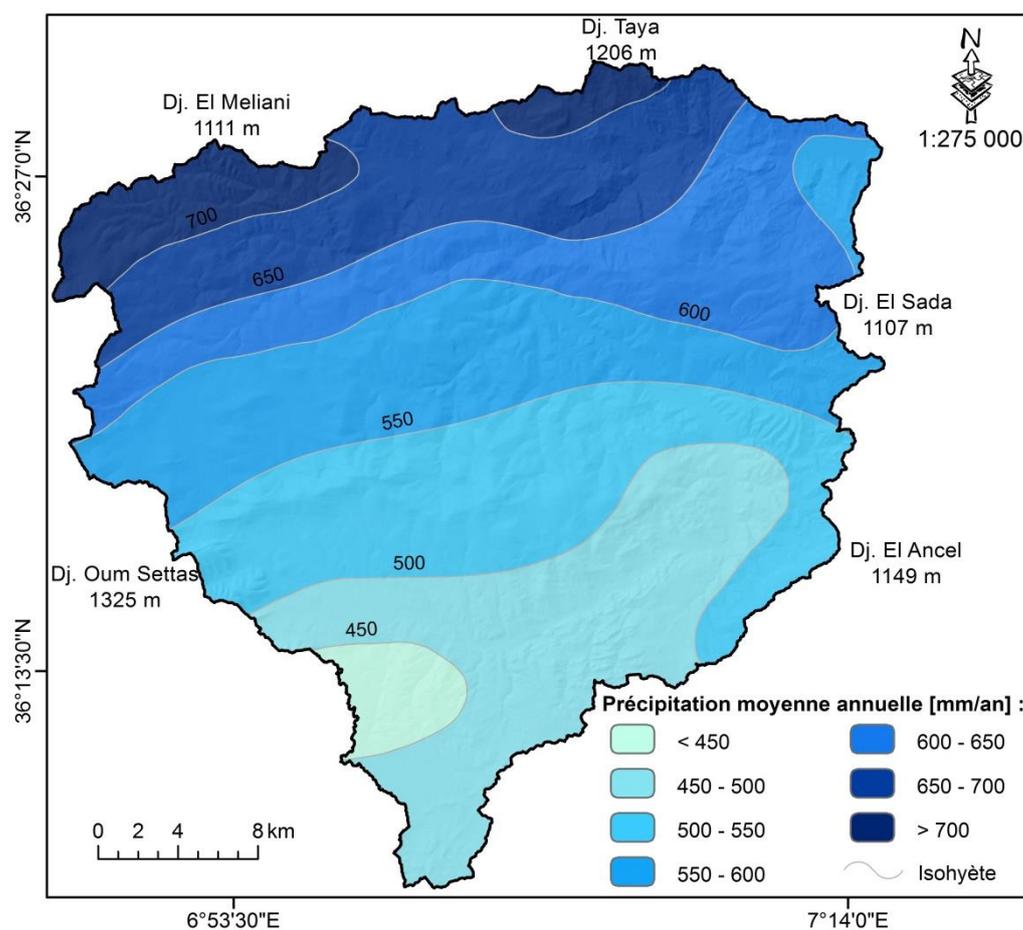


Fig. II.3- Répartition de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane (1921-1989).

De la figure II.4, on remarque que la répartition des précipitations moyennes annuelles sur le bassin versant de l'oued Ressoul varie légèrement avec une faible différence entre les valeurs minimales et les valeurs maximales. Sur l'ensemble du bassin versant les précipitations moyennes varient de 620 à 714 mm par an, avec une moyenne annuelle de l'ordre de 681 mm.

En outre, la répartition des précipitations dans l'ensemble du bassin versant varie en fonction de l'altitude ; les zones hautes sont plus pluvieuses que les basses zones, du fait que plus on monte en altitude par rapport au niveau de la mer, plus que la pluviométrie augmente (figure II.4).

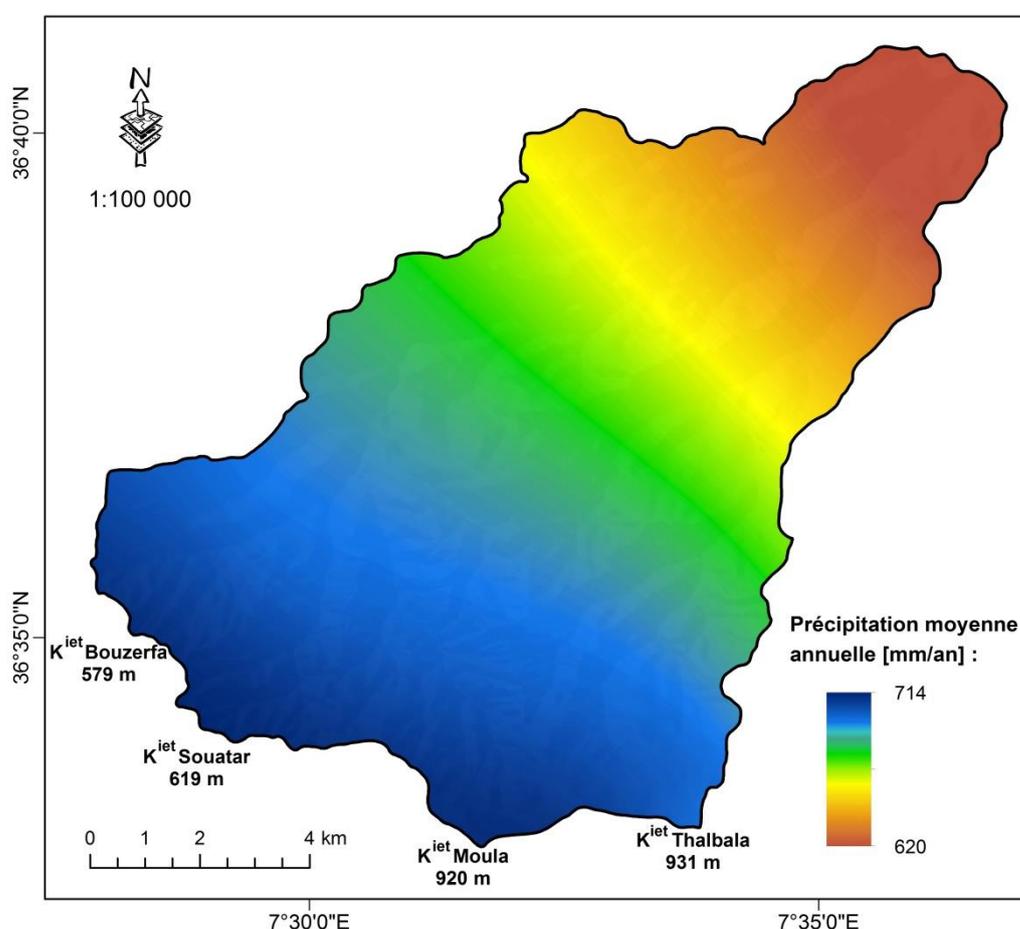


Fig. II.4- Répartition de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'oued Ressoul (1921-1989).

d. Variabilité interannuelle des précipitations :

L'analyse des précipitations moyennes annuelles (tableau II.4), indique que la moyenne interannuelle à la station de Guelma est de l'ordre de 597,8 mm/an avec un faible coefficient de variation (C_v) qui ne dépasse pas 25 %, alors qu'à la station d'Annaba elle est de 649 mm/an avec une très faible variabilité des précipitations annuelles, soit seulement 18,6 % de C_v et ce, au cours de deux périodes retenues.

Tab. II.4- Précipitations annuelles aux stations météorologiques de Guelma et d'Annaba.

Année \ Station	Guelma	Annaba	Année \ Station	Guelma	Annaba
1987	511,5	-	2004	804,8	850,2
1988	455,1	-	2005	540,7	803,6
1989	458,8	497	2006	478,3	584,5
1990	599,7	592	2007	723	700,8
1991	574,8	617,3	2008	381,8	439,6
1992	916,8	742	2009	890,3	888,1
1993	457,4	573,7	2010	614,1	583,8
1994	458	478,8	2011	711	674,5
1995	579,2	585,2	2012	571	555,1
1996	734,8	752	2013	630,6	716,9
1997	620,4	810,1	2014	511,7	623,8
1998	701,6	780,2	2015	668,6	747
1999	603,7	711,8	2016	423,6	487,1
2000	405	533,6	2017	580,3	665
2001	483,1	479,2	P_{moy} [mm]	597,8	648,9
2002	503,8	629,5	σ_x [mm]	148,4	120,5
2003	938,5	715,3	C_v [%]	24,82	18,57

La variation temporelle des précipitations moyennes annuelles à la station de Guelma (figure II.5), montre que l'année la plus pluvieuse (2003) cumule presque 940 mm d'hauteur d'eau, alors que l'année la plus sèche est observée en 2008 avec un total de 382 mm. La période humide est marquée par un écart positif, elle englobe plus de 45 % d'années humides (1990, 1992, 1996-1999, 2003-2004, 2007, 2009-2011, 2013 et 2015), tandis que la période dite sèche (marquée par un écart négatif) couvre 55% de la période étudiée.

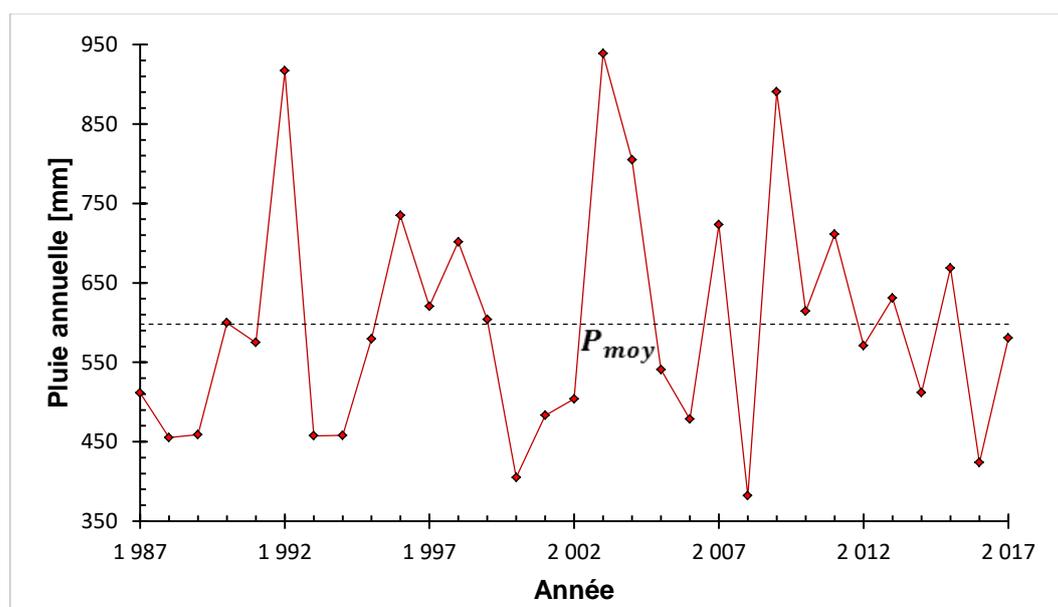


Fig. II.5- Répartition annuelle des précipitations à la station de Guelma (1987-2017).

A Annaba les précipitations moyennes annuelles ont atteint un maximum de 888 mm en 2009, alors que la plus faible pluie soit 440 mm a été enregistrée en 2008. La période humide englobe plus de 48 % d'années humides, alors que la période sèche couvre environ 52 % (1989-1991, 1993-1995, 2000-2002, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014 et 2016) de la période étudiée (figure II.6).

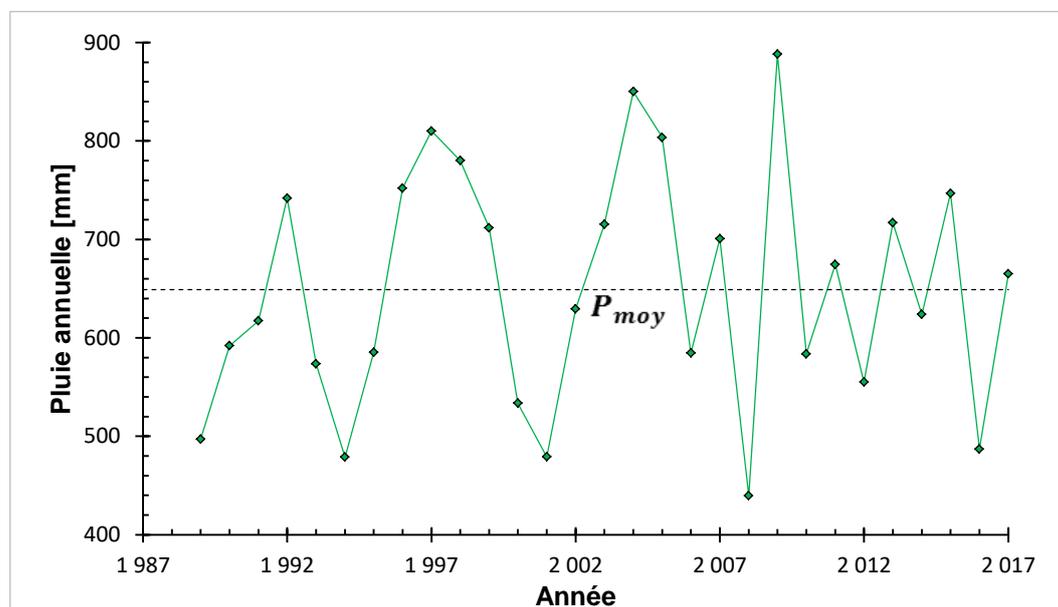


Fig. II.6- Répartition annuelle des précipitations à la station d'Annaba (1989-2017).

II-2.2 Température :

L'analyse des différentes températures (minimas, maximas et moyennes) enregistrées aux stations météorologiques de Guelma et d'Annaba montre que :

Les moyennes interannuelles de températures sont de l'ordre de 18,01 °C à la station de Guelma et de 17,95 °C à celle d'Annaba. En été, de Juin à Août les températures moyennes varient entre 24,1 et 27,4 °C à Guelma et entre 22,5 et 26 °C à Annaba. Les trois mois hivernaux de Décembre à Février sont caractérisés par une température moyenne relativement faible, elle est de l'ordre de 9,7 à 10,8 °C et de 11,3 à 12,5 °C respectivement aux stations météorologiques de Guelma et d'Annaba (tableau II.5).

Tab. II.5- Variation temporelle des températures aux stations de Guelma et d'Annaba.

Station	T [°C]	Automne			Hiver			Printemps			Été		
Guelma (1987-2017)	min	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
		15,5	11,7	7,9	5,3	4,6	5,3	7,0	10,3	13,6	16,8	19,1	18,5
	11,7			5,1			10,3			18,1			
	moy	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
		23,7	20,3	14,7	10,8	9,7	10,2	12,5	15,6	19,4	24,1	27,4	27,3
	19,6			10,2			15,8			26,3			
max	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
	29,2	24,3	18,8	16,2	16,3	17,7	20,3	25,0	29,4	34,1	36,3	34,2	
24,1			16,8			24,9			34,9				
Annaba (1989-2017)	min	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
		18,7	15,3	11,1	8,4	7,3	7,0	8,4	10,3	13,3	16,8	19,4	20,4
	15,0			7,6			10,7			18,9			
	moy	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
		23,5	20,4	15,6	12,5	11,3	11,3	13,2	15,3	18,6	22,5	25,2	26,0
	19,8			11,7			15,7			24,6			
max	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
	29,0	26,4	21,3	17,6	16,5	16,7	18,8	20,9	24,2	27,9	30,8	31,8	
25,6			16,9			21,3			30,1				

On constate pour les stations de Guelma et d'Annaba deux semestres bien distincts, un froid englobe les six mois de Novembre à Avril avec un trimestre notamment froid (Décembre, Janvier et Février) avec un minimum observé en Janvier (4,6 °C à Guelma et 7 °C à Annaba) ; et un autre chaud qui dure de Mai à Octobre avec un trimestre plus chaud (Juin, Juillet et Août) avec un maximum de 36,3 °C enregistré à la station de Guelma en Juillet et de 31,8 °C à Annaba en Août (figure II.7 et II.8).

La période la plus chaude se caractérise par des écarts thermiques plus importants le long de l'été; ils sont de l'ordre de 10 °C au mois de Juin, 8,9 °C au mois de Juillet et 6,8 °C au mois d'Août, enregistrés à la station de Guelma, alors que la station d'Annaba montre des écarts de moins importances (Juin = 5,4 °C, Juillet = 5,6 °C, Août = 5,8 °C). Les écarts thermiques du trimestre le plus froid (Décembre, Janvier et Février) sont de l'ordre de 5 °C à la station de Guelma et de 4 °C à celle d'Annaba par mois (figure II.7 et II.8).

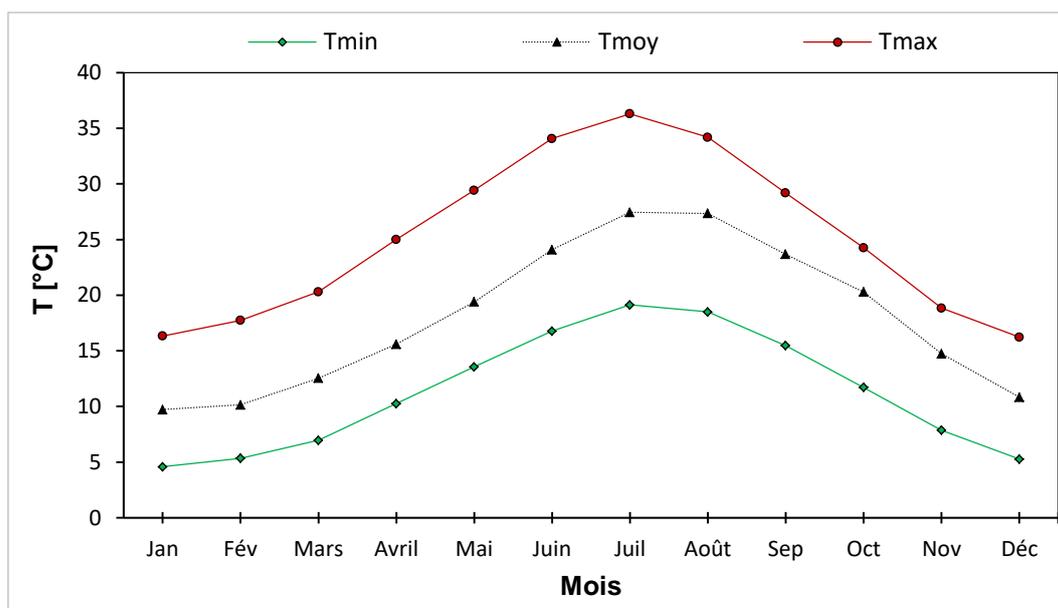


Fig. II.7- Courbes des moyennes mensuelles de températures enregistrées à la station de Guelma (1987-2017).

De même, on remarque que l'écart des températures minimum et maximum moyennes par mois enregistré à la station de Guelma (7,8 à 12,2 °C), est relativement plus élevé que la station d'Annaba (6,5 à 8 °C). Alors que l'amplitude thermique entre les valeurs moyenne et celles minimales et maximales varie de 4 à 10°C à la station de Guelma et de 4 à 6 °C pour la station d'Annaba le long de l'année (figure II.7 et II.8).

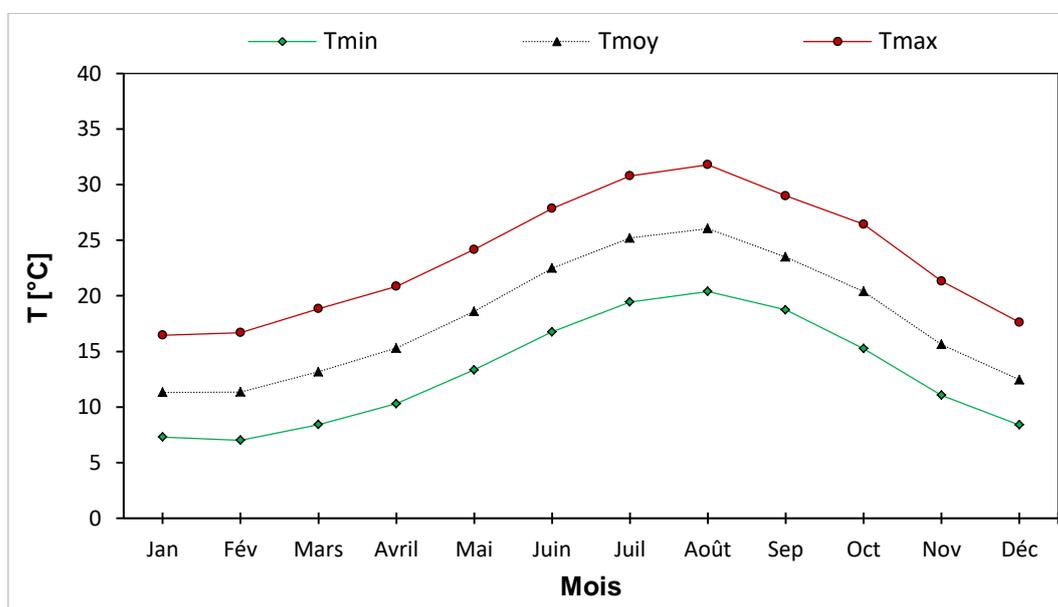


Fig. II.8- Courbes des moyennes mensuelles de températures enregistrées à la station d'Annaba (1989-2017).

II-2.3 Diagramme ombro-thermique de Gausсен :

Le diagramme ombro-thermique de Gausсен a été établi, en se basant sur les moyennes mensuelles interannuelles des précipitations et des températures enregistrées au niveau des deux stations météorologiques (Belkhir de Guelma et les salines d'Annaba). Les résultats montrent l'existence de deux périodes bien distinctes ; une période sèche où les précipitations sont inférieures ou égales aux doubles des températures du mois considéré, généralement cette période est courte et l'autre humide ($P > 2 * T$) qui peut durer huit mois par an au niveau de la zone d'étude.

La période sèche à la station de Guelma débute de la fin de la première semaine du mois de Mai jusqu'à la troisième semaine du mois de Septembre, elle est exactement de 4 mois et 12 jours (07Mai - 19Septembre). Cependant, la période humide plus longue que la précédente et dure presque huit mois (figure II.9).

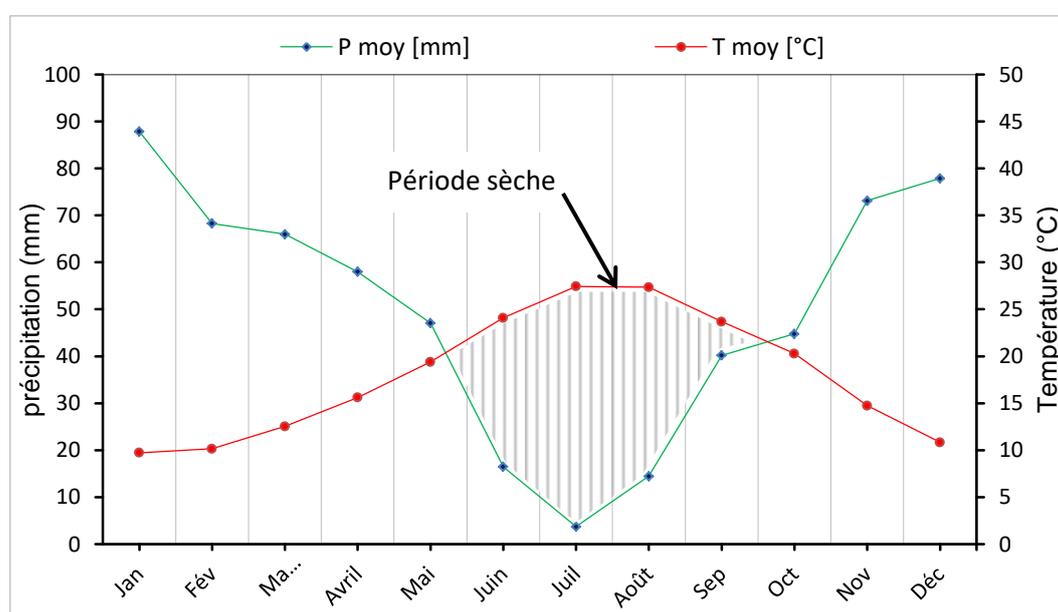


Fig. II.9- Diagramme ombro-thermique de la station de Guelma (1987-2017).

L'analyse du diagramme ombro-thermique de Gausсен pour la station d'Annaba nous a conduit à distinguer deux différentes périodes ; une sèche dont la durée varie du 26 Avril jusqu'au 09 Septembre et l'autre humide s'étend du la fin de la première jusqu'au son début, qui peut durer environ de 30 semaines (figure II.10).

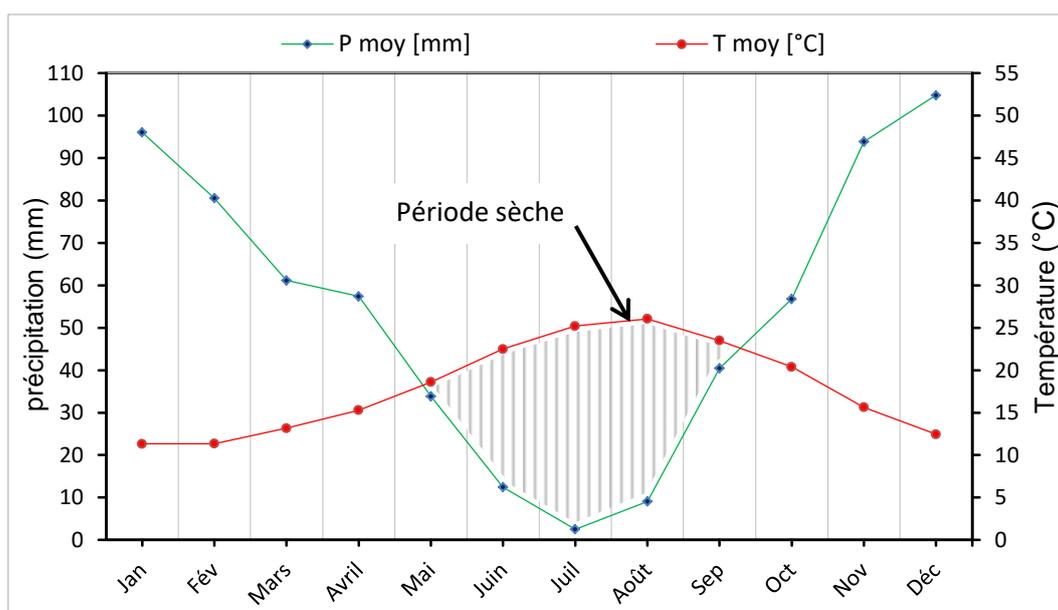


Fig. II.10- Diagramme ombro-thermique de la station de Annaba (1989-2017).

II-2.4 Humidité relative de l'air :

Les répartitions mensuelles de l'humidité relative ont été obtenues sur la base des mesures enregistrées aux stations météorologiques de Guelma sur la période de 1987 à 2017 et d'Annaba de 1989 à 2017.

L'humidité moyenne mensuelle observée à la station de Guelma est de 68,9 %. Le maximum est enregistré au mois de Janvier avec une moyenne interannuelle de 77,1 %, alors que la valeur minimale est de 55,2 % au mois de Juillet. L'humidité relative de l'air est relativement faible en période chaude et relativement élevée en période froide (figure II.11).

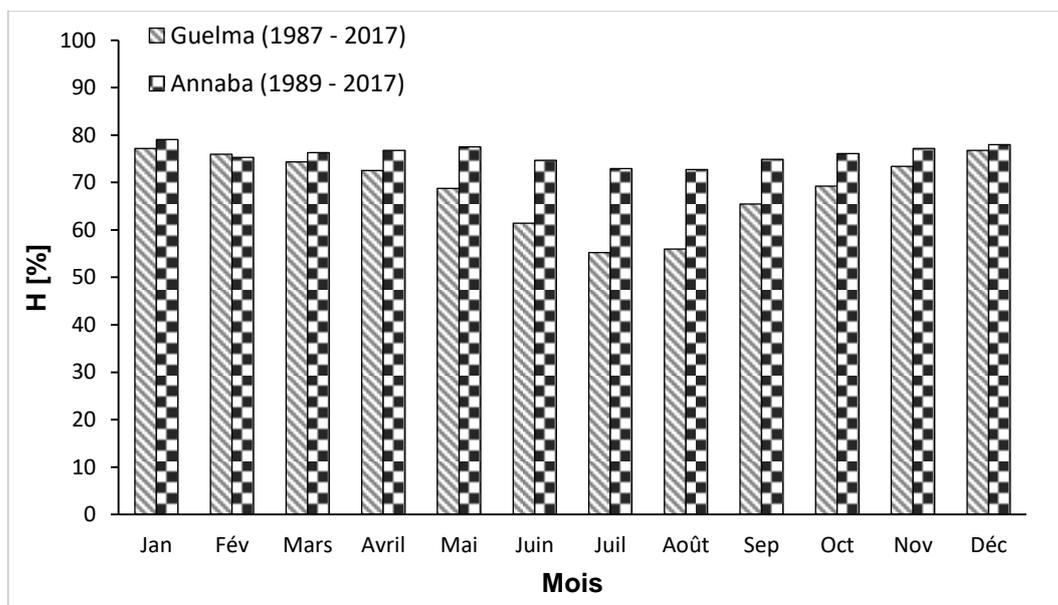


Fig. II.11- Répartition mensuelle de l'humidité relative de l'air aux stations de Guelma et d'Annaba.

La station d'Annaba avec sa proximité de la mer, enregistre une humidité relative varie de 72,7 à 79 % avec une moyenne mensuelle relativement forte de 75,9 %. Elle est quasiment invariable le long de l'année (figure II.11).

II-2.5 Vent :

Le vent est un facteur climatique caractérisé par sa direction, sa fréquence et sa vitesse, joue un rôle très important dans les processus de l'évaporation de l'eau et la transpiration des végétaux.

Cette étude est basée essentiellement sur de mesures réelles enregistrées aux niveaux des deux stations météorologiques (Guelma et Annaba) concernant la vitesse, la direction et la fréquence des vents au cours de l'année. La répartition mensuelle interannuelle de la vitesse moyenne du vent est représentée dans le tableau II.6.

La vitesse moyenne mensuelle du vent à la station de Guelma est faible, elle est de l'ordre de 1,8 m/s. Alors que, au niveau de la station d'Annaba elle est considérée comme valeur modérée avec une moyenne de 3,6 m/s. Les vitesses varient modérément de 1,5 à 2 m/s dans la station de Guelma, et entre 3,3 et 4,1 m/s à celle d'Annaba (tableau II.6).

Tab. II.6- Répartition mensuelle des vitesses du vent aux stations de Guelma (1987-2017) et d'Annaba (1989-2017).

Station \ Mois		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Guelma	V [m/s]	1,60	1,81	1,92	2,01	1,80	1,91	1,95	1,78	1,81	1,50	1,68	1,78
	V _{moy} [m/s]	1,79											
Annaba	V [m/s]	3,68	3,66	3,52	3,83	3,36	3,81	4,07	3,61	3,59	3,34	3,27	3,56
	V _{moy} [m/s]	3,61											

Généralement en période hivernale d'Octobre à Mars, les vents violents se manifestent avec la direction Nord et Nord-Ouest, et durant la période estivale de Mai à Septembre, les vents changent de direction souvent vers le Nord-Est. Les directions Nord et Nord-Ouest à la station de Guelma, possèdent les plus importantes fréquences, soit respectivement 12 et 8,5 % (figure II.12).

Le Sirocco, c'est un vent sec et très chaud venant du Sud (Sahara) passant par l'Atlas tellien, souffle généralement vers le Nord (littorale). Ce type de vent est beaucoup plus important pouvant provoquer un dessèchement accéléré du couvert végétal.

Le Sirocco dans les deux stations étudiées, souffle à une vitesse plus souvent variable d'une classe moyenne à forte avec une fréquence maximale enregistrée au trimestre le plus chaud (Juin, Juillet et Août). Il souffle d'environ 17 jours par an.

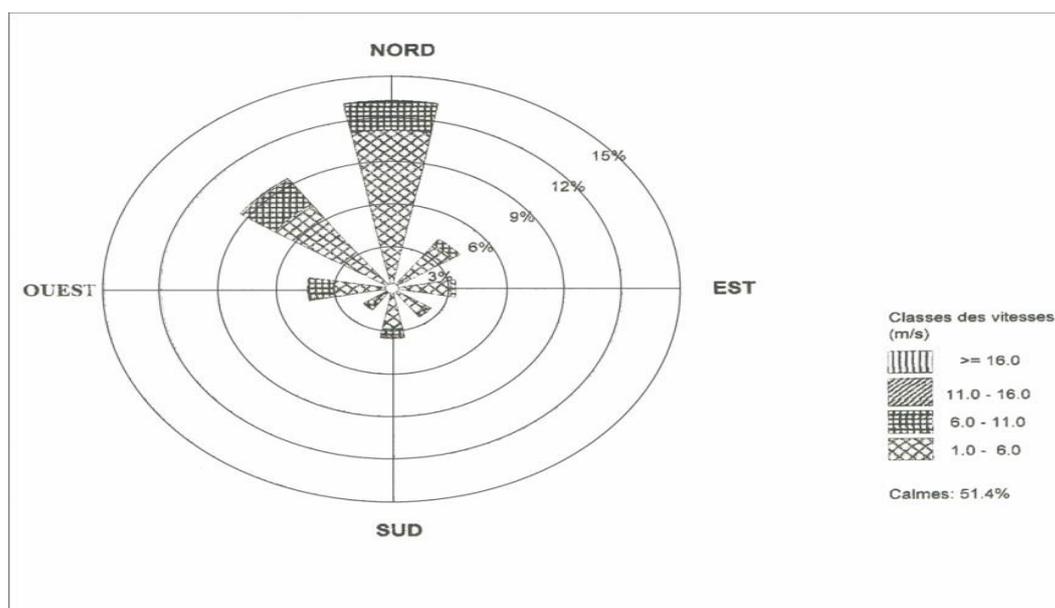


Fig. II.12- Rose des vents à la station de Guelma (2004-2013), source ONM.

II-2.6 Indice d'aridité de DE-MARTONNE (1926):

Cet indice climatique reflète le degré d'aridité d'une région donnée. L'estimation de cet indice est basée essentiellement sur les mesures de la pluviométrie et de la température, DE-MARTONNE établit deux indices d'aridités ; un annuel qui repose sur les moyennes annuelles des précipitations et des températures et l'autre mensuel basé sur les mesures moyennes mensuelles.

a. Indice d'aridité annuel :

L'indice d'aridité annuel de DE-MARTONNE est obtenu à partir de la relation suivante (Eq. II.1) :

$$A = \frac{P}{T+10} \quad \dots \text{Eq. II.1}$$

Dans laquelle :

A : Indice d'aridité annuel de DE-MARTONNE ;

P : Précipitation moyenne annuelle [mm] ;

T : Température moyenne annuelle [°C].

Lorsque l'indice d'aridité est plus faible, le climat tend vers l'aridité ; Un indice d'aridité inférieur à 5 correspond à un climat hyper-aride. Pour un indice de 5 à 10, le climat est désertique à steppique (climat aride) et un indice compris entre 10 et 20 représente un climat semi-aride. Un indice de DE-MARTONNE entre 20 et 30 indique un climat suffisamment tempéré. L'écoulement est abondant si l'indice d'aridité dépasse la valeur 30.

La combinaison des valeurs moyennes annuelles des précipitations avec celles des températures enregistrées aux stations météorologiques de Belkhir (Guelma) et les Salines d'Annaba montre un climat tempéré pour les deux stations où la station d'Annaba est plus tempérée que celle de Guelma (tableau II.7).

Tab. II.7- Indice d'aridité annuel de DE-MARTONNE aux stations de Guelma d'Annaba.

Station	Précipitation [mm]	Température [°C]	Indice d'aridité annuel	Type de climat
Guelma	597,8	18,01	21,34	tempéré
Annaba	648,9	17,95	23,22	tempéré

b. Indice d'aridité mensuel :

Cet indice mensuel est exprimé par la formule suivante (Eq. II.2) :

$$a = \frac{12 \cdot p}{t + 10} \quad \dots \text{Eq. II.2}$$

Où :

a : Indice d'aridité mensuel de DE-MARTONNE ;

p : Précipitation moyenne mensuelle [mm] ;

t : Température moyenne mensuelle [°C].

La figure II.13 montre l'évolution des degrés d'aridité le long des douze mois de l'année sur la base de l'indice de DE-MARTONNE ; les trois mois (de Juin à Août) possèdent un climat hyper-aride pour l'ensemble des deux stations (le mois de Juin à la station de Guelma se trouve à la frontière de l'hyper aridité). Les mois de Mai, Septembre et Octobre sont marqués par un climat semi-aride et le mois d'Avril considéré comme un mois tempéré. Mars et Novembre se caractérisent par un écoulement exoréique, et le reste des mois de l'année (Janvier, Février et Décembre) indiquent un écoulement abondant.

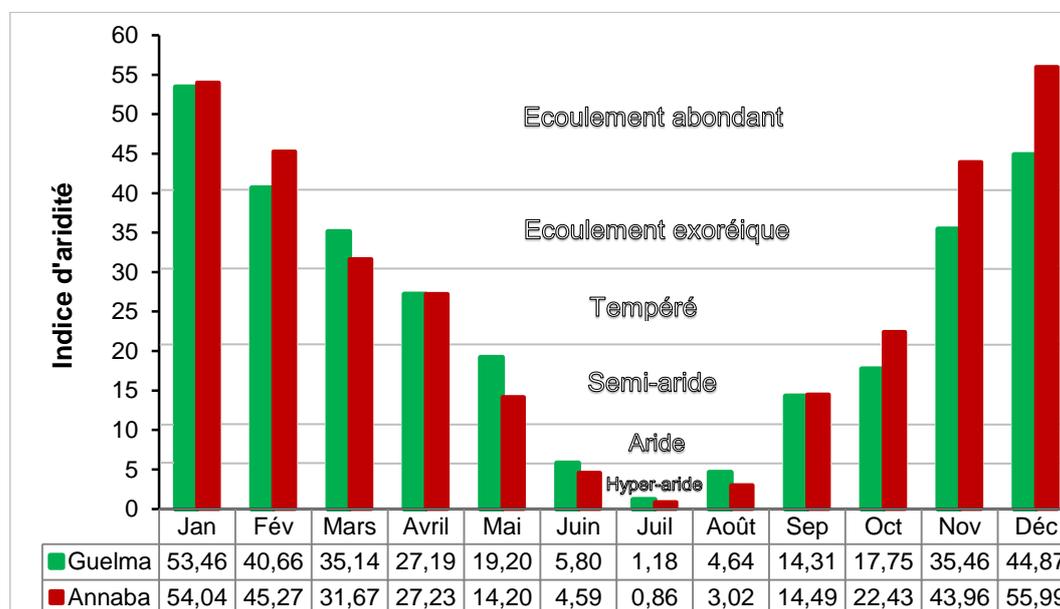


Fig. II.13- Degré d'aridité mensuel selon DE-MARTONNE.

II-2.7 Etages bioclimatiques :

Le régime climatique de la zone à l'étude est à dominance méditerranéenne avec un été sec et chaud et un hiver humide et frais. Les étages bioclimatiques sont identifiés sur la base de la carte simplifiée des domaines bioclimatiques établie par COTE en 1998 pour le Nord-Est algérien (figure II.14).

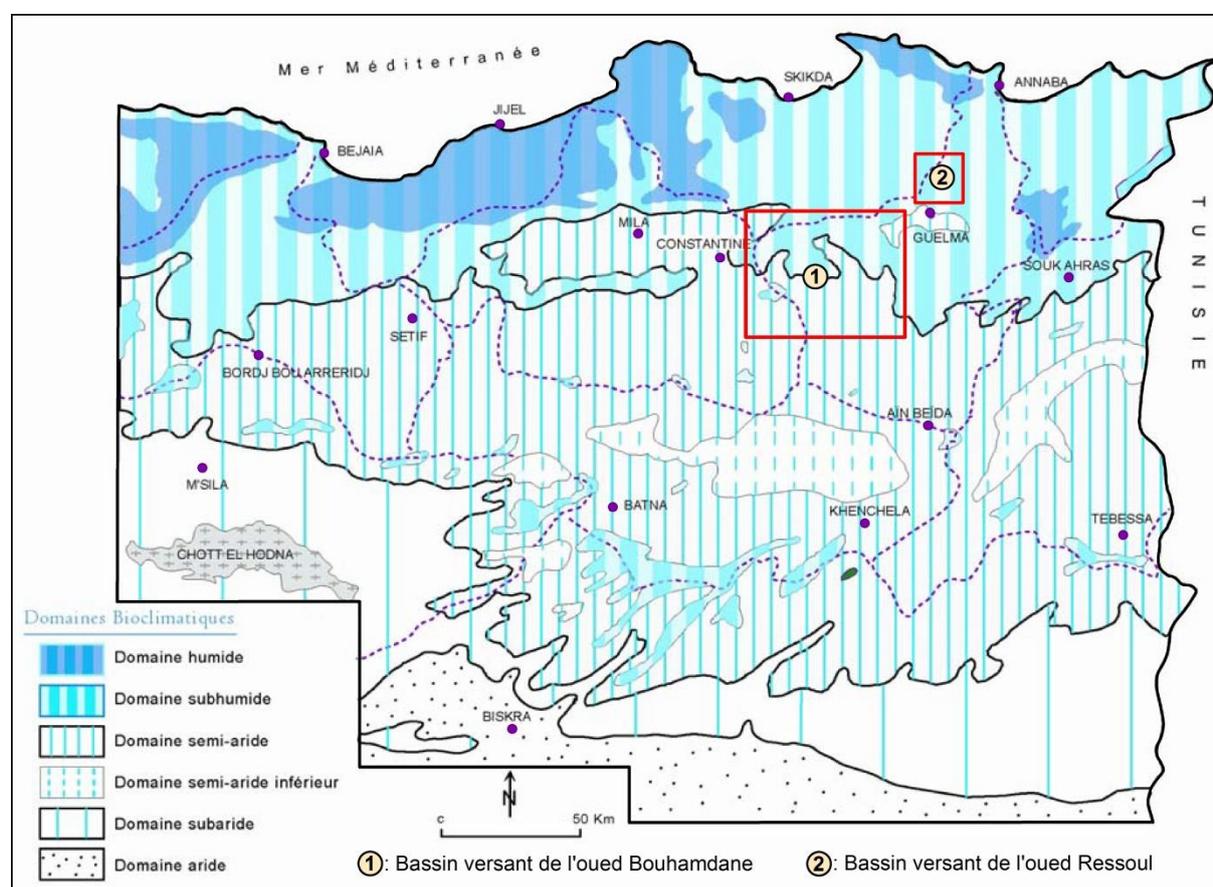


Fig. II.14- Carte simplifiée des domaines bioclimatiques du Nord-Est de l'Algérie, d'après COTE 1998.

Sur son ensemble le bassin versant de l'oued Bouhamdane (1) englobe deux domaines bioclimatiques ; une partie Sud à tendance semi-aride qui reçoit des précipitations relativement faibles et une partie Nord appartient au domaine sub-humide où les précipitations moyennes sont abondantes et dépassent les 700 mm/an. Alors que le bassin versant de l'oued Ressoul (2) appartient à l'étage bioclimatique sub-humide doux à frais sur sa totalité (figure II.14).

II-2.8 Indice d'EMBERGER (1955) :

Le quotient pluviothermique d'EMBERGER est un indice purement climatique, il tient compte de la pluviométrie moyenne annuelle, ainsi que les températures moyenne minimum du mois le plus froid et maximale du mois le plus chaud. Cet indice permet de classer les étages bioclimatiques d'une région donnée. L'indice climatique d'EMBERGER est beaucoup plus utilisé dans le territoire méditerranéen, il est calculé à l'aide de la formule suivante (Eq. II.3) :

$$Q = \frac{2000 * P}{(M+m+546,3)*(M-m)} \quad \dots \text{Eq. II.3}$$

Avec :

Q : Quotient pluviothermique d'EMBERGER ;

P : Précipitation moyenne annuelle [mm] ;

M : Température moyenne maximum du mois le plus chaud [°C] ;

m : Température moyenne minimum du mois le plus froid [°C].

Le quotient d'EMBERGER vaut presque 116 dans la station de Guelma et 151 à celle d'Annaba ; Ce qui permet de placer les deux stations météorologiques dans le domaine sub-humide avec saison hivernale relativement chaude (figure II.15).

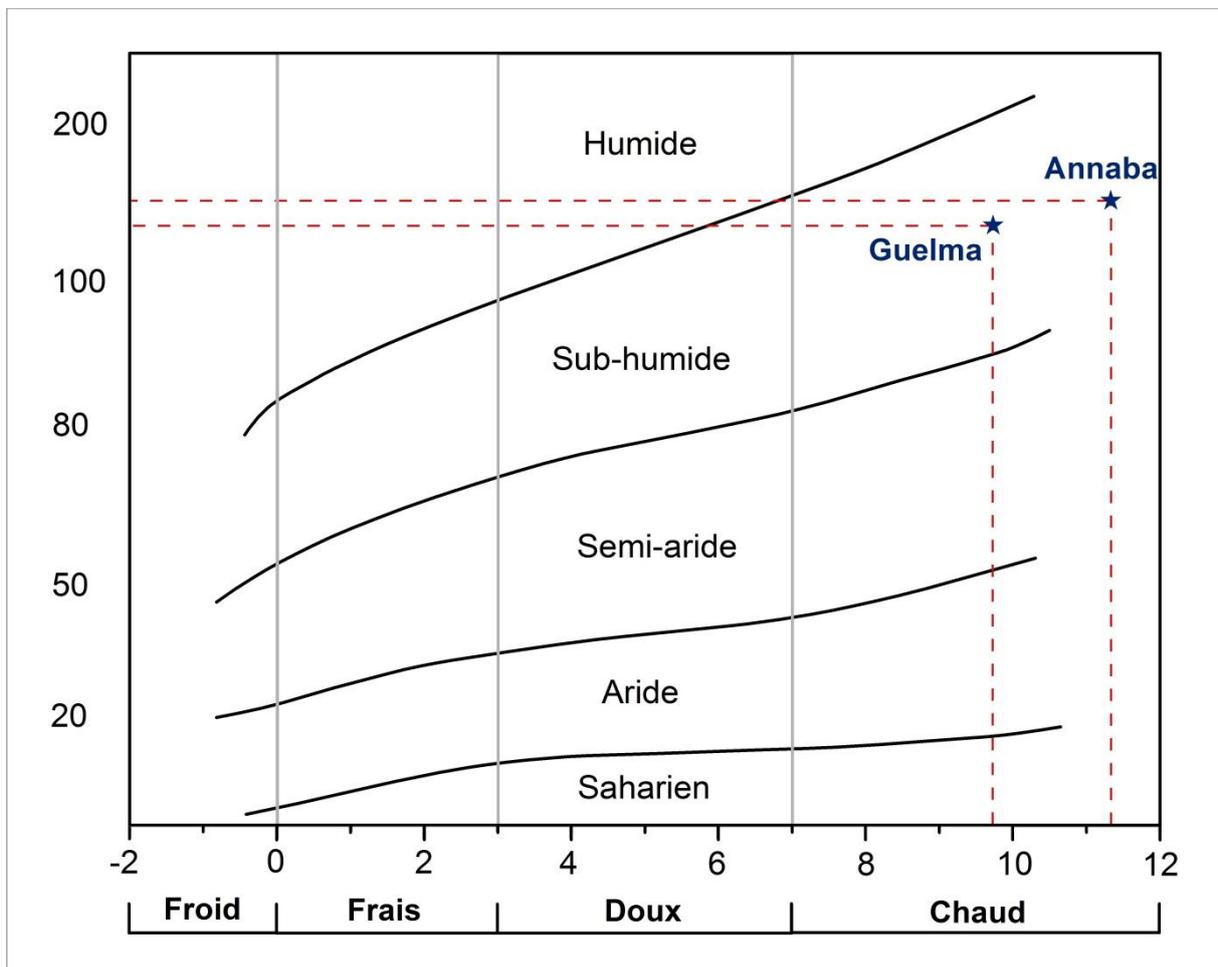


Fig. II.15- Climagramme pluviothermique d'EMBERGER.

II-3 Bilan hydrologique

La disponibilité en eau superficielle et/ou souterraine est relativement liée au fonctionnement du bilan hydrologique, la connaissance de ce dernier s'appuie sur l'analyse de toutes ces composantes : précipitation, température, évapotranspiration (potentielle et réelle), ruissellement, infiltration ainsi que le régime d'écoulement.

Le bilan hydrique est l'élément le plus important dans les études hydrologiques et hydrogéologiques, il est basé notamment sur les valeurs de l'évapotranspiration potentielle. L'établissement de ce bilan d'eau est fonction de plusieurs facteurs climatiques ; dont la pluviométrie et la température sont indispensables.

L'application de la méthode de THORNTHWAITE (1948) dans l'estimation des bilans mensuel et annuel nous a permis de ressortir les principales composantes du bilan à savoir ; l'évapotranspiration potentielle et réelle, l'infiltration et le ruissellement. Cette méthode tient compte de la précipitation et de la température moyenne mensuelle. Elle donne des meilleurs résultats (proche de la réalité) dans les régions humides à climat tempéré. Elle est valable si la température moyenne ne dépasse pas 38 °C.

Le bilan d'eau simplifié de THORNTHWAITE s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- ✚ La satisfaction de l'évapotranspiration réelle (ETR), et la complétion de la réserve facilement utilisable (RFU) sont également prioritaires sur le ruissellement ;
- ✚ Un seuil de 100 mm a été sélectionné comme tranche maximale de saturation de la RFU, après cette valeur du réserve l'écoulement sera déclenché ;
- ✚ Dans le cas où l'évapotranspiration potentielle (ETP) dépasse la pluviométrie moyenne (P), la quantité d'eau emmagasinée dans le sol s'évapore dans l'atmosphère sous forme de vapeur et ce par l'intermédiaire des végétations.

La méthode de THORNTHWAITE a été appliquée dans notre zone d'étude à l'échelle mensuelle et aussi annuelle, en se basant sur les mesures des précipitations et des températures enregistrées aux stations météorologiques de Belkhir (Guelma) et les salines (Annaba) respectivement durant les périodes 1987-2017 et 1989-2017.

II-3.1 Evapotranspiration :

L'évapo-transpiration est définie aisément comme la quantité d'eau sujette à la perte par évaporation sous l'influence de nombreux facteurs climatiques, parmi eux on cite: température de l'aire, durée d'insolation, humidité du sol, vitesse du vent,... Ce qui se traduit par un dégagement d'eau dans l'atmosphère sous forme de vapeur. Elle englobe deux processus ; l'évaporation direct à partir des surfaces libres d'eau (processus physique) et l'évaporation indirect "transpiration" par l'intermédiaire des plantes (processus physiologique). Ces évaporations jouent un rôle capital dans les calculs des régimes du bilan hydrique.

a. Evapotranspiration potentielle (ETP) :

Ce type d'évapotranspiration est estimé à l'aide de la formule simplifiée de THORNTHWAITE (1948), qui tient compte de la température moyenne de l'aire et de la position géographique de la station de mesure. Cette formule s'écrit de la manière suivante (Eq. II.4) :

$$ETP_{NC} = 16 * \left(\frac{10*T}{I}\right)^a \quad \dots \text{Eq. II.4}$$

Avec :

ETP_{NC} : Evapotranspiration potentielle mensuelle non corrigée [mm] ;

T : Température moyenne mensuelle de l'air [°C] ;

I : Indice thermique annuel, donné par (Eq. II.5) :

$$I = \sum_{m=1}^{12} i_m \quad \dots \text{Eq. II.5}$$

D'où :

$$i_m = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad \dots \text{Eq. II.6}$$

i_m : Indice thermique mensuel ;

a : Exposant, donné par la relation polynomiale suivante (Eq. II.7) :

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,792 * 10^{-2} * I + 0,49239 \quad \dots \text{Eq. II.7}$$

L'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (ETP_C) est obtenue par la relation suivante (Eq. II.8) :

$$ETP_C = ETP_{NC} * k \quad \dots \text{Eq. II.8}$$

Dans laquelle :

k : Coefficient correctif dépendant de la latitude, il est donné par la formule suivante (Eq. II.9) :

$$k = \frac{N*D}{3600} \quad \dots \text{Eq. II.9}$$

D : Durée moyenne mensuelle d'insolation mesurée exprimée par [h/J] ;

N : Nombre de jours dans le mois considéré.

Les valeurs obtenues du facteur correctif sont présentées au tableau II.8.

Tab. II.8- Variation des facteurs de corrections 'K' aux stations météorologiques de Guelma d'Annaba.

Station	Paramètre	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Guelma	D [h/J]	10,06	10,92	12,02	13,18	14,15	14,65	14,41	13,57	12,46	11,29	10,30	9,77
	$N * D$ [h/mois]	311,7	305,6	372,8	395,4	438,7	439,5	446,7	420,6	373,8	350,1	309,0	303,0
	K	0,866	0,849	1,035	1,098	1,219	1,221	1,241	1,168	1,038	0,973	0,858	0,842
Annaba	D [h/J]	10,01	10,90	12,02	13,20	14,20	14,70	14,46	13,60	12,46	11,29	10,25	9,72
	$N * D$ [h/mois]	310,2	305,2	372,7	395,9	440,3	441,0	448,2	421,5	373,8	350,1	307,5	301,5
	K	0,862	0,848	1,035	1,100	1,223	1,225	1,245	1,171	1,038	0,973	0,854	0,837

La formule proposée par THORNTHWAITE est applicable pour une température moyenne mensuelle de l'aire inférieure à 26,5 °C. Dans le cas où la température moyenne de l'aire dépasse ou égale 26,5 °C ; les valeurs de l'évapotranspiration potentielle non corrigée seront tirées directement à partir d'une table de correspondance (tableau II.9).

Tab. II.9- Evapotranspiration potentielle non corrigée en fonction de la température moyenne.

T [°C]	ETP _{NC} [mm]						
26,5	135	29,5	158,9	32,5	175,3	35,5	183,7
27	139,5	30	162,1	33	177,2	36	184,3
27,5	143,7	30,5	165,2	33,5	179	36,5	184,7
28	147,8	31	168	34	180,5	37	184,9
28,5	151,7	31,5	170,7	34,5	181,8	37,5	185
29	155,4	32	173,1	35	182,9	38	185

b. Evapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle (ETR) est souvent estimée à partir de la comparaison des valeurs de l'ETP déjà obtenues par la formule de THORNTHWAITE avec celles des précipitations mesurées dans les deux stations météorologiques. On distingue deux cas :

➤ Dans le cas où la précipitation est supérieur à l'évapotranspiration potentielle (P>ETP) ; l'évapotranspiration réelle sera égale à l'évapotranspiration potentielle (ETR=ETP), et la tranche d'eau restante entre la lame d'eau précipitée et l'ETP représente un excédent qui est stockée dans le sol en premier lieu jusqu'à la saturation de la RFU (100 mm au maximum) et puis à l'écoulement superficiel et l'alimentation de la nappe profonde.

➤ Dans le cas où la précipitation est inférieure à l'évapotranspiration potentielle (P<ETP) ; l'évapotranspiration réelle sera égale à toute la quantité d'eau précipitée plus toute ou une partie de la réserve facilement utilisable jusqu'à la vider totalement. Lorsque la RFU est entièrement épuisée ; le déficit agricole (Da) représente la différence entre l'évapotranspiration potentielle et réelle (ETP-ETR), cette tranche d'eau qu'il faudrait apporter aux végétations pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse (MEBARKI 2005).

II-3.2 Ruissellement (R) :

La lame d'eau ruisselée est obtenue par l'application de la relation empirique de TIXERONT-BERKALOFF. Cette relation fait intervenir la précipitation moyenne annuelle et l'évapotranspiration potentielle, dont l'expression est la suivante (Eq. II.10) :

$$R = \frac{P^3}{3*(ETP)^2} \quad \dots \text{Eq. II.10}$$

Avec :

R : Lamme d'eau ruisselée [mm] ;

P : Précipitation moyenne annuelle [mm] ;

ETP : Evapotranspiration potentielle annuelle [mm].

II-3.3 Interprétation des résultats du bilan hydrique :

Selon les résultats des bilans hydriques obtenus par l'application de la méthode de THORNTHWAITE (tableaux II.10 et II.11 plus figures II.16 et II.17), on déduit les points suivants :

- ✚ Sur la zone étudiée, l'évapotranspiration réelle est relativement élevée. Elle est (en moyenne) de l'ordre de 446 mm à la station de Guelma et de l'ordre de 460 mm pour la station d'Annaba soit respectivement 74,62 et 70,92 % des précipitations totales, avec un maximum marqué au mois de Mai.
- ✚ La recharge de l'RFU débute du mois de Novembre jusqu'à la fin du mois d'Avril, elle atteint son maximum (pris égale à 100 mm) entre Décembre et Janvier. Cette réserve d'eau devient nulle à partir du mois de Juin.

Tab. II.10- Bilan hydrique de la station de Belkhir (Guelma) selon la méthode de THORNTHWAITE.

Mois	T [°C]	i	ETP_{NC} [mm]	K	ETP_C [mm]	P [mm]	$C.HUM$	$Var.R$ [mm]	RFU [mm]	ETR [mm]	DEF [mm]	EXC [mm]
Sep	23,68	10,54	108,32	1,038	112,47	40,18	- 0,64	0	0	40,18	72,29	0
Oct	20,29	8,34	80,51	0,973	78,29	44,79	- 0,43	0	0	44,79	33,50	0
Nov	14,74	5,14	43,64	0,858	37,45	73,13	0,95	35,67	35,67	37,45	0	0
Déc	10,84	3,23	24,18	0,842	20,35	77,91	2,83	57,56	93,23	20,35	0	0
Jan	9,72	2,74	19,62	0,866	16,99	87,85	4,17	6,77	100	16,99	0	64,09
Fév	10,15	2,92	21,32	0,849	18,10	68,27	2,77	0	100	18,10	0	50,16
Mars	12,54	4,02	31,98	1,035	33,11	66,01	0,99	0	100	33,11	0	32,89
Avril	15,60	5,60	48,63	1,098	53,41	58,01	0,09	0	100	53,41	0	4,59
Mai	19,41	7,79	73,93	1,219	90,09	47,06	- 0,48	- 43,03	56,97	90,09	0	0
Juin	24,09	10,81	111,90	1,221	136,61	16,47	- 0,88	- 56,97	0	73,44	63,17	0
Juil	27,44	13,17	143,23	1,241	177,71	3,69	- 0,98	0	0	3,69	174,02	0
Août	27,35	13,10	142,42	1,168	166,38	14,45	- 0,91	0	0	14,45	151,93	0
Ann.	18,01	87,39	-	-	940,98	597,81	-			446,06	494,91	151,74

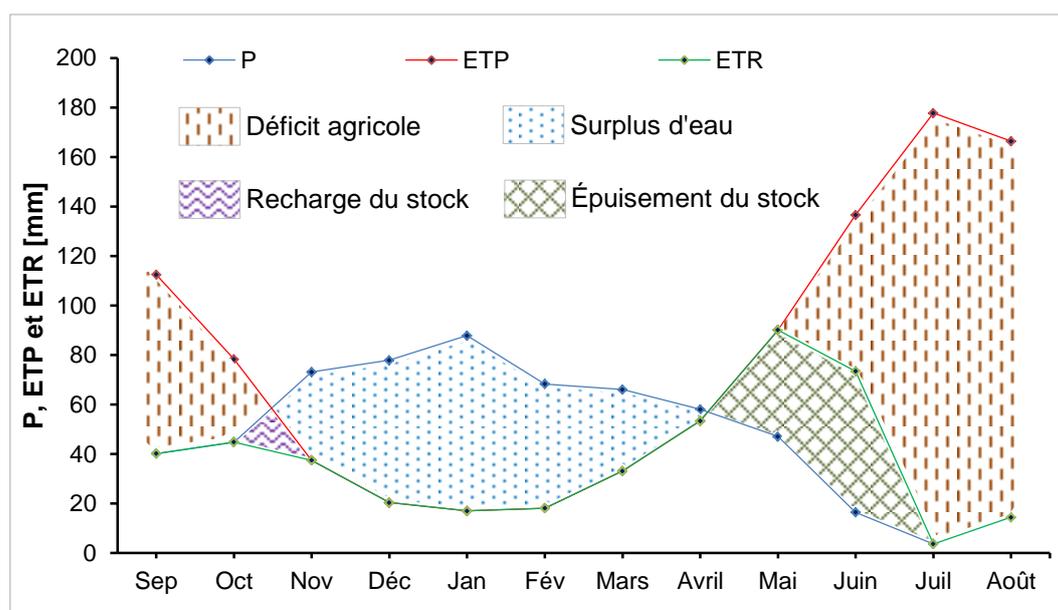


Fig. II.16- Représentation graphique de la variation temporelle du bilan hydrique au cours de l'année, à la station de Guelma.

- ✚ La période déficitaire où l'évapotranspiration potentielle dépasse nettement la quantité d'eau précipitée touche 5 mois de l'année, de Juin à Octobre. Avec un manque d'eau maximale observé en Juillet de l'ordre de 170 mm à la station de Guelma et d'environ 150 mm à celle d'Annaba.
- ✚ Le bilan hydrique est parfaitement excédentaire durant 4 des 12 mois de l'année (de Janvier à Avril) à la station de Guelma et de 5 mois (de Décembre à Avril) à la station d'Annaba. Avec seulement 151,74 mm/an pour la station de Guelma et 188,69 mm/an pour la station d'Annaba, ces valeurs ne représentent que 25,38 % et 29,08 % de la précipitation annuelle respectivement.

En outre, la lame d'eau écoulee a été estimée à 80,43 mm pour la station de Guelma, alors qu'à la station d'Annaba elle est de l'ordre de 111,14 mm. Ce qui donne un volume ruisselé d'environ 89 Hm³/an sur le bassin versant de l'oued Bouhamdane, et la station d'Ain Berda qui se trouve à l'exutoire du bassin versant de l'oued Ressoul reçoit annuellement un apport moyen de l'ordre de 11,5 Hm³.

Tab. II.11- Bilan hydrique de la station les salines (Annaba) selon la méthode de THORNTHWAITE.

Mois	T [°C]	i	ETP _{NC} [mm]	K	ETP _C [mm]	P [mm]	C.HUM	Var. R [mm]	RFU [mm]	ETR [mm]	DEF [mm]	EXC [mm]
Sep	23,50	10,41	107,09	1,038	111,20	40,45	- 0,64	0	0	40,45	70,75	0
Oct	20,39	8,40	81,92	0,973	79,67	56,81	- 0,29	0	0	56,81	22,86	0
Nov	15,62	5,61	49,54	0,854	42,31	93,86	1,22	51,55	51,55	42,31	0	0
Déc	12,46	3,98	32,31	0,837	27,06	104,79	2,87	48,45	100	27,06	0	29
Jan	11,32	3,45	26,98	0,862	23,24	96,02	3,13	0,00	100	23,24	0	72,78
Fév	11,35	3,46	27,08	0,848	22,96	80,53	2,51	0	100	22,96	0	57,57
Mars	13,17	4,33	35,89	1,035	37,15	61,15	0,65	0	100	37,15	0	24,00
Avril	15,30	5,44	47,60	1,100	52,34	57,40	0,10	0	100	52,34	0	5,06
Mai	18,60	7,31	68,88	1,223	84,24	33,84	- 0,60	- 50,40	49,60	84,24	0	0
Juin	22,49	9,74	98,54	1,225	120,70	12,44	- 0,90	- 49,60	0	62,04	58,66	0
Juil	25,20	11,57	122,18	1,245	152,11	2,52	- 0,98	0	0	2,52	149,59	0
Août	26,05	12,17	130,05	1,171	152,24	9,06	- 0,94	0	0	9,06	143,18	0
Ann.	17,95	85,87	-	-	905,23	648,88	-			460,19	445,04	188,69

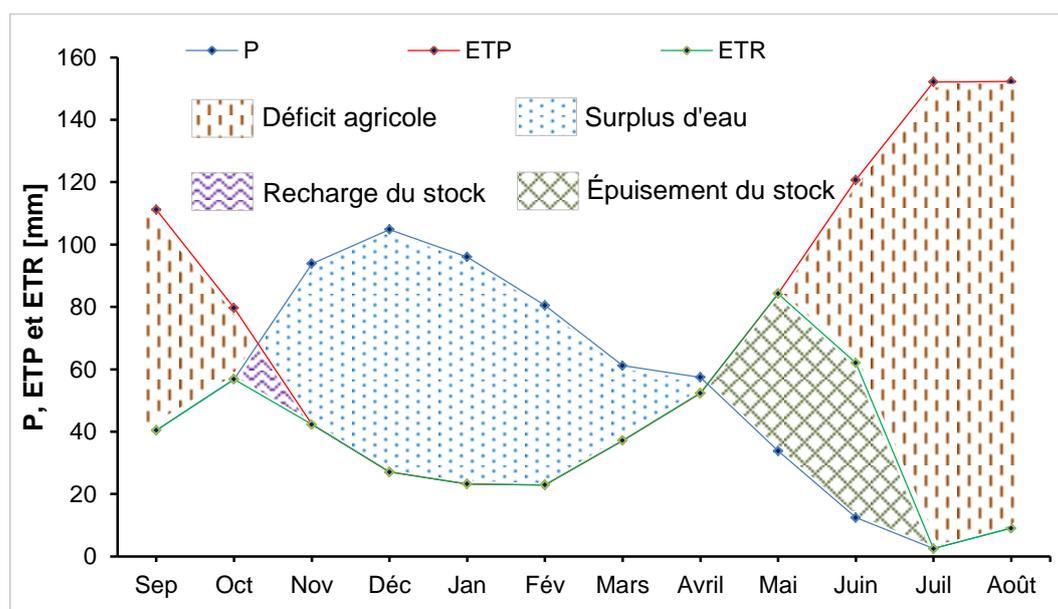


Fig. II.17- Représentation graphique de la variation temporelle du bilan hydrique au cours de l'année, à la station d'Annaba.

II-4 Régime d'écoulement aux stations hydrométriques :

Afin d'avoir une vue sur le régime d'écoulement des cours d'eau dans cette étude, deux stations hydrométriques ont été sélectionnées; la station de Medjez Amar II qui se trouve à l'exutoire du bassin versant de l'oued Bouhamdane (1105 km²) et celle de Ain Berda qui reçoit toute les eaux provenant du bassin versant de l'oued Ressoul (103 km²). Des séries de mesures de longue durée d'observation ont été fournies par le service hydrologique de l'ANRH, ces données présentent les débits moyens journaliers et les mesures instantanées pour les crues. Les différentes caractéristiques des stations hydrométriques utilisées dans la cette étude sont mentionnées au tableau II.12 :

Tab. II.12- Caractéristiques des stations hydrométriques utilisées.

Nom de la station		Medjez Amar II	Ain Berda
Code - ANRH		140301	140602
Coordonnées géographiques	Longitude	07°18'38" E	07°36'13" E
	Latitude	36°26'34" N	36°40'55" N
Altitude [m]		260	72
Sur oued		Bouhamdane	Ressoul
Superficie contrôlée [km ²]		1105	103
Période d'observation		1968/69 – 1986/87	1964/65 – 2011/12

Notons que pour la période d'observation de la station de Medjez Amar II a été arrêtée en 1986/87, en raison de la mise en eau du barrage Hammam Debagh en Décembre 1988. Il est implanté à 5 km à l'amont de la station suscitée.

II-4.1 Variation mensuelle de l'écoulement :

La variation du régime d'écoulement d'un cours d'eau à l'échelle mensuelle est définie par son coefficient d'hydraulicité ($C_{h,m}$), qui représente le rapport entre le débit moyen mensuel du mois considéré au débit moyen interannuel obtenu après le traitement de la longue série d'observation. En effet, la période de hautes eaux se caractérise par une hydraulicité supérieure au seuil de référence (1), et contrairement pour la période de basses eaux le coefficient d'hydraulicité est inférieur à la valeur 1.

L'analyse de la répartition du coefficient d'hydraulicité mensuel le long de l'année, nous a permis de définir la période de Décembre à Avril comme étant une période de hautes eaux en raison de l'importance des précipitations tombées dans cette dernière (figure II.18). Les débits moyens mensuels durant cette période varient de 4,02 à 7,13 m³/s pour la station hydrométrique de Medjez Amar II, et entre 0,58 et 1,23 m³/s à la station de Ain Berda où Février est le mois le plus humide (tableau II.13, figures II.19 et II.20).

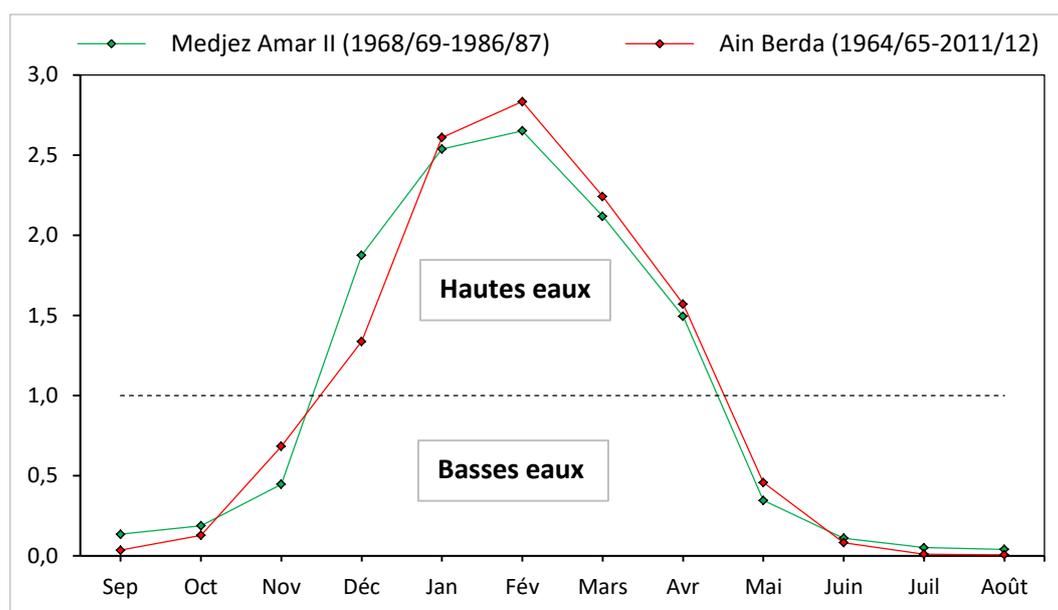


Fig. II.18- Représentation graphique des coefficients d'hydraulicité mensuels aux stations hydrométriques.

Pendant les sept mois restants le régime d'écoulement des oueds devient faible, notamment au mois d'Août (figure II.18). Durant cette période (basses eaux), les débits moyens mensuels sont compris entre 0,11 et 1,20 m³/s au niveau de la station de Medjez Amar II de l'oued Bouhamdane, et ne dépassent pas 0,30 m³/s à la station hydrométrique de Ain Berda de l'oued Ressoul (tableau II.13, figures II.19 et II.20).

Tab. II.13- Variation mensuelle de débits et de coefficients d'hydraulicité aux stations hydrométriques.

Mois \ Paramètre	Medjez Amar II			Ain Berda		
	Q _{moy} [m ³ /s]	A [Hm ³]	C _{h.m}	Q _{moy} [m ³ /s]	A [Hm ³]	C _{h.m}
Septembre	0,362	0,938	0,135	0,016	0,041	0,036
Octobre	0,505	1,352	0,188	0,056	0,150	0,128
Novembre	1,202	3,115	0,447	0,298	0,772	0,684
Décembre	5,042	13,504	1,876	0,583	1,561	1,338
Janvier	6,822	18,271	2,538	1,136	3,042	2,609
Février	7,125	17,489	<u>2,651</u>	1,234	3,012	<u>2,833</u>
Mars	5,695	15,255	2,119	0,976	2,615	2,242
Avril	4,016	10,409	1,494	0,684	1,773	1,571
Mai	0,934	2,501	0,347	0,199	0,534	0,458
Juin	0,298	0,773	0,111	0,036	0,093	0,083
Juillet	0,139	0,372	0,052	0,005	0,013	0,011
Août	0,111	0,298	<u>0,041</u>	0,003	0,008	<u>0,007</u>
moyenne	2,688	7,023	1,000	0,435	1,134	1,000

La station de Medjez Amar II reçoit un apport moyen mensuel de 7,023 Hm³, pour un minimum observé au cours du mois d'Août (0,298 Hm³) et un maximum de 18,271 Hm³ est enregistré au mois de Janvier (figure II.19). Alors que, l'apport moyen mensuel à la station

d'Ain Berda est de l'ordre de $1,134 \text{ Hm}^3$, la plus faible valeur est enregistrée au mois d'Août ($0,008 \text{ Hm}^3$) et la plus élevée au mois de Janvier soit $3,042 \text{ Hm}^3$ (figure II.20).

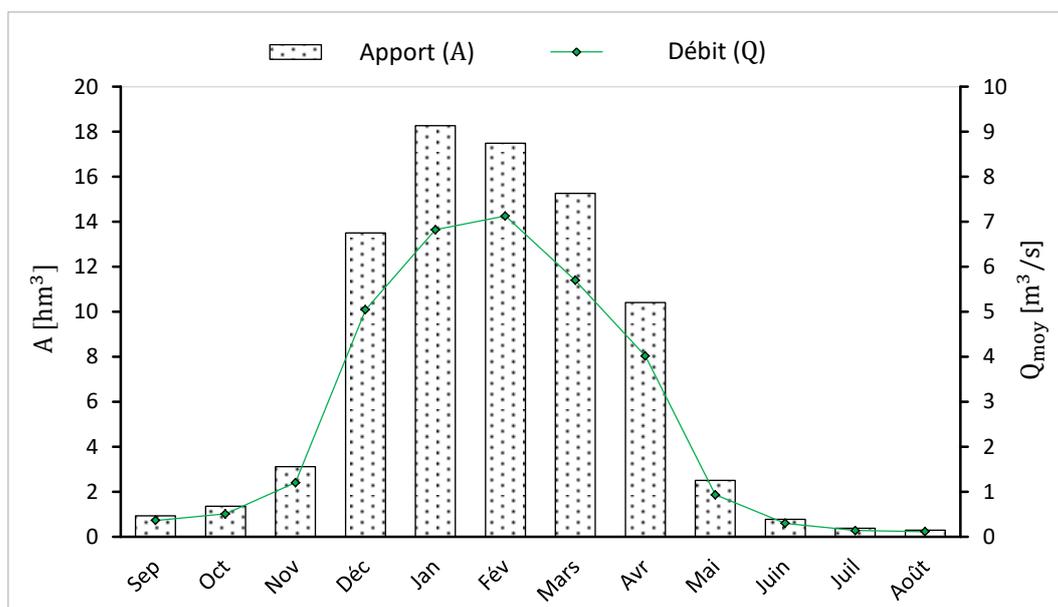


Fig. II.19- Apports et débits moyens mensuels à la station de Medjez Amar II (données calculées sur la période 1968/69 – 1986/87).

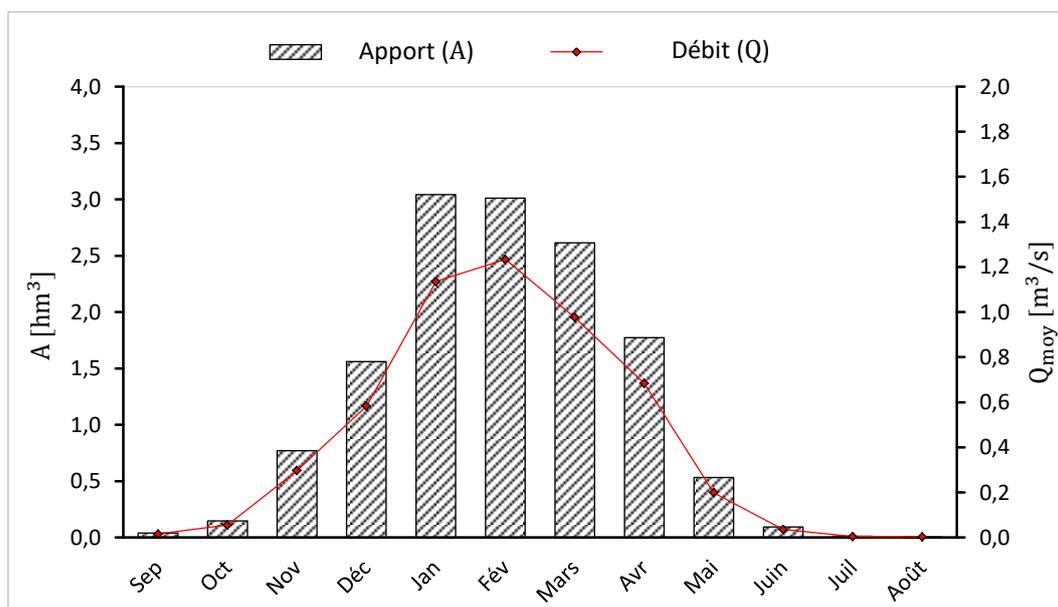


Fig. II.20- Apports et débits moyens mensuels à la station d'Ain Berda (données calculées sur la période 1964/65 – 2011/12).

II-4.2 Variation interannuelle de l'écoulement :

Le rythme d'écoulement est très variable d'une année à l'autre avec une importante amplitude de débit pour les deux stations hydrométriques; la station de Medjez Amar II reçoit annuellement 84,28 Hm³ d'apport liquide, pour un débit moyen de 2,69 m³/s et une surface contrôlée de 1105 km² (tableau II.14). Alors que le bassin versant de l'oued Ressoul débite à la station de Ain Berda 0,44 m³/s ce qui correspond à un apport moyen annuel de l'ordre de 13,61 Hm³, pour une aire drainée de 103 km² (tableau II.15).

Tab. II.14- Variation interannuelle des débits et des apports liquides à la station de Medjez Amar II (1968/1969 – 1986/1987).

Année	Q _{moy} [m ³ /s]	A [Hm ³]	C _{h.a}	1980/1981	3,135	98,249	1,166
1968/1969	0,228	7,174	<u>0,085</u>	1981/1982	2,018	63,103	0,751
1969/1970	3,335	106,035	1,241	1982/1983	1,915	60,724	0,713
1970/1971	1,898	58,430	0,706	1983/1984	5,967	183,465	2,220
1971/1972	3,858	122,305	1,436	1984/1985	8,443	269,698	<u>3,141</u>
1972/1973	6,080	193,242	2,262	1985/1986	0,705	22,131	0,262
1973/1974	0,413	12,904	0,154	1986/1987	6,158	189,192	2,291
1974/1975	0,521	15,788	0,194	Moyenne	2,688	84,277	1,000
1975/1976	1,135	35,646	0,422	Min.	0,228	7,174	0,085
1976/1977	1,651	51,743	0,614	Max.	8,443	269,698	3,141
1977/1978	0,971	29,283	0,361	σ_x	2,387	75,295	0,888
1978/1979	2,168	67,436	0,807	C _v	0,891		
1979/1980	0,465	14,710	0,173				

Les deux cours d'eau étudiés sont caractérisés par l'irrégularité de leurs débits, ce qui est confirmé par l'hydraulicité interannuelle de ces cours d'eau. L'analyse des résultats des coefficients d'hydraulicités annuels (C_{h.a}) obtenus sur la période 1968/1969 - 1986/1987 pour la station de Medjez Amar II et 1964/1965 - 2011/2012 pour celle de Ain Berda, ont permis de classer les deux années hydrologiques 1968/1969 et 1984/1985 respectivement comme étant la plus sèche et la plus humide à la station de Medjez Amar II. On peut aussi classer l'année hydrologique 2002/2003 comme la plus humide et 1987/1988 comme la plus sèche à la station d'Ain Berda (tableaux II.14 et II.15).

Tab. II.15- Variation interannuelle des débits et des apports liquides à la station d'Ain Berda (1964/1965 – 2011/2012).

Année	Q _{moy} [m ³ /s]	A [Hm ³]	C _{h.a}				
1964/65	0,628	19,295	1,442	1990/91	0,769	24,129	1,766
1965/66	0,071	2,271	0,164	1991/92	0,297	9,325	0,681
1966/67	0,131	4,053	0,300	1992/93	0,636	20,151	1,460
1967/68	0,871	27,704	2,000	1993/94	0,252	7,666	0,579
1968/69	0,105	3,332	0,242	1994/95	0,516	16,514	1,186
1969/70	0,585	18,518	1,343	1995/96	0,666	20,755	1,529
1970/71	0,386	11,695	0,887	1996/97	0,022	0,701	0,051
1971/72	0,444	14,070	1,019	1997/98	0,432	13,493	0,993
1972/73	1,038	32,911	2,384	1998/99	0,646	19,750	1,484
1973/74	0,028	0,875	0,065	1999/00	0,175	5,595	0,402
1974/75	0,089	2,708	0,204	2000/01	0,161	4,921	0,370
1975/76	0,123	3,896	0,282	2001/02	0,005	0,165	0,012
1976/77	0,461	14,431	1,058	2002/03	1,517	47,474	<u>3,484</u>
1977/78	0,186	5,622	0,426	2003/04	0,490	15,611	1,126
1978/79	0,322	10,060	0,739	2004/05	1,248	38,609	2,867
1979/80	0,014	0,458	0,033	2005/06	0,600	18,429	1,379
1980/81	0,371	11,506	0,852	2006/07	0,371	11,791	0,851
1981/82	0,233	7,233	0,534	2007/08	0,126	3,961	0,289
1982/83	0,344	10,877	0,790	2008/09	0,566	17,519	1,299
1983/84	0,985	30,561	2,261	2009/10	0,203	6,365	0,466
1984/85	0,933	29,657	2,142	2010/11	0,511	15,738	1,173
1985/86	0,067	2,119	0,154	2011/12	0,748	23,339	1,718
1986/87	1,272	39,474	2,921	Moyenne	0,435	13,614	1
1987/88	0,004	0,142	<u>0,010</u>	Min.	0,004	0,142	0,010
1988/89	0,122	3,848	0,281	Max.	1,517	47,474	3,484
1989/90	0,131	4,144	0,300	σ_x	0,367	11,486	0,844
				C_v		0,844	

L'analyse de la répartition des coefficients d'hydraulicité annuels sur les périodes d'observation, a montré clairement les années déficitaires et excédentaires ; au niveau de la station de Medjez Amar II, seulement 7 des 19 années sont excédentaires et le reste (presque 2/3 de la période d'observation) déficitaires. Alors que, la station d'Ain Berda montre 21 ans excédentaires et 28 ans déficitaires sur 48 ans d'observation. La longue période déficitaire s'observe durant les années soixante-dix pour les deux stations hydrométriques (figure II.21).

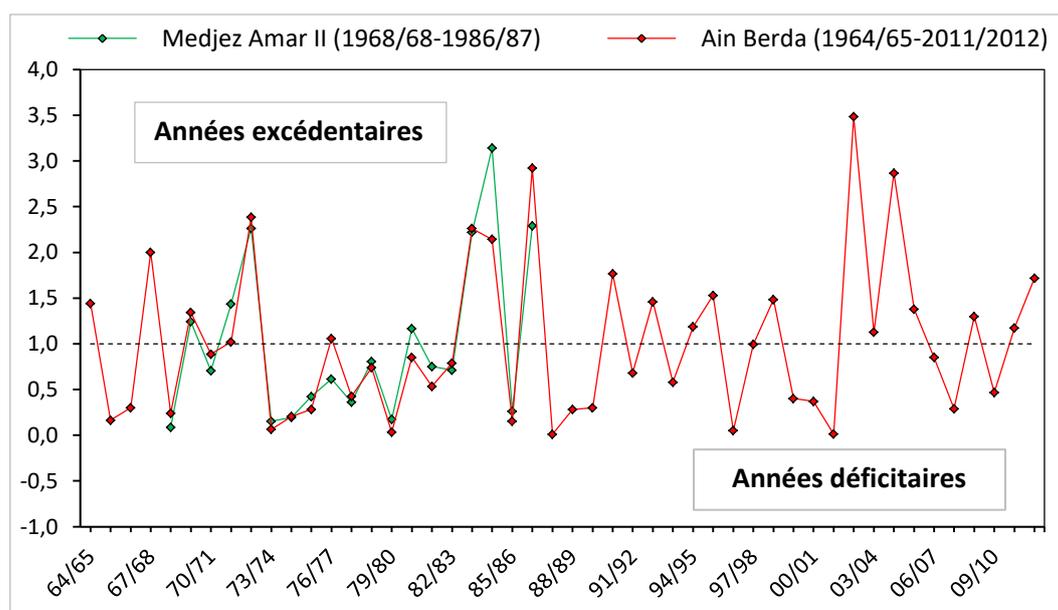


Fig. II.21- Représentation graphique des coefficients d'hydraulicité annuels aux stations hydrométriques.

L'année hydrologique 1984/85 été la plus humide au bassin versant de l'oued Bouhamdane, au cours de cette année la station de Medjez Amar II reçoit un important volume d'eau (270 Hm^3), cette valeur résulte notamment des précipitations torrentielles du 28-31/12/1984 où on a enregistré les valeurs 257 mm, 289 mm et 220 mm respectivement aux postes pluviométriques de Bordj Sabath (140302), Ras El-Akba (140309) et de Medjez Amar (140314). Ces pluies à provoquer une crue exceptionnelle caractérisée par un très fort débit de pointe de l'ordre de $785 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tandis que, l'année la plus humide pendant 48 ans d'observation à la station de Ain Berda été 2002/03 avec un apport annuel d'environ 47,5 million de m^3 , cet fort apport annuel par rapport à la petite surface drainée (103 km^2) provient généralement des crues d'hiver qui représentent des moyens débits de pointes souvent compris entre 50 et $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ainsi que la plus importante crue du printemps datée 04-08/04/2003 qui a contribué par un volume de $9,06 \text{ Hm}^3$ soit 19,08 % de l'apport annuel total avec un débit de pointe de l'ordre de $170 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure II.22).

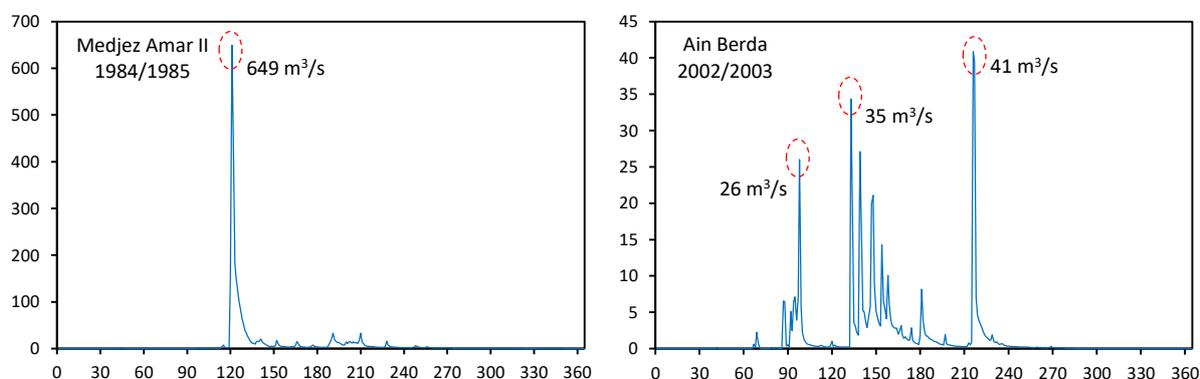


Fig. II.22- Évolution des débits moyens journaliers durant l'année la plus humide pour les deux stations hydrométriques.

L'année hydrologique la plus sèche (1968/69) déjà observée à la station de Medjez Amar II, recueille un volume d'eau total d'environ 7 Hm³. Alors que, les apports liquides durant l'année la plus sèche à la station de Ain Berda (1987/88) sont relativement très faibles ne dépassent pas 0,15 Hm³/an. Ces valeurs peuvent s'expliquer par la faible fréquence des crues pendant ces deux années (figure II.23).

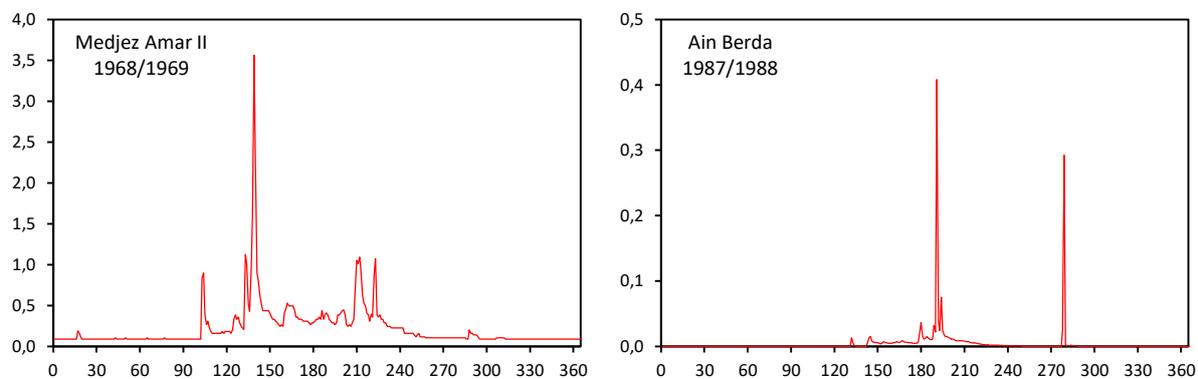


Fig. II.23- Évolution des débits moyens journaliers durant l'année la plus sèche pour les deux stations hydrométriques.

II-5 Synthèse :

De l'étude hydroclimatologique de la région qui nous occupe, on peut tirer les points suivants :

- Le régime climatique de la zone étudiée est à dominance méditerranéenne avec un été sec et chaud et un hiver humide et frais. Sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Bouhamdane, les précipitations moyennes annuelles obtenues par interpolation des isohyètes durant la période 1921-1989 varient entre 433 et 728 mm, avec une moyenne de 572 mm et sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Ressoul elles varient de 620 à 714 mm, avec une moyenne de l'ordre de 681 mm ;
- Les analyses statistiques des séries chronologiques des précipitations mesurées aux stations climatologiques, ont permis de déduire que la précipitation moyenne à la station de Guelma est de l'ordre de 598 mm/an avec un faible coefficient de variation (C_v) qui ne dépasse pas 25 %, tandis que la station de Annaba présente une valeur de 650 mm/an, avec une très faible variabilité de précipitations annuelles soit seulement 18,6 % de C_v ;
- Les mois les plus pluvieux sont Janvier, Novembre et Décembre avec un taux de l'ordre de 40 % pour la station de Guelma et de 45 % pour celle d'Annaba. Alors que, les mois de Juin, Juillet et Août présentent les mois les plus secs de l'année, avec des précipitations insignifiantes soit un total de ces trois mois d'environ 35 mm dans les deux stations ;
- On notera que l'année 2003 a été la plus pluvieuse dans la station de Guelma avec un cumul de 940 mm, et l'année la moins arrosée a été observée en 2008 avec un total de l'ordre de 382 mm. Au niveau de la station d'Annaba la pluviométrie moyenne peut atteindre 888 mm en 2009 et la plus faible pluie (440 mm) a été enregistrée en 2008 ;
- En ce qui concerne le régime thermique, les températures moyennes mensuelles varient entre 9,7 et 27,4 °C à la station de Guelma avec une moyenne interannuelle de 18,01 °C, et entre 11,3 et 26 °C à Annaba avec une moyenne de l'ordre de 17,95 °C ;
- L'analyse du diagramme ombro-thermique de Gaussen nous a conduit à distinguer deux différentes périodes, une sèche dont la durée varie souvent de Mai à Septembre et l'autre humide plus longue que la précédente s'étendant sur le reste de l'année ;
- La vitesse moyenne du vent est relativement faible, elle est de l'ordre de 1,8 m/s à la station de Guelma et de 3,6 m/s à celle d'Annaba, elle varie modérément de 1,5 à 2 m/s et de 3,3 à 4,1 m/s respectivement aux deux stations précédentes. Le Sirocco souffle d'environ 17 jours par an avec une vitesse plus souvent variable d'une classe moyenne à forte ;
- Sur la base de l'indice annuel de DE-MARTONNE qui reflète le degré d'aridité d'une région donnée, les deux stations présentent des valeurs compris entre 20 et 30 ce qui indique un climat suffisamment tempéré pour les deux stations ;

- Les trois mois d'Été possèdent un climat hyper-aride sauf que le mois de Juin à la station de Guelma se trouve à la frontière de l'hyper aridité. Mai, Septembre et Octobre sont marqués par un climat semi-aride et le mois d'Avril considéré comme un mois tempéré. Mars et Novembre se caractérisent par un écoulement exoréique, et le reste des mois de l'année indiquent un écoulement abondant ;
- Le bassin versant de l'oued Bouhamdane englobe deux domaines bioclimatiques, semi-aride caractérise sa partie Sud et sub-humide dans sa partie Nord. Alors que le bassin versant de l'oued Ressoul appartient à l'étage bioclimatique sub-humide doux à frais sur sa totalité ;
- Dans la station de Guelma l'indice d'EMBERGER vaut presque 116 et à Annaba 151, ce qui permet de placer les deux stations météorologiques dans le domaine sub-humide avec une saison hivernale relativement chaude ;
- L'étude du bilan hydrique par la méthode de THORNTHWAITE a montré que l'ETR calculée dans les deux stations est relativement élevée, elle représente presque 75 et 71 % des précipitations totales respectivement enregistrées aux stations de Guelma et d'Annaba ;
- La recharge de l'RFU débute de Novembre jusqu'à la fin d'Avril, elle devient nulle à partir du mois de Juin. La période déficitaire touche 5 des 12 mois de l'année, de Juin à Octobre avec un manque d'eau maximale observé au cours du mois de Juillet. Le bilan hydrique est parfaitement excédentaire entre Janvier et Avril à la station de Guelma et entre Décembre et Avril à celle d'Annaba.
- La station de Medjez Amar II qui contrôle le bassin versant de l'oued Bouhamdane reçoit annuellement $84,28 \text{ Hm}^3$ d'apport liquide pour un débit moyen de $2,69 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui correspond à une lame d'eau ruisselée de l'ordre de $76,27 \text{ mm}$, durant 19 ans d'observation (1968/69-1986/87). L'année 1984/85 est la plus humide pour la même période de mesure recueille un fort apport annuel soit 270 Hm^3 , alors que l'année la plus sèche (1968/69) n'a reçu que $7,17 \text{ Hm}^3$.
- Le bassin versant de l'oued Ressoul débite à la station de Ain Berda $0,44 \text{ m}^3/\text{s}$ ce qui correspond à un apport moyen annuel de l'ordre de $13,61 \text{ Hm}^3$ et une lame d'eau écoulée de $132,17 \text{ mm}$ pendant 48 ans d'observation (1964/65-2011/12). L'année la plus humide (2002/03) récolte un important volume d'eau d'environ 47,5 million de m^3 , tandis que l'année 1987/88 est la plus sèche caractérisée par un faible apport annuel ne dépasse pas $0,15 \text{ Hm}^3$.

CHAPITRE III:

QUANTIFICATION ET CARTOGRAPHIE DES
ZONES À RISQUE D'ÉROSION HYDRIQUE PAR
L'UTILISATION DU MODÈLE RUSLE SOUS SIG :
APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE
L'OUED BOUHAMDANE

III-1 Introduction

L'érosion des sols est le principal agent responsable à la dégradation des terres dans les bassins versants ; ce phénomène est très répandu dans la région du Maghreb notamment en Algérie puisque toutes les conditions sont réunies pour déclencher et développer le processus d'érosion (HALLOUCHE 2007). L'évaluation de la dégradation des terres sous l'influence du phénomène érosif nécessite la cartographie des différents paramètres intervenant directement ou indirectement dans le processus d'érosion : l'agressivité des pluies, la pente et sa longueur, l'érodibilité du sol, le couvert végétal et les pratiques culturales. La connaissance de ces paramètres physiques ou anthropiques est indispensable dans les études de l'évaluation du degré de dégradation des terres vis-à-vis à l'érosion hydrique.

L'objectif de ce chapitre est double ; d'une part quantifier les pertes en sol causées par le ruissellement et d'autre part localiser et cartographier les zones vulnérables à l'érosion hydrique au sein du bassin versant de l'oued Bouhamdane qui alimente le barrage de Hammam Debagh, en appliquant la version révisée de l'équation universelle de perte en terre (RUSLE) ; En effet, l'usage de cette équation à l'échelle des bassins versants dans le monde est très remarquable surtout dans les pays d'Afrique (ANGIMA et al. 2003, EL-GAROUANI et al. 2008, MHANGARA et al. 2012, BENKADJA et al. 2015, BOUHADEB et al. 2018,...). Pour cette fin, il est nécessaire d'introduire le modèle RUSLE dans un système d'information géographique "ArcGIS" et de spatialiser tous les facteurs naturels qui contribuent dans le processus arrachement-transport-envasement à l'aide d'une base de données existante, afin de localiser les zones de forte dégradation qui nécessitent une intervention urgente.

Le bassin versant choisi pour cette étude draine les monts de Djebels Oum Settas, El-Ancel, El-Sada, El-Meliani et Taya sur une superficie de 1056 km². Il s'agit du sous bassin de l'oued Bouhamdane qui fait partie de la Seybouse, situé au Nord-Est de l'Algérie entre 6°47'02" et 7°14'44" de longitude Est, et entre 36°30'28" et 36°07'49" de latitude Nord. Le bassin versant montre un relief hétérogène très accidenté où prédominent des pentes de classes moyennes à fortes. La zone étudiée est dominée par un climat méditerranéen avec une partie Sud à tendance semi-aride qui reçoit une précipitation annuelle moyenne de 497 mm et une partie Nord à tendance sub-humide où la moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 618 mm/an (Voir chapitre 01).

L'exutoire du bassin versant sélectionné pour cette étude est l'axe du barrage Hammam Debagh, qui se trouve sur l'oued Bouhamdane à environ 5 km en amont de la station hydrométrique de Medjez Amar II. Cet ouvrage a été mis en service en Décembre 1988 pour assurer les besoins en eau d'irrigation du périmètre de Guelma-Boucheouf d'une part et l'alimentation en eau potable de la ville de Guelma d'autre part, sa capacité initiale à la retenue normale est de 200 Hm³ (ANBT).



Fig. III.1- Photo du barrage Hammam Debagh ; cliché ANBT.

III-2 Méthodologie :

Le modèle empirique de perte en sol RUSLE (RENARD et al. 1997) a été utilisé afin d'évaluer le potentiel érosif dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane. Le modèle a été proposé auparavant par WISCHMEIER et SMITH (1965) dans lequel la perte en terre exprimée en t/ha/an est déterminée à l'échelle du pixel. La carte des pertes en sol est obtenue par le produit de cinq facteurs, à savoir : l'érosivité des pluies (R), la topographie (LS), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C) et les pratiques antiérosives (P).

L'équation mathématique du modèle a été intégrée dans un système d'information géographique "ArcGIS", toutes les cartes thématiques des facteurs influents sur l'érosion hydrique ont été réalisées sur une base de données existante. La superposition de tous les facteurs physiques et anthropiques qui contrôlent le phénomène érosif a été effectuée en mode raster en se basant sur l'équation mathématique du modèle (Eq. III.1) :

$$A = R * LS * K * C * P \quad \dots \text{Eq. III.1}$$

L'organigramme ci-dessous (figure III.2), résume toutes les étapes suivies pour quantifier la perte moyenne annuelle de terres causée par le phénomène érosif et cartographier la vulnérabilité des terres vis-à-vis de l'érosion hydrique sur l'ensemble du bassin versant.

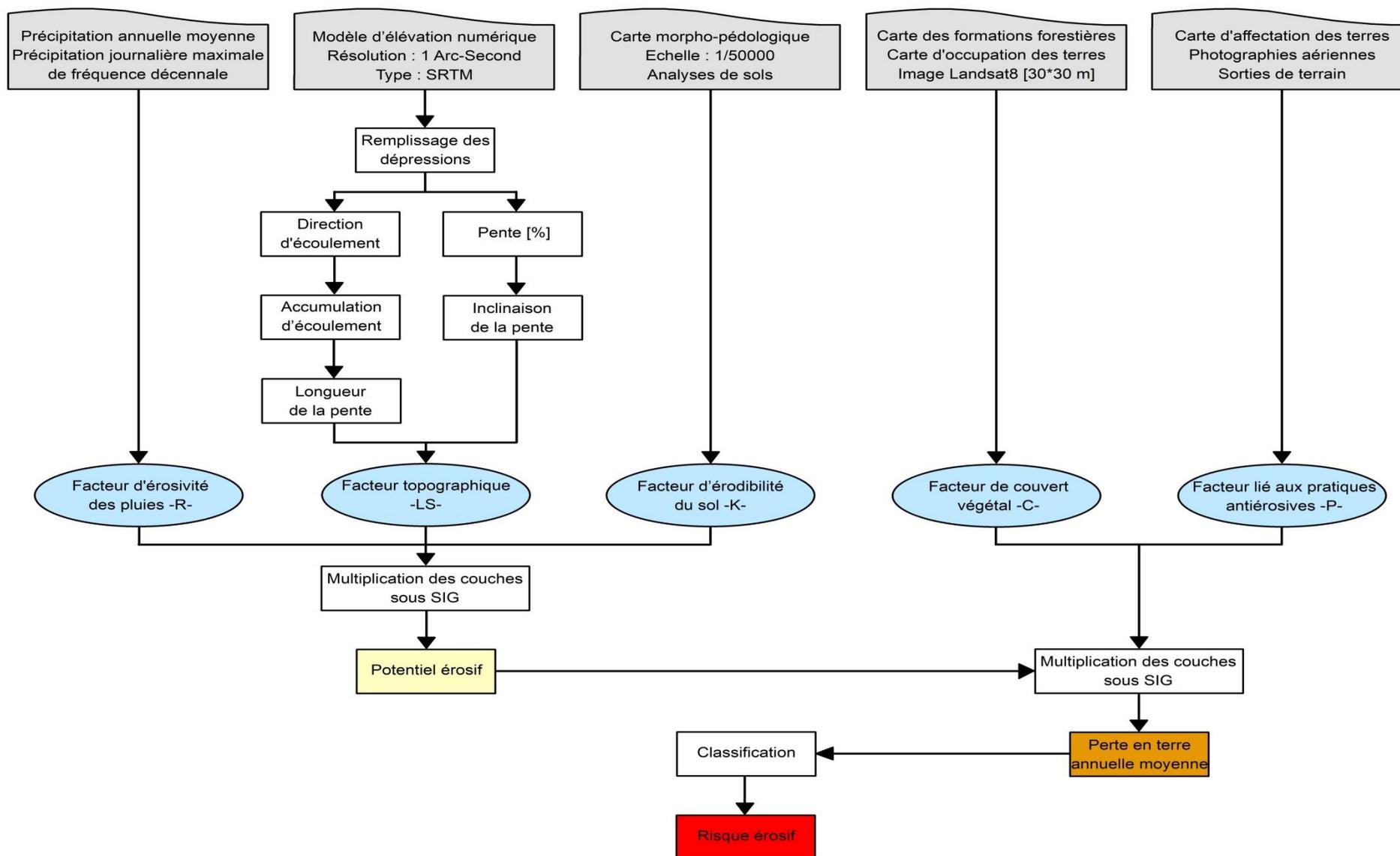


Fig. III.2- Organigramme de la méthodologie utilisée.

III-2.1 Facteur d'érosivité des pluies (R) :

Pour évaluer l'indice annuel d'agressivité des pluies sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Bouhamdane, la formule empirique de HEUSCH développée en 1971 au Maroc a été choisie (Eq. III.2). Elle tient compte de la précipitation annuelle moyenne et de la précipitation maximale en 24 heures d'une période de retour de 20 ans.

$$R = 143 * \log \left(P * \frac{(P_{24})^2}{10^6} \right) + 89,7 \quad \dots \text{Eq. III.2}$$

Où :

R : Facteur d'érosivité des pluies [Mj.mm/ha.h.an] ;

P : Précipitation moyenne annuelle [mm] ;

P_{24} : Précipitation maximale en 24 heures d'une période de retour de 20 ans [mm].

Dans notre cas d'étude, les données météorologiques utilisées pour estimer le facteur d'agressivité climatique (R) nous ont été fournies par l'Agence Nationales des Ressources Hydrauliques (ANRH) sous forme de cartes thématiques; La première c'est la carte des précipitations moyennes annuelles du Nord du pays, établie par le service hydrologique en 1993 sur une période d'observation qui s'étend de Septembre 1921 à Août 1989. Cette carte a permis de spatialiser les précipitations moyennes annuelles sur la totalité du bassin versant de l'oued Bouhamdane par une interpolation de type "Topo to Raster" des isohyètes de pluies sous ArcGIS (figure III.3).

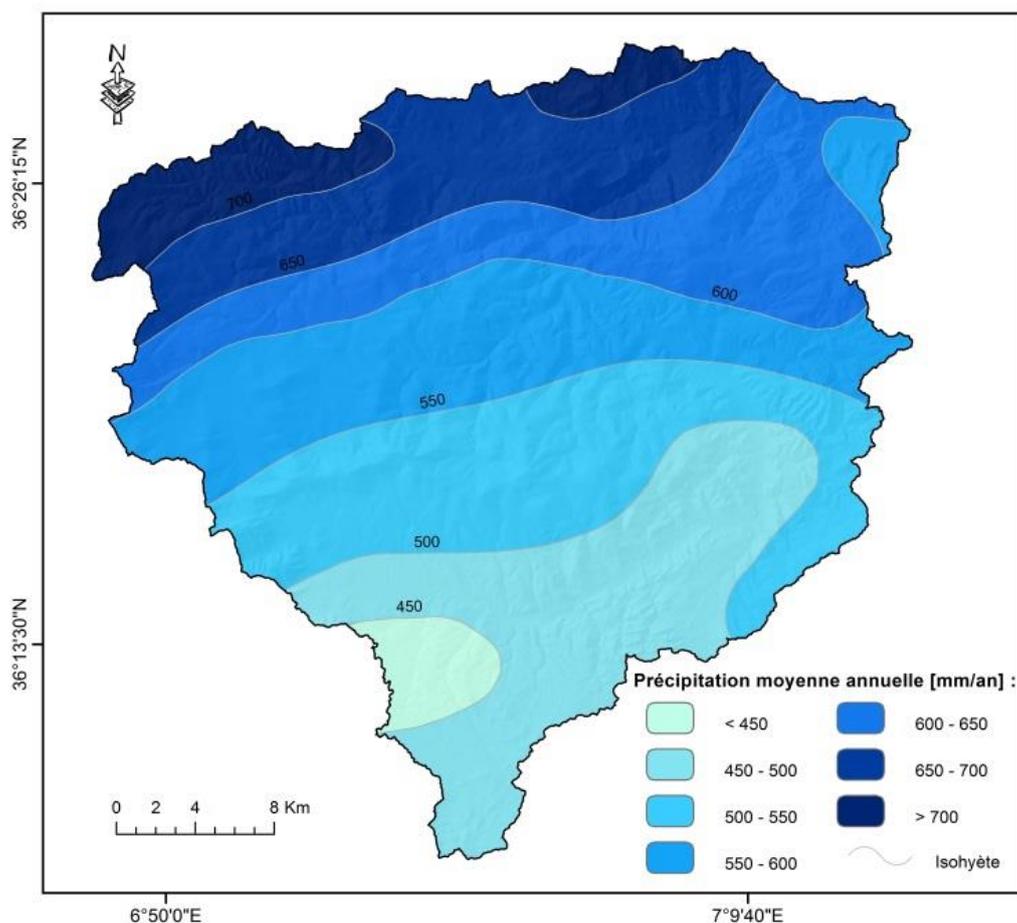


Fig. III.3- Carte des précipitations moyennes annuelles du bassin de l'oued Bouhamdane.

Selon la carte des précipitations moyennes annuelles du bassin versant de l'oued Bouhamdane, un fort gradient Nord-Sud est observé avec un écart d'environ 300 mm entre les plus fortes et les plus faibles précipitations. L'interpolation sous ArcGIS a permis d'estimer à 575 mm/an la moyenne annuelle des précipitations sur l'ensemble du bassin versant.

La deuxième carte fournie par l'ANRH, représente les précipitations journalières maximales de fréquence décennale dans le Nord de l'Algérie, réalisée sur la base des enregistrements de pluies journalières maximales ($P_{j_{max}}$) pendant 38 ans (1961-1999). Cette carte a été utilisée afin d'estimer les pluies maximales journalières ayant une période de retour de 20 ans en utilisant le modèle de Montana (REMINIERAS 1976) (Eq. III.3).

$$P_{(t,T)} = a_{(T)} * t^{[1-b(T)]} \quad \dots \text{Eq. III.3}$$

Avec:

$P_{(t,T)}$: Précipitation maximale d'une période de retour T (20 ans) et une durée de précipitation t (24 h) exprimée en mm ;

$a_{(T)}$ et $b_{(T)}$ sont des paramètres d'ajustement de Montana ; dans laquelle $a_{(T)}$ calculé par la formule suivante (Eq. III.4) :

$$a_{(T)} = K_W * \left(\frac{P_{j10} + g * (-\ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))) - 2,25}{24^{(1-b)}} \right) \quad \dots \text{Eq. III.4}$$

K_W : Coefficient correctif de Weiss, varie dans notre bassin versant de 1,114 à 1,141 du Sud vers le Nord ;

P_{j10} : Précipitation journalière de fréquence décennale [mm] ;

g : Gradex des précipitations journalières [mm] ;

T : Période de retour de l'événement [années] ;

b : Coefficient régional de Montana.

N.B. les Gradex des précipitations (g), les coefficients de Montana (b) et les coefficients correctifs de Weiss (K_W) sont données par l'ANRH (sur support informatique) sous forme de cartes thématiques.

III-2.2 Facteur topographique (LS) :

Le facteur topographique (LS) combine deux paramètres à savoir la longueur de la pente (L) et son inclinaison (S) qui ont une incidence importante sur le régime de ruissellement et donc sur l'érosion hydrique. Le volume et la vitesse de ruissellement augmentent avec l'accroissement de la longueur et de l'inclinaison de la pente du versant.

La version d'origine de l'équation d'évaluation du facteur LS établie par WISCHMEIER et SMITH en 1978 a été améliorée par de nombreux auteurs, parmi lesquels ; MOORE et BURCH 1986 ; MCCOOL et al. 1989 ; MOORE et WILSON 1992 ; DESMET et GOVERS 1996 ; MITASOVA et al. 1996 ; HICKEY 2000. L'équation adoptée dans cette étude est celle modifiée par MITASOVA et al. dans laquelle ils proposent de remplacer la longueur de la pente par l'aire contributive amont drainée (Eq. III.5).

$$LS = (m + 1) * \left(\frac{U}{l}\right)^m * \left(\frac{\sin \beta}{\alpha}\right)^n \quad \dots \text{Eq. III.5}$$

Dans laquelle :

LS : Facteur topographique [sans dimension] ;

U : Aire contributive amont drainée par unité de longueur [m^2/m] ;

l : Longueur de la parcelle standard USLE [22,1 m] ;

α : Pente de la parcelle standard USLE [9 %] ;

β : Angle de pente [en degrés] ;

m et n : sont des constantes expérimentales.

Les valeurs des constantes m et n sont comprises respectivement entre [0,2 – 0,6] et entre [1,0 – 1,3] (NETELER et MITASOVA 2004), où Les valeurs les plus faibles favorisent un processus d'érosion diffuse tandis que les valeurs les plus élevées favorisent un processus d'érosion par rigoles et ravines. MOORE et WILSON (1992), ont démontré que pour les pentes dont la longueur n'atteigne pas les 100 mètre et l'inclinaison inférieure à 14° ; $m = 0,6$ et $n = 1,3$ donnent des résultats cohérents dans le calcul du facteur LS.

Un modèle d'élévation numérique (DEM) de type SRTM et d'1 arc second de résolution a été utilisé pour évaluer l'indice topographique (LS) dans chaque pixel, ce modèle est téléchargeable à partir du site officiel de l'USGS (U. S. Geological Survey).

III-2.3 Facteur d'érodibilité du sol (K) :

Le facteur d'érodibilité du sol (K) caractérise la résistance des particules du sol au détachement et au transport des particules par l'eau. Cet indice dépend également des propriétés intrinsèques du sol et de leur évolution sous l'influence des techniques culturales (ROOSE et SARRAILH 1990).

Dans le cas présent, ces propriétés ont été déjà obtenues par le bureau national des études forestières (BNEF) chargé par l'ANBT en 1988 après l'analyse de 71 profils pédologiques répartis dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane (figure III.4). Nous nous sommes intéressés particulièrement aux résultats des analyses au niveau de l'horizon supérieur (de 0 à 30 cm de profondeur), car le phénomène d'érosion hydrique touche particulièrement cette couche.

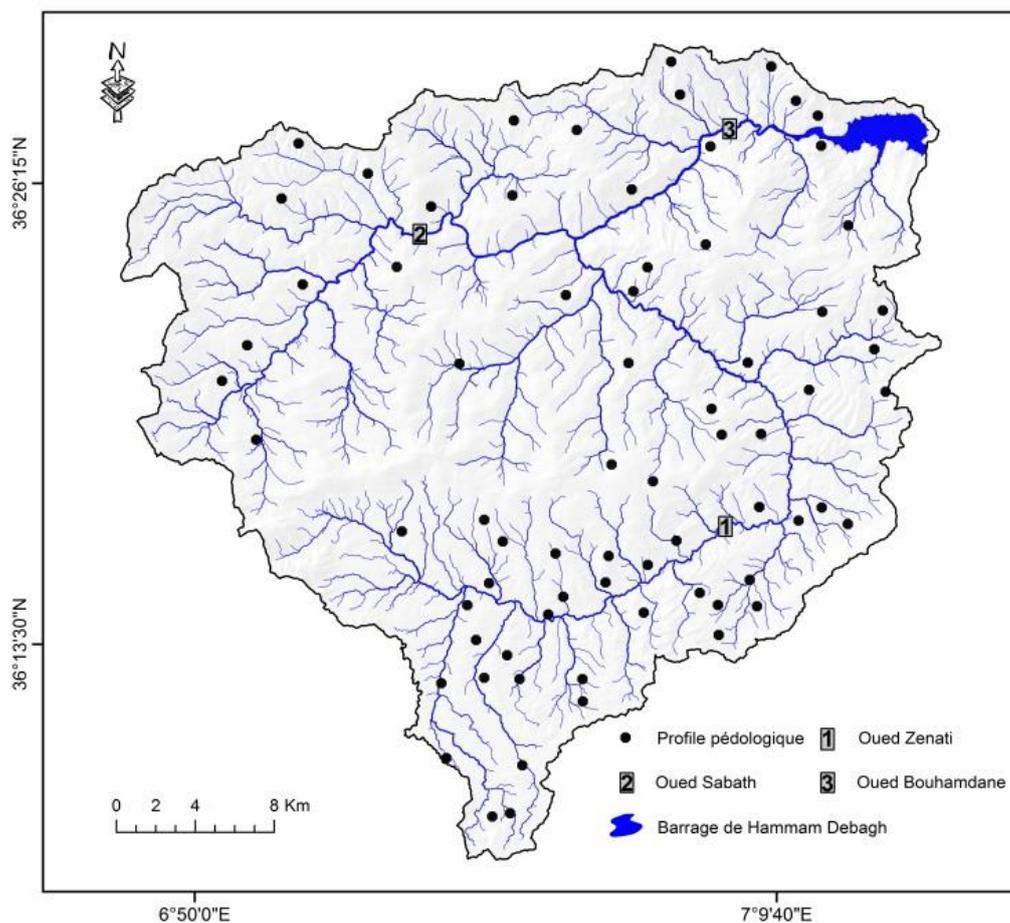


Fig. III.4- Répartition des profils pédologiques analysés au niveau du bassin versant de l'oued Bouhamdane.

En se basant sur la texture du sol, principal indice qui influence l'érodibilité du sol (STONE et HILBORN 2012) et de la teneur en matière organique (MO) pour chaque profil, on tire directement la valeur du facteur K à partir du tableau de correspondance de STONE et HILBORN. Les valeurs tirées du tableau exprimées en [tonne/hectare] sont converties en [t.ha.h/ha.MJ.mm] (tableau III.1) en utilisant les paramètres de conversion de l'équation universelle de perte en sol (FOSTER et al. 1981).

Tab. III.1: Valeurs du facteur K en fonction de la texture du sol et de la matière organique.

Textures générales	Textures détaillées	Facteur d'érodibilité du sol (K) [t.ha.h/ha.MJ.mm]		
		MO < 2%	MO > 2%	MO moyenne
Fine	Argile (Cl)	0,0317	0,0276	0,0288
	Argile silteuse (SiCl)	0,0358	0,0341	0,0341
	Argile sableuse (SaCl)	-	-	-
Modérément fine	Limon argileux (ClLo)	0,0435	0,0370	0,0394
	Limon silto-argileux (SiClLo)	0,0464	0,0394	0,0423
	Limon sablo-argileux (SaClLo)	-	0,0264	0,0264
Moyenne	Limon (Lo)	0,0446	0,0341	0,0394
	Limon silteux (SiLo)	0,0540	0,0488	0,0499
	Limon très fin (Si)	-	-	-
Modérément grossière	Limon sableux (SaLo)	0,0182	0,0159	0,0170
Grossière	Sable limoneux (LoSa)	0,0065	0,0053	0,0053
	Sable (Sa)	0,0041	0,0012	0,0023

La spatialisation de l'indice de l'érodibilité du sol sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Bouhamdane a été réalisée selon le principe du krigeage ordinaire, en utilisant les valeurs du facteur K attribuées aux 71 profils. Les différents modèles (sphérique, circulaire, exponentiel, gaussien, linéaire,...) pour ce type de krigeage (ordinaire) ont été ajustés selon la distribution des points du semi-variogramme expérimental afin de sélectionner le meilleur, qui donne une faible erreur type (figure III.5). L'ajustement de ces modèles a permis de préférer le modèle exponentiel.

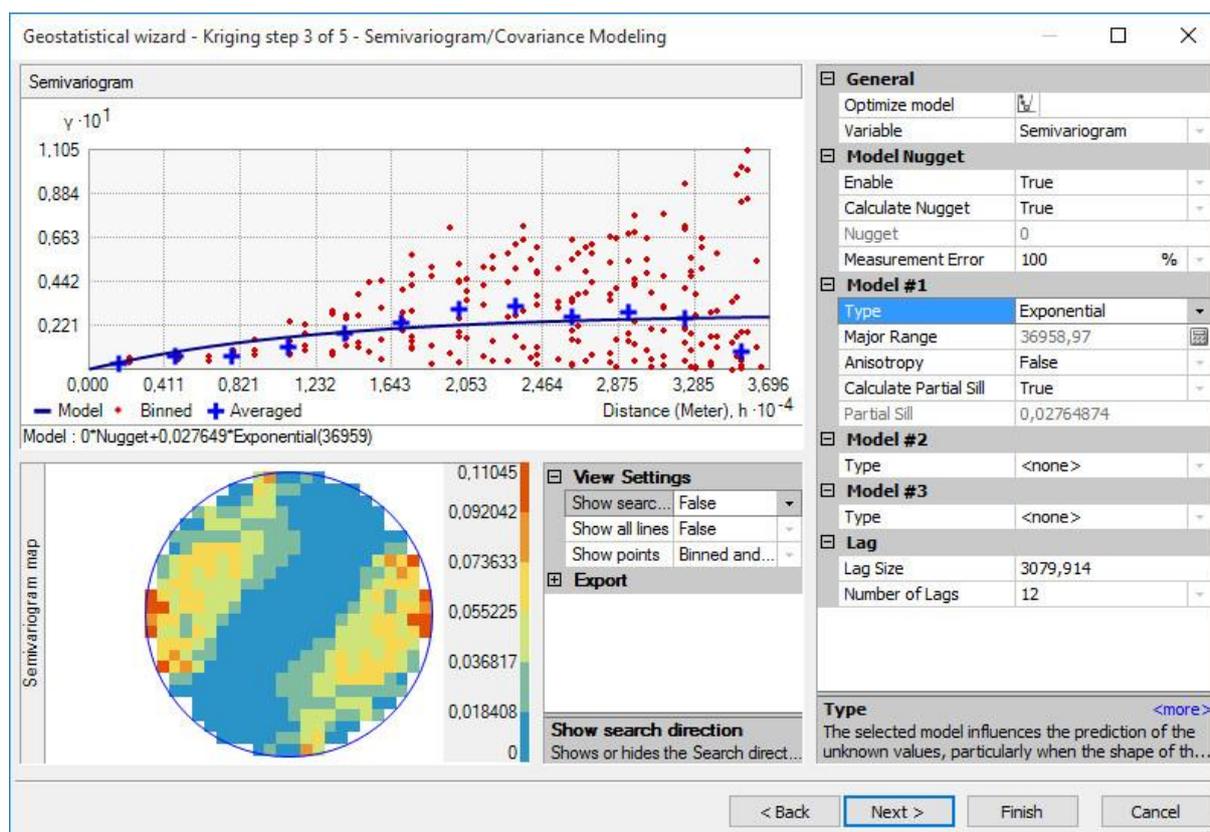


Fig. III.5- Semi-variogramme expérimental du facteur K.

III-2.4 Facteur du couvert végétal (C) :

Le facteur du couvert végétal (C) est le ratio de l'érosion d'un sol sous une couverture bien définie par rapport à l'érosion d'un sol nu, il représente l'influence de la couverture végétale et des techniques culturales sur l'érosion hydrique, ce facteur varie de 1 sur un sol nu à 0,003 sous une forêt dense (WISCHMEIER et SMITH 1978).

Dans la présente étude, les valeurs du facteur C ont été évaluées pour les différents types de couvertures du sol sur la base de la carte d'occupation des terres (voir chapitre 01). Les terres agricoles (cultures, cultures associées aux parcours et oléiculture) occupent une superficie très importante de 68535 Ha soit 65 % de la superficie du bassin versant, les parcours totalisent une superficie de 6812 Ha soit 6,5 % de la superficie totale, les maquis et maquis arborés occupent une superficie de 14570 Ha soit environ 14 %, alors que les forêts et les reboisements couvrent une superficie de 8890 Ha correspondant à 8,5 % de la superficie du bassin versant. Le reste est occupé par des terres improductives (terrains rocheux, terrains nus, plan d'eau et terres urbanisées).

Pour la classe d'occupation des terres forêts et reboisements, le facteur C a été estimé en s'inspirant des travaux de WISCHMEIER et SMITH 1978 à l'aide de la hauteur des arbres, de la densité de couvert végétal et le taux de recouvrement par les broussailles. Alors que pour les autres classes d'occupation, nous avons utilisé les résultats expérimentaux trouvés par CORMARY et MASSON (1964) en Tunisie et ROOSE (1977) en Afrique occidentale pour des classes d'occupations des terres similaires.

Le tableau ci-dessous (tableau III.2) donne les valeurs du facteur C attribuées aux classes d'occupation des terres du bassin versant de l'oued Bouhamdane :

Tab. III.2: Valeurs du facteur C choisies pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Occupation du sol	Facteur C
Forêt dense	0,17
Forêt ouverte	0,19
Maquis arboré	0,13
Maquis dense	0,10
Maquis claire	0,20
Oliveraies	0,29
Cultures	0,55
Zones de parcours	0,40
Cultures + Parcours	0,45
Reboisement	0,18
Affleurement rocheux	0,75
Terrains nus	1,00
Plan d'eau	0,00
Agglomérations	0,00

III-2.5 Facteur des pratiques antiérosives (P) :

Le facteur des pratiques antiérosives (P) reflète les techniques culturales utilisées (modes de gestion des terres tel que ; le mode de labour et le sens des cultures) et les actions de conservation des sols (La végétalisation des versants), qui réduisent le volume et la vitesse de l'eau ruisselée et favorisent l'infiltration par la modification de l'état structural du sol, ce qui réduit l'impact érosif.

Le facteur (P) a été déterminé dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane, en se basant sur les travaux de WISCHMEIER et SMITH (1965 et 1978), dans lesquels les valeurs du facteur P varient en fonction des combinaisons des classes de pentes et des aménagements agricoles existants. Ces derniers ont été identifiés à l'aide de la carte d'affectation des terres et l'interprétation visuelle des photographies aériennes.

III-3 Résultats et discussions :

III-3.1 Facteur R :

D'après la carte de répartition de l'indice d'agressivité climatique (R) dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane (figure III.6), il est clair que les valeurs de l'indice augmentent du Sud caractérisé par un climat semi-aride vers la partie Nord dominée par un climat sub-humide.

Dans son ensemble, le bassin versant de l'oued Bouhamdane présente une agressivité des pluies annuelle moyenne relativement modérée avec une moyenne de 198 [Mj.mm/ha.h.an]. Les valeurs annuelles moyennes de l'indice R varient entre 160 et 240 [Mj.mm/ha.h.an].

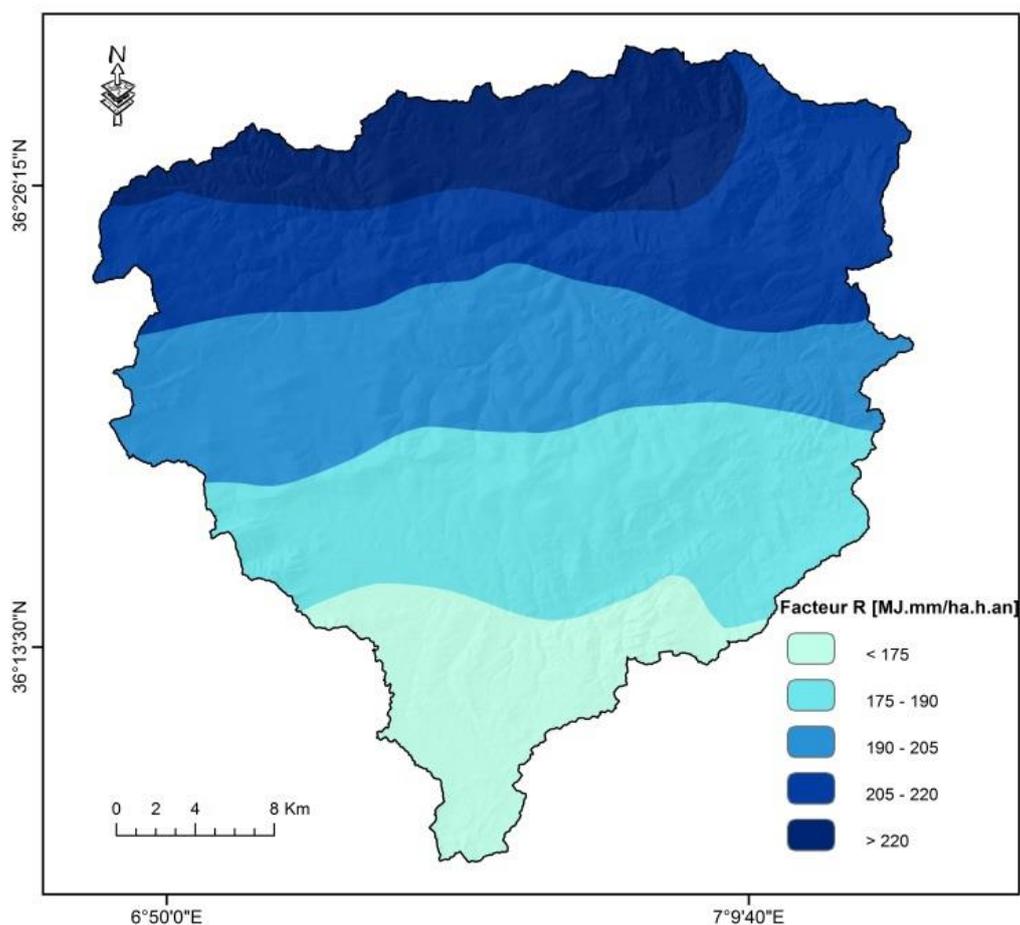


Fig. III.6- Carte de répartition du facteur R dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

La figure III.7, montre que plus d'un tiers (1/3) de la superficie du bassin versant de l'oued Bouhamdane est caractérisée par un degré élevé d'agressivité des pluies. Alors que près de la moitié (1/2) de sa superficie est caractérisée par une agressivité modérée.

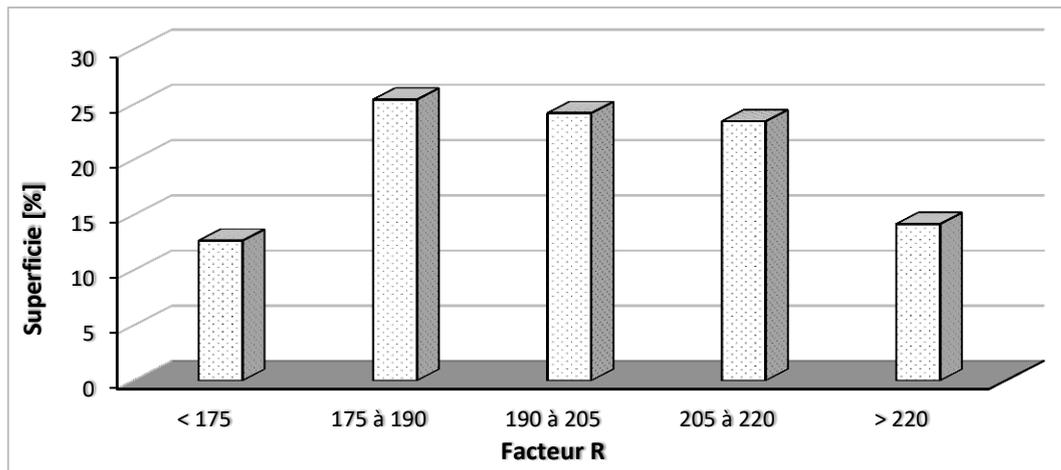


Fig. III.7- Répartition des classes du facteur d'agressivité des pluies.

III-3.2 Facteur LS :

L'utilisation de la formule empirique de MITASOVA et al. (1996) abouti à l'estimation du facteur topographique comprise entre 0 et 41,79 cet écart s'explique par l'hétérogénéité du relief dans notre secteur d'étude (figure III.8).

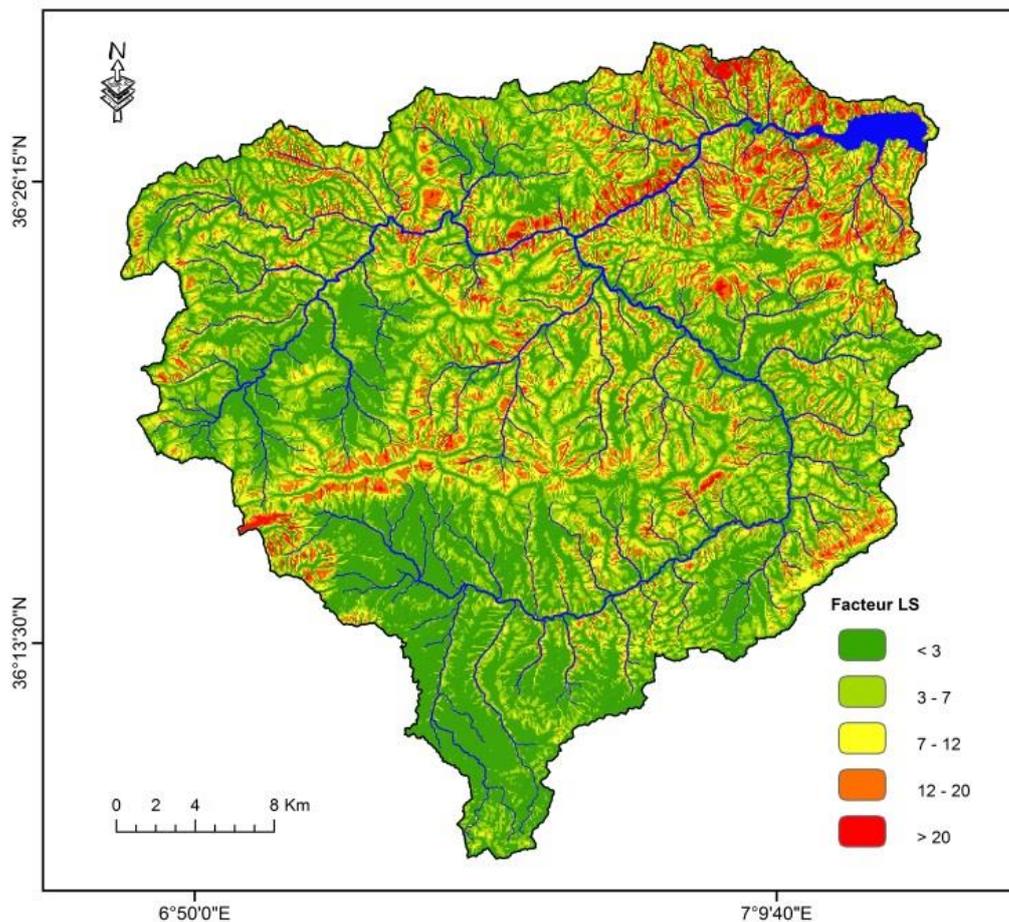


Fig. III.8- Carte de répartition du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

En moyenne le bassin versant de l'oued Bouhamdane a une valeur du facteur LS de l'ordre de 5,76. Les plus grandes valeurs sont localisées fréquemment dans la partie Nord-Est du bassin versant où prédominent les pentes de classes fortes à très fortes (figure III.8).

III-3.3 Facteur K :

Sur le bassin versant de l'oued Bouhamdane, l'indice de l'érodibilité du sol K à une valeur moyenne de 0,023 [t.ha.h/ha.Mj.mm], ce qui est relativement élevée.

Les valeurs de cet indice varient entre 0,0016 et 0,0342 [t.ha.h/ha.Mj.mm] ; les faibles valeurs localisées au Nord-Ouest du bassin versant s'expliquent par la texture grossière des sols qui favorisent l'infiltration aux dépens du ruissellement (figure III.9).

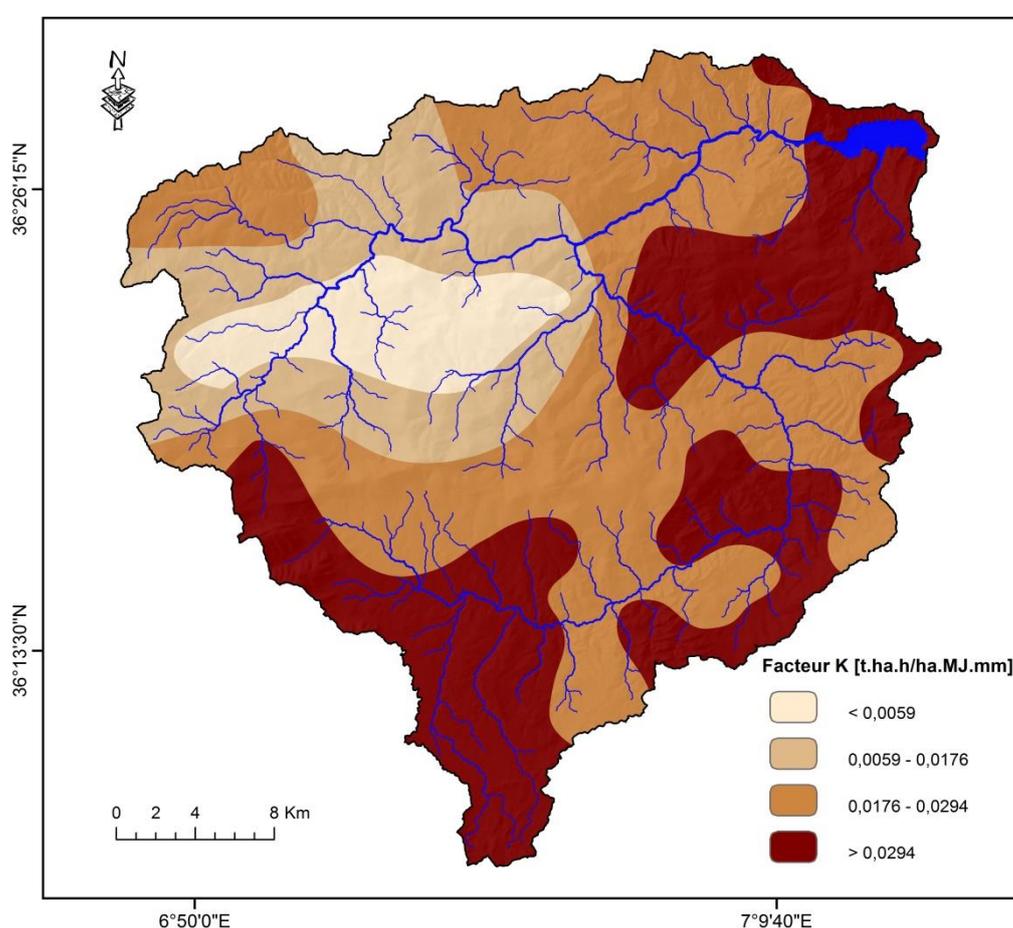


Fig. III.9- Carte de répartition du facteur K dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

D'après la classification de la résistance des sols à l'érosion de BOLLINNE et ROSSEAU (1978) en fonction du facteur K, près des trois quarts (3/4) de la superficie du bassin versant étudié se présente comme des sols sensibles à l'érosion hydrique, par contre moins d'un quart (1/4) de la superficie totale est classé comme des sols résistant à l'érosion hydrique.

Cette forte érodibilité s'explique par la texture limoneuse à limono-argileuse dominante dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane (tableau III.3).

Tab. III.3: Classification de la résistance des sols du bassin versant de l'oued Bouhamdane selon Bollinne et Rosseau.

Erodibilité [t.ha.h/ha.MJ.mm]	Classification	Superficie [Ha]	Superficie [%]
< 0,0059	Très résistants à l'érosion hydrique	8734,31	8,27
0,0059 à 0,0147	Résistants à l'érosion hydrique	13940,13	13,20
0,0147 à 0,0206	Moyennement sensibles à l'érosion hydrique	7308,22	6,92
0,0206 à 0,0264	Sensibles à l'érosion hydrique	10180,79	9,64
> 0,0264	Très sensibles à l'érosion hydrique	65436,55	61,97

III-3.4 Facteur C :

Le facteur du couvert végétal C a été évalué sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Bouhamdane sur la base des recherches effectuées par WISCHMEIER et SMITH (1978) et les travaux de CORMARY et MASSON (1964) et ROOSE (1977). Les valeurs de ce facteur varient entre 1 sur un sol nu et 0,17 sur un sol protégé par une couverture de forêt dense avec un taux de recouvrement des broussailles estimé à 25% après enquêtes sur terrain. La valeur moyenne relativement élevée estimée à 0,42 du facteur C s'explique par la présence d'une vaste zone agricole (figure III.10).

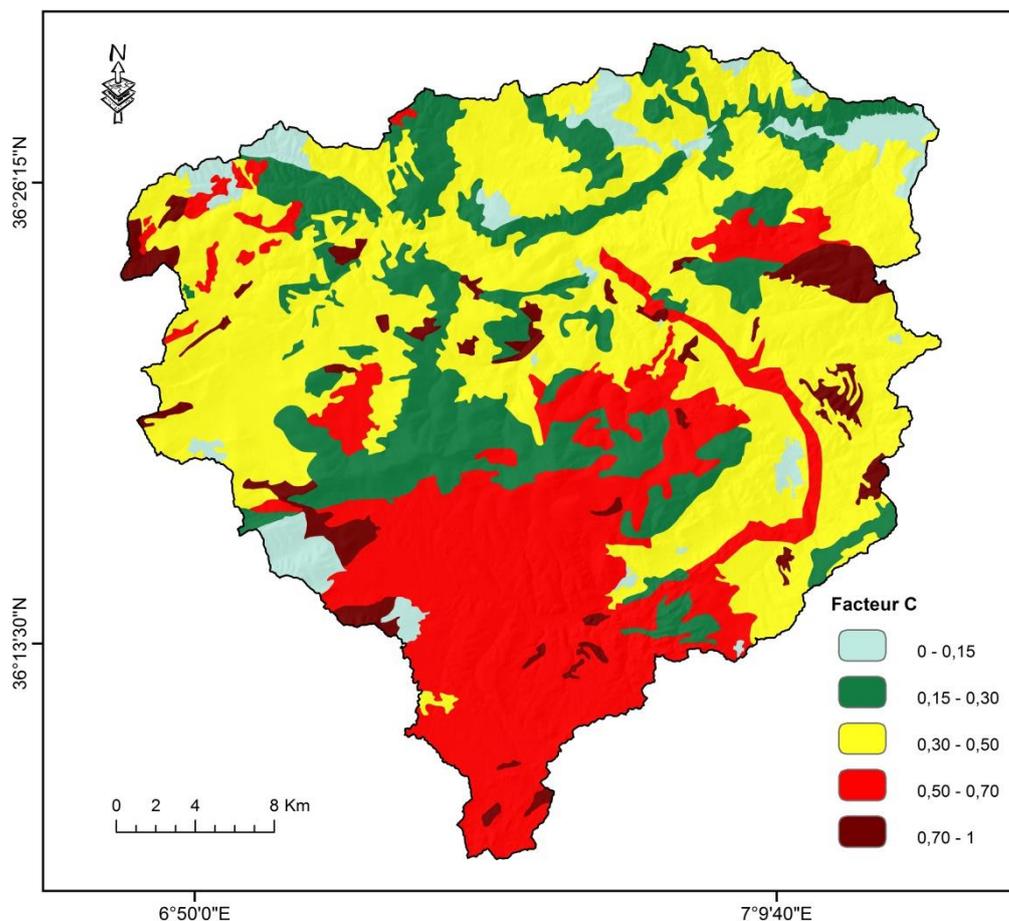


Fig. III.10- Carte de répartition du facteur C dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

L'histogramme ci-dessous (figure III.11) ; montre que, environ un quart (1/4) de la superficie du bassin versant présente un indice du couvert végétal faible à très faible, ces terres sont occupées généralement par des forêts et maquis qui sont réparties un peu partout. Plus de 70 % de la superficie présentant un facteur C modéré est occupée par des terres agricoles (cultures et cultures associées aux parcours). Alors que, moins de 5 % de la superficie du bassin versant de l'oued Bouhamdane est caractérisé par un facteur C élevé à très élevé généralement ces terres sont improductives.

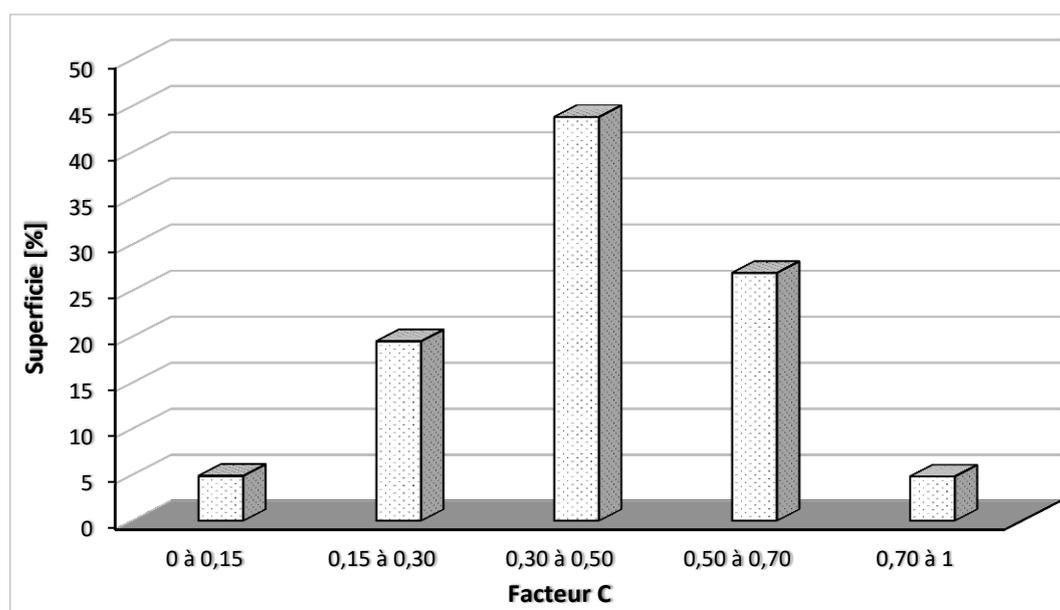


Fig. III.11- Répartition des classes de l'indice du couvert végétal.

III-3.5 Facteur P :

Le dernier facteur (P) de l'équation universelle des pertes en sol spatialisé dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane varie en fonction des pratiques culturales rencontrées et de la classe des pentes qui est inférieure à 1 dans les secteurs aménagés. Le facteur P à une valeur moyenne très élevée (0,93) au niveau du bassin versant de l'oued Bouhamdane, cette valeur est expliquée par l'absence de pratiques culturales antiérosives sur 80 % de la surface totale du bassin où le facteur P vaut 1 (figure III.12).

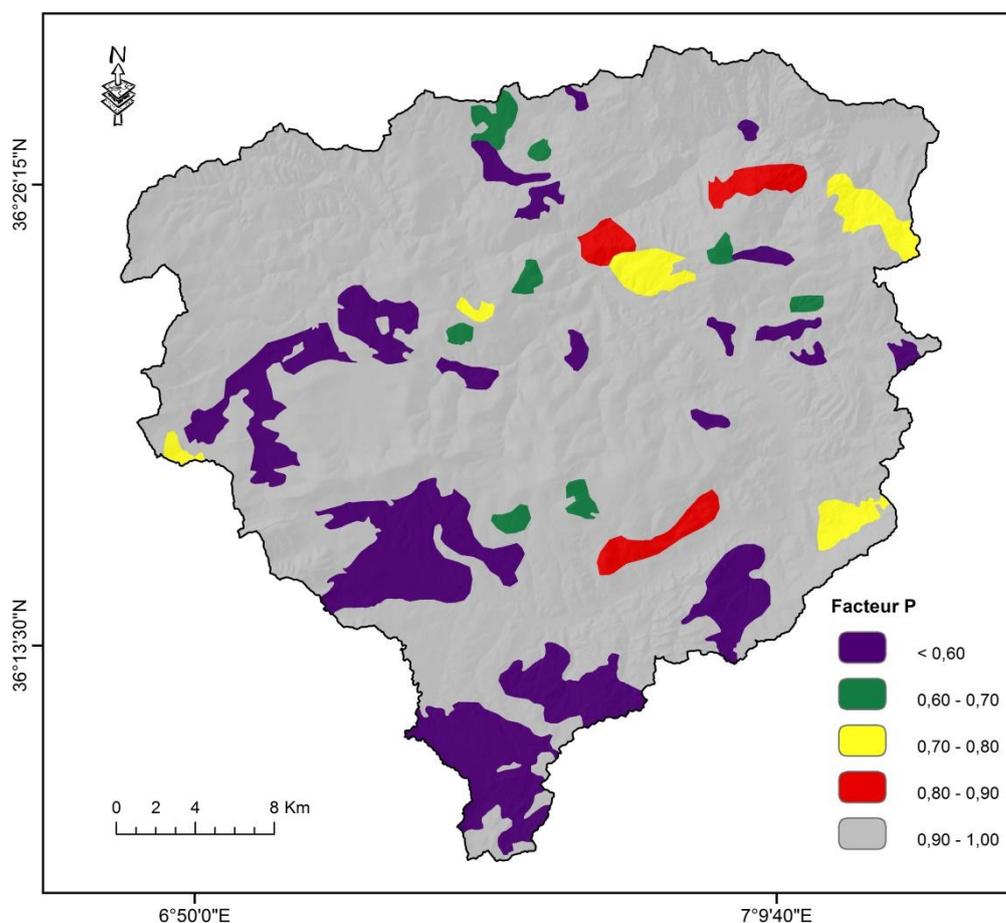


Fig. III.12- Carte de répartition du facteur P dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Les principales pratiques culturales rencontrées au sein de la zone d'étude sont le système de polyculture basé sur une arboriculture de montagne associée à une large gamme de culture annuelle, le labour dans le sens inverse de la pente et quelques plantations fourragères (plantations en bandes, parallèles aux courbes de niveau) sont rencontrées sur les terres reposant sur des pentes moyennes et fortes.

III-3.6 RUSLE :

Dans cette étude on a pu estimer tous les facteurs déterminants le phénomène érosif, le croisement de ces facteurs en mode raster sous ArcGIS nous a permis d'établir une carte de pertes en sol sur la totalité du bassin versant de l'oued Bouhamdane (figure III.13).

Le taux d'érosion varie d'un site à l'autre, il est important (dépassé 20 t/ha/an) dans les zones à proximité de la retenue du barrage Hammam Debagh. Ces zones caractérisées par des terres plus érodées à fortes pentes, sont des zones sérieusement menacées par le phénomène érosif.

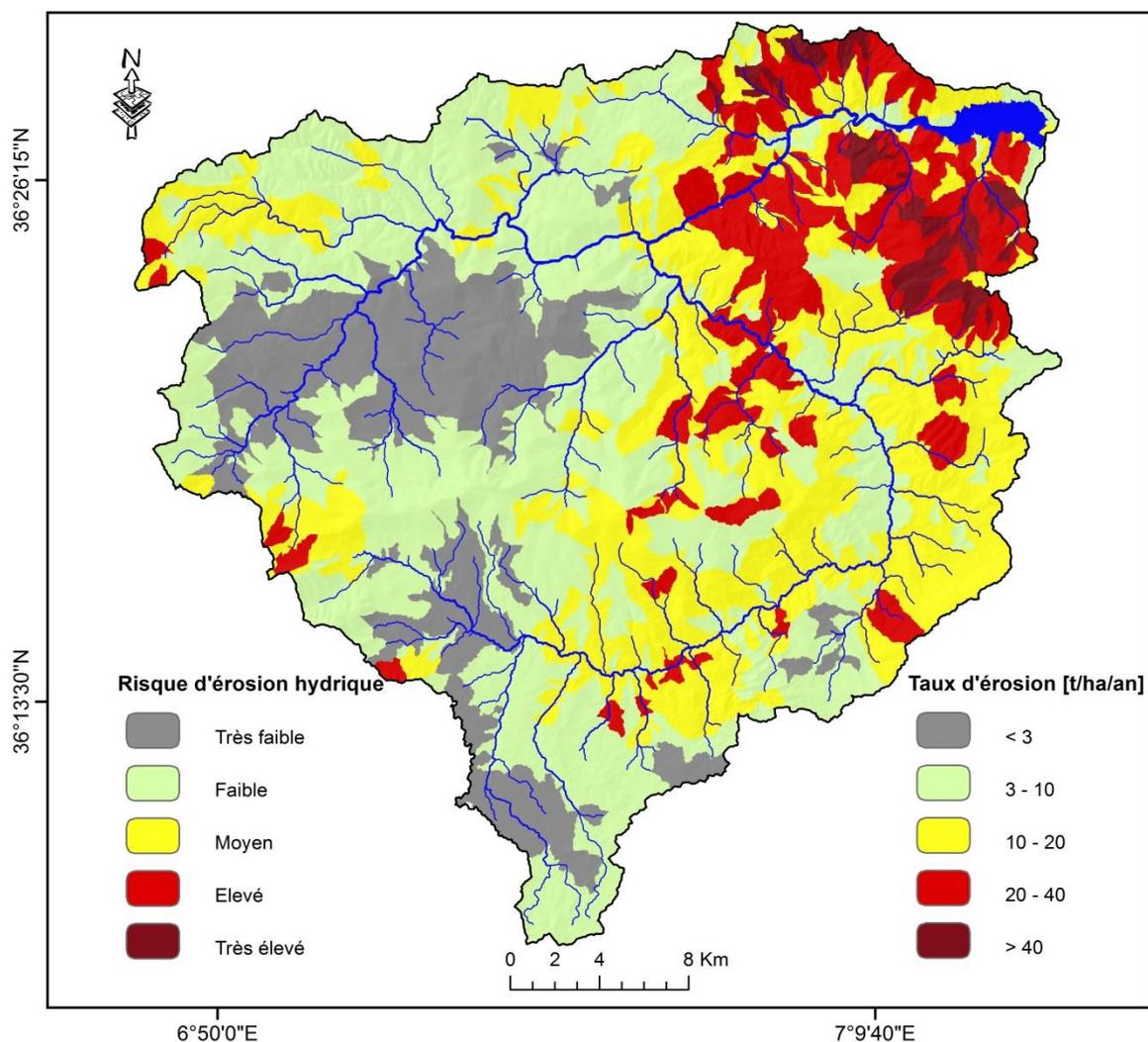


Fig. III.13- Carte du risque érosif dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

La perte moyenne des sols par l'érosion hydrique au bassin versant de l'oued Bouhamdane a été évaluée à 11,18 t/ha/an ; cette valeur dépasse la limite moyenne de tolérance des sols vis-à-vis de l'érosion hydrique qui est de 7 t/ha/an selon SADIKI et al. 2009. Toutefois, une grande partie de la zone étudiée soit 40,15 % de la superficie totale est marquée par un taux d'érosion inférieur à 7 t/ha/an, contre 14,33 % des terres qui montrent une perte de sol très importante (supérieur ou égal 20 t/ha/an), soit en moyenne plus de 1 mm d'épaisseur de sols.

La carte du risque érosif (figure III.13) montre que le risque n'apparaît pas de manière homogène sur le bassin versant de l'oued Bouhamdane. Il est qualifié de faible à modéré sur 89760 ha soit 85 % de la superficie totale du bassin versant. Dans le reste soit 15 % le risque d'érosion apparaît plus problématique classé de fort à très fort (figure III.14).

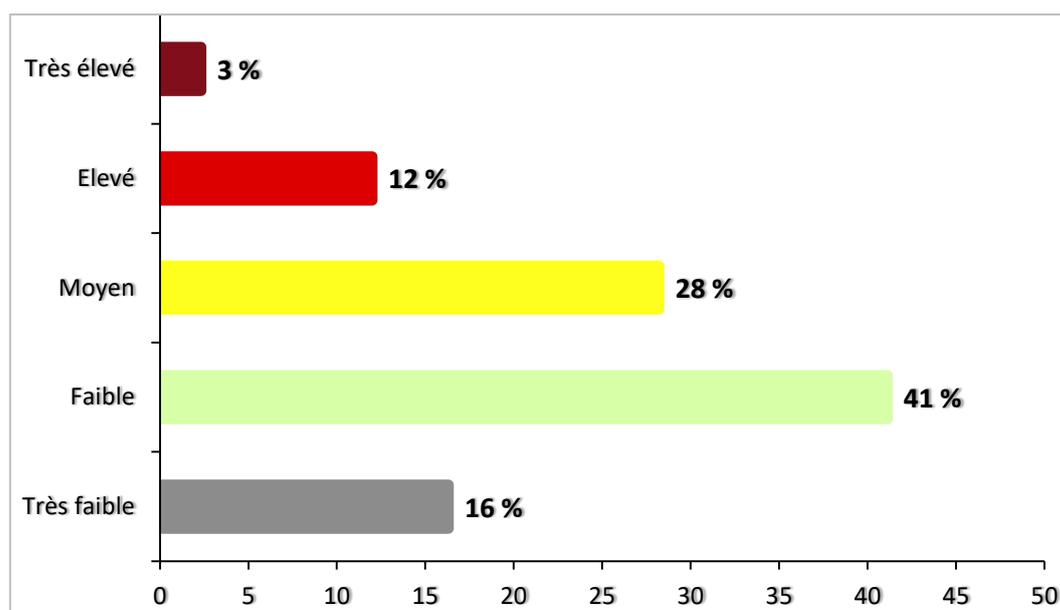


Fig. III.14- Distribution des classes de risques érosifs dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Pour mieux interpréter les pertes en sol dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane, nous avons subdivisé ce dernier en 31 sous bassins versants et ensuite on tire la perte moyenne de chaque sous bassin versant, se basant sur la carte de pertes en sol (figure III.15).

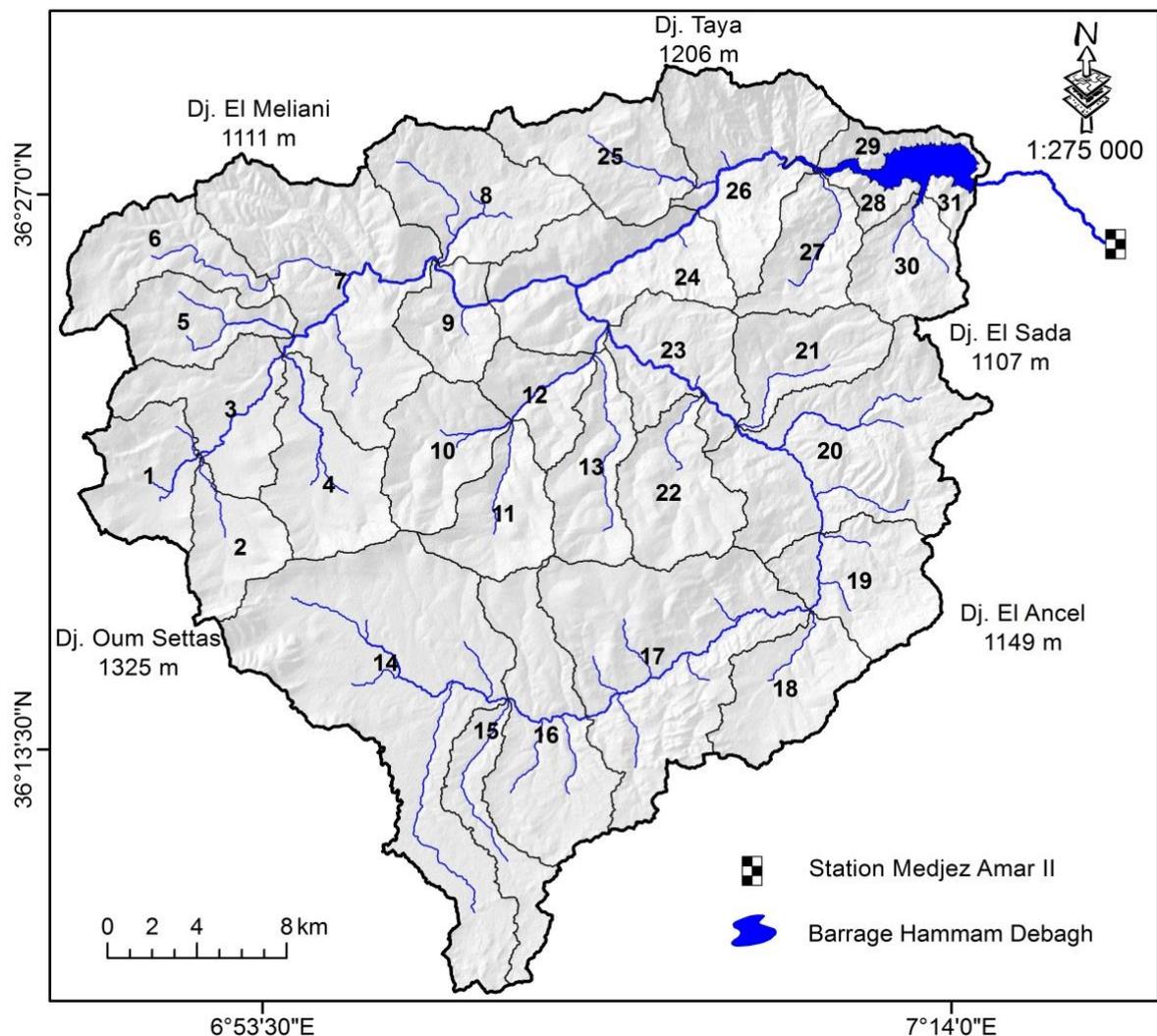


Fig. III.15- Sous bassins du bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Le tableau ci-dessous (tableau III.4) récapitule les résultats obtenus de la perte moyenne des terres pour les 31 sous bassins. Les plus fortes moyennes de la perte en sol sont enregistrées au niveau des sous bassins 21, 26, 27, 28 et 30 où la perte moyenne dépasse les 20 t/ha/an. Ces valeurs critiques s'expliquent par la réunion de différents paramètres contributifs de l'érosion hydrique ; sols frottements érodables qui reposent sur un relief très accidenté, caractérisés par une faible couverture végétale et recevant annuellement des précipitations moyennes de 600 à 650 mm. Ces sous bassins (21, 26, 27, 28 et 30) sont considérées comme sous bassins prioritaires dans les éventuels aménagements antiérosifs.

Tab. III.4: Perte moyenne des sols par érosion en nappe distribuée par sous bassin versant.

N°	S [km ²]	Perte en sol [t/ha/an]			
1	25,30	4,43	16	47,65	<u>9,34</u>
2	20,01	<u>12,10</u>	17	81,29	<u>12,24</u>
3	30,77	1,96	18	27,68	<u>10,01</u>
4	32,66	3,55	19	31,33	<u>12,78</u>
5	21,50	5,44	20	69,45	<u>15,37</u>
6	29,64	<u>12,20</u>	21	24,86	<u>21,97</u>
7	73,85	4,88	22	28,92	<u>15,63</u>
8	39,43	<u>7,17</u>	23	29,17	<u>18,24</u>
9	17,95	3,95	24	47,77	<u>15,51</u>
10	27,19	2,87	25	31,25	<u>13,39</u>
11	23,78	<u>8,60</u>	26	47,02	<u>23,64</u>
12	17,74	5,09	27	22,16	<u>24,63</u>
13	24,36	<u>13,73</u>	28	5,45	<u>20,83</u>
14	117,19	5,39	29	7,98	<u>15,45</u>
15	20,50	6,12	30	21,13	<u>33,12</u>
			31	3,55	<u>18,40</u>

les sous bassins versants 2, 6, 8, 11, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 29 et 31 sont modérément menacés par l'érosion en nappe, où la perte moyenne est comprise entre 7 et 20 t/ha/an ; on peut donc les classer comme sous bassins à priorité moyenne. Le reste des sous bassins versants (1, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 12, 14 et 15) marqués par une érosion acceptable qui ne dépasse pas le seuil de tolérance (7 t/ha/an), sont classés comme des sous bassins non prioritaires pour d'éventuels aménagements antiérosifs.

III-3.7 Envasement du barrage Hammam Debagh :

Dans cette partie nous essayons de comparer les résultats des volumes de sédiments transportés ou déposés dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane obtenues par l'application du modèle empirique de perte en sol RUSLE avec ceux des apports solides mesurés. A cet effet, les données du dernier levé bathymétrique (Mars 2004) réalisé par l'ANBT sur la cuvette du barrage Hammam Debagh ont été utilisées. Les résultats montrent que l'envasement de la retenue depuis la mise en eau du barrage (Décembre 1988) est de 15,653 millions de mètres cubes (figure III.16) ce qui correspond à une perte de l'ordre de 7,826 % de sa capacité initiale, soit un volume moyen annuel de l'ordre de 1,025 Hm³/an. Si l'on admet une densité des vases décantées de 1,5 ; le taux d'érosion moyen est de l'ordre de 14,56 t/ha/an.

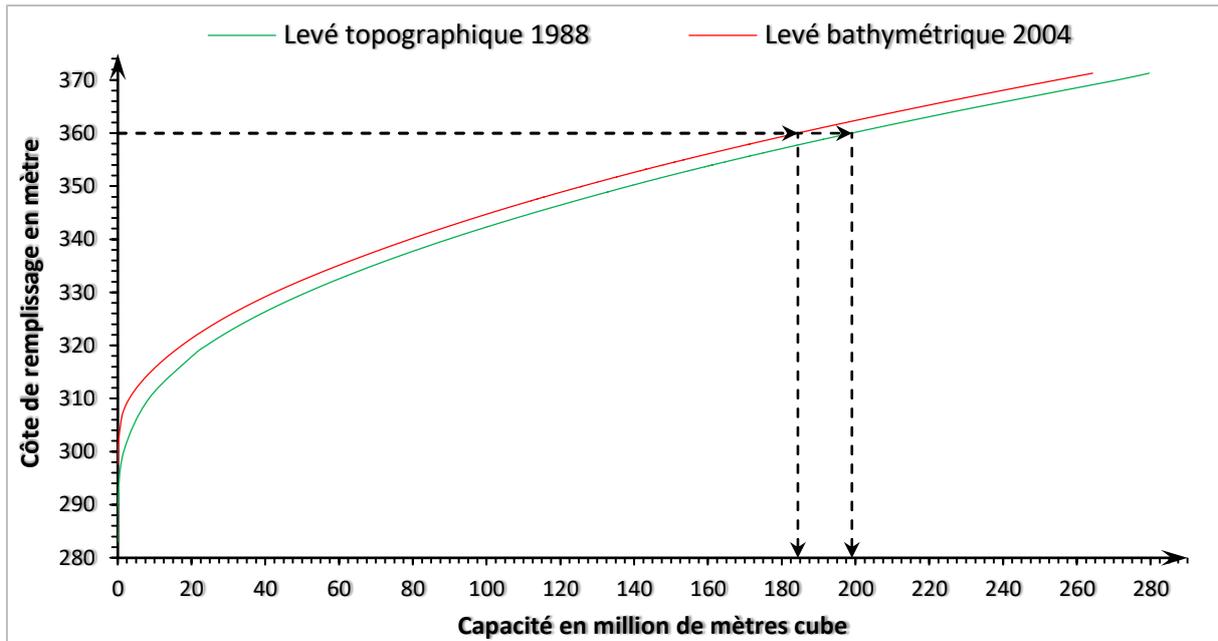


Fig. III.16- Courbes capacité-hauteur de la retenue du barrage Hammam Debagh.

Sur la base de mesures instantanées de couples (débits liquides - concentrations de sédiments) effectuées par l'ANRH dans des conditions d'écoulement diverses et ce, durant une période de 16 ans (1988-2004) ; les charges sédimentaires évacuées par la technique de soutirage lors des crues ont été évaluées au sein de la station hydrométrique Medjez Amar II située à l'aval du barrage de Hammam Debagh par l'établissement des relations entre les débits liquides (Q) et les concentrations des sédiments (C).

Le modèle régressif sélectionné dans cette étude et qui donne un meilleur ajustement avec les données observées, est un modèle non linéaire de type puissance (Eq. III.6) ; il est défini comme suit :

$$C = a * Q^b \quad \dots \text{Eq. III.6}$$

Où : C est la concentration des sédiments en g/l, Q est le débit liquide exprimé en m³/s et a et b sont des constantes.

Après analyse des résultats, il s'avère que la régression entre les débits liquides et les concentrations des matières en suspension (MES) présente un nuage de points très dispersé, ce qui donne un coefficient de détermination (R²) assez faible. Aussi, et pour améliorer la qualité de la relation entre les débits liquides et les concentrations des MES, nous avons opté pour la méthode des classes de débits. Cette méthode donne de très bons résultats dans l'estimation du transport solide, elle est utilisée par plusieurs auteurs ; JANSSON 1996, KHANCHOUL et JANSSON 2008, TOURKI et al. 2017,... (Figure III.17).

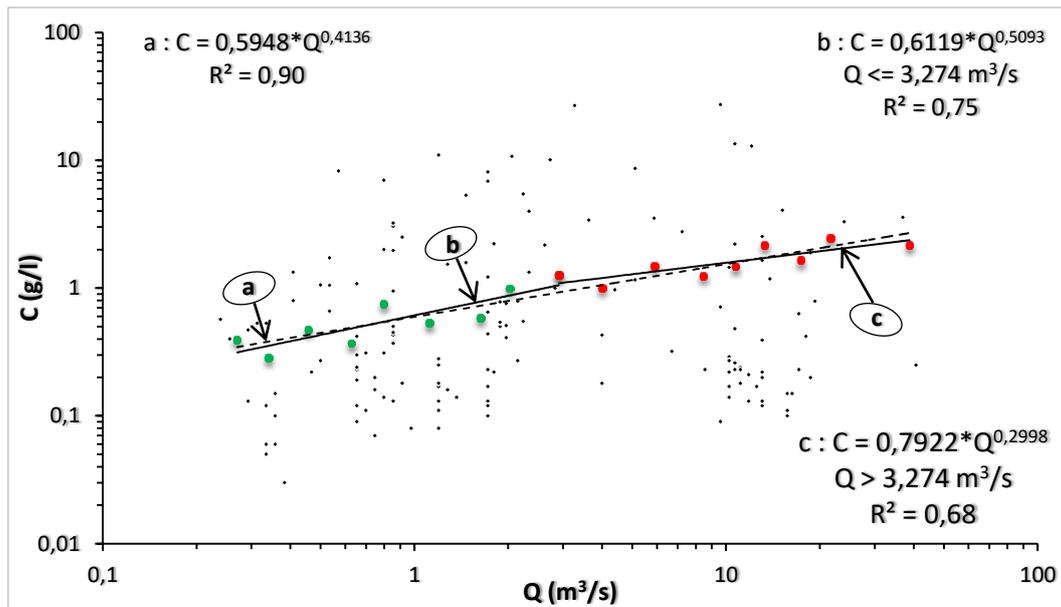


Fig. III.17- Relations entre les concentrations moyennes des sédiments et les débits moyens, station Medjez Amar II (1988-2004).

L'estimation des débits solides (Q_s) consiste également à déterminer les concentrations des sédiments et d'en déduire ensuite les débits solides par l'intermédiaires des débits liquides (Eq. III.7) :

$$Q_s = C * Q \quad \dots \text{Eq. III.7}$$

Les résultats de l'estimation des transports solides à l'aide des équations précédentes sont comparés avec ceux mesurés à la station de Medjez Amar II (soit 179 couples) en se basant sur l'erreur relative entre eux calculée par la formule suivante (HOROWITZ et al. 2001, KHANCHOUL 2006) (Eq. III.8) :

$$\text{Erreur} = \left(\frac{\sum Q_{s_{\text{estimé}}}}{\sum Q_{s_{\text{mesuré}}}} - 1 \right) * 100 \quad \dots \text{Eq. III.8}$$

L'application de l'équation (a) de l'option 01 dans l'estimation des transports solides implique une surestimation de 4,34 %, alors que l'utilisation des deux équations (b et c) de l'option 02 minimise l'erreur relative de 4,34 % à 2,33 % (tableau III.5). Les débits solides estimés par l'application de la deuxième option sont très proches des débits solides calculés issus des concentrations de MES mesurées.

Tab. III.5: Erreurs relatives entre les débits solides obtenus à l'aide des courbes d'étalonnages et ceux calculés issus des concentrations de MES mesurées.

Transport solide		ΣQ_s [t/s]	Erreur [%]
Observé		1,665	-
Estimé	<u>Option 01</u> : par l'utilisation de l'équation a	1,737	+ 4,341
	<u>Option 02</u> : par l'utilisation des équations b et c	1,704	+ 2,339

Les deux relations que nous avons établies (b et c) entre les débits liquides et les concentrations des matières en suspension ont permis d'estimer la dégradation spécifique moyenne annuelle à 1,52 t/ha/an (tableau III.6). Cette valeur représente environ 10 % des sédiments déposés au barrage Hammam Debagh.

Tab. III.6: Résultats des apports solides obtenus par l'application des équations de l'option 02 à la station de Medjez Amar II, sur la période de Décembre 1988 à Mars 2004.

Année \ Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	As Totale *10 ³ [t/an]
1988 - 1989	-	-	-	437,77	114,24	779,23	108,01	72,94	52,05	55,78	46,54	54,57	1,72
1989 - 1990	60,52	95,43	76,73	79,44	77,06	67,93	1798,44	437,03	214,73	70,49	44,69	40,75	3,06
1990 - 1991	42,93	100,42	2372,82	1298,43	386,47	470,32	1846,93	668,90	126,00	107,33	69,37	55,39	7,55
1991 - 1992	83,70	119,50	93,57	132,28	136,26	149,74	230,15	1009,50	954,78	116,30	104,91	96,88	3,23
1992 - 1993	88,64	98,77	7424,73	188082,06	310485,43	29320,81	16052,58	12445,93	2136,14	0,69	0,00	0,00	566,14
1993 - 1994	0,18	0,02	0,05	2363,37	10567,35	43465,43	8158,64	10860,80	102,08	1443,46	752,34	5364,17	83,08
1994 - 1995	3706,83	8585,30	10531,14	2079,25	96317,42	30333,47	57371,73	38876,42	166,75	2053,28	2796,62	4914,17	257,73
1995 - 1996	7964,33	8702,81	8540,52	9521,54	7372,44	32246,60	77660,72	4611,80	7865,10	2899,43	3299,44	3451,60	174,14
1996 - 1997	3065,31	3345,52	3405,13	3387,68	4185,71	1970,83	59,26	650,43	3279,39	3136,17	3895,60	0,00	30,38
1997 - 1998	5107,16	3635,17	2819,91	383,75	40,43	40,16	35,53	796,24	36,79	4272,56	6145,19	6353,22	29,67
1998 - 1999	6473,93	6353,22	5487,19	258,10	637,03	790,40	8694,23	8980,24	9564,04	11227,94	21300,98	22494,64	102,26
1999 - 2000	22178,51	22224,24	20958,90	19606,05	150,37	107,44	97,81	9573,75	11768,49	11938,55	22763,68	24392,96	165,76
2000 - 2001	24579,44	24350,42	12531,07	64,68	153,86	147,43	109,99	12947,73	14428,06	23941,79	27152,63	26914,52	167,32
2001 - 2002	27394,57	27579,62	20613,16	146,52	116,47	103,80	135,31	10904,00	22927,09	25622,53	27192,15	26398,34	189,13
2002 - 2003	25974,26	22232,63	873,65	2276,51	9613,80	114435,01	21495,72	248581,30	3049,08	7197,12	17187,30	17690,36	490,61
2003 - 2004	17119,70	10058,41	717,94	7974,52	237860,23	14959,37	10911,75	-	-	-	-	-	299,60
												As [t/an]	167748,21
												Ass [t/km ² /an]	151,81

Où :

As : Apport solide [t/km²] ;

Ass : Apport solide spécifique [t/km²/an].

En tenant compte des résultats trouvés à partir du levé bathymétrique de la retenue et la quantification des transports solides par méthode statistique (courbes d'étalonnage), nous évaluons la dégradation spécifique moyenne annuelle dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane à 16,08 t/ha/an. Cette valeur issue des données mesurées est plus élevée que celle trouvée par l'application du modèle RUSLE (11,18 t/ha/an). Cette différence peut également être expliquée par le fait que le modèle empirique de WISCHMEIER et SMITH (RUSLE) ne tient pas compte les processus d'érosion linéaire (griffes, rigoles et ravines) et les mouvements en masse (les glissements de terrain et/ou les éboulements) qui sont présents dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane selon KHANCHOUL et al. (2009) ; il ne prend en considération que l'érosion en nappe (premier stade de l'érosion hydrique) dont la source d'énergie est la battance des pluies (WISCHMEIER et SMITH 1978, ROOSE 1994, RENARD et al. 1997, SADIKI et al. 2004, EL-GAROUANI et al. 2008), on peut dire donc que le modèle RUSLE sous-estime les pertes en sols dans les bassins versants par l'érosion hydrique.

III-4 Synthèse :

Dans ce chapitre, l'intégration du modèle de prévision de perte en sol (RUSLE) dans un système d'information géographique "ArcGIS" nous a permis d'établir une carte des pertes en sol sur la totalité du bassin versant de l'oued Bouhamdane et de mettre en évidence les zones présentant un degré critique de sensibilité à l'érosion hydrique et qui doivent être considérées comme priorité dans les éventuels plans d'aménagement antiérosif dans le bassin versant, qui visent à réduire les apports solides au barrage Hammam Debagh et prolonger sa durée de vie.

CHAPITRE IV:

PRÉDICTION DES TRANSPORTS SOLIDES À L'AIDE
DES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS 'RNA':
APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE L'OUED
RESSOUL

IV-1 Introduction

Parmi les problèmes environnementaux majeurs auxquels les hydrologues sont confrontés de nos jours, il y a le transport solide et l'envasement qui sont causés par l'érosion hydrique. L'érosion et la sédimentation dans les rivières sont au centre d'intérêt d'un grand nombre de chercheurs afin de comprendre ce phénomène et de réduire le taux d'érosion dans la région méditerranéenne.

L'ampleur du phénomène des transports solides en Algérie a incité différents hydro-scientifiques à tenter de prédire ces sédiments transportées par les rivières en utilisant plusieurs méthodes, pour protéger les différents systèmes hydroélectriques, la dégradation du sol, la perte de la capacité de stockage dans les réservoirs, la stabilité et la détérioration des eaux souterraines (TACHI et al. 2016, BOUGUERRA et al. 2017).

Tout d'abord, les chercheurs ont modélisé le transport de matières en suspensions (MES) en utilisant des régressions généralement de type puissance dont nous citons PROBST et SUCHET (1992), JANSSON (1996), TOUAIBIA et al. (1999), TERFOUS et al. (2001), MEGNOUNIF et al. (2003), GHENIM et al. (2007), ACHITE et OUILLON (2007), KHANCHOUL et al. (2010), BOUANANI et al. (2013), BALLA et al. (2017),...

Durant la dernière décennie, les chercheurs scientifiques ont commencé à traiter différents phénomènes complexes et non linéaires en utilisant l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique qui sont capables de simuler des processus non-linéaire, notamment dans la modélisation des eaux de surfaces et souterraines RIAD (2003), RIAD et al. (2004), KISI (2004), BOUKHRISSE et al. (2013), KHANCHOUL et al. (2014), BOULMAIZ et al. (2016), TACHI et al. (2016), BOUZERIA et al. (2017),...

L'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) dans la modélisation des eaux de surface en général et le transport des sédiments solides dans les cours d'eau en particulier se trouve parmi les principales préoccupations des chercheurs de nos jours. Dans la majorité des études ayant utilisé les réseaux de neurones artificiel de rétro-propagation (RNRP) pour la prédiction de matières en suspensions (MES) dans les cours d'eau, l'emploi de l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) dans la phase d'apprentissage était le plus fréquent.

Le présent chapitre traite de l'estimation des transports solides en se basant sur la modélisation par les RNA sous MATLAB. Le travail explore la méthode de rétro-propagation selon deux différents algorithmes d'apprentissage dans la prévision de MES à l'échelle des événements extrêmes (crues) dans le bassin versant de l'oued Ressoul. Les résultats de simulations des deux algorithmes d'apprentissage de Levenberg-Marquardt (LM) et de Quasi-Newton (BFGS) ont par la suite été comparées en termes de critères d'évaluation sélectionnés.

IV-2 Méthodologie

IV-2.1 Utilisation des données :

Le cours d'eau sélectionné dans la présente étude est l'oued Ressoul, c'est un affluent rive gauche de l'oued Seybouse, recueille toutes les eaux provenant du bassin versant sur une superficie de 103 km².

Les données employées dans cette étude ont été collectées auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) qui gère toutes les mesures nécessaires des cours d'eau et contrôle les ressources en eau superficielles par le biais de stations hydrométriques, postes pluviométriques et par les analyses de la qualité de l'eau.

Les données recueillies sont les hauteurs d'eau instantanées en (cm) et les concentrations de MES en (g/l) à la station hydrométrique de Ain Berda (140602) entre la période 1968/1969 et 1999/2000. Les hauteurs d'eau ont été transformées en débits liquides par l'intermédiaire de la courbe d'étalonnage (figure IV.1). Cette dernière a été obtenue par l'utilisation des résultats de jaugeages au moulinet fournis par l'ANRH, et qui comprend 276 valeurs de jaugeages réalisés entre Décembre 1968 et Octobre 2012.

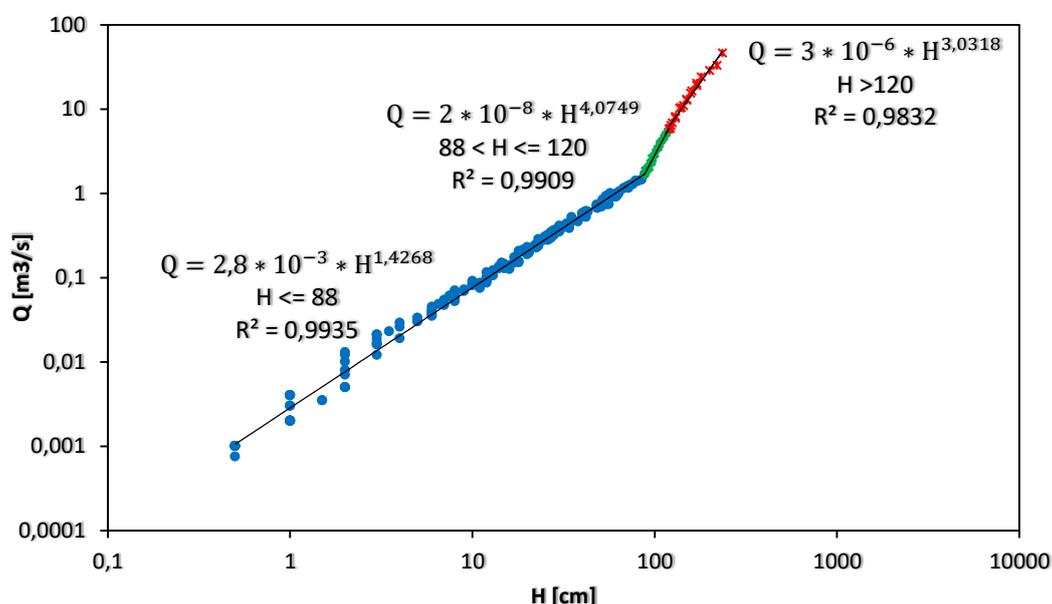


Fig. IV.1- La courbe d'étalonnage à la station d'Ain-Berda.

Le débit solide (Q_s) est calculé par la formule suivante (Eq. IV.1) :

$$Q_s = Q_l * C \quad \dots \text{Eq. IV.1}$$

Où:

Q_s : Débit solide en suspension [kg/s] ;

Q_l : Débit liquide [m^3/s] ;

C : Concentration des matières en suspensions [g/l].

Les valeurs instantanées des débits liquides et solides en périodes de crue ont été utilisées dans ce travail. Le traitement a fait l'objet de données de 134 crues afin de développer les modèles prédictifs par l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA).

La série des données a été divisée en deux ensembles; le premier représente les données de 109 crues entre 1968 et 1988 qui ont été introduites dans le processus d'apprentissage. Le second ensemble a été utilisé dans la phase de validation, constitué des données de 25 crues entre 1989 et 2000. Dans la présente étude, environ 75% des données utilisées entre le 27 septembre 1968 et 12 décembre 1988 ont été introduites dans la phase d'apprentissage, et le reste de la base de données (25 %) du 15 février 1989 au 28 mai 2000 dans l'évaluation de la qualité du réseau neuronal (phase de validation).

IV-2.2 Matrice de corrélation :

La matrice de corrélation a été effectuée pour indiquer l'interaction entre les combinaisons possibles de différentes variables d'entrée et de sortie. La matrice a été appliquée à 2775 individus en tenant compte de huit variables, à savoir : Q_{lt} , Q_{lt-1} , Q_{lt-2} , Q_{lt-3} , Q_{st} , Q_{st-1} , Q_{st-2} , Q_{st-3} . Les débits liquides et solides sont utilisés selon un temps instantané (t_0), un temps antécédent d'une mesure (t_{-1}), de deux mesures (t_{-2}) et de trois mesures (t_{-3}).

IV-2.3 Normalisation de données :

La méthode de normalisation des données a été appliquée pour éviter d'une part, l'effet des valeurs extrêmes des variables dans le processus d'apprentissage et d'autre part, les séries de données comprenant des débits liquides et des débits solides de MES qui ont des unités de mesure différentes qui risquent d'altérer la précision des résultats. L'équation de normalisation appliquée à l'ensemble de données est la suivante (Eq. IV.2) :

$$X_{norm} = \frac{X_i}{X_{max}} \quad \dots Eq. IV.2$$

Avec :

X_{norm} : Donnée normalisée entre 0 et 1 ;

X_i : Donnée réelle ;

X_{max} : Valeur maximale de la série de données réelles.

IV-2.4 Structure du réseau de neurones :

Un réseau de neurones artificiel (RNA) est défini comme un système non linéaire interconnecté qui reçoit des signaux de l'extérieur par l'intermédiaire de ses entrées et qui transmet les signaux à la sortie (MEDJILI 2010). D'après HAYKIN (2009), il est évident que la puissance de calcul du réseau neuronal est obtenue par une structure massivement distribuée en parallèle et aussi par sa capacité à apprendre ; puis à généraliser l'erreur au cours de la phase d'apprentissage. La figure qui suit montre la structure d'un réseau de neurone artificiel multi-couches (figure IV.2).

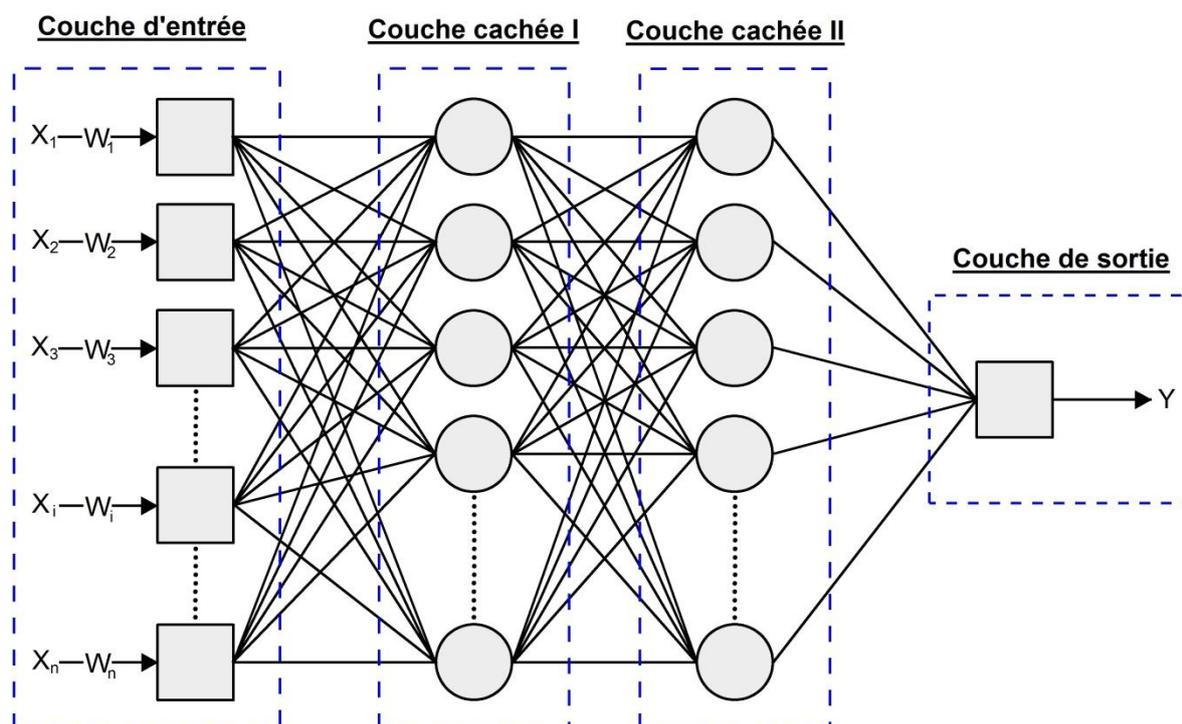


Fig. IV.2- Structure d'un réseau de neurones artificiel multi-couches.

Le réseau de neurones artificiel (RNA) figure parmi les techniques les plus performantes qui ont été appliquées par les hydrologues pour étudier les différents phénomènes au cours des vingt dernières années (TACHI 2017). Les réseaux de neurones biologiques (RNB) ont été l'inspiration du réseau neuronal artificiel. La figure IV.2 représente la structure aléatoire d'un RNA ; elle consiste en une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie. Le traitement de l'information s'effectue au sein d'éléments simples appelés cellules neurones ou nœuds. Les signaux transmettant le traitement de l'information transitent d'un neurone à un autre via un lien de communication. Chaque lien de communication est affecté d'un poids (W) qui pondère le signal transmis.

Le perceptron multicouche (MLP) basé sur l'algorithme du réseau de neurones à rétro-propagation (RNRP) est le type le plus utilisé dans la modélisation des sédiments en suspension dans les rivières (KHANCHOUL et al. 2014, BOUZERIA et al. 2017). Dans cette étude, l'apprentissage d'un réseau de neurones à rétro-propagation a été réalisé par deux différents algorithmes; l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) et l'algorithme de Quasi-Newton (BFGS) pour prédire les sédiments en suspension transportés durant les épisodes de crues.

IV-2.5 Les algorithmes d'apprentissage :

Les algorithmes d'apprentissage automatique permettent aux machines de s'entraîner sur une base de données connue formée des couples d'entrée et de sortie, par l'application des analyses statistiques entre eux sous une couche cachée ; et ce, pour minimiser l'erreur dans cette phase jusqu'à ce que le modèle devient plus précis. Il existe plusieurs algorithmes d'apprentissage, parmi ces algorithmes on peut citer :

a. Algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) :

L'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) est une solution numérique pour la minimisation des erreurs dans la modélisation des problèmes non-linéaires. L'algorithme LM a été développé par LEVENBERG KENNETH et MARQUARDT DONALD en 1963 (WILAMOWSKI et YU 2010). La conception de l'algorithme permet d'approcher une vitesse d'entraînement de second ordre sans calculer la matrice de HESSE (HAGAN et MENHAJ 1994).

b. Algorithme par descente de gradient (GD) :

L'algorithme par descente de gradient (gradient descent algorithm) développé par RUMELHART et al. en 1986, est une méthode qui sert à minimiser la somme des carrés des erreurs dans la détermination des poids et des valeurs biaisées de la fonction de performance qui décroît le plus rapidement (RUMELHART et al. 1986, DAO et VEMURI 2002).

c. Algorithme de gradient conjugué (CG) :

L'algorithme de gradient conjugué (CG) peut être décrit comme une méthode intermédiaire entre deux algorithmes très connus; la descente de gradient et la méthode de Newton. Les poids dans l'algorithme de rétro-propagation sont ajustés suivant la direction de descente la plus raide, c'est à dire, là où la fonction de performance diminue le plus rapidement. Il est à noter que cette direction n'est pas forcément la direction de la convergence la plus rapide. Les informations de matrice de Hesse associées au stockage d'évaluation et à l'inversion ne sont pas appliquées dans cette méthode.

d. Algorithme de Quasi-Newton (BFGS) :

Pour une meilleure et rapide optimisation pendant la phase d'apprentissage automatique ; en 1970, les chercheurs BROYDEN, FLETCHER, GOLDFARB et SHANNO ont mis à jour la formule générale de la méthode de Newton pour être ensuite appelée la méthode Quasi-Newton ou l'algorithme BFGS. Cet algorithme (BFGS) est la méthode alternative à la méthode du gradient conjugué (CG). DENNIS et al. (1977) ; HAGAN et MENHAJ (1994).

IV-2.6 Evaluation statistique

a. Critère de Nash-Sutcliffe (NS) :

Le critère de performance de NASH et SUTCLIFFE (NS) est suffisamment utilisé dans le domaine d'hydrologie notamment dans la modélisation pour expliquer l'efficacité des modèles. Sa valeur s'approchant de 1 détermine le meilleur modèle de simulation (NASH et SUTCLIFFE 1970). Il s'exprime par l'équation suivante (Eq. IV.3) :

$$NS = 1 - \frac{\sum (X_{i_{pred}} - X_{i_{obs}})^2}{\sum (X_{i_{obs}} - \bar{X}_{obs})^2} \quad \dots Eq. IV.3$$

Où : $X_{i_{pred}}$ et $X_{i_{obs}}$ sont respectivement les valeurs des débits solides estimées et observées, et \bar{X}_{obs} représente la valeur moyenne des débits solides observés.

Le critère NS varie entre 0 et 1, avec $NS = 1$ ayant la valeur optimale. Les valeurs comprises entre 0,0 et 1,0 sont généralement considérées comme des niveaux de performance acceptables. Alors que les valeurs $< 0,0$ indiquent que la valeur moyenne observée est un meilleur prédicteur que la valeur simulée ; ce qui indique une performance inacceptable.

b. Erreur moyenne quadratique (RMSE) :

L'erreur moyenne quadratique (RMSE) est utilisée pour calculer l'écart entre les valeurs prédites et celles observées. Plus le critère RMSE tend vers le 0, plus l'écart sera borné, c'est à dire l'erreur est réduite. Le paramètre est donné par la formule suivante (Eq. IV.4):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (X_{i_{\text{pred}}} - X_{i_{\text{obs}}})^2}{N}} \quad \dots \text{Eq. IV.4}$$

Dans laquelle :

N : Nombre total des observations ;

$X_{i_{\text{pred}}}$: Valeur du débit solide estimée ;

$X_{i_{\text{obs}}}$: Valeur du débit solide observée.

IV-3 Résultats et discussion

La modélisation de matières en suspension dans les cours d'eau à l'aide des réseaux de neurones artificiels est réalisée par la programmation sous MATLAB à partir des mesures instantanées des débits liquides et des débits solides à l'échelle des événements (les crues) de l'oued Ressoul, qui ont été enregistrées à la station hydrométrique de Ain Berda pendant une période de 31 ans de 1968 à 2000.

L'analyse de la matrice de corrélation a montré que le Q_{s_t} est bien corrélé avec Q_{l_t} , $Q_{l_{t-1}}$, $Q_{s_{t-1}}$ et modérément lié au $Q_{s_{t-2}}$; contrairement au reste des paramètres où la corrélation n'a pas montrée une bonne liaison avec le Q_{s_t} (tableau IV.1).

Tab. IV.1 : Matrice de corrélation entre les variables.

Variables	Q_{l_t}	$Q_{l_{t-1}}$	$Q_{l_{t-2}}$	$Q_{l_{t-3}}$	Q_{s_t}	$Q_{s_{t-1}}$	$Q_{s_{t-2}}$	$Q_{s_{t-3}}$
Q_{l_t}	1							
$Q_{l_{t-1}}$	0,899	1						
$Q_{l_{t-2}}$	0,788	0,899	1					
$Q_{l_{t-3}}$	0,707	0,788	0,899	1				
Q_{s_t}	<u>0,813</u>	<u>0,721</u>	<u>0,598</u>	0,507	1			
$Q_{s_{t-1}}$	0,678	0,813	0,721	0,598	<u>0,739</u>	1		
$Q_{s_{t-2}}$	0,576	0,678	0,813	0,721	<u>0,567</u>	0,739	1	
$Q_{s_{t-3}}$	0,477	0,576	0,678	0,813	0,440	0,567	0,739	1

Q_{l_t} et Q_{s_t} : débits liquide et solide au temps t_0 , $Q_{l_{t-1}}$ et $Q_{s_{t-1}}$: débits liquide et solide antécédent d'une mesure, $Q_{l_{t-2}}$ et $Q_{s_{t-2}}$: débits liquide et solide antécédent de deux mesures, $Q_{l_{t-3}}$ et $Q_{s_{t-3}}$: débits liquide et solide antécédent de trois mesures.

En ce qui concerne la sélection de l'algorithme d'apprentissage automatique, nous avons utilisé deux différents algorithmes pour la phase d'apprentissage sur le réseau de neurones à retro-propagation. Le premier algorithme qui a été utilisé pour l'apprentissage du perceptron multicouche est celui de Levenberg-Marquardt (LM), conçu avec une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie. L'activation de la fonction de transfert et le nombre de neurones dans les couches cachées ont été choisis sur la base de nombreuses simulations des modèles neuronaux en utilisant différentes variations de structure.

Le deuxième algorithme d'apprentissage de rétro-propagation est celui de Quasi-Newton (BFGS) avec une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie. La meilleure structure a été choisie après plusieurs tentatives avec différentes fonctions de transfert et différents nombres de neurones dans chaque couche.

Les différents paramètres statistiques instantanés (min, moy, max, écart-type et coefficient de variation) de données exploitées pour la présente étude sont présentés dans le tableau IV.2.

Tab. IV.2 : Différents paramètres statistiques des données.

Données	Variables	Minimum	Moyenne	Maximum	S.D.	C.V.
Apprentissage	Q_l [m^3/s]	0,001042	7,20	161,77	17,59	2,44
	C [g/l]	0,001764	1,47	32,00	2,86	1,94
	Q_s [kg/s]	0,000025	32,41	2732,33	133,03	4,10
Validation	Q_l [m^3/s]	0,001041	5,92	118,10	12,76	2,16
	C [g/l]	0,0001638	1,65	22,38	2,53	1,53
	Q_s [kg/s]	0,00000046	24,01	984,54	83,06	3,46

S.D. : Ecart type, C.V. : Coefficient de variation.

L'analyse statistique de la série de données utilisée dans la phase d'apprentissage montre une variabilité très accentuée concernant l'évolution temporelle des valeurs de débits solides avec un coefficient de variation (C.V.) de 4,1 et une variabilité modérément élevée de l'évolution temporelle du débit liquide avec un coefficient de variation C.V. = 2,4.

Les paramètres de la série de données utilisée dans la phase de validation présentent des coefficients de variations des débits solides et liquides légèrement inférieures par rapport à celle de l'apprentissage avec C.V. de 3,46 et 2,16 respectivement.

IV-3.1 RNRP avec l'algorithme LM :

Dans cette première application, sept combinaisons d'entrées ont été formées en utilisant l'algorithme de Levenberg Marquardt (LM) avec 1000 itérations dans chaque modèle de réseau de neurones et ce, pour évaluer la meilleure performance pendant la phase d'entraînement. Le tableau ci-dessous (IV.3) représente la structure et les résultats de performance du rétro-propagation en utilisant l'algorithme LM.

Tab. IV.3 : Résultats de la performance du RNRP par l'utilisation de l'algorithme LM.

No.	Combinaison	Structure	Fonctions de transfère	Apprentissage		Validation	
				NS	RMSE	NS	RMSE
01	Q_{l_t}	1 4 7 1	Tansig/Logsig/Purelin/Logsig	0,745	0,0246	0,821	0,0129
02	$Q_{s_{t-1}}$	1 2 4 1	Tansig/Logsig/Purelin/Logsig	0,654	0,0286	0,754	0,0148
03	$Q_{l_{t-1}}$	1 5 7 1	Tansig/Logsig/Tansig/Logsig	0,518	0,0338	0,695	0,0168
04	Q_{l_t} et $Q_{l_{t-1}}$	2 6 5 1	Tansig/Logsig/Purelin/Tansig	0,748	0,0244	0,806	0,0134
05	$Q_{l_{t-1}}$ et $Q_{s_{t-1}}$	2 3 4 1	Tansig/Logsig/Purelin/Logsig	0,694	0,0270	0,727	0,0149
06	Q_{l_t} et $Q_{s_{t-1}}$	2 4 6 1	Tansig/Logsig/Purelin/Tansig	0,839	0,0195	0,817	0,0122
07	Q_{l_t} , $Q_{l_{t-1}}$ et $Q_{s_{t-1}}$	3 5 6 1	Tansig/Logsig/Purelin/Logsig	0,929	0,0129	0,888	0,0096

Les valeurs de RMSE et NS présentées dans le tableau IV.3 ont été obtenues pendant les phases d'apprentissage et de validation du réseau de neurone à rétro propagation par l'utilisation de l'algorithme LM. Sept combinaisons d'entrée ont été proposées pour la prédiction des débits solides en suspension durant les périodes de crues dans l'oued Ressoul. Les valeurs de performance de la phase d'apprentissage montrent que le RNA s'est bien ajusté, en particulier le modèle 07 pour Q_1 antécédent et le Q_s antécédent, avec la plus forte valeur de NS soit 93% en phase d'apprentissage et 0,89 en phase de validation et les plus faibles valeurs de RMSE 0,0129 et 0,0096 respectivement en apprentissage et validation. En deuxième position on trouve le modèle n° 06 avec NS 84% en apprentissage et 0,82 en validation. Son RMSE en apprentissage est de 0,0195 et 0,012 en validation.

De ce fait, le meilleur réseau de neurones pendant la phase de validation est obtenu par la combinaison à l'entrée du Q_1 actuel, Q_1 antécédent et le Q_s antécédent. Les résultats confirment que l'utilisation des trois entrées améliore l'apprentissage automatique du réseau de neurones et minimise l'erreur entre les valeurs prédites et celles observées. Les résultats montrent aussi une très grande qualité d'ajustement pendant la phase de validation. De même, le modèle simulé n° 01, avec Q_1 actuel montre de très bonnes valeurs de NS et RMSE, ce qui prouve la vraie relation entre les débits liquides et les débits solides de MES. Ceci a été prouvé dans la littérature par de nombreux chercheurs (TACHI et al. 2016, BOUZERIA et al. 2017).

En général, l'utilisation des réseaux de neurones à rétro-propagation (RNRP) en se basant sur l'algorithme LM pour l'apprentissage est très efficace pendant les périodes de crues selon la littérature. Les valeurs de RMSE et NS qui ont été obtenues dans la phase de validation ont été bien meilleures que celles obtenues dans la phase d'apprentissage des simulations 01 à 05, et ce en raison des longues séries qui ont été introduites dans la phase d'apprentissage par rapport à la phase de validation. Les simulations 06 et 07 montrent, par contre, des erreurs moindres dans la phase d'apprentissage et des valeurs plus élevées de NS (figure IV.3).

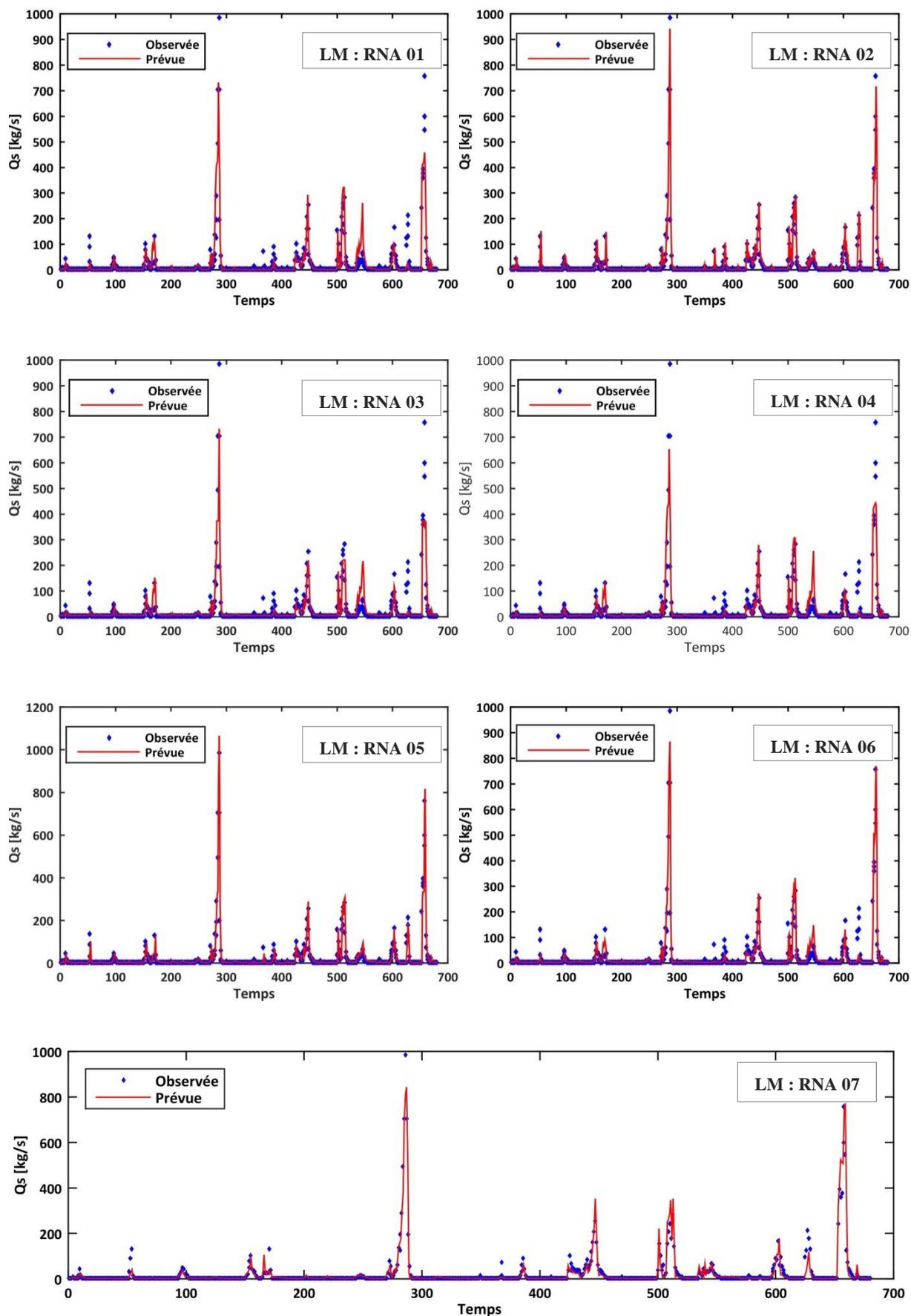


Fig. IV.3- Représentation des valeurs observées et celles simulées par l'algorithme LM.

IV-3.2 RNRP avec l'algorithme BFGS :

Dans cette seconde application, les transports solides en suspension ont été modélisés en utilisant l'algorithme Quasi-Newton (BFGS) avec 1000 itérations pour chaque simulation. Les structures obtenues présentées dans le tableau ci-dessous (tableau IV.4) sont les meilleures pour toutes les simulations élaborées.

Tab. IV.4 : Résultats de la performance du RNRP par l'utilisation de l'algorithme BFGS.

No.	Combinaison	Structure	Fonctions de transfère	Apprentissage		Validation	
				NS	RMSE	NS	RMSE
01	Q_{l_t}	1 3 3 1	Tansig/Logsig/Tansig/Logsig	0,734	0,0251	0,831	0,0125
02	$Q_{s_{t-1}}$	1 3 4 1	Tansig/Logsig/Purelin/Tansig	0,653	0,0287	0,762	0,0146
03	$Q_{l_{t-1}}$	1 4 5 1	Tansig/Logsig/Purelin/Logsig	0,519	0,0338	0,698	0,0167
04	Q_{l_t} et $Q_{l_{t-1}}$	2 4 6 1	Tansig/Logsig/Purelin/Logsig	0,742	0,0247	0,820	0,0129
05	$Q_{l_{t-1}}$ et $Q_{s_{t-1}}$	2 5 6 1	Tansig/Logsig/Purelin/Tansig	0,652	0,0287	0,768	0,0142
06	Q_{l_t} et $Q_{s_{t-1}}$	2 5 7 1	Tansig/Purelin/Tansig/Logsig	0,809	0,0213	0,883	0,0104
07	Q_{l_t} , $Q_{l_{t-1}}$ et $Q_{s_{t-1}}$	3 6 8 1	Tansig/Tansig/Purelin/Logsig	0,838	0,0196	0,934	0,0078

Les résultats obtenus de cette application ont montré des valeurs de NS et RMSE plus faibles en comparaison avec celles de l'algorithme LM durant la phase d'apprentissage et contrairement pour la phase de validation. La plupart des RNA ont été arrêtés avant de terminer les 1000 itérations. L'apprentissage s'est arrêté en raison du sur-ajustement qui est apparu lors de cette phase. Les meilleurs résultats ont été obtenus par les modèles 07 et 06 avec NS de 83,8 % et 80,9 % et RMSE de 0,0196 et 0,0213 respectivement. Les simulations 04, 01, 02 et 05 ont montré aussi des valeurs acceptables pendant la phase d'apprentissage avec NS de 74,2 %, 73,4 %, 65,3 % et 65,2 %. La simulation 03 avec Q_l antécédent a montré de faibles valeurs pendant la phase d'apprentissage avec NS égal à 51,9 % et RMSE de 0,0338.

En général, les valeurs de performance pendant la phase d'apprentissage sont acceptables mais inférieures aux résultats obtenus en utilisant l'algorithme LM en raison de l'apprentissage inachevé à travers toutes les itérations, qui ont été introduites dans les réseaux.

Les meilleures valeurs de NS et RMSE (93,4 % et 0,0078) au cours de la phase de validation ont été obtenues par le modèle 07 pour des valeurs actuels et antécédentes de Q_l et des valeurs antécédentes de Q_s avec 6 neurones dans la première couche cachée et 8 neurones pour la deuxième couche ; Les résultats obtenus de ce modèle restent les meilleurs dans les deux applications.

Les modèles 06, 01 et 04 ont montré de très bonnes valeurs non loin du modèle 07 et mieux que les autres réseaux avec la même combinaison d'entrée dans les réseaux basés sur l'algorithme LM, avec NS de 88,3 %, 83,1 % et 82 % et RMSE égal à 0,0104, 0,0125 et 0,0129 respectivement.

Les modèles 05, 02 et 03 présentent une certaine amélioration par rapport aux résultats de LM; les valeurs de NS sont de 76,8 %, 76,2 % et 69,8 % respectivement. Ces résultats sont jugés acceptables vu la complexité du phénomène étudié (figure IV.4).

Néanmoins, les résultats obtenus montrent que l'apprentissage du RNA par l'algorithme BFGS est plus efficace que l'apprentissage par l'algorithme LM, ce qui est contradictoire avec la littérature où la plupart des chercheurs ont utilisé l'algorithme LM dans la phase d'apprentissage des réseaux de neurones à rétro-propagation (RNRP).

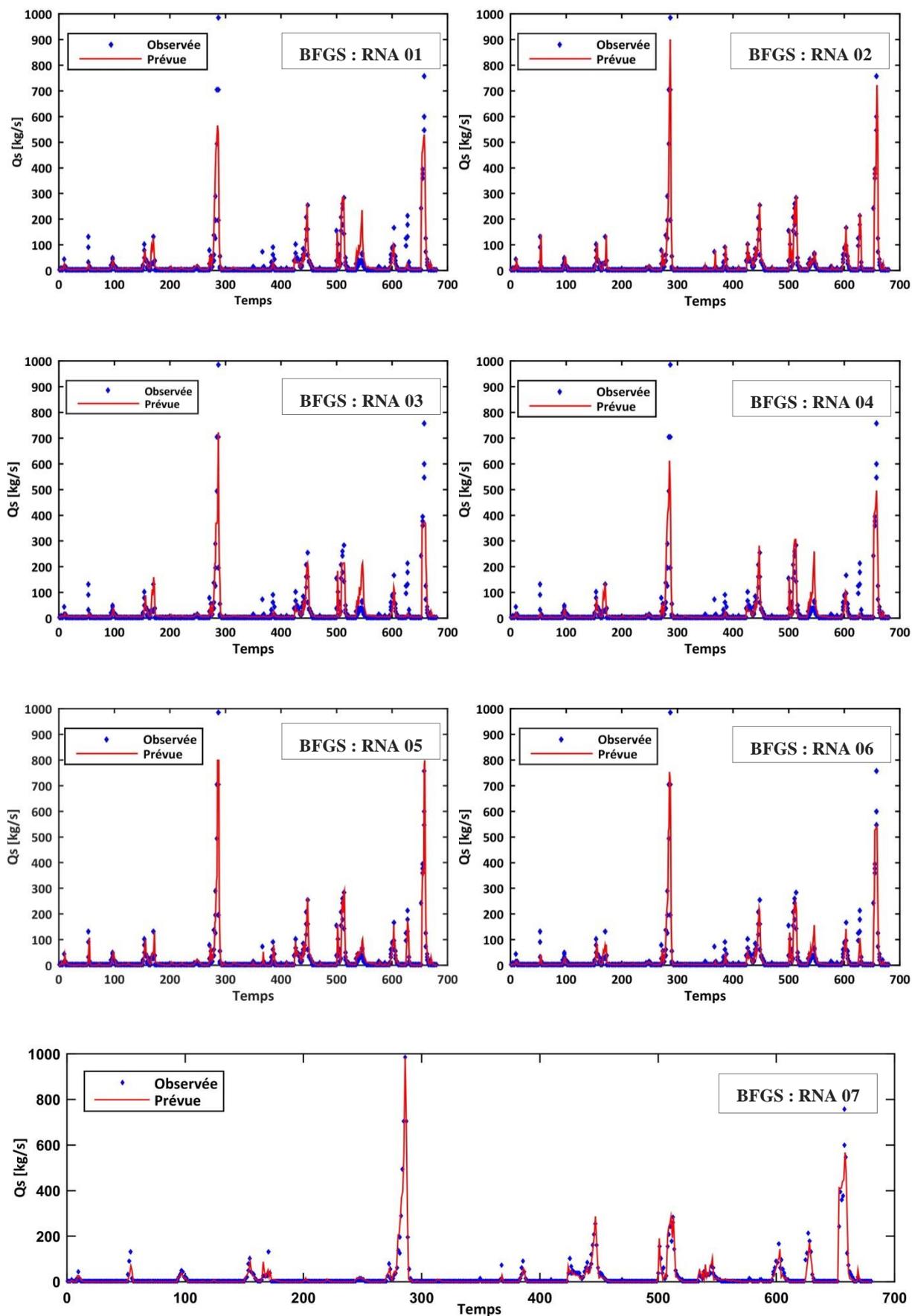


Fig. IV.4- Représentation des valeurs observées et celles simulées par l'algorithme BFGS.

IV-3.3 Amélioration de l'erreur par l'algorithme BFGS :

Comme il a été déjà présenté dans les sous-sections précédentes, l'utilisation de l'algorithme BFGS pour l'apprentissage du réseau de neurones de rétro-propagation (RNRP) a donné de meilleurs résultats par rapport à celui par l'algorithme LM. Aussi, on va discuter de l'amélioration des critères d'évaluation utilisés ; critère de Nash et Sutcliffe (NS) et l'erreur moyenne quadratique (RMSE) dans le RNRP basé sur l'algorithme BFGS. Le tableau IV.5 récapitule l'amélioration des erreurs dans les différentes combinaisons d'entrées entre les deux algorithmes d'apprentissage.

Tab. IV.5 : Amélioration des critères d'évaluation (NS et RMSE) entre les deux algorithmes utilisés (LM et BFGS).

No.	Combinaison d'entrée	Δ_{NS} [%]	Δ_{RMSE} [‰]
01	Q_{1t}	1,071	0,445
02	Q_{st-1}	0,843	0,206
03	Q_{1t-1}	0,283	0,088
04	Q_{1t} et Q_{1t-1}	1,387	0,491
05	Q_{1t-1} et Q_{st-1}	4,069	0,707
06	Q_{1t} et Q_{st-1}	6,552	1,739
07	Q_{1t} , Q_{1t-1} et Q_{st-1}	4,625	1,759

Selon le tableau IV.5, les meilleurs résultats d'amélioration ont été obtenus par les modèles 06 et 07. L'écart le plus élevé entre les RMSE est observé au niveau du modèle 07 avec une valeur de 1,76 ‰ suivi du modèle 06 avec une valeur estimée à 1,74 ‰. D'autre part, le modèle 06 a montré une meilleure amélioration de NS avec un écart de 6,55 % alors que dans le modèle 07 l'écart est de 4,63 %. Les modèles simulés 05, 04 et 01 ont également montré une bonne amélioration avec respectivement des écarts de NS de 4,07 %, 1,39 % et 1,07 % et des écarts de RMSE de 0,71 ‰, 0,49 ‰ et 0,45 ‰. De faibles améliorations ont été obtenues par les autres RNA également, toutefois ces améliorations ont été jugées non significatives par rapport aux modèles 06, 07, 05, 04 et 01.

L'amélioration obtenue en utilisant le BFGS comme algorithme d'apprentissage automatique explique le critère d'arrêt dans le BFGS en raison de la complexité des données introduites ainsi que l'utilisation de différentes combinaisons d'entrées, ce qui expose le processus d'apprentissage au sur-ajustement. Cependant, l'utilisation de RNRP en utilisant le BFGS comme algorithme d'apprentissage a amélioré la qualité des modèles, chose moins visible dans le cas de LM comme algorithme d'apprentissage de RNRP.

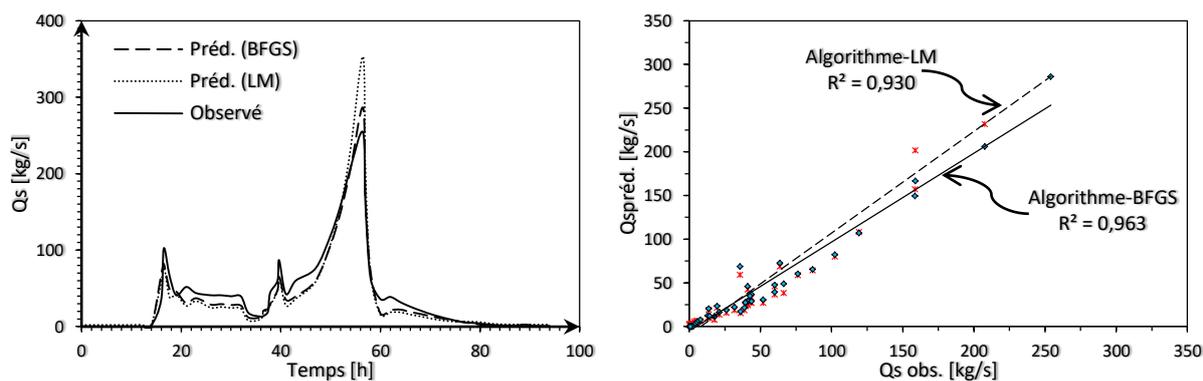


Fig. IV.5- Exemple de la crue du 06 au 09 Février 1996.

La figure IV.5 représente les débits solides instantanés observés et estimés en période de crue par le modèle RNA basé sur l’algorithme LM et son homologue basé sur l’algorithme BFGS entre le 06 et le 09 février 1996. Un très bon ajustement a été observé pour les deux modèles de réseaux de neurones avec une supériorité du modèle basé sur l’algorithme BFGS surtout pendant le pic de cette crue ; où le sur-ajustement est évident dans le modèle basé sur LM sachant que l’algorithme BFGS empêche le sur-ajustement durant la phase d’apprentissage.

IV-3.4 Estimation des apports solides :

L’estimation des apports solides en suspension dans les bassins versants est d’une grande importance car elle donne une idée sur la gravité du phénomène érosif dans le bassin versant ce qui la rend indispensable pour la gestion des différents systèmes hydrologiques.

Dans cette partie nous essayons d’estimer les apports solides en suspension transportés par l’oued Ressoul à la station hydrométrique d’Ain Berda, par l’utilisation du modèle neuronal basé essentiellement sur l’algorithme de Quasi-Newton (BFGS) ; pour ce faire, une série de données concernant 621 crues soit 51335 valeurs instantanées de la période allant de Décembre 1968 à Avril 2012 ont été utilisées. Durant cette période le limnigraphe auto-enregistreur de la station a fonctionné parfaitement, donc toutes les observations instantanées sont complètes et sûres à l’exception l’année hydrologique 1997/1998 qui est lacunaire.

L’oued Ressoul caractérisé par un écoulement non permanent, les crues dans ce cours d’eau ont une durée moyenne de 72 heures. Les hydrogrammes de ces événements sont généralement de forme creuse. La majorité des crues se manifeste entre Décembre et Avril avec de forts débits de pointes observés au mois de Janvier.

Les répartitions des classes de débits spécifiques moyens des crues en pourcentage sont représentées ci-dessous (tableau IV.6).

Tab. IV.6 : Répartition en pourcentage du nombre des crues enregistrées à la station hydrométrique d'Ain Berda (1968/69-2011/12).

Classe de débits spécifiques [l/s/km ²]	Nombre de crues	Nombre de crues en [%]
< 5	226	36,39
5 - 10	142	22,87
10 - 25	149	23,99
25 - 50	51	8,21
50 - 100	39	6,28
100 - 200	12	1,93
200 - 300	2	0,32

La classe la plus dominante est celle où les débits moyens sont inférieurs à 5 l/s/km² avec 36,4 % des cas, suivi par les deux classes de débits 5-10 l/s/km² et 10-25 l/s/km² avec des nombres plus importants de crues qui varient entre 142 (22,9 %) et 149 (24 %). D'autre part, l'étude fréquentielle de ces crues a montré que les classes de débits les plus élevées (100-200 l/s/km² et 200-300 l/s/km²) totalisent un pourcentage de 2,3 % des cas.

A partir des données instantanées de débits liquides en période de crues, nous avons calculé le transport solide en suspension entre 1968/69 et 2011/12. L'utilisation du réseau de neurone à rétro-propagation avec l'algorithme BFGS a abouti à des estimations des apports solides comprises entre $2,69 \cdot 10^2$ tonnes (pendant 24 heures) et $7,11 \cdot 10^4$ tonnes (pendant 192 heures). Sur une période de 42 ans ; 1,78 million de tonne de sédiments en suspension ont été transportés par l'oued Ressoul à la station d'Ain Berda (annexe II) ; Sur la base des travaux de DEMMAK (1982), MEGNOUNIF et al. (2004) on peut dire que cette valeur représente plus de 80 % de la charge totale des sédiments véhiculée dans la même période.

➤ L'automne caractérisé par des averses de courte durée et de forte intensité de pluie, après une longue période sèche ces averses provoquent de très fortes érosions notamment sur les versants nus.

Dans la saison automnale, et pendant la période 1968/69 à 2011/12, la station hydrométrique de Ain Berda a enregistré 92 crues donnant des apports liquides et solides variables allant de $9,76 \cdot 10^{-3}$ à $7,68 \text{ Hm}^3$ et de $0,29 \cdot 10^3$ à $3,58 \cdot 10^4$ tonnes.

A titre d'exemple, les deux crues du 17-24/11/1976 et du 13-14/11/2004 ont véhiculé respectivement $3,30 \cdot 10^4$ et $1,03 \cdot 10^4$ tonnes de sédiments en suspension pour des volumes d'eau de $7,68$ et $2,23 \text{ Hm}^3$ et des débits de pointes de $122,63$ et $157,66 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure IV.6).

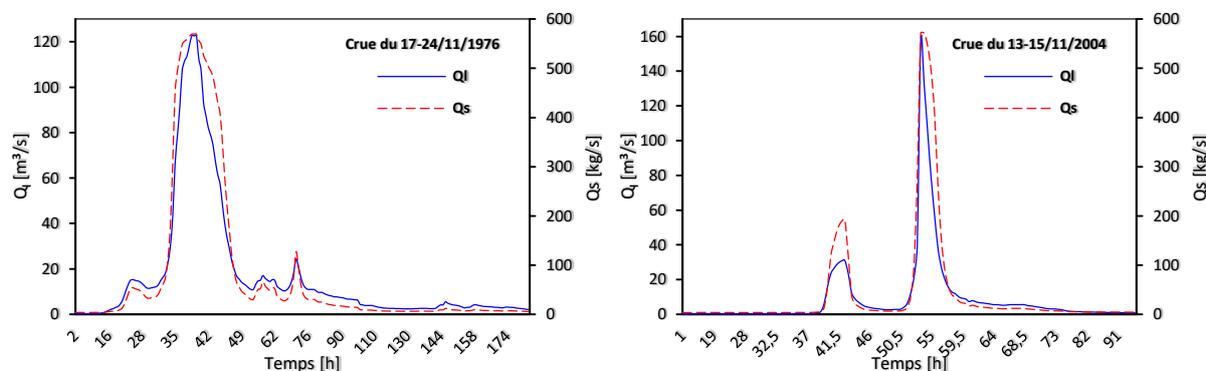


Fig. IV.6- Evolution de débits solides transportés et des débits liquides en fonction du temps, durant quelques importantes crues de l'automne.

➤ Les crues de l'hiver sont souvent provoquées par des pluies généralisées dans l'espace, continues et caractérisées par des pluies à moyennes et à fortes intensités. Les sols durant cette saison sont saturés, ce qui génère des écoulements plus importants que ceux de la saison automnale.

Le nombre de crues observées dans cette saison est le plus important des deux autres saisons (automne et printemps) soit 296 crues d'importance moyenne à forte. La contribution de ces crues a fourni 1,02 million de tonnes de charge solide pour un apport liquide de $240,08 \text{ Hm}^3$ pendant 42 hivers. Les deux crues de Janvier (06-11/01/1995 et 11-13/01/2003) transportent respectivement des apports solides de $3,19 \cdot 10^4$ et $2,98 \cdot 10^4$ tonnes pour des apports liquides en crues allant $6,91$ et $5,21 \text{ Hm}^3$ (figure IV.7).

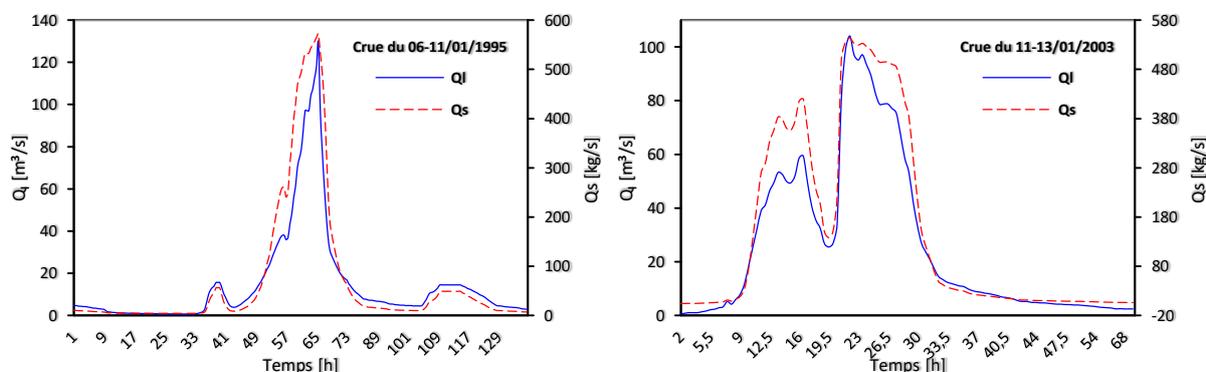


Fig. IV.7- Evolution de débits solides transportés et des débits liquides en fonction de temps, durant quelques importantes crues de l'hiver.

➤ La saison printanière, qui par ses apports liquides et solides variant entre 0,01 à 9,31 Hm³ et entre 0,30*10³ à 5,06*10⁴ tonnes, est considérée la moins alimentée en sédiments fins. Les deux importantes crues observées pour cette saison (21-23/04/1970 et 08-11/03/2012) transportent respectivement 1,77*10⁴ et 4,57*10⁴ tonnes des matières en suspension pour des volumes d'eau de 3,51 et 8,46 Hm³ (figure IV.8).

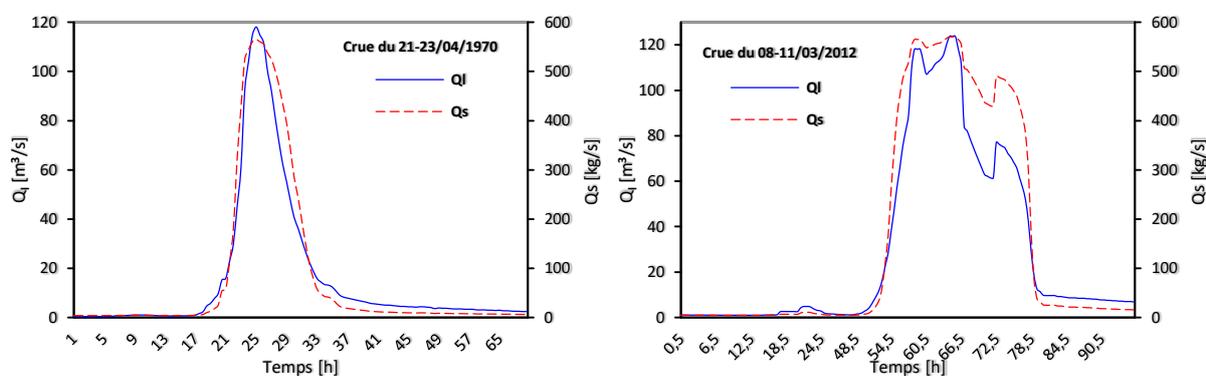


Fig. IV.8- Evolution des débits solides transportés et des débits liquides en fonction du temps, durant quelques importantes crues de printemps.

IV-4 Synthèse

Le principal but de ce chapitre a été la prédiction de MES dans le bassin versant de l'oued Ressoul en période de crue. Pour ce faire, on a employé deux modèles de réseau de neurones à retro-propagation (BPNN) avec deux algorithmes d'apprentissage différents; le Levenberg Marquardt (LM) et le Quasi-Newton (BFGS). Les deux modèles ont été simulés en utilisant différentes combinaisons d'entrée.

Il a été constaté que l'apprentissage du RNRP par l'algorithme Quasi-Newton (BFGS) a donné des valeurs plus proches de celles observées comparé à l'apprentissage par Levenberg Marquardt (LM), peu importe la combinaison d'entrée. Le meilleur RNA est celui du modèle 07 avec le Q_1 actuel et antécédent et le Q_s antécédent. En plus, il a été constaté que la prédiction des débits solides uniquement en se basant sur la valeur du Q_1 à t_0 ou la valeur du Q_s antécédent est très significative; ce qui améliore la corrélation entre ces derniers et le débit solide (Q_s).

Les résultats de la présente étude montrent que l'utilisation des réseaux de neurones à retro-propagation est très fiable pour la simulation des MES dans les cours d'eau et que l'apprentissage par l'algorithme Quasi-Newton (BFGS) peut donner de meilleurs résultats que celui par l'algorithme LM.

L'utilisation du réseau de neurone à rétro-propagation avec l'algorithme BFGS a abouti à des estimations des apports solides comprises entre 269 tonnes (pendant 24 heures) et 71091 tonnes (pendant 192 heures). Sur une période de 42 ans allant de 1968/1969 à 2011/2012, 1,78 million de tonne des sédiments en suspension ont été transportés par l'oued Ressoul à la station hydrométrique de Ain Berda ; on peut dire que cette valeur représente plus de 80 % des sédiments totales véhiculés dans la même période.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La présente étude s'articule sur la modélisation de l'érosion hydrique et de transports solides en suspension à l'échelle des bassins versants par l'utilisation du modèle RUSLE sous SIG et les réseaux de neurones artificiels dans le MATLAB. Donc à la lumière de cette étude, on peut conclure les points suivants :

Les deux bassins versants choisis pour cette étude sont situés dans la partie Nord-Est de l'Algérie et font partie de la Seybouse. Il s'agit des bassins versants de l'oued Bouhamdane (1105 km²) et de l'oued Ressoul (103 km²).

La zone étudiée est marquée par un relief hétérogène, accidenté où prédominent les pentes de classes moyennes à fortes sur environ 65 % de la superficie totale pour les deux bassins versants. Les deux bassins présentent un coefficient de torrencialité assez fort, de 9,85 pour le bassin de Bouhamdane et 10,39 pour le bassin de l'oued Ressoul, ce qui traduit une faible accumulation des eaux et un écoulement très important dans les deux bassins.

Le régime climatique est à dominance méditerranéenne avec un été sec et chaud et un hiver humide et frais. Sur le bassin versant de l'oued Bouhamdane, les précipitations moyennes annuelles durant la période 1921-1989 varient entre 433 et 728 mm, avec une moyenne de 572 mm et sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Ressoul elles varient de 620 à 714 mm, avec une moyenne de l'ordre de 681 mm. Les températures moyennes mensuelles varient entre 9,7 et 27,4 °C avec une moyenne interannuelle de 18,01 °C pour le bassin versant de l'oued Bouhamdane, et entre 11,3 et 26 °C avec une moyenne de l'ordre de 17,95 °C pour le bassin versant de l'oued Ressoul.

Durant 19 ans d'observation (1968/69-1986/87), la station de Medjez Amar II qui contrôle le bassin versant de l'oued Bouhamdane reçoit annuellement 84,28 Hm³ d'apport liquide pour un débit moyen de 2,69 m³/s, soit une lame d'eau ruisselée de l'ordre de 76,27 mm/an. L'année 1984/85 est la plus humide pour la même période de mesure avec un fort apport annuel de 270 Hm³, alors que l'année la plus sèche (1968/69) n'a reçu que 7,17 Hm³.

Le bassin versant de l'oued Ressoul débite à la station de Ain Berda 0,44 m³/s ce qui correspond à un apport moyen annuel de l'ordre de 13,61 Hm³ et une lame d'eau écoulée de 132,17 mm/an sur 48 années d'observation (1964/65 - 2011/12). L'année la plus humide (2002/03) a fourni un important volume d'eau d'environ 47,5 million de m³, l'année la plus sèche 1987/88 est caractérisée par un faible apport annuel ne dépassant pas 0,15 Hm³.

L'application du modèle de prévision de perte en sol (RUSLE) sur le bassin versant de l'oued Bouhamdane sous ArcGIS a permis de :

- ✓ Enregistrer une base de données multi-information, spatialisée sur l'ensemble du bassin versant ;
- ✓ Cartographier tous les facteurs impliqués dans le processus d'érosion à savoir l'érosivité des pluies (R), la topographie (LS), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C) et les pratiques antiérosives (P) ;
- ✓ Établir une carte de pertes en sol sur la totalité du bassin versant de l'oued Bouhamdane ;
- ✓ Hiérarchiser les différents secteurs du bassin versant selon leur sensibilité à l'érosion hydrique ;
- ✓ Identifier les secteurs de forte dégradation qui nécessitent des interventions très urgentes ;
- ✓ Mettre à la disposition des autorités responsables un support de base pour l'aide à la décision dans les futurs projets d'aménagements anti érosif du bassin versant.

Les résultats de l'application du modèle RUSLE ont montré que la perte moyenne des sols par le phénomène érosif est de l'ordre de 11,18 t/ha/an, cette valeur dépasse la limite moyenne de tolérance des sols vis-à-vis de l'érosion (7 t/ha/an). Le taux d'érosion varie d'un site à l'autre, il est important dans les zones à proximité de la retenue du barrage Hammam Debagh. Ces zones caractérisées par des terres plus érodées à fortes pentes, sont des zones sérieusement menacées par l'érosion hydrique.

Une grande partie soit 40,15 % de la superficie totale du bassin versant de l'oued Bouhamdane est marquée par un taux d'érosion inférieur à 7 t/ha/an, contre 14,33 % des terres qui montrent une perte de sol très importante (supérieur ou égal 20 t/ha/an), soit en moyenne plus de 1 mm d'épaisseur de sols.

La carte du risque érosif a montré que le risque n'apparaît pas de manière homogène sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Bouhamdane ; il est qualifié de faible à modéré sur une superficie de 89760 ha soit 85 %. Dans le reste, soit 15 % le risque d'érosion apparaît plus problématique classé de fort à très fort.

La modélisation des transports de matières en suspension (MES) à la station hydrométrique de Ain Berda sur l'oued Ressoul par l'utilisation des réseaux de neurones à retro-propagation (RNRP) avec deux algorithmes d'apprentissage différents ; Levenberg Marquardt (LM) et le Quasi-Newton (BFGS) nous a permis de :

- ✓ Développer des modèles neuronaux efficaces et précis pour la prédiction des transports solides en suspension ;
- ✓ Dédire le meilleur modèle prédictif avec les entrées : le débit liquide (Q_l) actuel et antécédent et le débit solide (Q_s) antécédent. En plus, il a été constaté que la prédiction des débits solides uniquement en se basant sur la valeur du Q_l à t_0 ou la valeur du Q_s antécédent est très significative, ce qui améliore la corrélation entre ces derniers et le Q_s ;
- ✓ Constater que l'apprentissage du RNRP par l'algorithme BFGS est plus efficace que l'apprentissage par l'algorithme LM, résultat différent par rapport à la littérature où la plupart des chercheurs ont utilisé l'algorithme LM dans la phase d'apprentissage ;
- ✓ Prédire les MES dans le bassin versant de l'oued Ressoul à l'échelle des événements extrêmes (crues).

En générale, l'utilisation des réseaux de neurones à retro-propagation (RNRP) est très fiable pour la simulation des MES dans les cours d'eau et que l'emploi de l'algorithme Quasi-Newton (BFGS) durant la phase d'apprentissage peut donner de meilleurs résultats que celui par l'algorithme LM.

L'utilisation du RNRP avec l'algorithme BFGS a abouti à des estimations des apports solides comprises entre 269 tonnes (pendant 24 heures) et 71091 tonnes (pendant 192 heures). Sur une période de 42 ans (1968/1969-2011/2012) et pendant 621 crues, 1,78 million de tonne de sédiments en suspension ont été transportés par l'oued Ressoul à la station de Ain Berda.

PERSPECTIVES

La présente recherche pourrait être suivie par les perspectives suivantes :

- Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane par l'application d'autres modèles tel-que WEPP (Water Erosion Prediction Project), SWAT (Soil and Water Assessment Tool), et par la suite comparer les résultats avec celles trouvées par le modèle RUSLE ;
- Elaboration d'un plan d'aménagement antiérosif sur l'ensemble du bassin de l'oued Bouhamdane selon la carte du degré de sensibilité de terres à l'érosion hydrique par la classification des secteurs par ordre de priorité, les secteurs de priorité forte sont appelés à être protégés en premier lieu et d'une façon approfondie par un couvert végétal approprié ;
- les résultats obtenus par l'application du modèle RUSLE nécessitent dans l'avenir une mise à jour pour mieux contrôler le phénomène érosif dans le bassin versant, et puis dégager un autre support de base pour l'élaboration d'un nouveau plan d'aménagements anti érosif ;
- Modélisation des transports solides en suspension par l'emploi des réseaux de neurones artificiels dans les bassins versants non jaugés (qui ne disposent pas des mesures de concentration des MES) sur la base de bassins jaugés plus proches ;
- En vue de la complexité du phénomène de transport solide notamment en période de crue, il sera mieux de compléter notre recherche de la modélisation des transports solides dans le bassin versant de l'oued Ressoul à l'aide des RNA par la technique de régularisation pour éviter la sous-estimation ou la sur-estimation des résultats et de bien cerner le phénomène durant les évènements extrêmes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHITE M., OUILLOON S. 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *Journal of Hydrology*. Vol. 343. p. 187-202.
- ACHOURI M. 1995. La conservation des eaux et du sol en Tunisie: bilan et perspectives. *Cahiers Options Méditerranéennes*. Vol. 9. p. 35-47.
- ADEDIJI A., TUKUR A.M., ADEPOJU K.A. 2010. Assessment of Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Katsina Area, Katsina State of Nigeria using Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS). *Iranica Journal of Energy and Environment*. Vol. 1. Iss. 3. p. 255-264.
- AFAN H.A., EL-SHAFIE A., YASEEN Z.M., HAMEED M.M., MOHTAR W.H.M.W., HUSSAIN A. 2015. ANN based sediment prediction model utilizing different input scenarios. *Water resources management*. Vol. 29. Iss. 4. p. 1231-1245.
- ALKHARABSHEHA M.M., ALEXANDRIDISA T.K., BILASB G., MISOPOLINOSB N., SILLEOSA N. 2013. Impact of land cover change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS. *Procedia Environmental Sciences*. Vol. 19. p. 912 – 921.
- ALP M., CIGIZOGLU H. K. 2007. Suspended sediment load simulation by two artificial neural network methods using hydrometeorological data. *Environmental Modelling and Software*. Vol. 22. Iss. 1. p. 2-13.
- ANGIMA S.D., STOTT D.E., O'NEILI M.K., ONG C.K., WEESIES G.A. 2003. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol. 97. Iss. 1. p. 295-308.
- ANYS H. 1991. Utilisation des données de télédétection dans un système d'information géographique pour l'étude de l'érosion hydrique du bassin versant de l'Oued Aricha (Settat - Maroc). *Mémoire de Maîtrise, Département de géographie et télédétection. Université de Sherbrooke, Québec, Canada*. 83 p.
- ANYS H., BONN F., MERZOUK A. 1994. Remote Sensing and GIS Based Mapping and Modeling of Water Erosion and Sediment Yield in a Semi-Arid Watershed of Morocco *Geocarto International*. Vol. 9. Iss. 1. p. 31-40.
- BALLA F., KABOUICHE N., KANCHOUL K., BOUGUERRA H. 2017. Hydro-sedimentary flow modelling in some catchments Constantine highlands, case of Wadis Souttez and Reboa (Algeria). *Journal of Water and Land Development*. Vol. 34. p. 21-32.
- BENBRAHIM K.F., ISMAILI M., BENBRAHIM S.F., TRIBAK A. 2004. Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation: impact du phénomène au Maroc. *Science et changements planétaires/Sécheresse*. Vol. 15. Iss. 4. p. 307-320.
- BENCHAIABA L. 2006. Condition d'écoulement et impact sur la mobilisation des ressources en eau, bassin versant de l'oued Bouhamdane (W. de Guelma, Est Algérien). *Thèse de magister. Université El-Hadj Lakhdar Batna*. 213 p.

- BENKADJA R., BOUSSAG F., BENKADJA A. 2015. Identification et évaluation du risqué d'érosion sur le bassin versant du K'sob (Est Algérien). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. 74. Iss. 1. p. 91-102.
- BISWAS S.S., PANI P. 2015. Estimation of soil erosion using RUSLE and GIS techniques: a case study of Barakar River basin, Jharkhand, India. *Modeling Earth Systems and Environment*. Vol. 42. p. 1-13.
- BOLLINNE A., ROSSEAU P. 1978. Erodibilité des sols de moyenne et haute Belgique, utilisation d'une méthode de calcul du facteur K de l'équation universelle de perte en terre. *Bulletin Société Belge d'Etudes Géographiques*. Vol. 14. Iss. 4. p. 127-140.
- BONN F. 1998. La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG: possibilités, erreurs et limites. *Science et changements planétaires/Sécheresse*. Vol. 9. Iss. 3. p. 185-192.
- BOUANANI A.R. 2004. Hydrologie, transport solide et modélisation ; étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie). Thèse de doctorat d'état. Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. 250 p.
- BOUANANI A., BABA-HAMED K., FANDI W. 2013. Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued Sikkak (Tafna – nord-ouest Algérie). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*. Vol. 26. Iss. 2. p. 119-132.
- BOUGUERRA H., BOUANANI A., KHANCHOUL K., DERDOUS O., TACHI S.E. 2017. Mapping erosion prone areas in the Bouhamdane watershed (Algeria) using the Revised Universal Soil Loss Equation through GIS. *Journal of Water and Land Development*. Vol. 32. p. 13–23.
- BOUHADEB CH.E., MENANI M.R., BOUGUERRA H., DERDOUS O. 2018. Assessing soil loss using GIS based RUSLE methodology. Case of the Bou Namoussa watershed – North-East of Algeria. *Journal of Water and Land Development*. No. 36 p. 27–35.
- BOUKHRISZA Z.A., KHANCHOUL K., LE-BISSONNAIS Y., TOURKI M. 2013. Prediction of sediment load by sediment rating curve and neural network (ANN) in El Kebir catchment, Algeria. *Journal of Earth System Science*. Vol. 122. Iss. 5. p. 1303–1312.
- BOULMAIZ T., OUERDACHI L., BOUTOUTAOU D., BOUTAGHANE H. 2016. Single neural network and neuro-updating conceptual model for forecasting runoff. *International Journal of Hydrology Science and Technology*. Vol. 6. Iss. 4. p. 344-358.
- BOUZERIA H., GHENIM A.N., KHANCHOUL K. 2017. Using artificial neural network (ANN) for prediction of sediment loads, application to the Mellah catchment, northeast Algeria. *Journal of Water and Land Development*. Vol. 33. p. 47–55.
- BROYDEN C.G. 1970. The Convergence of Single-Rank Quasi-Newton Methods. *Mathematics of computation*. Vol. 24. Iss. 110. P. 365-382.
- CHEN H., EL-GAROUANI A., LEWIS L.A. 2008. Modelling soil erosion and deposition within a Mediterranean mountainous environment utilizing remote sensing and GIS – Wadi Tlata, Morocco. *Geographica Helvetica*. Vol. 63. Iss. 1. p. 36-47.

- CLAIR T.A., EHRMAN J.M. 1998. Using neural networks to assess the influence of changing seasonal climates in modifying discharge, dissolved organic carbon, and nitrogen export in eastern Canadian rivers. *Water Resources Research*. Vol. 34. Iss. 3. p. 447-455.
- CORMARY Y., MASSON J. 1964. Etude de conservation des eaux et du sol au centre de recherches du génie rural de Tunisie, application à un projet type de la formule de perte de sols de Wischmeier. *Cahiers ORSTOM, série pédologie*. Vol. 2. Iss. 3. p. 3-26.
- COTE M. 1998. Les régions bioclimatiques de l'Est Algérien. *Rhumel*. Vol. 6. p. 57-71.
- DAO V.N., VEMURI V.R. 2002. A performance comparison of different back propagation neural networks methods in computer network intrusion detection. *Differential equations and dynamical systems*. Vol. 10. Iss. 1-2. p. 201-214.
- DE-MARTONNE E. 1926. Aréisme et indice d'aridité. *Comptes rendus Académie des Sciences*. Vol. 181. p. 1395-1398.
- DEMMAK A. 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie - France, 323 p.
- DENNIS J., MORÉ J. 1977. Quasi-Newton Methods, Motivation and Theory. *SIAM Review*, Society for Industrial and Applied Mathematics. Vol. 19. Iss. 1. p.46-89.
- DESMET P.J.J., GOVERS G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol. 51. Iss. 5. p. 427-433.
- DUBREUIL P. 1966. Les caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versants, leur détermination avec une précision acceptable. *Cahiers ORSTOM, série hydrologie*. Vol. 3. Iss. 5. 31 p.
- DUBREUIL P., GUISCAFRE J. 1971. La planification du réseau hydrométrique minimal. *Cahiers ORSTOM, série hydrologie*. Vol. 8. Iss. 2. p. 3-37.
- DUBREUIL P., MORELL M., SECHET P. 1975. Comportement et interaction des paramètres physiques de petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. *Cahiers ORSTOM, série hydrologie*. Vol. 12. Iss. 1. p. 13-36.
- ELGAALI E., GARCIA L.A. 2007. Using neural networks to model the impacts of climate change on water supplies. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 133. Iss. 3. p. 230-243.
- EL-GAROUANI A., CHEN H., LEWIS L., TRIBAK A.L., ABAHROUR M. 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG IDRISI au Nord-Est du Maroc. *Téledétection, Editions scientifiques GB*. Vol. 8. Iss. 3. p. 193-201.
- EMBERGER L. 1955. Une classification biogéographique des climats. *Recueil des travaux des laboratoires de Botanique, Géologie et Zoologie de la Faculté des Sciences de l'université de Montpellier. Fascicule 7*. p. 3-43.

- FLETCHER R. 1970. A new approach to variable metric algorithms. The computer journal. Vol. 13. Iss. 3. p. 317-322.
- FOSTER G.R., MCCOOL D.K., RENARD K.G., MOLDENHANER W.C. 1981. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric units. Journal of Soil and Water Conservation. Vol. 36. Iss. 6. p. 355-359.
- GHENIM A., SEDDINI A., TERFOUS A. 2007. Production et exportation des sédiments en suspension lors des évènements de crue, cas du bassin versant de l'oued Mouilah. Larhyss Journal. Vol. 06. p. 35-44.
- GOLDFARB D. 1970. A Family of Variable-Metric Methods Derived by Variational Means. Mathematics of computation. Vol. 24. P. 23-26.
- GOLOB R., ŠTOKELJ T., GRGIČ D. 1998. Neural-network-based water inflow forecasting. Control engineering practice. Vol. 6. Iss. 5. p. 593-600.
- HAGAN M.T., MENHAJ M.B. 1994. Training multilayer networks with the Marquardt algorithm. IEEE transactions on Neural Networks. Vol. 5. Iss. 6. p. 989-993.
- HAGAN M.T., DEMUTH H.B., BEALE M. 1996. Neural Network Design. PWS Publishing, Boston.
- HALFF A.H., HALFF H.M., AZMOODEH M. 1993. Predicting runoff from rainfall using neural networks. Engineering hydrology. p. 760-765.
- HALLOUCHE W. 2007. Prévision du transport solide et sédimentation des barrages. Thèse de doctorat en sciences. Université Mohamed Khider - Biskra. 105 p.
- HAYKIN S. 2009. Neural Networks and learning machines. Pearson Prentice Hall.
- HEUSCH B. 1971. Estimation et contrôle de l'érosion hydrique. Société des sciences naturelles et physiques du Maroc. Vol. 37. p. 41-54.
- HICKEY R. 2000. Slope angle and slope length solutions for GIS. Cartography. Vol. 29. Iss. 1. p. 1-8.
- HOROWITZ A.J., ELRICK K.A., SMITH J.J. 2001. Estimating suspended sediment and trace element fluxes in large river basins : methodological considerations as applied to the NASQAN programme. Hydrological processes. Vol. 15. p. 1107-1132.
- HORTON R.E. 1932. Drainage basin characteristics. Eos Transactions American Geophysical Union. Vol. 13. Iss. 1. p. 350-361.
- HORTON R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America. Vol. 56. Iss. 3. p. 275-370.
- JAIN S.K., DAS A., SRIVASTAVA D.K. 1999. Application of ANN for reservoir inflow prediction and operation. Journal of water resources planning and management. Vol. 125. Iss. 5. p. 263-271.

- JANSSON M.B. 1996. Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. *Journal of Hydrology*. Vol. 183. p. 227-241.
- KAMP R.G., SAVENIJE H.H.G. 2007. Hydrological model coupling with ANNs. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. Vol. 11. Iss. 6. p. 1869-1881.
- KANG K.W., KIM J.H., PARK C.Y., HAM K.J. 1993. Evaluation of hydrologic forecasting system based on neural network model. In proceedings of the congress-international association for hydraulic research. Local organizing committee of the XXV congress.
- KHANCHOUL K. 2006. Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants de l'extrême Nord-Est algérien. Thèse de doctorat d'Etat. Université Badji Mokhtar – Annaba. 296 p.
- KHANCHOUL K., JANSSON M.B. 2008. Sediment rating curves developed on stage and seasonal means in discharge classes for the Mellah wadi, Algeria. *Geografiska Annaler : Series A, Physical Geography*. Vol. 90. Iss. 3. p. 227-236.
- KHANCHOUL K., ALTSCHUL R., ASSASSI F. 2009. Estimating suspended sediment yield, sedimentation controls and impacts in the Mellah Catchment of Northern Algeria. Vol. 2. Iss. 3. p. 257-271.
- KHANCHOUL K., BENSLAMA M., REMINI B. 2010. Regressions on Monthly Stream Discharge to Predict Sediment Inflow to a Reservoir in Algeria. *Journal of Geography and Geology*. Vol. 2. Iss. 1. p. 36-47.
- KHANCHOUL K., TOURKI M., LE-BISSONNAIS Y. 2014. Assessment of the artificial neural networks to geomorphic modelling of sediment yield for ungauged catchments, Algeria. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. Vol. 8. Iss. 2. p. 175-185.
- KIŞI Ö. 2004. River flow modeling using artificial neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 9. Iss. 1. p. 60-63.
- LABORDE J.P. 2013. *Eléments d'hydrologie de surface*. Ecole polytechnique de l'université de Nice - Sophia Antipolis, Biot – France. 215 p.
- LEKFIR A., ALI T., DECHEMI N. 2006. Quantification du transport solide par la technique floue, application au barrage de Béni Amrane (Algérie). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*. Vol. 19. Iss. 3. p. 247-257.
- LIGONJA P.J., SHRESTHA R.P. 2013. Soil erosion assessment in Kondoa eroded area in Tanzania using Universal Soil Loss Equation, Geographic Information Systems and socioeconomic approach. *Land Degradation & Development*. Vol. 26. Iss. 4. p. 367-379.
- LOUAMRI A., MEBARKI A., LAIGNEL B. 2013. Variabilité interannuelle et intra-annuelle des transports solides de l'Oued Bouhamdane, à l'amont du barrage Hammam Debagh (Algérie orientale). *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 58. Iss. 7. p. 1559-1572.

- MARQUARDT D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*. Vol. 11. Iss. 2. p. 431-441.
- MATI B.M., VEIHE A. 2001. Application of the USLE in a savannah environment : comparative experiences from east and west Africa. *Singapore Journal of Tropical Geography*. Vol. 22. Iss. 2. p. 138-155.
- MCCOOL D.K., FOSTER G.R., MUTCHLER C.K., MEYER L.D. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*. Vol. 32. Iss. 5. p. 1571-1576.
- MEBARKI A. 2005. Hydrologie des bassins de l'Est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de doctorat d'état. Université Mentouri de Constantine. 360 p.
- MEDDI M., TOUMI S., ASSANI A.A. 2016. Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 9. Iss. 4. p. 1-13.
- MEDJILI F. 2010. Modélisation par Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et commande prédictive non linéaire d'une station de production d'eau froide. Thèse de magister. Université Badji Mokhtar – Annaba. 98 p.
- MEGNOUNIF A., TERFOUS A., BOUANANI A. 2003. Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau*. Vol. 16. Iss. 3. p. 369-380.
- MEGNOUNIF A., TERFOUS A., GHENAIM A., POULET J.B. 2004. Rôle des crues dans la production de sédiments transportés en suspension dans un cours d'eau des bassins versants méditerranéens. VIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Compiègne 2004. 8 p.
- MHANGARA P., VINCENT K., KYOUNG J.L. 2012. Soil erosion risk assessment of the Keiskamma catchment, South Africa using GIS and remote sensing. *Environ Earth Science*. Vol. 65. p. 2087–2102.
- MITASOVA H., HOFIERKA J., ZLOCHA M., IVERSON L.R. 1996. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*. Vol. 10. Iss. 5. p. 629-641.
- MOORE I.D., BURCH G.J. 1986. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sciences Society America Journal*. Vol. 50. Iss.5. p. 1294-1298.
- MOORE I.D., WILSON J.P. 1992. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation : Simplified method of estimation. *Journal of Soils and Water Conservation*. Vol. 47. Iss. 5. p. 423-428.
- MUSTAFA M.R., REZAUR R.B., SAIEDI S., ISA M.H. 2012. River suspended sediment prediction using various multilayer perceptron neural network training algorithms - a case study in Malaysia. *Water resources management*. Vol. 26. Iss. 7. p. 1879-1897.

- MUSY A. 2005. Cours d'hydrologie générale. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. En ligne: <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>
- MUTTIAH R.S., SRINIVASAN R., ALLEN P.M. 1997. Prediction of two year peak stream discharges using neural networks. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. Vol. 33. Iss. 3. p. 625-630.
- NAGY H.M., WATANABE K.A.N.D., HIRANO M. 2002. Prediction of sediment load concentration in rivers using artificial neural network model. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 128. Iss. 6. p. 588-595.
- NASH J.E., SUTCLIFFE J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. Journal of hydrology. Vol. 10. Iss. 3. p. 282-290.
- NETELER M., MITASOVA H. 2004. Open Source GIS : A GRASS GIS approach. Using GRASS : Application examples. The International Series in Engineering and Computer Science 773 (Chapitre 12). p. 289-325.
- PIKE R.J., WILSON S.E. 1971. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area altitude analysis. Geological Society of America Bulletin. Vol. 82. Iss. 4. p. 1079-1084.
- PROBST J.L., SUCHET P.A. 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). Hydrological Sciences Journal. Vol. 37. Iss.6. p. 621-637.
- REMINIERAS G. 1976. L'hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles editions, Paris - France. 456 p.
- RENARD K.G., FOSTER G.R., WEESIES G.A., MCCOOL D.K., YODER D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U. S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook No. 703.
- RIAD S. 2003. Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse de doctorat. Université des sciences et technologies de Lille/Université Ibnou Zohr d'Agadir. 154 p.
- RIAD S., MANIA J. 2004. Rainfall-Runoff Model Using an Artificial Neural Network Approach. Mathematical and Computer Modelling. Vol. 40. p. 839-846.
- ROCHE M. 1963. Hydrologie de surface. ORSTOM et Gauthier-Villars, Paris - France. 431 p.
- ROOSE E. 1977. Adaptation des méthodes de conservation des sols aux conditions écologiques et socio-économiques de l'Afrique de l'Ouest. Agronomie tropicale. Vol. 32. Iss. 2. p. 132-140.
- ROOSE E., SARRAILH J.M. 1990. Erodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. Cahiers de l'ORSTOM, série pédologique. Vol. 25. p. 7-30.
- ROOSE E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO, ORSTOM – France. N° 70. 442 p.
- RUMELHART D.E., HINTON G.E., WILLIAMS R.J. 1986. Learning representations by back-propagating errors. Nature. Vol. 323. p. 533-536.

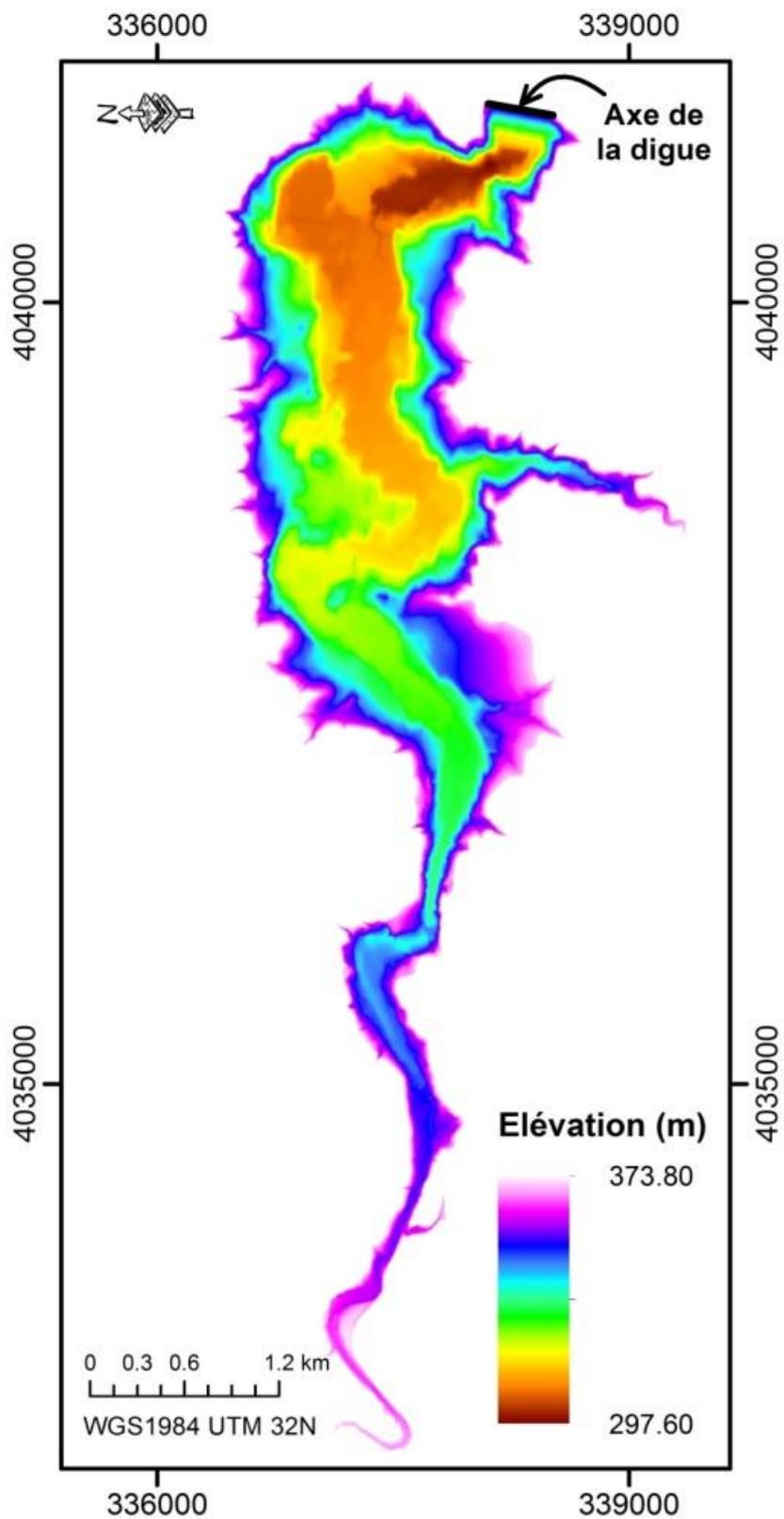
- SADIKI A., BOUHLASSA S., AUAJAR J., FALEH A., MACAIRE J.J. 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab. Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre. Vol. 26. p. 69-79.
- SADIKI A., FALEH A., ZÉZERE J.L., MASTASS H. 2009. Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla Rif central Maroc. Cahiers Géographiques. Vol. 6. p. 59-70.
- SAHOO G.B., RAY C., DE-CARLO E.H. 2006. Use of neural network to predict flash flood and attendant water qualities of a mountainous stream on Oahu, Hawaii. Journal of Hydrology. Vol. 327. Iss. 3-4. p. 525-538.
- SAVIC D.A., WALTERS G.A., DAVIDSON J.W. 1999. A genetic programming approach to rainfall-runoff modelling. Water Resources Management. Vol. 13. Iss. 3. p. 219-231.
- SHANNO D.F. 1970. Conditioning of Quasi-Newton Methods for Function Minimization. Mathematics of computation. Vol. 24. Iss. 111. P. 647-656.
- SMITH H.J. 1999. Application of Empirical Soil Loss Models in Southern Africa : a review. South African Journal of Plant and Soil. Vol. 16. Iss. 3. p. 158-163.
- STONE R.P., HILBORN D. 2012. Universal Soil Loss Equation (USLE). Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 8p.
- STRAHLER A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Eos Transactions American Geophysical Union. Vol. 38. Iss. 6. p. 913-920.
- TACHI S.E., OUERDACHI L., REMAOUN M., DERDOUS O., BOUTAGHANE H. 2016. Forecasting suspended sediment load using regularized neural network : Case study of the Isser River (Algeria). Journal of Water and Land Development. Vol. 29. p. 75-81.
- TACHI S.E. 2017. Contribution to the characterization and the modelling of sediment transport in urban hydro-systems. Doctorate thesis. University of Hassiba Benbouali, Chlef. 136 p.
- TERFOUS A., MEGNOUNIF A., BOUANANI A. 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). Revue des sciences de l'eau. Vol. 14. Iss. 2. p. 173-185.
- THORNTHWAITE C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical review. Vol. 38. Iss. 01. p. 55-94.
- TOUAIBIA B., DAUTREBANDE S., GOMER D., AIDAOU A. 1999. Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : bassin versant de l'oued Mina. Hydrological sciences journal. Vol. 44. Iss. 6. p. 973-986.
- TOURKI M., KHANCHOUL K., LE-BISSONNAIS Y., BELALA F. 2017. Estimation des transports solides dans le bassin versant de l'oued Kébir amont, Oued Kébir Rhumel ,Nord-Est Algérien (1973-2006). Revue des sciences et technologie, Synthèse. Vol. 34. p. 122-133.

- WANG W.C., CHAU K.W., CHENG C.T., QIU L. 2009. A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. *Journal of hydrology*. Vol. 374. Iss. 3-4. p. 294-306.
- WILAMOWSKI B.M., YU H. 2010. Improved computation for Levenberg-Marquardt training. *IEEE transactions on neural networks*. Vol. 21. Iss. 6. p. 930-937.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains : Guide for selection of practices for soil and water conservation. U. S. Department of Agriculture. *Agriculture Handbook No. 282*.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses : A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture. *Agriculture Handbook No. 537*.
- ZHU Y.M., LU X.X., ZHOU Y. 2007. Suspended sediment flux modeling with artificial neural network : An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China. *Geomorphology*. Vol. 84. Iss. 1-2. p. 111-125.

ANNEXES

Annexe I :

Levé bathymétrique de la cuvette du barrage Hammam Debagh, Mars 2004.



Annexe II :

Résultats de simulation des transports solides à la station hydrométrique d'Ain Berda en période de crue par l'utilisation des RNA (1968/69-2011/12).

N°	Date de la crue	$Q_{l_{moy}}$ [m ³ /s]	$Q_{l_{max}}$ [m ³ /s]	V [Hm ³]	$Q_{s_{moy}}$ [kg/s]	$Q_{s_{max}}$ [kg/s]	A_s [t]	A_{ss} [t/km ²]
1	12-13/12/1968	0,78	7,00	0,13	4,18	15,81	721,47	7
2	15-12-1968	0,39	1,59	0,03	3,75	5,03	324,13	3,15
3	03-05/01/1969	0,87	5,94	0,23	4,35	12,95	1127,02	10,94
4	11-12/01/1969	0,87	4,82	0,15	4,33	10,36	748,2	7,26
5	14-17/01/1969	1,71	12,61	0,59	6,06	38,5	2094,37	20,33
6	05-06/02/1969	0,43	1,08	0,07	3,77	4,44	651,76	6,33
7	28-02-1969	0,18	0,26	0,02	3,53	3,6	305,08	2,96
8	02-04/03/1969	0,47	6,83	0,12	3,88	15,34	1004,79	9,76
9	08-09/03/1969	2,22	9,22	0,38	6,84	23,22	1181,76	11,47
10	26-03-1969	0,29	0,47	0,03	3,64	3,8	314,09	3,05
11	28-03-1969	0,29	0,43	0,02	3,63	3,77	313,44	3,04
12	30-03-1969	0,38	0,48	0,03	3,72	3,82	321,36	3,12
13	04-05/04/1969	0,33	1,43	0,06	3,68	4,84	635,33	6,17
14	11-04-1969	0,22	0,39	0,02	3,57	3,73	308,32	2,99
15	14-04-1969	0,20	0,36	0,02	3,55	3,7	306,88	2,98
16	25-28/09/1969	0,76	10,71	0,26	3,92	29,34	1354,01	13,15
17	10-12/10/1969	0,60	20,64	0,16	3,78	94,07	980,42	9,52
18	14-15/10/1969	2,15	58,63	0,37	15,03	415,32	2596,36	25,21
19	23-25/10/1969	0,19	3,58	0,05	3,57	7,97	924,76	8,98
20	28-29/10/1969	0,38	11,40	0,06	3,96	32,48	683,55	6,64
21	01-02/12/1969	0,58	4,32	0,10	4,01	9,34	693,13	6,73
22	05-12-1969	1,96	9,84	1,35	5,92	25,65	4092,99	39,74
23	17-12-1969	0,60	1,06	0,05	3,94	4,42	339,95	3,3
24	19-21/12/1969	1,92	14,99	0,50	6,49	52,28	1681,89	16,33
25	23-29/12/1969	8,30	136,92	5,02	36,99	571,72	22369,56	217,18
26	12-13/01/1970	0,60	1,53	0,10	3,94	4,97	681,44	6,62
27	15-17/01/1970	0,85	3,06	0,22	4,22	7,1	1094,56	10,63
28	31-01-1970	0,59	1,01	0,05	3,93	4,37	339,64	3,3
29	02-02-1970	0,65	2,10	0,06	4,00	5,69	345,74	3,36
30	19-20/02/1970	0,28	0,48	0,05	3,62	3,82	626,26	6,08
31	26/02-01/03/1970	0,96	4,32	0,33	4,42	9,34	1526,48	14,82
32	03-04/03/1970	0,84	2,60	0,15	4,22	6,4	729,31	7,08
33	10-03-1970	0,41	0,58	0,04	3,75	3,91	323,86	3,14
34	12-18/03/1970	1,43	13,12	0,86	5,45	41,22	3295,58	32
35	20-03-1970	1,42	4,32	0,12	4,89	9,34	422,8	4,1
36	29-03-1970	0,63	1,18	0,05	3,97	4,55	342,69	3,33
37	02-03/04/1970	0,68	2,94	0,12	4,06	6,91	700,66	6,8
38	10-12/04/1970	3,94	40,59	1,02	18,79	284,4	4869,25	47,27

39	21-23/04/1970	13,55	118,10	3,51	68,46	564,89	17744,91	172,28
40	06-08/01/1971	0,33	0,85	0,08	3,67	4,19	951,58	9,24
41	16-19/01/1971	0,68	5,54	0,23	4,11	11,99	1421,82	13,8
42	04-05/02/1971	0,18	0,52	0,03	3,53	3,86	610,71	5,93
43	09-12/02/1971	10,96	66,67	3,79	59,48	453,95	20554,93	199,56
44	16-17/02/1971	0,98	1,13	0,17	4,33	4,5	748,32	7,27
45	19-21/02/1971	1,86	9,22	0,48	5,93	23,22	1537,03	14,92
46	23-24/02/1971	4,03	21,70	0,70	13,11	103,16	2264,63	21,99
47	01-02/03/1971	1,43	3,31	0,25	4,88	7,51	843,86	8,19
48	15-17/03/1971	0,63	1,67	0,16	3,97	5,13	1028,58	9,99
49	21-24/03/1971	0,60	2,39	0,21	3,95	6,09	1363,46	13,24
50	28-31/03/1971	2,47	12,61	0,85	7,28	38,5	2515,36	24,42
51	02-03/04/1971	1,28	3,72	0,22	4,72	8,22	815,01	7,91
52	09-11/04/1971	2,31	16,74	0,60	7,24	63,92	1876,62	18,22
53	11-12/05/1971	1,53	10,94	0,26	5,81	30,35	1004,2	9,75
54	25-09-1971	0,22	1,25	0,02	3,58	4,63	309,16	3
55	02-07/10/1971	2,05	32,93	1,06	9,00	211,3	4665,49	45,3
56	10-11/10/1971	0,23	2,94	0,04	3,59	6,91	620,93	6,03
57	28-29/10/1971	0,63	7,00	0,11	4,21	15,81	728,1	7,07
58	27-28/11/1971	0,15	1,20	0,03	3,51	4,58	605,68	5,88
59	07-11/12/1971	0,56	24,31	0,24	4,72	126,81	2037,81	19,78
60	10-13/01/1972	0,38	5,74	0,13	3,78	12,46	1307,47	12,69
61	19-21/01/1972	4,38	48,13	1,14	17,65	347,03	4575,04	44,42
62	23-28/01/1972	5,26	33,89	2,73	15,99	220,79	8289,11	80,48
63	10-02-1972	0,51	0,60	0,04	3,85	3,93	332,5	3,23
64	12-13/02/1972	0,54	1,10	0,09	3,88	4,47	670,7	6,51
65	18-19/02/1972	0,50	1,51	0,09	3,85	4,93	664,89	6,46
66	25-26/02/1972	0,83	5,17	0,14	4,28	11,13	739,73	7,18
67	28/02-03/03/1972	0,84	4,01	0,36	4,22	8,75	1824,6	17,71
68	05-06/03/1972	0,82	3,86	0,14	4,21	8,48	727,33	7,06
69	10-11/03/1972	4,23	54,53	0,73	21,97	391,24	3796,79	36,86
70	17-18/03/1972	0,65	0,87	0,11	3,99	4,22	688,82	6,69
71	25-03-1972	0,67	1,08	0,06	4,01	4,44	346,59	3,36
72	30/03-02/04/1972	0,63	4,48	0,22	4,01	9,66	1384,01	13,44
73	10-15/04/1972	2,59	15,85	1,34	8,22	57,83	4260,03	41,36
74	17-21/04/1972	1,32	4,32	0,57	4,79	9,34	2067,18	20,07
75	25-29/04/1972	1,73	10,71	0,75	5,67	29,34	2449,02	23,78
76	01-03/05/1972	1,13	4,32	0,29	4,55	9,34	1180,48	11,46
77	09-05-1972	0,64	1,67	0,06	3,99	5,13	344,68	3,35
78	18-05-1972	0,55	1,51	0,05	3,89	4,93	335,9	3,26
79	04-05/06/1972	0,25	1,56	0,04	3,60	5	622,35	6,04
80	07-08/10/1972	0,83	8,25	0,14	4,54	19,72	784,75	7,62
81	30-31/12/1972	1,35	10,71	0,23	5,65	29,34	975,81	9,47
82	02-05/01/1973	0,97	6,35	0,34	4,42	14,01	1526,01	14,82
83	09-10/01/1973	0,33	0,45	0,06	3,67	3,78	633,73	6,15

84	23-29/01/1973	11,66	87,62	7,05	55,89	515,72	33799,57	328,15
85	05-02-1973	1,35	3,19	0,12	4,80	7,3	414,56	4,02
86	12-02-1973	1,05	2,10	0,09	4,43	5,69	382,87	3,72
87	14-02-1973	0,69	2,01	0,06	4,04	5,57	349	3,39
88	16-22/02/1973	1,64	10,49	0,99	5,35	28,37	3238,08	31,44
89	26-28/02/1973	4,44	15,85	1,15	10,99	57,83	2847,32	27,64
90	18-19/04/1973	0,67	1,25	0,12	4,02	4,63	694,16	6,74
91	04-05/06/1973	0,53	9,63	0,09	4,11	24,81	710,25	6,9
92	25-26/09/1973	0,19	4,16	0,03	2,25	9,04	389,05	3,78
93	27-28/10/1973	0,16	1,20	0,03	3,51	4,58	606,79	5,89
94	03-04/12/1973	0,30	1,59	0,05	3,65	5,03	631,14	6,13
95	17-18/02/1974	0,12	0,26	0,02	3,47	3,6	599,77	5,82
96	22-23/02/1974	0,22	1,35	0,04	3,57	4,75	617,13	5,99
97	26-27/02/1974	0,51	2,71	0,09	3,88	6,56	669,63	6,5
98	05-03-1974	0,14	0,20	0,01	3,49	3,55	301,61	2,93
99	01-02/04/1974	0,17	0,87	0,03	3,53	4,22	609,15	5,91
100	23-25/04/1974	0,14	0,50	0,03	3,49	3,84	904,3	8,78
101	07-10/11/1974	0,13	1,10	0,04	3,03	4,47	1047,76	10,17
102	14-12-1974	0,31	1,67	0,03	3,11	5,13	268,66	2,61
103	17-19/02/1975	4,16	22,43	1,08	13,81	109,56	3580,62	34,76
104	06-07/03/1975	0,14	0,36	0,02	3,49	3,7	603,19	5,86
105	09-10/03/1975	0,20	1,10	0,03	3,55	4,47	613,89	5,96
106	19-25/03/1975	0,67	10,94	0,41	4,21	30,35	2546,11	24,72
107	31-03-1975	0,35	0,79	0,03	3,69	4,13	318,63	3,09
108	07-10/05/1975	0,15	1,30	0,05	3,50	4,69	1210,79	11,76
109	12-14/05/1975	0,24	0,81	0,06	3,59	4,15	929,17	9,02
110	25-26/05/1975	0,26	3,58	0,04	3,63	7,97	627,08	6,09
111	27-29/01/1976	0,26	0,56	0,07	3,61	3,89	934,42	9,07
112	02-02-1976	0,21	0,45	0,02	3,55	3,78	306,96	2,98
113	08-02-1976	0,30	1,08	0,03	3,65	4,44	315,29	3,06
114	10-11/02/1976	0,23	0,48	0,04	3,58	3,82	618,1	6
115	15-16/02/1976	0,56	2,71	0,10	3,91	6,56	676,12	6,56
116	23-25/02/1976	0,37	1,51	0,10	3,72	4,93	963,03	9,35
117	27-02-1976	0,36	0,45	0,03	3,70	3,78	319,42	3,1
118	11-12/03/1976	0,53	2,29	0,09	3,90	5,95	673	6,53
119	14-21/03/1976	2,40	13,63	1,66	7,03	44,12	4858,78	47,17
120	26-27/03/1976	0,55	0,68	0,09	3,88	4,02	670,87	6,51
121	30-03-1976	0,48	0,74	0,04	3,81	4,08	329,52	3,2
122	10-11/04/1976	0,35	0,70	0,06	3,69	4,04	637,5	6,19
123	30-04-1976	0,19	0,34	0,02	3,54	3,68	305,76	2,97
124	02-05-1976	0,40	2,82	0,03	3,77	6,73	325,94	3,16
125	14-16/05/1976	0,16	0,43	0,04	3,52	3,77	911,29	8,85
126	19-20/05/1976	0,26	0,90	0,04	3,61	4,24	623,19	6,05
127	07-08/09/1976	0,17	2,19	0,03	2,34	5,82	404,18	3,92
128	17-23/10/1976	1,70	25,10	1,03	7,08	134,19	4280,21	41,56

129	25-27/10/1976	0,59	1,53	0,15	3,93	4,97	1017,88	9,88
130	04-06/11/1976	0,80	5,35	0,21	4,23	11,55	1095,32	10,63
131	11-12/11/1976	0,36	0,45	0,06	3,70	3,78	638,59	6,2
132	17-24/11/1976	11,11	122,63	7,68	47,78	569,49	33023,09	320,61
133	03-04/12/1976	0,85	1,51	0,15	4,20	4,93	725,06	7,04
134	12-12-1976	0,54	0,76	0,05	3,88	4,1	335,08	3,25
135	22-23/12/1976	0,74	2,82	0,13	4,11	6,73	710,14	6,89
136	26-27/12/1976	0,44	0,72	0,08	3,78	4,06	652,38	6,33
137	02-01-1977	0,48	0,81	0,04	3,82	4,15	330,08	3,2
138	04-07/01/1977	0,51	1,92	0,18	3,85	5,46	1330,62	12,92
139	09-11/01/1977	0,88	2,01	0,23	4,25	5,57	1100,22	10,68
140	15-17/01/1977	0,57	0,99	0,15	3,91	4,34	1013,08	9,84
141	23-25/01/1977	0,55	1,35	0,14	3,88	4,75	1006,36	9,77
142	03-02-1977	0,50	0,85	0,04	3,84	4,19	331,5	3,22
143	20-21/04/1977	0,31	0,38	0,05	3,65	3,71	630,23	6,12
144	01-05-1977	0,30	0,38	0,03	3,64	3,71	314,46	3,05
145	17-18/05/1977	0,25	0,41	0,04	3,59	3,75	620,54	6,02
146	03-06-1977	0,29	0,72	0,03	3,64	4,06	314,2	3,05
147	21-25/01/1978	0,46	3,72	0,20	3,11	8,22	1344,18	13,05
148	30/01-05/02/1978	2,85	48,13	1,72	11,71	347,03	7080,5	68,74
149	07-08/02/1978	1,70	2,71	0,29	5,19	6,56	897,42	8,71
150	01-02/03/1978	0,34	0,50	0,06	3,68	3,84	636,04	6,18
151	06-03-1978	0,29	0,36	0,03	3,64	3,7	314,09	3,05
152	08-09/03/1978	0,55	1,20	0,10	3,89	4,58	672,77	6,53
153	19-03-1978	0,19	0,22	0,02	3,54	3,56	305,9	2,97
154	30-31/03/1978	0,29	0,99	0,05	3,63	4,34	627,79	6,1
155	02-04/04/1978	1,55	11,87	0,40	5,80	34,76	1503,5	14,6
156	07-08/04/1978	0,96	2,39	0,17	4,32	6,09	746,66	7,25
157	25-04-1978	0,34	0,72	0,03	3,68	4,06	317,93	3,09
158	29-30/11/1978	0,11	0,26	0,02	3,47	3,6	599,05	5,82
159	12-14/01/1979	0,21	1,64	0,05	3,56	5,1	923,03	8,96
160	17-22/02/1979	0,26	1,28	0,13	3,61	4,66	1869,47	18,15
161	24-28/02/1979	0,54	1,64	0,23	3,88	5,1	1674,08	16,25
162	03-08/03/1979	1,67	9,22	0,86	5,46	23,22	2827,92	27,46
163	15-16/03/1979	0,45	2,60	0,08	3,80	6,4	657,33	6,38
164	19-20/03/1979	0,49	1,28	0,09	3,83	4,66	662,29	6,43
165	06-04-1979	0,20	0,28	0,02	3,54	3,62	306,22	2,97
166	10-12/04/1979	0,18	0,47	0,05	3,53	3,8	915,27	8,89
167	15-22/04/1979	9,43	112,59	6,52	44,86	556,89	31008,11	301,05
168	07-08/01/1980	1,83	9,84	0,32	6,00	25,65	1036,32	10,06
169	14-16/01/1980	1,19	5,74	0,30	4,69	12,46	1191,34	11,57
170	18-21/01/1980	0,92	3,31	0,32	4,28	7,51	1480,63	14,38
171	27-28/01/1980	0,49	0,62	0,09	3,83	3,95	661,63	6,42
172	30-31/01/1980	0,45	0,56	0,08	3,78	3,89	653,82	6,35
173	04-06/03/1980	0,52	4,99	0,14	3,95	10,73	1023,15	9,93

174	08-09/03/1980	0,12	0,20	0,02	3,47	3,55	600,05	5,83
175	12-16/03/1980	0,17	0,85	0,07	3,52	4,19	1520,14	14,76
176	05-06/12/1980	0,23	3,72	0,04	2,32	8,22	400,91	3,89
177	18-24/12/1980	1,78	12,12	1,07	6,39	35,97	3866,01	37,53
178	30-04/12/1980	3,67	22,79	1,59	14,24	112,87	6151,63	59,72
179	07-08/01/1981	1,85	9,84	0,32	6,02	25,65	1039,64	10,09
180	14-15/01/1981	1,38	5,74	0,24	4,95	12,46	855,84	8,31
181	18-19/01/1981	1,06	3,31	0,18	4,46	7,51	769,79	7,47
182	21-01-1981	0,82	1,30	0,07	4,16	4,69	359,75	3,49
183	27-28/01/1981	0,50	0,62	0,09	3,83	3,95	661,91	6,43
184	30/01-02/02/1981	0,79	3,31	0,27	4,16	7,51	1437,28	13,95
185	05-09/02/1981	1,95	6,67	0,84	5,73	14,88	2476,45	24,04
186	12-15/02/1981	0,73	0,85	0,25	4,07	4,19	1405,75	13,65
187	17-18/02/1981	1,07	2,19	0,19	4,46	5,82	770,28	7,48
188	20-24/02/1981	2,77	33,89	1,20	12,06	220,79	5208,19	50,56
189	18-20/03/1981	1,31	5,17	0,34	4,83	11,13	1250,99	12,15
190	31/03-02/04/1981	0,74	2,10	0,19	4,09	5,69	1060,61	10,3
191	18-20/04/1981	0,20	0,28	0,05	3,55	3,62	920,27	8,93
192	23-24/04/1981	0,55	8,43	0,09	4,04	20,37	698,41	6,78
193	22-23/12/1981	0,29	1,59	0,05	3,12	5,03	538,52	5,23
194	09-11/01/1982	2,44	21,34	0,63	8,80	100,06	2279,93	22,14
195	20-25/01/1982	0,52	2,39	0,27	3,87	6,09	2005,54	19,47
196	27-31/01/1982	0,53	2,60	0,23	3,89	6,4	1680,95	16,32
197	10-11/02/1982	0,62	1,64	0,11	3,97	5,1	686,24	6,66
198	17-19/02/1982	0,44	1,53	0,11	3,78	4,97	980,48	9,52
199	21-28/02/1982	1,92	9,84	1,32	5,92	25,65	4090,46	39,71
200	05-11/03/1982	2,20	10,71	1,33	6,48	29,34	3916,66	38,03
201	16-19/03/1982	1,16	17,67	0,40	5,45	70,56	1882,71	18,28
202	21-23/03/1982	1,06	2,82	0,27	4,44	6,73	1151,63	11,18
203	25-26/03/1982	0,59	3,06	0,10	3,96	7,1	683,83	6,64
204	30-03-1982	0,68	2,29	0,17	4,03	5,95	1044,52	10,14
205	15-16/04/1982	0,35	2,19	0,06	3,70	5,82	638,59	6,2
206	18-20/04/1982	1,78	20,64	0,46	6,91	94,07	1790,76	17,39
207	09-05-1982	0,24	0,28	0,02	3,58	3,62	309,37	3
208	12-13/05/1982	0,33	0,74	0,06	3,67	4,08	633,82	6,15
209	29-30/10/1982	0,72	6,83	0,12	4,18	15,34	722,21	7,01
210	10-13/11/1982	2,47	35,37	0,85	10,28	235,25	3551,7	34,48
211	16-20/11/1982	1,19	7,88	0,51	4,80	18,5	2073,97	20,14
212	27-30/11/1982	3,44	75,42	1,19	19,06	485,28	6587,35	63,95
213	04-06/12/1982	0,60	8,82	0,15	3,95	21,74	1023,25	9,93
214	10-12-1982	0,91	2,60	0,08	4,30	6,4	371,06	3,6
215	18-20/12/1982	2,68	14,99	0,69	8,82	52,28	2285,26	22,19
216	23-29/12/1982	2,62	17,35	1,58	7,80	68,28	4719,67	45,82
217	09-11/01/1983	2,44	21,34	0,63	8,80	100,06	2279,93	22,14
218	20-21/01/1983	0,68	1,25	0,12	4,02	4,63	694,14	6,74

219	10-11/02/1983	0,62	1,64	0,11	3,97	5,1	686,18	6,66
220	16-19/03/1983	1,16	17,67	0,40	5,45	70,56	1883,57	18,29
221	25-26/03/1983	0,59	3,06	0,10	3,96	7,1	684,15	6,64
222	01-03/11/1983	1,50	17,05	0,39	5,84	66,07	1514,33	14,7
223	07-08/11/1983	3,58	92,28	0,62	23,83	524,59	4118,36	39,98
224	10-11/11/1983	0,12	0,31	0,02	3,47	3,65	600,22	5,83
225	19-11-1983	0,30	0,66	0,03	3,65	4	315,03	3,06
226	22-23/11/1983	0,41	1,48	0,07	3,76	4,9	649,75	6,31
227	28-30/11/1983	0,22	1,35	0,06	3,57	4,75	925,66	8,99
228	05-12-1983	0,17	0,26	0,01	3,52	3,6	304,44	2,96
229	08-10/12/1983	1,19	5,54	0,31	4,79	11,99	1241,97	12,06
230	13-14/12/1983	0,51	2,29	0,09	3,86	5,95	667,71	6,48
231	22-12-1983	0,85	3,06	0,07	4,25	7,1	367,32	3,57
232	01-04/01/1984	12,16	33,89	4,20	45,10	220,79	15586,75	151,33
233	07-08/01/1984	4,72	23,93	0,82	16,53	123,22	2855,81	27,73
234	10-17/01/1984	6,45	41,14	4,46	20,10	289,33	13889,61	134,85
235	24-25/01/1984	1,59	9,63	0,27	5,44	24,81	939,53	9,12
236	27/01-01/02/1984	0,94	6,67	0,49	4,40	14,88	2281,6	22,15
237	03-06/02/1984	25,69	161,77	8,88	156,39	2732,33	54046,68	524,73
238	09-14/02/1984	5,10	27,98	2,64	15,21	162,07	7883,08	76,53
239	16-18/02/1984	5,14	10,71	1,33	11,96	29,34	3100,69	30,1
240	22-26/02/1984	2,62	26,72	1,13	9,05	149,75	3910,94	37,97
241	01-04/03/1984	1,14	2,71	0,39	4,52	6,56	1562,22	15,17
242	06-12/03/1984	4,79	92,28	2,90	19,94	524,59	12061,23	117,1
243	14-18/03/1984	1,63	7,69	0,71	5,26	17,92	2274,04	22,08
244	20-22/03/1984	1,62	6,19	0,42	5,23	13,6	1354,79	13,15
245	25-26/03/1984	1,20	4,16	0,21	4,64	9,04	802,18	7,79
246	28-30/03/1984	2,16	19,61	0,56	7,53	85,62	1951,71	18,95
247	03-07/04/1984	0,85	3,58	0,37	4,24	7,97	1829,33	17,76
248	15-16/04/1984	0,36	0,76	0,06	3,71	4,1	640,38	6,22
249	05-07/05/1984	0,36	1,45	0,09	3,70	4,87	958,87	9,31
250	13-14/05/1984	0,39	1,67	0,07	3,74	5,13	645,55	6,27
251	17-05-1984	0,19	0,26	0,02	3,54	3,6	305,82	2,97
252	13-14/10/1984	3,09	28,40	0,53	12,47	166,29	2154,4	20,92
253	18-19/10/1984	1,44	24,31	0,25	7,80	126,81	1347,82	13,09
254	22-23/10/1984	1,36	13,37	0,24	5,83	42,65	1007,4	9,78
255	30/10-01/11/1984	0,13	0,36	0,02	3,49	3,7	602,53	5,85
256	20-21/11/1984	0,12	0,23	0,02	3,47	3,58	599,81	5,82
257	05-07/12/1984	0,60	3,58	0,16	3,98	7,97	1031,95	10,02
258	20-26/12/1984	1,11	13,63	0,67	5,01	44,12	3028,44	29,4
259	28/12/1984-04/01/1985	19,08	97,11	13,19	102,85	532,77	71091,32	690,21
260	13-01-1985	1,61	1,84	0,14	5,06	5,35	437,31	4,25
261	15-21/01/1985	2,29	15,56	1,38	6,78	55,92	4099,98	39,81
262	27-30/01/1985	0,90	1,67	0,31	4,25	5,13	1466,98	14,24
263	11-15/02/1985	2,84	27,98	1,23	11,47	162,07	4955,14	48,11

264	22-24/02/1985	0,80	2,39	0,21	4,15	6,09	1075,1	10,44
265	06-11/03/1985	5,35	92,28	2,77	22,46	524,59	11641,46	113,02
266	18-22/03/1985	1,58	6,19	0,68	5,17	13,6	2232,25	21,67
267	25-26/03/1985	1,17	4,16	0,20	4,59	9,04	793,91	7,71
268	28-30/03/1985	2,17	19,61	0,56	7,56	85,62	1958,89	19,02
269	15-16/04/1985	0,50	0,76	0,09	3,83	4,1	661,92	6,43
270	28-04-1985	0,21	0,29	0,02	3,56	3,63	307,24	2,98
271	05-07/05/1985	0,36	1,45	0,09	3,70	4,87	959,38	9,31
272	13-14/05/1985	0,39	1,67	0,07	3,74	5,13	645,58	6,27
273	17-05-1985	0,19	0,26	0,02	3,54	3,6	305,51	2,97
274	10-11/01/1986	0,64	7,69	0,11	4,25	17,92	734,61	7,13
275	13-14/01/1986	0,19	0,96	0,03	3,55	4,32	613,14	5,95
276	09-12/02/1986	0,22	0,74	0,07	3,57	4,08	1232,02	11,96
277	22-02-1986	0,30	0,81	0,03	3,64	4,15	314,83	3,06
278	07-08/03/1986	1,09	8,63	0,19	4,85	21,05	837,4	8,13
279	11-17/03/1986	0,81	4,65	0,49	4,21	10	2544,82	24,71
280	08-04-1986	0,17	0,26	0,01	3,52	3,6	304,42	2,96
281	28-29/10/1986	0,84	7,88	0,14	4,22	18,5	729,78	7,09
282	04-05/11/1986	0,58	1,30	0,10	3,26	4,69	563,54	5,47
283	19-20/11/1986	0,72	7,88	0,12	3,46	18,5	597,74	5,8
284	24-27/11/1986	2,73	27,13	0,94	8,41	153,79	2905,9	28,21
285	01-12-1986	0,75	1,13	0,07	4,09	4,5	353,58	3,43
286	15-18/12/1986	1,72	10,06	0,59	5,71	26,53	1972,41	19,15
287	23-29/12/1986	5,86	28,40	3,54	17,90	166,29	10824,63	105,09
288	03-05/01/1987	3,85	32,46	1,00	14,52	206,61	3763,28	36,54
289	08-01-1987	1,02	1,43	0,09	4,38	4,84	378,03	3,67
290	11-12/01/1987	1,91	9,22	0,33	6,03	23,22	1041,43	10,11
291	17-19/01/1987	1,07	2,94	0,28	4,45	6,91	1153,05	11,19
292	31/01-01/02/1987	0,83	1,38	0,14	4,17	4,78	721,03	7
293	05-07/02/1987	3,71	59,33	0,96	17,55	419,13	4549,58	44,17
294	12-16/02/1987	8,40	85,80	3,63	43,80	511,92	18919,91	183,69
295	18-20/02/1987	2,74	11,17	0,71	7,35	31,39	1903,88	18,48
296	22-24/02/1987	5,10	16,74	1,32	13,58	63,92	3519,92	34,17
297	26-27/02/1987	6,51	49,37	1,12	25,96	356,23	4486,31	43,56
298	09-11/03/1987	4,74	37,92	1,23	17,25	259,73	4472,28	43,42
299	30/03-02/04/1987	6,77	34,87	2,34	25,63	230,4	8856,92	85,99
300	14-04-1987	2,52	8,06	0,22	6,60	19,1	570,25	5,54
301	14-15/05/1987	0,34	0,70	0,06	3,68	4,04	635,56	6,17
302	28-05-1987	0,69	3,44	0,06	4,07	7,74	351,99	3,42
303	26-02-1988	0,15	0,23	0,01	3,50	3,58	302,32	2,94
304	06-07/03/1988	0,15	0,28	0,03	3,50	3,62	605,31	5,88
305	09-10/03/1988	0,36	1,06	0,06	3,71	4,42	640,78	6,22
306	04-05/06/1988	0,18	5,17	0,03	1,92	11,13	330,99	3,21
307	21-24/12/1988	6,23	63,66	2,15	34,20	440,75	11818,27	114,74
308	23-25/01/1989	0,25	1,59	0,07	3,61	5,03	934,85	9,08

309	15-17/02/1989	1,30	9,63	0,34	5,13	24,81	1329,34	12,91
310	27-02-1989	0,45	1,08	0,04	3,79	4,44	327,33	3,18
311	10-03-1989	0,30	1,25	0,03	3,66	4,63	315,81	3,07
312	21-23/03/1989	0,26	1,45	0,07	3,61	4,87	935,77	9,09
313	02-03/12/1989	1,12	9,43	0,19	5,12	24	884,25	8,58
314	10-11/12/1989	0,30	3,58	0,05	3,69	7,97	636,76	6,18
315	05-08/01/1990	2,49	23,93	0,86	10,75	123,22	3713,88	36,06
316	12-16/01/1990	1,10	4,48	0,47	4,56	9,66	1971,52	19,14
317	22-25/01/1990	1,63	4,99	0,56	5,27	10,73	1821,81	17,69
318	28-09-1990	0,49	4,16	0,04	3,94	9,04	340,66	3,31
319	16-18/11/1990	0,15	3,06	0,04	2,84	7,1	735,53	7,14
320	02-12-1990	0,16	1,01	0,01	3,17	4,37	273,59	2,66
321	13-15/12/1990	0,93	6,51	0,24	4,47	14,43	1158,03	11,24
322	23-29/12/1990	6,40	43,39	3,87	24,88	308,92	15048,17	146,1
323	13-16/01/1991	1,36	12,12	0,47	5,58	35,97	1926,77	18,71
324	26/01-01/02/1991	3,61	48,75	2,18	17,50	351,65	10585,75	102,77
325	13-19/02/1991	3,49	27,55	2,11	11,61	157,9	7018,75	68,14
326	21-25/02/1991	1,04	3,06	0,45	4,42	7,1	1910,63	18,55
327	02-03/03/1991	0,58	1,03	0,10	3,92	4,39	676,86	6,57
328	09-10/03/1991	0,31	0,39	0,05	3,65	3,73	631,26	6,13
329	14-20/03/1991	8,16	70,56	4,93	38,26	469,07	23138,12	224,64
330	22-23/03/1991	1,67	2,19	0,29	5,14	5,82	888,2	8,62
331	25-03-1991	1,15	1,20	0,10	4,52	4,58	390,08	3,79
332	31/03-02/04/1991	3,05	11,87	0,79	8,10	34,76	2099,13	20,38
333	04-09/04/1991	2,83	20,64	1,47	8,91	94,07	4621,23	44,87
334	21-22/04/1991	0,51	0,58	0,09	3,85	3,91	664,67	6,45
335	14-05-1991	0,15	0,20	0,01	3,50	3,55	302,27	2,93
336	01-06-1991	0,14	0,33	0,01	3,49	3,67	301,71	2,93
337	28-29/01/1992	0,24	4,16	0,06	3,63	9,04	940,81	9,13
338	21-22/02/1992	1,26	7,69	0,22	5,02	17,92	866,67	8,41
339	27-28/02/1992	0,17	0,50	0,03	3,52	3,84	608,83	5,91
340	06-03-1992	0,42	0,99	0,04	3,76	4,34	324,92	3,15
341	08-10/03/1992	0,96	4,82	0,25	4,37	10,36	1133,09	11
342	26-27/03/1992	0,27	0,79	0,05	3,62	4,13	625,4	6,07
343	09-14/04/1992	4,62	33,89	2,40	17,87	220,79	9262,45	89,93
344	17-21/04/1992	2,74	26,31	1,18	9,55	145,76	4124,03	40,04
345	27-04-1992	0,72	0,74	0,06	4,06	4,08	350,63	3,4
346	01-05-1992	0,65	1,38	0,06	4,00	4,78	345,16	3,35
347	24-27/05/1992	4,37	32,93	1,51	20,11	211,3	6949,02	67,47
348	18-19/06/1992	0,24	3,72	0,04	3,61	8,22	623,83	6,06
349	04-08/11/1992	12,41	161,77	5,36	82,84	2732,33	35785,69	347,43
350	11-11-1992	0,42	0,48	0,04	3,76	3,82	324,72	3,15
351	18-19/11/1992	0,63	3,06	0,11	4,00	7,1	690,91	6,71
352	08-11/12/1992	0,86	2,60	0,30	4,26	6,4	1471,52	14,29
353	17-19/12/1992	1,06	2,82	0,27	4,47	6,73	1159,03	11,25

354	29/12/1992-04/01/1993	10,03	51,91	6,07	44,16	374,12	26707,56	259,3
355	06-08/01/1993	4,29	13,12	1,11	10,11	41,22	2621,04	25,45
356	11-01-1993	1,76	1,84	0,15	5,25	5,35	453,94	4,41
357	14-02-1993	0,29	0,54	0,05	3,64	3,88	628,2	6,1
358	28-02-1993	0,43	1,06	0,04	3,77	4,42	326,04	3,17
359	09-11/03/1993	0,40	0,76	0,10	3,74	4,1	969,98	9,42
360	26-28/03/1993	0,72	3,72	0,19	4,10	8,22	1062,27	10,31
361	16-04-1993	0,17	0,45	0,01	3,52	3,78	304,49	2,96
362	20-21/04/1993	0,14	0,33	0,02	3,50	3,67	604,31	5,87
363	05-08/05/1993	1,17	10,06	0,40	4,93	26,53	1702,63	16,53
364	11-13/05/1993	0,47	2,19	0,12	3,82	5,82	990,43	9,62
365	04-06-1993	0,21	0,34	0,02	3,56	3,68	307,5	2,99
366	02-05/12/1993	0,50	1,84	0,17	3,87	5,35	1336,29	12,97
367	26-27/12/1993	1,17	9,63	0,20	5,21	24,81	900,88	8,75
368	08-12/01/1994	0,80	5,17	0,34	4,25	11,13	1834,49	17,81
369	18-01-1994	0,32	0,62	0,03	3,66	3,95	316,53	3,07
370	20-21/01/1994	2,43	11,64	0,42	7,65	33,6	1321,98	12,83
371	25-26/01/1994	0,77	1,53	0,13	4,12	4,97	711,56	6,91
372	06-11/02/1994	1,88	7,17	0,97	5,63	16,31	2920,56	28,35
373	14-02-1994	1,06	1,33	0,09	4,42	4,72	381,77	3,71
374	18-21/02/1994	3,35	17,98	1,16	10,81	72,9	3734,81	36,26
375	14-03-1994	0,39	0,66	0,03	3,72	4	321,76	3,12
376	11-12/04/1994	0,19	0,31	0,03	3,54	3,65	611,46	5,94
377	16-17/04/1994	0,24	1,06	0,04	3,59	4,42	620,07	6,02
378	20-21/04/1994	0,17	0,23	0,03	3,52	3,58	607,62	5,9
379	30-04-1994	0,16	0,38	0,01	3,51	3,71	303,2	2,94
380	03-04/11/1994	0,20	4,16	0,03	3,58	9,04	618,2	6
381	20-24/12/1994	0,44	2,60	0,19	3,80	6,4	1642,39	15,95
382	06-11/01/1995	13,32	129,64	6,91	61,49	571,65	31873,76	309,45
383	18-01-1995	1,70	2,01	0,15	5,18	5,57	447,79	4,35
384	02-03/03/1995	0,56	3,86	0,10	3,95	8,48	682,43	6,63
385	05-07/03/1995	2,18	7,34	0,57	6,23	16,83	1613,57	15,67
386	08-03-1995	0,97	1,28	0,08	4,32	4,66	373,25	3,62
387	12-15/03/1995	2,04	9,63	0,71	6,28	24,81	2168,71	21,06
388	17-03-1995	1,72	4,16	0,15	5,28	9,04	456,45	4,43
389	29-04-1995	0,20	0,28	0,02	3,55	3,62	306,53	2,98
390	16-17/10/1995	0,19	1,20	0,03	3,55	4,58	612,53	5,95
391	03-11-1995	0,12	0,25	0,01	3,48	3,59	300,57	2,92
392	01-04/12/1995	0,34	4,48	0,12	3,73	9,66	1287,55	12,5
393	11-14/01/1996	1,20	11,87	0,41	5,35	34,76	1850,23	17,96
394	26-01-1996	0,28	0,68	0,02	3,63	4,02	313,6	3,04
395	30-31/01/1996	0,39	0,81	0,07	3,73	4,15	644,43	6,26
396	06-09/02/1996	8,24	37,92	2,85	28,28	259,73	9774,03	94,89
397	12-13/02/1996	1,77	4,48	0,31	5,37	9,66	927,67	9,01
398	17-18/02/1996	2,19	6,19	0,38	6,08	13,6	1049,9	10,19

399	20-02-1996	0,97	1,08	0,08	4,32	4,44	372,92	3,62
400	23-02-1996	1,55	2,82	0,13	5,04	6,73	435,1	4,22
401	27-29/02/1996	6,04	14,44	1,56	15,85	48,86	4107,16	39,88
402	11-12/03/1996	1,13	2,49	0,20	4,52	6,24	781,34	7,59
403	14-18/03/1996	4,42	18,30	1,91	13,81	75,31	5965,13	57,91
404	09-04-1996	0,55	1,06	0,05	3,89	4,42	336,47	3,27
405	18-04-1996	0,60	1,84	0,05	3,95	5,35	341,59	3,32
406	26/04-02/05/1996	6,20	161,77	3,75	34,43	2732,33	20822,57	202,16
407	04-06/05/1996	2,83	17,05	0,73	8,98	66,07	2327,74	22,6
408	19-20/05/1996	1,84	3,06	0,32	5,38	7,1	930,43	9,03
409	11-12/01/1997	0,67	3,44	0,12	4,06	7,74	701,43	6,81
410	16-03-1997	0,53	2,82	0,05	3,91	6,73	337,99	3,28
411	23-24/09/1998	0,49	5,94	0,09	2,51	12,95	433,75	4,21
412	20-22/11/1998	0,48	2,60	0,13	3,85	6,4	998,81	9,7
413	26/11-01/12/1998	6,13	50,63	3,18	31,39	365,26	16270,39	157,96
414	07-08/12/1998	0,70	2,10	0,12	4,06	5,69	701,32	6,81
415	12-12-1998	0,76	1,56	0,07	4,11	5	354,72	3,44
416	21-23/12/1998	2,00	11,17	0,52	6,36	31,39	1647,86	16
417	25-26/12/1998	0,84	1,61	0,15	4,19	5,06	724,65	7,04
418	02-03/01/1999	1,16	4,32	0,20	4,64	9,34	800,93	7,78
419	20-22/01/1999	7,26	40,59	1,88	33,30	284,4	8630,96	83,8
420	30/01-03/02/1999	2,20	12,12	0,95	6,43	35,97	2777,97	26,97
421	06-07/02/1999	2,07	8,82	0,36	6,04	21,74	1044,19	10,14
422	11-19/02/1999	7,07	35,37	5,50	23,76	235,25	18472,77	179,35
423	01-02/03/1999	0,85	2,01	0,15	4,19	5,57	724,58	7,03
424	17-19/03/1999	0,83	3,19	0,22	4,23	7,3	1095,96	10,64
425	27-03-1999	0,41	0,60	0,04	3,75	3,93	323,61	3,14
426	29-30/03/1999	1,47	4,01	0,25	5,01	8,75	864,81	8,4
427	09-10/04/1999	0,53	0,92	0,09	3,87	4,27	668,4	6,49
428	16-18/04/1999	2,60	22,06	0,67	10,20	106,32	2644,63	25,68
429	02-04/05/1999	0,49	2,49	0,13	3,84	6,24	995,43	9,66
430	17-22/12/1999	0,67	9,63	0,34	4,29	24,81	2221,61	21,57
431	01-02/01/2000	1,01	4,48	0,17	4,52	9,66	780,68	7,58
432	12-13/01/2000	0,13	0,29	0,02	3,48	3,63	601,12	5,84
433	17-20/01/2000	0,35	1,67	0,12	3,70	5,13	1277,34	12,4
434	25-29/05/2000	8,59	95,16	3,71	49,73	529,56	21481,5	208,56
435	03-10-2000	0,34	0,96	0,03	3,69	4,32	318,51	3,09
436	05-10-2000	0,12	0,15	0,01	3,47	3,5	299,82	2,91
437	27-10-2000	0,94	7,88	0,08	4,60	18,5	397,35	3,86
438	31/12/2000-01/01/2001	0,21	0,92	0,04	3,56	4,27	615,1	5,97
439	14-15/01/2001	0,56	3,06	0,10	3,96	7,1	684,05	6,64
440	20-22/01/2001	2,36	19,95	0,61	8,47	88,37	2196,42	21,32
441	26-01-2001	0,30	1,01	0,03	3,65	4,37	315,36	3,06
442	30/01-04/02/2001	3,42	21,34	1,77	10,49	100,06	5438,13	52,8
443	09-10/02/2001	0,70	1,56	0,12	4,05	5	699,38	6,79

444	18-02-2001	0,48	1,06	0,04	3,82	4,42	330,37	3,21
445	31/03-01/04/2001	0,30	2,10	0,05	3,65	5,69	630,28	6,12
446	28-29/04/2001	0,33	2,29	0,06	3,70	5,95	638,8	6,2
447	08-02-2002	0,12	0,26	0,01	3,48	3,6	300,49	2,92
448	22-23/02/2002	0,21	1,35	0,04	3,57	4,75	616,55	5,99
449	12-10-2002	0,11	0,20	0,01	3,33	3,55	287,55	2,79
450	06-09/11/2002	0,75	8,43	0,26	3,81	20,37	1317,67	12,79
451	18-11-2002	0,15	0,47	0,01	3,50	3,8	302,46	2,94
452	21-11-2002	0,14	0,58	0,01	3,50	3,91	302,15	2,93
453	26-27/11/2002	6,03	23,55	1,04	21,70	119,7	3749,99	36,41
454	01-08/12/2002	7,48	74,59	5,17	31,77	482,72	21958,12	213,19
455	21-22/12/2002	0,41	0,92	0,07	3,75	4,27	647,4	6,29
456	28-29/12/2002	0,62	2,39	0,11	3,99	6,09	688,8	6,69
457	31/12/2002-01/01/2003	0,39	1,10	0,07	3,73	4,47	644,21	6,25
458	11-13/01/2003	20,11	104,14	5,21	114,98	543,78	29803,68	289,36
459	15-21/01/2003	8,87	94,19	5,36	40,91	527,92	24739,54	240,19
460	23-29/01/2003	9,56	61,47	5,78	40,89	430,21	24732,92	240,13
461	01-07/02/2003	6,64	30,16	4,01	19,88	183,73	12021,09	116,71
462	12-15/02/2003	1,68	4,48	0,58	5,22	9,66	1802,56	17,5
463	17-02-2003	1,18	1,84	0,10	4,56	5,35	393,83	3,82
464	20-22/02/2003	1,36	9,63	0,35	5,03	24,81	1303,73	12,66
465	27/02-02/03/2003	3,42	15,56	1,18	9,76	55,92	3374,12	32,76
466	04-03-2003	1,26	1,48	0,11	4,64	4,9	401,1	3,89
467	16-17/03/2003	1,00	2,82	0,17	4,40	6,73	759,41	7,37
468	03-09/04/2003	15,39	161,77	9,31	83,67	2732,33	50601,08	491,27
469	14-04-2003	1,07	1,15	0,09	4,43	4,52	382,49	3,71
470	17-04-2003	1,32	1,84	0,11	4,73	5,35	408,31	3,96
471	20-04-2003	0,73	0,83	0,06	4,07	4,17	351,79	3,42
472	23-24/04/2003	0,59	0,74	0,10	3,92	4,08	677,77	6,58
473	26-27/05/2003	0,24	0,50	0,04	3,59	3,84	620,03	6,02
474	15-17/09/2003	0,40	8,06	0,10	3,94	19,1	1021,53	9,92
475	12-11-2003	0,19	1,20	0,02	3,55	4,58	306,31	2,97
476	12-14/12/2003	2,37	12,36	0,62	7,76	37,21	2011,39	19,53
477	20-12-2003	0,21	0,41	0,02	3,56	3,75	307,17	2,98
478	22-26/12/2003	1,47	8,43	0,63	5,38	20,37	2322,15	22,55
479	30/12/2003-06/01/2004	7,85	85,80	5,43	29,25	511,92	20220,27	196,31
480	19-01-2004	0,76	1,06	0,07	4,10	4,42	354,5	3,44
481	21-26/01/2004	1,89	9,22	0,98	5,71	23,22	2959,76	28,74
482	28-30/01/2004	1,46	4,99	0,38	4,98	10,73	1291,02	12,53
483	26-02-2004	0,37	0,48	0,03	3,71	3,82	320,48	3,11
484	23-24/03/2004	0,32	0,72	0,06	3,67	4,06	633,4	6,15
485	29-31/03/2004	0,25	0,54	0,07	3,60	3,88	932,52	9,05
486	10-12/04/2004	0,90	5,35	0,23	4,36	11,55	1129,26	10,96
487	16-04-2004	0,34	0,47	0,03	3,68	3,8	317,65	3,08
488	18-04-2004	0,43	0,70	0,04	3,77	4,04	325,57	3,16

489	24-25/04/2004	1,93	8,82	0,33	5,96	21,74	1029,46	9,99
490	05-05-2004	0,52	1,56	0,04	3,86	5	333,72	3,24
491	25-27/05/2004	0,48	1,67	0,12	3,83	5,13	991,73	9,63
492	1618/06/2004	2,03	10,06	0,53	6,53	26,53	1691,52	16,42
493	02-11-2004	0,23	0,56	0,02	3,58	3,89	308,99	3
494	08-11-2004	0,65	3,31	0,06	4,08	7,51	352,07	3,42
495	13-15/11/2004	6,45	157,66	2,23	29,70	571,72	10264,5	99,66
496	17-18/11/2004	1,18	2,94	0,20	4,59	6,91	792,7	7,7
497	08-12-2004	0,33	0,47	0,03	3,67	3,8	317,23	3,08
498	10-12/12/2004	2,47	10,27	0,64	6,86	27,43	1777,11	17,25
499	16-19/12/2004	2,00	8,63	0,69	6,01	21,05	2076,36	20,16
500	21-22/12/2004	1,28	1,92	0,22	4,68	5,46	808,46	7,85
501	25-26/12/2004	0,97	1,40	0,17	4,32	4,81	747,24	7,25
502	29/12/2004-04/01/2005	9,81	91,34	5,93	42,01	522,88	25408,57	246,69
503	07-01-2005	1,66	1,84	0,14	5,13	5,35	443,02	4,3
504	14-01-2005	0,89	0,96	0,08	4,23	4,32	365,67	3,55
505	19-21/01/2005	1,48	4,48	0,38	5,04	9,66	1304,97	12,67
506	25-31/01/2005	7,67	55,87	4,64	33,20	399,49	20080,52	194,96
507	02-02-2005	8,95	22,06	0,77	27,42	106,32	2369,48	23
508	09-11/02/2005	8,49	28,40	2,20	26,75	166,29	6934,22	67,32
509	14-20/02/2005	9,74	22,06	5,89	28,91	106,32	17487,41	169,78
510	27/02-02/03/2005	5,53	21,34	1,91	18,08	100,06	6247,37	60,65
511	05-03-2005	6,39	14,99	0,55	16,94	52,28	1463,99	14,21
512	07-10/03/2005	5,87	19,28	2,03	15,63	82,94	5399,97	52,43
513	14-04-2005	1,61	1,67	0,14	5,06	5,13	436,8	4,24
514	04-07/04/2005	2,56	56,55	0,88	15,24	403,53	5267,44	51,14
515	09-14/04/2005	9,18	33,89	4,76	37,96	220,79	19679,59	191,06
516	19-04-2005	1,23	1,28	0,11	4,61	4,66	398,44	3,87
517	11-12-2005	0,14	0,39	0,01	3,50	3,73	302	2,93
518	14-17/12/2005	4,30	28,40	1,48	18,86	166,29	6518,12	63,28
519	04-05/05/2006	1,43	19,28	0,25	6,75	82,94	1165,87	11,32
520	07-08/12/2006	0,78	5,17	0,13	4,30	11,13	742,18	7,21
521	18-19/12/2006	0,26	0,96	0,04	3,61	4,32	623,55	6,05
522	25-12-2006	0,86	1,67	0,07	4,23	5,13	365,82	3,55
523	31/01-01/02/2007	0,12	0,22	0,02	3,47	3,56	599,89	5,82
524	19-20/02/2007	0,22	0,54	0,04	3,56	3,88	615,88	5,98
525	24-02-2007	0,12	0,20	0,01	3,47	3,55	299,8	2,91
526	27-28/02/2007	0,16	0,58	0,03	3,51	3,91	606,26	5,89
527	11-15/03/2007	11,71	68,98	5,06	65,75	463,2	28401,72	275,74
528	21-24/03/2007	3,10	8,25	1,07	7,87	19,72	2720,96	26,42
529	26-03-2007	1,08	1,15	0,09	4,44	4,52	383,72	3,73
530	28-31/03/2007	1,26	2,82	0,44	4,67	6,73	1614,84	15,68
531	03-04-2007	0,80	1,08	0,07	4,14	4,44	357,88	3,47
532	06-04-2007	0,64	1,25	0,06	3,98	4,63	343,78	3,34
533	13-18/04/2007	2,15	14,17	1,11	6,96	47,23	3607,33	35,02

534	02-05-2007	0,39	0,60	0,03	3,73	3,93	322,04	3,13
535	17-11-2007	0,11	0,20	0,01	3,47	3,55	299,73	2,91
536	11-12/12/2007	0,16	0,39	0,03	3,51	3,73	606,05	5,88
537	16-17/12/2007	0,13	0,38	0,02	3,49	3,71	602,3	5,85
538	29-30/12/2007	1,49	7,69	0,26	5,55	17,92	959,18	9,31
539	16-02-2008	0,14	0,31	0,01	3,49	3,65	301,83	2,93
540	06-09/03/2008	0,60	6,67	0,21	4,09	14,88	1413,39	13,72
541	01-07/04/2008	2,13	24,31	1,29	8,64	126,81	5226,6	50,74
542	17-11-2008	0,33	0,72	0,03	3,68	4,06	317,63	3,08
543	11-12/12/2008	0,11	0,36	0,02	3,47	3,7	599,01	5,82
544	05-01-2009	0,48	0,96	0,04	3,82	4,32	330,06	3,2
545	12-15/01/2009	1,85	7,34	0,64	5,97	16,83	2062,12	20,02
546	17-01-2009	0,27	0,33	0,02	3,61	3,67	311,95	3,03
547	21-01-2009	0,26	0,45	0,02	3,60	3,78	311,4	3,02
548	27/01-04/02/2009	2,30	15,28	1,59	7,26	54,07	5014,72	48,69
549	09-02-2009	0,94	1,13	0,08	4,29	4,5	370,94	3,6
550	12-16/02/2009	3,34	15,56	1,44	9,29	55,92	4014,69	38,98
551	18-02-2009	1,19	1,33	0,10	4,57	4,72	394,85	3,83
552	24-26/02/2009	1,70	8,43	0,44	5,42	20,37	1404,64	13,64
553	05-09/03/2009	3,29	17,98	1,42	10,10	72,9	4362,79	42,36
554	30/03-01/04/2009	0,51	1,10	0,13	3,85	4,47	997,24	9,68
555	03-04/04/2009	0,48	0,79	0,08	3,82	4,13	659,27	6,4
556	08-09/04/2009	0,69	2,19	0,12	4,05	5,82	699,31	6,79
557	11-14/04/2009	2,67	10,49	0,92	7,77	28,37	2685,56	26,07
558	18-04-2009	0,83	1,10	0,07	4,17	4,47	360,62	3,5
559	20-24/04/2009	3,02	13,12	1,30	8,33	41,22	3600,36	34,95
560	28-29/08/2009	0,15	1,51	0,03	3,51	4,93	606,4	5,89
561	21-09-2009	0,22	0,90	0,02	3,57	4,24	308,74	3
562	23-27/09/2009	1,32	9,63	0,57	5,38	24,81	2323,84	22,56
563	01-02/10/2009	0,18	0,38	0,03	3,53	3,71	610,61	5,93
564	10-11/10/2009	0,33	1,25	0,06	3,68	4,63	635,21	6,17
565	22-23/10/2009	0,28	0,62	0,05	3,62	3,95	626,01	6,08
566	03-11-2009	0,20	0,28	0,02	3,55	3,62	306,28	2,97
567	08-11-2009	0,16	0,29	0,01	3,51	3,63	303,38	2,95
568	10-12/11/2009	0,73	2,94	0,19	4,12	6,91	1068,97	10,38
569	04-12-2009	0,14	0,22	0,01	3,50	3,56	301,94	2,93
570	16-12-2009	0,24	0,58	0,02	3,59	3,91	309,86	3,01
571	19-20/12/2009	0,38	0,90	0,07	3,73	4,24	644,05	6,25
572	27-12-2009	0,28	0,83	0,02	3,63	4,17	313,48	3,04
573	15-17/01/2010	2,05	13,37	0,53	6,86	42,65	1777,13	17,25
574	20-21/01/2010	0,62	1,25	0,11	3,96	4,63	683,52	6,64
575	27-01-2010	4,25	8,43	0,37	9,76	20,37	843,28	8,19
576	29-01-2010	1,28	2,01	0,11	4,68	5,57	404,28	3,93
577	31/01-02/02/2010	0,99	1,56	0,26	4,35	5	1126,43	10,94
578	07-02-2010	0,60	0,81	0,05	3,93	4,15	339,71	3,3

579	14-15/02/2010	0,58	0,96	0,10	3,91	4,32	676,07	6,56
580	19-02-2010	0,43	0,54	0,04	3,77	3,88	325,39	3,16
581	08-15/03/2010	1,05	4,82	0,72	4,47	10,36	3092,29	30,02
582	18-04-2010	0,29	0,39	0,02	3,63	3,73	313,79	3,05
583	22-24/04/2010	0,31	0,79	0,08	3,65	4,13	946,92	9,19
584	14-15/05/2010	0,14	0,26	0,02	3,49	3,6	603,15	5,86
585	30-05-2010	0,17	0,20	0,01	3,52	3,55	304,2	2,95
586	15-06-2010	0,12	0,22	0,01	3,48	3,56	300,44	2,92
587	18-19/10/2010	0,15	0,50	0,03	3,51	3,84	606,14	5,88
588	26-27/10/2010	0,27	0,85	0,05	3,62	4,19	624,73	6,07
589	03-08/11/2010	6,06	42,26	3,14	22,35	299,15	11584,25	112,47
590	10-11-2010	1,65	1,92	0,14	5,11	5,46	441,78	4,29
591	20-11-2010	0,58	0,92	0,05	3,92	4,27	338,97	3,29
592	15-18/12/2010	0,83	2,94	0,29	4,25	6,91	1467,94	14,25
593	22-01-2011	0,30	0,41	0,03	3,65	3,75	314,9	3,06
594	02-06/02/2011	7,45	57,24	3,22	32,28	407,52	13946,18	135,4
595	18-19/02/2011	0,54	0,79	0,09	3,88	4,13	670,15	6,51
596	21-28/02/2011	1,91	10,06	1,32	5,92	26,53	4090,22	39,71
597	02-05/03/2011	2,35	3,31	0,81	6,08	7,51	2102,07	20,41
598	07-03-2011	1,15	1,35	0,10	4,52	4,75	390,72	3,79
599	15-17/03/2011	6,07	26,72	1,57	21,93	149,75	5683,91	55,18
600	21-22/03/2011	1,55	2,39	0,27	5,00	6,09	864,13	8,39
601	23-24/04/2011	0,64	1,25	0,11	3,98	4,63	687,77	6,68
602	26-28/04/2011	1,57	10,94	0,41	5,54	30,35	1436,61	13,95
603	21-22/05/2011	0,42	1,25	0,07	3,77	4,63	650,54	6,32
604	29/10-02/11/2011	1,04	4,48	0,36	4,62	9,66	1596,62	15,5
605	29-30/11/2011	0,19	0,62	0,03	3,54	3,95	611,75	5,94
606	20-25/12/2011	1,55	8,25	0,80	5,39	19,72	2794,47	27,13
607	28-31/12/2011	0,73	1,56	0,25	4,08	5	1408,42	13,67
608	03-05/01/2012	1,38	4,48	0,36	4,90	9,66	1271,06	12,34
609	30/01-01/02/2012	0,86	2,29	0,22	4,25	5,95	1101,76	10,7
610	03-08/02/2012	4,58	12,36	2,38	11,12	37,21	5765,99	55,98
611	12-15/02/2012	4,22	13,90	1,46	10,13	45,65	3501,99	34
612	18-02-2012	1,42	1,59	0,12	4,83	5,03	417,53	4,05
613	22-25/02/2012	12,87	57,93	4,45	66,79	411,45	23080,87	224,09
614	27-28/02/2012	1,96	2,82	0,34	5,51	6,73	952,89	9,25
615	05-03-2012	1,03	1,59	0,09	4,40	5,03	379,75	3,69
616	08-11/03/2012	24,47	123,78	8,46	132,14	570,21	45668,58	443,38
617	13-03-2012	3,83	4,32	0,33	8,43	9,34	728,05	7,07
618	16-03-2012	2,01	2,60	0,17	5,59	6,4	482,55	4,68
619	18-03-2012	1,31	1,51	0,11	4,71	4,93	406,56	3,95
620	05-04-2012	0,73	1,28	0,06	4,07	4,66	351,7	3,41
621	16-18/04/2012	1,03	3,31	0,27	4,45	7,51	1154,2	11,21