



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf

Faculté d'architecture et génie civil

Département d'hydraulique

# THÈSE

En vue de l'obtention du

Diplôme de Doctorat en Sciences

---

Présenté et Soutenu par :

**CHENAOUI BAKHTA**

Intitulé

***Erosion et transport solide du bassin versant  
d'Oued Sly et leur impact sur l'envasement du  
barrage de Sidi Yacoub***

---

**Spécialité** : *Hydraulique*  
**Option** : *Hydraulique*

*Soutenue publiquement le 09/04/2018*

*Le jury est composé de :*

***Professeur, Yebdri Djilali***

***Professeur, Remini Boualem***

***Professeur, Cherif El Amine***

***Professeur, Hamoudi Saaed***

***Professeur, Habi Mohamed***

***Président***

***Encadreur***

***Examineur***

***Examineur***

***Examineur***

***U .S.T.O -MB***

***Université de Blida1***

***U .S.T.O -MB***

***U.H.B.B Chlef***

***Université de Tlemcen***

Année Universitaire 2017 / 2018

## Remerciements

Au terme de ce travail, j'adresse mes gratitudes au Professeur **REMINE BOUALEM** de l'université de Blida d'avoir accepté de diriger cette thèse. Je tiens à lui présenter mes remerciements d'avoir accepté de m'encadrer sur le thème de l'érosion, transport solide et envasement du barrage dans la région de Chlef.

Je remercie le Professeur **YEBDRI DJILALI** de l'université Mohamed Boudiaf d'Oran (USTO) de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements au Professeur **CHERIF EI AMINE** de l'université Mohamed Boudiaf d'Oran (USTO) d'avoir accepté d'être examinateur. Je n'oublierai jamais son soutien et ses qualités humaines.

Je remercie le Professeur **SAAED HAMOUDI** de l'université de Chlef d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

Je remercie le Professeur **HABI MOHAMED** de l'université de Tlemcen d'avoir accepté de juger le contenu de ce travail et participer au jury.

Je remercie particulièrement les organismes suivants : l'**A.N.R.H** (de Blida, d'Alger et d'Oran), l'**A.B.H** de Chlef et l'**A.N.B.T** d'Alger d'avoir mis à ma disposition les données climatiques et hydrométriques de la région d'étude.

Je remercie monsieur **Marc Binard** du département de géomatique, université de Liège, Belgique qui m'a énormément aidé dans la maîtrise du logiciel ArcGis et la partie SIG et Cartographie de la région d'étude durant mon Stage de formation au Département ARGENCO. Faculté des sciences appliquées. Université de Liège. Belgique.

Une pensée à **ma famille** qui m'a toujours soutenue et encouragée tout au long de mes années de travail.

## RESUME

Le travail élaboré est divisé en deux parties ; en première partie , il s'agit de l'étude de l'érosion et du transport solide au niveau du bassin versant de Oued sly en utilisant les données de la seule station hydrométrique existante à l'aval pour faire la modélisation à différentes échelles temporelles(interannuelle, annuelle, mensuelle, saisonnière et à l'échelle des crues) et avec les différents modèles régressifs (linéaire, parabolique, exponentiel, logarithmique et puissance). Le modèle accepté est utilisé pour calculer le volume de vase déposé au sein de la retenue en posant comme hypothèse que le volume entrant à la retenue n'est autre que celui calculé à l'aval par les données de la station hydrométrique.

La deuxième partie concernant l'étude du barrage de Sidi Yacoub, son exploitation et son état d'envasement. Afin de localiser les zones productrices de sédiments et permettre ainsi d'orienter le choix des actions anti-érosives selon la nature et les caractéristiques des sites, des cartes distinctes du degré d'érosion sont produites. Une carte synthèse est élaborée afin de visualiser la sensibilité à l'érosion du bassin versant d'Oued Lardjem ; carte réalisée à partir de la superposition de quatre cartes (carte impact de la pente, carte de friabilité, carte d'érosivité, et carte des risques liées au couvert végétal).

En effet, la valorisation des sédiments figure parmi les recommandations dans de nombreuses études effectuées sur le devenir des sédiments dragués ainsi que sur la préservation des ressources en eau et la protection de l'environnement.

**Mots clés** : érosion, transport solide, envasement, barrage de Sidi Yacoub, bassin versant d'Oued Sly, modèle régressif.

## ABSTRACT

The work is developed in two parts; in the first part, it is the study of erosion and sediment transport in the watershed of Oued Sly using data from the only existing gauging station downstream to modeling at different time scales (interannual, annual, monthly, seasonal and wide flood) and with different regression models (linear, parabolic, exponential, parabolic and power). The accepted model is used to calculate the volume of silt deposited in the reservoir under the assumption that the volume entering the reservoir is none other than that calculated by the downstream data from the hydrometric station.

The second part concerning the study of the dam of Sidi Yacoub, its operation and siltation state. To locate productive zones of sediment and allow thus to guide the selection of anti-erosion measures depending on the nature and characteristics of the sites, individual maps of the degree of erosion occurred. A synthesis map is developed to visualize the sensitivity to erosion of the Oued Lardjem watershed; map made from the superposition of four maps (slope impact map, friability map, erosivity map, and map risks related to vegetation cover).

Indeed, valuation of sediments among the recommendations in many studies on the fate of dredged sediments and on the preservation of water resources and environmental protection.

**Keywords:** erosion, sediment transport, siltation, Sidi Yacoub dam, Oued Sly watershed, regressive model.

## ملخص

العمل المقدم ينقسم الى قسمين، القسم الاول يتناول دراسة الانجراف و نقل الرواسب على مستوى حوض التغذية لواد سلي باستعمال معطيات المحطة الهيد و مترية ونمذجتها على مختلف الازمنة ( سنويا، شهريا، فصليا و خلال الفيضانات) وباستعمال مختلف الطرق الرياضية ويستعمل النموذج المقبول في حساب حجم الترسب في السد مع الأخذ بعين الاعتبار فرضية كون حجم الترسب الداخل الي السد هو نفسه المحسوب عند المحطة الهيد و مترية.

القسم الثاني يتناول دراسة سد سيدي يعقوب، استغلاله و مدى توحله. من اجل تحديد مناطق الترسب و طرق التصدي للانجراف، انجزنا مجموعة من الخرائط ( خريطة تأثير الانحدار، خريطة التآكل، خريطة الاضرار الناجمة عن الغطاء النباتي، خريطة التكوين الجيولوجي و خريطة التساقطات) و باسقاط جميعها تم استنباط خريطة الانجراف لحوض واد لرجام.

ان عملية تقييم و استغلال الترسبات في شتى المجالات من شأنها المحافظة على الموارد المائية و حماية المحيط.

**مفتاح الكلمات:** الانجراف، نقل الرواسب، توحل، حوض التغذية لواد سلي، سد سيدي يعقوب، الطرق الرياضية.

# TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale.....	01

## PREMIERE PARTIE: Le bassin versant de Oued Sly

### Chapitre I : Recueils théoriques sur le transport solide et l'envasement des barrages

I.1- Généralités.....	06
I.2- L'érosion des sols en Algérie.....	06
I.2.1-L'érosion hydrique.....	07
I.2.1.1-L'érosion laminaire (ou érosion en nappe).....	08
I.2.1.2-L'érosion en rigoles (ou érosion en griffes).....	08
I.2.1.3-L'érosion en ravines.....	08
I.2.1.4-Les mouvements de masse.....	09
I.2.1.5-Le sapement des berges.....	10
I.2.2- Le Contexte algérien.....	10
I.2.3 -Contribution des différents processus érosifs à la sédimentation des réservoirs.....	10
I.2.4- Techniques de lutte anti-érosive.....	10
I.2.4.1 -Typologie de la lutte selon le type d'érosion.....	10
I.2.4.2- Projets passés et actuels de protection des bassins versants et de lutte.....	15
I.2.4.3- Approches pour l'étude de l'érosion.....	19
I.2.4.3.1 -Approches visant l'estimation de la charge sédimentaire.....	19
I.2.4.3.2- Approches visant l'estimation des taux d'abrasion .....	25
I.2.4.3.3- Localisation des zones sensibles à l'érosion .....	26
I.2.4.3.4- Approches spécifiques associées à l'érosion en ravine .....	28
I.2.5- Méthodologie mise de l'avant par Tecsalt.....	29
I.2.5.1-Choix des approches d'estimation des taux d'envasement.....	30
I.2.5.2 -Approche visant la localisation des zones de production des sédiments.....	31
I.2.5.3-L'équation universelle de la perte des sols (RUSLE) .....	31
I.2.5.4- Modèle ICONA .....	34
I.2.5.5- Modèle de Gavrilovic.....	35
I.2.5.6- Cartographie des zones sensibles aux glissements de terrain .....	35
I.2.5.7- Cartographie des zones propices à l'érosion en ravine .....	36
I.3- Différents aspects du transport solide.....	38
I.3.1- Transport par charriage .....	38
I.3.2-Transport en suspension .....	39
I.3.3-Transport en solution et saltation .....	38
I.4 -Théorie du transport solide .....	38
I.4.1- Cas du charriage .....	38

I.4.2 -Cas de la suspension .....	39
I.5- L'évaluation du transport solide à partir des formules .....	40
I.5.1- Cas du charriage .....	40
I.5.2 -Cas de la suspension .....	42
I.5.3 -Transport solide total .....	45
I.6 -La mesure du transport solide dans les cours d'eau .....	46
I.6.1- Cas de la suspension .....	46
I.6.1.1- Méthodes de mesure.....	48
I.6.1.2- Appareillage de mesure.....	49
I.6.2- Cas du charriage .....	49
II/-Travaux réalisés dans le monde.....	50
III/-Travaux réalisés en Algérie.....	54

## **Chapitre II : Le bassin versant de Oued Sly**

II.1- Situation géographique .....	68
II.2- L'étude géologique de la région .....	69
II.3- Le Couvert végétal .....	70
II.4- Caractéristiques hydro-morphométriques du bassin versant .....	71
II.4.1 -La forme du bassin .....	71
II.4.1.1- Rectangle équivalent .....	72
II.4.1.2 -Orientation .....	73
II.4.2 - Relief du bassin.....	73
II.4.2.1- Courbe hypsométrique (méthode altimétrique) .....	73
II.4.2.2- Indice de pente (roche) .....	75
II.4.2.3- Indice de pente globale .....	75
II.4.2.4- La dénivelée spécifique .....	76
II.4.2.5- Altitude moyenne .....	76
II.4.2.6 - La pente moyenne .....	76
II.4.3- Réseau hydrographique .....	77
II.4.3.1- Densité de drainage.....	77
II.4.3.2- Coefficient de torrencialité .....	78
II.4.3.3- Temps de concentration .....	78
II.4.3.4- Vitesse de propagation des eaux.....	78
II.4.3.5- Coefficient de sinuosité.....	79
II.4.3.6- Profil en long .....	79

## **Chapitre III : Climat et hydrologie du bassin versant d'Oued Sly**

III.1 -Conditions climatiques et hydrologiques .....	84
III.1.1- Evapotranspiration .....	84
III.1.2 - Les vents .....	84
III.1.3 - Température.....	85
III.1.4 - Pluviométrie.....	85
III.2 - Equipement du bassin .....	86

III.3- Détermination de la pluie moyenne annuelle par la méthode de Thiessen.....	87
III.4- Analyse des précipitations.....	88
III.4.1- Variation annuelle des précipitations.....	89
III.4.2- Variation mensuelle des précipitations.....	90
III.4.3- Variation des pluies maximales journalières.....	92
III.4.4- Précipitations extrêmes.....	94
III.4.4.1- Ajustement des pluies annuelles.....	94
III.4.4.2- Ajustement des pluies mensuelles.....	96
III.4.4.3- Ajustement des pluies journalières.....	98
III.5- Etude des débits.....	100
III.5.1- Etude des débits extrêmes.....	105
III.5.2- Analyse fréquentielle des débits de crue par modèle QdF.....	106
III.6.- Conclusion.....	114

## **Chapitre IV : Etude du transport solide**

IV.1 – Présentation des données.....	116
IV.1.1 – Mode de prélèvement.....	116
IV.1.2 – Collecte et présentation des données.....	117
IV.2- Traitement des données .....	118
IV.2.1 - Méthode de corrélation entre débits liquides et solides.....	118
IV.2.2- Etablissement des relations de corrélation.....	119
IV.2.2.1- Etablissement des relations pour l'ensemble des données.....	119
IV.2.2.2- Etablissement des relations de corrélation à l'échelle annuelle.....	120
IV.2.2.3- Etablissement des relations de corrélation à l'échelle mensuelle.....	125
IV.2.2.4- Etablissement des relations de corrélation à l'échelle saisonnière.....	129
IV.2.2.5- Etablissement des relations de corrélation à l'échelle des crues.....	131
IV.2.3- Quantification de l'apport solide et l'érosion spécifique .....	136
IV.3- Conclusion.....	143

## **DEUXIEME PARTIE: Le barrage de Sidi Yacoub**

### **Chapitre V : Le barrage de Sidi Yacoub**

V.1- Introduction.....	145
V.2- Description de l'ouvrage.....	146
V.2.1- Le barrage en chiffre .....	148
V.3- Caractéristiques physiques du bassin versant .....	148
V.3.1 –Géologie et géomorphologie.....	149
V.3.2- Lithologie et stratigraphie .....	151
V.3.3- Séismicité .....	151
V.3.4- Végétation et occupation du sol .....	152
V.3.5- Description socio-économique du bassin versant.....	153
V.3.6-Conditions climatiques et hydrologiques .....	154

V.3.6.1- Vent et évapotranspiration .....	154
V.3.6.2- Température.....	155
V.3.6. 3-Humidité .....	156
V.3.6.4-Insolation.....	156
V.3.6.5- Pluviométrie .....	156
V.3.6.6-Hydrologie et réseau hydrographique .....	157
V.3.6.6.1- Étude des apports .....	157
V.3.6.6. 3- Etat d'envasement du barrage.....	158
V.3.6.7- Caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant.....	158
V.5- Analyse des données fournis par les lèves bathymétriques.....	160
V.5.1-Résumé des résultats obtenus .....	161
V.6- Prévision de l'envasement du barrage de sidi yacoub .....	161
V.6.1- La relation d'Orth .....	161
V.7- Exploitation des données relatives au barrage .....	163
V.8- Etablissement de la carte de sensibilité des sols à l'érosion (carte des zones à risque) ...	172
V.8.1-Cartographie des facteurs d'érosion .....	172
V.8.1.1- Réalisation de la carte de précipitation.....	172
V.8.1.2-La carte des précipitations .....	159
V.8.1.3-Réalisation de la carte d'occupation des sols.....	174
V.8.1.4-Réalisation de La carte des formations géologiques .....	175
V.8.1.5-Réalisation de la carte des pentes .....	176
V.8.1.6- Impacts des facteurs sur la sensibilité des terres à l'érosion .....	178
V.8.1.6.1- Carte d'érosivité.....	178
V.8.1.6.2- Carte de friabilité géologique.....	179
V.8.1.6.3- Carte de l'impact de la pente sur l'érosion .....	180
V.8.1.6.4- Carte des risques d'érosions liées au couvert végétal.....	181
V.8.1.6.5-Carte de sensibilité à l'érosion du Sous Bassin Versant Oued Lardjem .....	182
V.8.2-Conclusion.....	182
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>184</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>190</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>I.1</b> Equation de Tixeront selon la position géographique .....	<b>21</b>
<b>I.2</b> Equation de SOGREAH selon la perméabilité du socle.....	<b>22</b>
<b>I.3</b> Critères de sélection des formules de Kassoul et al.....	<b>24</b>
<b>I.4</b> Classes de sensibilité à l'érosion.....	<b>27</b>
<b>I.5</b> Valeurs des coefficients b et c selon la classe texturale.....	<b>32</b>
<b>I.6</b> Valeur du coefficient m selon la dénivelée.....	<b>33</b>
<b>I.7</b> Classe de pentes.....	<b>34</b>
<b>I.8</b> Classes du degré de couvert végétal.....	<b>34</b>
<b>I.9</b> Classes d'érosion suivant le coefficient d'érosion.....	<b>35</b>
<b>III.1</b> Statistiques sur la sédimentation des barrages en exploitation.....	<b>56</b>
<b>III.2</b> Intensité du processus d'érosion.....	<b>62</b>
<b>III.3</b> Quantification de l'érosion à différentes échelle spatiales.....	<b>65</b>
<b>II.1</b> Indice de compacité.....	<b>72</b>
<b>II.2</b> Répartition altimétrique du bassin versant d'Oued Sly.....	<b>74</b>
<b>II.3</b> Classification de l'O.R.S.T.O.M.....	<b>76</b>
<b>II.4</b> la répartition des moyennes altimétriques.....	<b>77</b>
<b>II.5</b> les altitudes du bassin versant d'Oued Sly.....	<b>77</b>
<b>II.6</b> Paramètres de calcul du profil en long.....	<b>79</b>
<b>II.7</b> Caractéristiques hydro-morphométriques du bassin versant.....	<b>81</b>
<b>III.1</b> Evapotranspiration potentielles moyennes mensuelles.....	<b>84</b>
<b>III.2</b> la vitesse du vent.....	<b>85</b>
<b>III.3</b> températures moyennes mensuelles.....	<b>85</b>
<b>III.4</b> Caractéristiques des différents postes pluviométriques du bassin.....	<b>86</b>
<b>III.5</b> Caractéristiques la station hydrométrique de Ouled Ben A.E.K.....	<b>86</b>
<b>III.6</b> Surfaces d'influence des postes pluviométriques.....	<b>88</b>
<b>III.7</b> Précipitations moyennes mensuelles.....	<b>91</b>
<b>III.8</b> Ajustement des pluies annuelles à la loi normale.....	<b>95</b>
<b>III.9</b> Pluies annuelles pour différents périodes de retour.....	<b>96</b>
<b>III.10</b> Ajustement des pluies mensuelles à une loi Log –normale.....	<b>98</b>
<b>III.11</b> Pluies mensuelles pour différents périodes de retour.....	<b>98</b>
<b>III.12</b> Ajustement des pluies journalières à la loi de Gumbel .....	<b>99</b>
<b>III.13</b> Pluies journalières pour différents périodes de retour.....	<b>100</b>
<b>III.14</b> Débit moyen annuel de la station Ouled Ben A.E.K.....	<b>101</b>
<b>III.15</b> Débit moyen mensuel pour toute la période d'étude (85-86/06-07).....	<b>102</b>
<b>III.16</b> Débit moyen saisonnier pour toute la période d'étude (85-86/06-07).....	<b>102</b>
<b>III.17</b> Caractéristiques de l'écoulement annuel de la station.....	<b>103</b>
<b>III.18</b> L'hydraulicité de la station de Ouled Ben A.E.K.....	<b>105</b>
<b>III.19</b> Echantillon de débit seuil .....	<b>109</b>

<b>III.20</b>	Quantiles théoriques estimés pour le bassin.....	<b>111</b>
<b>III.21</b>	Quantiles modélisés selon le modèle convergent.....	<b>112</b>
<b>III.22</b>	Paramètres d'ajustement par la loi exponentielle.....	<b>113</b>
<b>IV.1</b>	Modèles retenus à l'échelle interannuelle .....	<b>122</b>
<b>IV.2</b>	Corrélation à l'échelle annuelle.....	<b>122</b>
<b>IV.3</b>	Modèles retenus à l'échelle interannuelle.....	<b>125</b>
<b>IV.4</b>	Corrélation à l'échelle mensuelle.....	<b>126</b>
<b>IV.5</b>	Modèles retenus à l'échelle mensuelle.....	<b>130</b>
<b>IV.6</b>	Corrélation à l'échelle saisonnière.....	<b>130</b>
<b>IV.7</b>	Modèles retenus à l'échelle saisonnière.....	<b>130</b>
<b>IV.8</b>	Corrélation à l'échelle des crues.....	<b>132</b>
<b>IV.9</b>	Modèles retenus à l'échelle des crues.....	<b>135</b>
<b>IV.10</b>	Variation de l'apport solide à l'échelle annuelle.....	<b>136</b>
<b>IV.11</b>	Variation de l'érosion spécifique à l'échelle annuelle.....	<b>137</b>
<b>IV.12</b>	Variation de l'apport solide à l'échelle mensuelle.....	<b>138</b>
<b>IV.13</b>	Variation de l'érosion spécifique à l'échelle mensuelle.....	<b>139</b>
<b>IV.14</b>	Apport des sédiments apportés à la chaque saison .....	<b>140</b>
<b>IV.15</b>	Variation de l'érosion spécifique dans le bassin à l'échelle saisonnière .....	<b>141</b>
<b>IV.16</b>	Variation de l'apport solide à l'échelle de crue.....	<b>141</b>
<b>IV.17</b>	Variation de l'érosion spécifique à l'échelle de crue.....	<b>142</b>
<b>V.1</b>	Lithologie du bassin versant de l'Ardjem.....	<b>151</b>
<b>V.2</b>	Occupation du sol du bassin versant de Sidi .....	<b>153</b>
<b>V.3</b>	Vent et évapotranspiration de la région de Sidi Yacoub.....	<b>155</b>
<b>V.4</b>	Température moyenne de la région de Sidi Yacoub.....	<b>156</b>
<b>V.5</b>	Evaluation de la lame d'eau.....	<b>156</b>
<b>V.6</b>	Caractéristiques hydro-morphométriques du bassin.....	<b>159</b>
<b>V.7</b>	Tableau comparatif de volume à la cote normale de la retenue.....	<b>161</b>
<b>V.8</b>	Tableau comparatif de la surface a la cote normale de la retenue.....	<b>161</b>
<b>V.9</b>	Valeurs annuels du débit sortant et débit entrant.....	<b>163</b>
<b>V.10</b>	Hauteur- surface- capacité (nouvelle et ancienne situation) .....	<b>171</b>
<b>V.11</b>	Superficie des hauteurs pluviométriques.....	<b>173</b>
<b>V.12</b>	Superficies des occupations des sols.....	<b>175</b>
<b>V.13</b>	Superficies des formations géologiques.....	<b>176</b>
<b>V.14</b>	Superficie des pentes.....	<b>177</b>
<b>V.15</b>	Classe de risques.....	<b>179</b>
<b>V.24</b>	Classes des sensibilités géologiques.....	<b>180</b>
<b>V.25</b>	Classes des pentes .....	<b>181</b>
<b>V.26</b>	Risques liées au couvert végétal.....	<b>181</b>

## **LISTE DES FIGURES**

<b>I.1</b>	Détermination graphique du débit d'un cours d'eau.....	<b>47</b>
<b>II.1</b>	Situation du bassin de Oued Sly.....	<b>68</b>
<b>II.2</b>	Présentation du bassin de Oued Sly.....	<b>69</b>
<b>II.3</b>	La carte géologique du bassin versant de Oued Sly.....	<b>70</b>
<b>II.4</b>	Rectangle équivalent du bassin de Oued Sly.....	<b>73</b>
<b>II.5</b>	Carte topographique du bassin versant de Oued Sly.....	<b>74</b>
<b>II.6</b>	Courbe hypsométrique et répartition altimétrique.....	<b>75</b>
<b>II.7</b>	Profil en long de Oued Sly et ses affluents.....	<b>80</b>
<b>III.1</b>	La carte d'équipement du bassin versant.....	<b>87</b>
<b>III.2</b>	Détermination de la pluie moyenne par méthode de Thiessen.....	<b>88</b>
<b>III.3</b>	Variation annuelle des précipitations.....	<b>89</b>
<b>III.4</b>	Variation mensuelle des précipitations.....	<b>91</b>
<b>III.5</b>	Variation des pluies maximales journalières.....	<b>93</b>
<b>III.6</b>	Ajustement des pluies annuelles à la loi Normale.....	<b>94</b>
<b>III.7</b>	Ajustement des pluies mensuelles à la loi log Normale.....	<b>96</b>
<b>III.8</b>	Ajustement des pluies journalières à la loi de Gumbel.....	<b>100</b>
<b>III.9</b>	Variation du débit moyen annuel.....	<b>101</b>
<b>III.10</b>	Variation du débit moyen mensuel.....	<b>102</b>
<b>III.11</b>	Variation du débit saisonnier.....	<b>103</b>
<b>III.12</b>	Test de stationnarité de Lang.....	<b>107</b>
<b>III.13</b>	Chronique au pas de temps variable.....	<b>107</b>
<b>III.14</b>	Hydrogramme type de la station.....	<b>108</b>
<b>III.15</b>	Quantiles modélisés de la station.....	<b>110</b>
<b>III.16</b>	Les courbes QdFde la station.....	<b>110</b>
<b>III.17</b>	Les courbes QdF ajustées sur les débits seuils de la station.....	<b>111</b>
<b>III.18</b>	Choix du modèle pour la station.....	<b>112</b>
<b>III.19</b>	Ajustement selon la loi exponentielle.....	<b>113</b>
<b>IV.1</b>	Modèle retenu pour la relation interannuelle.....	<b>120</b>
<b>IV.3</b>	Relation entre débit liquide et débit solide à l'échelle annuelle.....	<b>121</b>
<b>IV.4</b>	Relation entre débit liquide et débit solide à l'échelle mensuelle.....	<b>128</b>
<b>IV.5</b>	Relation entre débit liquide et débit solide à l'échelle saisonnière.....	<b>131</b>
<b>IV.6</b>	Relation entre débit liquide et débit solide à l'échelle de crue.....	<b>135</b>
<b>IV.7</b>	Variation annuelle de l'apport solide en tonnes.....	<b>137</b>
<b>IV.8</b>	Variation de l'érosion spécifique à l'échelle annuelle.....	<b>138</b>
<b>IV.9</b>	Variation de l'apport solide à l'échelle mensuelle.....	<b>139</b>
<b>IV.10</b>	Variation de l'érosion spécifique à l'échelle mensuelle.....	<b>140</b>
<b>IV.11</b>	Variation de l'apport solide à l'échelle saisonnière.....	<b>140</b>
<b>IV.12</b>	Variation de l'érosion spécifique à l'échelle saisonnière.....	<b>141</b>
<b>IV.13</b>	Variation de l'apport solide de certaines crues sélectionnées.....	<b>142</b>

<b>IV.14</b> Variation de l'érosion spécifique de certaines crues sélectionnées .....	<b>143</b>
<b>V.1</b> Situation géographique du bassin versant du barrage de sidi Yacoub .....	<b>146</b>
<b>V.2</b> Vue du barrage Sidi Yacoub .....	<b>147</b>
<b>V.3</b> La carte géologique de bassin versant.....	<b>150</b>
<b>V.4</b> Carte du couvert des terres du bassin versant du barrage de Sidi Yacoub.....	<b>152</b>
<b>V.5</b> Bassin versant d'oued lardjem et son réseau hydrographique.....	<b>157</b>
<b>V.6</b> Prévision de l'envasement du barrage de sidi Yacoub .....	<b>162</b>
<b>V.7</b> Variation annuelle du débit entrant et sortant .....	<b>164</b>
<b>V.8</b> Variation journalière du débit entrant .....	<b>164</b>
<b>V.9</b> Variation journalière du débit sortant .....	<b>165</b>
<b>V.10</b> Variation journalière de la pluie .....	<b>165</b>
<b>V.11</b> Relation débit liquide à l'aval-débit sortant.....	<b>166</b>
<b>V.12</b> Relation débit entrant-pluie.....	<b>166</b>
<b>V.13</b> Relation débit entrant-pluie-débit sortant .....	<b>167</b>
<b>V.14</b> Variation du débit solide en fonction du temps.....	<b>167</b>
<b>V.16</b> MNT avant barrage .....	<b>169</b>
<b>V.17</b> MNT avec données bathymétriques2004.....	<b>169</b>
<b>V.18</b> Différence entre MNT avant barrage et MNT avec données bathymétriques 2004.....	<b>170</b>
<b>V.15</b> Variation du volume en fonction de la cote.....	<b>171</b>
<b>V.19</b> Carte des précipitations.....	<b>173</b>
<b>V.20</b> Répartition spatiale de la pluviométrie par rapport à la surface.....	<b>174</b>
<b>V.21</b> Carte d'occupation des sols.....	<b>174</b>
<b>V.22</b> Répartition de la superficie par type d'occupation.....	<b>175</b>
<b>V.23</b> Carte des formations géologiques .....	<b>175</b>
<b>V.24</b> Répartition de la superficie selon la géologie.....	<b>176</b>
<b>V.25</b> Carte des pentes du Bassin d'Oued Lardjem .....	<b>177</b>
<b>V.26</b> Répartition de la superficie par classes des pentes .....	<b>178</b>
<b>V.27</b> Carte d'érosivité.....	<b>178</b>
<b>V.28</b> Carte de sensibilité des formations géologiques.....	<b>179</b>
<b>V.29</b> Impact des pentes sur la vulnérabilité de l'érosion.....	<b>180</b>
<b>V.30</b> Carte des risques liés au couvert végétal .....	<b>181</b>
<b>V.36</b> Carte sensibilité Sous Bassin Versant Oued Lardjem.....	<b>182</b>

## Liste des abréviations

<b>ABH-CZ</b>	: Agence de bassin Hydrographique Chlef Zahrez
<b>AEP</b>	: Alimentation en Eau Potable
<b>ANBT</b>	: Agence Nationale des Barrages et Transferts
<b>ANRH</b>	: Agence Nationale des Ressources Hydriques
<b>ATD</b>	: Analyse ThermoDifférentielle
<b>ATG</b>	: Analyse ThermoGravimétrique
<b>DRS</b>	: Défense et Restauration des Sols
<b>DRX</b>	: Diffraction des Rayons X
<b>EGEM</b>	: Ecole de Géologie et d'Exploitation Minière
<b>FAO</b>	: Food and Agriculture Organisation
<b>FIDA</b>	: Fond International de Développement Agricole
<b>GCES</b>	: Gestion Conservatoire de l'Eau, de la biomasse et de la fertilité des Sols
<b>GTZ</b>	: Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
<b>HYDROMED</b>	: Gestion des ressources Hydrauliques en Méditerranée
<b>INRF</b>	: Institut National de Recherches Forestières
<b>IRD</b>	: Institut de Recherche et Développement
<b>IWK</b>	: Institut für Wasserwirtschaft für Karlsruhe
<b>ONF</b>	: Office Nationale des Forêts
<b>ONM</b>	: Office Nationale de Météorologie
<b>ORSTOM</b>	: Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
<b>PAM</b>	: Polyacrylamide
<b>PAP</b>	: Plan d'Aménagement de Protection
<b>PNE</b>	: Plan National de l'Eau
<b>PNUD</b>	: Programme des Nations Unies pour le Développement
<b>PRETHY</b>	: Programme d'Echantillonnage et de Traitements Hydrologiques
<b>QdF</b>	: Débit-durée-Fréquence
<b>RUSLE</b>	: Revised Universal Soil Loss Equation
<b>SIG</b>	: Système d'Information Géographique
<b>SINMAP</b>	: Stabilité Index Mapping
<b>TSS</b>	: Transport Solide Spécifique
<b>UTM</b>	: Universel Transverse Mercator

### INTRODUCTION GENERALE :

L'envasement ou l'alluvionnement est la conséquence naturelle de la dégradation des bassins versants dont le taux d'érosion spécifique atteint en Algérie les valeurs les plus importantes d'Afrique du nord ce qui rend l'étude de l'ampleur du phénomène et la gravité des problèmes qui en découlent la première préoccupation de l'agence nationale de gestion des barrages surtout lorsqu'il s'agit des réservoirs destinés à l'irrigation, dont les intérêt socio-économiques justifient une garantie de service illimité.

En Algérie où la disponibilité de l'eau est limitée, sa répartition inégale et sa demande en forte croissance, la perte de capacité des barrages par leur envasement continu est considérée comme un problème crucial à l'échelle nationale. La récupération de la capacité perdue des barrages par des techniques de dragage, de succion ou de chasse des sédiments, représente une solution parfois indispensable, mais toujours temporaire puisqu'elle ne s'attaque pas à la véritable source du problème.

Les conséquences de l'érosion ne se limitent pas à l'envasement des barrages. L'érosion contribue aussi à la perte de la couche arable, la plus fertile du sol, diminuant sa productivité et dégradant la qualité des eaux de surface. Par ailleurs, les particules de sol qui rejoignent les oueds et les barrages contribuent, d'une part, à rehausser le lit des cours d'eau entraînant un risque plus élevé d'inondation et, d'autre part, à augmenter la turbidité des eaux, ce qui affecte les infrastructures en aval telles que les usines de traitement d'eau potable, les centrales hydroélectriques et les barrages. Ce dernier problème touche particulièrement les pays du Maghreb. En Algérie, une réduction de 20% de la capacité initiale de stockage était liée à l'envasement des retenues depuis la construction des barrages (Benblidia et al., 2001).

L'atteinte de cet objectif de réduction du taux d'envasement passe non seulement par l'élaboration de mesures de protection anti-érosives orientées vers la réduction des taux d'érosion, mais aussi par la réduction de la quantité des sédiments atteignant le barrage. Quel que soit le degré de réduction envisageable du taux d'envasement du barrage à l'étude, la protection de sa capacité utile aura un impact; à moyen et long terme sur le développement durable des ressources en eau et se répercutera sur l'ensemble des activités économiques liées directement ou indirectement à la disponibilité de l'eau en quantité et en qualité suffisante.

Afin de permettre d'identifier et d'évaluer la nature et l'ampleur des processus d'érosion en cours, il a été indispensable de réaliser une revue exhaustive des documents et études existantes, de procéder à une collecte de données nécessaires à la description des milieux physiques propres au bassin versant et de concevoir un outil d'analyse capable de mettre à profit plusieurs méthodologies d'étude de l'érosion susceptibles de répondre aux objectifs de quantification des taux d'envasement et de localisation des zones de forte production de sédiments.

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

Pour mieux comprendre le contexte dans lequel la région d'étude se situe, le **chapitre I**, intitulé : recueils théoriques sur le transport solide et l'envasement des barrages, présente une revue de littérature sur l'érosion des bassins versants en amont des barrages, sous toutes ses formes : laminaire, en rigole, en ravine, des berges, glissement de terrain, coulée de boue, etc , qui est à l'origine de l'envasement des barrages. Que ce processus soit naturel ou anthropique, l'érosion est un phénomène complexe. Elle englobe non seulement le détachement ou l'ablation des particules de sol, mais aussi leur déplacement d'un point à un autre du bassin versant.

Consciente de ce problème, la Direction de la Maintenance et du Contrôle (DMC) de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT), agissant pour le compte du Ministère des Ressources en Eau, confiait à Tecslut International Limitée, le 5 septembre 2005, au terme d'un processus d'appel d'offres international, le mandat d'Étude de la protection du bassin versant du barrage Sidi-Yacoub. Pour ce faire, Tecslut a préconisé une méthodologie consistant à évaluer divers indices de risque d'érosion. Le premier groupe d'indices englobait les modèles permettant de localiser les versants théoriquement les plus sensibles à l'érosion à l'échelle des sous-bassins versants. Le deuxième groupe d'indices englobait tous les modèles d'estimation de la charge sédimentaire, c'est-à-dire les volumes de sédiments susceptibles d'atteindre la retenue de barrage. Ces indices sont forts utiles car ils représentent un bilan de tous les types d'érosion et permettent d'estimer les volumes totaux de sédiments se déversant dans le réservoir. La collecte de certaines données additionnelles sera toutefois nécessaire afin de permettre, d'une part, l'exploitation optimale des modèles retenus et, d'autre part, la comparaison des valeurs d'envasement générées par ces modèles avec les valeurs mesurées de transport de sédiment et d'envasement.

La première approche fait appel à neuf formules régionales de production, de transport ou d'apports solides adaptés au contexte algérien. Ces neuf formules tirées de la littérature sont :

La formule de Fournier (1960);

La formule de Tixeront (1960);

La formule de SOGREAH (1969);

La formule de l'A.N.R.H. (1982);

La formule de Saidi (1991);

La formule de Gavrilovic (1992);

La formule de Probst et Suchet (1992);

La formule de Kassoul et al. (1997);

La formule de Touaïbia et al. (2003).

La charge solide sera également estimée au moyen d'une méthode analogique en comparant le bassin versant étudié avec un autre bassin versant algérien dont les caractéristiques du milieu (sol, pente, végétation, utilisation des sols) sont similaires et pour lequel le débit solide est connu.

Dans la seconde approche, la cartographie des zones de production de sédiments sera effectuée au moyen de trois modèles. Ces modèles seront l'équation universelle des pertes de sols (RUSLE), le modèle ICONA et finalement le modèle de Gavrilovic (1992). Pour des fins d'illustration cartographique et de détermination de stratégies d'aménagement, l'état érosif des versants sera divisé en quatre classes principales de vulnérabilité des sols, soient les niveaux "négligeable", "modéré", "élevé" et "très élevé". Par ailleurs, les probabilités de glissement de terrain seront également évaluées en s'appuyant sur le même type de procédure, à la différence que l'analyse des caractéristiques morphologiques des sites portera d'avantage sur les écoulements hypodermiques de l'eau et sur la sensibilité des formations géologiques.

Dans le **chapitre II**, la description du milieu physique du bassin versant, permettra de préciser les principales caractéristiques des milieux physique et humain propres au bassin versant du barrage Sidi-Yacoub. Il met en lumière pour le bassin versant :

- ses limites géographiques;
- la localisation du barrage;
- le chevelu du réseau hydrographique;
- sa topographie (modèle numérique de terrain);
- ses paramètres physiographiques;
- sa géologie et sa géomorphologie;
- son couvert végétal;
- ses principales caractéristiques socio-économiques.

Par la suite, le **chapitre III** identifie et évalue les conditions climatiques et hydrologiques, l'analyse statistique des précipitations et l'étude des débits.

Au cours du **chapitre IV**, La variabilité du transport solide a été mise en évidence, une relation entre les débits liquides et les débits solides à différents échelles temporelles (interannuelle, annuelle, mensuelle, saisonnière et à l'échelle des crues) la justifie.

On associe toutes les observations (couples) et on recherche les relations à différentes échelles temporelles, on utilisant les différents modèles régressifs (linéaire, parabolique, exponentiel et puissance). Selon la valeur du coefficient de détermination, on retient le modèle puissance.

Le modèle régressif retenu a servi pour le calcul de l'apport de sédiments apporté annuellement au droit de la station hydrométrique.

Pour l'identification et l'évaluation du degré d'érosion, au cours du **chapitre V** le système d'information géographique mis en place permet de générer les cartes thématiques des principaux facteurs intervenants dans l'érosion des sols, notamment l'agressivité des pluies et l'érodabilité des sols.

Puisque il n'existe pas de mesures du taux d'envasement du barrage, celui-ci sera estimé à partir des cartes présentés au **chapitre V** et intégrés au système d'information géographique.

Afin de localiser les zones productrices de sédiments et permettre ainsi d'orienter le choix des actions anti-érosives selon la nature et les caractéristiques des sites, des cartes distinctes du degré d'érosion seront produites.

Finalement une carte synthèse est élaborée afin de visualiser la sensibilité à l'érosion du bassin versant Oued Lardjem ; carte réalisée à partir de la superposition de quatre cartes (carte impact de la pente, carte de friabilité, carte d'érosivité, et carte des risques liées au couvert végétal).

Cette étude s'intègre aux efforts d'exploitation optimale et durable des ressources en eau menés par le Gouvernement de la République d'Algérie. L'atteinte de cet objectif de réduction du taux d'envasement passe non seulement par l'élaboration de mesures de protection anti-érosives orientées vers la réduction des taux d'érosion, mais aussi par la réduction de la quantité des sédiments atteignant le barrage. Quel que soit le degré de réduction envisageable du taux d'envasement du barrage à l'étude, la protection de sa capacité utile aura un impact; à moyen et long terme sur le développement durable des ressources en eau et se répercutera sur l'ensemble des activités économiques liées directement ou indirectement à la disponibilité de l'eau en quantité et en qualité suffisante.

# **Chapitre I : Recueils théoriques sur le transport solide et l'envasement des barrages**

---

### I/- Recueils théoriques sur le transport solide et l'envasement des barrages

#### I.1- Généralités :

L'érosion hydrique qu'elle soit pluviale ou fluviale s'accompagne par une mobilisation des alluvions apportés par l'écoulement à des époques géologiques antérieures. En cas d'un couvert végétal discontinu ou totalement absent, le ruissellement dû aux eaux de pluie et surtout à la suite d'averses torrentielles décape progressivement les horizons supérieurs du sol, jusqu'à atteindre parfois la roche mère. Le long du versant, la lame d'eau en mouvement déploie une force après sa concentration lui permettant d'arracher les obstacles (grains de sables, végétaux, etc...).

«Une fois détachée, la particule est mise en mouvement par le rejaillissement de la goutte de pluie sur la surface du sol et est entraînée par l'écoulement le long de la pente» (Meyer et al., 1975). Les obstacles arrachés, emportés par l'eau, se mélangent à elle. La faculté d'érosion augmente avec l'épaisseur de la lame d'eau ruisselée donc avec la forte intensité de pluie et la longueur du bassin versant.

La capacité de transport des particules solides varie dans l'espace et dans le temps avec le débit liquide, sa vitesse d'écoulement et la nature granulométrique des matériaux. Les matériaux arrachés au sol finissent par atteindre le réseau hydrographique.

Afin de permettre d'identifier et d'évaluer la nature et l'ampleur du processus d'érosion, il a été indispensable de réaliser une revue exhaustive des documents et études existantes, de procéder à une collecte de données nécessaires à la description du milieu physique propre au bassin versant et de concevoir un outil d'analyse capable de mettre à profit plusieurs méthodologies d'étude de l'érosion susceptibles de répondre aux objectifs de quantification du taux d'envasement et de localiser les zones de forte production de sédiments.

La revue de littérature est divisée en trois grandes parties décrivant la problématique de l'érosion des sols en Algérie, les techniques de lutte anti-érosives et finalement les approches pour modéliser le phénomène.

#### I.2- L'érosion des sols en Algérie :

Il existe actuellement en Algérie 98 ouvrages de retenues des eaux et bien que théoriquement ils devraient retenir une capacité totale de plus de 4,3 milliards de m<sup>3</sup> d'eau, ils ne contiennent en fait que la moitié de ce volume compte tenu de leur envasement (Boudjadja et al., 2003). Puisque les ouvrages en cours de réalisation porteront éventuellement le nombre de retenues à 143, il est nécessaire de bien comprendre les enjeux associés à la dégradation de leur bassin versant.

La diminution progressive de la capacité de stockage de l'eau des barrages algériens est telle que la majorité ont une durée de vie d'à peine une trentaine d'années (Remini et Kettab, 1994). La courte durée de vie de certains barrages est causée par le taux élevé de capture des sédiments (plus de 90 %) qui sont transportés continuellement par les oueds

alimentant les réservoirs (Remini, 2003). La poussée de la vase exercée sur le corps du barrage diminue sa stabilité et peut rendre inopérants certains équipements hydromécaniques tels que les organes de vidange de fond (Chadi et Hadji, 1992). Si le barrage est aussi utilisé à des fins d'irrigation, un envasement trop important du réservoir peut provoquer à son tour l'envasement des canaux d'irrigation situés en aval du barrage (Remini, 1989; Remini, 1999).

L'envasement peut endommager les infrastructures, telles les turbines et les vannes, et même entraîner le déclassement du barrage (Boudjadja et al., 2003). Par ailleurs, des coûts sont également associés à la chasse des sédiments par les vannes de fond, un procédé dont l'efficacité est variable (Remini, 1999).

L'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) a estimé un envasement annuel d'environ 20 millions de m<sup>3</sup> pour l'ensemble des barrages en exploitation en 1995 (Boudjadja et al., 2003). Afin d'examiner le lien entre la vitesse de comblement des réservoirs et les caractéristiques des bassins versants, Remini (1989) a établi, en étudiant 34 barrages du Maghreb, deux relations; une première liant les taux d'envasement (Env. en 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/an) aux apports liquides annuels (A en 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) et une seconde liant le taux d'envasement à la superficie des bassins versants (S en km<sup>2</sup>):

$$\text{Env.} = 0,0332 A^{0,694} \quad (\text{I-1})$$

$$\text{et Env.} = 0,0097 S^{0,6} \quad (\text{I-2})$$

Ce type de modèles prédit des taux de sédimentation qui sont utiles pour cibler les barrages prioritaires à dévaser. Or, selon Benblidia et al. (2001) qui ont examiné l'efficacité des différentes méthodes de dévasement des barrages algériens, la solution du dévasement règle le problème à court terme. Ils estiment plutôt que la problématique de l'envasement des barrages doit être réglée par l'implantation de stratégies plus globales et à plus long terme d'aménagement des bassins versants. Ces stratégies peuvent s'attaquer au déplacement des particules en les empêchant d'arriver jusqu'aux barrages par la construction de structures dans le cours d'eau afin de décanter les apports (Honermann 1991). Toutefois, Touaïbia et al. (1995) ont démontré que l'implantation de retenues ne peut suffire à freiner l'érosion pour les bassins présentant des zones de marnes. Ces auteurs proposent que la lutte contre l'envasement des barrages doive être menée sur l'ensemble du bassin en réduisant le déplacement initial des sédiments sur les versants.

### **I.2.1-L'érosion hydrique :**

L'érosion des sols peut se diviser en deux types, l'érosion géologique et l'érosion accélérée. L'érosion géologique est un processus naturel d'équilibrage du relief qui aplani inexorablement les collines et les montagnes et remplit les vallées et les lacs. Le taux d'érosion géologique dépend principalement du climat et de la lithologie et est généralement élevé dans les pays semi-arides comme l'Algérie car les précipitations y sont assez fortes pour endommager la surface des sols, mais pas assez pour permettre le développement d'un couvert végétal jouant un rôle protecteur. À l'opposé, l'érosion accélérée survient lorsque les populations perturbent les sols ou le couvert végétal par l'entremise de l'élevage, des activités forestières, d'agriculture et des travaux de construction. Quelle soit géologique ou accélérée, l'érosion se produit en deux phases, soit le détachement des particules de la surface

du sol et leur déplacement des versants aux oueds. Pour certains auteurs, le dépôt subséquent des particules est parfois inclus dans le phénomène de l'érosion tandis que pour d'autres il s'agit d'un phénomène indépendant qu'ils nomment sédimentation. Malgré cette divergence, les spécialistes classifient les principaux types d'érosion de sols.

Selon le déplacement des particules érodées sur les surfaces. L'érosion hydrique se manifeste sous cinq formes : l'érosion laminaire, l'érosion en rigole, l'érosion en ravines, le sapement des berges et les mouvements de masse.

### **I.2.1.1-L'érosion laminaire (ou érosion en nappe) :**

Dès que le sol cesse d'absorber la totalité de la pluie, l'eau en excès ne peut s'infiltrer et ruisselle donc sur la surface du sol en déplaçant les particules arrachées de la surface par la battance de la pluie. Lors de leur écoulement sur les surfaces, ces particules conjointement avec l'accélération de la vitesse de l'eau de ruissellement exercent un effet mécanique capable d'entraîner le détachement d'autres particules. L'érosion laminaire est difficile à détecter sur le terrain car les sols perdent une mince couche de façon plus ou moins uniforme. Par ailleurs, l'érosion laminaire est un processus idéalisé qui est rarement présent dans les champs car en raison du micro-relief du terrain, l'eau de ruissellement tend à se concentrer et à creuser les surfaces sous forme de rigoles.

### **I.2.1.2-L'érosion en rigoles (ou érosion en griffes) :**

Au Maroc, Kalman (1976) a observé que l'érosion en rigoles (griffes) est actif au début du ruissellement, mais diminue au cours de l'événement jusqu'à devenir minime. Cette étude a également démontré que la présence d'une rigole préexistante au début d'une averse ne provoquera pas une érosion supérieure. Ainsi, Kalman (1976) a conclu que les rigoles ne sont pas un facteur provoquant l'érosion mais plutôt un symptôme. Puisqu'elles sont initialement petites et peu profondes, ces rigoles sont facilement effacées par les pratiques agricoles. Toutefois, si ce processus s'intensifie lors d'événements pluviaux successifs, les rigoles deviennent de plus en plus profondes et créent des ravines.

### **I.2.1.3-L'érosion en ravines**

L'érosion en ravines se produit lorsque les rigoles touchent non seulement à l'horizon de surface mais érodent également les horizons sous-jacents à un point tel que les pratiques agricoles ne peuvent effacer les traces. Lorsque les ravines creusent les horizons de sol, elles peuvent parfois atteindre un sous-sol plus résistant à l'érosion provoquant l'allongement des ravines vers le haut de la pente. Sur des micro-bassins expérimentaux, Bouguerra (1985) a démontré que le ravinement est un facteur prédominant dans le processus global de l'érosion. Chebbani et Belaidi (1997) ont démontré que dans le bassin versant de l'Oued Isser, les ravines se développent en trois étapes. Les ravines débutent par une alternance entre l'ablation et le dépôt des sédiments suivi par le creusement, le comblement et l'affouillement du fond des ravines et finalement par une érosion régressive remontante. Kouri et al. (1997) ont montré que dans la région de l'oued Mina, les facteurs influençant l'érosion en ravines sont le type de marne, la pente, l'exposition des versants, l'utilisation du sol et la morphologie des parois des ravines. L'influence de la pente sur le ravinement a également été observée par Morsli et al. (2004). Roose et al. (2000) ont classifié les ravines observées dans les montagnes du Nord-Ouest de l'Algérie selon cinq types: 1) les ravines en

«V» observées sur des matériaux homogènes et tendres des vertisols, 2) les ravines en «U» survenant sur des sols hétérogènes comme des sols à croûtes calcaires, 3) les ravines «en tunnel» se développant sur des sols à argiles gonflantes et les marnes contenant des sels solubles, 4) les ravines reliées avec les glissements de terrain sur les pentes fortes et 5) les ravines régressives provenant du sapement des colluvions par les cours d'eau. À l'instar de l'érosion en nappe et rigoles, l'érosion en ravines déplace les sols sous forme de particules ou d'agrégats de façon lente. Il existe cependant des processus pouvant déplacer des blocs de sols de façon spontanée: les mouvements de masse et les coulées boueuses.

### **I.2.1.4-Les mouvements de masse :**

L'eau joue toujours un rôle prépondérant dans ce processus, mais le mouvement du sol se produit non par le mouvement de l'eau, mais plutôt suite à un stress gravitationnel. En effet, lorsque les sols constitués de limons et d'argiles sont gorgés d'eau, les colloïdes responsables de la cohésion du sol prennent une consistance liquide. Si ces sols « liquéfiés » sont situés sur de fortes pentes avec un sous-sol imperméable, ils peuvent glisser spontanément dans un mouvement d'ensemble (glissement de terrain) ou encore sous forme de coulée boueuse si les matériaux sont à peu près complètement fluidifiés. Suite à l'analyse de 32 mouvements de terrain dans le bassin versant du Rhumel constantinois, Rullan-Perchirin (1989) a noté que la majorité des mouvements se développent soit sur des terres non cultivées à fortes pentes (25 %) ou bien sur des terres ensemencées mais avec un couvert végétal peu protecteur. Il a également été noté que près d'un quart des mouvements de masse résultent de matériaux argileux gorgés d'eau. Travaillant dans la même région, Benaïssa (1998) et Benaïssa et Bellouche (1999) ont également noté cette influence des formations géologiques sur les mouvements de masse. Les mouvements de masse et les trois premiers types d'érosion contribuent en partie à la charge sédimentaire des cours d'eau, le reste provenant de l'érosion des berges.

### **I.2.1.5-Le sapement des berges :**

La force cinétique reliée à l'écoulement de l'eau peut exercer un stress sur les berges et y éroder les matériaux les plus fragiles. Le sapement des berges provoque l'éboulement de masses importantes de sols dans les cours d'eau dans lesquels ces masses se fragmentent et s'incorporent à la charge du cours d'eau. Ramdane (1985) a démontré par photo-interprétation que ce phénomène est présent dans le bassin versant de l'Oued Isser. Rullan-Perchirin (1989) a noté que le sapement des berges contribuait aux mouvements de masses surtout dans la zone aval des bassins versants.

Quel que soit son type, l'importance de l'érosion ne dépend pas que d'un seul et unique facteur mais résulte plutôt d'une interaction entre plusieurs facteurs. L'érosion intensive observée dans le Nord de l'Algérie est le fruit de l'action de plusieurs facteurs qui sont d'une part climatologiques et lithologiques (Mazour, 1992). À l'aide de la superposition de cartes des formes d'érosion et des facteurs théoriques d'érosion, Brahamia (1993) a observé que l'apparition des formes d'érosion est reliée à un couvert végétal faible et inadéquat, à une lithologie friable et à une exposition des versants favorisant la dessiccation des sols.

### 1.2.2 Le Contexte algérien :

Pouquet (1952) a affirmé que l'érosion des sols en Algérie du Nord était principalement géologique et que l'homme ne faisait qu'avancer de quelques siècles des phénomènes inéluctables puisque liés à des conditions incontrôlables par l'homme. Cependant, deux autres chercheurs ont attribué les principales causes de l'érosion en Algérie à de l'érosion accélérée soit par l'entremise de la destruction du couvert végétal forestier protecteur des sols (Despois, 1949) ou soit par l'exploitation des terres agricoles en zones très montagneuses (Benchetrit, 1972). Tihay (1976) a testé l'explication géologique de Pouquet (1952) et celles anthropiques de Despois (1949) et Benchetrit (1972) afin de déterminer laquelle joue un rôle majeur dans l'érosion de la vallée de la Soummam. Il conclut que la cause majeure de l'érosion était anthropique puisque due au peu d'entretien des structures anti-érosives et à l'abandon des pratiques culturales ancestrales telles que le système de polyculture dans les secteurs éloignés des villages. L'étude de Tihay (1976) a bien démontré l'importance de l'érosion accélérée en Algérie. Or, ce type d'érosion peut être diminué et maintenu à un niveau tolérable par l'implantation de plans de gestion de conservation des sols.

### 1.2.3 Contribution des différents processus érosifs à la sédimentation des réservoirs :

Heusch (1970) a été l'un des premiers à comparer les différents types d'érosion pour la contribution de la charge sédimentaire des oueds marocains et a obtenu l'ordre suivant :

Érosion en nappe < érosion en rigole < érosion en ravines < érosion de masse

En Algérie, Brahamia (1993) a mesuré la superficie d'un bassin versant affectée par chaque type d'érosion et a démontré que la superficie des régions touchées par l'érosion en nappe était sensiblement la même que celle de l'érosion en ravines. Mise ensemble, ces superficies couvraient plus de la moitié du territoire. Cependant, même si ces types d'érosion couvrent sensiblement la même superficie, ils ne génèrent pas les mêmes volumes de sédiments. En effet, Demmak (1982) et Arabi (1991) ont soulevé l'hypothèse que sur les versants cultivés, l'érosion en nappe contribuait modestement à la charge sédimentaire des oueds. Mazour (1992) et Brahamia (1993) ont confirmé la faiblesse de l'érosion en nappe sur des parcelles situées respectivement dans le bassin versant de l'Isser et de l'Oued Mina. Pour sa part, Roose et al. (1993) ont examiné l'influence de l'érosion en nappe pour 50 parcelles réparties entre quatre stations de recherche dans le Nord de l'Algérie. Leurs travaux ont démontré que l'érosion en nappe n'est pas un processus actif sur les versants algériens dû à la richesse des sols en cailloux et en argile saturée en calcium. Roose et al. (1993) ont plutôt suggéré que l'érosion en rigole est le type d'érosion hydrique le plus actif. Cependant, Amirèche (1994) a observé que les deux principales formes d'érosion dans le Tell nord constantinois sont le ravinement et les mouvements de masse. Kouri et al. (1997) ont également démontré que l'érosion en ravines et les glissements de terrain sont les types d'érosion les plus actifs sur les terrains marneux. Megnounif et al. (2003) ont montré que la contribution de l'érosion des berges et du lit de l'oued comparativement à l'érosion en versant est presque constante d'une année à l'autre mais varie à l'échelle saisonnière. En effet, la contribution de l'érosion des berges est plus importante au printemps en raison de l'augmentation des débits dans le chenal et à la présence de végétation sur les versants qui réduit les autres sources de sédiments. En été, lorsque les débits diminuent dans le cours

d'eau, les sédiments proviennent presque exclusivement de l'érosion des versants survenant lors d'orages.

### 1.2.4 Techniques de lutte anti-érosive :

Afin de contrer l'érosion des sols et réduire l'envasement des structures hydrauliques, plusieurs techniques anti-érosives ont été adoptées.

#### 1.2.4.1 Typologie de la lutte selon le type d'érosion :

Le contrôle de l'érosion ne peut être efficace par l'application d'une seule technique, mais plutôt par une série de mesures. Ainsi, les principales méthodes de correction selon les différents types d'érosion seront présentées et particulièrement celles dont les effets se veulent permanents et qui permettent l'aménagement de sites à large échelle.

##### a)- Erosion en nappe :

Il existe deux approches pour réduire l'impact de l'érosion en nappe. On peut diminuer l'abrasion des versants en protégeant la surface des sols soit contre l'érosivité de la pluie ou encore contre le ruissellement.

##### *Diminution de l'érosivité de la pluie :*

La façon la plus efficace de protéger les sols de la battance de la pluie est par l'établissement d'un couvert végétal sur les versants. Ce couvert végétal protecteur peut être obtenu en milieu agricole en semant des plantes de couverture entre les périodes de culture principale ou bien entre les rangs des cultures permanentes. L'implantation d'un couvert végétal sur des versants non agricoles comme les talus de route et de canaux d'irrigation, s'effectue par l'ensemencement hydraulique de graminées et de légumineuses car celles-ci s'enracinent facilement même pour des conditions de terrain les plus adverses (Dumouchel, 1991). Sur les versants possédant des sols trop pauvres pour l'établissement efficace des graminées et légumineuses, il est plutôt suggéré de planter des arbustes. En effet, certains types d'arbustes, les aulnes par exemple, peuvent croître sur des sols pauvres car leur source principale d'approvisionnement en azote ne provient pas des sols mais de l'atmosphère.

La protection des versants par l'implantation d'un couvert végétal est une excellente technique mais nécessite l'usage d'une couverture de protection avant leur établissement. Ces couvertures peuvent être simplement composées d'éléments parsemés (paille, foin et copeaux de bois), de paillis composés de matériaux biodégradables ou de grillages en matériel synthétique. Benik et al. (2003) ont comparé cinq types de couvertures : de la paille, trois types de paillis (fibre de bois, noix de coco, paille) et un grillage. Ils ont observé que la paille a été le type de couverture le plus efficace avec un taux d'érosion environ dix fois inférieur à un site témoin (sol nu). Pour leur part, les paillis biodégradables ont tous réduit l'érosion de façon similaire.

Une autre façon de stabiliser les versants pendant l'établissement de la végétation est par l'application d'un stabilisateur chimique tel que le polyacrylamide (PAM). Le PAM est une molécule organique en vente libre sous forme de poudre qu'on peut appliquer sur les sols directement ou après dissolution. L'intérêt du PAM réside dans son faible coût et son risque

minime pour l'environnement lorsque appliqué sous forme anionique. De plus, puisqu'il est possible de l'épandre sous forme solide (quoique moins efficace), le PAM ne nécessite donc pas d'eau contrairement à d'autres stabilisateurs chimique tel que l'acétate de polyvinyl (Curasol).

Dans les sols, le PAM permet aux particules argileuses de s'agglomérer pour former des agrégats plus résistants à l'impact des gouttes de pluie et au ruissellement. Depuis une trentaine d'années, plusieurs études ont démontré l'efficacité du PAM à réduire l'érosion des sols sur les terres irriguées. Flanagan et al. (2003) ont observé que le PAM pouvait également être efficace sur les versants à fort dénivelé. En effet, ils ont mesuré que le PAM diminuait les taux d'érosion jusqu'à 53 % sur des versants ayant des pentes jusqu'à 45 %.

### ***Diminution de l'érosivité du ruissellement :***

Le pouvoir érosif du ruissellement peut être affaibli par la pratique de techniques culturales simples ou bien par l'implantation de structures dans les champs. En effet, certaines techniques de labour sur les versants peuvent réduire les volumes d'eau de ruissellement par la création de dépressions qui permettent une plus grande infiltration d'eau dans les sols. Ces dépressions peuvent être obtenues en labourant selon les courbes de niveau (culture en courbe de niveau) ou bien en créant des billons perpendiculairement à la pente (billonnage en courbe de niveau). Une autre technique culturale est l'établissement de bandes d'arrêt agissant comme des filtres en ralentissant la vitesse du ruissellement et provoquant ainsi le dépôt des particules les plus grossières (Roose, 1994). Ces bandes d'arrêt peuvent être composées d'herbes ou d'arbres dont l'efficacité varie selon la largeur des bandes, du mélange d'herbes et de l'importance du ruissellement qui traverse la bande. Toutefois, les pratiques de labour ou les bandes d'arrêts sont peu efficaces lorsque les dénivelés et la longueur des pentes sont trop importants. Dans ces situations, le pouvoir érosif du ruissellement peut être diminué en remodelant les versants sous formes de terrasses ou bien en implantant des banquettes. Les terrasses divisent les longues pentes en plusieurs petits segments empêchant ainsi l'eau de ruissellement de se concentrer. De plus, les dépressions au pied de chaque terrasse emmagasinent l'eau permettant ainsi son infiltration. Au Canada, Chow et al (1999) ont observé que ce système a contribué à une diminution de l'érosion des sols par un facteur de 20 dans des champs de pommes de terre. En Algérie, la technique des terrasses a été adoptée pour des petits jardins dans les régions de Médéa, Ouled Brahim, El Oamria et Sidi Naamane (Bellatreche, 1987). L'établissement de terrasses nécessite cependant un remodelage majeur des versants et donc un grand niveau d'effort. À l'opposé, l'implantation de banquettes est généralement plus aisée car seulement certaines parties des versants sont remodelées. Ces banquettes peuvent dériver l'eau de ruissellement (banquettes de diversion) ou bien l'emmagasiner (banquettes d'infiltration). En Algérie, ces banquettes ont été implantées sous la forme d'étroites bandes de terres placées perpendiculairement à la pente et ce à divers endroits sur les versants. Chaque banquette est composée d'un fossé et d'un bourrelet qui intercepte les eaux de ruissellement. Il a été noté que les banquettes algériennes sont efficaces pour les versants ayant des pentes de 3 à 12,5 % et que leurs impacts dépendent des caractéristiques des sols et de la végétation (Kadik, 1978). En effet, Aubert (1986) a observé qu'elles sont plus efficaces sur des sols formés sur calcaire friable et pour une végétation de type herbacé. Selon Bellatreche (1987), la technique des banquettes peut s'avérer efficace si les terrains sont adéquatement choisis et qu'un entretien approprié s'ensuit. Arabi et al. (2004) ont publié les résultats d'une enquête sur la défense et la restauration des sols en Algérie soulignant que les banquettes couvrent 80 % des surfaces

aménagées dont 20 % ont été effacés par des labours, 30 % ont été détruites, 30 % sont en mauvaise état car elles n'ont jamais été entretenues et seulement 20 % sont en bon état.

### **b)-Ravinement :**

Le développement de ravines peut être prévenu en augmentant l'infiltrabilité des sols ou bien en accroissant la résistance de la couche de surface à l'érosion (Poesen et Govers, 1990). Par exemple, la première alternative peut être obtenue en améliorant la structure des sols et la deuxième par la compaction de la couche de surface. Pour Poesen et Govers (1990), la meilleure technique pour prévenir le ravinement est d'utiliser des voies d'eau gazonnées dans les champs. Elles permettent d'exporter l'eau des champs sans toutefois créer de nouvelles entailles dans les sols.

Pour les champs où les ravines sont déjà existantes, la stabilisation s'effectue par la dissipation de l'énergie de chute à la tête, la stabilisation du fond et la protection des parois par végétalisation (Roose et al., 2000). Au Canada, le choix des techniques utilisées pour stabiliser une ravine est fonction de la pente (Hilborn et Stone, 1996).

Spécifiquement pour les régions semi-arides, Finkel (1986) a proposé des techniques d'intervention selon le type de ravines. Pour les ravines en «V» peu profondes, la technique la plus simple consiste à les remplir de terre et pour prévenir leur réouverture, le versant est modelé sous forme de larges terrasses larges. Si les ravines sont trop profondes pour être remplies à faible coût, Finkel (1986) propose de rediriger l'eau de ruissellement avant qu'elle se canalise dans la ravine vers d'autres ravines. Ainsi un versant est traité progressivement avec une partie des ravines servant d'exutoire alors que les ravines de l'autre partie sont traitées. Les interventions dans les ravines consistent à installer des barrages submersibles afin de réduire la vitesse de l'eau sur le lit de la ravine, mais également la stabilisation des parois par végétalisation. En effet, Bourougaa et Monjengue (1989) ont observé dans le cadre de contrôle de l'érosion dans les ravines que la lutte mécanique est indispensable, mais efficace temporairement et exige donc une fixation biologique à l'intérieur des ravines. Dans le cas des ravines en «U», Finkel (1986) propose d'élever le plan horizontal de référence par l'installation de chutes imperméables qui permettront l'accumulation de sédiments presque jusqu'au niveau de la surface. Ensuite, les pentes des parois verticales doivent être adoucies et stabilisées par végétalisation.

En Algérie, les interventions de correction des ravines s'effectuent par l'installation de gabions aux débouchés des ravines secondaires en combinaison avec des seuils en grillage léger dans les ravines secondaires (Roose, 2000). L'inconvénient majeur de l'aménagement de seuils en gabions dans les ravines est le coût élevé du transport pour les ravines éloignées d'une source de pierre de qualité (marnes, schistes et pellicite) (Bourougaa et Monjengue, 1989). Afin de réduire ces coûts, Bourougaa et Monjengue (1989) ont examiné l'efficacité de quatre types de matériaux utilisés comme seuils contre le ravinement (gabions, pierres sèches, grillages métalliques et toiles en plastique). Ils ont noté que les seuils en toile en plastique sont presque aussi efficaces que les gabions et ne coûtent que 1/5 du prix de ces derniers. Ils ont également observé que le peuplier, le frêne et l'eucalyptus sont des essences pouvant se développer très rapidement dans les ravines lors d'essais de végétalisation de celles-ci. Une technique économique qui pourrait s'avérer utile pour stabiliser les ravines

avant l'établissement de la végétation est l'application de PAM sur les parois car ce produit s'est avéré efficace pour diminuer l'érosion linéaire à petite échelle (Flanagan et al., 2003).

### **c)-Mouvement de masse :**

Il existe trois approches pour corriger des pentes jugées sensibles aux glissements de terrain. La première méthode consiste à modifier la géométrie de la pente soit en remplissant ou en excavant son profil. La deuxième méthode vise à implanter des structures qui appliquent des forces opposées à celles des glissements telles que les butées de pierre et les murs de soutènement. Finalement, les pentes peuvent être stabilisées par l'augmentation de la résistance interne des sols. Pour ce faire, la technique la plus simple et la plus efficace consiste à drainer les sols pour éviter que l'eau n'atteigne le plan de glissement (Bromhead, 1997; Roose, 1994). Zaitchick et Van Es (2003) ont proposé que le choix des interventions se fonde sur la dénivelée et l'humidité des sols.

Pour sa part, Montgomery et al. (1991) ont examiné les diverses techniques utilisées pour contrôler les coulées de débris. À l'instar des glissements de terrain, il est possible de travailler sur les pentes afin d'augmenter leur stabilité soit en drainant les terres ou bien en excavant les zones sensibles jusqu'au roc (Montgomery et al, 1991).

Il existe également une approche alternative qui consiste non pas à empêcher le déclenchement des coulées, mais plutôt à empêcher les débris d'atteindre les oueds. Ceci peut être réalisé par l'installation de barrières mécaniques qui peuvent être 1) des structures de rétention, 2) des structures de diversion, 3) des filets et clôtures ou, finalement, 4) des murs de rétention. Les structures de rétention sont construites au pied des zones de coulée afin d'arrêter et retenir les débris. Les structures de diversion consistent à diriger les coulées vers des zones prédéterminées en prolongeant le lit de la coulée au travers du cône de déjection. Toutefois, l'implantation de structures de rétention ou de diversion nécessite une estimation du volume des débris des coulées futures (Montgomery et al., 1991). Les filets et les clôtures sont installés au pied des zones de coulée afin de capter les plus gros débris tout en laissant passer la portion fluide de la coulée. Les filets consistent en une série de poteaux de ciment connectés par des chaînes. La technique des filets est peu onéreuse, mais les filets sont cependant inefficaces sur des pentes abruptes ou lorsque les coulées sont trop volumineuses (Montgomery et al., 1991). Finalement des murs de retenue peuvent être installés au pied des zones de coulées, mais puisqu'ils ne filtrent pas la coulée ils sont vulnérables au débordement.

### **d)-Sapement des berges :**

Il existe diverses techniques pour protéger les berges des cours d'eau. Une première méthode consiste à enrocher les zones de berges subissant les remous. Johnson (2003) a décrit quatre moyens économiques de réduire l'érosion des berges à l'aide de pierres en les empilant soit 1) en jetées dans le cours d'eau, 2) le long de la berge attaquée, 3) en amas dans le cours d'eau afin de créer des mouilles et des seuils et 4) en barbelures qui est une modification de la technique en jetées.

Une autre façon d'empêcher l'eau de frapper les berges est de recouvrir de murs de soutènement construits en matériaux durs comme des gabions, des plaques de béton ou des palplanches métalliques. Malgré sa grande efficacité, cette dernière technique est peu

recommandée, car elle crée une discontinuité nette entre les milieux aquatique et terrestre nuisant ainsi à la faune (Boudjadja, 1996).

### 1.2.4.2 Projets passés et actuels de protection des bassins versants et de lutte contre l'érosion :

Au Maghreb, divers programmes de recherche dédiés à la conservation des sols ont été élaborés.

#### *Régions méditerranéenne et maghrébine :*

La Tunisie a élaboré en 1991 une stratégie de conservation des eaux et du sol dans laquelle le choix des aménagements anti-érosifs s'effectue en fonction de cartes de classement des terres. En effet, les sols ont été classés en 4 groupes ; 1) les terres de culture, 2) les terres à vocation pastorale, 3) les «bad lands» et 4) les terres forestières. Ces groupes ont été par la suite subdivisés en classes pour un grand total de 14 classes possédant des interventions spécifiques (Bouزيد, 1991).

Quelques années plus tard (1994), le Ministère de l'Agriculture tunisien a collaboré avec l'ORSTOM pour réaliser des études traitant de l'envasement des lacs et des barrages collinaires. L'engouement qui a suivi la publication des premiers résultats a incité des instituts de recherche européens (Suède, Grande-Bretagne, Espagne, France) et des pays de la Méditerranée (Maroc, Tunisie, Syrie) à s'associer de 1996 à 2001 pour réaliser le projet HYDROMED. Ce projet examine les impacts des lacs et des barrages collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen et inclut un volet touchant l'érosion sur les versants. Au Maroc, HYDROMED a permis aux chercheurs d'adapter l'équation universelle de pertes des sols (USLE) aux conditions nationales et de l'utiliser pour simuler les impacts des transformations des terres. Par ailleurs, les Marocains ont examiné un modèle espagnol (IMPELERO) et tunisien (SAGATELLE) (HYDROMED, 2001). Pour leur part, les tunisiens en partenariat avec l'IRD, l'Université de Lund et l'INGREF ont élaboré des cartes de risques d'érosion en nappe et ont examiné l'érosion en ravines pour deux bassins versants.

Parallèlement au projet HYDROMED, l'augmentation des populations côtières et l'intensification des activités économiques observées en Méditerranée ont amené le PNUE/PAM à développer un programme de protection de l'environnement nommé « Gestion intégrée des zones côtières et marines ». Un volet de ce programme aborde spécifiquement le contrôle de l'érosion des sols par une séquence logique de six phases d'activités (PNUE/PAM/PAP, 2000). Les deux premières Phases (I et II) touchent à la reconnaissance du terrain et à la cartographie des zones d'érosion en utilisant une méthodologie commune (modèle ICONA). La Phase III consiste à identifier les aires prioritaires et à proposer des mesures préventives (agronomiques et biologiques), curatives (reboisement, réhabilitation des terres) et/ou protectives (mise en place de structures, socio-économiques). La quatrième phase (Phase IV) est la rédaction d'un canevas décrivant le plan de gestion du contrôle de l'érosion, sa mise en place et son évaluation. La cinquième phase (Phase V) est la mise en œuvre du programme de gestion incluant la réalisation technique des mesures de correction et le déroulement d'un programme participatif pour les populations autochtones. La dernière phase

(Phase VI) est l'implantation et l'évaluation d'activités de suivi sur le contrôle de l'érosion et des impacts généraux sur l'environnement.

### *Projets recensés en Algérie :*

Antérieurement à 1942, la conservation des sols algériens a été associée à la politique forestière car on estimait que la dégradation des sols était intimement liée à la dégradation de la forêt (Bellatreche, 1987). S'inspirant des spécialistes américains, l'Algérie a développé en 1942 un service dédié à la défense et à la restauration des sols (DRS) pour les périmètres dits « d'utilité publique ». La contribution la plus importante des spécialistes de la DRS a été sans aucun doute l'instauration de banquettes sur les versants. Or, leur inefficacité a rapidement été observée pour les versants subissant l'érosion et ainsi, il a été proposé d'installer les nouvelles banquettes seulement aux zones non touchées par l'érosion (Heusch, 1986). En 1960, les forestiers ont mis en place un programme de restauration et de protection des terres utilisables de l'Algérie du Nord (Bellatreche, 1987). En raison des piètres résultats, le gouvernement algérien a suspendu toutes interventions fondées sur l'approche du génie civil, incluant les banquettes.

À la fin des années 70, le Ministère de l'Agriculture et de la révolution agraire a effectué un inventaire général de la situation des terres et forêts pour chaque wilaya de l'Algérie du Nord (BNEDER, 1979). Les schémas directeurs d'aménagement régional émanant de ces études proposaient la reconversion des terres agricoles les plus touchées par l'érosion à leur vocation d'origine soit forestière, pastorale ou arboricole. Dès 1983, ces schémas ont été appliqués par des offices d'aménagement et de mise en valeur des périmètres afin de protéger et valoriser les ressources dans les zones montagneuses (Bellatreche, 1987). De plus, à la même époque en 1984, le code forestier a été modifié par l'adoption de la loi portant sur le régime général des forêts. Cette loi incluait pour la première fois un volet de conservation des sols et de lutte contre l'érosion. En effet, la loi stipulait que les paysans ne pouvaient s'opposer à l'implantation de techniques de contrôle de l'érosion si leurs terres étaient jugées trop dégradées.

Au cours des années 80, trois grands projets d'étude et de la lutte à l'érosion ont été réalisés en Algérie. Le premier est le projet "Ressources en eau dans les pays d'Afrique du Nord" (RAB 80/011), les deux autres projets ont été des projets de collaboration avec des chercheurs français et allemands.

Le projet RAB 80/011 s'est réalisé en Algérie (Ministère de l'Hydraulique, de l'Environnement et des Forêts), le Maroc et la Tunisie sous la tutelle du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD, 1988). L'un des objectifs de ce projet était de contribuer à la définition d'une stratégie de lutte contre l'érosion et les transports solides, et ce, sur la base de l'expérimentation de différents traitements antiérosifs d'une part et de la mesure de l'efficacité de ces traitements de l'autre. Pour ce faire, quatre couples de micro-bassins expérimentaux ont été implantés sur le bassin versant de l'oued Isser (Ain Raouraoua, Souagui, Ouled Amar et Chaabet Touriah). Pour chacun de ces micro-bassins, un traitement anti-érosif a été appliqué uniquement sur un des bassins du couple. Les résultats ont permis de développer une équation reliant la concentration solide au débit maximal. Dans le cadre du deuxième volet, divers types de traitements antiérosifs (génie civil et biologique) ont été expérimentés sur trois des micro-bassins (PNUD et OPE, 1987).

Dans le contexte de protéger les barrages contre l'envasement, les résultats de ces travaux semblent indiquer que l'accent de la lutte à l'érosion doit être mis sur le contrôle des entailles linéaires et le sapement des berges afin réduire les principales sources de sédiment. En matière de lutte à l'érosion sur les terres agricoles, les chercheurs algériens du projet préconisaient une utilisation rationnelle de la mécanisation combinée à la fertilisation minérale et organique des sols.

Le deuxième projet est le fruit d'une collaboration entre l'Institut National Algérien de Recherches Forestières (INRF) avec des chercheurs français de l'ORSTOM entre 1984 à 1989. Cette collaboration a été réalisée en trois volets. Le premier volet a abordé le démarrage du projet par une enquête sur l'efficacité des méthodes de D.R.S. (Hammoudi et al., 1989). Le deuxième volet a étudié l'aménagement de micro-bassins dans les monts Beni Slimane (Bourougaa et al., 1989) et Beni Chougrane (Morsli et al., 1989). Finalement, le troisième volet a examiné la quantification de l'érosion. La quantification de l'érosion en nappe a été examinée à l'aide de parcelles expérimentales mises en place à Ouzera et Beni Slimane en 1983 lors d'une collaboration entre l'INRF et le Centre National d'Etudes et de Recherches en Aménagement du Territoire (CNERAT) (Kouidri et al., 1989a). L'érosion en ravines a été examinée sur des zones pilotes autour de Médéa, Souagui, l'oued Mina (avec Brahmia et la G.T.Z), Mascara (Ain Fares) et Tlemcen (avec Mazour) (1989b). Suite à ces travaux, une nouvelle entente de collaboration a été signée en 1989 (Roose, 1989). Lors de cette deuxième phase, l'enquête traitant de l'efficacité de la D.R.S. a été effectuée (Arabi et al., 2004) et a permis de quantifier l'érosion en nappe et en ravines en fonction des systèmes de production (Arabi, 1992; Roose, 1993). Finalement la deuxième phase a examiné la possibilité d'aménager les micro-bassins en utilisant une nouvelle approche de lutte à l'érosion: « la Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols » (GCES) (Arabi et Roose, 1993). Cette stratégie implique les paysans dans la gestion de leurs terres par la modification de leurs systèmes de culture et l'amélioration de leurs méthodes culturales. En effet, l'approche GCES propose que la réduction de l'érosion puisse s'effectuer par une intensification de l'agriculture de montagne. L'impact du passage au système intensif a été d'augmenter la productivité des terres et donc d'accroître le couvert végétal. Ainsi, contrairement aux banquettes qui diminuent la superficie cultivable et donc la productivité des terres, la GCES intéressait les paysans à la lutte à l'érosion en améliorant la productivité de leurs terres.

Le troisième projet s'est réalisé à la fin des années 80 par le biais d'un projet de coopération entre le Ministère algérien de l'agriculture et la Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (G.T.Z.), une agence fédérale allemande vouée à la coopération internationale. Ce regroupement a utilisé le bassin versant de l'Oued Mina comme zone-test pour développer un schéma directeur d'utilisation des sols pour favoriser la conservation des sols et de l'eau en Algérie. Pour ce faire, l'efficacité des techniques anti-érosives a été examinée suivi de la mise en place des ateliers de démonstration en vue de sensibiliser les populations.

Afin de lutter contre un taux de chômage élevé, la Direction Générale des Forêts a lancé en 1997 un projet (Projet Emploi Rural I) qui a permis de créer de l'emploi en intégrant les populations de la région Ouest du pays à la lutte à l'érosion (Ministère de l'Agriculture, 2002). À la suite de résultats positifs, le gouvernement algérien a lancé un deuxième projet (Projet Emploi Rural II) dans les wilayas de Tiaret, Tissemsilt, Chlef, Aïn Defla, Médéa et

Bouira. Ce dernier projet prévoit, entre autres, la réduction de l'érosion par le biais du reboisement, la correction torrentielle, le repeuplement des zones désertiques, la fixation des berges et la réfection des banquettes (Ministère de l'Agriculture, 2002).

### *Succès et échecs des projets de conservations des sols :*

Dans le cadre d'une thèse de doctorat, Bellatreche (1987) explique les échecs du projet DRS. Selon lui, l'échec des travaux de ce service est imputable à l'imposition des banquettes auprès des paysans qui les percevaient comme une servitude. Ainsi, les banquettes ont été laissées à l'abandon et voir même détruites (Aubert, 1986). Par ailleurs, les banquettes sont efficaces seulement si les pluies sont brèves et très intenses sur des sols secs. Or, les pluies en Algérie sont souvent de faibles intensités, mais de longues durées (Heusch, 1986). Cette situation peut s'avérer dangereuse car Tihay (1976) a observé que l'abandon des banquettes dans la vallée de la Soummam a conduit à des mouvements de masse généralisés. Afin d'obtenir une revue de littérature plus détaillée sur l'échec des banquettes, il est utile de consulter la thèse de doctorat de Bellatreche (1987) qui a effectué des études de cas pour plusieurs régions de l'Algérie.

Selon Fay (1993a et b), la réduction de l'érosion dans les montagnes ne peut se réaliser que dans le cadre de l'aménagement de leur territoire en apurant les structures foncières, en intégrant davantage leurs économies dans le marché national et par la responsabilisation des collectivités locales. Ce dernier point est important car selon une enquête menée dans le cadre d'un projet pilote du FIDA et du Gouvernement algérien, il a été démontré que les agriculteurs ne comprennent toujours pas l'utilité des travaux de correction torrentielle (Sahli, 2003).

Suite à de nombreux tests sur la partie marneuse de l'Oued Mina, Paschen et al. (1998) ont conclu que l'utilisation traditionnelle du sol par les populations locales était la façon la plus efficace de minimiser la production de sédiments. En effet, pour les régions sous le climat méditerranéen, le reboisement n'a pas donné les résultats attendus car la pluviométrie y est trop faible. Ainsi, afin d'obtenir un couvert végétal protecteur à la surface de sols, il est plutôt suggéré de réutiliser des techniques de cultures traditionnelles adaptées aux versants sur marnes. Par exemple, le labour pratiqué par ces populations augmentait la porosité des sols favorisant ainsi l'infiltration et minimisant, par conséquent, le ruissellement et donc le ravinement (GTZ, 1996). Ces techniques fonctionnaient si bien selon Paschen et al. (1998) que la dégradation des versants n'a débuté qu'immédiatement après la migration de la population montagnarde vers le fond des vallées. Ainsi, le schéma directeur de l'Oued Mina devrait combiner aux mesures anti-érosives des aspects socio-économiques tels qu'inciter les fermiers des régions montagneuses à employer de nouveau ces techniques. Par contre, si l'objectif du plan de lutte contre l'érosion est de diminuer les taux d'envasement des barrages, alors les plans de gestion des bassins versants doivent également s'attaquer aux sources les plus importantes de sédiments, c'est-à-dire le ravinement et le sapement des berges (PNUD et OPE, 1987). Reconnaisant la faible importance de l'érosion en nappe comme source de sédiments, Roose (1994) propose néanmoins d'appliquer la GCES sur les versants afin de diminuer les volumes de ruissellement et ainsi réduire le ravinement et les crues provoquant l'érosion des berges.

A la suite de l'analyse des résultats de l'enquête sur la défense et la restauration des sols, Arabi et al (2004) ont proposé que les facteurs qui doivent impérativement être inclus dans un programme de lutte à l'érosion sont: 1) l'intégration des communautés paysannes, 2) l'amélioration des systèmes de production, 3) la recherche d'ouvrage dont le rapport coût/efficacité serait optimum, 4) un choix de technologies proches des paysans et adapté au milieu écologique, 5) la participation graduelle des paysans au financement ou à leurs entretien, et finalement 6) la définition des rôles et responsabilités des intervenants par contrats relatifs à l'aménagement des ressources naturelles.

### **1.2.4.3 Approches pour l'étude de l'érosion :**

Afin de développer la meilleure stratégie de réduction de l'érosion, différents modèles peuvent être utilisés pour prédire les apports solides aux cours d'eau. L'érosion peut être examinée tant du point de vue du transport des sédiments que du point de vue de l'ablation des particules de sol. En effet, la première approche tente de prédire la charge sédimentaire à l'exutoire des cours d'eau tandis que la seconde approche estime les taux de production de sédiments à la source, c'est-à-dire les taux d'ablation sur les versants.

#### **1.2.4.3.1 Approches visant l'estimation de la charge sédimentaire :**

La technique la plus simple pour étudier l'ampleur des processus d'érosion consiste à mesurer les concentrations de sédiments dans les cours d'eau. L'échantillonnage alors nécessaire collecte non seulement les particules provenant de l'érosion des sols mais également celles produites par l'érosion des berges. Ainsi, le terme «transport solide» englobe l'ensemble des particules transportées par un cours d'eau. Les études sur le transport solide peuvent être examinées en travaillant uniquement sur un seul bassin versant pour obtenir des relations spécifiques à celui-ci ou en travaillant dans plusieurs oueds pour ainsi obtenir une équation reliant le transport solide à diverses caractéristiques d'un bassin versant.

#### ***Études sur un seul bassin versant :***

Après l'étude de 34 crues dans le bassin de l'oued Allalah, Demmak (1982) a constaté un faible lien entre les concentrations de sédiments en suspension et les débits à l'échelle de l'événement. Demmak (1982) a estimé qu'environ 80 % des apports annuels de sédiments (tonnes) étaient associés à des crues supérieures à 30 m<sup>3</sup>/l. Bourouba (1994, 1997, 1998 et 2003), Meddi (1999) et Terfous et al (2001) ont tous démontré l'influence de la saison sur les charges en suspension. En effet, en étudiant de façon individuelle deux oueds (Djendjen et Seybouse), Bourouba (1994) a observé des fluctuations des taux d'érosion moyenne mensuelle augmentant de septembre à mars suivit d'une décroissance jusqu'en juillet. Après l'étude des trois autres oueds, (Reboa, Lougmène et Leham), Bourouba (1997) a observé deux périodes d'érosion distinctes. La période minimale d'érosion survient de l'hiver au printemps. À l'opposé, de l'été à l'automne, l'érosion est maximale en raison des pluies torrentielles qui s'abattent sur des matériaux fins désagrégés et facilement mobilisables. Bourouba (1997, 1998 et 2003) a cependant observé que l'hiver et le printemps sont également des périodes de forte érosion pour les oueds Boudouaou, Medjerna supérieur, El Kébir Est et El Kébir Ouest. Meddi (1999) a observé que les plus fortes concentrations de sédiments dans l'oued Ebda sont mesurées en automne et propose ainsi d'évacuer le maximum de sédiments

du futur barrage lors de cette saison car les volumes d'eau sont moins importants par rapport aux saisons d'hiver et de printemps. Terfous et al. (2001) ont observé pour le bassin versant de l'Oued Mouilah que les saisons où l'érosion est la plus intense sont l'automne et le printemps car les sols sont très érodables en raison des cycles gel-dégel qui déstabilisent leur structure.

Touaïbia et al. (2001) ont examiné à l'échelle mensuelle les relations reliant les débits solides ( $Q_s$ ) aux débits liquides ( $Q$ ) pour deux bassins versants. Parmi les différents modèles explorés, le modèle de puissance ( $Q_s = aQ^b$ ) était le plus performant avec des valeurs de coefficients  $a$  et  $b$  fluctuant selon le mois et le bassin versant. L'érosion spécifique atteint son maximum en automne pour chaque bassin versant. À l'échelle interannuelle, ils ont déterminé une équation propre à chaque bassin versant qui relie l'érosion spécifique ( $E_s$ ) au coefficient d'écoulement ( $C_e$ ) :

$$\text{Bassin de Oued El-Haddad : } E_s = 0,24 C_e^{1,47} \quad \text{(I-3)}$$

$$\text{Bassin de Oued El-Abtal : } E_s = 0,15 C_e^{0,40} \quad \text{(I-4)}$$

Lors de l'étude du bassin versant de la Haute-Tafna, Megnounif et al. (2003) ont montré l'effet de la saison sur la charge sédimentaire, les plus fortes concentrations de sédiments n'étant pas nécessairement mesurées pendant les périodes de crues. En effet, le flux saisonnier de la charge en suspension a été plus important en automne qu'au printemps et ce malgré des crues printanières plus importantes. Les auteurs ont attribué ceci à la plus grande violence des orages qui génèrent alors une charge élevée de sédiments avec un faible apport en eau par rapport à la force érosive limitée de l'eau de fonte de la neige au printemps. L'impact des orages sur le transport solide a également été souligné par Benkhalel et Remini (2003). Ils ont examiné attentivement les fluctuations des paramètres  $a$  et  $b$  de la relation  $Q_s = aQ^b$  à diverses échelles temporelles pour le bassin versant de l'oued Ouahrane. Leur étude a démontré qu'entre les saisons le paramètre  $a$  est relié à la pluviométrie moyenne et qu'à l'intérieur d'une saison, ce même paramètre est relié à l'état du sol avec les valeurs les plus faibles lorsque les sols sont saturés. Pour sa part, le coefficient  $b$  est relié aux caractéristiques de l'écoulement tel que le débit maximal quel que soit l'échelle temporelle.

### *Études sur plusieurs bassins versants :*

Après l'étude de l'écoulement de 33 bassins versants de l'Algérie septentrionale, Bourouba (2003) a observé que les moyennes annuelles de transport solides se répartissent en trois catégories en fonction de l'ampleur des programmes de contrôle de l'érosion. La première catégorie englobe 5 bassins versants possédant un taux de dégradation spécifique supérieur à 2000 t/km<sup>2</sup>/an et nécessitant des programmes d'aménagement immédiats. La deuxième catégorie inclut 6 bassins versants présentant un taux de dégradation spécifique moyen qui varie de 1100 à 1850 t/km<sup>2</sup>/an et pouvant éventuellement basculer vers le taux de dégradation élevé si les conditions actuelles de l'érosion persistent. Finalement, la dernière catégorie présente 22 bassins versants avec un taux de dégradation spécifique faible (<950 t/km<sup>2</sup>/an) dans lesquelles l'aménagement immédiat peut contribuer à court terme à une stabilisation des zones d'ablation actuelle.

La dernière étude de Bourouba (2003) est très utile lors d'une étape de tri des bassins versants afin de cibler les plus problématiques à l'échelle du pays. Toutefois, ce ne sont pas tous les oueds qui possèdent des stations hydrologiques permettant de mesurer les débits solides. Dans ce cas, l'étude de plusieurs bassins versants pour lesquelles des mesures de débits solides ont été effectuées permet de développer des formules pour estimer l'érosion ou la charge sédimentaire pour des bassins versants ne possédant pas de stations de mesures. Les prochains paragraphes décrivent neuf de ces formules empiriques.

Fournier (1960) a développé un modèle pour prédire les apports solides à l'exutoire d'un cours d'eau quel que soit son emplacement géographique en utilisant les données de 104 bassins versants provenant de différentes régions du globe.

En Algérie toutefois, la formule de Fournier (1960) a été testée sur une trentaine de bassins versants et les résultats ont été médiocres (PNUD et OPE, 1987). Ceci démontre bien l'importance de développer des équations propres aux conditions du pays. En travaillant spécifiquement avec des bassins versants du Maghreb dont 32 algériens, Tixeront (1960) a proposé pour l'Algérie un modèle basé sur deux équations reliant les apports solides ( $A$  en  $t/km^2/an$ ) à l'écoulement annuel total ( $R$  en  $mm$ ) selon la position géographique.

**Tableau 1 : Equation de Tixeront selon la position géographique**

Position géographique	Equation
Est de l'Algérie	$A = 92 R^{0,21}$
Centre de l'Algérie	$A = 2000$

L'influence de la position géographique du bassin versant (physiographie, relief,...) a également été démontrée par Bourouba (1996) qui a étudié 18 bassins versants de l'Algérie orientale. Il a souligné que les taux de transports solides pour les bassins versants situés dans les hautes plaines et la région d'Aurès sont influencés par les averses estivales et automnales tandis que les bassins versants des régions côtières et de l'Isser sont davantage influencés par la saturation des sols pendant le printemps et l'hiver.

Inspirée par l'équation de Tixeront, la firme française SOGREAH (1969) a développé un modèle basé sur cinq équations reliant les apports ( $A$  en  $t/km^2/an$ ) en fonction du ruissellement annuel de crue ( $R$  en  $mm$ ). Le choix d'une équation est fondé non par l'emplacement géographique du bassin comme le modèle de Tixeront, mais par sa perméabilité. Les équations de SOGREAH (1969) sont exprimées dans le **Tableau 2** :

**Tableau 2 : Equation de SOGREAH selon la perméabilité du socle**

Permeabilité	Apport
Élevée	$A = 8,5R^{0,15}$
Moyenne à élevée	$A = 75 R^{0,15}$
Faible à moyenne	$A = 350 R^{0,15}$
Faible	$A = 1400 R^{0,15}$
Imperméable	$A = 3200 R^{0,15}$

Heusch et Milliès-Lacroix (1971) ont montré le rôle de la lithologie sur les équations décrivant le transport solide en établissant quatre droites liant la lame écoulée et la concentration de sédiment pour une vingtaine de bassins versants maghrébins. Ils ont observé que les bassins sur grès, calcaire et limon possédaient de faibles concentrations de sédiments relativement aux bassins sur roches tendres (marne et schiste). L'aspect de la lithologie a également été examiné par Demmak (1982 et 1984) qui a analysé des données provenant de 30 bassins versants algériens sur une période de plus de dix ans. Suite à des analyses statistiques, il a proposé un modèle statistique pour prédire le transport solide spécifique moyen annuel (TSS) pour des bassins versants variant de 100 à 3000 km<sup>2</sup>. L'équation est la suivante :

$$\text{TSS} = 26.62 \text{ IL} + 5.07 \text{ IP} + 9.77 \text{ CT} - 593.56 \quad \text{(I-5)}$$

Avec :

TSS : transport solide spécifique moyen annuel ;

IL : pourcentage de la superficie d'un bassin couverte de formations marneuses et argileuses du Crétacé supérieure et du Tertiaire ;

IP : indice d'énergie du ruissellement qui est le produit du pourcentage et de la fréquence des précipitations annuels en considérant uniquement les événements supérieurs à 20 mm ;

CT : coefficient de torrencialité qui est une mesure de l'intensité du chevelu hydrographique. Le coefficient de torrencialité est le produit de la densité de drainage (D<sub>d</sub>) par la fréquence des talwegs d'ordre 1 (F<sub>1</sub>) (Husson, 1975).

Demmak (1984) mentionne que le domaine d'application reste cependant limité aux bassins possédant un indice IL supérieur à 10% et une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 300 mm.

Saidi (1991) a lié l'érosion spécifique mesurée à 18 barrages algériens en étudiant uniquement des données hydrologiques et climatiques. En effet, il a dégagé une équation liant l'érosion spécifique au module spécifique (Mo) et au coefficient de ruissellement.

$$Es = 29,8 Mo^{1,20} Ce^{-0,73} \quad \text{(I-6)}$$

Dans le cadre d'une étude de la petite et moyenne hydraulique agricole en Algérie du Nord, Gavrilovic (1992) a appliqué une équation qu'il a développée en Yougoslavie pour prédire la production moyenne annuelle de sédiments ( $W_{an}$ ). Cette équation intègre la température moyenne annuelle ( $t^\circ$ ) et la pluviométrie moyenne annuelle ( $H_{an}$ ), la superficie du bassin ( $F$ ) et un coefficient d'érodabilité ( $Z$ ).

Toutefois, cette équation nécessite à priori une excellente connaissance du bassin versant car le choix de la valeur du coefficient d'érodabilité ( $Z$ ) tient compte de l'état actuel d'érosion du bassin versant.

Probst et Suchet (1992) ont développé une équation similaire à celle de Demmak (1984) fondée sur l'étude de 130 bassins versants non seulement algériens, mais également marocains et tunisiens. Ils ont relié les taux de rendement annuel de sédiments en suspension dans les oueds ( $T_{ss}$ ) en fonction d'un coefficient d'érosivité de la lithologie ( $K_{ER}$  en  $t/km^2$ ), le débit annuel ( $R$  en mm) et la superficie du bassin versant ( $A$  en  $km^2$ ).

$$\ln(T_{ss}) = 4,79 + (54 \times 10^{-3} K_{ER}) + (4 \times 10^{-3} R) - (5,6 \times 10^{-5} A) \quad \text{(I-7)}$$

Il est important de souligner la correspondance entre l'équation de Demmak (1984) et celle de Probst et Suchet (1992). En effet, IL correspond au paramètre  $K_{ER}$ ,  $I_p$  est lié à  $R$  alors que  $CT$  augmente lorsque  $A$  diminue.

Jugeant trop faible les relations reliant les débits solides aux paramètres mesurables des bassins versants algériens (pluie annuelle, superficie du bassin versant, longueur et pente brute du talweg principal), Morel et Cayla (1993) ont proposé de greffer un indice de «paysage» ( $IP$ ) à ce type d'équation. Cet indice de «paysage» prend la valeur de la somme de paramètres qui ne peuvent être mesurés globalement.

Pour chaque bassin versant, les auteurs ont attribué à chacun des paramètres une valeur entre -2 et 2 selon leur contribution à l'érosion. L'indice de «paysage» est par la suite introduit indirectement dans la formule estimant les débits solides par l'entremise d'un coefficient multiplicateur ( $MP$ ). La valeur de ce coefficient est fonction de la valeur de  $IP$ .

Vogt et Gomer (1992) ont modélisé la concentration moyenne des sédiments en suspension à l'échelle de la crue pour l'oued Mina en cartographiant l'humidité des sols par la télédétection (Landsat TM). Gomer et Vogt (2000) ont par la suite raffiné leur approche en greffant aux données de télédétection un modèle basé sur les lois de la physique. Dans un premier temps, leur modèle divise le territoire en cellules. Pour chacune d'elle, on estime la quantité de particules arrachées à la surface du sol par le battement des gouttes de pluie. Par la suite, le programme modélise le déplacement de ces particules d'une cellule à l'autre jusqu'au cours d'eau. Le transport de ces particules est associé à celui de l'eau de ruissellement dont les volumes et le trajet sont également modélisés. Le modèle tient également compte du fait que le dépôt de ces particules puisse survenir lors du transport de la cellule d'origine jusqu'à l'exutoire. En comparant les résultats obtenus par leur modèle avec une cinquantaine de mesures prises lors d'un seul événement pluviométrique, les auteurs ont démontré l'efficacité du modèle. Toutefois, le modèle nécessite une foule de données qui ne sont pas toujours disponibles.

Kassoul et al. (1997) ont examiné l'envasement de 19 barrages algériens et ont proposé trois équations pour estimer le taux d'abrasion ( $T_a$  en  $m^3/km^2/an$ ). La sélection de l'équation s'effectue principalement par la taille du bassin versant. Pour les bassins versants possédant une superficie inférieure à  $1000 km^2$ , l'indice d'altitude (dénivelée ÷ altitude moyenne) est utilisé comme deuxième critère de sélection de l'équation. Un bassin versant ne peut avoir qu'une seule équation.

**Tableau 3 : Critères de sélection des formules de Kassoul et al.**

Superficie ( $km^2$ )	Indice d'altitude	Équation
$S < 1000$	$< 1$	$T_a = 1433 S^{-0,43} - 15,24$
$S < 1000$	1,5 à 2	$T_a = 0,463 S + 2026$

Touaïbia et al (2003) ont également étudié statistiquement le lien entre les taux d'érosion spécifique ( $Es$  en  $t/ha$ ) et près d'une dizaine de facteurs favorisant ou limitant l'érosion pour 16 sous bassins versants du bassin versant de l'Oued Mina. Ils ont trouvé que l'érosion spécifique pouvait être estimée par une simple équation utilisant la superficie du bassin versant ( $S$ ) et le couvert végétal (%):

$$Es = 19,36 S^{-0,134} \times C_{veg}^{-0,308} \quad \text{(I-8)}$$

Malgré leur utilité pour estimer le transport solide, ces formules possèdent des lacunes. En effet, Ramdane (1989) a souligné que les bassins versants utilisés pour élaborer ces modèles ne sont pas toujours représentatifs, engendrant ainsi des difficultés d'extrapolation lorsqu'ils sont utilisés à un ensemble national. Smati (1996) a évoqué un autre problème avec ces modèles car selon lui les formules de transport décrites plus haut, même améliorées en fonction des paysages, ne sont pas adéquates pour des bassins de plus de  $100 km^2$ . Ce dernier point avait également été mentionné par Kouti et al. (1991) qui ont observé une sous-estimation des apports solides avec les formules de Demmak et Fournier pour les grands bassins. Abdelali et al. (2003) ont démontré la faible performance de ce type de modèle en comparant la performance du modèle de SOGREAH (1969) avec les mesures réelles d'apports spécifiques pour trois bassins versants situés dans le Nord-Ouest de l'Algérie (La Haute Tafna, Isser, Mouilah). Ils ont démontré que ce dernier modèle sous-estimait jusqu'à 34 fois les mesures réelles. Les auteurs attribuent cette faible performance à l'exclusion de caractéristiques intimement liées à l'érosion des sols telles que le couvert végétal et la pluviométrie. De plus, il est important de souligner que ces formules sont souvent développées à partir de mesures de la charge en suspension et ne considèrent pas les sédiments transportés par le charriage de fond. Or, Boudjemline et al. (1993) ont démontré que le transport par charriage avait contribué jusqu'à 30% de l'apport annuel de sédiments s'acheminant au réservoir du barrage d'Iril-Emda.

Kassoul Par ailleurs, dans le cadre d'un programme de conservation des sols, les interventions doivent être implantées non pas de façon homogène à l'ensemble d'un bassin versant, mais en ciblant prioritairement les zones à fort taux d'ablation. Touaïbia et al (2003) ont cartographié ces zones à l'aide d'outils géostatistiques en utilisant non pas des valeurs

provenant de mesures de terrain, mais plutôt d'exutoires. Or, la faiblesse majeure des mesures en rivières est que celles-ci ne reflètent pas uniquement les taux d'érosion dans les champs puisque d'autres phénomènes influencent la charge sédimentaire dans un cours d'eau tels que l'érosion des berges et la sédimentation des particules de sol.

### 1.2.4.3.2 Approches visant l'estimation des taux d'abrasion :

L'équation universelle des pertes de sol (USLE) permet d'estimer le risque d'érosion hydraulique. Il s'agit d'un modèle empirique réunissant cinq facteurs ayant une incidence sur l'importance de l'érosion. L'équation se présente comme suit :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (\text{I-9})$$

Avec :

R : facteur d'érosivité de la pluie ;

K : *facteur* d'érodibilité du sol ;

LS : facteur topographique intégrant la dénivelée et la longueur du versant ;

C : facteur de protection du sol par le couvert végétal ;

P : facteur de protection du sol par les pratiques agricoles.

Ainsi ce modèle se présente comme une multiplication de coefficients dont le produit est un estimé du taux de perte de sol. Dans le cadre d'une thèse de doctorat, Arabi (1991) a examiné la relation entre les différents paramètres de l'équation universelle et l'érosion des sols mesurée pour 15 parcelles combinant trois types de sol (vertisol, fersiallitique et brun calcaire) et quatre systèmes de production (agro-pastoral, vigne, arboriculture et sylvo-pastoral). En ce qui a trait au facteur *R*, Arabi (1991) a distingué deux types de pluie : les pluies automnales d'intensité élevée mais de faible fréquence et les pluies hivernales et printanières moins intenses que celles de l'automne, mais plus fréquentes. Pour le facteur *K*, Arabi (1991) a remarqué que les vertisols sont les sols les plus résistants. Concernant le facteur *C*, il a démontré que l'érosion est faible en milieu cultivé et naturel comparativement aux sols nus (Arabi, 1991; Gomer et Touaibia, 1991). Arabi (1991) n'a pas observé de liens significatifs entre l'érosion et les facteurs *R* et *LS* représentant l'agressivité des pluies et la pente. Morsli et al. (2004) ont également observé des risques modestes d'érosion en nappe pour des pentes de 10 à 45 %. Par contre, Brahamia (1993) a également travaillé en parcelles et a démontré que l'érosion est sensible à l'augmentation de la pente et à la longueur du versant.

Finalement, Arabi (1991) et Brahamia (1993) ont appliqué l'équation universelle sur une partie de leurs parcelles. Arabi (1991) a mentionné que les estimations calculées par le modèle furent comparables aux mesures réelles alors que Brahamia (1993) a jugé que les valeurs estimées sont nettement inférieures à celles mesurées. Dans ce contexte, Meddi et Morsli (2001) ont développé de nouvelles équations pour modéliser l'érosion spécifique ( $E_S$ ) sur ces

parcelles à l'échelle de l'événement. Ils ont trouvé que  $E_s$  pouvait être estimée en utilisant la pluviométrie ( $P$  en mm) et l'état d'humidité du sol ( $IPA$ ) selon la formule suivante :

$$E_s = a P^b + c IPA^d - e \quad \text{(I-10)}$$

Les valeurs des coefficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  et  $e$  varient en fonction de la saison et du sol (sol brun calcaire ou vertisol). Ces auteurs ont démontré que l'énergie de la pluie est relativement plus importante que celle du ruissellement dans le détachement des agrégats et l'érosion, et il attribue ceci au caractère torrentiel des pluies dans les monts de Beni-Chougrane.

Il est important de rappeler que ces études ont été effectuées sur des parcelles et que le transfert direct à l'échelle des bassins versants est problématique. Par exemple, Touaïbia et al. (1999) ont calculé à l'aide de l'USLE des valeurs de perte des sols à l'échelle parcellaire de 0,12 à 1,09 t/ha/an comparativement à des valeurs de 12,38 à 48,72 t/ha/an à l'échelle du micro bassin (21,7 à 76,2 ha). Les auteurs attribuent cette différence au fait que l'érosion en nappe observée sur les parcelles et calculée par l'équation universelle est négligeable à une plus grande échelle où toutes les formes d'érosion sont présentes démontrant ainsi l'importance d'étudier l'érosion à grande échelle. Dans cette optique, le Ministère de l'agriculture et de la révolution agraire a publié à l'échelle de la wilaya des cartes résultant de la superposition de cartes de l'érosion observable par photo-interprétation et de cartes de sensibilité du substrat à l'érosion (Bureau national d'études pour le développement rural, 1979). Les cartes de la sensibilité du substrat à l'érosion ont été réalisées en superposant manuellement une carte de la lithologie et une carte de la déclivité des pentes, et présentent l'érosion de façon qualitative (Bureau national des études pour le développement rural, 1979).

L'érosion à l'échelle du bassin versant a également été cartographiée par photo-interprétation lors d'une composante d'un projet impliquant l'Algérie, la Tunisie et le Maroc (PNUD et OPE, 1987). Bien que cette méthode soit la plus efficace, elle nécessite un nombre considérable de photographies lorsque les bassins versants sont vastes, engendrant ainsi des coûts élevés pour la réalisation des cartes. Afin de cartographier l'érosion rapidement et à faible coût pour la région de Médéa, Guettouche (1991) a exploré l'utilisation de la télédétection par le traitement d'images SPOT. Sa méthode lie l'intensité de l'érosion des sols (nulle, moyenne, forte) à l'intensité du couvert végétal. Toutefois, les images satellitaires ne permettent que de cartographier l'érosion qualitativement et ne donnent pas les taux d'abrasion. Grâce au développement et à l'essor des SIG au cours de la dernière décennie, il est maintenant possible de modéliser quantitativement l'érosion des sols dans les champs à l'échelle des bassins versants.

### 1.2.4.3.3 Localisation des zones sensibles à l'érosion :

Au Maroc, plusieurs études ont utilisé l'USLE et un SIG afin de cartographier l'érosion des sols à l'échelle des bassins versants (Chen et al., 1993; Tahri et al., 1993; Garouani et al., 2003). Ces études ont démontré que les taux d'érosion varient principalement en fonction de

l'occupation des terres et de la pente. Kingumbi (1997) a développé un modèle inspiré de l'USLE pour un bassin versant tunisien. Son modèle superpose, à l'aide d'un SIG, cinq couches, soit l'érodabilité des sols, la lithologie, les pentes, le type d'occupation des terres et l'agressivité des pluies. Pour chaque couche, des valeurs de superposition (1 à 3 ou 1 à 5 selon la couche) sont attribuées. Par exemple, pour la couverture des pentes une valeur de superposition de 1, 2, ou 3 est attribuée selon que la pente soit faible ( $0-4^\circ$ ), moyenne ( $4-10^\circ$ ) ou forte ( $>10^\circ$ ). Une carte finale de sensibilité à l'érosion est obtenue en multipliant les valeurs de toutes les couches superposées. Le produit ainsi obtenu et prenant une valeur entre 1 à 1125, permet à Kingumbi (1997) d'identifier cinq classes, soit :

**Tableau 4 : Classes de sensibilité à l'érosion (Kingumbi, 1997)**

Classe	Intervalle de valeurs	Degré d'érosion
1	1-125	Très faible
2	126 - 450	faible
3	451 - 675	moyenne
4	676 - 900	forte
5	901 – 1125	très forte

Quoique très pratique car elle s'accommode de données moins précises que l'USLE, la méthode développée par Kingumbi (1997) produit une carte qualitative d'abrasion des sols qui ne peut pas être validée facilement par des taux d'envasement.

Par ailleurs, la principale réserve face à l'USLE est qu'elle ne modélise uniquement que les taux d'abrasion des sols sans tenir compte du phénomène de dépôt lors du transport d'une particule d'un point donné jusqu'au cours d'eau. Pour pallier à cette lacune, Benmoussa et al. (1993), Anys et al. (1994) et Talbi et al. (2002) ont greffé au modèle USLE un coefficient de transportabilité ( $D_r$ ) lors d'études au Maroc. En effet, ce coefficient est un indice compris entre 0 et 1 qui permet de calculer pour chaque cellule du SIG la quantité de sédiments érodés qui sera transportée jusqu'au cours d'eau. Ainsi, la superposition des couches des paramètres de l'USLE donne une carte du potentiel érosif. La superposition de la couche du facteur  $D_r$  à la carte du potentiel érosif résulte en une carte de pertes de sol.

Gavrilovic (1992) a réalisé une cartographie de son coefficient d'érosion ( $Z$ ) pour une partie de l'Algérie du Nord par la numérisation de cartes topographiques, pédologiques, géologiques et le traitement d'images satellitaires.

Pour contourner le fait que des études pédologiques soient préalables à l'application autant de l'équation universelle que de celle de Gavrilovic (1992), une autre technique existe pour

mesurer l'érosion des sols à grande échelle, il s'agit de l'utilisation d'un isotope (le césium-137). Cet isotope n'existe pas naturellement et sa présence dans les sols provient des retombées des tests nucléaires atmosphériques (Bernard et al., 1998). Puisque ses retombées sont universelles et sont rapidement adsorbées sur les particules fines du sol, le césium-137 est particulièrement bien adapté pour estimer les taux d'érosion des sols à long terme (40 ans). De plus, cette technique permet d'identifier autant les zones de dépôts que d'érosion et ainsi d'obtenir une quantification globale des mouvements des sédiments (Bernard et al. 1998).

En utilisant cette technique au Maroc, Bouhlassa et al. (1995) et Bouhlassa et al. (2000) ont démontré que les deux facteurs les plus déterminants pour l'érosion sont la longueur de la pente et les propriétés pédologiques des sols. Moukhchane et al. (1998) ont démontré en utilisant le césium-137 sur un bassin versant marocain que les faciès les plus érodables sont les terrains quaternaires, les argiles et les marnes du Crétacé. La technique du césium-137 peut être utilisée également sur les sédiments déposés dans les cours d'eau et les réservoirs pour mesurer la contribution relative des différentes sources. En utilisant cette approche au Maroc, Tahri et al. (1993) ont estimé que près de 25 % des sédiments proviendraient des berges et du ravinement. Or, les modèles décrits jusqu'à maintenant qui ont pour objectif de repérer spatialement les zones sensibles à l'érosion sur les versants ne considèrent pas l'érosion en ravines (Tahri et al., 1993).

Puisque le ravinement est un phénomène important dans les pays méditerranéens, l'Espagne, la Tunisie et la Turquie ont développé un modèle SIG (ICONA) qui tient compte à la fois de l'érosion potentielle et de l'érosion active (PAP/CAR, 1998). Le SIG superpose une carte d'érosion potentielle à une carte de d'érosion active. L'obtention, de la première carte est similaire à celle de l'USLE, car ICONA considère les mêmes paramètres à l'exception des pratiques anti-érosives, mais cartographie l'érosion de façon qualitative. La carte présentant les zones actives d'érosion telles que les ravines et les mouvements de masse est obtenue par photo-interprétation et observations terrain. Bien qu'elle considère un type d'érosion souvent ignoré, cette approche exige des photographies récentes et/ou des visites sur le terrain pour cartographier les zones sensibles au ravinement.

#### **1.2.4.3.4 Approches spécifiques associées à l'érosion en ravine :**

Daoudi et al. (1994) ont exploré la possibilité de cartographier directement les ravines au moyen de la télédétection. Malheureusement, le document ne présente pas les images de ravines et ne discute pas de la fiabilité des résultats. Il existe quelques modèles tels que CREAMS, EGEM et WEPP qui peuvent estimer la contribution de l'érosion en ravines sans toutefois localiser l'emplacement de ces ravines dans le bassin versant (Poesen et al., 2003). L'emplacement des ravines pourrait être prédit en utilisant la notion de seuil car ce type d'érosion est initié lorsqu'un seuil hydraulique, pluviométrique, pédologique ou bien topographique est dépassé. Selon Poesen et al. (2003) si la valeur de ces seuils pouvait être déterminée, il serait alors possible de cartographier les zones sensibles au ravinement. Cependant, les valeurs de ces seuils sont difficiles à déterminer in situ en raison de la difficulté à mesurer précisément certains paramètres sur le terrain. Dans ce contexte, le seuil topographique a été le paramètre le plus utilisé pour tenter de prédire les zones de développement des ravines. Cette approche est fondée sur le postulat qu'il existe, pour une

penne donnée, une aire de drainage critique nécessaire pour provoquer le ravinement (Poesen et al., 1998). Lorsque les pentes sont plus accentuées, les valeurs critiques de l'aire de drainage diminuent et vice versa.

Cette approche a été utilisée en Australie avec un certain succès par Prosser et Abernethy (1996) pour prédire l'emplacement des têtes des ravines. Toutefois, Vandekerckhove et al. (1998) ont démontré que ce type d'équation pour prédire les valeurs critiques n'est pas indépendant des conditions locales telles que les propriétés des sols et les directions de labour. Par exemple, Khai et al. (2002) ont démontré au Maroc un ravinement moyen à fort pour les flyschs de Bni Ider tandis que les flyschs numidiens ont moins de ravines. Ainsi, l'équation de Prosser et Abernethy (1996) n'est pas applicable directement pour les bassins versants algériens car les valeurs des coefficients  $a$  et  $b$  dépendent des caractéristiques locales. Afin d'inclure plus de paramètres environnementaux dans un modèle de prédiction du ravinement, Hughes et al. (2001) ont développé une équation prédisant la densité de ravines à l'échelle continentale australienne. Leur modèle fait intervenir l'utilisation du sol, la géologie, la texture, la pluviométrie, la climatologie, la dénivelé et la longueur des versants.

En Tunisie, Boughattas et al. (2003) ont développé une façon simple de mesurer la susceptibilité des bassins versants à être ravinés en utilisant un « nombre lithologique ». En effet, en utilisant la densité du ravinement mesurée en étudiant des photographies aériennes, Boughattas et al. (2003) ont attribué à neuf groupes lithologiques un facteur d'érodabilité à l'érosion par ravinement. La valeur de ce facteur varie de 3 pour la formation avec la plus faible densité à une valeur maximale de 50 qui a été attribuée à la formation lithologique ayant la plus forte densité. Le nombre lithologique est calculé en pondérant le facteur de chaque formation lithologique par sa superficie.

En Algérie, Kouri et Vogt (1996) ont développé un modèle pour déterminer la sensibilité des terrains marneux au ravinement à l'aide d'un SIG. Ils ont utilisé des facteurs stables, c'est-à-dire non contrôlés par l'homme (nature des marnes, dénivelé, exposition des versants, distance par rapport aux oueds et altitude), et des facteurs variables qui sont influençables par l'homme tels que l'utilisation des terres (GTZ, 1994).

### 1.2.5 Méthodologie mise de l'avant par Tecslult :

La perte de capacité des barrages due à leur envasement continu constitue un frein majeur au développement et à l'exploitation optimale et durable des ressources en eau. La superficie de plus de 926 km<sup>2</sup> que couvre le bassin versant de Sidi-Yacoub et sa diversité en termes biophysiques et socioéconomiques posent un défi de taille à l'atteinte des objectifs de cette étude. L'envergure de ce défi a amené Tecslult à opter pour des technologies de pointe dans les domaines de la télédétection et des systèmes d'information géographique afin de permettre une évaluation multicritère de la problématique et proposer des mesures d'atténuation adaptées à chaque région de l'Algérie.

### 1.2.5.1 Choix des approches d'estimation des taux d'envasement et de localisation des zones de production de sédiments :

L'analyse globale de l'état des connaissances actuelles dans le domaine de l'érosion des sols en Algérie mène à trois conclusions :

1. les modèles élaborés jusqu'à maintenant aux conditions algériennes sont des formules empiriques pour estimer la charge sédimentaire dans les oueds;

2. à notre connaissance, les cartes traitant de l'érosion des sols en Algérie ont été réalisées à l'échelle régionale (1 : 200 000) et nous jugeons que cette échelle n'est pas la plus adéquate pour localiser précisément les zones prioritaires d'interventions dans un bassin versant;

3. finalement, l'utilisation des SIG comme outil cartographique n'a pas été exploitée à son plein potentiel jusqu'à maintenant en Algérie.

En conséquence, la méthodologie préconisée par Tecsalt consiste à évaluer divers indices de risque d'érosion. Le premier groupe d'indices englobe tous les modèles d'estimation de la charge sédimentaire. Ces indices sont forts utiles car ils représentent un bilan de tous les types d'érosion et permettent d'estimer les volumes de sédiments se déversant dans le réservoir. Le deuxième groupe d'indices englobe les modèles permettant de localiser les versants théoriquement les plus sensibles à l'érosion pour le bassin versant.

La première approche fait appel à neuf formules régionales de production, de transport ou d'apports solides adaptés au contexte algérien. Ces neuf formules tirées de la littérature sont :

La formule de Fournier (1960);

La formule de Tixeront (1960);

La formule de SOGREAH (1969);

La formule de l'A.N.R.H. (1982);

La formule de Saidi (1991);

La formule de Gavrilovic (1992);

La formule de Probst et Suchet (1992);

La formule de Kassoul et al. (1997);

La formule de Touaïbia et al. (2003).

La charge solide sera également estimée au moyen d'une méthode analogique en comparant le bassin versant étudié avec un autre bassin versant algérien dont les caractéristiques du milieu (sol, pente, végétation, utilisation des sols) sont similaires et pour lequel le débit solide est connu.

Dans la seconde approche, la cartographie des zones de production de sédiments sera effectuée au moyen de trois modèles. Ces modèles seront l'équation universelle des pertes de sols (RUSLE), le modèle ICONA et finalement le modèle de Gavrilovic (1992). Pour des fins d'illustration cartographique et de détermination de stratégies d'aménagement, l'état érosif des versants sera divisé en quatre classes principales de vulnérabilité des sols, soient les niveaux "négligeable", "modéré", "élevé" et "très élevé". Par ailleurs, les probabilités de glissement de terrain seront également évaluées en s'appuyant sur le même type de procédure, à la différence que l'analyse des caractéristiques morphologiques des sites portera d'avantage sur les écoulements hypodermiques de l'eau et sur la sensibilité des formations géologiques.

La perméabilité du bassin a été estimée en se basant sur des travaux australiens. En effet, après étude de plus 8 000 profils australiens, une équipe de pédologues a établi les propriétés physico-chimiques les plus probables d'un sol selon son matériel parental (Gray et Murphy, 1999). Les résultats de leur étude ont été adaptés pour les sols du bassin versant de Sidi-Yacoub.

### 1.2.5.2 Approche visant la localisation des zones de production des sédiments

Compte tenu du rôle central accordé à la réalisation de futurs travaux de conservation des sols, un aspect cartographique des zones sensibles à l'érosion doit être intégré. La cartographie des zones d'érosion en nappe a été effectuée en utilisant l'équation universelle des pertes des sols, le modèle ICONA et le modèle de Gavrilovic.

### 1.2.5.3. L'équation universelle de la perte des sols (RUSLE) :

La cartographie des zones sensibles à l'érosion en nappe a été effectuée avec l'aide de l'équation universelle. Le facteur  $K$  a été calculé en utilisant la texture et les taux de matière organique qui sont généralement tirées de rapports pédologiques. En comparant les cartes pédologiques et géologiques, Benchetrit (1972) a observé de forts liens entre celles-ci pour la région tellienne humide. De plus, Raunet (1974) a noté sur les versants de la région de Béni-Slimane une bonne identité entre les unités morpho-pédologiques et les faciès lithologiques. Ceci laisse à croire que sur les versants d'Algérie du Nord, les cartes géologiques représentent le matériel parental des sols. Comme la géologie du bassin versant étudié a été entièrement cartographiée, la texture de la couche de surface des sols a été déduite à partir de celle-ci en se basant sur l'étude australienne décrite précédemment.

Puisque les autres facteurs influençant le développement d'un sol (température, pluviosité, végétation, etc.) ne sont pas nécessairement semblables entre les deux pays, des liens aussi précis entre la texture et la roche-mère seraient difficilement transférables en Algérie. Ainsi, les relations entre la géologie et la texture ont été généralisées en regroupant les douze classes internationalement reconnues en cinq classes texturales qui sont parfois utilisées par l'USDA (Soil Survey Division Staff, 1993).

Le facteur  $K$  a été déterminé pour chaque unité géologique en utilisant l'équation présentée par Wischmeier et Smith (1978) :

$$K = [0,00021 m^{1.14} (12 - a)] + [0,0325 (b - 2)] + [0,025 (c - 3)] \quad \text{(I-11)}$$

Où :

$m$  : (% limon + % sable très fin) x (100 – % argile) ;

$a$  : % de matière organique ;

$b$  : structure des sols ;

$c$  : perméabilité des sols.

Dans le cas présent, les valeurs d'argile, limon et sable sont respectivement les pourcentages moyens d'argile, limon et de sable calculés par Shirazi et al. (2001).

Les pourcentages de matière organique ( $a$ ) ont été estimés par l'entremise du couvert végétal présent sur les sols. Finalement, les valeurs des coefficients  $b$  et  $c$  ont été obtenues en se basant sur la texture (**Tableau 5**).

**Tableau 5: Valeurs des coefficients  $b$  et  $c$  selon la classe texturale**

Texture	$b$	$c$
Grossière	1	1
Modérément grossière	2	2
Moyenne	3	3
Modérément fine	4	4
Fine	4	5

Les deux facteurs topographiques, la dénivelé ( $S$ ) et la longueur de la pente ( $L$ ) seront obtenus du modèle numérique de terrain (MNT). Les dénivelés et les longueurs de pentes seront automatiquement calculés par le SIG en utilisant le MNT. Une valeur de 301 mètres a été utilisée pour des longueurs de pente supérieures à 300 mètres car des pentes de plus de 300 mètres sont peu probables dans la nature. La valeur du facteur  $LS$  de l'équation universelle a été calculée de la façon suivante :

$$LS = (L/22.15)^m [65,41 \sin^2 (S)] + [4,56 \sin (S) + 0,065] \quad \text{(I-12)}$$

La valeur de  $m$  sera attribuée en fonction de la dénivelé de la façon suivante :

**Tableau 6 : Valeur du coefficient m selon la dénivelé**

<b>Dénivelé (S)</b>	<b>m</b>
≥ 5 %	0,5
3,5 à <5 %	0,4
1 à <3,5 %	0,3
< 1 %	0,2

Le facteur  $R$  de l'équation universelle de perte en sol de Wischmeier et Smith (1978) est calculé en faisant la somme des produits de l'énergie des averses ( $E$ ) et de l'intensité maximale en 30 minutes ( $I_{30}$ ) :

$$R = \sum (E \times I_{30}) \quad \text{(I-13)}$$

Pour utiliser cette équation, les données de précipitation doivent être disponibles à des périodes de moins de 30 minutes. Or, des données de précipitation aussi détaillées n'ont pas été trouvées pour l'Algérie du Nord. Toutefois, diverses études ont développé des équations pour estimer le facteur  $R$  en utilisant les données annuelles et TECSULT a utilisé trois de celles-ci. La première formule a été développée à Hawaï par Lo et al. (1985) et utilisée en Mauritanie par Atawoo et Heerasing (1997) sur la base de la précipitation annuelle ( $P_A$ ) :

$$R_{Lo} = (38,46 + (3,48 \times P_A)) \times 0,1 \quad \text{(I-14)}$$

La deuxième formule a été développée par Roose (1975) pour l'Afrique du Sud :

$$R_{Roose} = 0,5 P_A \times 1,735 \quad \text{(I-15)}$$

La dernière formule a été développée par Renard et Freimund (1994) aux États-Unis et modifiée par Sharma :

$$\text{Si } P_A < 850 \text{ mm : } R_{R,F} = 0,0483 \times P_A^{1,61} \times 0,1 \quad \text{(I-16)}$$

$$\text{Si } P_A > 850 \text{ mm : } R_{R,F} = (587,8 - 1,219 \times P_A + 0,004105 \times P_A^2) \times 0,1 \quad \text{(I-17)}$$

Finalement, le facteur  $R$  de Tecult ( $R_{Tecsult}$ ) est calculé en utilisant la moyenne des résultats de ces trois formules.

Le facteur  $C$  a été dérivé de l'utilisation du sol qui a été cartographiée en utilisant des images satellitaires. Suite à leur traitement, ces images ont été transférées au SIG dans lequel une valeur de  $C$  a été attribuée pour chaque type d'utilisation. Finalement, une valeur de 1 a été attribuée au facteur  $P$  puisque peu de techniques culturales anti-érosives sont pratiquées sur le bassin de Sidi-Yacoub.

### 1.2.5.4 Modèle ICONA :

La réalisation de la cartographie des zones sensibles à l'érosion par l'application du modèle ICONA a été effectuée en trois phases. La première phase a été la réalisation d'une carte des états érosifs, la deuxième phase a été l'identification et l'évaluation des processus actuels d'érosion sur les sites et la dernière phase a été la réalisation d'une carte résultant des première et deuxième phases. Seulement la première phase du modèle a été réalisée mais les deux autres phases ont été examinées afin de développer une méthode pour obtenir une carte consolidée des risques d'érosion.

La phase descriptive a été réalisée en une séquence de sept étapes. Les deux premières étapes concernant l'élaboration de cartes de classes de pentes et de lithofaciès. Les cartes des pentes ont été réalisées en utilisant les valeurs de dénivelé obtenues par le SIG suite à la numérisation des cartes topographiques. Ces valeurs ont été regroupées en cinq classes selon le **Tableau 7**.

**Tableau 7 : Classe de pentes**

Classe	Type de pente
Nulle à faible	0-3%
Modérée	3-12%
Abrupte	12-20%
Très abrupte	20-35%
Extrême	>35

Les cartes de lithofaciès présentent la résistance des différents types de roche ou de sédiments à l'érosion. Ces cartes ont été réalisées en regroupant les unités numérisées des cartes géologiques en cinq classes.

La troisième étape a consisté à élaborer une carte d'érodabilité par la superposition des cartes de pentes et des lithofaciès.

Les quatrième et cinquième étapes ont consisté à élaboration de cartes d'occupation des sols et de couvert végétal. Ces cartes ont été réalisées en regroupant les données des images satellitaires suite à leur traitement.

**Tableau 8: Classes du degré de couvert végétal**

Classe	Degré de couvert végétal
1	< 25 %
2	25 – 50 %
3	50 – 75 %
4	> 75 %

La sixième étape a consisté à réaliser des cartes de protection des sols par la superposition des cartes d'occupation du sol et du degré de couverture végétale. La septième et dernière étape du modèle ICONA a été l'élaboration du produit final c'est-à-dire les cartes des états érosifs. Ces cartes ont été obtenues par la superposition des cartes des degrés d'érodabilité et de protection des sols.

### 1.2.5.5 Modèle de Gavrilovic :

La cartographie des zones sensibles à l'érosion dans le bassin versant par le modèle de Gavrilovic a été effectuée par la superposition de quatre couches dans le SIG en utilisant l'équation suivante:

$$Z=YXa(\varphi+\sqrt{J_{SR}}) \quad \text{(I-18)}$$

L'attribution des valeurs pour le coefficient de résistance du sol à l'érosion (Y) a été déterminée au moyen des cartes géologiques simplifiées.

Le produit de la protection des sols par la végétation (X) par les pratiques agricoles (a) a été déterminé sur la base des images satellitaires.

Le paramètre  $\varphi$  représente les processus d'érosion visibles et nettement prononcés fondées sur l'occupation du sol.

Finalement la valeur du paramètre  $J_{SR}$  a été calculée par le SIG en utilisant les informations numérisées des cartes topographiques.

**Tableau 9: Classes d'érosion suivant le coefficient d'érosion**

Érosion	Z
Excessive	1.00 à 1.50
Intense	0.70 à 1.00
Moyenne	0.40 à 0.70
Faible	0.20 à 0.40
Très Faible	0.10 à 0.20

Source : Gavrilovic (1992)

### 1.2.5.6 Cartographie des zones sensibles aux glissements de terrain :

La cartographie de la probabilité de mouvements de masse future a été basée uniquement sur leur susceptibilité d'occurrence. En effet, les facteurs déterminant la probabilité d'un mouvement de masse peuvent être regroupés en deux catégories. La première catégorie regroupe les facteurs liés à des pentes susceptibles de glisser sans toutefois initier le mouvement et donc créant des pentes avec un état fragile de stabilité. La deuxième catégorie regroupe les facteurs déclencheurs, c'est-à-dire les facteurs qui brisent le fragile équilibre des pentes initiant ainsi le mouvement.

La carte de probabilité de glissement de terrain dépend à la fois des facteurs préparatifs et déclencheurs. Si ces derniers ne sont pas considérés, alors nous utilisons la carte des facteurs préparatifs comme une carte de susceptibilité aux glissements de terrain.

Dai et al. (2002) considèrent qu'à l'échelle régionale, la carte de susceptibilité des glissements de terrain peut être utilisée comme une carte de probabilité de glissements de terrain. Or, puisque le mandat de TecSULT se réalise sur un bassin versant de près de 1000 km<sup>2</sup>, TecSULT a également considéré que la carte de susceptibilité est la carte de probabilité des glissements de terrain.

Les zones potentielles de glissements de terrain ont été définies à l'aide du logiciel SINMAP (Stability Index MAPing). Six classes ont été définies (stable, modérément stable, presque stable, instable, très instable, extrêmement instable). Les classes stables, modérément stables et presque stables définissent des terrains stables mais qui peuvent être affectés par des glissements si une augmentation des facteurs déstabilisants comme une augmentation de la teneur en eau, un tremblement de terre ou une surcharge locale de poids apparaît. La probabilité de glissement de terrain par les classes instables est inférieure à 50 % alors que celle pour les classes très instables est supérieure à 50 %. La classe extrêmement instable définit une zone où quelque soient les variables entrées, les conditions topographiques et hydrogéologiques définissent cette zone comme toujours instable.

Les calculs de stabilité effectués à l'aide du logiciel SINMAP ont été précisés en fonction de la granulométrie des sols présents dans le bassin versant et de la couverture végétale. Le type de sol a été défini en fonction de la roche sous-jacente. L'index de stabilité a été diminué si les sols issus de l'altération de la roche étaient principalement formés d'argile. En effet, les propriétés géotechniques de l'argile rendent ce matériau sensible au glissement. L'index de stabilité a été augmenté si la couverture végétale est importante, car la présence d'un couvert végétal favorise la stabilité des versants.

Les chutes de blocs et les écroulements affectant les falaises rocheuses ne sont pas pris en compte dans le logiciel SINMAP. Les falaises rocheuses ont été définies comme étant des zones où l'inclinaison de la pente est supérieure à 50 degrés. Ces zones ont été reportées sur la carte des glissements de terrain générée par SINMAP avec le postulat que si un risque de glissement existe dans une zone où la topographie est supérieure à 50 degrés, les mouvements de masse attendus se présenteront sous forme de chute de blocs ou d'écroulement.

### **1.2.5.7 Cartographie des zones propices à l'érosion en ravine :**

La technique la plus détaillée pour cartographier les ravines est de les localiser en utilisant des photographies aériennes. Toutefois, cette approche nécessiterait un temps considérable pour leur interprétation car le bassin versant du barrage Sidi-Yacoub est relativement vaste. Afin de s'adapter à l'échelle de réalisation du projet, TECSULT a opté pour l'utilisation d'un modèle spécifiquement développé pour localiser les zones les plus susceptibles à être ravinées.

En Algérie, Kouri (1993) a développé un modèle pour déterminer la sensibilité des terrains au ravinement à l'aide d'un SIG. Il a utilisé des facteurs stables, c'est-à-dire non contrôlés par l'homme (nature des marnes, dénivelé, exposition des versants, distance par rapport aux oueds et altitude), et des facteurs variables qui sont influençables par l'homme tels que l'utilisation des terres (GTZ, 1994). Toutefois, ce modèle évalue le degré d'érosion par ravinement uniquement pour les terrains marneux et non pour les diverses unités géologiques observées sur le bassin versant concerné par le présent rapport.

Par ailleurs, Tecsalt a développé dans le cadre d'un autre mandat pour l'ANBT un modèle simple, mais efficace, pour cartographier les zones les plus susceptibles au ravinement pour l'ensemble du bassin versant quelles que soient les caractéristiques géologiques. Pour ce faire, des photographies aériennes du bassin versant du barrage de Kef Eddir ont été étudiées afin de délimiter les zones de ravinement. Par la suite, ces zones ont été transférées sur les cartes topographiques et puis numérisées. Par l'entremise du SIG, les différentes couches décrivant les aspects physiographiques du bassin (couvert végétal, déclivité et longueur des pentes, lithologie, etc) ont été examinées afin d'obtenir les couches clefs régissant le ravinement. Ces manipulations ont démontré que trois paramètres physiographiques semblent déterminants pour l'obtention des zones les plus propices au ravinement. Les deux premiers paramètres sont la déclivité et la longueur de pente. À cet effet, aucune zone de ravines n'a été observée sur les pentes inférieures à 3%. Finalement, le troisième paramètre est le couvert végétal.

Le modèle procède en trois étapes :

**1.** le SIG estime que toutes les régions ayant une déclivité de pente inférieure à 3% possèdent un risque très faible au ravinement;

**2.** pour toutes les zones possédant une déclivité supérieure à cette valeur, un facteur topographique similaire à celui de RUSLE ( $LS$ ) a été utilisé en multipliant la déclivité au cube par la longueur de la pente ( $LS$ ). En effet, une faible présence de ravines a été observée lorsque ce produit est inférieur à 600 000;

**3.** finalement, la susceptibilité au ravinement a été cartographiée en intégrant l'effet protecteur du couvert végétal par l'entremise d'un coefficient de ravinement. Ce coefficient permet d'ajuster les résultats des facteurs topographiques car certaines utilisations du sol protègent suffisamment le sol pour éviter le développement de ravines. Par exemple, une probabilité nulle de ravinement a été attribuée aux zones forestières possédant une densité d'arboré supérieur à 50 % et ce même si elles possèdent un produit  $LS$  supérieur à la valeur critique. En effet, la probabilité de ruissellement est faible pour ces zones car la couche organique généralement observée sur leur surface empêche le développement du ruissellement. Or, le ruissellement est le principal agent régissant le développement des ravines.

### **I.3- Les différents aspects du transport solide :**

Le phénomène recouvre trois fractions, à savoir: le charriage, la suspension et le transport en solution. Les plus répandus sont le charriage et la suspension.

#### **1.3.1- Le transport par charriage :**

Dans ce cas, les matériaux roulent, glissent ou bien sautent légèrement tout en suivant le sens du courant et sans pratiquement quitter le lit. Ce sont des particules en contact continu avec le lit, et qui se déplacent plus proche du lit.

#### **1.3.2- Le transport par suspension :**

Ce sont des matériaux qui restent au sein de l'écoulement lui-même sans jamais retomber malgré leur densité supérieure à celle de l'eau, sauf très épisodiquement sur le fond. Leur déplacement s'effectue sur de longues distances.

#### **1.3.3- La saltation et le transport en solution :**

Il s'agit des matériaux très fins qui ne peuvent être appréhendé que par analyse chimique, la saltation qu'est toujours liée au charriage regroupe des particules qui progressent par bancs successifs sur des périodes plus au moins longues d'immobilisation, et se retrouvant tantôt au sein du liquide, tantôt sur le fond.

Le transport en solution concerne les matériaux qui n'ont aucun contact avec le lit. On peut dire que la distinction entre ces différents modes de transport peut être liée à l'action mécanique qui s'effectue entre les particules, à la dimension de ces particules et au courant qui les transportent.

### **I.4- Théorie du transport solide**

#### **1.4.1- Cas du charriage :**

Bien des auteurs ont décrit le phénomène comme P.Boys.(1879), Shields(1879), White S.J.(1936), White W.R.(1972), Neille(1976) et Issle Donavie(1976), en s'appuyant sur des propriétés physiques des sédiments et les contraintes de cisaillement imposées.

Un grain en charriage peut être remis en mouvement si la force tractrice critique exercée par le fluide sur le fond « $\tau_0$ » est supérieure à la force tractrice d'érosion du matériau.

On compare la force déstabilisatrice (motrice ou tractrice) due à l'écoulement à la capacité de résistance au mouvement des matériaux qui tapissent le fond du lit.

La méthode la plus directe de cette approche est celle de Shields (des procédés similaires ont été donnés par Eisten Kalinske). Schields suppose que la force exercée par l'écoulement sur les Sédiments peut être exprimée de la forme:

$$F = C_D \cdot A \cdot \frac{\rho V^2}{2} = \phi_1 \left( \alpha_1 \cdot \frac{Vd}{V} \right) \cdot \rho \cdot d^2 \cdot V^2 \quad \text{(I-19)}$$

avec :

$\alpha_1$  : Facteur de forme;

$V^2$  : Vitesse caractéristique de l'écoulement ( $m^3/s$ ); le coefficient d'entraînement est donnée pour des valeurs  $d/D < 1/3$  suivant:

$$C_D = 1 + \frac{9d}{4D} + \left[ \frac{9d}{4D} \right]^2 \cdot \frac{24}{R} \quad (\text{I-20})$$

Avec:

A : Surface apparente exposée au courant ( $Km^2/s$ );

$C_D$  : dépend d'un coefficient de forme  $\alpha_1$ , caractéristique des particules d'un nombre de Reynolds rapporté au diamètre apparent.

Tant que le cours d'eau a une puissance plus grande que l'énergie dépensée en frottement interne et en frottement contre le fond, il est capable de transporter les matériaux et parfois de mettre en marche par arrachement des éléments du lit, jusqu'au point où la rivière devient trop chargée. Cela se manifeste par la réduction de la déclivité, de la vitesse et par conséquent de la capacité de transport des sédiments. Dans ce cas, les éléments transportés sont amenés à se déposer, on dit que le courant a atteint sa charge limite, charge au-delà de laquelle, le courant serait contraint de déposer une partie.

Il commence par les matériaux les plus gros qu'il charrie. Ces derniers s'arrangent en couche d'une épaisseur réduite, protégeant les couches inférieures des sédiments. On dit alors qu'il s'est produit: «un pavage». Ce pavage ne peut être rompu que pour les valeurs de la vitesse moyenne beaucoup plus grande que celle nécessaire à l'entraînement des sédiments auparavant.

Quelquefois, dans les réservoirs, le dépôt prend place, en affectant en premier la partie grossière et en dernier la partie fine des particules sous forme des couches horizontales planes. L'épaisseur de ces couches tend à diminuer en présentant un talus assez raide formé par des limons et des vases en suspension dans l'eau, Ce processus crée une forme triangulaire typique de dépôt dite : «DELTA».

Durant l'entraînement des matériaux sur le versant, ces derniers voient leurs dimensions diminuer au cours du charriage par un phénomène appelé «ABRASION».

Cette usure est plus importante en cas de fortes pentes et quand la vitesse de l'eau est élevée. Le débit solide total ne se réduit pas vers l'aval, mais il passe progressivement du charriage en suspension (Chenaoui B., 1991).

### 1.4.2- Cas de la suspension :

Ce type de transport se fait sur toute l'étendue du cours d'eau. Il est dû principalement à la turbulence. Quantitativement, il est considéré comme un type de transport plus important puisqu'il est à l'origine de l'envasement des barrages.

Les courtes périodes où les transports solides sont plus élevés, correspondent vraisemblablement à des effondrements locaux des berges. Une forte quantité de terre est

apportée par le ruissellement de surface, principalement au début de campagne des labours; le sol étant remué et aéré est fragilisé. Donc, on peut dire que ce mode de transport reflète en quelque sorte l'importance de la dégradation des sols cultivés.

La suspension constitue un état d'équilibre entre les forces de gravité qui tendent à homogénéiser la concentration le long d'une verticale. Suivant la variation de la vitesse et la fluctuation turbulente de l'écoulement, la particule va monter à une certaine hauteur dans l'écoulement, et sera transportée par la vitesse moyenne locale, avant de redescendre, remonter... ect. Selon Kuenen W.(1952) in Yucel et Graf W. H.(1976), il y a un début de mise en suspension des matériaux des berges et du fond pour une vitesse moyenne  $u$  égale à:

$$\bar{u} = 19(g \cdot d)^{1/2} \quad (\text{I-23})$$

avec:

$\bar{u}$  : vitesse moyenne (m/s) ;  
d: diamètre médian des grains (m) ;  
g: accélération de la pesanteur (m/s).

Cette formule ne s'applique qu'à des granulats de 0,2 à 0,85 mm de diamètre.

### 1.5 L'évaluation du transport solide à partir des formules :

La formule quelle qu'elle soit, ne peut alors que refléter les conditions dans lesquelles elle a été établie (Bouvard M., 1984). Il est certain que la rivière est un milieu très complexe pour être facilement étudiée. Un bon nombre de formules sont établies en laboratoire sur des écoulements rectilignes uniformes et pour des granulométries qui n'ont que peu de chance d'être en rapport avec celles des sédiments de la rivière.

Le transport se fait par charriage et en suspension, et pour chaque mode de transport, il existe dans la littérature une multitude de formules basées sur des approches du problème de transport.

#### 1.5.1- Cas du charriage :

La majorité des formules de transport par charriage sont des formules à seuil qui peuvent s'exprimer sous la forme:

$$q = \alpha(\tau - \tau_c)^B \quad (\text{I-24})$$

$\tau_c \leq \tau \leq \tau'_c$   
 $q = 0 \Rightarrow \tau < \tau_c$   
 $q = q_{\max} \Rightarrow \tau \geq \tau'_c$

avec:

$\tau'_c$  : Contrainte critique de décollement des matériaux de fond ;  
 $\tau_c$  : Le début de phénomène de suspension ;

$\tau$  : Contrainte hydrodynamique exercée par l'écoulement sur le fond.

On ne cite que les formules les plus usuelles.

**1)- MEYER-PETER, 1934**

Pour les sables grossiers de grains uniformes, une formule présentée en 1934, de type:

$$\frac{q_b^{2/3} S}{d} = a + b \frac{q_B^{2/3}}{d} \quad \text{(I-25)}$$

Avec :

- a = 17, b = 0.4 et  $q_B = V.R_b$
- V: vitesse moyenne du courant ( $m^3/s$ );
- d: diamètre caractéristique des particules (m);
- $R_b$ : rayon hydraulique ;
- $q_b$ : débit liquide en poids sec par unité de largeur;
- $q_B$ : débit solide en poids sec par unité de largeur;
- a, b : constantes.
- S: la pente.

En 1947, il a établi la formule suivante :

$$q^{2/3} \frac{j}{d} = 9,57 \cdot (\delta - 1)^{1/9} + 0,462 \cdot (\delta - 1)^{1/9} \cdot q' \cdot s^{2/3} / \bar{d} \quad \text{(I-26)}$$

Où :

- $(\delta-1)$  : densité des granulats dans l'eau ;
- d: diamètre médian des particules exprimé en m ;
- Q, q' : débits liquides et solides exprimés en kg/m.sec.

Cette formule ne donne pas de bons résultats pour une granulométrie étendue.

**2)- EINSTEIN, 1942**

$$q_s = \frac{[(\gamma_s/\gamma)gd^3]^{1/3}}{0,465} e^{-\left[ \frac{0,391(\gamma_s/\gamma-1)d}{DS} \right]} \quad \text{(I-27)}$$

Avec:

- $q_s$  : taux de la charge du lit transportée en volume par unité de temps et de largeur;
- $g_s$  : taux de la charge du lit en poids par unité de temps et de largeur;
- d : la taille des grains (m);
- g : accélération de la pesanteur (m/s);
- q : le taux de l'eau en volume par unité de temps et unité de largeur;
- $q_{cr}$  : est q où commence le mouvement des sédiments;

$\gamma_s$  et  $\gamma$  : poids volumique respectivement du sable et de l'eau.

### 3)- SCHOKLITSCH

$$q_s = \chi^{sk} (q - q_{cr}) \quad (I-28)$$

Avec :

- qs: débit solide du charriage en volume par unité de largeur et par unité de temps;
- s: la pente du canal ;
- q: débit de l'eau par unité de largeur et de temps;
- $q_{cr}$ : débit critique de l'eau pour lequel les matériaux du lit commencent à se mouvoir;
- $\chi$  et k : sont des coefficients empiriques fonction des sédiments.

Relation plus commode que les précédentes, car elle a été établie selon le principe de l'équilibre entre l'érosion et le dépôt. De manière générale, il existe deux types de formules:

- Les formules de type Duboys lorsque le débit solide est une fonction de  $(\tau - \tau_c)$  ou de  $(q - q_{cr})$ . Ces deux formules donnent un débit solide nul lorsqu'un seuil de début de transport n'a pas été franchi ( $\tau \leq \tau_c$ ), ( $q \leq q_{cr}$ ), celles qui s'expriment en  $\tau - \tau_c$  indiquent un débit solide décroissant avec  $\tau$  et non avec la vitesse moyenne. Les formules de Duboys, Schoklitsch, Shields, Meyer-Peter et Muller et de Laursen appartiennent à ce type.

- Les formules de type Einstein ou Einstein-Brown qui donnent une valeur continue de  $g_s$  (taux de la charge du lit en poids par unité de temps et de largeur) au faible transport solide, ce qui s'explique du point de vue probabiliste par suite de la turbulence.

#### 1.5.2 Cas de la suspension :

On ne cite que les formules qui sont effectuées en Algérie. Plusieurs auteurs se sont intéressés par le transport solide en suspension en Algérie tels que: Medinger 1960, Tixeront 1960, Capolini 1965-1969 et Sogreah 1969.

Citons quelques formules:

##### 1)- Hennin, 1950

$$E = \frac{I_p \cdot \pi \cdot S}{K \cdot V_e} \quad (I-29)$$

Avec :

- $I_p$ : intensité des précipitations;
- $\pi$ : la pente;
- s: susceptibilité;
- K: perméabilité;
- $V_e$ : végétation.

$I_p$  et  $\pi$  constituent des facteurs susceptibles de favoriser l'érosion tandis que les autres paramètres de la formule la limite.

### 2)- Fournier, 1960

La formule de Fournier donne le taux d'abrasion d'un bassin versant situé dans une zone semi-aride.

$$T_a = 91,78 \cdot \frac{P^2}{\bar{P}} - 737,62 \quad (T/Km^2 / an) \quad (I-30)$$

Avec:

$P$  : pluie max. mensuelle (le mois le plus arrosé) (mm);

$\bar{P}$  : pluie moyenne annuelle (mm).

$$T_a = \frac{1}{36} (P_m / P_a)^{2,65} \cdot (H^2 / S)^{0,46} \quad (I-31)$$

Où:

$T_a$ : apport solide spécifique moyen annuel (T/Km<sup>2</sup>/an) ;

$P_m$ : pluie moyenne du mois le plus arrosé (mm) ;

$H$ : dénivelée du bassin (m) ;

$P_a$ : pluie moyenne annuelle (mm) ;

$S$ : surface du bassin (Km<sup>2</sup>).

$P_m^2/p_a$ : appelé facteur climatique ou indice de Fournier qui tient compte de l'abondance pluviale et de la répartition de la pluie au cours de l'année.

### 3)- Gravitovic, 1960

$$E_s = 3,14 \cdot T \cdot P_0 \cdot \sqrt{Z^3} \quad \text{et} \quad T = \sqrt{\frac{t_0}{T_0}} + 0,1 \quad (I-32)$$

Avec:

$p_0$ : pluie moyenne annuelle en (mm);

$T$ : coefficient de température;

$E_s$ : érosion spécifique dans le bassin versant (T/Km<sup>2</sup>. an);

$t_0$ : température moyenne annuelle en °c;

$Z$ : coefficient d'érosion relative du terrain;

### 4)-Tixeront, 1960

Si on considère que la totalité des sous bassins versants ont la même perméabilité.

$$T = K \cdot R^a \quad (I-33)$$

Avec:

$T$ : turbidité moyenne annuelle (kg/m<sup>3</sup>) ;

$R$ : ruissellement annuel (mm) ;

K et a : constantes, pour l'algérois (k=200, a= -1).

$$Es = (S_1 T_{a1} + S_2 T_{a2} + S_3 T_{a3}) \cdot S \quad \text{(I-34)}$$

$T_{a1} = 75 Le^{0,15}$  → pour une surface de forte perméabilité;  
 $T_{a2} = 350 Le^{0,15}$  → pour une surface de perméabilité moyenne;  
 $T_{a3} = 1400 Le^{0,15}$  → pour une surface de faible perméabilité;

Le: lame d'eau ruisselée moyenne interannuelle;  
 Es: érosion spécifique (T/Km<sup>2</sup>/an);  
 Ta: taux d'abrasion(T/Km<sup>2</sup>. an);  
 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>: surfaces élémentaires, S= S1+S<sub>2</sub>+S<sub>3</sub> (km<sup>2</sup>).  
 S: superficie totale du bassin versant (km<sup>2</sup>).

**5)-Sogrèah** (Formule de Tixeront et Berkaloff modifiée)

$$Es = 350.R^{0,15} (T/Km^2) \quad \text{(I-35)}$$

R: écoulement moyen annuel (mm/an).

**6)- Sogétha-Sogrèah**

Sogétha-Sogrèah a établi la formule de Tixeront pour l'Algérois, elle est de la forme:

$$Ta = a.R^{0,15} (T/Km^2/an) \quad \text{(I-36)}$$

Avec:

Ta: taux d'abrasion (T/Km<sup>2</sup>/an);  
 a: coefficient de perméabilité;  
 R: lame d'eau ruisselée annuelle en (mm).

**7)- POLIAKOV**

$$S_0 = \alpha \cdot \sqrt{j} \cdot 10^8 \quad \text{(I-37)}$$

avec:

j: pente du bassin versant;  
 α: Coefficient d'érosion.

**8)- A.N.R.H. 1970**

Elle lie l'érosion spécifique au coefficient de torrentialité et à l'indice climatique de Fournier.

$$Ta = 44,9C_t + 73,2 \frac{P^2}{P} - 1442,8 \quad \text{(I-38)}$$

Avec:

$C_t$ : coefficient de torrentialité;  
 $\frac{P^2}{\bar{P}}$  : Indice climatique de Fournier.

$$TSS = 2662I_L + 5,07I_P + 9,77C_t - 59359 \quad (\text{I-39})$$

Avec:

T.S.S: transport solide spécifique moyen annuel (t/km<sup>2</sup>/an);  
 $I_P$  : indice de précipitation (%);  
 $I_L$ : indice lithologique (%);  
 $C_t$ : coefficient de torrentialité.

Les conditions d'application de cette formule sont :  $I_L > 10\%$ ,  $P_m > 300$  mm.

$$R = \frac{Q_1 \cdot 3600(365)}{2750 \cdot 10^6} \quad (\text{I-40})$$

Avec:

$Q_1$ : débit liquide moyen d'un bassin versant (m<sup>3</sup>/s).

L'auteur s'est basé essentiellement sur les facteurs sol et pluviométrie.

### 1.5.3 Transport solide total :

Larsen trouve une relation empirique entre le rapport

$$100 \cdot \delta \cdot Q_s / q \cdot (q/L)^{7/6} \left[ \frac{(\tau_1 - \tau_0)}{\tau_0} \right] \text{ et le rapport } \frac{V^*}{W} \quad (\text{I-41})$$

Avec:

$Q_s$ : débit solide total par unité de largeur de l'écoulement;  
 $q$ : débit liquide correspondant (m<sup>3</sup>/s);  
 $\tau_1$ : la partie de la tension tangentielle qui correspond à des transports des granulats;  
 $\tau_0$ : tension tangentielle critique;  
 $h$  : hauteur du liquide qui s'écoule (m);  
 $d$  : diamètre des granulats (m);  
 $s$  : densité par rapport au liquide;

$W$ : vitesse de chute libre des granulats isolés (m/s);

$L$  : largeur de la section de mesure.

$V^*$  : vitesse de frottement (m/s);  $V^* = V \sqrt{\frac{f}{8}}$  ; avec:

$V$ : vitesse moyenne de l'écoulement;

$F$  : coefficient de frottement ; fonction du nombre de Reynolds.

Cette formule est valable pour les granulats quartzeux de 0,011 à 4,08 m de diamètre dans l'eau.

### \*Formule universelle de perte en sol

$$A = R.K.LS.C.P \text{ (T /Ha.an)} \quad \text{(I-42)}$$

Avec:

A: perte en terre (T/Ha) ;

R: indice de pluie, il représente le nombre d'unité de l'indice d'érosivité ou d'agressivité moyenne annuel des pluies (caractérise la force érosive d'une pluie), calculé à partir de l'énergie cinétique et de quantité des pluies entraînant une érosion;  $R_i = E_i I_{30i}$   
 $R = \sum R_i$ .

K: indice d'érodibilité du sol;

LS: les facteurs topographiques qui tiennent compte de l'effet de la longueur de la pente (L(m)) et de déclivité (S%) sur l'intensité de l'érosion;

C: indice de culture qui prend en considération l'influence des pratiques culturales et du couvert végétal;

P: facteur conservation du sol;

Gomer(1994), en analysant les valeurs de l'index d'érosion sur les différentes stations pluviométriques sur le bassin versant de l'Oued Mina, a conclu que des valeurs à l'échelle mensuelle, sont un peu plus élevées pour les mois de mai, septembre et octobre. De même, des événements rares, d'une période de retour de vingt (20) ans peuvent avoir une érosivité du même ordre que la moyenne interannuelle.

### 1.6 Mesure du transport solide :

L'évaluation des apports solides est basée sur l'analyse des échantillons prélevés au niveau de la station.

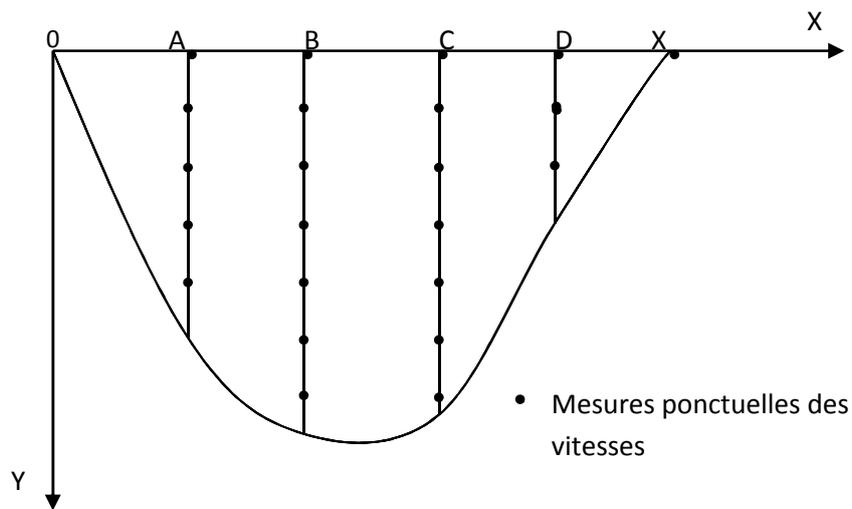
#### 1.6.1 Cas de la suspension :

Cette mesure est analogue à celle du débit liquide en un point de la station, on mesure simultanément la vitesse «V» du courant avec un moulinet, et la concentration en matériaux de suspension. Bien des variables conditionnant un échantillonnage représentatif sont indiqués, les plus importants sont: la variation spatiale et les fluctuations dans le temps décrites par Nordin, 1980 in Chenaoui, 1991.

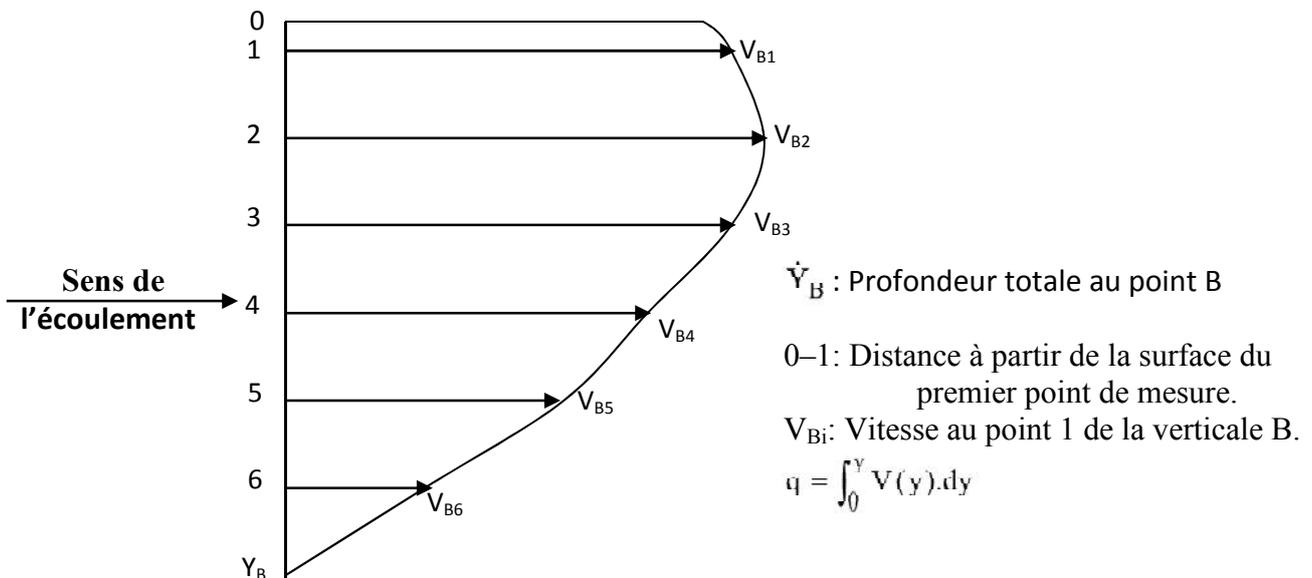
Au moyen d'un appareil de prélèvement, on procède ainsi par un jaugeage ordinaire, en plusieurs points d'un certain nombre de verticales. Chaque point étant défini par ses coordonnées Y, profondeur, et X, distance à une des rives prise comme origine (Fig.1), le débit solide à travers une surface dx dy de la section est égale à C(x, y). V(x, y) et le débit solide en suspension de la rivière est obtenu par double intégration graphique étendue à la totalité de la section suivant l'expression:

$$Q_s = \int \int_{L.P} C(x,y) V(x,y) dx dy \quad \text{(I-43)}$$

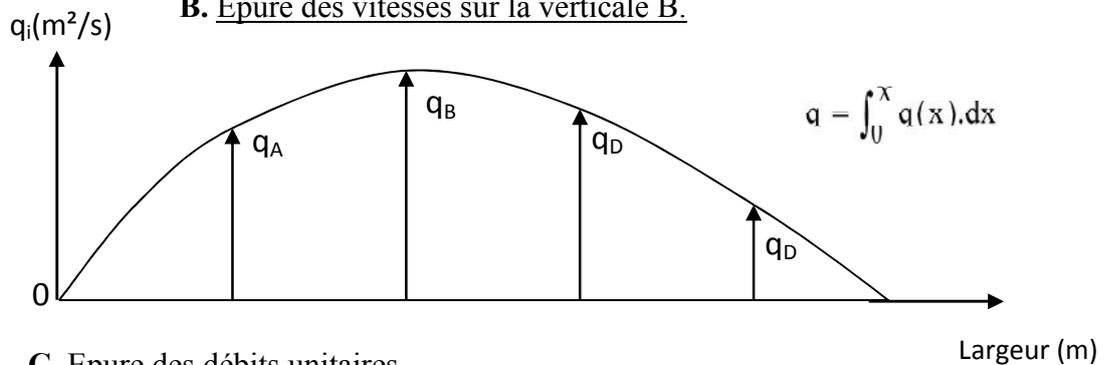
L.P: largeur de la rivière et hauteur d'une verticale



A. Section de mesure d'un cours d'eau.



B. Epure des vitesses sur la verticale B.



C. Epure des débits unitaires.

Figure I-1 : Détermination graphique du débit d'un cours d'eau.

Source: Serra-Bertral, 1979

### 1.6.1.1 Méthodes de mesure :

#### 1)- Prélèvement d'échantillons des cours d'eau :

Son principe consiste à déterminer un certain nombre de verticales dans la section de mesure et à prélever des échantillons d'eau trouble à différentes profondeurs le long de chaque verticale. Il y a deux sortes de prélèvement:

##### a)- Méthode approchée :

On prélève des échantillons à l'aide des bouteilles de 0,5 à 1 l de capacité. Ces bouteilles sont lestées pour permettre une entrée rapide dans la section mouillée et présentent un goulot de diamètre très large afin de diminuer le temps de remplissage et d'éviter d'autant que possible les variations de la concentration due au remplissage saccadé. Le lieu de prélèvement sera pris dans le centre de la section, si la rivière est franchissable, en bordure, mais en tous cas pas dans une zone calme.

##### b)- Méthode par extrapolation du champ de concentration :

Elle consiste à explorer à travers une section droite du cours d'eau, le champ de concentration en matières solides et déterminer le débit solide par intégration. On procède à des prélèvements d'échantillons en différents points de la section de mesure.

$$Q_s = \int_{l_i}^L \int_h^H C_v \cdot dh \cdot dl \quad (\text{I-44})$$

Avec:

- h: profondeur du point de prélèvement (m);
- H: profondeur totale (m);
- $l_i$ : abscisse de la verticale;
- L: largeur totale de la section (m).

#### 2)- Mesure in situ :

L'évaluation du transport solide est basée sur deux types d'action:

- La mesure directe du taux de remplissage des retenues, en contrôlant le bilan hydraulique sur le barrage et la turbidité des volumes d'eau déversés ou soutirés.
- L'observation du réseau hydrométrique en faisant des mesures instantanées.

L'intérêt de cette mesure réside dans le fait qu'elle permet une mesure continue et sur place de la turbidité. Les caractères généraux de transport solide en suspension par les cours d'eau se résument en deux points principaux:

- la distribution inégale des matériaux solides dans une section mouillée. La turbidité varie latéralement et verticalement.

- la variation de la turbidité dans le temps, surtout lors des crues.

C'est en fonction de ces caractéristiques fondamentales que les différents appareils et méthodes de mesure se sont développés.

### 1.6.1.2- Appareillage de mesure :

On distingue:

- les échantillonneurs instantanés.
- les échantillonneurs à intégration dans le temps qui regroupent les bouteilles modifiées et les turbidsondes.

Les caractéristiques des sédiments ainsi que les limitations physiques des possibilités d'échantillonnage des débits à toute station aideront à choisir le type de préleveur de sédiments en suspension et la méthodologie d'échantillonnage à adopter.

Trois types principaux de préleveur sont utilisés pour les sédiments en suspension:

- préleveur à intégration (ponctuelle et intégration sur une verticale);
- préleveur à pompe et préleveur instantanés.

Le préleveur à intégration est préféré pour la plupart des recherches, parce qu'il est utilisé pour recueillir des mélanges eau-sédiments pendant un certain intervalle de temps, ce qui contribue à réduire les variations dues aux fluctuations temporelles. Le préleveur instantané est le plus ancien des appareils car il a été utilisé de bien des façons, par exemple en descendant un récipient ouvert dans l'eau.

Il y a des conditions limites recommandées pour l'usage de différents types d'appareils, selon la masse de l'appareil, la profondeur, la vitesse maximum et la taille des sédiments (Serra-Bertral, 1979).

### 1.6.2 Cas du charriage :

Les mesures du transport par charriage englobent une forte proportion de transport par saltation, car il n'existe pas une différence essentielle entre les deux sortes de transport solide; c'est en effet moins une question de nature qu'une question de degré dans la hauteur des sauts successifs des grains.

Ces mesures sont malheureusement difficiles à réussir et rarement précises parce que le charriage et la saltation ne font que mouvoir les agrégats le long du périmètre mouillé sans changements de forme des berges et du fond tout on puisse tirer un enseignement (Chenaoui B., 1991).

a)- La méthode de mesure la plus directe consiste à déposer des nasses de captage sur le fond et à mesurer les volumes des agrégats qu'on y capte en un temps donné. Mais la présence

de ses nasses modifie les conditions d'écoulement donc de transport solide autour d'elle et ces nasses (cages grillagées) résistent mal à l'action des forts courants qui les détériorent.

**b)-** On peut mesurer dans le même ordre d'idée, la vitesse de comblement de fosses ou trappes transversales creusées en travers du lit, mais il faut beaucoup de temps pour en arriver à des chiffres suffisamment précis comme pour les nasses puisque ce sont surtout les grosses crues qui déplacent les matériaux par charriage sur le fond.

**c)-** On peut procéder d'une façon plus directe: en mélangeant des granulats artificiels (tels que des débris d'un verre de densité convenable) ou des granulats naturels convenablement marqués (par irradiation nucléaire ou par peinture) aux matériaux des berges et du fond dans une section d'écoulement donnée. Et en relevant les proportions de grains marqueurs ou marqués qu'on retrouve dans les sections d'aval au bout d'un temps donné. Cette méthode est plus précise que les précédentes.

**d)-** Une méthode encore plus indirecte consiste à construire un modèle réduit de la partie de la rivière dont on veut mesurer le débit solide, et à reproduire sur ce modèle l'évolution passée du tracé, des largeurs, des profondeurs, et du champ de vitesses de la rivière.

**e)-** On peut encore utiliser des traceurs radioactifs ou des appareils acoustiques (dits hydrophones) sur le fond et en guettant l'apparition sonore des premiers chocs entre les gravillons et galets entraînés. Le préleveur Helly-Smith à échantillonnage directe décrit par Emmet(1980) s'est montré efficace récemment pour des particules de 0,5 à 16 millimètres de diamètre. Le seul procédé adéquat est d'estimer le charriage en fonction de l'évolution des lits.

Selon Touat et al, 1991, la composante du charriage, n'est pas prise en considération, elle est le plus souvent évaluée à l'estime (en % du transport solide en suspension). Selon Saadaoui, 1991, le charriage de fond est estimé à 20-30% des transports en suspension.

## II/- Travaux réalisés dans le monde

### 1/- Flemming, 1969

Flemming symbolise la relation liant l'apport solide moyen annuel ( $Q_S$ ) et le débit liquide moyen annuel ( $Q_L$ ) de la forme:

$$Q_S = a (Q_L)^n \quad \text{(I-46)}$$

Où: a et n sont des coefficients tabulés en fonction du type et densité du couvert végétal.

### 2/-Heusch, 1970

Heusch in Touaïbia, 2000 a établi des relations entre débit liquide et débit solide en quantifiant l'érosion au pré-rif marocain aussi bien pour les bassins versants que pour les parcelles expérimentales du type:

pour les bassins versants:  $Q_S = a - H.Q_1.a^{1,8}$  (I-47)

pour les parcelles expérimentales:  $Q_s = a - H \cdot Q_L \cdot a$  **(I-48)**

Où:

$Q_s$ : débit solide moyen annuel en kg/h;

$Q_L$ : débit liquide moyen en m<sup>3</sup>/h;

H: hauteur annuelle de la pluie en mm;

a: constante expérimentale.

Les résultats de cette quantification sont comparés avec l'index d'érosion de Wischmeier. Il a constaté que les pertes en terre en terre calculées par cette dernière méthode sont extrêmement fortes et d'une telle importance qu'un examen sommaire du terrain montre que ces valeurs calculées sont fausses par excès.

### 3/- Hudson, 1971

Hudson in Touaïbia, 2000, dans ses travaux effectuées au ZIMBABWE trouve que l'index  $KE > 1$  convient mieux que l'index d'érosivité R de Wischmeier où l'indice KE représente l'énergie cinétique de la pluie tombant à des intensités supérieures à 1 inch/h soit 25mm/h. Il est exprimé en joules/m<sup>2</sup>.

Quand Ke est supérieure à 25, il existe une bonne corrélation entre l'énergie cinétique de la pluie et l'érosion du sol, soit un coefficient de 0,94.

### 4/- Roose, 1973

Roose in Touaïbia, 2000 constate par ces travaux en Afrique de l'Ouest, qu'il existe une relation simple entre l'indice d'érosion annuel moyen ( $R_{am}$ ) sur une période de dix (10) ans et la hauteur de la pluie annuelle ( $H_{am}$ ) durant la même période. L'erreur commise sur cet indice est de 5%.

$$C = \frac{R_{am}}{H_{am}} = 0,5 \pm 0,05 \quad \text{(I-49)}$$

En 1977, Roose remarqua qu'aucun de ces indices d'érosivité climatiques cités ne convient vraiment dans le cas des marnes, de fortes pentes, de l'érosion en ravine ; et que l'énergie cinétique de la pluie et de son intensité maximale de 30mn sont les meilleurs paramètres permettant d'interpréter efficacement l'érosion en nappe.

L'index d'érosivité climatique  $A.I_m$  est donné par:

$$A.I_m = \left[ \sum_1^{12} \left( \sum_1^n A.I_m \right) \right] \quad \text{(I-50)}$$

Où:

A: hauteur de la pluie en cm;

$I_m$ : intensité de la pluie maximale en cm/h;

n: nombre de jours pluvieux dans un mois.

En 1981, Roose propose des relations empiriques simples liant l'indice  $R_{am}$  à la hauteur de pluie annuelle moyenne  $H_{am}$  pour différentes régions :

- en région montagneuse  $R_{am} = 0,35 H_{am} \pm 0,05$
- sur la frange côtière  $R_{am} = 0,60 H_{am} \pm 0,05$
- pour les autres zones  $R_{am} = 0,50 H_{am} \pm 0,05$

En s'inspirant des travaux de Roose (1981), Fournier (1994) propose d'une part, une relation pour le site étudié:

$$R_{am} = 0,42 H_{am} \pm 0,05 \quad \text{(I-51)}$$

Et d'autre part une esquisse de la répartition de l'indice  $R_{am}$  en foot.tonne/acre.inch à l'échelle de l'Afrique Occidentale et centrale

#### **5/- Lal, 1976**

Lal in Touaïbia, 2000 dans ces travaux effectués au Nigéria, développe un indice qui tient compte la quantité totale de la pluie A en cm et l'intensité maximale de la pluie annuelle en cm/h. Il fait remarquer que cet indice a des avantages considérables par rapport aux indices  $E.I_{30}$  de Wischmeier et KE de Hudson, dans la mesure où il est simple à calculer et fait intervenir l'intensité maximale de la pluie.

#### **6/- Djabbouri, 1988**

Dans ces expériences faites sur un bassin versant en U.S.A, Djabbouri montre la variation du transport solide en fonction de la densité du couvert végétal. Les résultats obtenus montrent que la perte de sol est inversement proportionnelle à la densité du couvert végétal pour une même intensité de précipitation, soit:

Pour une intensité des précipitations  $I = 62$  mm/h, on observe trois cas :

<u>1<sup>er</sup> cas</u>	<u>2<sup>ème</sup> cas</u>	<u>3<sup>ème</sup> cas</u>
-Densité de plantation = 60 à 75%	-Densité de plantation = 38%	-Densité de plantation = 10%
-Coefficient d'écoulement $C_e=14\%$	-Coefficient d'écoulement $C_e=2\%$	-Coefficient d'écoulement $C_e=74\%$
-Perte de sol $E_s = 0,2$ T/Ha	-Perte de sol $E_s = 0,05$ T/Ha	-Perte de sol $E_s = 2,5$ T/Ha

#### **7/-Bouزيد, 1991**

Bouزيد, 1991, définit les objectifs suivants dans son projet d'aménagement du bassin versant de l'Oued Marguellil en Tunisie:

-prolongation de la durée de vie du barrage El Ouareb: Selon des études antérieures, il est estimé que la stabilisation des lits des oueds, la réduction des sapements de berges et le piégeage des sédiments dans des seuils peuvent prolonger la durée de vie du barrage de 25 ans;

- alimentation de la nappe de Bou Hafna;
- protection des infrastructures (routes, périmètres irrigués, villages);
- laminage des eaux de crue;
- réduction de l'érosion (sapement des berges, creusement des lits d'oueds, recalibrage des pentes des cours d'eau);
- protection des sols.

Suite à une étude de planification du bassin versant de l'Oued Marguellil, un programme d'intervention a été établi. Celui-ci prend en considération les composantes suivantes:

- aménagement des affluents du Marguellil par des ouvrages transversaux;
- traitement des affluents secondaires par des seuils en pierre sèche;
- fixation biologique des berges et terres en pente et terrassement mécanique.

### **8/- Saadaoui, 1991**

Saadaoui, 1991 dans ces travaux sur l'impact de l'érosion et le transport solide sur l'infrastructure en Tunisie, précise les facteurs mis en jeu et quantifié le phénomène. Il indique que le phénomène d'érosion et de transport solide menace l'infrastructure hydraulique du pays étant donné qu'il existe une perte annuelle de capacité de ces ouvrages estimée de 1 à 5% de la réserve totale. Le développement d'une stratégie de lutte contre l'érosion et le transport solide par l'expérimentation de différents traitements anti-érosifs et de la mesure de l'efficacité de ces traitements, permet de combattre efficacement les effets de l'érosion ce qui permet d'allonger la durée de vie des ouvrages et de préserver la qualité de l'eau stockée.

### **9/- Meunier, 1994**

Meunier in Touaïbia, 2000 dans son étude sur trois bassins expérimentaux (bassins de Draix), de taille, de végétation, de pente et de production d'érosion différentes, situés sur les terres noires des Alpes du Sud (très sensible à l'érosion), a montré qu'à chaque événement crue les volumes érodés peuvent être expliqués par les débits maximum et l'intensité de la pluie. Il a constaté que l'érosion à l'exutoire est 80 fois moindre sur les terres boisées si on la ramène à un hectare de terrain dénudé.

Beaucoup d'autres travaux sur l'érosion de par le monde ont fait l'objet d'études poussées sur le processus et la quantification de l'érosion. Parmi ces travaux, citons en quelques-uns un des plus récents effectués en zone semi-aride:

- travaux de Bergaoui et al, 1996 sur la quantification de l'érosion à l'échelle du micro-bassin en Tunisie;
- travaux de Dogan et al, 1997 sur la lutte anti-érosive en Turquie;
- travaux de Roose et al, 1997 sur la gestion conservatoire de l'eau et du sol en Algérie.

Mais aucune de ces études n'a pu s'étendre et s'appliquer en dehors du contexte régional où elle a été élaborée. Les modèles obtenus dans les pays autres que l'Algérie ne peuvent se caler aux conditions nationales vu la diversité et la complexité des paramètres naturels et anthropiques entrant en jeu.

### III/- Travaux réalisés en Algérie

L'érosion hydrique est très importante en Algérie septentrionale et menace gravement les potentialités en eaux et en sols. Selon les résultats de l'étude «Inventaire des terres et des forêts» (B.N.E.D.E.R., 1982 in Mahieddine, 1997), traduisant le degré de sensibilité des sols à l'érosion en fonction de la pente et de la nature du substrat, il ressort qu'au niveau national près de 4000.000ha sont potentiellement touchés par la dégradation liée à l'érosion, se répartissant comme suit:

- 2.110.000ha de terres labourables, soit 53%;
- 830.000ha de parcours, soit 21%;
- 430.000ha de maquis clairs, soit 11%;
- 250.000ha de forêts claires, soit 6%;
- 220.000ha d'alfa, soit 5%;
- 60.000ha de bad-lands, soit 4%.

Comparé à la superficie totale de chaque région, les superficies menacées sont concentrées encore une fois, dans la région Nord: 77% de la surface contre 23%, seulement pour la région des hauts-plateaux. Les ressources potentielles en eau superficielles et souterraines estimées à 19 milliards de m<sup>3</sup>, renouvelables annuellement, sont localisées à hauteur de 60% au Nord, 13% dans les hauts-plateaux et 27% au Sud. L'essentiel des écoulements (89%) se trouve dans le Tell, dont 18% à l'Ouest, 41% à l'Est et 24% au centre. Paradoxalement, c'est la région Nord Ouest, la moins arrosé, qui dispose de l'un des meilleurs potentiels en sol du pays. A terme, le conflit eau potable/agriculture/industrie, risque de se poser de manière aiguë. En effet, la part de l'eau potable qui actuellement ne dépasse pas les 10% des ressources mobilisables, représentera 16% en l'an 2000 et 40% en 2025. Cette augmentation de la part de l'eau potable se fera au détriment de l'agriculture et de l'industrie. (Mahieddine, 1997).

Les forêts sont très âgées et dans un état de dégradation avancé. Elles se caractérisent en outre par leurs répartitions très inégales selon les régions. Représentant seulement 0,16 ha par habitant et passeront à 0,11ha/habitant en l'an 2000. La région nord est la plus boisée soit 61,5% de toutes les superficies forestières nationales, contre 36,5% dans la région des hauts-plateaux, et 2% dans le Sud. (Ministère de l'équipement, 1995).

Sur les zones marneuses le couvert végétal est pratiquement inexistant. Le ruissellement et l'érosion hydrique sont largement favorisés. Les terrains marneux sont de loin les plus grands fournisseurs de sédiments aux lacs de barrage. Ainsi dans le cas du bassin versant de l'oued Mina (Meddi, 1992 in Mahieddine, 1997):

- oued Haddad, drainant les marnes, fournit 148 t/km<sup>2</sup>. an.
- oued El abd, drainant une zone de calcaire et de marnes subordonnées fournit 22t/km<sup>2</sup>. an.

On estime également que 69% de la superficie des zones de montagnes sont exploitées par l'agriculture et le pastoralisme. Ces surfaces sont situées, le plus souvent, sur de fortes pentes et les terres exploitées sont dans la plupart des cas de petits lopins éparpillés. Ceci rend difficile l'application d'une politique de gestion conservatoire des terrains.

Les conséquences liées à l'érosion hydrique en Algérie sont dramatiques ; Dans l'Ouarsenis, en 90 ans les paysans ont perdu le tiers de la superficie cultivable (Demmak, 1982), une dégradation spécifique atteignant 2000t/km<sup>2</sup>.an dans les bassins versants telliens, une quantité de 120 millions de tonnes de sédiment rejeté en mer chaque année par les bassins tributaires de la Méditerranée (Demmak, 1982), un envasement rapide de nombreux barrages qui réduit de près de 20 millions de m<sup>3</sup>/an la capacité de stockage de nos barrages.

L'envasement des retenues des barrages constitue sans nul doute, la conséquence la plus dramatique du phénomène en Algérie où l'eau est, à cause des conditions climatiques surtout la sécheresse qui sévit ces derniers temps, un facteur limitant au développement économique. Ceci montre l'importance capitale de la construction de barrages afin de satisfaire les besoins en eau, d'une population toujours en croissance, de l'industrie et de l'irrigation.

Le lac de Sidi M'hamed Benaouda situé au Nord de la région étudiée est lentement comblé par les sédiments transportés par les cours d'eaux. Ce n'est pas l'érosion diffuse sur les interfluves, mais l'érosion linéaire évoluant fréquemment en bad-lands qui est source de sédiments en milieu marneux dans le bassin versant de l'oued Mina (Gomer, 1994). Par conséquent, les projets d'utilisation à longs termes, tel que l'installation de grands projets d'irrigations, sont remis en question.

Aujourd'hui, le pays dispose de 98 barrages totalisant un volume régularisé de 2 milliards de m<sup>3</sup>. La production d'eau potable a atteint en 1990 un volume total de 1300 millions de m<sup>3</sup> pour une population de 25 millions d'habitants. C'est assez dire l'important effort consenti par l'Algérie dans le domaine hydraulique, puisque le nombre de barrages est passé de 24 à 98 ouvrages entre 1962 et 1994, et que dans le même temps la capacité régularisée a connu un bond de 554 millions de m<sup>3</sup> à 2 milliards de m<sup>3</sup>. Dix-neuf (19) barrages totalisent un volume régularisé de plus de 1600 millions de m<sup>3</sup>, sont en cours de réalisation ou en voie de lancement et 37 barrages et ouvrages de dérivation sont en cours d'étude à divers stades (volume régularisé) : 2100 millions m<sup>3</sup> (Ministère de l'équipement, 1995).

Les ressources potentielles du pays en eau risquent de s'avérer insuffisantes dès l'horizon 2025 face à la croissance de la population, alors que, les coûts liés à leur mobilisation vont en s'alourdissant. Les potentialités en eau évaluées à 19 milliards, se réduisent à 12,43 milliards de m<sup>3</sup> en termes de ressources réellement mobilisables, en raison des limites techniques et économiques imposées aux possibilités de stockage. (Ministère de l'équipement, 1995).

Un nombre important de ces barrages sont touchés par un envasement accéléré (tableau III.1) ; ce qui se traduit négativement et d'une façon importante sur l'objectif initial à savoir augmenter les potentialités des ressources hydrauliques. Sur les 12,4 milliards de m<sup>3</sup> que totalisent les ressources potentielles en eau de surface, on ne peut en effet, en fonction des barrages installés et envisageables, effectivement récupérer et stocker que 5,7 milliards de m<sup>3</sup>.

**Tableau III.1** Statistiques sur la sédimentation des barrages en exploitation.

N°	Barrage, Période d'exploitation	Surface du B.V(Km <sup>2</sup> )	Capacité sous RN* Crn*(hm <sup>3</sup> )	Apport moyen A <sub>0</sub> (hm <sup>3</sup> )	Capacité résiduelle (hm <sup>3</sup> )	Volume envasé (hm <sup>3</sup> )	Envasement Spécifique q <sub>s</sub> (m <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup> .an)
1	GHRIB (1935-86) 52ans	23,3	278,23	153	165,6	112,6	111
2	DJORF TORBA (1969-86) 18ans	22	350	200	33,6	33,6	85
3	BOUGHZOUL (1934-86) 53ans	20,5	11,7 33*	83	6 20,3	22,3	21
4	BOUHANIFIA (1940-86) 47ans	7	73	137	21,4	21,4	59
5	S.M.B.A (1978-86) 9ans	4,89	235	120	225,6	9,4	213
6	CHEURFAS (en 70 ans)	4,15	18	62	6	12	41
7	K'SOB (1940-86) 51ans	1,31	11,6	50	12,2	12,2	198
8	BAKHADA (1936-86) 51ans	1,3	37,6 50,3*	73	- 45,1*	8,1	122
9	FOUM EL GHERZA (1950-86) 37ans	1,28	47	21	26,5	20,5	433
10	BENI BEHDEL (1940-86) 47ans	1,016	63	74	56,5	6,5	136
11	OUED FODDA (1953-86) 55ans	800	225	94	132,7	92,3	2098
12	IGHIL EMDA (1953-74) 22ans	652	154,8	175	119,9	34,9	2493
13	LA CHEFFIA (1965-86) 22ans	575	175,68	140	168,4	7,3	573
14	ZARDEZAZ (1936-86) 51ans	345	14,9 27*	53	- 20,2*	16,5	938
15	SARNO (1954-74) 21ans	264	22	12	21,3	0,7	234
16	FOUM EL GUEISS (1936-86) 48ans	156	3	12	21,3	0,7	234
17	HAMIZ I (1890-1914) 25ans	139	14,6	54	12,31	2,05	590 moy.690 649
	HAMIZ II (1935-86) 51ans	139	21	54	16,4	4,6	
18	MEFROUCH (1936-86) 24ans	90	16	18	14,6	1,4	648

**Source:** SAIDI (Ministère de l'Équipement)  
**Année:** 1991

- Crn: Capacité à retenue normale.
- RN: Retenue normale
- \* Après surélévation.

La durée de vie moyenne de nos barrages en Algérie est environ de 30 ans (Saidi, 1991). Les mesures curatives telles que le dragage ou la surélévation de la digue ont besoin d'investissements colossaux. La prévention des potentialités hydriques et agricoles constitue une condition au développement économique du pays. Cette préservation passe impérativement par la mise en œuvre d'une politique rationnelle, tenant compte des phénomènes et contraintes naturelles qui caractérisent nos régions.

### 1/- Capolini (1965-1969)

Les travaux de Capolini consistent en une étude géomorphologique régionale sur le bassin versant de l'oued Cheliff et de ces principaux affluents en montrant l'existence d'une relation entre l'érosion et le transport solide et par la suite aboutit aux conclusions suivantes:

- une quantification des débits solides à partir de la lithologie.
- l'existence d'une relation statistique entre l'érosion spécifique et la torrentialité.
- possibilité de cartographie du coefficient de torrentialité( $C_t$ ).

### 2/- Tixeront, 1960

Les recherches de Tixeront in Touaïbia (2000) ont été les premiers a entamé en Algérie. Il a travaillé sur 32 bassins versants algériens et 9 bassins tunisiens.

Il a d'abord procédé à une homogénéisation des données hydroclimatiques pour réévaluer les débits solides des périodes manquantes et étendre les séries courtes sur le même bassin versant et évaluer les données manquantes à d'autres bassins versants. Aussi, il a regroupé les bassins versants en 3 classes suivant un critère régional en tenant compte des précipitations et de leur répartition saisonnière, des facteurs géomorphologiques et lithologiques, du climat et du couvert végétal.

Ces travaux ont montré que:

- la concentration en éléments fins augmente quand le ruissellement diminue;
- la nature de la roche a son importance dans le processus de l'érosion;
- les terrains jeunes fournissent des taux d'abrasion importants;
- la répartition saisonnière des précipitations a son importance;
- le taux d'abrasion le plus fort se situe en Automne.

De plus, selon la lame d'eau précipitée, il a abouti à trois zones d'identification du taux d'abrasion:

- zone où la pluie <300mm ; taux d'abrasion faible;
- zone où 300mm < pluie <700mm ; taux d'abrasion important, érosion très active;
- zone où la pluie > 700mm et qui bénéficie d'un couvert végétal, l'érosion est faible et le taux d'abrasion est inférieur à 350 T/Km<sup>2</sup>. an.

### 3/- Sari, 1977

Sari postule que l'érosion dans les zones marneuses de l'Atlas tellien est due pour l'essentiel à l'agriculture de subsistance des paysans de montagne et se demande comment cette

subsistance peut être garantie à la longue et comment la protection des sols peut être atteinte par le boisement. Il conclut que l'exploitation des sols telle qu'elle se pratique à l'heure actuelle n'est pas compatible avec leur protection. Toutes les mesures préconisées par Sari tendent à la reconstitution de la forêt, sans plus en préciser les exigences.

#### 4/- Demmak, 1982

Selon Demmak (1982) les facteurs déterminants du transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina sont sa lithologie et en particulier la proportion des marnes et d'argiles affleurantes, les précipitations au-delà de certain seuil et la densité du réseau de collecteurs.

#### 5/- O.N.T.F, 1987

Projet d'aménagement du bassin versant de l'oued Mina rentre dans le cadre de la coopération Algéro-Allemande dont l'objectif est doublé:

- définir des méthodes de lutte anti-érosive en vue de la protection du barrage Es-Saada contre l'envasement.

- élaboration d'un schéma d'aménagement pour le développement et l'intégration d'une agriculture de montagne adaptée aux conditions physiques et socio-économiques de la région.

Située dans la partie septentrionale du bassin versant de l'oued Mina, au Nord du village de Oued El Abtal (ex, Uzès-le-Duc), la zone pilote de Tassalet couvre une superficie de 160 km<sup>2</sup> et occupe la position Centre Nord d'un ensemble plus vaste de 950km<sup>2</sup> dénommé par le projet «zone des marnes». La localisation est de 0°40' à 0° 50' de longitude et de 35° 34' de latitude Nord.

La zone pilote de Tassalet est une des deux zones pilotes sélectionnées comme représentative pour le bassin versant de l'oued Mina, la deuxième zone pilote est Medroussa. Elle a été sélectionnée parce qu'elle est représentative des régions de marne tertiaire qui forment le paysage le plus instable de tout le bassin. (O.N.T.F, 1987).

Les caractères lithologiques ont été déterminants dans le choix de la partie Nord du bassin pour la réalisation des études de quantification de l'érosion sur bassins expérimentaux et pour tester un certain nombre de traitements anti-érosifs (Chader et al, 1992).

Le projet Mina a pour buts de développer des mesures adaptées à l'amélioration de la protection des ressources en eau et en sol, ainsi que le développement et le test de mesures anti-érosives. Pour atteindre ces buts, six(06) micro-bassins expérimentaux, situés dans le Nord du bassin versant de l'oued Mina dans une zone de marnes tertiaires, ont été choisis (Fig.2). Dans ces micro-bassins des mesures continues sont effectuées concernant, la pluviographie, le débit, le transport en suspension, ainsi que des paramètres physiques de pédologie, de mécanique du sol, de topographie et d'agriculture (Fig.3).

Les microbassins dans la zone pilote de Taassalet sont fortement productifs de ruissellement pour des averses ponctuelles et fortes qui donnent une grande force érosive. On constate que la

quantité de terre arrachée pendant l'année 1989/1990 (123 T/Ha), année sèche avec une pluviométrie de 109 mm est légèrement supérieure à l'année 1990/1991 (121 T/Ha) où la pluviométrie était importante et atteint une lame 189mm. Cette différence peut être expliquée par la bonne couverture végétale qui a assuré la protection du sol contre l'impact érosive de la pluie, ce qui a permis cette légère diminution de l'érosion.

Les valeurs trouvées de «R» sont très importantes, environ 17 T/Ha.an. Si l'on ne tient compte que de l'index d'érosion «R», la quantité de terre arrachée au sol est estimée à 272000T/an pour la seule zone de Taassalet d'une superficie égale à 160 km<sup>2</sup> (O.N.T.F.,1987).

Les différentes caractéristiques pour la zone des marnes montrent qu'elle n'est pas homogène et par conséquent la zone pilote de Taassalet ne pourrait pas être représentative pour l'ensemble de la région.

•Toujours dans le cadre de l'aménagement intégré du bassin versant de l'oued Mina, une convention a été signée entre l'ex. O.N.T.F de Relizane et l'I.N.E.S d'Agronomie de Chlef, l'étude vise à améliorer la compréhension scientifique de l'érosion hydrique par simulation parcellaire et de mettre au point une méthodologie d'étude et de quantification de l'érosion en zones semi-arides. Il s'agissait également d'étudier l'influence de certains paramètres tels que l'intensité, la pente et la végétation sur l'érosion en nappe. La simulation artificielle pour étudier le phénomène d'érosion hydrique se limite seulement à la mesure de l'érosion en nappe or le bassin versant est caractérisé par différentes formes d'érosion. De même seule les micro-parcelles sont simulées artificiellement or ces dernières sont loin de représenter la variabilité spatiale d'un bassin versant.

La partie simulation a été menée en collaboration avec l'équipe de l'Université de Karlsruhe à l'aide de deux types de simulateurs:

- type O.R.S.T.O.M\* sur parcelle de 1m<sup>2</sup> produit de Deltaleb;

- type I.W.K\* sur parcelle de 100 m<sup>2</sup>.

Dans le même contexte, l'étude de Mahieddine M., 1997 étalée sur trois(03) ans (1990-1992) vise à contribuer à une meilleure compréhension de l'érosion hydrique et en particulier à l'érosion parcellaire en nappe et aboutit à ce que la simulation sur micro-parcelle a tendance à surestimer le ruissellement et par-delà, l'érosion en nappe. Cette étude est arrivée à des résultats d'érosion modérés (1,46 à 3,45t/ha). L'érosion quantifiée aux niveaux des parcelles du bassin versant de l'oued Mina, n'est une menace ni pour les sols en amont, ni pour la durée de vie du barrage en aval.

En effet, à ce rythme et en considérant la concentration moyenne maximale enregistrée 16g/l, ces résultats permettent de raisonner qu'il faudrait près de 14 siècles (1398 ans) pour décaper 20cm de terre soit 0,14 mm/an avec une pluie annuelle de 350mm et un ruissellement de 4% (bilan d'eau du barrage) pour un bassin versant de 500000ha. Dans les mêmes conditions il faudrait plus de trois (03) siècles (318ans) pour envaser le barrage de 237 millions de m<sup>3</sup>.

Il faut relativiser la signification de ces résultats et situer la contribution de l'érosion en nappe dans l'ensemble des phénomènes du transport solide qui arrive au barrage Es-Saada

---

\* O.R.S.T.O.M: Office de Recherche des Sciences Techniques d'Outre-Mer.

\* I.W.K: Institut für Wasserwirtschaft für Karlsruhe (institut d'hydraulique d'Allemagne).

provenant essentiellement du ravinement et des sapements des berges des différents oueds, le ruissellement de pointe quant à lui vient des versants.

### 6/- Arabi, 1991

Arabi in Gomer (1994) confirme que le ruissellement constitue un facteur essentiel pour la détermination du transport solide dans les bassins versants et propose les mesures de protection suivantes:

- stoker les eaux d'écoulement;
- favoriser l'infiltration au maximum;
- végétaliser;
- travailler le sol chaque fois que possible;
- améliorer la structure du sol;
- corriger les ravins.

### 7/- Tabni, 1991

Tabni, 1991 constate, par ses travaux effectués sur le bassin versant de l'Oued Ardjem (Ouarsenis occidental) qu'il existe une relation entre l'instabilité du milieu naturel et les charges solides des cours d'eau. La connaissance de la dynamique des milieux naturels constituant le bassin versant est un préalable à la mise en œuvre d'actions relatives à la conservation et à la gestion des eaux de surface. Il trouve que plus un milieu est instable, moins il y a d'entraves à la morphodynamique et par conséquent sa contribution dans la fourniture des débits liquides et solides est élevée.

Le bassin versant de l'Oued Ardjem, situé dans l'Ouarsenis occidental, a servi de cadre à l'application de l'approche cartographique des déséquilibres du milieu naturel.

Les données de mesure hydrologiques fournies par l'A.N.R.H indiquent une érosion spécifique de 2349 tonnes/Km.an et une concentration moyenne de 18g/l. L'étude hydrotechnique corporation (1968) donne les chiffres suivants: une sédimentation annuelle moyenne de 1,36 Hm<sup>3</sup>/an au site de Sidi Yacoub, soit 1,48% du débit moyen. Ces données placent le bassin versant de l'Ardjem parmi les bassins telliens subissant une dégradation accélérée et appelant des actions de protection des terres en pente situées à l'amont pour limiter l'envasement du barrage de Sidi Yacoub.

Cette première approche du bassin versant de l'Oued Ardjem a fourni un diagnostic de l'état du milieu naturel et de ces principaux composants.

### 8/- Amirèche, 1991

Dans ces travaux sur le bassin versant du barrage des Zardezas (Tell Nord-Constantinois), Amirèche, 1991 trouve que ce bassin présente l'un des plus forts taux de dégradation spécifique. Les facteurs explicatifs de la fragilité du bassin tellien imposent des

mesures plus systématiques de lutte contre l'érosion (D.R.S\*, correction torrentielle ect...). Ces mesures permettent d'atténuer le charriage de quelques 200 à 500 T/Km<sup>2</sup>. an.

### 9/- Saidi, 1991

Saidi, 1991 essaye de dégager une relation entre l'érosion spécifique et quelques facteurs hydroclimatiques d'une part, et de proposer une formule de prévision de l'envasement des retenues d'autre part. Il s'agit des retenues des barrages suivants: Ghrib, Djorf Torba, Boughzoul, Bouhanifia, Sidi M'hamed Benaouda, Cheurfas, K'sob, Bakhadda, Foum El Gueiss, Béni Bahdel, Oued Fodda, Ighil Emda, Foum El Ghersa, Zardezas, Sarno, Hamiz et Meffrouch.

L'analyse est essentiellement axée sur la corrélation multiple du type:

$$qs = f(\text{superficie, apport, pluviométrie}) \quad (\text{I-52})$$

Pour l'ensemble des retenues les relations trouvées sont les suivantes:

$$\begin{aligned} qs &= 4077 s^{-0,43} \\ qs &= 29,8 M_0^{1,2} c_e^{-0,732} \\ qs &= 2,3 M_0^{0,468} p_0^{0,732} \\ qs &= 178 M_0^{0,748} \end{aligned}$$

où :

qs: érosion spécifique exprimée en m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. an;  
s: superficie exprimée en km<sup>2</sup>;  
M<sub>0</sub>: module spécifique exprimé en l/s.km<sup>2</sup>;  
p<sub>0</sub>: pluviométrie moyenne annuelle en mm;  
c<sub>0</sub>: coefficient d'écoulement.

### 10/-Gravilovitch, 1992

Dans le cadre d'une étude générale de la petite et moyenne hydraulique agricole pour la détermination des potentialités globales par zone homogène menée sous l'autorité administrative du Ministère de l'Équipement et du Logement la méthode de Gravilovitch (Touaïbia, 2000) a été utilisée pour la détermination d'un coefficient d'érodibilité des sols et des paramètres de la production du débit solide dans le Nord de l'Algérie, et s'est basée sur:

- la carte d'érosion à échelle 1/200 000 établie par le Bureau national d'études pour le développement rural (B.N.E.D.E.R) en 1979, et qui ne peut à elle seule, quantifier le phénomène de l'érosion actuellement;
- l'utilisation de plusieurs paramètres intervenant dans l'analyse de l'existence du phénomène de l'érosion par rapport à la méthodologie classique utilisée dans l'établissement de la carte de l'érosion;

---

\* D.R.S: Défense et restauration des sols.

- l'utilisation des données satellitaires qui constituent les paramètres les plus fiables à l'heure actuelle de l'utilisation des surfaces dans la région de l'Algérie du Nord.

Cette méthode a permis aux Ingénieurs du bureau d'études de calculer le coefficient d'érodabilité des sols et de dresser une carte pour l'Algérie du Nord afin de pouvoir l'estimer dans n'importe quel bassin versant (Association ENHYD & Energoproject, 1992 in Touaïbia, 2000).

Partant de la valeur du coefficient d'érodabilité des sols, six (06) catégories de destruction des sols ont été établies et sont présentées dans le tableau III.2 avec le débit solide spécifique correspondant.

**Tableau III.2** Intensité du processus d'érosion

Catégorie de destruction	Intensité du processus d'érosion dans le lit et sur le bassin versant	Coefficient d'érodabilité Z	Valeur moyenne du coefficient Z	Débit solide spécifique m <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup> . an
I	Erosion excessive	1,01/1,50 et au delà	1,25	<3000
II	Erosion forte	0,71/1,00	0,85	1500/3000
III	Erosion moyenne	0,41/0,70	0,55	1000/1500
IV	Erosion faible	0,20/0,40	0,30	500/1000
V	Erosion très faible	0,01/0,19	0,10	0/500
VI	Retenues	0,00	0,00	0,00

Source: Association ENHYD & Energoproject, 1992 in Touaïbia, 2000.

### 11/- Meddi, 1992

Meddi in Gomer, 1994 montre qu'on peut déterminer les zones de plus forte ablation de manière satisfaisante par les démarches du type boîte noire, mais dans la discussion des causes de différences dans le taux d'ablation il ne fait que répéter les anciennes positions de Sari(1977) ou Gréco(1966). La méthode qu'il préconise se prête à la délimitation générale des zones fournissant beaucoup ou peu de sédiments en suspension, mais on ne peut en déduire de mesures de protection.

### 12/- Mostefaoui, 1992

Vu la localisation du barrage de Sidi M'hamed Benaouda par rapport à la zone des marnes qui est très productive en sédiments, il a été jugé utile de chercher des sites afin d'implanter des retenues

Les sites sélectionnés pour l'installation d'ouvrages colinéaires pour le stockage de sédiments, sont en nombre de quatre, situés dans la rive gauche de l'oued Mina et de l'oued Haddad qui est caractérisée par une érosion régressive des lits d'oueds et des pentes et d'importants glissements de terrains.

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'effet d'atténuation que peuvent exercer les quatre retenues projetées sur la vitesse d'envasement du barrage de Sidi M'hamed Benaouda. L'implantation des quatre retenues colinéaires projetées dans ce travail entre dans le cadre de l'aménagement pour le but de quantifier le bilan d'érosion et de prolonger la durée de vie du barrage ES-Saada.

Les résultats de l'étude hydrologique ne sont pas assez représentatifs vu l'absence totale de stations hydrométriques dans la zone d'étude et l'utilisation des données des stations avoisinantes disposant de données complètes ou des formules empiriques établies sur la base d'observation sur des grands bassins versants. En plus leur impact sur le ralentissement de l'envasement du barrage est significatif, car au bout de 14 ans de vie, elles auront retenu une quantité d'environ 132000 m<sup>3</sup> de sédiments, qui seront normalement retranchés de la quantité arrivant au barrage. Ces retenues contribueront aussi au développement rural de la région et à la stabilisation de paysans dans leurs terres.

### **13/-Ramdane, 1993**

Selon Ramdane in Gomer(1994) en Algérie la vitesse de comblement des lacs des barrages est nettement corrélée avec la proportion de terrains marneux dans le bassin versant. Selon lui, on peut avoir en théorie recours non seulement à des mesures anti-érosives dans le bassin versant, mais aussi à des mesures d'aménagement et de gestion du barrage-réservoir utilisant des courants de densité pour canaliser les sédiments. Cependant le bilan hydrologique déficitaire empêche d'adopter ces techniques. La protection contre l'érosion est donc prioritaire.

### **14/- Meddi et al, 1994**

Il s'agit ici d'un travail sur le transport solide dans les pays du Maghreb arabe. L'application des différents modèles existants de prévision de la dégradation spécifique donne une différence considérable entre les valeurs mesurées et celles estimées. Ces modèles lient la dégradation spécifique au débit liquide moyen annuel et la superficie, en utilisant les données de barrages algériens, marocains et tunisiens ainsi que les données obtenues au niveau des stations hydrométriques algériennes. Le modèle choisi est basé sur les données de l'ensemble des barrages et celles des stations hydrométriques. Ensuite, le modèle a été testé sur dix stations hydrométriques où les données de la dégradation spécifique sont disponibles. Les résultats trouvés sont satisfaisants. Les erreurs sur l'estimation de la dégradation spécifique, pour les dix stations, sont inférieures à 20%.

Le modèle établi permet de calculer le transport solide, à l'échelle annuelle, en fonction de deux paramètres disponibles au niveau de l'ensemble des bassins versants contrôlés par des stations hydrométriques à savoir: le débit liquide et la superficie. Pour donner plus de signification au modèle, les données (les trois variables) de 18 barrages algériens en exploitation, de 50 stations hydrométriques algériennes, de 11 barrages tunisiens en exploitation et de 16 barrages marocains en exploitation ont été utilisées.

Afin d'établir les relations entre la dégradation spécifique (variable expliqué) et les paramètres explicatifs: le débit moyen annuel et la superficie des bassins versants étudiés, la régression multiple «pas à pas» a été employée.

### 15/- Bourouba, 1997

Bourouba in Touaibia, 2000 a quantifié l'érosion sur trois(03) bassins versants en zone semi-aride, en partant de dix(10) années de mesure de concentrations en éléments fins (1974/1975 à 1984/1985), en Algérie orientale.

L'érosion spécifique est influencée par les caractéristiques pluviométriques et les variations de l'écoulement durant l'été et l'automne d'une part et les caractéristiques morphométriques des bassins versants d'autre part.

L'érosion reste faible sur ces bassins et n'a guère excédé 2T/Ha.an. Par contre une variabilité temporelle très significative est apparue aussi bien d'année en année que de saison en saison. Cette variabilité temporelle a été étudiée par le même auteur en 1996, sur 18 bassins versants, de superficie variant entre 103 et 835 Km<sup>2</sup>, sous différents milieux physico-climatiques et contrôlés par des stations hydrométriques (période 1975/1975 à 1978/1979).

Pour ces années de mesures, l'érosion spécifique moyenne a varié annuellement de 0,36 à 76,19T/Ha. Cette importante variation est fortement influencée par la lithologie des sols et de la couverture végétale. Il y a lieu de constater que quatre(04) années de mesures restent trop insuffisantes pour en généraliser une conclusion conséquente.

### 16/-Kouri et al, 1997

Kouri in Touaibia (2000) en étudiant l'évolution des ravins du Tassalet a établi par une analyse statistique une typologie de cinq (05) types de ravins en fonction de la lithologie, de la pente, de l'exposition, de la morphologie des ravins et de la mise en valeur des bassins versants respectifs.

Il estime de 0,5 T/Ha.an, l'érosion spécifique diffuse sur sol nu. Elle est encore plus faible sous cultures (0,1 à 0,6 T/Ha.an). Cette érosion diffuse représente entre 1 et 5% du transport solide observé à l'exutoire des petits bassins versants.

L'ablation de terre due à l'allongement des ravins est de l'ordre de 3 à 4,6 T/Ha.an, représentant 15 à 24% de la charge solide en suspension.

Les glissements pelliculaires sur les parois des ravins fournissent 25 à 79%de la charge solide en suspension.

L'érosion des fonds des lits à concavité très élevée atteint des proportions allant de 25 à 40% des pertes de terre.

### 17/- Touaibia, 2000

Dans ses travaux de recherche sur l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Mina, Touaibia (2000) quantifie l'érosion à différentes échelles spatiales. Les résultats trouvés sont présentés dans le tableau III.3:

**Tableau III.3.** Quantification de l'érosion à différentes échelles spatiales

Echelle spatiale	Erosion spécifique	Forme d'érosion
Parcelle Wischmeier	0,12 à 1,09 T/Ha.an	En nappe: négligeable
Mini Simulation de pluie (1 m <sup>2</sup> )	9 à 1407 g/m <sup>2</sup> . h	En nappe: faible
Simulation géante (87 m <sup>2</sup> )	0,1 à 184 g/m <sup>2</sup> . h	En nappe, en rigole: faible
Micro-bassins expérimentaux	12,38 à 48,72 T/Ha.an	Toute forme d'érosion: appréciable et dangereuse
Retenues collinaires	23,74 T/Ha.an	Toute forme d'érosion: appréciable
Stations hydrométriques(Oued El Abtal et Sidi A.E.K Djillali)	2,12 à 3 T/Ha	Toute forme d'érosion: faible
Barrage S.M.B.A:		
•D'après la bathymétrie 1986	3,27 T/Ha.an	Toute forme d'érosion, faible
•D'après les deux stations hydrométriques	7,10 T/Ha.an	Toute forme d'érosion, non négligeable
•D'après les micro-bassins	21,5 T/Ha.an	Toute forme d'érosion, dangereuse et barrage menacé

- Parcelle de type Wischmeier (érosion obtenue par calculs) :

L'index d'érosion calculé sur la base de dépouillement de 902 pluies enregistrées à 7 pluviogrammes sur deux années consécutives: 1989/90 et 1990/91 est estimé à 16,53 m.t.m/Ha.h.

L'application de l'équation universelle de perte de sol a donné une érosion variant de 0,12 à 1,09 T/Ha Ce qui reste évidemment négligeable.

- Parcelle de 1m<sup>2</sup> :

L'érosion quantifiée sur 10 parcelles expérimentales de trois(03) micro-bassins expérimentaux varie de 9 à 2805g/m<sup>2</sup>. h pour une durée de ruissellement de 1h et pour des intensités de pluie artificielles dépassant 24mm/h, ce qui n'est guère négligeable.

- Parcelles géantes (87m<sup>2</sup>) :

L'érosion quantifiée varie de 0,1 à 184g/m<sup>2</sup>. h pour une durée de ruissellement de 1h.

- Les micro-bassins expérimentaux :

L'érosion quantifiée pour les six(06) micro-bassins varie de 12,38 à 48,72 T/Ha.an avec des coefficients de ruissellement respectifs de 8,5% et 22,38% pour la seule année 1989/90.

Calculée sur les trois (03) années successives (1989/90, 1990/91 et 1991/92), l'érosion spécifique estimée est de 21,50 T/Ha.an, ce qui est important.

- Les retenues collinaires :

Pour les quatre sites d'implantation de retenues, l'érosion estimée par la formule de Tixeront (vu l'absence de données) d'une valeur de 23,74 T/Ha.an a permis de calculer non seulement la tranche morte de ces retenues mais aussi la durée de leur envasement.

- Les deux stations hydrométriques :

L'érosion moyenne inter-annuelle estimée au droit des stations, à partir de 22 années d'observations de concentrations en éléments fins, s'évalue à de 3 T/Ha.an à la station de Sidi A.E.K Djillali et de 2,12 T/Ha.an à la station de Oued El Abtal. Ce qui reste très négligeable.

Cette valeur moyenne de l'érosion n'est nullement significative en tant que telle, mais sa variabilité temporelle est très appréciable aussi bien au cours de l'année qu'inter-annuelle.

- Le barrage de Sidi M'hamed Benaouda :

Selon les données bathymétriques de 1986, l'érosion estimée au droit du barrage est de 3,27 T/Ha.an, ce qui reste faible.

# **Chapitre II : Le bassin versant de Oued Sly**

---

## II.1 Situation Géographique :

Le bassin versant de oued sly est situé dans le massif de l'Ouarsenis qui appartient à l'atlas tellien constitue un important chaînon montagneux compris entre la plaine du Cheliff au nord et la parallèle de Tiaret au sud, il présente des ensembles naturels très variés (Figure II-1).

C'est un sous bassin du moyen Cheliff. Son point culminant est à 1600m par contre le plus bas est 160m d'altitude, limité par :

- au nord par oued Cheliff ;
- au sud par le bassin versant de Teguiquest et Nahr Oussel ;
- à l'est par le bassin versant d'oued fodda ;
- à l'ouest par le bassin versant d'oued Rhiou.

Oued Sly est parmi les plus grands affluents de Cheliff, il est alimenté à son tour par une série d'affluents dont les plus importants sont : Oued Lardjem, Oued-Mellah, Oued Lag, et oued-Djouza (Figure II-2).

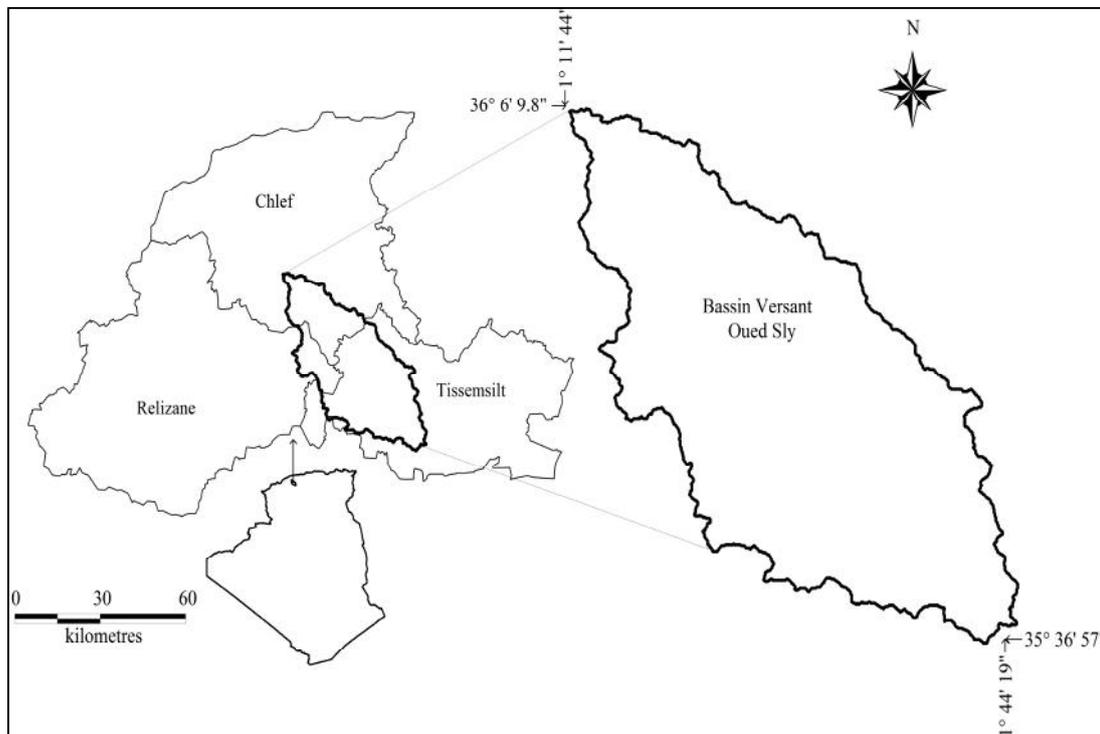


Figure II-1: Situation du bassin de Oued Sly

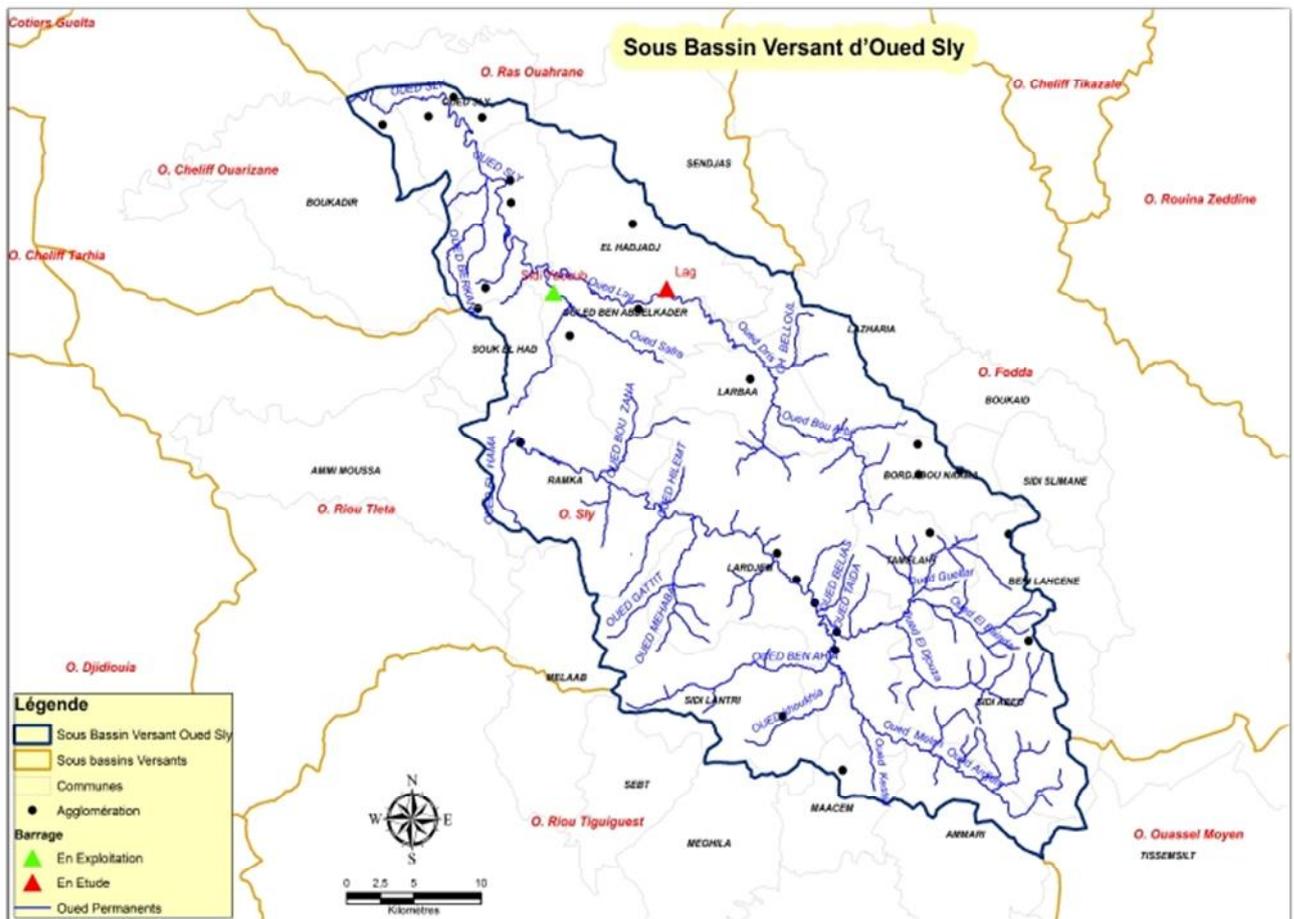


Figure II-2: Présentation du bassin de Oued Sly

## II.2 L'étude géologique de la région :

La géologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grès, calcaires, dolomies,...). La nature des affleurements a une influence sur l'hydrologie de surface et le type du dépôt alluvionnaire (A. Bouanani, 2004).

L'étude géologique de la région nous permet de déterminer la structure du sol du bassin versant d'Oued Sly, de savoir son degré d'érodabilité et de la classer selon sa plus ou moins grande perméabilité.

Le bassin versant de Oued Sly est caractérisé par différents faciès de tous âges dont les plus répandues sont les marnes et les calcaire de crétacé.

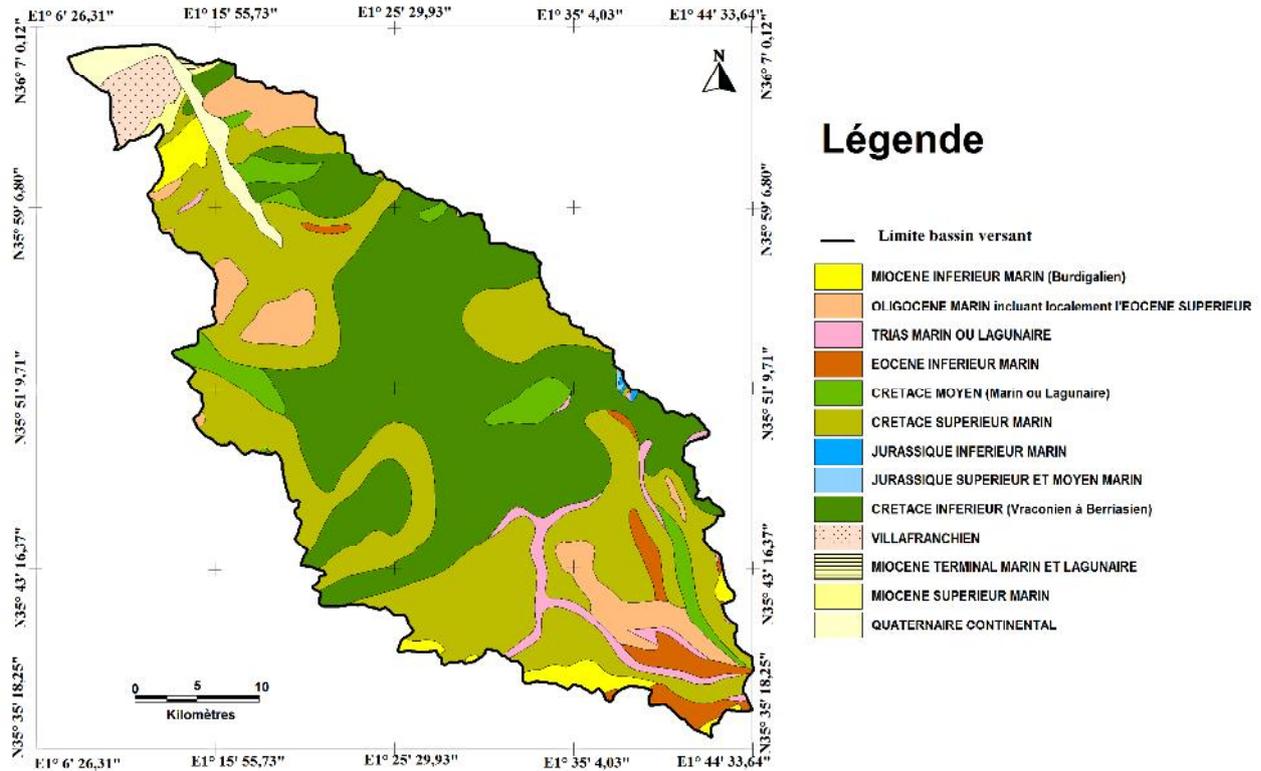


Figure II-3: La carte géologique du bassin versant d'Oued Sly

### II.3 Le Couvert végétal:

Le couvert végétal est en particulier les forêts et les cultures viennent ajouter leurs influences à celle de la nature géologique des terrains pour conditionner la rapidité du ruissellement superficiel et le taux d'évaporation, C'est un facteur d'influence sur l'équilibre hydrologique du bassin. Dans le bassin versant de Oued Sly, les forêts sont disposées dans la partie montagneuse et occupent la moitié de la surface, mais dans la partie basse, les forêts occupent 4/5 de la surface, les terrains dénudés sont peu mais sont reliés aux terres labourées à cause de l'avancement de la nappe.

La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense. Cette influence de la forêt sur le régime des eaux en domaine méditerranéen a un rôle considérable (A. Bouanani, 2004).

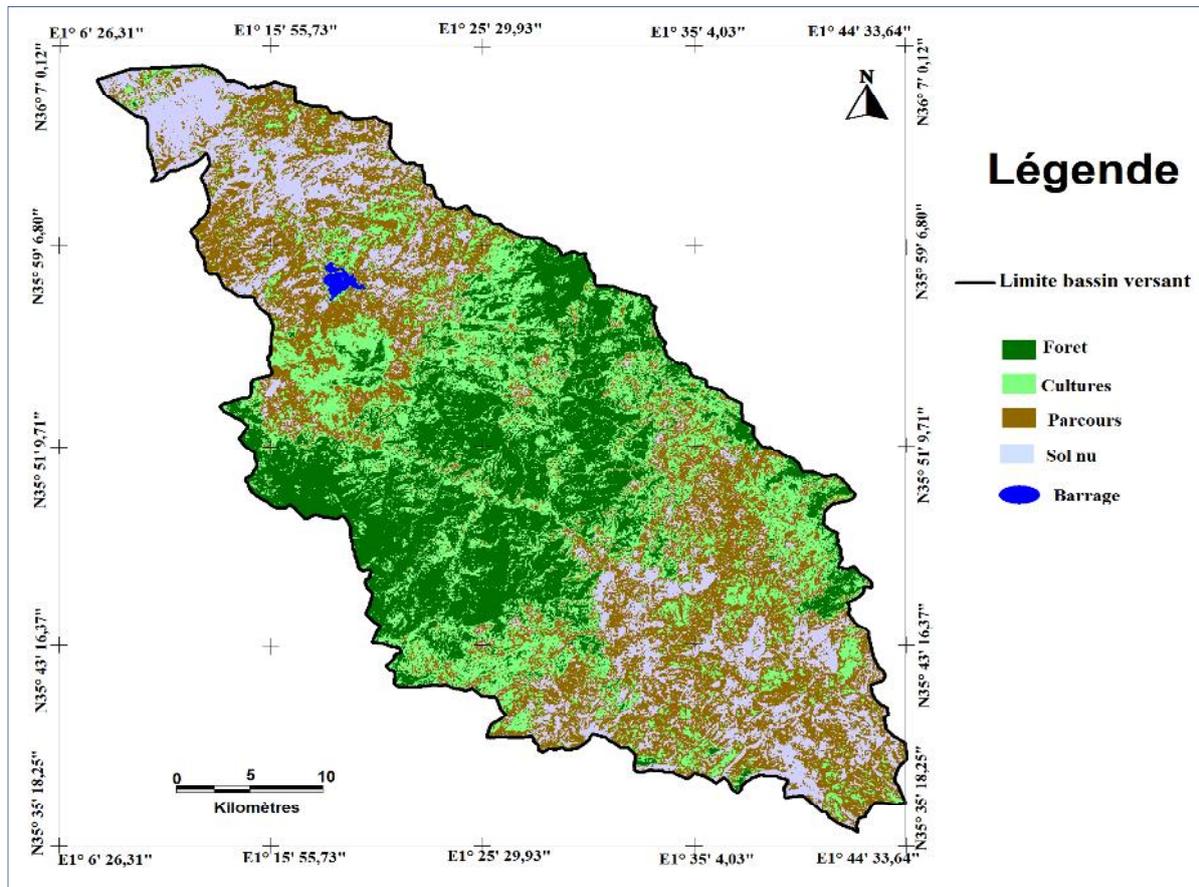


Figure II-4: La carte de végétation du bassin versant d'Oued Sly

## II.4 Caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant

### II.4.1 La forme du bassin :

La forme du bassin est la configuration géométrique telle qu'elle est projetée sur un plan horizontal. Elle influence directement le temps de réponse du bassin, c'est-à-dire le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent, le type des hydrogrammes.

La forme d'un bassin versant a une influence certaine sur l'écoulement, elle détermine dans une certaine mesure, l'allure de l'hydrogramme de crue «Un bassin très allongé, ne réagira pas, toutes choses égales d'ailleurs de la même manière qu'un bassin de forme très ramassée» (Roche M., 1963).

Elle peut être mesurée par un coefficient appelé : indice de compacité ou indice de Gravelius, ou coefficient de forme notée: «Kc»

Il se définit comme étant le rapport du périmètre du bassin versant considéré à celui d'un cercle ayant même surface.

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi.S}} \quad \text{(II-1)}$$

Avec:

- K<sub>c</sub>: Indice de compacité;
- P: périmètre du bassin (m);
- S: Surface du bassin (Km<sup>2</sup>).

Cet indice de compacité est égal à 1 pour un bassin circulaire et croit d'autant plus que la compacité diminue.

Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau (II.1).

**Tableau (II.1) : Indice de compacité**

Bassin versant	Superficie A (Km <sup>2</sup> )	Périmètre P (Km)	Indice de compacité K <sub>c</sub>
Oued-sly	1335	193	1,48

K<sub>c</sub>>1, donc notre bassin versant est de forme allongé.

#### II.4.1.1 Rectangle équivalent :

Afin de pouvoir comparer le comportement hydraulique de deux bassins on utilise la notion du rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius. Il s'agit d'une transformation purement géométrique en vertu de laquelle on assimile le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même superficie. De façon, que les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle, et l'exutoire est l'un de ces petits côtés.

$$L_r = \sqrt{A} \cdot \frac{K_c}{1.128} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right] \quad \text{(II-2)}$$

Avec:

- L<sub>r</sub> : Longueur du rectangle équivalent en (Km) ;
- A : Superficie du bassin versant en (Km<sup>2</sup>) ;
- L<sub>r</sub> = 78,97 Km l = 16,90 Km (l : Largeur du rectangle équivalent) ;
- K<sub>c</sub> : indice de compacité.

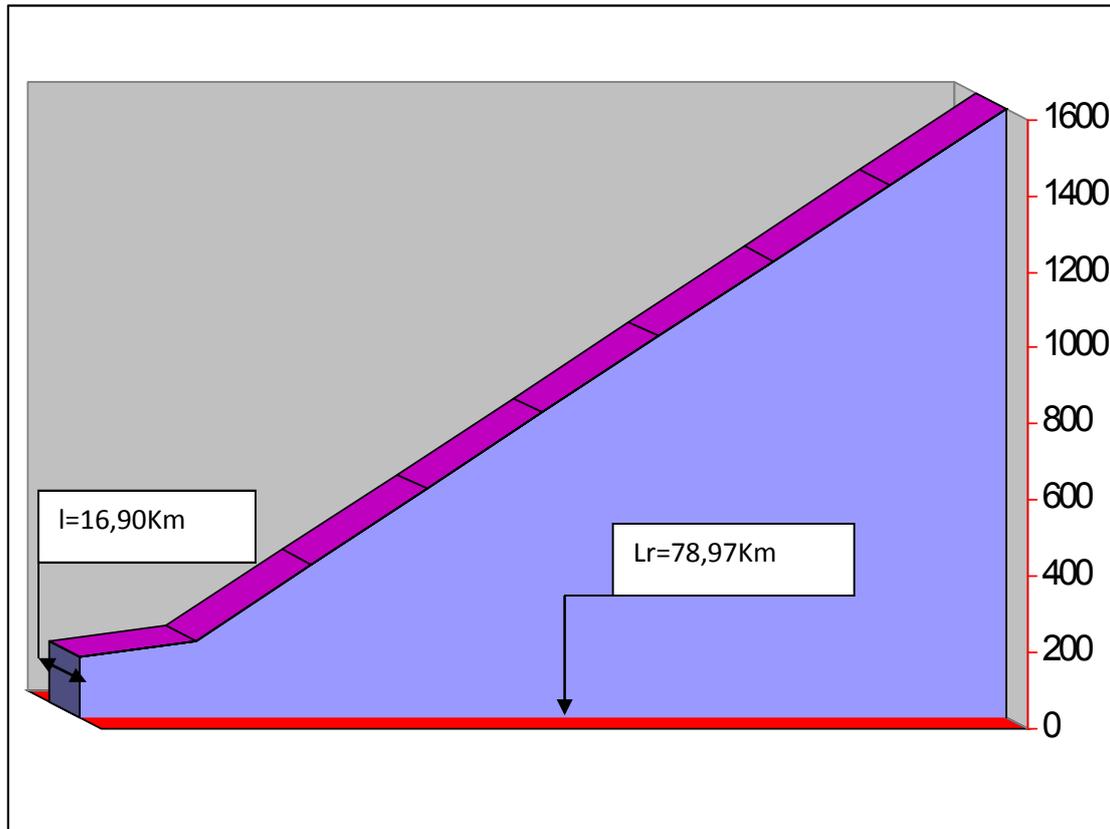


Figure II-4: Rectangle équivalent du bassin de Oued Sly

#### II.4.1.2 Orientation :

Par orientation d'un bassin, il faut entendre sa direction géographique suivant la résultante de la pente générale.

Ce paramètre est très important dans l'étude du nombre d'heures où le bassin est ensoleillé; ce nombre est le facteur principal dans le calcul de l'évapotranspiration. Dans l'hémisphère Nord une orientation Sud – Nord indique, en général, que la fonte commence dans la partie haute du bassin et qu'elle peut engendrer des problèmes d'embâcles et d'inondations. Le bassin versant d'oued sly est orienté vers le Nord-Ouest.

#### II.4.2 le relief du bassin:

L'importance de l'étude de relief est de caractériser la répartition altimétrique de la courbe hypsométrique résidant au niveau du régime d'écoulement des eaux, car le relief peut modifier la répartition entre l'infiltration et les eaux, a une forte influence sur l'hydro gramme une forte pente provoque un écoulement plus rapide donc un temps de concentration plus court, d'où une montée plus rapide de crues.

II.4.2.1 Courbe hypsométrique (méthode altimétrique):

La courbe hypsométrique donne la répartition des altitudes en fonction des pourcentages cumulés des superficies, elle est obtenue par planimétrage des surfaces partielles comprises entre deux courbes de niveau consécutives.

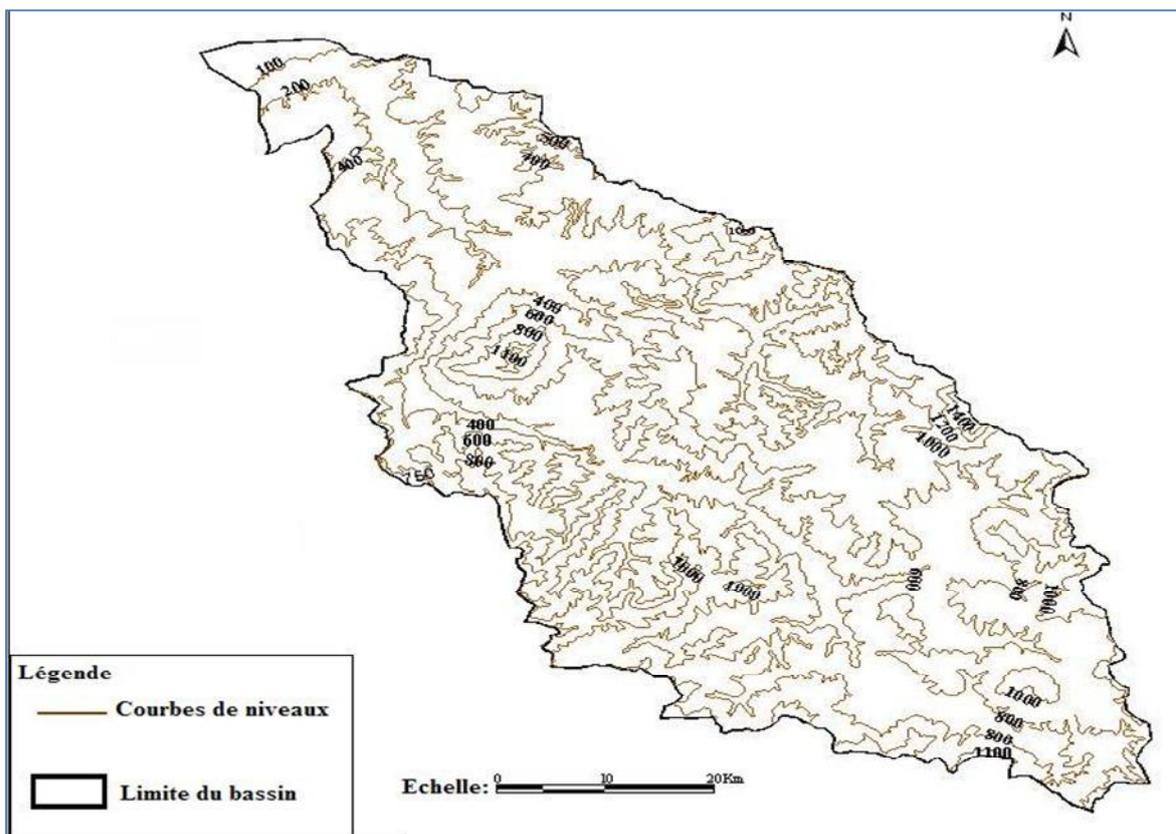


Figure II-5: Carte topographique du bassin versant de Oued-Sly (Source: A.B.H)

Tableau (II.2) : répartition altimétrique du bassin versant d'Oued Sly

Classe des altitudes	Surface Partielle (Km <sup>2</sup> )	Pourcentage des surfaces partielles (%)	Surface Cumulée (Km <sup>2</sup> )	Pourcentage des Surfaces Cumulées (%)
1600-1400	1,60	0,12	1,60	0,12
1400-1200	3,60	0,27	5,20	0,39
1200-1000	50,00	3,75	55,20	4,14
1000-800	374,40	28,04	429,60	32,18
800-600	417,20	31,25	846,80	63,43
600-400	253,00	18,95	1099,80	82,38
400-200	183,20	13,72	1283,00	96,10
200-160	52,00	3,90	1335,00	100,00

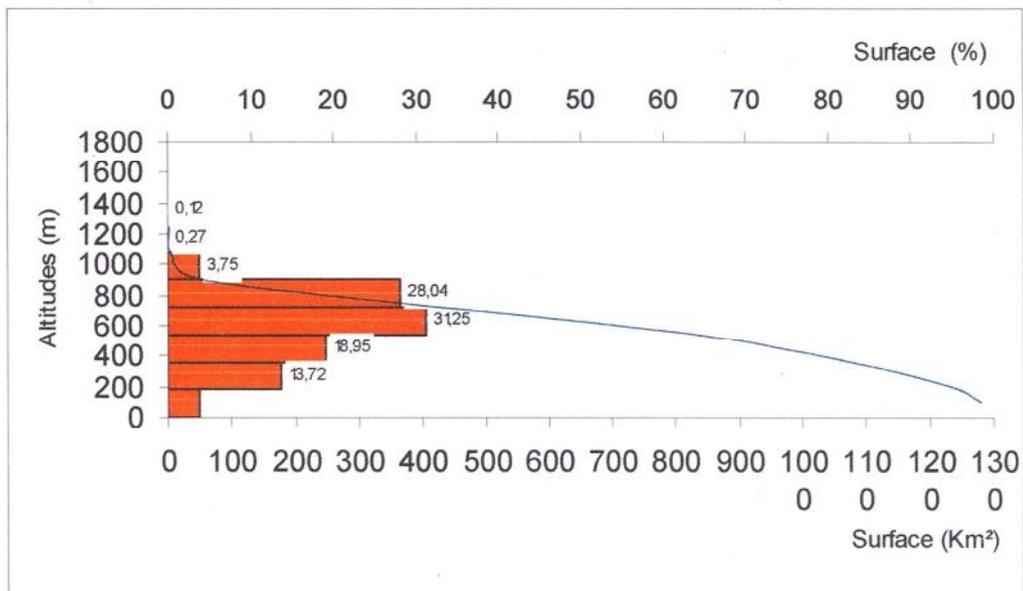


Figure II-6: courbe hypsométrique et répartition altimétrique

#### II.4.2.2 Indice de pente (Roche) $I_p$ :

A partir du rectangle équivalent, M. Roche a introduit la notion d'indice de pente qui exprime la pente moyenne à l'échelle du bassin.

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \sqrt{B_i(a_{i-1} - a_i)} \right] \quad (\text{II-3})$$

Avec:

- Bi: fraction en % de la surface totale du bassin comprise entre les côtés  $a_{i-1}$  et  $a_i$ ;
- L: longueur du rectangle équivalent.

#### II.4.2.3 Indice de pente globale $I_g$ :

Pour l'indice de pente global  $I_g$  qui présente la pente moyenne de 90% de la surface du bassin. Il est obtenu à partir de la courbe hypsométrique à l'aide de l'expression suivante :

$$I_g = (H_{5\%} - H_{95\%})/L_r \quad (\text{II-4})$$

$H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin.

La dénivelée D est donc égale à :

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \quad (\text{II.5})$$

#### II.4.2.4 La dénivelée spécifique:

La dénivelée spécifique  $D_s$  apparaît comme une correction de la dénivelée simple par application, d'un coefficient qui ne dépend que de la forme du bassin.

La dénivelée spécifique  $D_s$  sert à comparer les indices de pentes des bassins de superficies différentes.

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} \quad (\text{II-6})$$

On va classer notre bassin versant selon la dénivelée spécifique (Classification de l'O.R.S.T.O.M)

**Tableau N° (II.3): Classification de l'O.R.S.T.O.M**

Classification	Type de relief	$D_s$ (m)
R <sub>1</sub>	Relief très faible	$D_s < 10$
R <sub>2</sub>	Relief faible	$10 < D_s < 25$
R <sub>3</sub>	Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
R <sub>4</sub>	Relief modéré	$50 < D_s < 100$
R <sub>5</sub>	Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
R <sub>6</sub>	Relief fort	$250 < D_s < 500$
R <sub>7</sub>	Relief très fort	$D_s > 500$

#### II.4.2.5 Altitude moyenne :

Le calcul de l'altitude moyenne est nécessaire du fait que cette valeur pourra être utilisée ultérieurement pour le calcul de la lame d'eau précipitée.

L'altitude moyenne s'obtient par la formule suivante :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot h_{i,\text{moy}}}{S} \quad (\text{II-7})$$

Avec:

$S_i$ : Surface comprise entre deux courbes de niveau successives;

$h_{i,\text{moy}}$  : altitude moyenne entre ces deux courbes de niveau.

**Tableau (II.4) : la répartition des moyennes altimétriques.**

Classe des altitudes	Hi (m)	Ai (Km <sup>2</sup> )	Ai Hi (Km <sup>2</sup> .m)
1600-1400	1500	1,60	2400
1400-1200	1300	3,60	4680
1200-1000	1150	50,00	57500
1000-800	900	374,00	336600
800-600	700	417,20	292040
600-400	500	253,00	126500
400-200	300	183,20	54960
200-160	180	52,00	9360
			$\Sigma = 884040$

**Tableau (II.5): les altitudes du bassin versant d'Oued sly**

Bassin	Altitude moyenne(m)	Altitude maximale(m)	Altitude minimale (m)
Oued sly	660,33	1600	160

#### II.4.2.6 La pente moyenne :

Elle se calcule selon la formule suivante :

$$I_m = \frac{\Delta H(0,5.l_1 + l_2 + l_3 + \dots + 0,5.l_n)}{S} \quad \text{(II-8)}$$

$\Delta H$  : Dénivelée entre les courbes de niveau (m) ;

$L_i$  : Longueur des courbes de niveau (m) ;

S : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

#### II.4.3 Le réseau hydrographique du bassin versant :

Dans l'étude morphométrique d'un bassin versant c'est à dire sa forme et sa structure il est nécessaire d'étudier certains paramètres tels que la densité de drainage, coefficient de sinuosité et le profil en long des affluents qui permettent de déterminer le régime hydrologique.

#### II.4.3.1 Densité de drainage :

Elle renseigne sur l'importance du mode de drainage du bassin et son aptitude au ruissellement superficiel. Elle s'obtient en rapportant la somme des longueurs de tous les cours d'eau d'ordre «i » à la surface totale du bassin versant, soit:

$$D_d = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S} \quad [\text{Km}/\text{Km}^2] \quad (\text{II-9})$$

Avec :

$D_d$  : densité de drainage totale [ $\text{km} / \text{km}^2$ ] ;

$L$  : la longueur totale de cours d'eau [ km ] ;

$A$  : superficie du bassin versant [ $\text{km}^2$ ] .

La méthode utilisée pour ranger tous les cours d'eau du réseau d'écoulement par ordre de grandeur et d'en déduire le cours d'eau principal est celle de Schumm. La théorie de classification énoncée par Schumm, est la suivante: « Est d'ordre X+1, tout tronçon de rivière formée par la réunion de deux cours d'eau d'ordre X».

#### II.4.3.2 Coefficient de torrentialité :

C'est un coefficient qui tient compte du nombre de talwegs élémentaires et de la densité de drainage. Il mis en évidence le caractère torrentiel d'un chevelu hydrographique, soit:

$$C_t = F_1 \cdot D_d \quad (\text{II-10})$$

$$\text{et } F_1 = \frac{N_1}{S} \quad (\text{II-11})$$

Avec:

$N_1$ : nombre de cours d'eau d'ordre 1;

$S$ : Surface totale du bassin versant ( $\text{Km}^2$ );

$F_1$ : Densité des thalwegs les plus petits.

#### II.4.3.3 Temps de concentration « $T_C$ »

C'est le temps que met une particule depuis la partie la plus éloignée jusqu'à l'exutoire, il est souvent calculé, pour les bassins de l'Algérie du Nord, par la formule de Giandotti:

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L_{CP}}{0,8\sqrt{(H_{moy} - H_{min})}} \quad (II-12)$$

Avec:

- $L_{CP}$ : longueur du cours d'eau principal (Km);
- $H_{moy}$ : altitude moyenne du bassin versant (m);
- $H_{min}$ : altitude minimale du bassin versant (m);
- S: Surface totale du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

#### II.4.3.4 Vitesse de propagation des eaux :

C'est la vitesse de progression des eaux, dans le parcours du cours d'eau principal, pour arriver à l'exutoire. Elle est obtenue en rapportant la longueur du cours d'eau principal au temps de concentration des eaux dans le bassin versant, soit:

$$V_p = L_{CP} / T_c \text{ (m/s)} \quad (II-13)$$

Avec:

- $L_{CP}$ : longueur du cours d'eau principal (Km);
- $T_c$ : temps de concentration (heure).

#### II.4.3.5 Coefficient de sinuosité :

Le coefficient de sinuosité ( $K_s$ ) est défini comme étant la distance mesurée de l'exutoire à la source sur la distance réelle du talweg principal.

$$K_s = \frac{L_d}{L} \quad (II-14)$$

Avec :

- $K_s$  : coefficient de sinuosité ;
- L : longueur du talweg principal (L= 79Km);
- $L_d$  : Distance mesurée de l'exutoire à la source à la règle ( $L_d = 63\text{Km}$ ).
- $K_s = 0.79$

#### II.4.3.6 Profil en long:

L'étude du profil en long mis en évidence le changement de pentes le long du cours d'eau et par la suite elle permet d'apporter des éléments complémentaires à la densité de drainage au vu du rôle déterminant des pentes des talwegs sur le ruissellement superficiel et surtout sur les

vitesse d'écoulement lors des crues. La courbe est en fonction du cumulé des longueurs du cours d'eau principal et les altitudes

Les données pour tracer le profil en long d'Oued Sly sont reportées sur le tableau (II.6)

Tableau (II.6): Paramètres de calcul du profil en long

		Altitude	Distance (Km)	Dénivelée (m)	Pente
Oued principal	Sly et L'ardjem	1000-800	05	200	40
		800-600	28	200	7.14
		600-400	42	200	4.16
		400-200	57	200	3.50
		200-160	80	40	0.50
Oueds secondaires	lag	800-600	13.5	200	14.81
		600-400	25	200	08
		400-200	41	200	04.88
	Mellah	1000-800	08.7	200	22.98
		800-600	19.40	200	10.30
		600-400	28	200	07.14

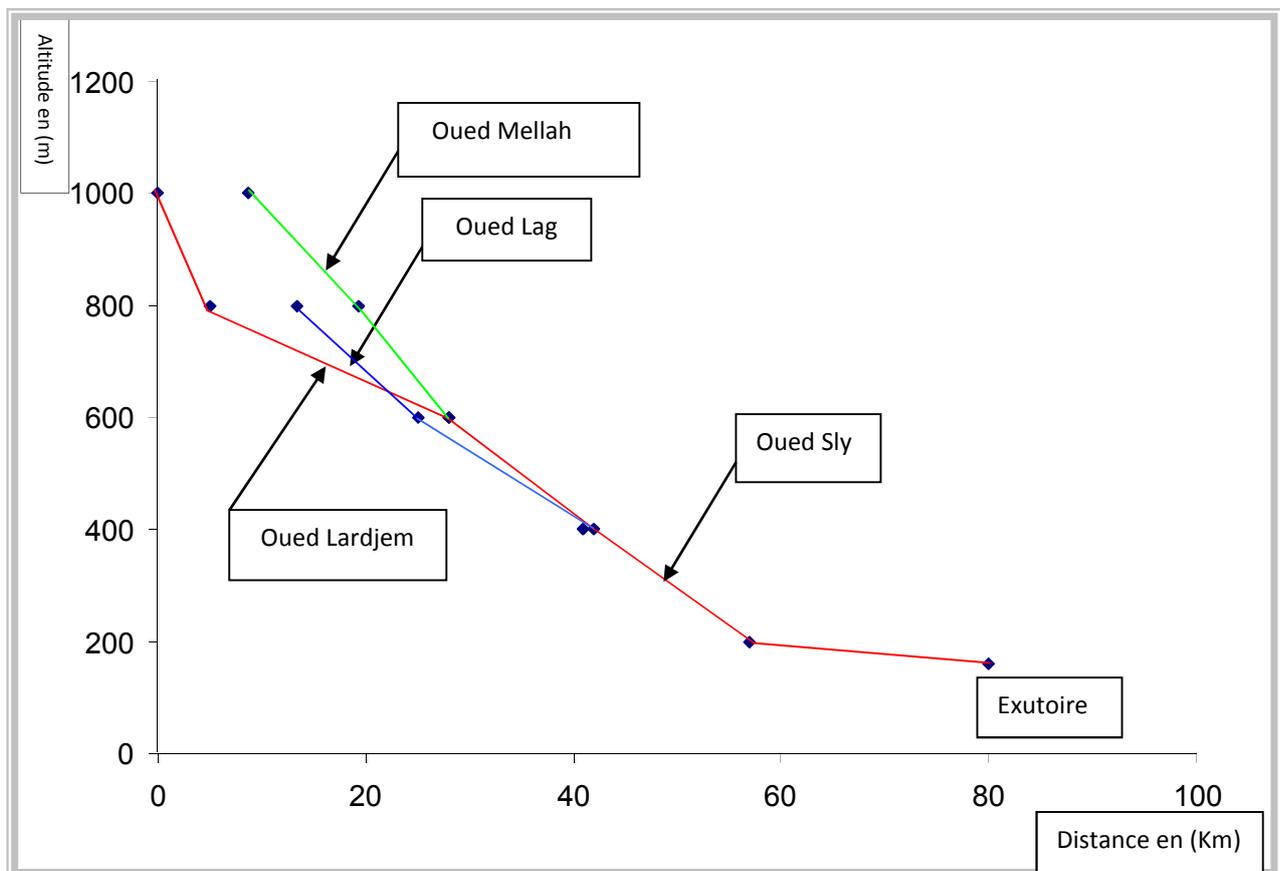


Figure II-7: profil en long de Oued Sly et ses Affluents

Tableau (II.7): Caractéristiques hydro-morphométriques du bassin versant

	Désignation	Symbole	Unité	Valeur
Caractéristiques de forme	Superficie	S	km <sup>2</sup>	1335
	Périmètre	P	km	193
	Indice de compacité	K <sub>c</sub>	/	1.48
	Longueur du Rec. Eq.	L <sub>R</sub>	Km	78.97
	Largeur du Rec. Eq.	L <sub>T</sub>	km	16.90
Caractéristiques topographiques	Altitude moyenne	H <sub>moy.</sub>	M	660.33
	Altitude minimale	H <sub>min.</sub>	M	160
	Altitude maximale	H <sub>max.</sub>	M	1600
	Indice de pente globale	I <sub>g</sub>	%	9.62
	Pente moyenne	I <sub>m</sub>	%	14.17
	Dénivelée spécifique	D <sub>s</sub>	m	351.49
	Indice de pente de Roche	I <sub>p</sub>	%	0.4
Caractéristiques hydrographiques	Densité de drainage	D <sub>d</sub>	km/km <sup>2</sup>	2.89
	Coefficient de torrentialité	C <sub>t</sub>	/	0.58
	Vitesse de propagation des eaux	V <sub>p</sub>	m/s	5.36
	Coefficient de sinuosité	K <sub>s</sub>	/	0.79
	Temps de concentration	T <sub>c</sub>	heures	14.92

### Conclusion :

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes et des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles au dépend de l'infiltration (A. Bouanani, 2004).

Les principaux paramètres physiques analysés au cours de ce chapitre permettent de conclure :

- Le bassin est sensible aux processus d'érosion. Cette sensibilité s'explique par la lithologie d'abord, les faciès marneux surtout et enfin les pentes (A. Benkhaled, 2005) ;
- La valeur de l'indice de compacité  $K_c$ , indiquant la forme allongée du bassin et impliquant un temps de concentration lent ;
- L'indice de pente globale caractérisant l'influence de la pente sur le régime hydrologique du bassin ;
- La dénivelée spécifique montrant que le bassin versant est caractérisé par un relief fort ;
- La densité de drainage renseignant sur l'importance du drainage du bassin et son aptitude au ruissellement superficiel.

# **Chapitre III : Climat et hydrologie du bassin versant d'Oued Sly**

---

### III.1 Conditions climatiques et hydrologiques :

Plus encore que les facteurs morphologiques et lithologiques, les conditions climatiques du bassin versant ont un rôle déterminant du comportement du régime d'un cours d'eau, les précipitations qui sont de loin les plus importantes agissent directement dans l'alimentation pluviale de l'écoulement qui constituent le facteur essentiel de l'érosion du sol.

Le bassin versant d'Oued Sly situé dans la zone de l'Atlas Tellien est caractérisé par un climat méditerranéen en général avec une saison froide et pluvieuse en hiver et une saison chaude et sèche et ensoleillée en été.

#### III.1.1 Evapotranspiration :

L'évapotranspiration représente l'action conjuguée de l'évaporation du sol et de la transpiration de la plante; c'est la restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre, quel que soit sa nature (sols, végétaux, eaux libres), c'est un paramètre clés dans la détermination des besoins en eaux des cultures et de l'évaluation des ressources en eau.

Les données des évapotranspirations inscrites ci-dessus (tableau III.1) sont relevés à partir des cartes des évapotranspirations mensuelle et annuelle éditées par les services de l'agence nationale des ressources hydrauliques, ces cartes montrent que l'évapotranspiration se positionne en parfaite opposition à celle de la pluviométrie, elle est de l'ordre de 1500 mm, avec un maximum de 237 mm au mois de juillet, et un minimum de 37 mm au mois de décembre.

**Tableau (III.1) : Evapotranspiration potentielles moyennes mensuelles**

station	Janv	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Annuel (mm)
Chlef O.N.M	42	57	95	130	174	207	237	217	153	98	52	37	1499

Source : O.N.M de Chlef

#### III.1.2 Les vents :

Le vent assure le remplacement de l'air plus ou moins saturé au contact de la surface évaporante par des nouvelles couches ayant une température et une humidité généralement plus faible, il favorise donc l'évaporation d'autant plus que sa vitesse et sa turbulence est grande.

Les moyennes de la vitesse du vent relevées en trois heures différentes de la journée, en Km/heure, par P. Seltzer en 1938 à la station de Chlef est données par le tableau (III.2) Notons que les vents qui prédominent dans la région sont du nord-ouest.

**Tableau (III.2): la vitesse du vent**

<b>Vent (Km/h)</b>	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	jui	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy
7h	41	29	31	34	30	38	35	26	23	28	36	40	33.3
13h	37	35	35	38	32	31	34	30	28	36	32	37	34
18h	30	29	26	31	25	22	18	18	20	27	27	29	25

Source : O.N.M de Chlef

### **III.1.3 Température:**

La température est un des éléments fondamentaux dans l'établissement du bilan hydrologique et dans la détermination du caractère climatique d'une région et aussi un facteur nécessaire à l'apport de l'énergie pour les plantes. Les données existantes (1990-2009) sont celles de l'office national de météorologie, voir tableau (III.3).

**Tableau (III.3): températures moyennes mensuelles.**

Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Annuel
Chlef ONM	9.4	10.7	12.9	15.4	20.1	24	28.9	29.4	25.4	19.8	13.8	10.1	18.33

Source : O.N.M de Chlef

Les grandes oscillations mensuelles durant les mois les plus froids s'accompagnent d'importants phénomènes tels que les baisses brutales de températures, entraînant des épisodes pluvieux générateurs de crues qui agissent directement sur l'écoulement fluvial, l'érosion et le transport solide. De même, les effets de la saison chaude ne sont pas sans conséquences, ainsi la stagnation des masses d'air anticycloniques provoque souvent un déficit pluviométrique et une forte évapotranspiration (A. Bouannani, 2004).

### **III.1.4 Pluviométrie:**

Sur un bassin versant, les précipitations regroupent toutes les eaux météorologiques sous forme liquide ou solide (neige, grêle, pluie...).

Notons que la pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs (P.Seltzer, 1913-1947, H.Gaussen, 1918-1947, G.Medinger, 1913-1953, M.Chaumant et C.Paquin 1913-1963) et par l'A.N.R.H, 1993. Ces études montrent qu'en général la pluviométrie augmente de l'Ouest à Est et du Sud au Nord; les chaînes de l'Atlas Tellien littoral et Sud Tellien (Ouest Est) sont les plus arrosées parce qu'elles présentent un obstacle devant les masses d'air humide.

**III.2 Equipement du bassin :**

Le bassin est équipé de Sept postes pluviométriques (Ouled Ben A.E.K, Souk El Had, Ain Lellou, Bordj Bounaama, Oued Sly, Sid Yacoub et Saadia). Les caractéristiques de ces postes sont données dans le tableau (III.4).

**Tableau (III.4) : Caractéristiques des différents postes pluviométriques du bassin versant**

N°	Poste pluviométrique	Code A.N.R.H	Année de mise en service	Coordonnées		
				X (m)	Y (m)	Z (m)
1	Oued sly	012309	1925	365,20	312,70	95
2	Ouled Ben A.E.K	012308	1967	373,40	302,85	240
3	Souk El Had	012304	1959	395,85	272,70	550
4	Ain Lellou	012307	1964	397,40	293,60	900
5	Bordj Bounaama	012306	1972	402,6	284,10	1050
6	Sidi yacoub	012318	1972	375,0	289,30	272,00
7	Saadia	012316	1972	377,20	289,65	1000

Source: A.N.R.H Chlef

Le bassin versant est contrôlée par une seule station hydrométrique dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau (III.5).

**Tableau (III.5): Caractéristiques la station hydrométrique d'Ouled Ben A.E.K**

Station	Code ANRH	Coordonnée X (m)	Coordonnée Y (m)	Coordonnée Z (m)
Ouled Ben A.E.K	012308	373,40	302,85	240

Source: A.N.R.H Chlef

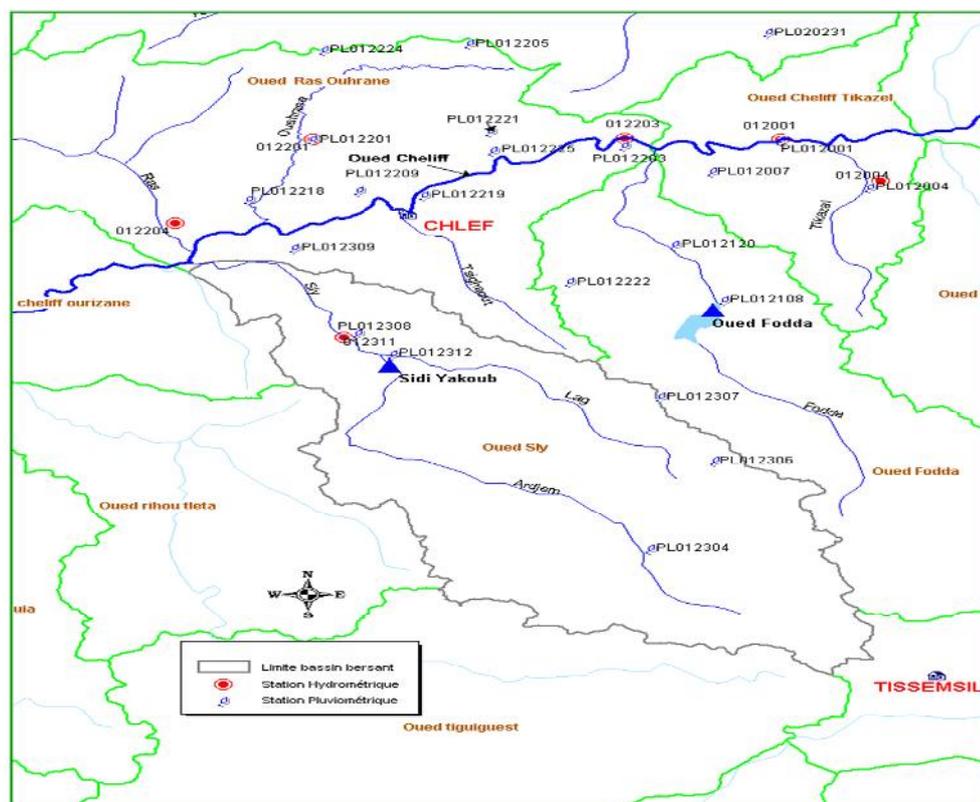


Figure III-1 : La carte d'équipement du bassin versant

Source : A.B.H Chlef

### III.3 Détermination de la pluie moyenne annuelle par la méthode de Thiessen :

C'est une méthode purement géométrique assez arbitraire mais plus rapide, elle consiste à pondérer les relevés de chaque station pluviométrique en admettant que chacune d'elles représente la précipitation moyenne sur une fraction de sous bassin de la manière suivante :

Les stations disponibles étant reportées sur une carte. On trace une série de droites reliant les stations adjacentes, au milieu de chacune de ces droites on relève une perpendiculaire, les intersections de ces médianes déterminent un certain nombre de polygones, pour chacun desquels la station, et la hauteur de précipitation moyenne est prise égale à celle relevée comprise à l'intérieur du polygone qu'il entoure ; s'il y a lieu, certains côtes du polygone sont remplacés par les limites du bassin étudié.

$$P_{moy} = \frac{P_1 \cdot A_1 + P_2 \cdot A_2 + \dots + P_n \cdot A_n}{A} \quad (III-1)$$

$P_i$  : Précipitation moyenne annuelle pour le polygone (i) (mm) ;

$A_n$  : Surface planimétrie du polygone (i) (Km<sup>2</sup>) ;

A : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

Tableau (III.6): Surfaces d'influence des postes pluviométriques

Station	Pluviométrie ( $p_i$ ) (mm)	Surface d'influence ( $s_i$ ) (km <sup>2</sup> )
Souk el Had	345	176.8
Borj Bounaama	450	142.0
Ain lellou	444	366.0
Ouled Ben A.E.K	368	277.8
Oued sly	298	161.1
Saaidia	532	420
Sidi Yakoub	257	213.9

La pluie moyenne annuelle est évaluée à **346mm**, valeur proche de celle enregistrée à la station de **Souk el Had**, ce qui permet de la considérer comme station représentative de l'ensemble du bassin d'oued sly.

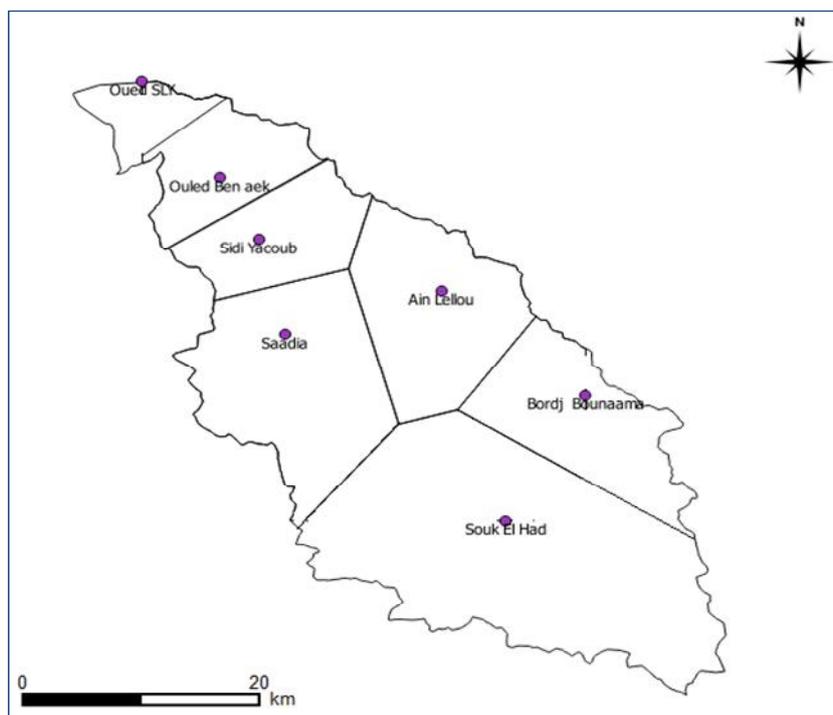


Figure III-2: détermination de la pluie moyenne par la méthode de Thiessen

#### III.4 Analyse des précipitations:

L'irrégularité des précipitations a un rôle essentiel et décisif sur l'écoulement fluvial et afin de caractériser le régime des précipitations, le choix de la loi d'ajustement de la distribution des pluies permet d'estimer les paramètres d'ajustement et de calculer les quantiles ou valeurs extrêmes.

III.4.1 Variation annuelle des précipitations:

Bien que la notion de la moyenne pluviométrique estompe la réalité des faits climatiques, notamment en domaine méditerranéen, sa connaissance demeure nécessaire pour aborder l'étude de l'abondance des cours d'eau et surtout la détermination du bilan moyen annuel de l'écoulement. Elle permet également de cerner la variabilité des pluies sur de longues périodes d'observation, néanmoins, cette variabilité doit être précisée par des moyens statistiques qui permettent de lier les hauteurs précipitées à leur durée de récurrence (A. Bouannani, 2004).

Les graphes de la figure (III-3) représentant la variation annuelle des pluies durant une période de 42ans d'observation (1970 – 2011) laissent apparaitre une diminution considérable allant de 1978 à 2006 et ce qui pour la majorité des postes pluviométriques.

Tous les auteurs qui ont étudié la pluviométrie montrent que la répartition de la pluie subit trois influences, celle de l'altitude, les conditions topographiques, de la longitude et enfin celle de l'éloignement de la mer (A. Bouannani, 2004).

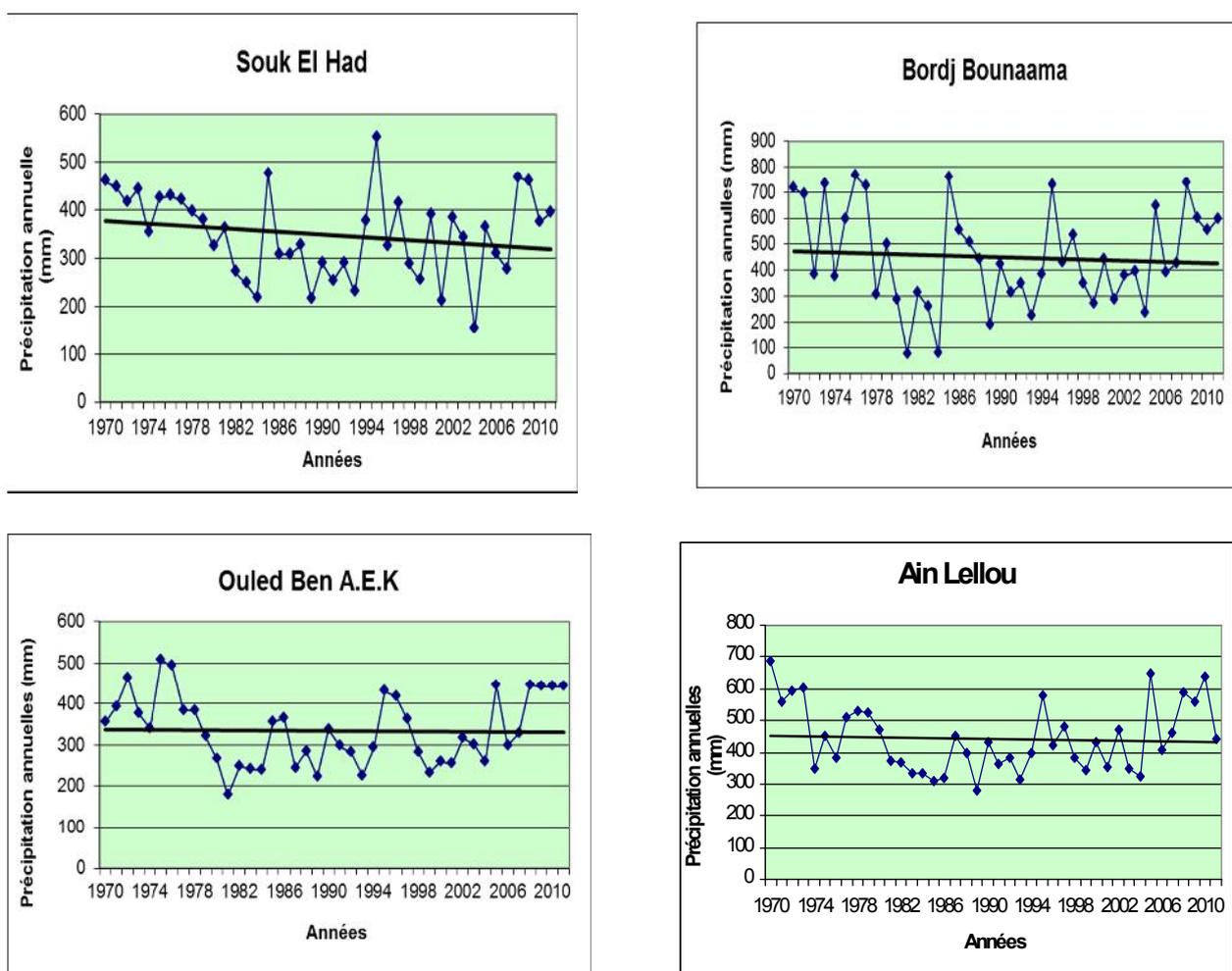


Figure III-3: Variation annuelle des précipitations aux différents postes pluviométriques

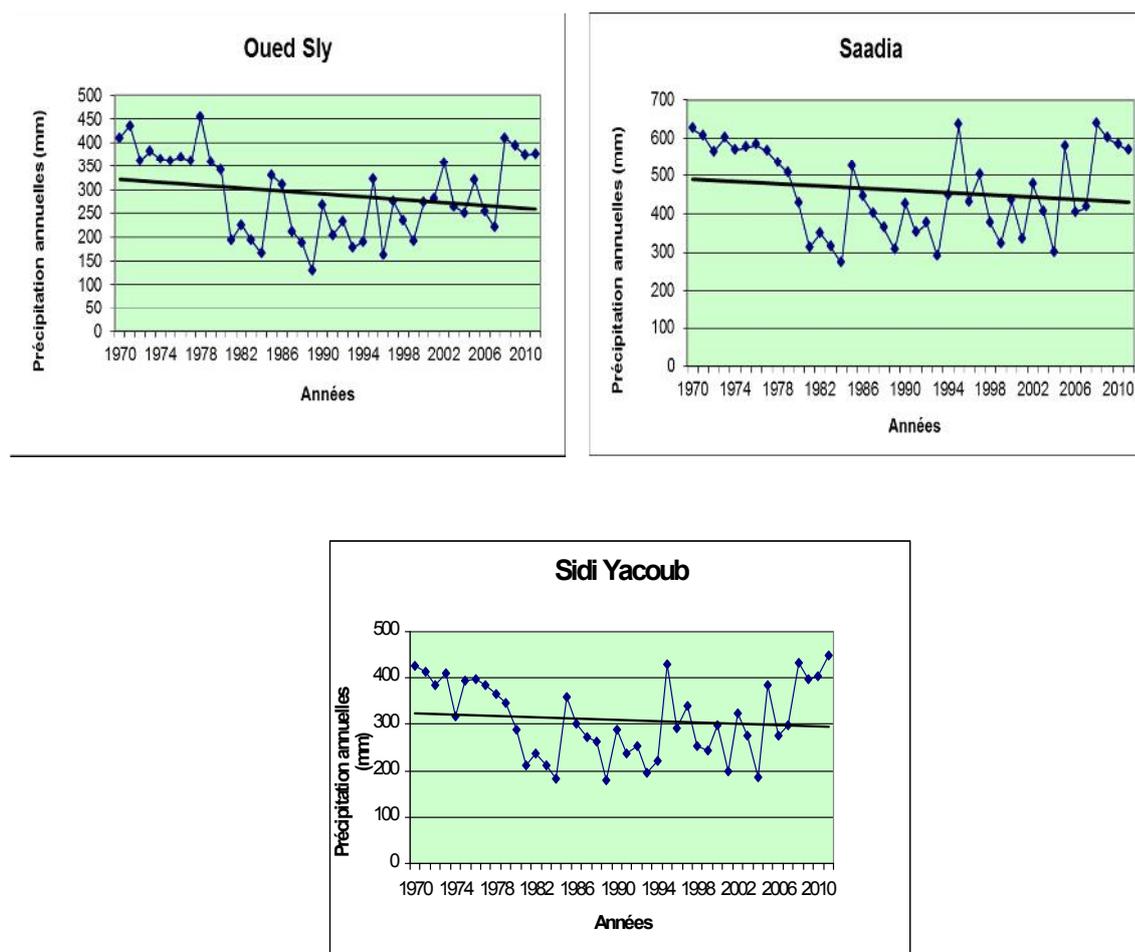


Figure III-3: Variation annuelle des précipitations aux différents postes pluviométriques (suite)

### III.4.2 Variation mensuelle des précipitations:

La répartition mensuelle des précipitations dans l'année et ses variations conditionnent, en relation avec les facteurs thermiques, l'écoulement saisonnier et le régime des cours d'eau, l'érodabilité des sols et le transport des matériaux en suspension (A. Bouanani, 2004).

Les valeurs maximales des pluies sont enregistrées en hiver (décembre, janvier, février) et en printemps (mars et avril) permettant de mettre en évidence deux périodes distinctes :

-une période sèche, correspondant à la saison d'été (juin, juillet, août), caractérisée par un remarquable déficit pluviométrique ;

-une période humide, correspondant à la saison d'hiver et de printemps.

Tableau (III.7): Précipitations moyennes mensuelles durant (1970-2011)

Station Mois	Souk El Had	Bordj Bounaama	Ouled Ben A. E. K	Ain Lellou	Oued Sly	Saadia	Sidi Yacoub
Septembre	19,36	17,04	16,29	17,16	9,77	28,86	16,92
Octobre	28,21	28,21	<b>47,95</b>	35,01	26,34	41,28	26,91
Novembre	<b>46,56</b>	<b>58,5</b>	<b>44,59</b>	<b>58,08</b>	38,96	<b>66,20</b>	37,32
Décembre	<b>45,08</b>	<b>59,25</b>	<b>41,99</b>	<b>56,97</b>	38,36	<b>68,03</b>	35,20
Janvier	<b>51,29</b>	<b>65,36</b>	<b>43,56</b>	<b>62,50</b>	<b>40,65</b>	<b>51,29</b>	<b>58,19</b>
Février	<b>49,21</b>	<b>62,23</b>	<b>50,07</b>	<b>54,52</b>	<b>44,76</b>	<b>71,09</b>	<b>39,41</b>
Mars	<b>39,00</b>	<b>56,15</b>	<b>43,45</b>	<b>59,02</b>	39,09	<b>48,50</b>	28,76
Avril	33,09	<b>53,74</b>	<b>40,19</b>	<b>40,12</b>	28,15	<b>76,00</b>	39,45
Mai	24,71	34,54	29,00	39,04	24,56	51,03	25,58
Juin	2,68	9,81	6,06	7,33	3,83	13,21	4,45
Juillet	2,15	1,54	1,40	2,45	1,53	7,27	1,69
Aout	3,79	3,51	3,66	2,68	2,12	3,88	1,82
Annuelle	345	<b>450</b>	368	<b>444</b>	298	<b>532</b>	257

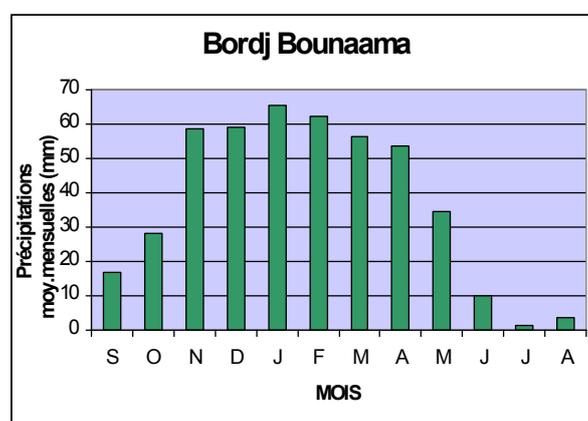
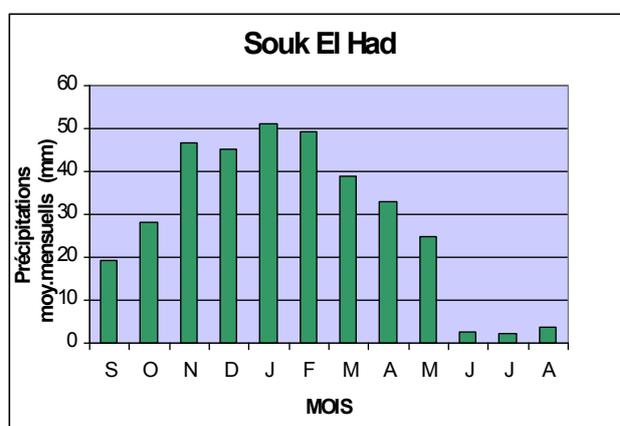


Figure III-4: Variations des pluies mensuelles des différents postes pluviométriques

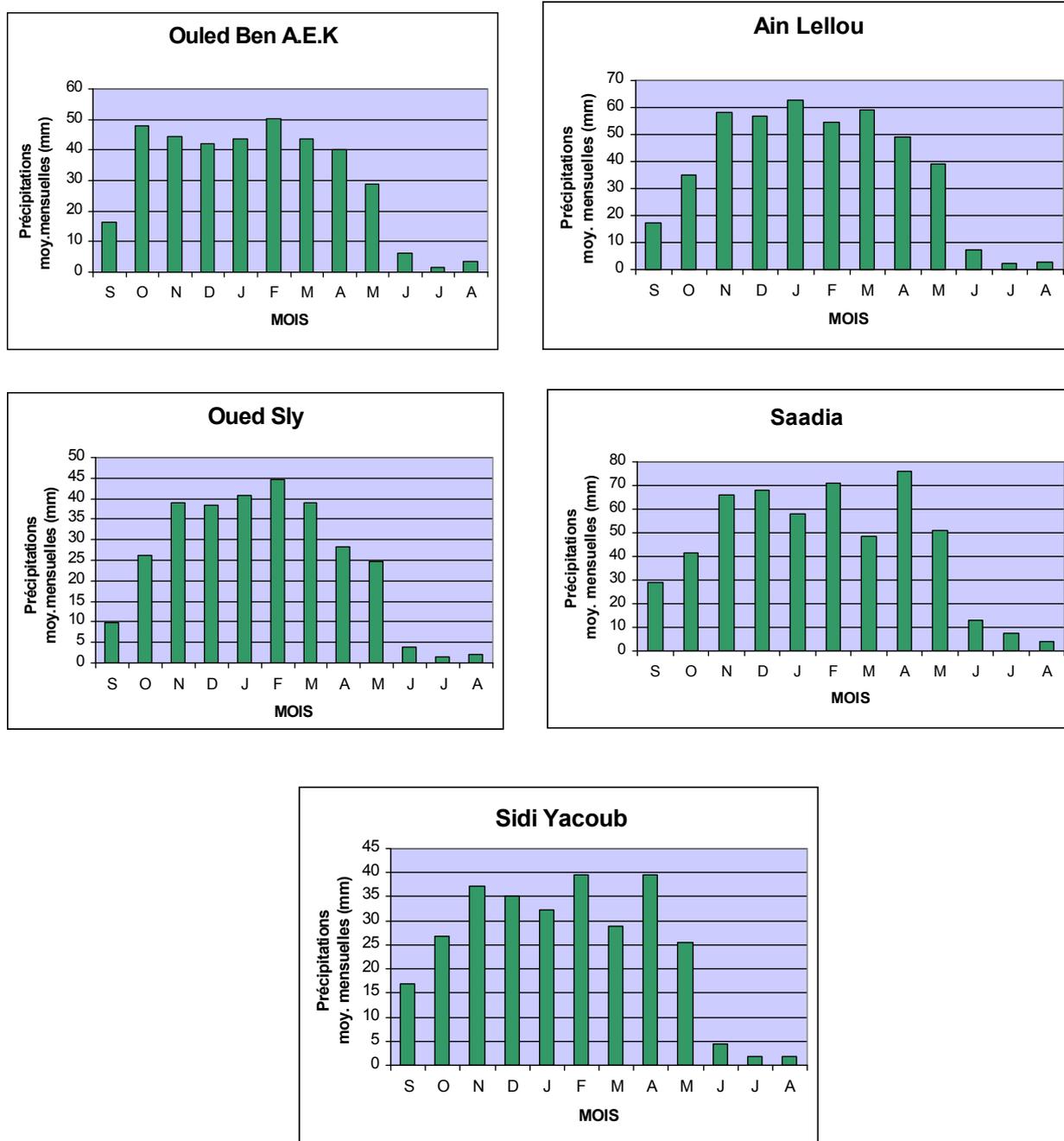


Figure III-4: Variations des pluies mensuelles des différents postes pluviométriques (suite)

### III.4.3 Variation des pluies maximales journalières :

Les hauteurs de pluies maximales recueillies en 24heures sont d'autant plus élevées que le module annuel est plus fort et cela pour la majorité des postes pluviométriques durant la période de 42 ans (1970-2011).

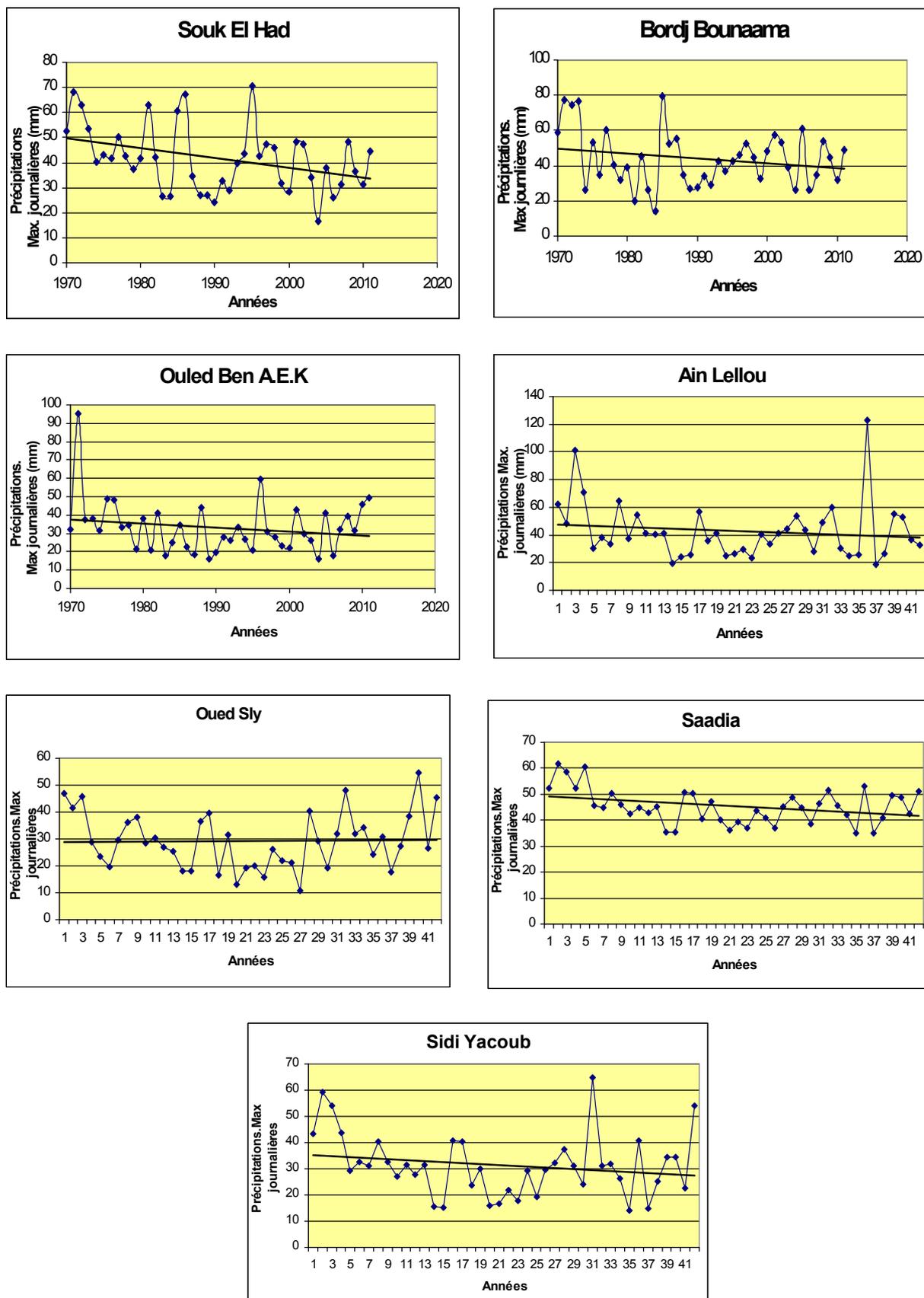


Figure III-5: Variations des pluies maximales journalières des différents postes pluviométriques

### III.4.4 Précipitations extrêmes:

L'analyse fréquentielle fait appel à diverses méthodes statistiques et représente un intérêt particulier pour la gestion et la prévention des événements hydrologiques, en particulier les événements extrêmes, et sa validité repose bien sur la pertinence de la loi adoptée que sur la technique numérique d'ajustement utilisée.

L'analyse statistique est réalisée sur les précipitations à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière pour la station de **Souk el Had** avec les différentes lois normale et log normale.

#### III.4.4.1 Ajustement des pluies annuelles :

L'équation de la droite de Gauss est de type :  $P = 347.29 + 87.35U$  (III-2)

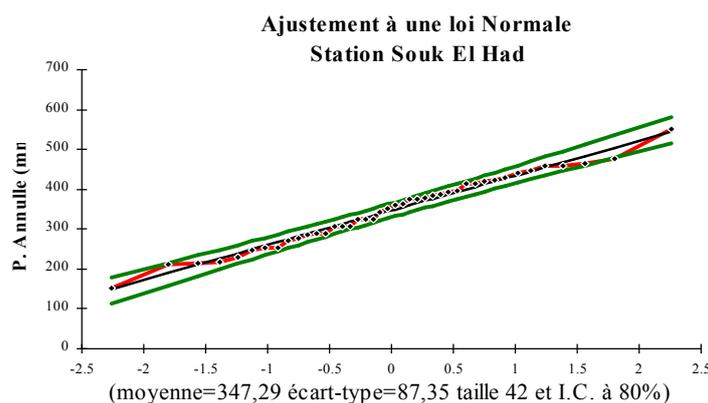


Figure III-6: Ajustement des pluies annuelles de la station (Souk el Had) à la loi normale

Le tableau (III.8) présente l'ajustement des précipitations annuelles de la station à la loi normale

### Chapitre III : Climat et hydrologie du bassin versant d'Oued Sly

Tableau (III.8): Ajustement des précipitations annuelles de la station de Souk el Had à la loi normale

		Ajustement à une			loi de Gauss			
Taille n=	42	Moyenne=	347.29					
		Ecart-type=	87.35		I.C. à (en%)=	80	U Gauss=	1.2817
Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
623.7382	270.9445	1	0.0119	-2.261	270.9445	205.06252	157.134363	242.830553
605.7321	288.7267	2	0.0357	-1.803	288.7267	256.600149	215.725243	289.371035
563.4036	299.6043	3	0.0595	-1.559	299.6043	284.092155	246.764544	314.412546
598.9693	307.6	4	0.0833	-1.383	307.6	303.90535	269.009467	332.584465
568.4	312.2876	5	0.1071	-1.242	312.2876	319.813835	286.778416	347.267157
575.1157	313.9425	6	0.1310	-1.122	313.9425	333.33828	301.809381	359.824644
582.0577	322.3004	7	0.1548	-1.016	322.3004	345.252841	314.98616	370.952322
565.283	332.9945	8	0.1786	-0.921	332.9945	356.008868	326.823376	381.056272
533.9683	349.4713	9	0.2024	-0.833	349.4713	365.894337	337.648879	390.39609
505.8687	350.3614	10	0.2262	-0.751	350.3614	375.105356	347.685509	399.148973
426.0304	362.8	11	0.2500	-0.674	362.8	383.782303	357.092403	407.442144
312.2876	374.3372	12	0.2738	-0.601	374.3372	392.02977	365.987777	415.370737
349.4713	374.5184	13	0.2976	-0.531	374.5184	399.928335	374.462376	423.008384
313.9425	399.6549	14	0.3214	-0.463	399.6549	407.541908	382.587849	430.413801
270.9445	403.6165	15	0.3452	-0.398	403.6165	414.922509	390.422201	437.635103
524.0426	404.747	16	0.3690	-0.334	404.747	422.113523	398.01349	444.712728
443.3558	416.1825	17	0.3929	-0.271	416.1825	429.151969	405.402413	451.681497
399.6549	425.1528	18	0.4167	-0.210	425.1528	436.070159	412.624175	458.572119
362.8	426.0304	19	0.4405	-0.149	426.0304	442.89694	419.709882	465.412329
307.6	428.967	20	0.4643	-0.089	428.967	449.658653	426.687622	472.227775
425.1528	434.1647	21	0.4881	-0.030	434.1647	456.379918	433.583315	479.04276
350.3614	443.3558	22	0.5119	0.030	443.3558	463.085601	440.422759	485.882204
374.5184	447.5	23	0.5357	0.089	447.5	469.806866	447.237744	492.777897
288.7267	476.2759	24	0.5595	0.149	476.2759	476.568579	454.05319	499.755637
447.5	500.452	25	0.5833	0.210	500.452	483.39536	460.8934	506.841344
633.9	505.8687	26	0.6071	0.271	505.8687	490.31355	467.784022	514.063106
428.967	524.0426	27	0.6310	0.334	524.0426	497.351996	474.752791	521.452029
500.452	533.9683	28	0.6548	0.398	533.9683	504.54301	481.830416	529.043318
374.3372	563.4036	29	0.6786	0.463	563.4036	511.923611	489.051718	536.87767
322.3004	565.283	30	0.7024	0.531	565.283	519.537184	496.457135	545.003143
434.1647	567.2074	31	0.7262	0.601	567.2074	527.435749	504.094782	553.477743
332.9945	568.4	32	0.7500	0.674	568.4	535.683216	512.023375	562.373117
476.2759	575.1157	33	0.7738	0.751	575.1157	544.360163	520.316546	571.78001
404.747	576.7143	34	0.7976	0.833	576.7143	553.571182	529.069429	581.81664
299.6043	582.0577	35	0.8214	0.921	582.0577	563.456651	538.409247	592.642143
576.7143	582.7349	36	0.8452	1.016	582.7349	574.212678	548.513197	604.479359
403.6165	598.9693	37	0.8690	1.122	598.9693	586.127239	559.640876	617.656138
416.1825	599.754	38	0.8929	1.242	599.754	599.651684	572.198362	632.687103
635.8978	605.7321	39	0.9167	1.383	605.7321	615.560169	586.881054	650.456052
599.754	623.7382	40	0.9405	1.559	623.7382	635.373364	605.052973	672.700975
582.7349	633.9	41	0.9643	1.803	633.9	662.86537	630.094484	703.740276
567.2074	635.8978	42	0.9881	2.261	635.8978	714.402999	676.634966	762.331156

Le tableau (III.9) regroupe les pluies des différentes périodes de retour.

Tableau (III.9) : pluies annuelles pour différentes périodes de retour

Période de retour T (ans)	2	5	10	20	50
Fréquence F(%)	50	80	90	95	98
Précipitation annuelle	347.29	420.66	459.10	490.54	526.36

III.4.4.2 Ajustement des pluies mensuelles :

Les pluies mensuelles s'ajustent bien à la loi Log-normale (loi de Galton).

Le tableau (III.10) présente les différentes périodes de retour pour la loi ajustée.

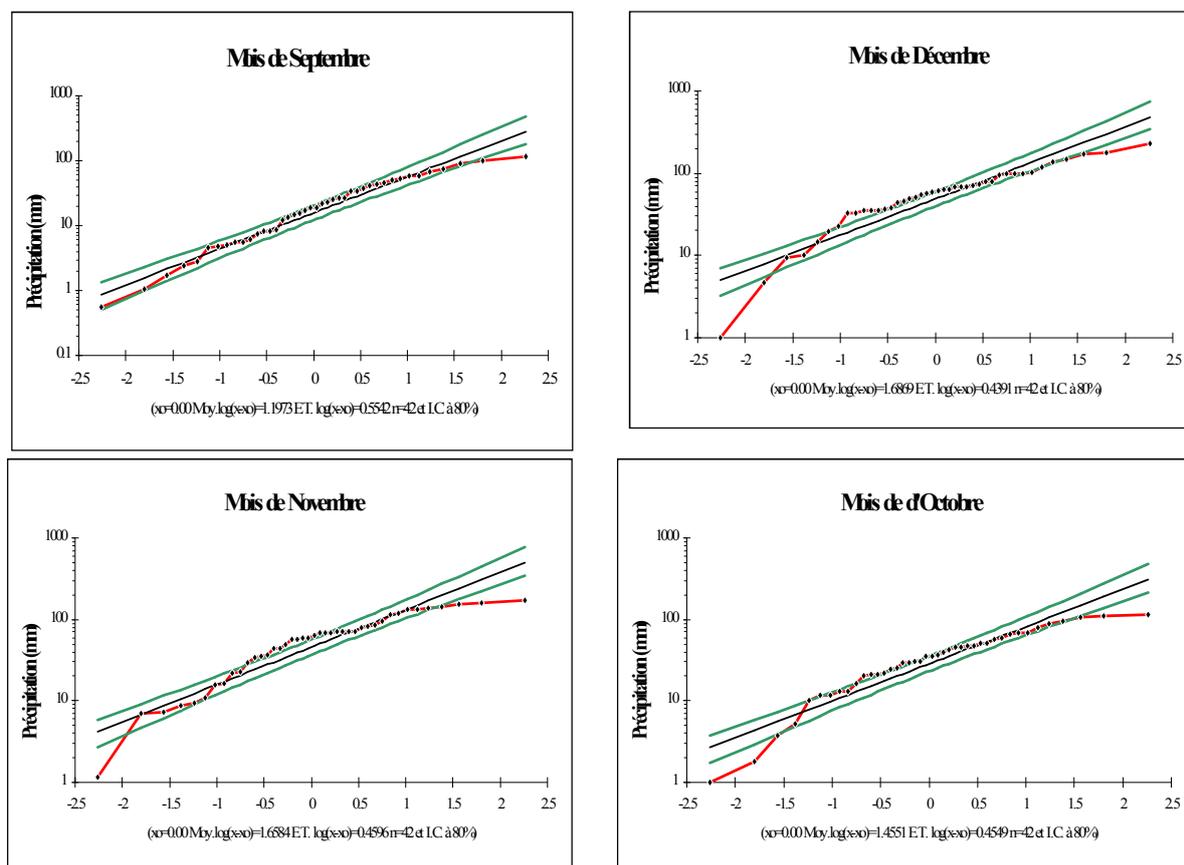


Figure III-7: Ajustement des pluies mensuelles de la station (Souk el Had) à la loi log- normale

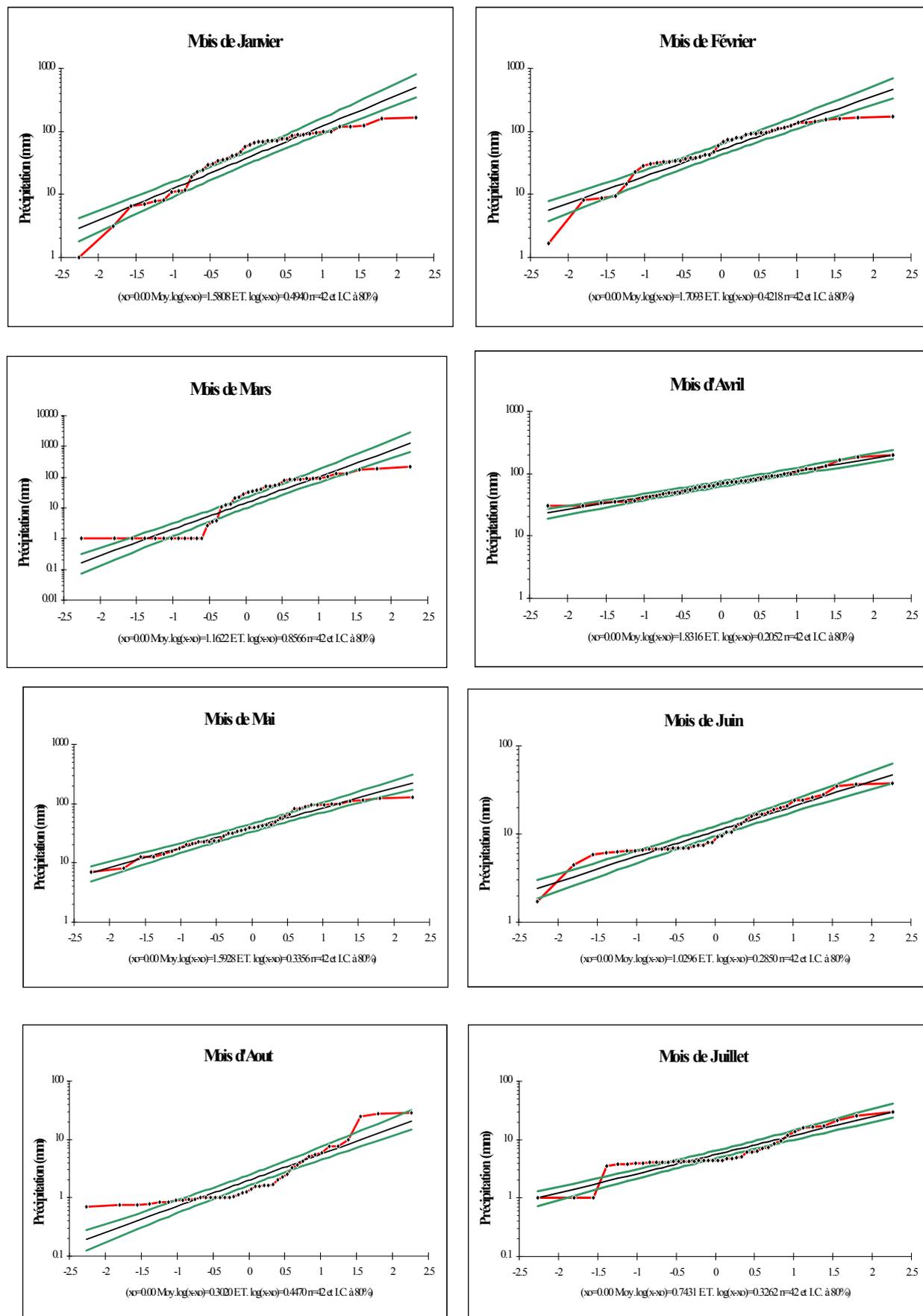


Figure III-7: Ajustement des pluies mensuelles de la station (Souk el Had) à la loi log- normale

Tableau (III.10): Ajustement des pluies mensuelles à la loi Log - Normale

Station	Mois	Equation de la droite de Galton
<b>Souk El Had</b>	<b>Septembre</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 1,11 + 0,44 U_{p\%}$
	<b>Octobre</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 1,28 + 0,49 U_{p\%}$
	<b>Novembre</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 1,49 + 0,50 U_{p\%}$
	<b>Décembre</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 1,54 + 0,39 U_{p\%}$
	<b>Janvier</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 1,56 + 0,45 U_{p\%}$
	<b>Février</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 1,51 + 0,50 U_{p\%}$
	<b>Mars</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 1,46 + 0,40 U_{p\%}$
	<b>Avril</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 1,37 + 0,44 U_{p\%}$
	<b>Mai</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 1,16 + 0,53 U_{p\%}$
	<b>Juin</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 0,24 + 0,46 U_{p\%}$
	<b>Juillet</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 0,39 + 0,89 U_{p\%}$
	<b>Août</b>	$\text{Log } X_{p\%} = 0,22 + 0,99 U_{p\%}$

Les pluies mensuelles pour différentes périodes de retour sont regroupées dans le tableau (III.11)

Tableau (III.11) : pluies mensuelles pour différentes périodes de retour.

T (ans)	1-F	P (mm)											
		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
<b>2</b>	0,5	12.88	19.05	30.90	34.67	36.31	32.34	28.84	23.44	14.45	1.74	0.40	0.6
<b>5</b>	0,8	30.17	49.16	81.28	74.13	86.70	85.11	62.52	54.90	40.29	4.22	13.73	4.08
<b>10</b>	0,9	47.12	80.76	134.90	109.45	136.77	141.25	93.76	85.74	68.93	6.74	33.82	11.15
<b>20</b>	0,95	67.86	121.23	204.17	151.22	198.61	213.80	130.62	123.48	106.95	9.87	70.73	25.33
<b>50</b>	0,98	102.80	192.53	327.34	218.52	303.74	342.77	190.55	187.07	176.40	15.24	163.88	1.81

#### III.4.4.3 Ajustement des pluies journalières :

A l'échelle journalière, nous avons aussi procédé aux mêmes démarches, nous avons calculé les paramètres statistiques des précipitations de la station étudiée. Nous avons remarqué bien que les précipitations à l'échelle journalière suivent la loi Gumbel. Le tableau (III.12) donne l'ajustement Selon la loi de Gumbel, l'équation de la droite est de type:  $P= 5.29Y+42.20$

Tableau (III.12): Ajustement des pluies journalières à la loi de Gumbel

		Ajustement à une loi de Gumbel						
Taille n=	42	Xo=	35.70					
		g=	10.16		I.C. à (en%)=	80	U Gauss=	1.2817
Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
52.22002	35.1023	1	0.012	-1.489	35.10226	34.3231	31.9865	35.99159
61.85534	35.1938	2	0.036	-1.204	35.19379	35.83091	33.8158	37.31368
58.61815	35.2969	3	0.060	-1.037	35.29692	36.71146	34.8718	38.09808
52.35528	35.4149	4	0.083	-0.910	35.41489	37.38343	35.6696	38.70472
60.7	36.1901	5	0.107	-0.804	36.19005	37.94762	36.3329	39.22057
45.75325	36.8797	6	0.131	-0.709	36.87968	38.44575	36.9128	39.68176
44.9563	37	7	0.155	-0.624	37	38.89948	37.4357	40.10718
50.4616	38.4985	8	0.179	-0.544	38.49847	39.32172	37.9172	40.50815
45.83864	39.3021	9	0.202	-0.469	39.30211	39.72084	38.3674	40.89212
42.3504	40.2	10	0.226	-0.396	40.2	40.10268	38.7933	41.26433
44.98512	40.3432	11	0.250	-0.327	40.34318	40.47154	39.1998	41.6287
42.9533	40.7946	12	0.274	-0.259	40.79464	40.8307	39.5909	41.98828
45.14985	41	13	0.298	-0.192	41	41.18278	39.9695	42.34554
35.41489	41.947	14	0.321	-0.127	41.94696	41.52994	40.338	42.70257
35.29692	42.3111	15	0.345	-0.062	42.31113	41.87405	40.6986	43.06117
50.74454	42.3504	16	0.369	0.003	42.3504	42.21673	41.053	43.42298
50.46485	42.9533	17	0.393	0.068	42.9533	42.55947	41.4029	43.78949
40.34318	43.6526	18	0.417	0.133	43.65256	42.90367	41.7496	44.16212
47	44.8631	19	0.440	0.199	44.86312	43.25068	42.0947	44.54228
40.2	44.9563	20	0.464	0.265	44.9563	43.60183	42.4395	44.93137
36.19005	44.9851	21	0.488	0.332	44.98512	43.95849	42.7855	45.33084
39.30211	45.1499	22	0.512	0.401	45.14985	44.32207	43.134	45.74225
36.87968	45.3714	23	0.536	0.471	45.37143	44.69411	43.4865	46.16727
43.65256	45.4551	24	0.560	0.544	45.45509	45.07624	43.8447	46.60775
41	45.7533	25	0.583	0.618	45.75325	45.47031	44.2103	47.0658
37	45.8386	26	0.607	0.695	45.83864	45.87839	44.5851	47.54383
45.37143	46.4749	27	0.631	0.775	46.47486	46.30288	44.9715	48.04467
48.75208	47	28	0.655	0.859	47	46.74658	45.3719	48.57166
44.86312	48.7521	29	0.679	0.947	48.75208	47.21284	45.7892	49.12884
38.49847	48.7985	30	0.702	1.040	48.79852	47.7057	46.227	49.72114
46.47486	49.4554	31	0.726	1.140	49.45542	48.23017	46.6895	50.35472
51.63303	50.4616	32	0.750	1.246	50.4616	48.79258	47.1823	51.03739
45.45509	50.4649	33	0.774	1.361	50.46485	49.40112	47.7123	51.7793
41.94696	50.7445	34	0.798	1.487	50.74454	50.06662	48.2885	52.59398
35.19379	51.1844	35	0.821	1.626	51.18439	50.80401	48.9236	53.50004
53.10947	51.633	36	0.845	1.783	51.63303	51.63452	49.6353	54.5241
35.10226	52.22	37	0.869	1.964	52.22002	52.5901	50.4504	55.70618
40.79464	52.3553	38	0.893	2.177	52.35528	53.72194	51.4117	57.11056
49.45542	53.1095	39	0.917	2.442	53.10947	55.12024	52.5942	58.85051
48.79852	58.6182	40	0.940	2.791	58.61815	56.96768	54.1502	61.15568
42.31113	60.7	41	0.964	3.314	60.7	59.73632	56.4727	64.6197
51.18439	61.8553	42	0.988	4.425	61.85534	65.61388	61.3811	71.9956

Les précipitations pour différentes périodes de retour sont mentionnées dans le tableau (III.13).

Tableau (III.13) : pluies journalières pour différentes périodes de retour

Fréquence	Période de retour T	Précipitation
50	2	44.10
80	5	50.08
90	10	54.10
95	20	57.96
98	50	62.88

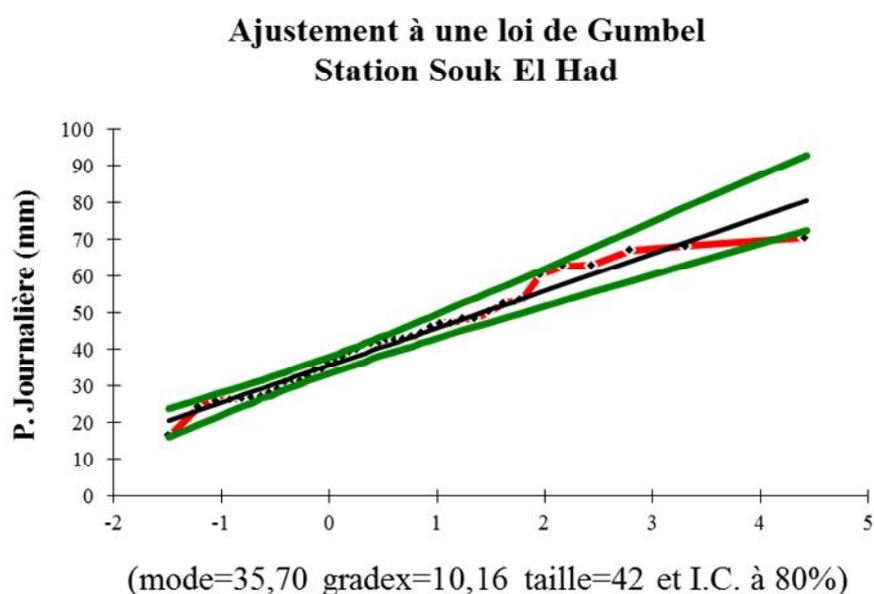


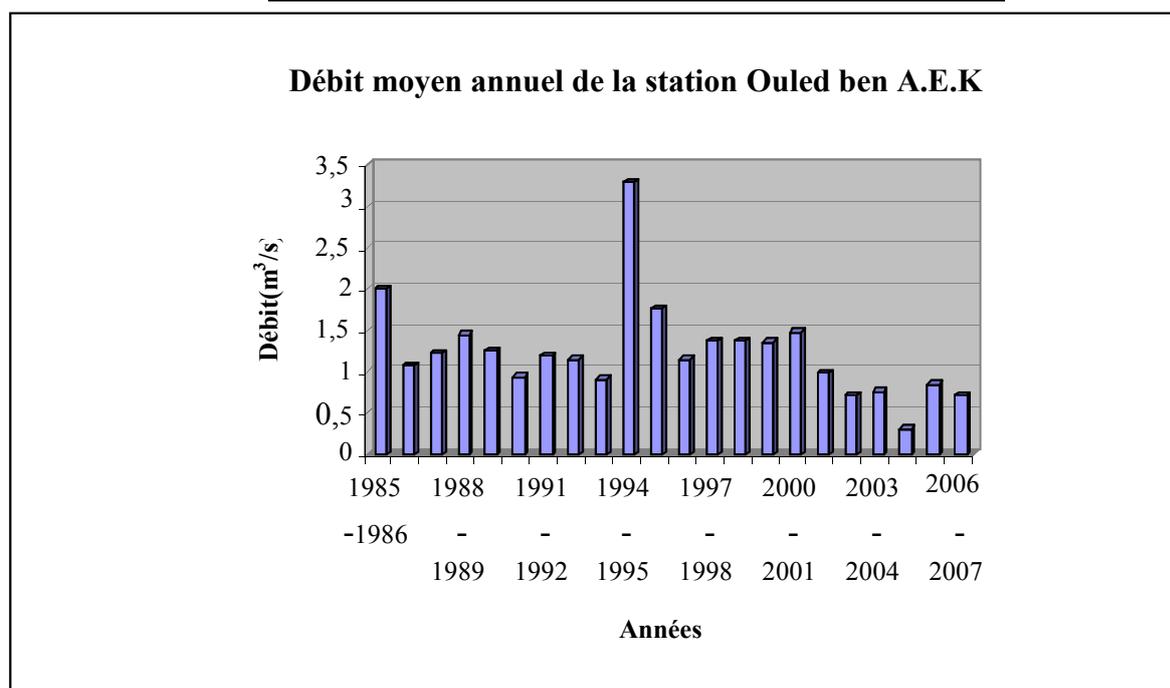
Figure III-8: Ajustement des pluies journalières de (Souk El Had) à la loi de Gumbel

### III.5 Etude des débits:

L'écoulement moyen annuel ou l'abondance annuelle est une notion fondamentale en hydrologie. C'est le volume d'eau écoulé en 365 jours à la sortie d'un bassin. Le module brut ou absolu est généralement exprimé en  $m^3/s$  et le module spécifique se traduit en  $ls^{-1}km^2$  (A. Bouanani, 2004).

**Tableau (III.14):** débit moyen annuel de la station Ouled Ben A.E.K.

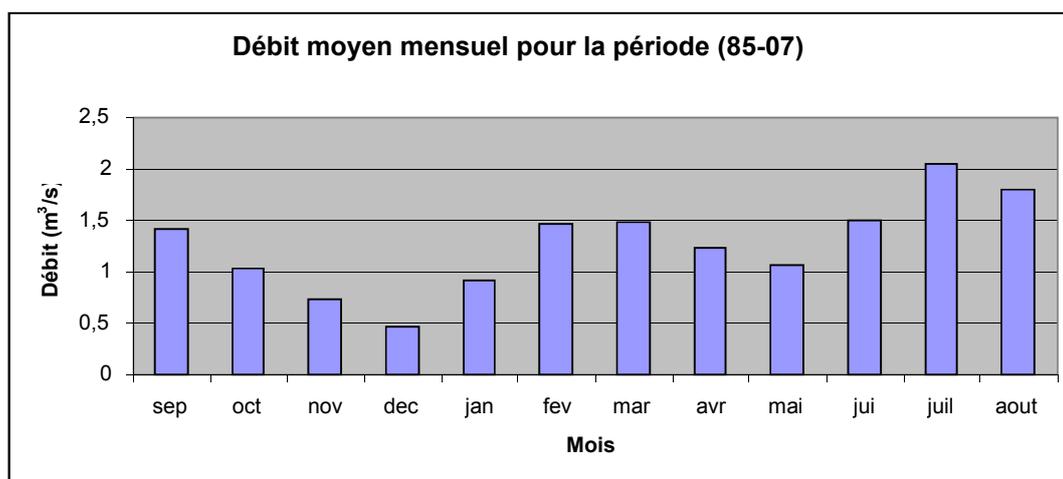
Année	Q <sub>max.</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>min.</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>moy.</sub> (m <sup>3</sup> /s)
1985 -1986	7,56	0,11	2,00
1986 - 1987	7,89	0,00	1,07
1987 - 1988	3,12	0,13	1,23
1988 - 1989	11,59	0,00	1,45
1989 - 1990	4,34	0,02	1,26
1990 - 1991	3,42	0,07	0,94
1991 - 1992	3,71	0,06	1,19
1992 - 1993	5,41	0,10	1,15
1993 - 1994	2,29	0,09	0,91
1994 - 1995	7,28	0,40	3,30
1995 - 1996	5,88	0,38	1,76
1996 - 1997	2,58	0,13	1,15
1997 - 1998	2,39	0,32	1,37
1998 - 1999	2,59	0,18	1,38
1999 - 2000	2,11	0,00	1,36
2000 - 2001	3,62	0,20	1,48
2001 - 2002	2,29	0,13	0,98
2002- 2003	1,56	0,11	0,72
2003 - 2004	1,50	0,22	0,76
2004 - 2005	1,34	0,00	0,31
2005 - 2006	2,39	0,09	0,85
2006 - 2007	2,59	0,06	0,72



**Figure III-9 :** Variation du débit moyen annuel

**Tableau (III.15):** débit moyen mensuel pour toute la période d'étude (85-86/06-07)

Mois	Q <sub>max.</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>min.</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>moy.</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Sept.	5,88	0,10	1,42
Oct.	4,34	0,05	1,03
Nov.	2,68	0,06	0,73
Dec.	1,72	0,06	0,47
Jan.	3,43	0,00	0,91
Fev.	7,89	0,02	1,46
Mar.	5,55	0,02	1,48
Avr.	3,71	0,04	1,23
Mai.	2,88	0,00	1,07
Jui.	5,41	0,00	1,50
Juil.	11,59	0,00	2,05
Aout.	7,28	0,00	1,80



**Figure III-10:** Variation du débit moyen mensuel

**Tableau (III.16) :** débit moyen saisonnier pour toute la période d'étude (85-86/06-07).

Saison	Q <sub>max.</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>min.</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>moy.</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Automne	5,88	0,05	1,05
Hiver	7,89	0,00	0,94
Printemps	5,55	0,00	1,27
Été	11,59	0,00	1,78

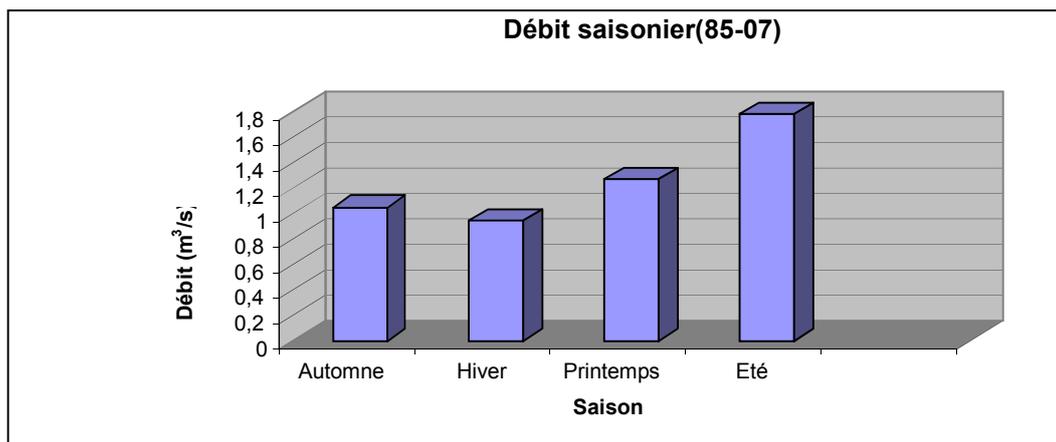


Figure III-11: Variation du débit saisonnier

Tableau (III.17): caractéristiques de l'écoulement annuel de la station Ouled Ben A.E.K.

Année	Q <sub>moy.</sub> (m <sup>3</sup> /s)	M <sub>0</sub>	A <sub>0</sub>	h <sub>0</sub>
1985 -1986	2	1,498	63,07	47,24
1986 - 1987	1,07	1,122	33,74	25,28
1987 - 1988	1,23	0,921	38,78	29,06
1988 - 1989	1,45	1,086	45,72	34,25
1989 - 1990	1,26	0,943	39,73	29,76
1990 - 1991	0,94	0,704	29,64	22,21
1991 - 1992	1,19	0,891	37,52	28,11
1992 - 1993	1,15	0,861	36,26	27,17
1993 - 1994	0,91	0,681	28,69	21,50
1994 - 1995	3,3	2,471	104,06	77,95
1995 - 1996	1,76	1,318	55,50	41,58
1996 - 1997	1,15	0,861	36,26	27,17
1997 - 1998	1,37	1,026	43,20	32,36
1998 - 1999	1,38	1,033	43,51	32,60
1999 - 2000	1,36	1,018	42,88	32,13
2000 - 2001	1,48	1,108	46,67	34,96
2001 - 2002	0,98	0,734	30,90	23,15
2002- 2003	0,72	0,539	22,70	17,01
2003 - 2004	0,76	0,569	23,96	17,95
2004 - 2005	0,31	0,232	9,77	7,32
2005 - 2006	0,85	0,636	26,80	20,08
2006 - 2007	0,72	0,539	22,70	17,01
moyenne	1,24	0,945	39,19	29,36
total	27,34	20,800	862,19	645,84
écart type	0,905	0,677	28,54	21,38
CV	0,72	0,71	0,72	0,72

Les paramètres du tableau (III.17) sont calculés selon les formules suivantes :

**\*) Le module spécifique  $M_0$ :**

$$M_o = \frac{Q_o}{S} \quad \text{(III.3)}$$

Avec:

$Q_0$  : Débit moyen annuel en l/s ;

$S$  : Surface du bassin en (1335) km<sup>2</sup>.

**\*) L'apport moyen annuel " $A_0$ " :**

$$A_o = Q_o.T(M.m^3) \quad \text{(III.4)}$$

Avec:

$T$  : temps d'une année (31536.10<sup>3</sup>) ;

$Q_0$ :débit moyen en l/s.

**\*) lame d'eau moyen écoulée  $h_0$  :**

$$h_o = \frac{A_o}{S}(mm) \quad \text{(III.5)}$$

Avec:

$A_0$ : apport moyen annuel en (M.m<sup>3</sup>) ;

$S$ : superficie du bassin versant.

L'irrégularité interannuelle de l'écoulement peut être mesurée par l'hydraulicité  $K_i$ , qui est le rapport entre le débit moyen annuel de l'année  $i$  et le débit moyen interannuel.

$$K_i = \frac{Q_0}{Q_{moy}}(m^3 / s) \quad \text{(III.6)}$$

$Q_0$  : Débit de l'année ;

$Q_{moy}=1.24m^3/s$  : Débit de toute la période d'étude ;

Ce coefficient est très important dans la régularisation des débits:

Si :

$Q_0 > Q_{moy}$ : année humide ;

$Q_0 < Q_{moy}$ : année sèche ;

$Q_0 = Q_{moy}$ : année moyenne.

**Tableau (III.18) :** L'hydraulicité de la station d'Ouled Ben A.E.K.

Année	Qo(m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>moy.</sub> (m <sup>3</sup> /s)	K <sub>i</sub>	classification de l'année
1985 -1986	2	1,24	1,62	année humide
1986 - 1987	1,07	1,24	0,86	année sèche
1987 - 1988	1,23	1,24	0,99	année sèche
1988 - 1989	1,45	1,24	1,16	année humide
1989 - 1990	1,26	1,24	1,01	année humide
1990 - 1991	0,94	1,24	0,75	année sèche
1991 - 1992	1,19	1,24	0,95	année sèche
1992 - 1993	1,15	1,24	0,92	année sèche
1993 - 1994	0,91	1,24	0,73	année sèche
1994 - 1995	3,3	1,24	2,66	année humide
1995 - 1996	1,76	1,24	1,41	année humide
1996 - 1997	1,15	1,24	0,92	année sèche
1997 - 1998	1,37	1,24	1,10	année humide
1998 - 1999	1,38	1,24	1,11	année humide
1999 - 2000	1,36	1,24	1,09	année humide
2000 - 2001	1,48	1,24	1,19	année humide
2001 - 2002	0,98	1,24	0,79	année sèche
2002- 2003	0,72	1,24	0,58	année sèche
2003 - 2004	0,76	1,24	0,61	année sèche
2004 - 2005	0,31	1,24	0,25	année sèche
2005 - 2006	0,85	1,24	0,68	année sèche
2006 - 2007	0,72	1,24	0,58	année sèche

L'hydraulicité montre une forte fluctuation de débit d'une année à l'autre, faisant apparaître parfois une tendance climatique sèche et d'autre fois humide durant toute la période d'étude.

### III.5.1 Etude des débits extrêmes :

Les débits extrêmes que sont les phénomènes de crues et d'étiages ne peuvent être cernés que dans leur succession chronologique, allant de quelques heures à plusieurs jours.

L'étude des crues permet de mettre en évidence la réaction du bassin versant pendant un pas de temps réduit à une averse ou séquence pluvieuse donnée. Cette réaction ou cette réponse du bassin, fonction des caractères propres des précipitations (hauteur, intensité et durée) est déterminée par la combinaison complexe des divers éléments caractérisant l'organisation fluviale : état de saturation des sols, importance des pentes, densité de drainage, taux de la couverture végétale, forme du bassin, etc...

L'étude des étiages, phénomènes moins brutaux dans leur apparition, permet de mettre en valeur la forte décroissance des débits en phase de tarissement (A. Bouannani, 2004).

#### III.5.1.1 Analyse fréquentielle des débits de crue par modèle QdF:

L'analyse fréquentielle des données hydrométriques est une approche privilégiée pour obtenir une estimation du débit de crue relative à une période de retour donnée. De façon analogue à ce qui est pratiqué pour les pluies avec les courbes Intensité-durée-Fréquence, il est possible de caractériser la distribution des crues par des courbes Débit-durée-Fréquence (QdF). La variable Q du débit étudié est relative à un **débit moyen maximal** sur la durée d, ou à un débit dépassé de façon continue pendant la durée d, (**débit seuil**) (G. Galéa et al, 1997).

La modélisation débit-durée-fréquence (QdF) est une généralisation de l'analyse fréquentielle classique des crues. Le premier modèle QdF régional a été proposé par Meunier (2001).

Afin de mettre en évidence et d'estimer les quantiles des crues caractérisant le bassin versant de Oued Sly, le logiciel **PRETHY** (**P**rogramme d'**É**chantillonnage et **T**raitement **H**ydrologique) a été utilisé pour déterminer les critères de sélection des crues avec, en particulier, vérification des hypothèses de base (indépendance, stationnarité et homogénéité des événements (Lang et al, 1999).

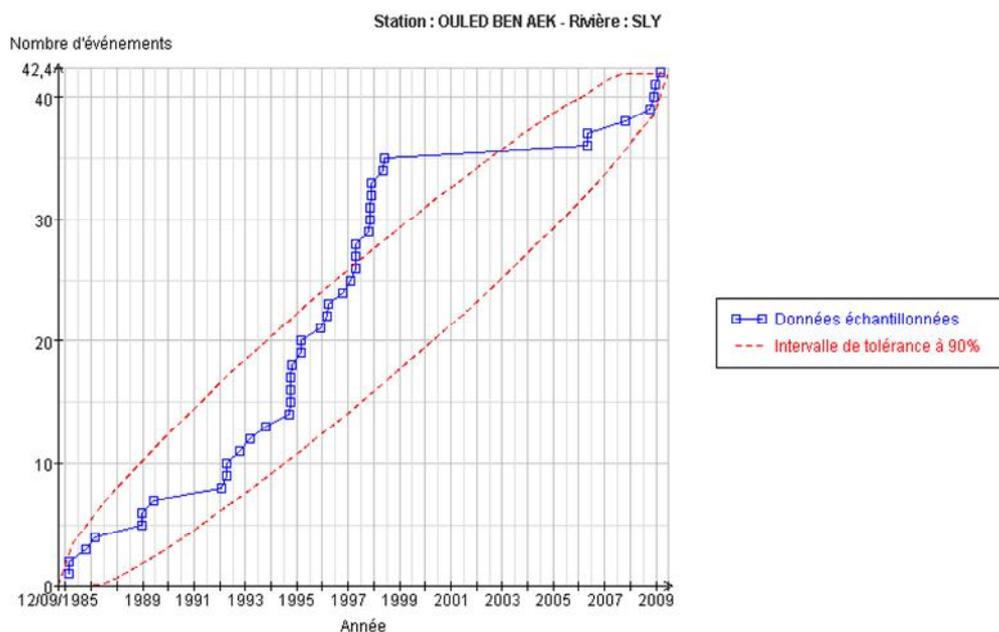
L'étude consiste à déterminer les caractéristiques du bassin par son régime hydrologique à savoir les débits caractéristiques et leur dates d'apparition, de vérifier la stationnarité des séries des d'observations et par la suite calculer les quantiles des crues.

##### a) Analyse de stationnarité temporelle du régime de crue :

La question de la stationnarité temporelle des caractéristiques extraites chronologiques doit être examinée. C'est un pré requis indispensable avant de mettre en œuvre les procédures d'ajustement et d'autoriser le calcul des quantiles de crue. Pour détecter d'éventuelles modifications dans une série temporelle, l'usage de tests statistiques et le recours à la représentation graphique est privilégié. L'approche statistique apporte une aide à la décision concernant une hypothèse énoncée. Les calculs réalisés sur les échantillons conduiront à retenir l'hypothèse de stationnarité  $H_0$  ou son alternative  $H_1$  sachant qu'un seul est vrai.

Il faut mentionner que les chroniques de plus de vingt ans restent malgré tout trop courtes pour étudier les tendances de long terme induit par un dérèglement du climat.

Enfin, l'analyse du seul donné de débit ne permet pas toujours de remonter à l'origine des ruptures.

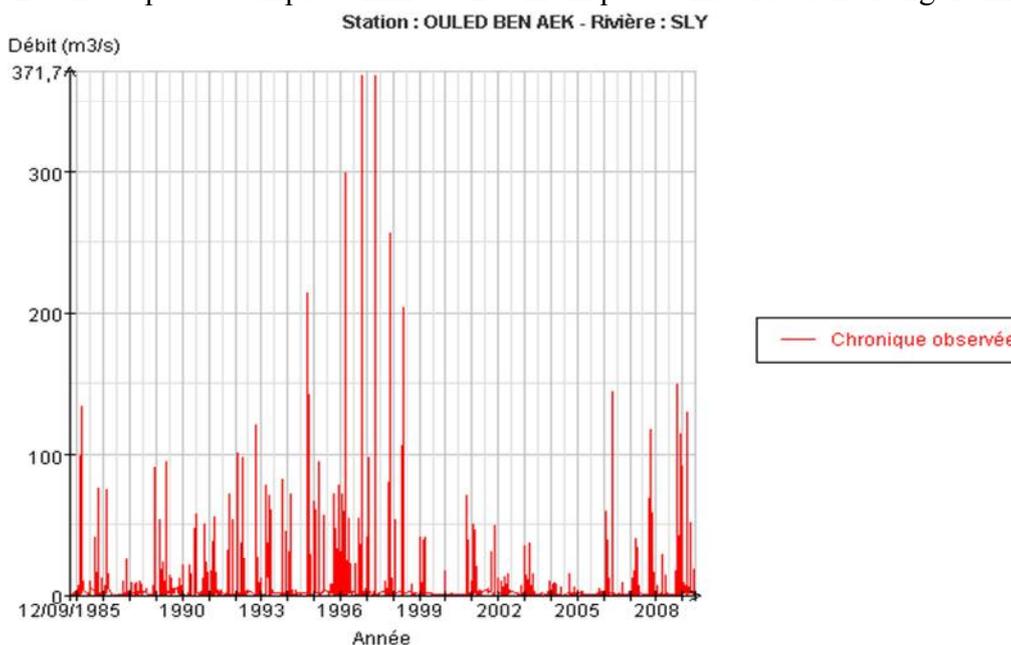


**Figure III-12:** Test stationnarité de Lang sur les échantillonnages de sup-seuil du débit d'Ouled ben AEK

Le test de Lang (figure III-12) permet d'identifier une non stationnarité allant du 1997 au 1999 montrant que cette distribution des évènements des années est en dehors de l'intervalle de tolérance à 90%.

#### **b) Paramètres d'échantillonnage sup-seuil de la station d'Ouled ben A.E.K:**

Les débits de la station sont enregistrés depuis 12/09/1985 jusqu'au 31/08/2009 pour une durée de 23 ans au pas du temps 30 minute. La chronique est illustrée dans la figure III-13.



**Figure III-13 :** Chronique au pas de temps variable d'Ouled Ben Abdelkader

#### c) Hydrogrammes bruts et hydrogramme type:

On appelle hydrogrammes bruts les hydrogrammes issus de la chronique de données. Ils sont construits en prenant les valeurs maximales de toutes les crues et s'étendant sur un intervalle de temps de 5 heures.

On prend les dix plus forts hydrogrammes, les événements correspondant aux crues dont le maximum a été échantillonné pour une durée d'échantillonnage égale à zéro.

On appelle hydrogramme moyen normé la moyenne entre ces dix hydrogrammes qui se fait par extrapolation dont la formule n'est pas déterminée.

Ce hydrogramme moyen normé est un hydrogramme type pour la rivière toute entière au niveau de la même station de débit et qui peut servir pour toute construction d'un hydrogramme de crue. Le diagramme est à valeurs proportionnelles entre le débit maximal de crue et les valeurs de débits en fonctions de temps. C'est un hydrogramme de « durée » en fonction de la « proportionnel de débit » et prévu pour une crue qui dure environ 5 jours.

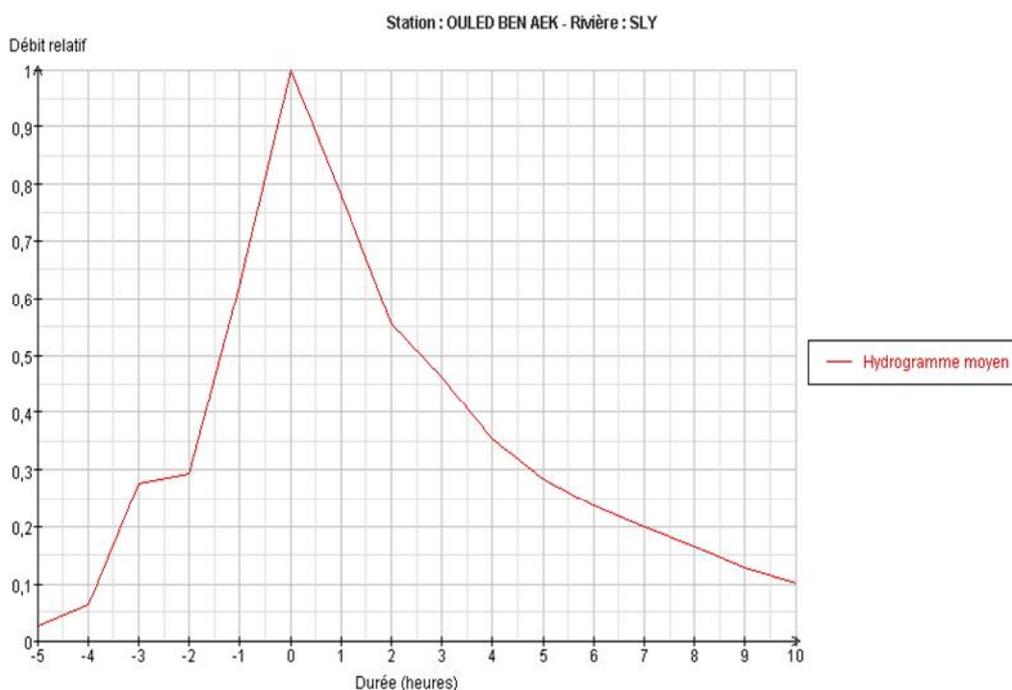


Figure III-14 : Hydrogramme type de la station d'Ouled Ben Abdelkader

**Tableau (III.19) : échantillon de débit seuil pour les différentes durées examinées**

	$d_1=0$ (jours)	$d_2=0,09$ (jours)	$d_3=0,19$ (jours)	$d_4=0,38$ (jours)	$d_5=0,77$ (jours)
1	56.50	32.52	23.13	11.62	5.76
2	56.50	33.26	23.76	12.24	6.07
3	56.70	33.62	23.84	12.24	6.18
4	57.80	33.78	24.93	12.54	6.24
5	59.00	34.00	25.05	12.68	6.58
6	59.00	34.20	25.08	13.02	6.60
7	59.15	34.48	25.94	13.10	6.72
8	59.18	34.59	26.13	13.12	6.76
9	59.47	35.90	26.90	13.23	6.84
10	60.10	38.21	27.38	13.72	7.07
11	60.10	40.22	27.48	14.01	7.51
12	60.30	40.80	27.73	14.30	7.87
13	62.40	40.80	28.20	15.36	7.88
14	63.60	41.63	29.34	15.38	7.99
15	65.80	42.46	29.40	16.73	8.30
16	65.80	45.30	29.64	16.86	8.46
17	68.00	45.94	31.39	16.99	8.50
18	68.11	46.50	31.60	17.30	8.50
19	70.32	46.70	33.16	19.90	8.81
20	70.40	48.03	34.60	20.29	9.00
21	70.40	48.74	36.77	20.74	9.50
22	71.50	49.20	37.06	20.79	9.52
23	71.50	49.55	39.04	21.71	10.04
24	73.90	50.93	40.80	22.16	10.10
25	74.40	52.20	43.00	22.77	10.17
26	75.60	52.27	43.47	24.37	10.37
27	77.20	52.80	48.50	25.16	10.58
28	78.00	54.68	48.84	25.61	10.70
29	81.00	61.30	49.68	27.10	10.80
30	86.20	62.58	53.46	27.24	11.04
31	91.94	63.38	54.21	28.40	13.05
32	92.40	68.67	54.40	29.91	13.40
33	93.70	69.30	56.53	30.80	14.91
34	96.00	69.63	58.20	32.93	16.37
35	96.00	72.00	58.75	32.98	16.58
36	105.00	73.80	60.10	36.20	19.40
37	111.00	74.02	61.30	36.33	20.33
38	114.00	75.69	62.69	43.20	22.29
39	114.21	78.14	62.97	45.30	23.70
40	117.00	78.60	63.60	47.45	25.00
41	117.09	81.61	64.57	49.65	32.43
42	126.00	82.58	72.39	61.57	32.60
43	129.24	91.94	100.31	102.08	33.90
44	141.00	105.57	114.60	112.10	45.25
45	143.90	115.84	128.13	***	49.10
46	148.78	127.51	***	***	107.12

Les valeurs du tableau (III.19) servent pour tracer les quantiles modélisés et les courbes QdF.

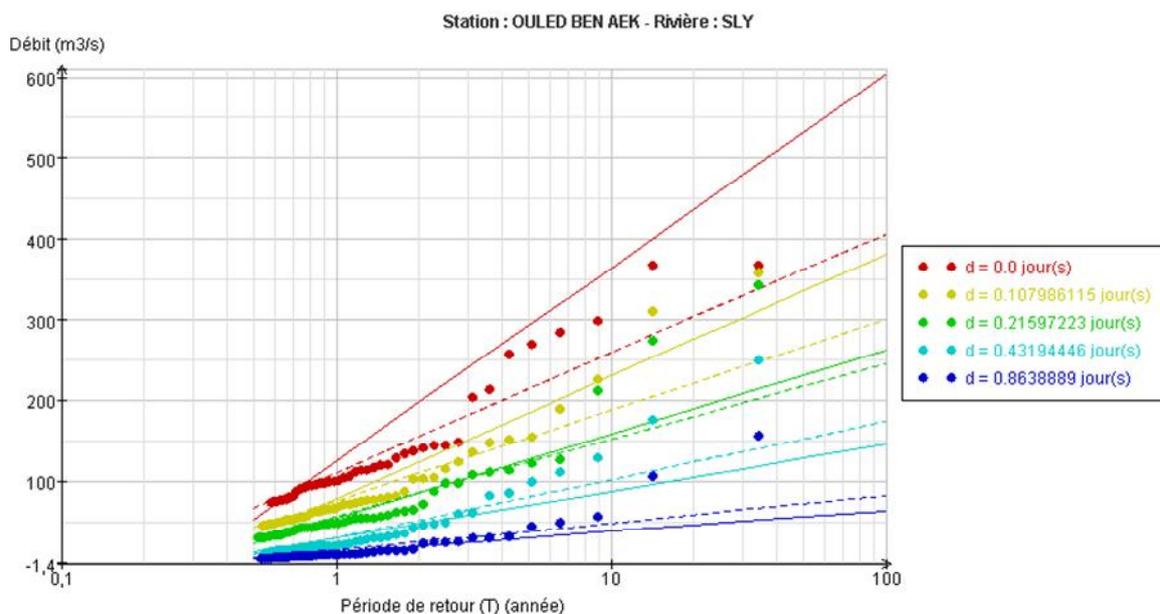


Figure III-15: quantiles modélisés de la station d'Ouled Ben Abdelkader

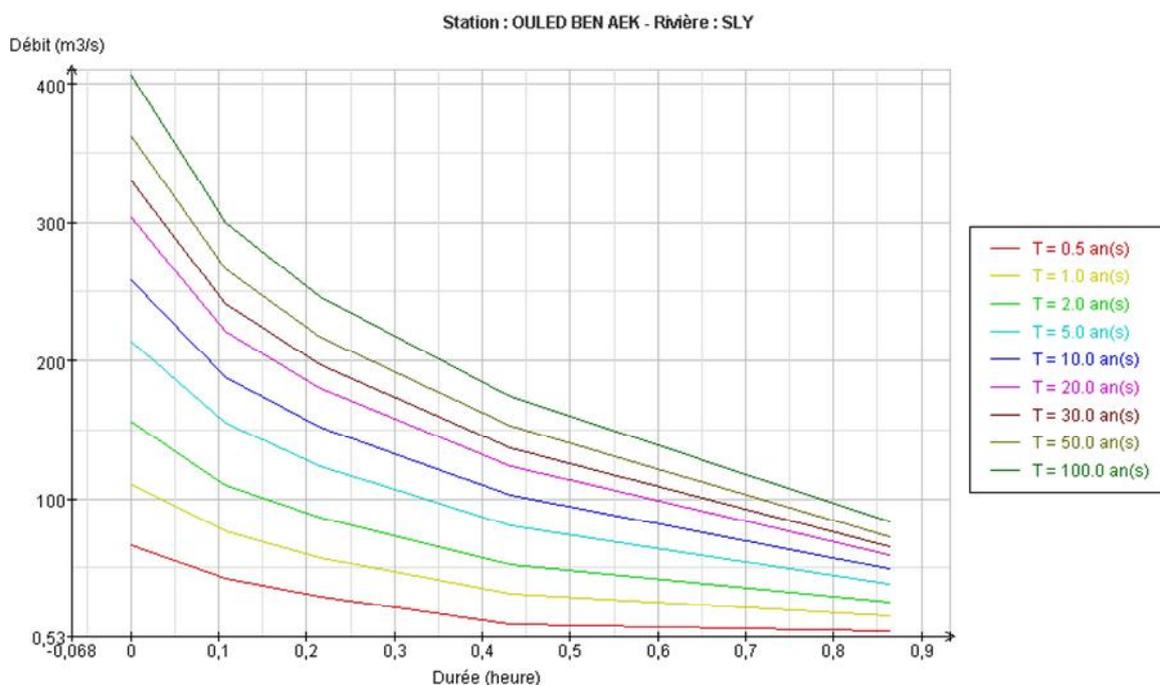


Figure III-16 : Les courbes QdF de la station d'Ouled Ben Abdelkader

Tableau (III.20) : Quantiles théoriques estimés pour le bassin d'Oued Sly

Quantiles Qd (T) (m <sup>3</sup> /s)					
T (an)	d (jour)				
	0	0,10	0,19	0,38	0,77
1	111	51,26	38,199	21,914	12,739
2	156	69,746	54,019	33,099	19,833
5	214	94,184	74,931	47,884	29,212
10	259	113	90,75	59,069	36,306
20	303	131	107	70,254	43,401
30	329	142	116	76,796	47,551
50	362	156	127	85,039	52,78
100	407	174	143	96,224	59,874

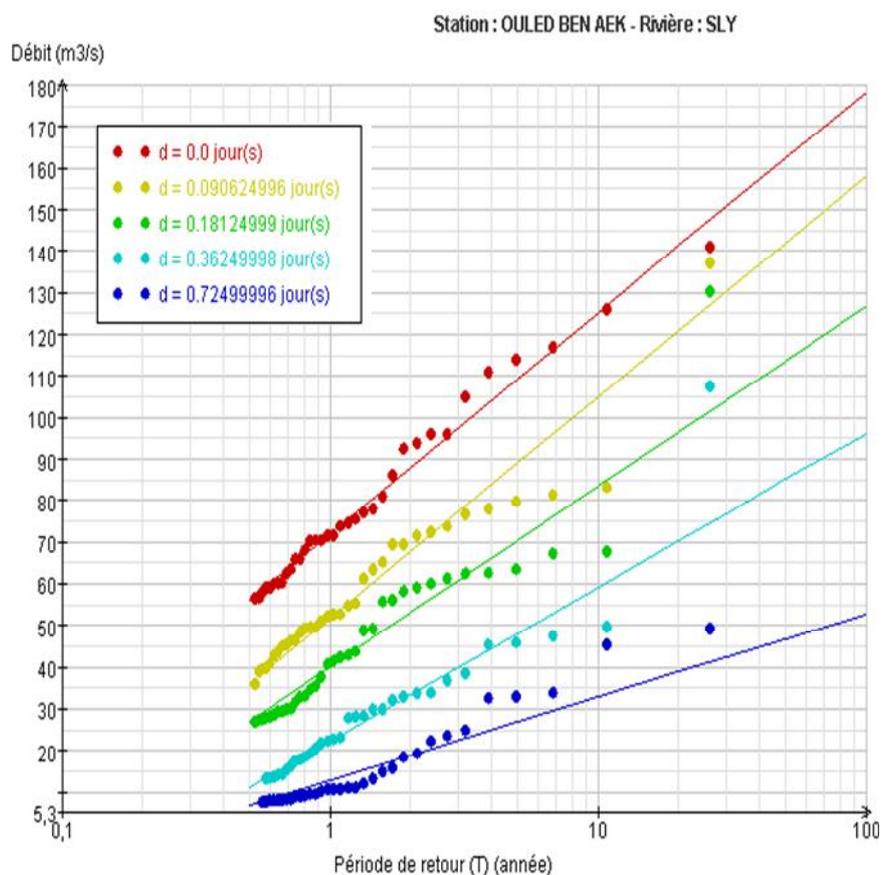


Figure III-17: Courbe QdF ajustée sur les débits seuils selon le modèle convergent

Tableau (III.21): Quantiles modélisé selon le modèle convergent

Quantiles Q (d, T) (m <sup>3</sup> /s)					
T (an)	d (jour)				
	0	0,10	0,19	0,38	0,77
1	75,167	52,901	39,241	24,046	11,687
2	107	75,006	55,638	34,093	16,57
5	148	104	77,314	47,376	23,026
10	180	126	93,711	57,423	27,909
20	211	148	110	67,471	32,792
30	229	161	120	73,348	35,649
50	252	178	132	80,753	39,248
100	284	200	148	90,801	44,131

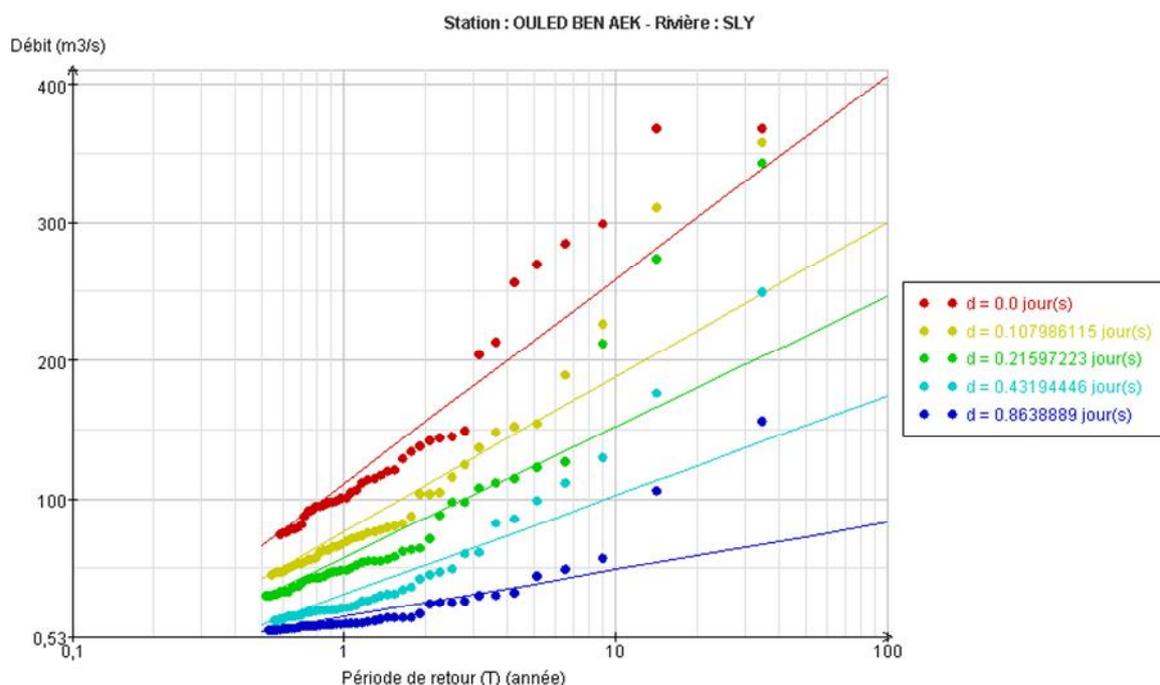


Figure III-18: choix du modèle pour la station d'Ouled Ben Abdelkader

**d) Ajustement du modèle analytique sur les débits-seuils:**

Un échantillonnage sup-seuil a été réalisé pour cinq durée  $d_i$  (0, 0.10, 0.21, 0.43 et 0.86journs) pour objectif de conserver en moyenne deux sélections par an.

Cet échantillon a été ajusté à une loi exponentielle.

Tableau (III.22): paramètres d'ajustement par la loi exponentielle

Station d'Oued Ben A.E.K. Rivière Sly QCX					
Durée en jour	0	0.10	0.21	0.43	0.86
Débit maximum	148.78	127.51	114.60	112.10	45.25
Débit moyen (m <sup>3</sup> /s)	1,74	1,586	1,502	1,391	1,201
Seuil (m <sup>3</sup> /s)	74,416	45,36	29,815	11,771	5,045
MU (N/an)	1,767	1,893	1,977	1,851	1,935
Taux d'Observation (an)	23,773	23,773	23,773	23,773	23,773
Nombre des Valeurs ajustés	42	45	47	44	46
x0	111	76,334	57,698	30,906	14,821
a	64,243	48,539	40,908	31,082	14,811
Durée caractéristique (heures)	8	8	8	8	8
Coefficient redescende	75	75	75	75	75
Coefficient espacement	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864

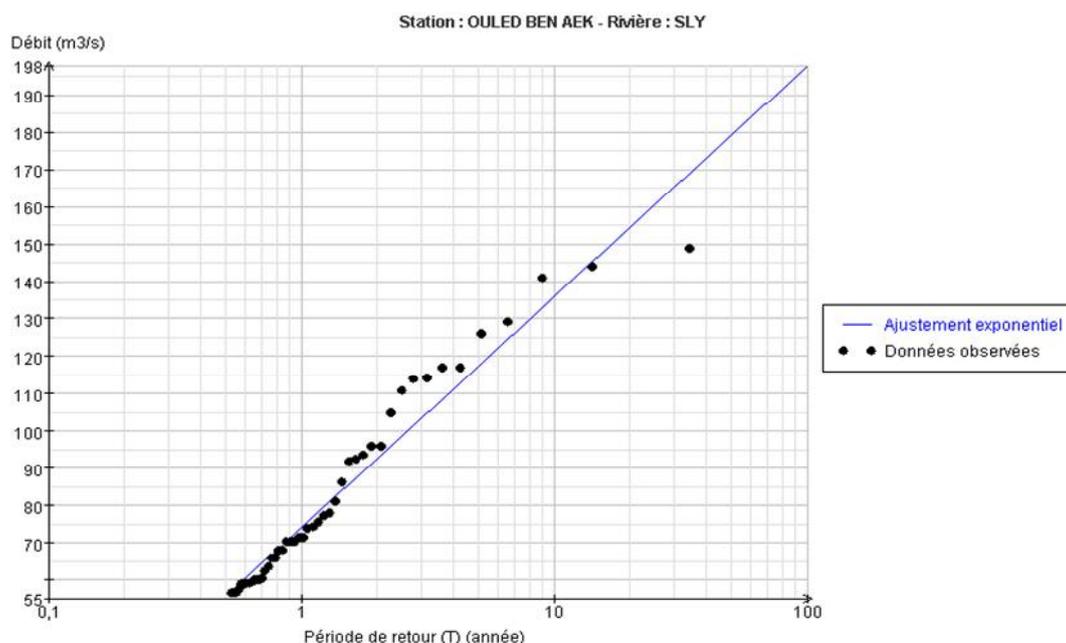


Figure III-19: Ajustement selon la loi exponentielle aux échantillons de débits seuil

A l'aide du modèle convergent, cette nouvelle approche examine en simultané l'ensemble des courbes durées confondues et réalise une consolidation mutuelle de tous les ajustements.

La description en débit-durée-fréquence, quelle qu'en soit la formulation, a de multiples usages : estimation des quantiles de crues en débits moyens ou débits seuil pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, insertion dans une typologie de régime de crue, définition de scénarios hydrologiques de référence pour l'estimation du risque d'inondation, validation des sorties de modèle hydrologique, caractérisation d'une évolution du régime des hautes eaux.

### III.6 Conclusion :

L'étude climatique précisément l'étude de la pluviométrie montre et affirme que le bassin versant est caractérisé par un climat semi-aride, connu par un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec. La variation pluviométrique à l'échelle annuelle à révéler l'existence d'une faible pluviométrie annuelle dans le bassin d'étude qui varie de 200 mm à 450 mm. A l'échelle mensuelle, les précipitations augmentent significativement pour les mois d'hivers et du printemps et diminuent pour les mois d'été pour toute les stations retenues dans l'étude, la période sèche peut s'étaler parfois jusqu'à six mois de Mai jusqu'à Octobre, et la période pluvieuse s'étend d'Octobre à Mai. Concernant l'échelle journalière on remarque bien une irrégularité de la précipitation dans la zone d'étude.

L'étude des précipitations notamment des valeurs moyennes annuelles, mensuelles et maximales journalières durant la période 1970/2011, présente une différence remarquable de la distribution des pluies, on constate **une décroissance de la pluie annuelle du Sud de la région vers le Nord**. Les endroits du Sud du bassin versant à cause de la présence et l'existence des chaînes montagneuses d'Ouarsenis sont pluvieux par rapport aux endroits du Nord , exemple: 532 mm à la station Saâdia (1000 m d'altitude), 450 mm à la station de Bordj-Bounaama (1050 m d'altitude), et 444 mm à la station d'Ain Lellou (900 m d'altitude) contre 257 mm de pluviométrie à la station de Sidi-Yacoub (272 m d'altitude), et 298 mm à la station de Oued-Sly (95 m d'altitude).

# **Chapitre IV: Etude du transport solide**

---

### IV.1 Présentation des données:

Toutes les recherches qui sont faites sur le transport solide mettent en cause la difficulté de mesure du charriage malgré qu'il constitue une part considérable du transport total.

Ce mode de transport nécessite un matériel sophistiqué qui n'existe pas aux stations hydrométriques. Généralement certains auteurs l'estiment à 20% de la suspension. Malheureusement la prolifération et l'imprécision des formules de charriage constituent une première et sérieuse difficulté pour apporter une réponse au problème (Bordas, 1988). Il ne s'agit donc que des mesures du transport en suspension.

#### IV.1.1 Mode de prélèvement :

Le principe général est simple: On filtre les eaux prélevées en un point unique (soit sur le bord, soit au milieu) au moyen de bouteilles en matière plastique d'une contenance de 500cc et on récupère les matériaux en suspension sur des filtres de papier préalablement pesés. On sèche ensuite le papier à l'étuve portée à 100°C et par double pesée, on obtient le poids de la charge solide qu'on ramène à une unité de volume (g/l ou kg/m<sup>3</sup>).

Actuellement les eaux sont prélevées chaque jour à raison d'un échantillon pour les jours d'écoulement normal, avec des teneurs en boue, relativement faibles et ne variant que très lentement au cours d'une journée, et de plusieurs échantillons espacés dans le temps pour les jours à écoulement torrentiel avec des variations très rapides de débit.

En règle générale:

- un prélèvement est effectué durant la montée des eaux; si cette montée est lente (supérieure à une heure) on prélève un échantillon d'eau toutes les heures.
- un prélèvement doit obligatoirement être effectué au maximum de la crue.
- en décrue, et suivant la vitesse de cette décrue, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six (06) premières heures et toutes les 2 heures ensuite.

Cette méthode, utilisée au service hydrologique de façon systématique et routinière sur l'ensemble du réseau hydrométrique a servi de base à l'élaboration des données de cette étude et permet de suivre l'évolution et les variations du débit liquide en relation avec le débit solide à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière.

### IV.1.2 Collecte et présentation des données :

Notre étude est basée surtout sur la suspension vu l'inexistence des données sur le charriage. L'accès à ces données est difficile car le relevé des données doit suivre un pas de temps convenable. Ainsi le débit liquide est enregistré continuellement alors que la concentration n'est mesurée qu'une ou deux fois.

Les mesures des débits liquides sont faites continuellement avec un déversoir en période d'étiage et en moulinet en période de crue, l'observateur est en place pour lire les hauteurs d'eau sur l'échelle limnométrique placée à la station.

Les mesures de concentration ne sont faites qu'en cas de crue, cela est dû certainement à la faiblesse de l'effectif d'observation et de mesure qui doit se répartir sur un réseau hydrométrique relativement dense.

Les données nécessaires pour cette étude sont:

- les débits liquides instantanés obtenues à partir des barèmes d'étalonnage établit par l'A.N.R.H. d'Alger;
- les concentrations journalières instantanées obtenues à partir des fiches d'analyse des eaux;
- un fichier traité sous forme d'annuaire de débit moyen journalier;
- les hauteurs d'eau instantanées obtenues à partir de l'A.N.R.H. d'Oran.

Le contrôle des données constitue la partie ingrate et la phase préliminaire de toute étude statistique. On peut affirmer sans exagération que 30 à 50% du travail consiste à critiquer les séries de données que l'on utilisera dans le calcul. On n'insistera jamais sur cet aspect, car c'est un travail rebutant, fastidieux. Pourtant, il n'y a pas de meilleur moyen d'acquérir la notion des ordres de grandeur. De ce contrôle dépend toute la suite de l'étude.

La mise en forme du fichier des données consiste à partir des barèmes d'étalonnage fournis par les différentes courbes de tarage, d'établir manuellement la correspondance entre la hauteur d'eau mesurée à la station et le débit liquide donné par le tarage, à chaque fois que la valeur de la concentration en éléments fins existe.

On note qu'à chaque fois qu'il y a eu crue, la courbe de tarage change d'aspect suite à un changement de place du zéro de l'échelle qui peut nous renseigner sur l'instabilité du site de la station.

Suite au détarage de la station; les barèmes d'étalonnage diffèrent pour une même année, ce qui est le cas pour notre zone d'étude.

Il existe une relation entre les débits liquides et les débits solides. Pour calculer ces derniers, on procède comme suit: les débits liquides instantanés exprimés en  $m^3/s$  sont transformés en débits solides instantanés par l'intermédiaire des concentrations qui sont exprimées en g/l.

La masse de données à traiter est très importante. Le nombre de valeurs de débit liquide jaugé et pour lequel la concentration en éléments fins est mesurée reste considérable pour la période 1985/1986 à 2003/2004.

### IV.2. Traitement des données :

L'objectif à atteindre à travers le traitement des données est de voir comment se présente l'écoulement durant la période d'étude. Quelles en sont les années sèches des années humides, pouvant nous aider dans la recherche de modèles entre le débit solide-débit liquide pour la station du bassin versant.

#### IV.2.1 Méthode de corrélation entre débits liquides et solides :

C'est la méthode sur laquelle nous avons axé notre travail. Elle fait apparaître les points aberrants ou anormaux. Avant d'éliminer un tel point parce qu'il est sans valeur et imprécis, il est prudent d'examiner les autres paramètres qui peuvent influencer l'événement.

La variabilité des transports solides en suspension ne peut survenir seule si ce n'est l'existence en parallèle, d'une variabilité du vecteur de ces matériaux solides transportés en suspension.

Il existe donc une relation entre les débits liquides et les débits solides. Pour calculer ces derniers, on procède comme suit : les débits liquides instantanés exprimés en  $m^3/s$  sont transformés en débits solides instantanés par l'intermédiaire des concentrations qui sont exprimées en gramme par litre.

En général cette méthode consiste à apporter les données point par point puis à ajuster une équation par la méthode des moindres carrées pour deux variables. On détermine des relations régressives entre deux paramètres ensuite on utilise ces relations pour calculer et combler les données manquantes. On se limite si possible aux méthodes de régression linéaire et baserons les travaux sur la méthode des moindres carrées.

Afin de connaître quel type de fonction doit-on utiliser, il est recommandé de tracer les diagrammes de dispersion et l'allure du graphe orientera le choix du modèle.

Les principaux modèles régressifs sont :

- Le modèle linéaire:  $Y = a + b X$

- Le modèle parabolique:  $Y = a + bX + cX^2$
- Le modèle exponentiel:  $Y = b e^{aX}$
- Le modèle puissance:  $Y = b X^a$
- Le modèle logarithmique:  $Y = b \ln X + a$

Les coefficients a,b,c sont des constantes à déterminer par la méthode des moindres carrés. Lorsque les points ne sont pas alignés, mais proches d'une courbe usuelle (parabole, hyperbole, etc. ...).

Le principe des moindres carrés a pour but de trouver l'équation d'ajustement qui rend minimum l'écart ou la différence entre les valeurs observées dans la réalité et les valeurs théoriques données par la courbe.

Pour s'assurer de la validité objective de l'ajustement, on calcule le coefficient de corrélation linéaire qui sert à mesurer l'intensité ou le degré de dépendance entre les deux variables (débit liquide et débit solide). En effet plus sa valeur est supérieure à 0,7 et plus l'ajustement des observations est bon.

### **IV.2.2 Etablissement des relations de corrélation :**

#### **IV.2.2.1 Etablissement des relations pour l'ensemble des données (relation interannuelle) :**

Avant d'ajuster n'importe quel modèle, la mise en graphe montre une dispersion des points dont il est visuellement difficile de faire sortir un modèle régressif représentatif. Surtout que la majeure partie des points oscille autour de zéro si on se base sur la mise en graphe, la dispersion des points permet de conclure que si, un modèle de régression peut être ajusté à ces données, il ne peut être que physiquement accepté et cela car les débits sont des paramètres aléatoires, présentant des fluctuations qui peuvent varier d'un moment à un autre.

On associe toutes les observations (couples) et on recherche les relations interannuelles, on utilisant les différents modèles régressifs. Selon la valeur du coefficient de détermination, on retient le modèle puissance.

La mise en graphe de l'ensemble des données de débits solide et liquide; comme le montre la figure laisse apparaître une dispersion sous forme d'éventail dont le modèle puissance semble le mieux l'ajuster au vu de la valeur du coefficient de détermination  $R^2$ .

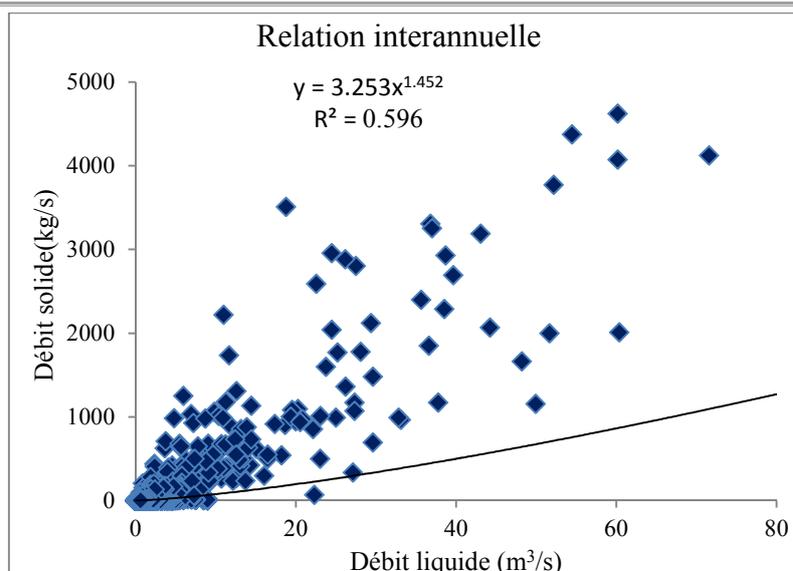


Figure IV-1 : Modèle retenu pour la relation interannuelle

Le modèle régressif retenu a servi pour le calcul de l'apport de sédiments apporté annuellement au droit de la station hydrométrique.

Tableau (IV.1) : Modèles retenus à l'échelle interannuelle

Mode de régression	Equation	R <sup>2</sup>
Linéaire	$Q_s = 85.192 Q_l - 104.69$	<b>0.54</b>
Parabolique	$Q_s = 1.0106 Q_l^2 + 39.159 Q_l - 34.018$	<b>0.58</b>
Exponentiel	$Q_s = 1.387 e^{0.238 Q_l}$	<b>0.28</b>
Puissance	$Q_s = 3.253 Q_l^{1.452}$	<b>0.60</b>
Logarithmique	$Q_s = 153.37 \ln Q_l + 145.21$	<b>0.11</b>

#### IV.2.2.2 Etablissement des relations de corrélation à l'échelle annuelle :

Pour cela, on associe toutes les observations annuelles et pour chaque année, on fait la mise en graphes qui permet le choix du modèle régressif.

Au vu de la valeur de R<sup>2</sup>, il y a lieu de constater que deux modèles ajustent les données, à savoir le modèle puissance et parabolique à l'exception de quelques années. On reporte quelques figures qui semblent les plus représentatives des modèles retenus.

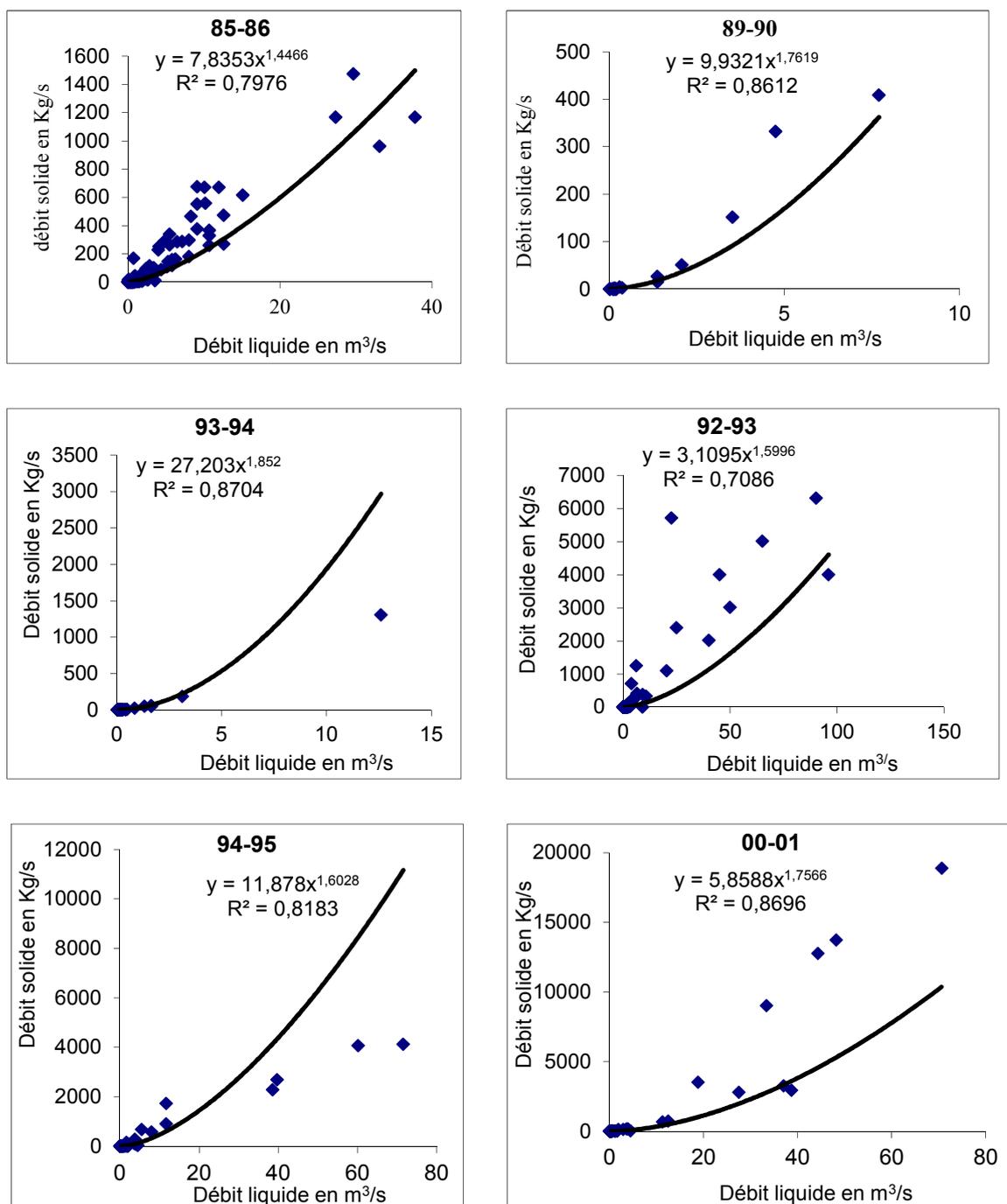


Figure IV-3: Relation entre débit liquide et débit solide à l'échelle annuelle

Tableau (IV.2): corrélation à l'échelle annuelle

Année	Mode de régression	Equation	R <sup>2</sup>
85-86	Linéaire	$Q_s = 38.73Q_l - 15.281$	0.79
	Parabolique	$Q_s = 0.3621Q_l^2 + 48.673 - 29.068$	0.79
	Exponentiel	$Q_s = 2.0194e^{0.339Q_l}$	0.43
	Puissance	$Q_s = 7.8353Q_l^{1.4466}$	<b>0.80</b>
	Logarithmique	$Q_s = 85.122\ln Q_l + 111.39$	0.41
86-87	Linéaire	$Q_s = 51.39Q_l - 2.891$	0.79
	Parabolique	$Q_s = 13.26Q_l^2 + 39.11Q_l - 1.709$	<b>0.79</b>
	Exponentiel	$Q_s = 0.5136e^{5.1542Q_l}$	0.60
	Puissance	$Q_s = 60.128Q_l^{1.7708}$	0.66
	Logarithmique	$Q_s = 14.756\ln Q_l + 38.38$	0.78
87-88	Linéaire	$Q_s = 16.379Q_l + 45.99$	0.41
	Parabolique	$Q_s = 0.3364Q_l^2 + 0.8651Q_l + 14.287$	0.76
	Exponentiel	$Q_s = 0.3498e^{0.1487Q_l}$	0.18
	Puissance	$Q_s = 2.6645Q_l^{1.81}$	<b>0.76</b>
	Logarithmique	$Q_s = 99.227\ln Q_l + 182.92$	0.39
89-90	Linéaire	$Q_s = 3.8958Q_l - 5.389$	0.091
	Parabolique	$Q_s = 3.4997Q_l^2 - 17.233 + 16.017$	0.52
	Exponentiel	$Q_s = 0.16e^{0.2033Q_l}$	0.01
	Puissance	$Q_s = 9.9321Q_l^{1.7619}$	<b>0.861</b>
	Logarithmique	$Q_s = 2.344\ln Q_l + 4.4616$	0.019
92-93	Linéaire	$Q_s = 10.256Q_l - 41.111$	0.53
	Parabolique	$Q_s = 0.107Q_l^2 - 12.2Q_l + 52.916$	0.69
	Exponentiel	$Q_s = 0.5869e^{0.0439Q_l}$	0.38
	Puissance	$Q_s = 3.1095Q_l^{1.5996}$	<b>0.71</b>
	Logarithmique	$Q_s = 102.1\ln Q_l + 1.2853$	0.12
93-94	Linéaire	$Q_s = 100.27Q_l - 23.458$	0.77
	Parabolique	$Q_s = 5.5392Q_l^2 + 34.323Q_l - 4.1399$	0.79
	Exponentiel	$Q_s = 0.7647e^{0.8019Q_l}$	0.87
	Puissance	$Q_s = 27.203Q_l^{1.852}$	<b>0.87</b>
	Logarithmique	$Q_s = 92.21\ln Q_l + 191.12$	0.35

Tableau (IV.2): corrélation à l'échelle annuelle (suite)

94-95	Linéaire	$Q_s = 63.582Q_l - 10.848$	0.96
	Parabolique	$Q_s = 0.3395Q_l^2 + 83.559Q_l - 25.827$	0.77
	Exponentiel	$Q_s = 1.9795e^{0.1553Q_l}$	0.38
	Puissance	$Q_s = 11.878Q_l^{1.6028}$	<b>0.82</b>
	Logarithmique	$Q_s = 337.58\ln Q_l + 435.06$	0.55
95-96	Linéaire	$Q_s = 70.369Q_l - 209.95$	0.82
	Parabolique	$Q_s = 1.093Q_l^2 + 5.576Q_l - 4.4924$	<b>0.83</b>
	Exponentiel	$Q_s = 6.1335e^{0.116Q_l}$	0.41
	Puissance	$Q_s = 6.107Q_l^{0.752}$	0.29
	Logarithmique	$Q_s = 263.54\ln Q_l - 53.668$	0.19
96-97	Linéaire	$Q_s = 47.052Q_l - 54.62$	0.57
	Parabolique	$Q_s = -0.92 Q_l^2 + 62.489 Q_l - 43.24$	0.57
	Exponentiel	$Q_s = 3.559e^{0.4Q_l}$	0.4
	Puissance	$Q_s = 8.0125Q_l^{1.457}$	<b>0.63</b>
	Logarithmique	$Q_s = 96.816\ln Q_l + 81.203$	0.29
97-98	Linéaire	$Q_s = 66.23Q_l - 54.62$	0.90
	Parabolique	$Q_s = 1.216Q_l^2 + 34.069Q_l - 17.28$	<b>0.83</b>
	Exponentiel	$Q_s = 3.4521e^{0.28Q_l}$	0.47
	Puissance	$Q_s = 7.29Q_l^{1.358}$	0.55
	Logarithmique	$Q_s = 206.12\ln Q_l + 116.26$	0.44
98-99	Linéaire	$Q_s = 1.664Q_l - 21.132$	0.04
	Parabolique	$Q_s = 1.664Q_l^2 + 22.92Q_l - 10.809$	<b>0.49</b>
	Exponentiel	$Q_s = 3.5017e^{0.034Q_l}$	0.02
	Puissance	$Q_s = 3.5208Q_s^{0.678}$	0.13
	Logarithmique	$Q_s = 38.52\ln Q_l + 20.574$	0.27
00-01	Linéaire	$Q_s = 228.05Q_l - 263.82$	0.86
	Parabolique	$Q_s = 2.9119Q_l^2 + 78.67Q_l - 52.231$	0.80
	Exponentiel	$Q_s = 0.353e^{0.236Q_l}$	0.57
	Puissance	$Q_s = 5.859Q_l^{1.7566}$	<b>0.87</b>
	Logarithmique	$Q_s = 926.33\ln Q_l + 1850$	0.38

Tableau (IV.2): corrélation à l'échelle annuelle (suite)

01-02	Linéaire	$Q_s = 79.782Q_l - 38.659$	0.82
	Parabolique	$Q_s = 3.229Q_l^2 + 16.05Q_l - 0.8809$	<b>0.86</b>
	Exponentiel	$Q_s = 0.222e^{1.298Q_l}$	0.56
	Puissance	$Q_s = 4.273Q_l^{1.7383}$	0.73
	Logarithmique	$Q_s = 183.93\ln Q_l + 343.84$	0.46
02-03	Linéaire	$Q_s = 43.303Q_l - 31.276$	0.28
	Parabolique	$Q_s = 15.55Q_l^2 - 39.558Q_l + 18.356$	<b>0.67</b>
	Exponentiel	$Q_s = 8.085e^{1.298Q_l}$	0.37
	Puissance	$Q_s = 0.8759Q_l^{1.219}$	0.52
	Logarithmique	$Q_s = 13.039\ln Q_l + 26.86$	0.04
03-04	Linéaire	$Q_s = 111.46Q_l - 80.848$	0.96
	Parabolique	$Q_s = 3.129Q_l^2 + 35.97Q_l - 21.27$	<b>0.79</b>
	Exponentiel	$Q_s = 1.266e^{0.396Q_l}$	0.25
	Puissance	$Q_s = 3.39Q_l^{1.6497}$	0.47
	Logarithmique	$Q_s = 174.1\ln Q_l + 120.05$	0.25

Le tableau suivant regroupe les résultats de toute la période d'étude.

**Tableau (IV.3) : Modèles retenus à l'échelle annuelle**

Année	Mode de régression	Equation	R <sup>2</sup>
85-86	Puissance	$Q_s = 7.8353Q_l^{1.4466}$	<b>0.80</b>
86-87	Parabolique	$Q_s = 13.26Q_l^2 + 39.14Q_l - 1.7093$	<b>0.79</b>
87-88	Puissance	$Q_s = 2.6645Q_l^{1.81}$	<b>0.86</b>
89-90	Puissance	$Q_s = 9.932Q_l^{1.7619}$	<b>0.86</b>
92-93	Puissance	$Q_s = 3.1095Q_l^{1.5996}$	<b>0.71</b>
93-94	Puissance	$Q_s = 27.203Q_l^{1.852}$	<b>0.87</b>
94-95	Puissance	$Q_s = 11.878Q_l^{1.6028}$	<b>0.82</b>
95-96	Parabolique	$Q_s = 1.093Q_l^2 + 5.576Q_l - 4.4924$	<b>0.83</b>
96-97	Puissance	$Q_s = 8.0125Q_l^{1.457}$	<b>0.63</b>
97-98	Parabolique	$Q_s = 1.216Q_l^2 + 34.069Q_l - 17.28$	<b>0.83</b>
98-99	Parabolique	$Q_s = 1.664Q_l^2 + 22.92Q_l - 10.809$	<b>0.49</b>
00-01	Puissance	$Q_s = 5.859Q_l^{1.7566}$	<b>0.87</b>
01-02	Parabolique	$Q_s = 3.229Q_l^2 + 16.05Q_l - 0.8809$	<b>0.86</b>
02-03	Parabolique	$Q_s = 15.55Q_l^2 - 39.558Q_l + 18.356$	<b>0.67</b>
03-04	Parabolique	$Q_s = 3.129Q_l^2 + 35.97Q_l - 21.27$	<b>0.79</b>

**IV.2.2.3 Etablissement des relations de corrélation à l'échelle mensuelle :**

Pour toute la période 1985/1986 à 2003/2004 on fait la mise en graphe des valeurs mensuelles (Ql-Qs) qui permet le choix du modèle régressif.

Tableau (IV.4) : Corrélation à l'échelle mensuelle

Mois	Mode de régression	Equation	R <sup>2</sup>
septembre	linéaire	$Q_s = 4.6887Q_l + 4.2863$	0.08
	Parabolique	$Q_s = -0.2313Q_l^2 + 6.4565Q_l + .207$	0.08
	exponentielle	$Q_s = 0.1818 e^{0.579Q_l}$	0.28
	puissance	$Q_s = 0.7714Q_l^{0.989}$	<b>0.29</b>
	logarithmique	$Q_s = 8.56 \ln Q_l + 16.123$	0.09
octobre	Linéaire	$Q_s = 167.01Q_l - 327.04$	0.61
	Parabolique	$Q_s = 13.271Q_l^2 - 45.912Q_l + 33.818$	<b>0.73</b>
	exponentielle	$Q_s = 0.32 e^{0.484Q_l}$	0.22
	puissance	$Q_s = 0.8049Q_l^{1.042}$	0.26
	logarithmique	$Q_s = 111.61 \ln Q_l + 67.415$	0.06
novembre	Linéaire	$Q_s = 67.179Q_l - 38.873$	0.73
	Parabolique	$Q_s = 1.0718Q_l^2 + 48.318Q_l - 19.88$	<b>0.73</b>
	exponentielle	$Q_s = 0.7278 e^{0.506Q_l}$	0.39
	puissance	$Q_s = 5.132Q_l^{1.3916}$	0.58
	logarithmique	$Q_s = 88.864 \ln Q_l + 157.98$	0.27
décembre	linéaire	$Q_s = 70.507Q_l - 33.761$	0.78
	Parabolique	$Q_s = 7.476Q_l^2 - 1.578Q_l + 3.408$	0.70
	exponentielle	$Q_s = 0.459 e^{0.9569Q_l}$	0.42
	puissance	$Q_s = 7.9719Q_l^{1.6834}$	<b>0.78</b>
	logarithmique	$Q_s = 8.56 \ln Q_l + 16.123$	0.24
janvier	linéaire	$Q_s = 47.38Q_l - 15.026$	0.67
	Parabolique	$Q_s = -0.9788Q_s^2 + 84.322Q_s - 50.444$	0.72
	exponentielle	$Q_s = 2.078 e^{0.2626Q_l}$	0.24
	puissance	$Q_s = 10.719Q_l^{1.82}$	<b>0.91</b>
	logarithmique	$Q_s = 110.48 \ln Q_l + 138.59$	0.26
février	linéaire	$Q_s = 49.214Q_l - 38.778$	0.71
	Parabolique	$Q_s = 0.2224Q_l^2 + 37.888Q_l - 19.029$	0.71
	exponentielle	$Q_s = 3.028 e^{0.174Q_l}$	0.39
	puissance	$Q_s = 26.949Q_l^{1.1501}$	<b>0.78</b>
	logarithmique	$Q_s = 193.01 \ln Q_l + 160.49$	0.37

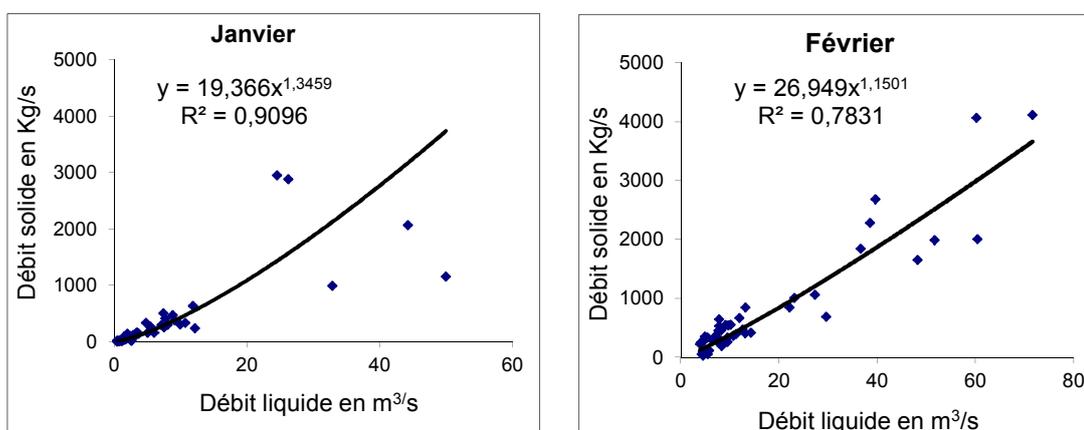
Tableau (IV.4) : Corrélation à l'échelle mensuelle (suite)

Mars	linéaire	$Q_s = 73.867Q_l - 105.2$	0.88
	Parabolique	$Q_s = 0.816Q_l^2 + 27.709Q_l - 6.244$	0.85
	exponentielle	$Q_s = 2.4909e^{0.1812Q_l}$	0.37
	puissance	$Q_s = 13.098Q_l^{1.3857}$	<b>0.92</b>
	logarithmique	$Q_s = 251.86\ln Q_l + 240.62$	0.27
avril	linéaire	$Q_s = 68.26Q_l - 64.443$	0.79
	Parabolique	$Q_s = 1.58Q_l^2 + 23.865Q_l - 4.54$	0.78
	exponentielle	$Q_s = 1.2768e^{0.3273Q_l}$	0.45
	puissance	$Q_s = 12.193Q_l^{1.3258}$	<b>0.82</b>
	logarithmique	$Q_s = 130.26\ln Q_l + 162.5$	0.27
Mai	linéaire	$Q_s = 24.575Q_l - 7.352$	0.38
	Parabolique	$Q_s = -2.7312Q_l^2 + 73.055Q_l - 57.141$	<b>0.57</b>
	exponentielle	$Q_s = 1.5655e^{0.3697Q_l}$	0.34
	puissance	$Q_s = 3.105Q_l^{1.5849}$	0.49
	logarithmique	$Q_s = 83.102\ln Q_l + 37.883$	0.34
juin	linéaire	$Q_s = 9.081Q_l - 11.525$	0.47
	Parabolique	$Q_s = 0.4878Q_l^2 - 0.99905Q_l + 5.39$	<b>0.63</b>
	exponentielle	$Q_s = 1.2084e^{0.2909Q_l}$	0.28
	puissance	$Q_s = 1.5125Q_l^{0.85}$	0.21
	logarithmique	$Q_s = 13.13\ln Q_l + 2.1871$	0.08
juillet	linéaire	$Q_s = 46.355Q_l - 23.583$	0.19
	Parabolique	$Q_s = 18.508Q_l^2 - 51.67Q_l + 69.584$	<b>0.39</b>
	exponentielle	$Q_s = 7.442e^{-0.5498Q_l}$	0.03
	puissance	$Q_s = 5.467Q_l^{-1.9216}$	0.18
	logarithmique	$Q_s = 32.648\ln Q_l + 42.225$	0.04
août	linéaire	$Q_s = 0.5152Q_l + 2.2328$	0.07
	Parabolique	$Q_s = -0.241Q_l^2 + 2.8833Q_l + 0.229$	0.07
	exponentielle	$Q_s = 0.3939e^{0.3013Q_l}$	0.5
	puissance	$Q_s = 0.5659Q_l^{1.0725}$	<b>0.53</b>
	logarithmique	$Q_s = 1.829\ln Q_l + 2.856$	0.07

Au vu du tableau (IV.4), le modèle puissance offre la meilleure corrélation, sauf pour les mois de novembre, mai, juin et juillet où le modèle parabolique l'emporte.

**Tableau (IV.5) : Modèles retenus à l'échelle mensuelle**

Mois	Mode de régression	Equation	R <sup>2</sup>
septembre	Puissance	$Q_s = 0.7714Q_l^{0.989}$	<b>0.29</b>
octobre	Parabolique	$Q_s = 13.271Q_l^2 - 45.912Q_l + 33.818$	<b>0.73</b>
novembre	Parabolique	$Q_s = 1.0718Q_l^2 + 48.318Q_l - 19.88$	<b>0.73</b>
décembre	Puissance	$Q_s = 7.9719Q_l^{1.6834}$	<b>0.78</b>
janvier	Puissance	$Q_s = 19.366Q_l^{1.3459}$	<b>0.91</b>
février	Puissance	$Q_s = 26.949Q_l^{1.1501}$	<b>0.78</b>
Mars	Puissance	$Q_s = 13.098Q_l^{1.3857}$	<b>0.92</b>
avril	Puissance	$Q_s = 12.193Q_l^{1.3258}$	<b>0.82</b>
mai	Parabolique	$Q_s = -2.7312Q_l^2 + 73.055Q_l - 57.141$	<b>0.57</b>
juin	Parabolique	$Q_s = 0.4878Q_l^2 - 0.99905Q_l + 5.39$	<b>0.63</b>
juillet	Parabolique	$Q_s = 18.508Q_l^2 - 51.67Q_l + 69.584$	<b>0.39</b>
août	Puissance	$Q_s = 47.728Q_l^{1.355}$	<b>0.91</b>



**Figure IV-4 : Relation entre débit liquide et débit solide à l'échelle mensuelle**

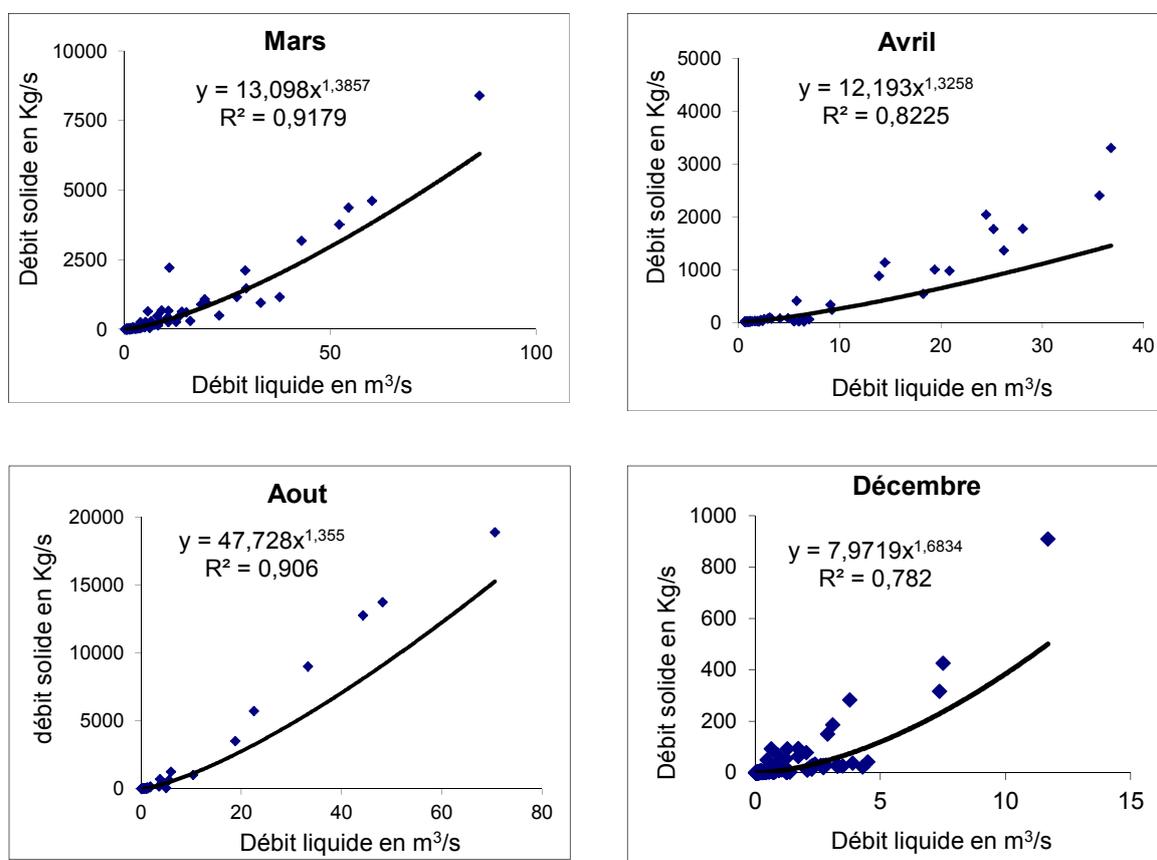


Figure IV-4: Relation entre débit liquide et débit solide à l'échelle mensuelle (suite)

#### IV.2.2.4 Etablissement des relations de corrélation à l'échelle saisonnière :

On regroupe les observations (débit liquide, débit solide) mensuelles selon le découpage hydrologique habituel en quatre saisons, à savoir :

Automne : Septembre, Octobre et Novembre ;

Hiver : Décembre, Janvier et février ;

Printemps : Mars, Avril et Mai ;

L'été : juin, juillet et Août.

On fait la mise en graphe qui permet le choix du modèle régressif. Au vu de la valeur du coefficient de détermination  $R^2$ , l'approche puissance et parabolique offre une bonne corrélation pour le regroupement des données par saison.

Tableau (IV.6) : Corrélation à l'échelle saisonnière

saison	Mode régression	Equation	R <sup>2</sup>
<b>Automne</b>	linéaire	$Q_s = 75,377Q_l - 84.518$	0.47
	Parabolique	$Q_s = 3.6051Q_l^2 + 37.768Q_l - 73.845$	<b>0.89</b>
	exponentielle	$Q_s = 0.4309 e^{0.5277 Q_l}$	0.32
	puissance	$Q_s = 1.9223Q_l^{1.1496}$	0.38
	logarithmique	$Q_s = 73.444\ln Q_l + 104.73$	0.11
<b>Hiver</b>	Linéaire	$Q_s = 49.12Q_l - 22.858$	0.83
	Parabolique	$Q_s = 0.009Q_l^2 + 49.079Q_l - 22.808$	0.83
	exponentielle	$Q_s = 1.8457 e^{0.227 Q_l}$	0.27
	puissance	$Q_s = 8.8003Q_l^{1.6643}$	<b>0.89</b>
	logarithmique	$Q_s = 124.62\ln Q_l + 158.22$	0.29
<b>Printemps</b>	linéaire	$Q = 24.575Q_l - 7.3525$	0.38
	Parabolique	$Q_s = 0.7097Q_l^2 + 36.949Q_l - 43.652$	<b>0.93</b>
	exponentielle	$Q_s = 1.5655 e^{0.3697 Q_l}$	0.34
	puissance	$Q_s = 3.1056Q_l^{1.5649}$	0.49
	logarithmique	$Q_s = 83.102\ln Q_l + 37.8830$	0.34
<b>Eté</b>	Linéaire	$Q_s = 275.59Q_l + 609.89$	0.90
	Parabolique	$Q_s = 1.1939Q_l^2 + 209.75Q_l - 453.36$	<b>0.97</b>
	exponentielle	$Q_s = 1.2255 e^{0.2211 Q_l}$	0.45
	puissance	$Q_s = 1.6067Q_l^{0.5473}$	0.28
	logarithmique	$Q_s = 7.2572\ln Q_l + 11.72$	0.36

Tableau (IV.7) : Modèles retenus à l'échelle saisonnière

saison	Mode de régression	Equation	R <sup>2</sup>
Automne	Parabolique	$Q_s = 3.6051Q_l^2 + 37.768Q_l - 73.845$	<b>0.89</b>
Hiver	Puissance	$Q_s = 8.8003Q_l^{1.6643}$	<b>0.89</b>
Printemps	Parabolique	$Q_s = 0.7097Q_l^2 + 36.949Q_l - 43.652$	<b>0.93</b>
Eté	Parabolique	$Q_s = 1.1939Q_l^2 + 209.75Q_l - 453.36$	<b>0.97</b>

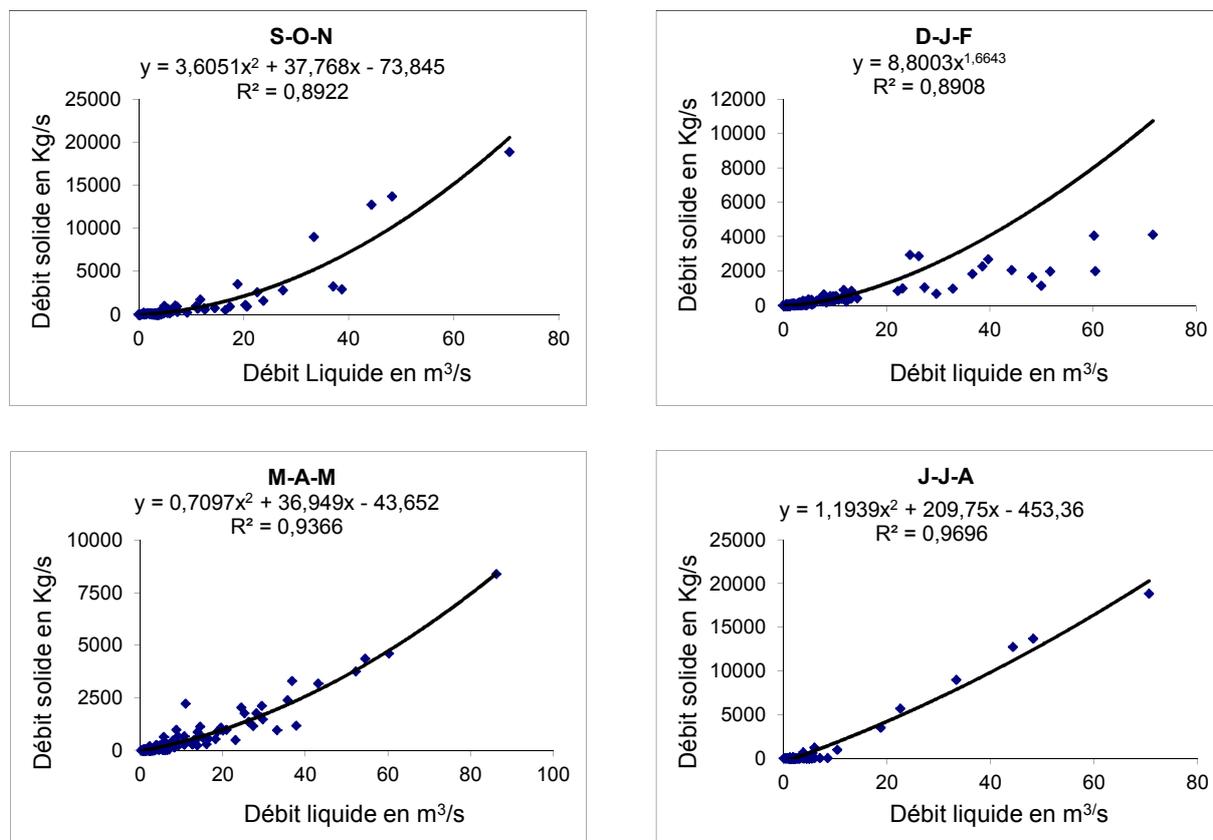


Figure IV-5 : relation entre débit liquide et débit solide à l'échelle saisonnière

#### IV.2.2.5 Etablissement des relations de corrélation à l'échelle des crues :

Vu que la plupart des effets de transport solide se manifestent durant les crues, on a sélectionné quelques crues exceptionnelles pour savoir la relation qui existe entre les débits liquides et solides.

Les crues sélectionnées sont en nombre de 16 crues, on s'est basé pour cette sélection sur la période où figure le plus grand nombre de prélèvement de concentration ainsi que le plus grand nombre d'apparition des crues.

On regroupe les observations débit liquide, débit solide de chaque crue, et la mise en graphique orientera le choix du modèle régressif.

Tableau (IV.8) : corrélation à l'échelle des crues

Crue	Mode de régression	Equation	R <sup>2</sup>
11-13/02/85	linéaire	$Q_s = 51.085Q_l - 33.213$	0.82
	parabolique	$Q_s = 1.5172Q_l^2 + 70.662Q_l - 74.766$	0.83
	puissance	$Q_s = 11.433Q_l^{1.667}$	<b>0.92</b>
	exponentielle	$Q_s = 18.23e^{0.3412Q_l}$	0.73
	logarithmique	$Q_s = 212.85\ln Q_l - 48.69$	0.75
20-22/02/85	linéaire	$Q_s = 36.956Q_l - 5.8424$	0.84
	parabolique	$Q_s = -0.6903Q_l^2 + 62.437Q_l - 128.15$	0.86
	puissance	$Q_s = 24.739Q_l^{1.1107}$	<b>0.89</b>
	exponentielle	$Q_s = 82.53e^{0.0895Q_l}$	0.74
	logarithmique	$Q_s = 391.32\ln Q_l - 365.01$	0.73
10-16/02/87	linéaire	$Q_s = 48.177Q_l - 141.34$	0.97
	parabolique	$Q_s = 0.6688Q_l^2 + 26.256Q_l - 46.586$	0.97
	puissance	$Q_s = 4.1613Q_l^{1.7453}$	<b>0.98</b>
	exponentielle	$Q_s = 23.265e^{0.1538Q_l}$	0.83
	logarithmique	$Q_s = 444.88\ln Q_l - 476.26$	0.77
21-27/02/87	linéaire	$Q_s = 36.17Q_l - 97.014$	0.97
	parabolique	$Q_s = 0.1769Q_l^2 + 25.808Q_l - 40.198$	<b>0.98</b>
	puissance	$Q_s = 8.6098Q_l^{1.3634}$	0.95
	exponentielle	$Q_s = 56.125e^{0.0679Q_l}$	0.84
	logarithmique	$Q_s = 653.88\ln Q_l - 921.55$	0.88
28-30/11/89	Linéaire	$Q_s = 26.322Q_l - 32.228$	0.97
	parabolique	$Q_s = 1.9814Q_l^2 + 4.8659Q_l + 3.497$	0.98
	puissance	$Q_s = 8.483Q_l^{1.0177}$	<b>0.99</b>
	exponentielle	$Q_s = 9.772e^{0.351Q_l}$	0.92
	logarithmique	$Q_s = 92.494\ln Q_l - 27.522$	0.78
4/01/90	Linéaire	$Q_s = 55.072Q_l + 4.586$	0.80
	parabolique	$Q_s = -29Q_s^2 + 387.04Q_l - 851.43$	0.80
	puissance	$Q_s = 39.994Q_l^{1.189}$	<b>0.80</b>
	exponentielle	$Q_s = 91.172e^{0.2069Q_l}$	0.71
	logarithmique	$Q_s = 312.85\ln Q_l - 208.84$	0.67

Tableau (IV.8) : corrélation à l'échelle des crues (suite)

7-9/02/94	Linéaire	$Q_s = 82.457Q_l - 569.85$	0.94
	parabolique	$Q_s = 0.5017Q_l^2 + 33.495Q_l + 75.258$	0.97
	puissance	$Q_s = 17.203Q_l^{1.333}$	<b>0.99</b>
	exponentielle	$Q_s = 157.68e^{0.0475Q_l}$	0.83
	logarithmique	$Q_s = 1835 \ln Q_l - 2837.1$	0.69
13-15/01/95	linéaire	$Q_s = 47.365Q_l - 39.741$	0.82
	parabolique	$Q_s = 0.4395Q_l^2 + 26.692Q_l + 24.051$	0.93
	puissance	$Q_s = 23.247Q_l^{1.1035}$	<b>0.97</b>
	exponentielle	$Q_s = 45.142e^{0.0809Q_l}$	0.77
	logarithmique	$Q_s = 372.9 \ln Q_l - 158.29$	0.74
3-5/03/95	Linéaire	$Q_s = 92.065Q_l - 34.819$	0.96
	parabolique	$Q_s = 0.7589Q_l^2 + 31.93Q_l - 6.3511$	0.96
	puissance	$Q_s = 17.154Q_l^{1.3622}$	<b>0.97</b>
	exponentielle	$Q_s = 60.844e^{0.0653Q_l}$	0.94
	logarithmique	$Q_s = 1612.5 \ln Q_l - 1053$	0.81
7-9/01/96	Linéaire	$Q_s = 24.321Q_l + 35.12$	0.96
	parabolique	$Q_s = -0.419Q_l^2 + 46.127Q_l - 70.366$	0.98
	puissance	$Q_s = 29.291Q_l^{0.969}$	<b>0.99</b>
	exponentielle	$Q_s = 95.368e^{0.0565Q_l}$	0.90
	logarithmique	$Q_s = 395.97 \ln Q_l - 423.74$	0.96
6-7/02/96	linéaire	$Q_s = 72.005Q_l - 115.39$	0.99
	parabolique	$Q_s = 0.6031Q_l^2 + 62.958Q_l - 89.647$	<b>0.99</b>
	puissance	$Q_s = 20.993Q_l^{1.7376}$	0.95
	exponentielle	$Q_s = 38.578e^{0.2701Q_l}$	0.80
	logarithmique	$Q_s = 408.24 \ln Q_l - 335.07$	0.91
9-21/03/96	linéaire	$Q_s = 32.36Q_l - 20.32$	0.67
	parabolique	$Q_s = -0.7046Q_l^2 + 52.57Q_l - 87.653$	0.68
	puissance	$Q_s = 20.993Q_l^{1.139}$	<b>0.69</b>
	exponentielle	$Q_s = 58.361e^{0.1333Q_l}$	0.61

	logarithmique	$Q_s = 271.22 \ln Q_l - 224.45$	0.57
--	---------------	---------------------------------	------

Tableau (IV.8) : corrélation à l'échelle des crues (suite)

21/04/97	linéaire	$Q_s = 87.671Q_l - 275.04$	0.88
	parabolique	$Q_s = -.9266Q_s^2 + 135.23Q_l - 801.07$	0.88
	puissance	$Q_s = 37.565Q_l^{1.2127}$	<b>0.94</b>
	exponentielle	$Q_s = 484.83e^{0.05Q_l}$	0.90
	logarithmique	$Q_s = 2083.1 \ln Q_l - 4620.7$	0.88
24-25/05/98	linéaire	$Q_s = 32.36Q_l + 9.4132$	0.98
	parabolique	$Q_s = -0.4937Q_l^2 + 43.984Q_l - 2876$	0.98
	puissance	$Q_s = 31.654Q_l^{1.0198}$	<b>0.99</b>
	exponentielle	$Q_s = 71.958e^{0.118Q_l}$	0.86
	logarithmique	$Q_s = 249.74 \ln Q_l - 155.17$	0.91
11-12/11/01	linéaire	$Q_s = 46.906Q_l - 35.852$	0.99
	parabolique	$Q_s = 0.2740Q_l^2 + 410.96Q_l - 21.567$	0.99
	puissance	$Q_s = 14.338Q_l^{1.4321}$	<b>0.99</b>
	exponentielle	$Q_s = 14.369e^{0.2363Q_l}$	0.75
	logarithmique	$Q_s = 217 \ln Q_l + 69.691$	0.77
09/01/03	linéaire	$Q_s = 133.73Q_l - 502.57$	0.98
	parabolique	$Q_s = 2.43Q_l^2 + 58.99Q_l - 160.67$	0.98
	puissance	$Q_s = 15.954Q_l^{1.6055}$	<b>0.99</b>
	exponentielle	$Q_s = 107.11e^{0.12317Q_l}$	0.97
	logarithmique	$Q_s = 1547 \ln Q_l - 2235.9$	0.90

Tableau (IV.9): Modèles retenus à l'échelle de crue

Crue	Mode de régression	Equation	R <sup>2</sup>
11-13/02/85	puissance	$Q_s = 11.433Q_l^{1.667}$	<b>0.92</b>
20-22/02/85	puissance	$Q_s = 24.739Q_l^{1.1107}$	<b>0.89</b>
10-16/02/87	puissance	$Q_s = 4.1613Q_l^{1.7453}$	<b>0.98</b>
21-27/02/87	parabolique	$Q_s = 0.1769.Q_l^2 + 25.808Q_l - 40.198$	<b>0.98</b>
28-30/11/89	puissance	$Q_s = 8.483Q_l^{1.0177}$	<b>0.99</b>
04/01/90	puissance	$Q_s = 39.994Q_l^{1.189}$	<b>0.80</b>
7-9/02/94	puissance	$Q_s = 17.203Q_l^{1.333}$	<b>0.99</b>
13-15/01/95	puissance	$Q_s = 23.247Q_l^{1.1035}$	<b>0.97</b>
3-5/03/95	puissance	$Q_s = 17.154Q_l^{1.3622}$	<b>0.97</b>
7-9/01/96	puissance	$Q_s = 29.291Q_l^{0.969}$	<b>0.99</b>
6-7/02/96	parabolique	$Q_s = 0.6031Q_l^2 + 62.958Q_l - 89.647$	<b>0.99</b>
9-21/03/96	puissance	$Q_s = 20.993Q_l^{1.139}$	<b>0.69</b>
21/04/97	puissance	$Q_s = 37.565Q_l^{1.2127}$	<b>0.94</b>
24-25/05/98	puissance	$Q_s = 31.654Q_l^{1.0198}$	<b>0.99</b>
11-12/11/01	puissance	$Q_s = 14.338Q_l^{1.4321}$	<b>0.99</b>
09/01/03	puissance	$Q_s = 15.954Q_l^{1.6055}$	<b>0.99</b>

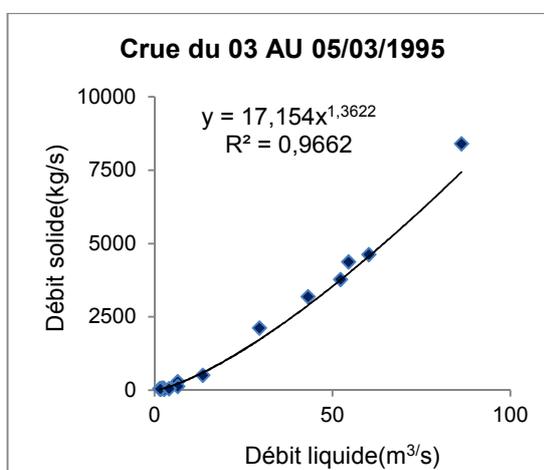
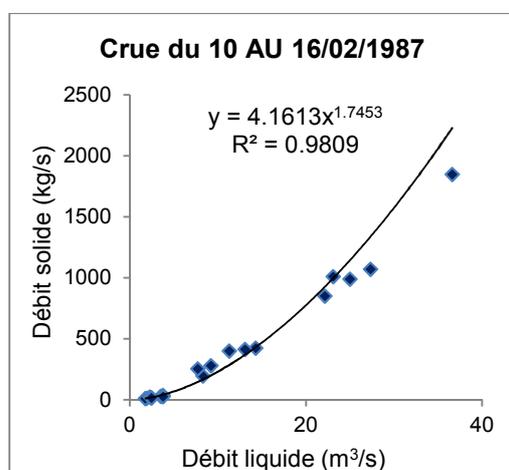


Figure IV-6 : relation entre débit liquide et débit solide à l'échelle de crue

### IV.2.3 Quantification de l'apport solide et l'érosion spécifique au droit de la station hydrométrique:

La relation débit liquide-débit solide établie préalablement sur la base de différents modèles régressifs permet de corriger et de combler les données manquantes.

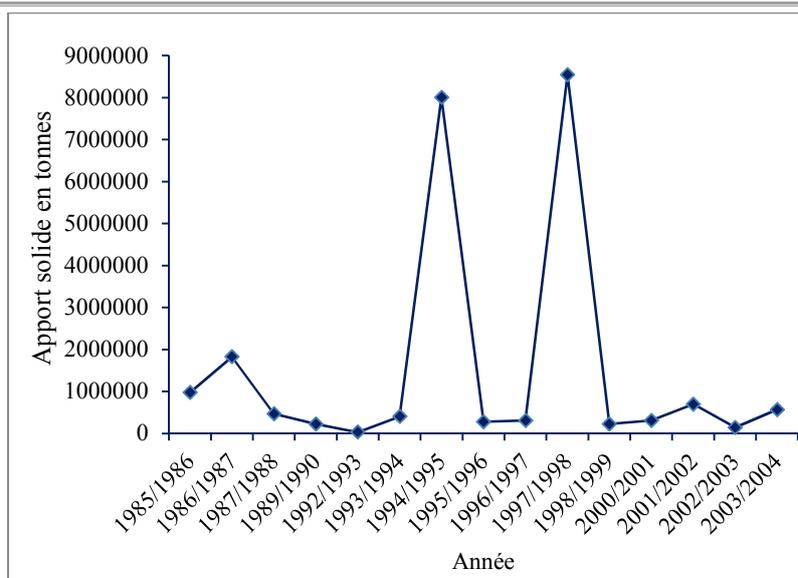
$$Q_s = 3.25Q_l^{1.45}$$

L'application du modèle puissance a permis de quantifier l'apport de sédiments et de même l'érosion spécifique.

Tableau (IV.10) : Variation de l'apport solide à l'échelle annuelle

Année	Apport solide en tonnes
85-86	973080
86-87	1823832
87-88	467678.9
89-90	223905.6
92-93	28382.4
93-94	401358.672
94-95	8000683.2
95-96	275750.784
96-97	308106.72
97-98	8537741.28
98-99	224851.68
00-01	307530
01-02	696377.952
02-03	140524.4
03-04	564494.4
<b>Moy.</b>	<b>24535.73</b>

Un apport considérable en sédiments est constaté durant les années 1986/1987, 1994/1995 et 1997/1998 entraînant une érosion spécifique remarquable (figure IV-7) et ( figure IV-8).



**Figure IV-7: Variation annuelle de l'apport solide en Tonnes**

L'érosion spécifique a été calculée au droit de la station dont la variation annuelle est donnée par la figure IV.8.

**Tableau (IV.11) : Variation de l'érosion spécifique à l'échelle annuelle**

Année	Erosion spécifique en (T/Km <sup>2</sup> /an)	Erosion spécifique en T/Ha
85-86	1060	10.6
86-87	1986.74	19.87
87-88	509.45	5.09
89-90	243.9	2.44
92-93	30.91	0.31
93-94	437.21	4.37
94-95	8715.34	87.15
95-96	30.04	0.30
96-97	335.62	3.36
97-98	9300.37	93.00
98-99	24.49	0.24
00-01	335.2	3.35
01-02	758.58	7.58
02-03	153.07	1.53
03-04	614.9	6.15
<b>Moy.</b>	<b>1635.72</b>	<b>16.36</b>

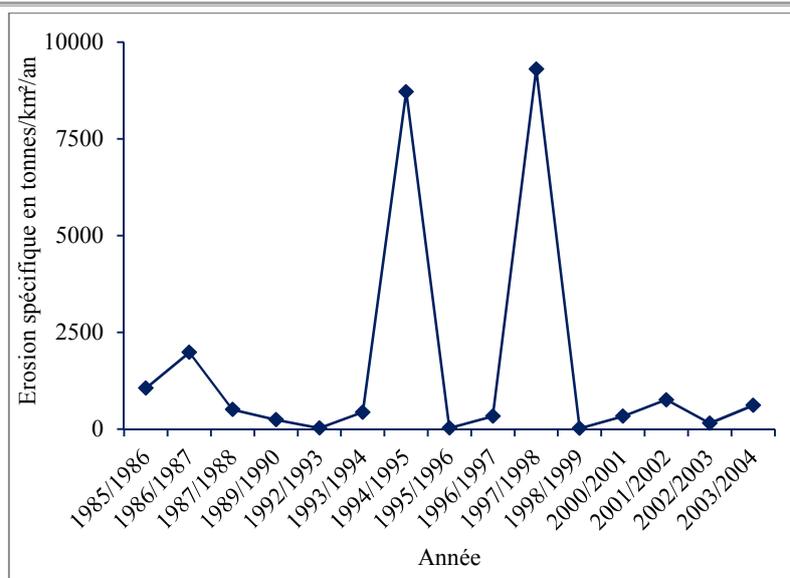


Figure IV-8: Variation de l'érosion spécifique à l'échelle annuelle

Tableau (IV.12) : variation de l'apport solide à l'échelle mensuelle

Mois	Apport solide en tonnes
Septembre	1275.26
Octobre	40227.84
Novembre	67345.344
Décembre	11104.128
Janvier	229839.104
Février	119346.048
Mars	97096.32
Avril	37920.96
Mai	72384.192
Juin	14411.52
Juillet	12856.32
Août	3317.76

A l'échelle mensuelle, l'apport est assez important durant le mois de janvier et février correspondant à la période pluvieuse (figure IV-9) et ( figure IV-10).

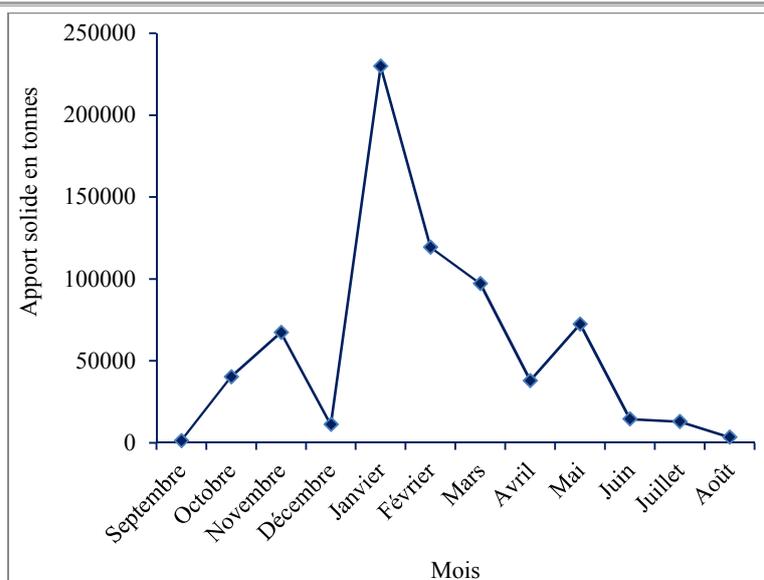


Figure IV-9: Variation de l'apport solide à l'échelle mensuelle

Tableau (IV.13) : Variation de l'érosion spécifique à l'échelle mensuelle

Mois	Erosion spécifique en T/km <sup>2</sup> /an	Erosion spécifique en T/Ha
Septembre	1.39	0.014
Octobre	43.91	0.44
Novembre	73.52	0.73
Décembre	12.12	0.12
Janvier	250.91	2.51
Février	130.29	1.30
Mars	106	1.06
Avril	41.39	0.41
Mai	79.022	0.79
Juin	15.733	0.15
Juillet	14.00	0.14
Août	3.62	0.036

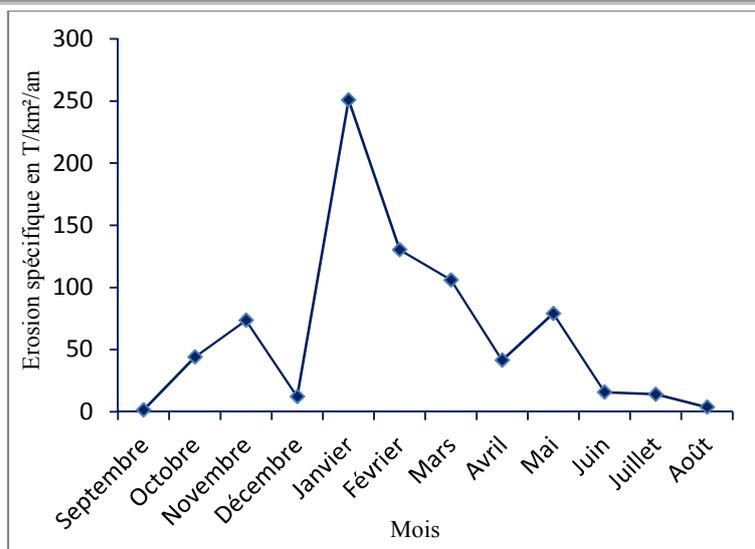


Figure IV-10: Variation de l'érosion spécifique à l'échelle mensuelle.

Tableau (IV.14) : Apport des sédiments apportés à chaque saison

Saison	Apport solide en tonnes
S-O-N	215550.72
D-J-F	686232
M-A-M	1028920.32
J-J-O	83903.04

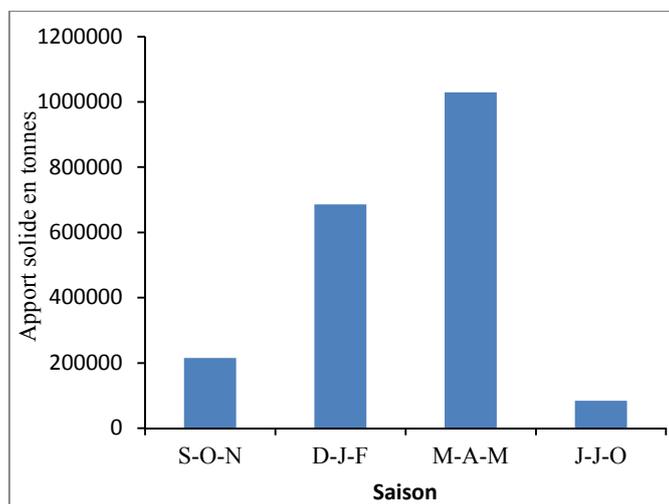


Figure IV-11: Variation de l'apport solide à l'échelle saisonnière

A l'échelle saisonnière un accroissement en apport en sédiments est constaté en allant de l'automne au printemps correspondant au lessivage progressive du cours d'eau par un apport liquide important entrainant parfois des crues considérables (crues printanières) illustré par la figure (IV-11) et (IV-12), le sol des versants est pratiquement dénudé, asséché et fragilisé pendant l'été pour subir l'action des premières pluies survenant en saison d'automne.

Tableau (IV.15) : Variation de l'érosion spécifique à l'échelle saisonnière

Saison	Erosion spécifique en (T/Km <sup>2</sup> /an)	Erosion spécifique en T/Ha
S-O-N	235.31	2.35
D-J-F	749.16	7.49
M-A-M	1123.27	11.23
J-J-O	91.59	0.91

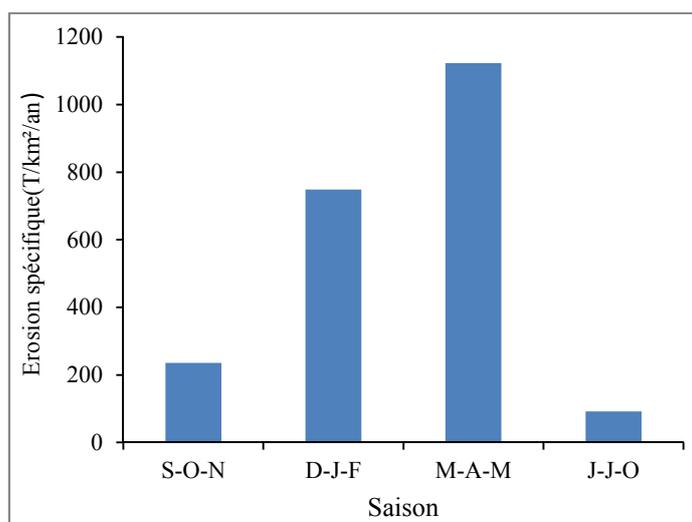


Figure IV- 12: Variation de l'érosion spécifique à l'échelle saisonnière

Tableau (IV.16) : Variation de l'apport solide à l'échelle des crues

Date	Apport solide en tonnes
11-13/02/85	54168.00
10-16/02/87	261368.55
21-27/02/87	368724.33
28-30/11/89	19531.3
04/01/90	25726.09
7-9/02/94	826218.51
13-15/01/95	159245.87
3-5/03/95	876147.84
7-9/01/96	173836.8
6-7/02/96	69614.67
9-21/03/96	316504.84
21/04/97	186067.34
24-25/05/98	46447.62
11-12/11/01	53598.18
09/01/03	139014.12

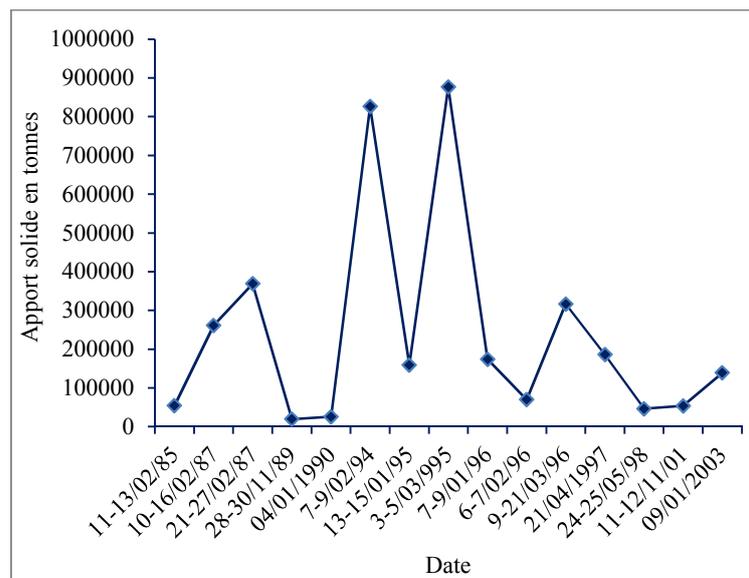


Figure IV-13 : Variation de l'apport solide de certaines crues sélectionnées

Tableau (IV.17) : Variation de l'érosion spécifique à l'échelle des crues

Date	Erosion spécifique en (T/Km <sup>2</sup> /an)	Erosion spécifique en T/Ha
11-13/02/85	59.00	0.59
10-16/02/87	285.3	2.85
21-27/02/87	402.53	4.02
28-30/11/89	21.322	0.21
04/01/90	28.085	0.28
7-9/02/94	901.985	9.01
13-15/01/95	173.85	1.73
3-5/03/95	956.49	9.56
7-9/01/96	189.77	1.89
6-7/02/96	75.12	0.75
9-21/03/96	345.52	3.45
21/04/97	203.13	2.03
24-25/05/98	50.71	0.51
11-12/11/01	58.51	0.58
09/01/03	151.762	1.52

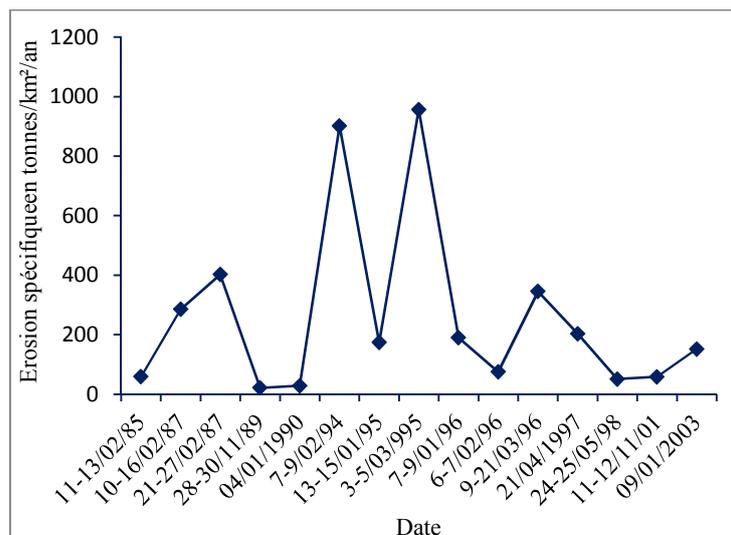


Figure IV-14: Variation de l'érosion spécifique de certaines crues sélectionnées

### IV.3 Conclusion :

L'érosion spécifique varie considérablement à différentes échelles temporelles, à l'échelle saisonnière c'est au printemps que se produit le maximum du transport solide pour le bassin versant.

En tout état de cause, cette variabilité temporelle dépend de la fréquence des orages et de leur période d'occurrence. En effet, ce sont ces orages qui génèrent la plus grande partie de la charge en suspension (A. Bouanani, 2004).

L'apport moyen calculé est de **24535.73** tonnes/an d'où une érosion spécifique de **1635.72** tonnes/Km<sup>2</sup>/an. Ce taux de dégradation se situe dans la fourchette des valeurs proposées par Walling(1984) en se basant sur ses travaux réalisés au Maghreb. Il estime que la dégradation varie entre **1000 et 5000** tonnes/Km<sup>2</sup>/an.

D'autres auteurs ont proposées des valeurs encore plus élevées. Ainsi Probst et Suchet (1992) ont avancé des valeurs supérieures à 5000 tonnes/Km<sup>2</sup>/an pour cinq bassins versants. C'est le cas d'oued Agrioum en Algérie ou la dégradation spécifique a été estimée à 7200 tonnes/Km<sup>2</sup>/an. Des valeurs plus faibles ont été observées dans certains basins du Maghreb, sur la base de données de mesure de la charge en suspension réalisés dans 130 bassins des trois pays du Maghreb (Maroc, Algérie et Tunisie), Probst et Suchet ont estimé que la dégradation spécifique moyenne est respectivement de 400 à 610 T/km<sup>2</sup>/an pour les oueds qui se jettent dans la mer Méditerranée et l'océan Atlantique (A. Bouanani, 2004).

La comparaison des valeurs de l'érosion spécifique révèle une très forte disparité spatiale du taux d'érosion des sols au Maghreb. Cette disparité résulte principalement de la différence de lithologie, du couvert végétal, de la pente et de la taille des bassins versants (Probst et Suchet, 1992).

# **Chapitre V : Le barrage de sidi yacoub**

---

### **V.1. Introduction :**

Les eaux du barrage Sidi-Yacoub sont mobilisées pour satisfaire les besoins en eau potable et d'irrigation. Toutefois, ce barrage est sujet à un envasement par les sédiments issus de l'érosion de son bassin versant. Dans ce contexte, l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) désire identifier et préciser les mesures à mettre en œuvre afin de lutter adéquatement contre l'envasement de ce barrage, préserver sa capacité utile et assurer la disponibilité future de l'eau (Tecsult, 2007).

L'objectif de cette étude est la conception d'aménagements et d'ouvrages anti-érosifs qui assureront :

- une meilleure conservation des sols sur le bassin versant dominant le barrage;
- la réduction éventuelle du taux de transport des sédiments vers le barrage;
- la réduction du taux de sédimentation et d'envasement du barrage;

et, conséquemment, la prolongation de la vie utile du barrage.

Les retenues de barrage constituent une aire privilégiée pour le dépôt des matières solides érodées. De ce fait, de nombreux réservoirs se sont comblés et d'autres sont en train de l'être à une vitesse inquiétante.

Les divers types d'érosion sont à l'origine du transport des masses solides et en suspension, lequel se développe dans un système constitué, d'une part par l'élément bassin (et oued) caractérisé par sa perméabilité, sa nature lithologique, l'intensité du relief et sa végétation, et d'autre par l'élément moteur du transport solide, à savoir l'eau qui agit par son énergie cinétique d'impact, sa capacité d'érodabilité et son ruissellement.

Divers paramètres conditionnent la formation de ces transports de matières terreuses et leur évolution dans le temps. Citons notamment les conditions initiales, à savoir : l'humidité antérieure du sol, le caractère torrentiel des précipitations pluviales, la période de l'année dans laquelle s'effectue le transport solide, la nature géologique du bassin versant, la pente, la lame d'eau ruisselée ainsi que le couvert végétal. Tous ces paramètres entrent simultanément en jeu.

C'est pourquoi il est vital d'appréhender les raisons de son inégale répartition à la fois spatiale et temporelle afin de mieux la préserver.

Nous tenterons de répondre aux questions essentielles liées à cette problématique :

- quelle part du lac de retenue est aujourd'hui comblée par les sédiments ?
- comment et par quel rythme se remplit-il ?
- d'où proviennent les sédiments qui le comblent ?
- qu'elle relation peut-on établir entre ce remplissage sédimentaire et le contexte hydro climatique de la région ?

-qu'en est-il du barrage ?

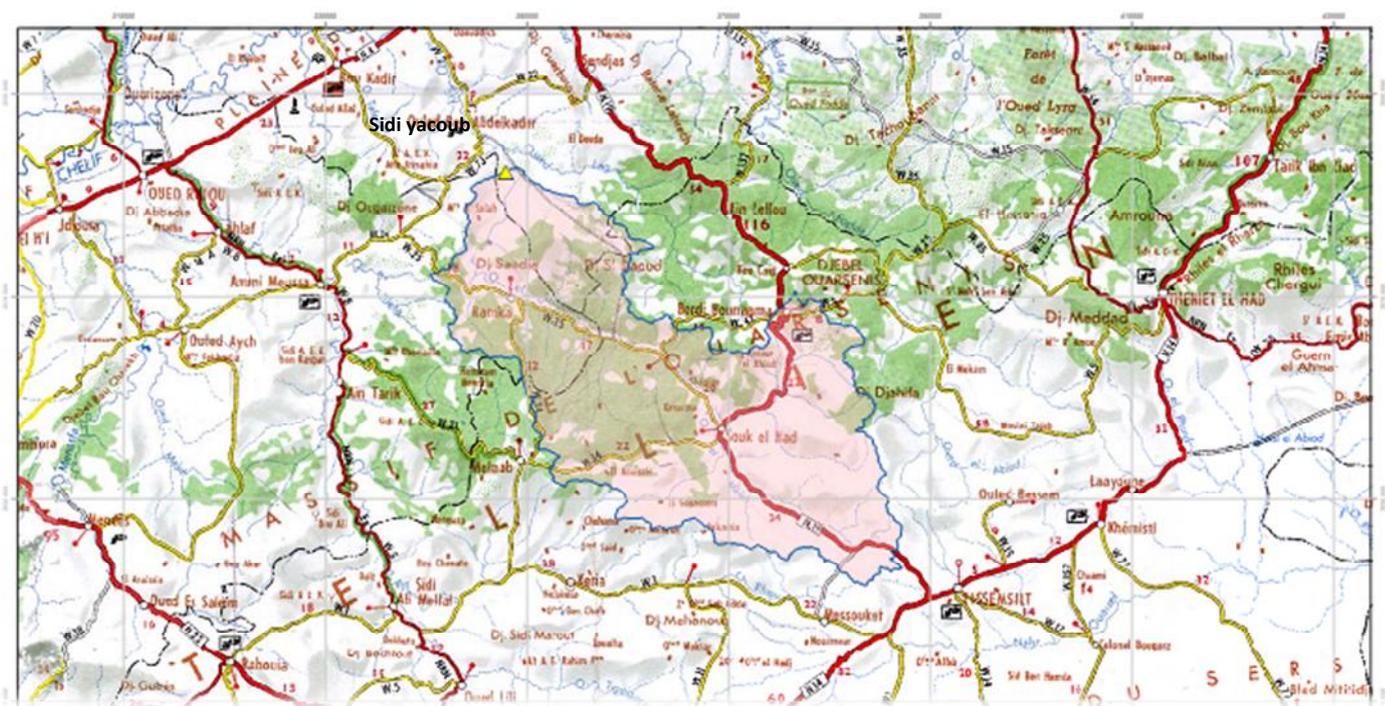
## V.2. Description de l'ouvrage :

Le barrage de Sidi Yacoub est situé sur l'Oued lardjem à 20 kilomètres au Sud de la ville de Chlef. L'ouvrage, d'une capacité de 286 hm<sup>3</sup>, est destiné à l'irrigation d'un périmètre de 10000 ha environ et l'alimentation en eau potable de la wilaya de Chlef.

Il est implanté dans les gorges de l'oued Lardjem qui est l'un des principaux affluents de la rive gauche de l'oued Chlef. Barrage en terre de 94 m de hauteur avec une crête à la côte 272 m ; composé d'un noyau étanche, des filtres et des drains de protection ainsi que des recharges amont et aval. Le noyau étanche est une argile. Pour des raisons de plus grande sécurité sismique, il est implanté verticalement dans la partie centrale de la digue. La protection de noyau en argile consiste en filtres amont et aval composé de matériaux répondants à des critères granulométriques bien précis. Les recharges sont constituées semi-perméables de granulométrie étalée (Tecsult, 2006).

Le bassin d'étude est localisé en Algérie du Nord entre le 35<sup>ème</sup> et 36<sup>ème</sup> parallèles Nord et les méridiens 1° 15' et 1° 45' Est (**Figure V-1**). L'oued Lardjem est le cours d'eau qui draine le bassin depuis les versants Nord du massif de l'Ouarsenis dans l'Atlas Tellien jusqu'au réservoir du barrage SidiYacoub. Plusieurs villes et villages d'importance significative sont situés dans le bassin versant tel que Ramka, Bordj Bounaama, Lardjem et Ain Dalia (Tecsult, 2006).

Le bassin versant du barrage Sidi Yacoub couvre une superficie de près de 918 km<sup>2</sup> s'étendant sur des milieux naturels et socio-économiques d'une grande diversité.



**Figure V-1:** situation géographique du bassin versant du barrage de sidi yacoub (ANBT)



**Figure V-2:** Vue du barrage Sidi Yacoub

Le barrage de Sidi Yacoub a été confié à l'entreprise Hidroelektra (Yougoslavie). Il a été mis en eau en 1985.

Les études et l'assistance technique ont été assurées par le bureau d'études Electroproject (Yougoslavie).

C'est un barrage digue en terre zonée avec noyau central (noyau en argile, les recharges amont et aval sont constitués de matériaux semi-perméables).

La longueur de l'ouvrage en crête est de 400 mètres, pour une hauteur maximale au-dessus de la fondation est de 91m alors que la hauteur maximale au-dessus du lit est 82 m. La largeur en crête est de 12 m.

Evacuateur de crue : situé en rive gauche de type tulipe 24 m, 9m de largeur et 41m de hauteur (déversoir avec un puits vertical, une galerie et un chenal de l'évacuateur de crue. Il est dimensionné pour un débit de  $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ , la corolle déversant à seuil libre calé à 264 m NGA. Elle déverse dans un puits vertical débouchant sur une galerie souterraine permettant d'acheminer les eaux vers l'aval de l'ouvrage (Tecsult, 2006).

Vidange de fond: la galerie de vidange de fond a été obtenue par transformation de la galerie de dérivation provisoire. A l'aval du puits de prise, la vidange de fond est constituée par 2 conduites métalliques de 1,4 m de diamètre scellées dans le béton (capacité de  $98 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

La vidange de fond est complètement obturée par un important dépôt de vase qui empêche le dégagement du puits.

Ouvrage de prise : tour inclinée avec 4 niveaux de prise.

### **V.2.1. Le barrage en chiffre :**

Année de construction : 1981

Année d'achèvement des travaux: 1985

Année de mise en eau: 1985

Bassin fluvial principal : Cheliff

Cours d'eau : Oued Lardjem

Capacité initiale : 280 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 252.85 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 98 hm<sup>3</sup>

Envasement annuel : 0.17 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 918 km<sup>2</sup>

Hauteur : 91 m

Côte de retenue Normale (R.N): 264.00m

Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E): 267.50 m

Déversoir seuil libre: 1 700 m<sup>3</sup>/s

Vidange de Fond : 153 m<sup>3</sup>/s

Longueur en crête: 400 m

Côte de la crête : 272 NGA

Volume du barrage : 3.690.000 m<sup>3</sup> (matériaux) et 14000 m<sup>3</sup> (béton)

Inclinaison des talus (v/h): amont 1/2 et aval : 1/4

### **V.3. Caractéristiques physiques du bassin versant :**

La surface du bassin versant est de 918 km<sup>2</sup>, sa longueur de 62.7 km, son altitude varie entre 190 et 1200 m, l'altitude moyenne est de 682 m, le relief est vigoureux et son indice de pente est de 48%.

Le pourcentage de boisement, d'environ 20%, est faible pour une région au relief abrupt. La forêt se trouve d'ailleurs localisé dans les terrains les plus résistants à l'érosion. Les

terres cultivées représentent 42.5%. D'après les services des forêts de Chlef, le bassin versant d'oued Lardjem est très dégradé (Tecsult, 2006).

### V.3.1.Géologie et géomorphologie :

Le bassin versant du barrage de SidiYacoub se situe au nord-ouest de l'Algérie dans le domaine de l'Atlas tellien. Les cartes géologiques et topographiques consultées indiquent que l'ensemble du bassin versant présente un relief accidenté sauf dans la partie sud-est où le relief devient moins important. L'oued Lardjem constitue le cours d'eau principal du bassin versant. Des oueds secondaires (oueds Maleh et Djouza notamment) rejoignent l'oued principal surtout dans la partie sud-est du bassin versant (Tecsult, 2006).

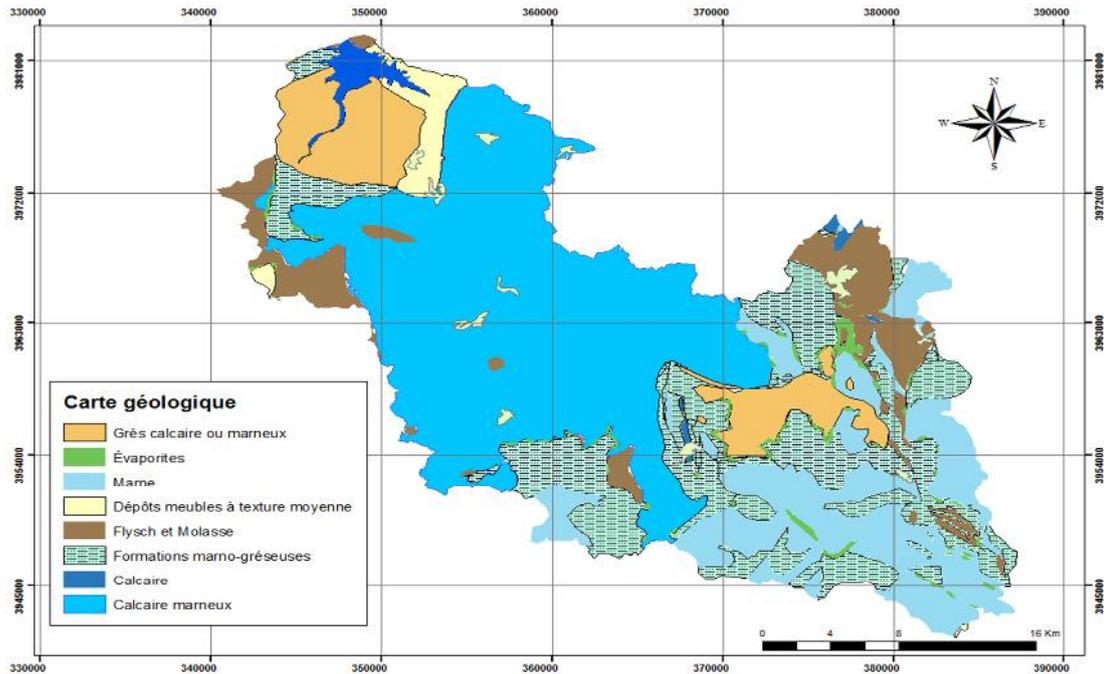
Les cartes géologiques consultées indiquent que les roches présentes dans le bassin versant sont d'origine sédimentaire d'âge compris entre le Trias et le Miocène. Les dépôts quaternaires sont distingués sur la carte géologique de l'Ouarsenis oriental (Mattauer, 1958). Les dépôts quaternaires sont localisés le long des oueds ou dans les plaines alluviales.

Mattauer (1958) indique dans son étude la présence de dépôts quaternaires notables dans la bordure sud tellienne et dans la dépression du Chélif. Dans la bordure sud-tellienne, des nombreuses terrasses s'étagent jusqu'à près de 50 m au-dessus du lit actuel du cours d'eau. Les dépôts sont généralement caillouteux. Les alluvions récentes sont décrites comme limoneuses. Les dépôts quaternaires répertoriés par Mattauer n'apparaissent dans le bassin versant à l'étude qu'à l'extrême sud-est de ce dernier.

La superficie occupée par chaque formation a été calculée en km<sup>2</sup> ainsi qu'en pourcentage par rapport à la superficie totale du bassin versant. Les formations répertoriées sont les calcaires marneux (44%), les formations marno-calcaires (17%), les marnes (16%), les grès calcaires ou marneux (9%), le flysch et molasse (8%) les formations marno-gréseuses (3%), les évaporites (2%), les calcaires (<1%) ainsi que les dépôts meubles à texture moyenne (<1%) (Tecsult, 2006).

Du point de vue géologique, le bassin versant du barrage de Sidi Yacoub est situé dans l'ensemble structuro-sédimentaire de l'Atlas tellien. L'Atlas tellien est une zone orogénique complexe constituée de nappes de charriage à vergence sud mises en place au Miocène inférieur. Les mouvements orogéniques ont entraîné notamment la formation de plans de chevauchement et de failles. Les principales failles se trouvent au sud du barrage en exploitation ainsi qu'au sud-est du bassin versant. Finalement, aucun glissement de terrain n'est mentionné sur les cartes géologiques (Tecsult, 2006).

Le massif de l'Ouarsenis est constitué par une bande de terrain en majeure partie crétacé, l'importance des reliefs y est fort variable, le massif draine des vallées profondes et étroites, la région est très accidentée.



**Figure V-3** : la carte géologique du bassin versant

La zone du barrage est de structure flyschoidé d'âge crétacé (albien cénomanien) et de sédiments alluviaux et diluviaux d'âge quaternaire.

Appuis du barrage, l'évacuateur de crue et la retenue sont des structures flyschoidé d'âge crétacé (albien cénomanien) et de sédiments alluviaux et diluviaux d'âge quaternaire. Les recharges amont et aval sont en colluvions calcaires. Les fondations sont constituées par des sédiments de type flysch du crétacé :

Formation A : argilite schisteuse avec intercalation de grès. Cette formation recouvre en partie la rive gauche et en totalité la partie centrale et la rive droite. Elle a une perméabilité faible en dehors des zones faillées, de l'ordre de  $10^{-5}$  à  $10^{-8}$  m/s.

Formation B : grès quartzitiques avec intercalation d'argilites stratifiées. Cette formation fissurée présente une perméabilité élevée, de l'ordre de  $10^{-3}$  m/s.

Formation C : argilites massives ou schisteuses calciques de perméabilité très réduite, de l'ordre de  $10^{-6}$  à  $10^{-8}$  m/s en dehors des intercalations gréseuses.

Le taux d'envasement du barrage dépend essentiellement de la nature des roches constituant le bassin versant. Le bassin versant est situé dans le massif de l'Ouarsenis qui appartient à l'Atlas Tellien. Les calcaires et les marnes du crétacé forment en général le cadre montagneux avec quelques épitements triasiques.

Comme le montre la figure de l'aperçu géologique, on peut dire que le caractère essentiel de ces formations, aussi bien dure que tendre, est la présence de sels (calcaires, gypse) qui aura des conséquences sur la composition chimique des eaux superficielles et souterraines.

### V.3.2. Lithologie et stratigraphie :

Sachant qu'une grande partie de sédiments constituant l'Ouarsenis est charriée ; il est difficile d'établir des séries stratigraphiques continues (Tecsult, 2006).

**Tableau V.1** : lithologie du bassin versant de Lardjem

Lithologie	Superficie (km <sup>2</sup> )	Superficie (%)
Trias	21.5	2.48
Crétacé moyen	362.2	41.88
Albien cénomanien	11.6	1.34
Crétacé supérieur	183.3	21.19
Eocène supérieur	29.8	3.44
Oligocène à faciès numidien	45.4	5.25
Oligocène à faciès Boughari ou Oranais	69.4	8.02
Miocène inférieur	30.6	3.53
Eocène inférieur	11.4	1.31
Crétacé inférieur	98.0	11.33

### V.3.3. Séismicité :

#### - Situation relative aux grandes failles :

Le barrage est situé à proximité de la zone de l'épicentre d'ech cheliff (ex el asnam) sismiquement la plus active en Algérie.

Accélération horizontale maximale :

Pour la période de retour de 1000 ans  $a = 0.5 \text{ g}$

Pour la période de retour de 200 ans  $a = 0.3 - 0.35 \text{ g}$

### – Glissements de terrain dans la région :

Un ancien glissement est situé sur le flanc gauche, en direction sud du déversoir latéral dans le but de poursuivre les recherches sur le terrain.

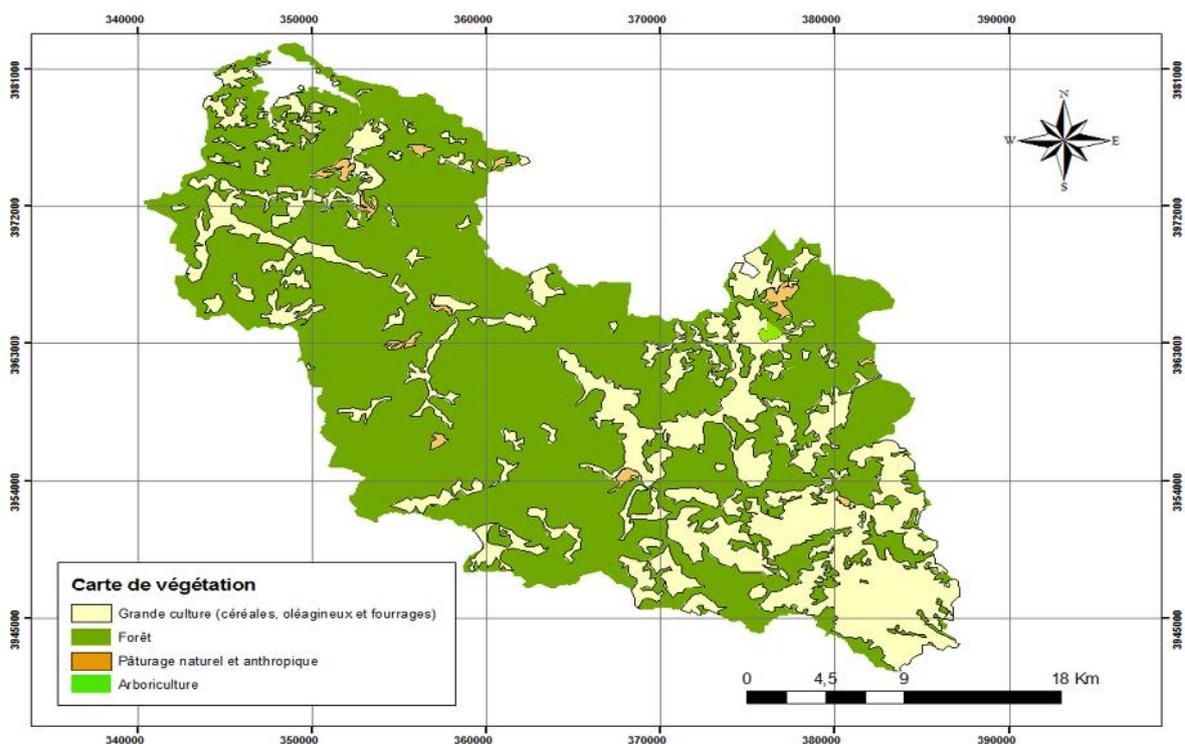
### V.3.4. Végétation et occupation du sol :

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. Le couvert végétal joue un rôle régulateur dans le régime d'écoulement.

Dans le bassin, les forêts sont disposées dans la partie montagneuse et occupent la moitié de la nappe la surface, mais dans la partie basse, les forêts occupent 4/5 de la surface.

Le bassin versant du barrage de SidiYacoub est utilisé à environ 30% pour l'agriculture intensive, en l'occurrence les grandes cultures céréalières et fourragères (**Figure V-4**). Cette utilisation reflète clairement la présence de replats dans l'unité de paysage montagneuse, au nord, et l'étendue des grands plateaux au sud.

En contrepartie, les zones plus accidentées sont généralement couvertes de forêts (21.1%), de maquis/garrigues (20.8%) et de matorrals (17%). Ce sont toutefois les formations de matorrals qui dominent ce groupe, ne laissant habituellement place aux massifs forestiers que sur les sommets les plus élevés.



**Figure V-4** : Carte du couvert végétal du bassin versant de Sidi Yacoub

La situation géographique et la configuration géographique confèrent au bassin versant de Sidi Yacoub une utilisation du sol constituée principalement de milieux naturels et d'activités agricoles. La zone d'étude comprend :

- des chaînes de montagnes et de collines à l'Est et à l'Ouest couvertes de forêts et de maquis ;
- de vastes terres agricoles situées essentiellement dans les vallées des oueds el Melab et Maleh.

Dans le bassin versant, les agglomérations de Bordj Bounaama, Lardjem et Ramka sont les seules en importance et elles sont desservies par les routes principales bitumées RN 19 et la CW 25. Le **Tableau V.2** présente les superficies des différentes occupations du sol pour le bassin versant. À l'examen de ces données, il ressort que le milieu naturel domine (73.2%) suivi par les activités agricoles (25.6%).

**Tableau V.2** : Occupation du sol du bassin versant de Sidi Yacoub

Type d'occupation du sol	Superficie(Km <sup>2</sup> )	Superficie (%)
Milieu naturel	678.2	73.2
Zone agricole	237	25.6
Pâturage	8.1	0.9

Les terres susceptibles d'être cultivées dans le bassin versant n'ont pu être identifiées de manière précise faute de cartes pédologiques disponibles. Toutefois, une estimation de ces terres a été faite en se basant sur d'autres critères moins pertinents mais quand même utiles tels que : la topographie et la pente ( $\leq 5\%$ ), l'occupation actuelle (occupation qui serait apte au changement par suite de travaux d'aménagement et fonciers, tel qu'une forêt peu dense transformée en culture céréalière) et la proximité des surfaces potentielles aux zones déjà agricoles (afin d'éviter l'éparpillement). Cet exercice très approximatif révèle que le bassin versant disposerait de peu de superficies ( $< 6\%$ ) de terres qui pourraient intéresser l'agriculture (Tecsult, 2006).

### V.3.5. Description socioéconomique du bassin versant :

Le bassin versant du barrage de Sidi Yacoub s'étend sur 918 km<sup>2</sup> répartis sur 17 communes appartenant à quatre wilayas : Tissemsilt, Relizane, Chlef et Tiaret.

L'on relève d'ailleurs que plus de la moitié du bassin versant est constitué du territoire des communes de Lardjem, Ramka et Sidi Abed. Il est donc important de souligner d'entrée de jeu que ces communes qui constituent l'essentiel du bassin devront être l'objet d'une attention particulière au moment de la mise en œuvre d'actions participatives éventuelles visant à réduire les actions érosives. A ce sujet, du point de vue des structures sociales, la partie essentielle du bassin versant répond aux principales caractéristiques des populations du versant sud de l'atlas Tellien. Ces caractéristiques tiennent leurs principaux fondements dans le fait que les groupes sociaux en présence sont davantage tournés vers le sud (la steppe) que vers le nord,

tant du point de vue des traditions socioculturelles que du point de vue des activités économiques (Tecsult, 2006).

Par ailleurs, la proximité relative de la steppe et de l'activité pastorale fait que la population de la partie essentielle du bassin versant subit dans une certaine mesure l'influence de la tendance dominante dans la steppe où les populations pratiquent davantage l'élevage que l'agriculture. De plus, il importe de souligner le développement l'arboriculture sur le bassin versant lors de l'application depuis 2001 du plan national de développement agricole. Ainsi, l'arboriculture sera un élément qui à considérer lors de propositions d'actions anti-érosives destinées à protéger le bassin versant.

Du point de vue de la taille, la population résidant dans le territoire du bassin versant de Sidi Yacoub est estimée à 110 000 habitants.

La population la plus orientée vers l'activité agricole est celle des communes de Sidi Abed (Tissemsilt) et de Merghila (Tiaret) avec un taux d'occupation dans l'agriculture qui est respectivement de 63.96% et de 63.31 %; à l'inverse, la commune dont la population active est la moins présente dans le secteur agricole est celle de Larbaa (Tissemsilet) avec un taux de 0.5 % seulement dans l'agriculture(Tecsult, 2006).

La population du bassin versant du barrage de Sidi Yacoub est marquée par un taux de chômage assez variable allant de 42.46% à Souk El Had (Relizane) jusqu'à 73.57% à Melaab (Tissemsilt).

### **V.3.6.Conditions climatiques et hydrologiques :**

Le climat de notre zone d'étude est de type méditerranéen avec une longue période estivale sèche et chaude et une saison hivernale pluvieuse et froide, les valeurs de précipitation sont très variable d'une année à l'autre du point de vue quantité et répartition. Tandis que les régions thermiques sont relativement homogènes.

#### **V.3.6.1. Vent et évapotranspiration :**

L'évapotranspiration représente l'action conjuguée du sol et de la transpiration de la plante, c'est la restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre.

L'évapotranspiration annuelle est d'environ 1390 mm. La superposition des valeurs de pluviosité à celles d'évapotranspiration potentielle permet de repérer les mois déficitaires en eau. En effet, pour le bassin versant du barrage de Sidi Yacoub, les mois de mars à octobre présentent un déficit hydrique. Ce déficit représente un manque d'eau de près de 993 mm. Les mois de novembre à février ont un léger surplus d'eau, soit près de 103 mm.

Les données des évapotranspirations et la vitesse moyenne de vent inscrites ci-dessous sont relevées à partir des évapotranspirations mensuelles et annuelles éditées par les services du bureau assistance météorologique de CHLEF.

**Tableau V.3 : Vent et évapotranspiration de la région de Sidi Yacoub**

Année Mois	2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006	
	vent	ETP	vent	ETP	vent	ETP								
Jan	2.2	1.23	3.2	1.32	2.3	1.33	2.3	1.04	2.3	1.16	2.3	1.29	2.4	1.29
Fev	2.2	2.09	2.8	1.8	2.6	2.13	2	1.49	2.4	1.73	2.3	2.09	2.7	1.47
Mar	2.6	2.13	3.3	3.44	3	2.95	2	2.66	2.5	2.36	2.1	3.14	2.8	2.23
Avr	4	4.71	2.7	4.18	2.9	3.61	2.3	3.29	3.7	4	2.7	4.76	2.7	3.38
Mai	3.4	5.87	3.1	5.03	3.4	5.68	2.9	5.17	3.3	4.17	2.9	7.1	3.3	4.92
Juin	3.6	8.06	3.6	8.66	3.5	7.83	2.9	7.86	2,8	6.94	3.2	6.18	3.6	6.85
Juillet	3.2	8.15	3.1	8.23	3	7.24	2.4	7.5	2.7	7.67	2.9	8.38	3.9	7.73
Aout	3.1	8.11	2.9	7.43	2.8	6.1	2.8	7.36	2.6	7.12	3	7.34	3.2	6.66
Sep	2.3	5.28	2.9	5.23	2.7	5.19	3	5.43	2.9	15.75	2.3	4.76	2.2	5.21
Oct	2.6	2.81	2.8	4.14	2.6	3.48	2.3	2.85	2.2	3.44	2.2	3.1	2.3	2.67
Nov	2.9	1.6	2.6	1.6	2.2	1.7	2.5	1.57	2.1	1.6	2.2	2.08	2.4	2
Dec	3.2	1.58	2.3	1.09	2.3	1.29	2.6	1.14	2.9	1.17	2.2	1.2	2.3	1.32
Moyenne	2.94	4.30	2.94	4.35	2.77	4.04	2.5	3.95	2.7	4.76	2.52	4.28	2.81	3.81

**V.3.6.2. La température :**

Selon la station météorologique d'Ain Dalia, la température moyenne annuelle observée sur le bassin versant est de 15.9 °C. Les valeurs mensuelles maximales et minimales moyennes sont respectivement de 26.4 °C et 7.4°C. Le mois de janvier présente les plus basses températures, alors que le mois d'août est le mois le plus chaud.

D'après les données du bureau d'assistance météorologique de CHLEF les températures moyennes durant les années 2000 jusqu'au 2007 sont les suivantes :

**Tableau V.4** : Température moyenne de la région de Sidi Yacoub

Mois	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Janvier	10	12,6	12	10,6	12,3	8,7	9,8	11,93
Février	13,7	12,5	13,1	11,1	13,7	8,8	10,9	14,19
Mars	16,1	18,4	15,6	15,9	14,3	14,5	15,8	13,37
Avril	23,5	17,9	16,8	17,3	17	17,8	19,9	16,41
Mai	23,6	20,6	21,9	21,5	18,4	24,2	24,5	26
Juin	27,7	28	28,6	30,1	26,8	28	26,9	26
Juillet	30,7	30,3	28,6	32,2	30,5	31,7	31,9	31
Aout	31,1	31,3	28,2	31,6	31,6	29,5	29,5	26,4
Septembre	25,7	26,5	25,4	27,1	43,8	24,9	25,8	26,4
Octobre	19,1	24,7	21,8	21,8	23,5	22,5	23,8	20,3
Novembre	15 ,7	14,3	16,1	16,2	14,6	14,9	17,1	14,6
Décembre	13,4	10,9	14,5	12,1	12,1	11,8	12,16	11,7
Moyenne	20,86	20,67	20,22	20,62	21 ,55	19,77	20,67	19,86

**V.3.6. 3. Humidité :**

L'humidité relative moyenne annuelle dans la région du bassin versant du barrage de Sidi Yacoub est estimée à environ 66% et les valeurs extrêmes seraient atteintes en janvier (77%) et en juin (61%), (Tecsult, 2006).

**IV.3.6.4. Insolation :**

L'insolation journalière moyenne est de 7.9 heures/jour et les valeurs varient de 4.9 heures/jour en décembre à 11.0 heures/jour en juillet et août, (Tecsult, 2006).

**IV.3.6.5. Pluviométrie :**

Le bassin versant a une pluviométrie moyenne annuelle de 462.96 mm, calculée par la méthode de Thiessen à partir des observations des stations pluviométriques, sur une période de 20 ans.

**Tableau V.5:** Evaluation de la lame d'eau annuelle

Station	Altitude(m)	P <sub>moy.</sub> (mm)
Ouled Ben A.E.K	160.0	368.4
Tissemsilt	940.0	445.2
Bordj Bounaama	1050.0	605.3
Souk El Had	550.0	482.2
Ain Iellou	900.0	358.8



L'apport moyen annuel de l'oued Lardjem est de  $31.34 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Depuis la mise en marche du barrage, l'apport annuel maximum enregistré a été de  $72 \times 10^6 \text{ m}^3$  en 1986/1987 alors que l'apport minimal enregistré était de  $8 \times 10^6 \text{ m}^3$  en 1992/1993. La plus forte crue enregistrée a été en date du 23/02/1987 (estimée à  $9 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) selon l'ABH en 2011.

Du fait de l'érosion du bassin versant, le barrage accumule chaque année des volumes de vase entraînant une réduction progressive de sa capacité totale. D'après l'ANBT, les mesures hydrologiques indiquent une érosion spécifique de 2349 tonnes / $\text{km}^2$ /an et une concentration moyenne de 18 g/l.

#### **V.3.6.6.2. Etat d'envasement du barrage :**

L'envasement menace la performance d'un barrage par sa capacité de stockage et de sa durée de vie et de la sécurité de l'ouvrage ...c'est l'effet de l'érosion, du transport solide et de la sédimentation.

Le taux d'envasement du barrage dépend essentiellement de la nature des roches constituant le bassin versant. Le bassin versant est situé dans le massif de l'Ouarsenis qui appartient à l'Atlas Tellien. Les calcaires et les marnes du crétacé forment en général le cadre montagneux avec quelques époinçonnements triasiques.

Le caractère essentiel de ces formations, aussi bien dures que tendres, est la présence de sels (calcaires, gypse) qui aura des conséquences sur la composition chimique des eaux superficielles et souterraines.

#### **V.3.6.7. Caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant:**

Le bassin versant de l'oued Lardjem est caractérisé par une superficie de  $918 \text{ km}^2$  et un périmètre de  $156 \text{ km}^2$ , à une pente moyenne de 21.62 m/km sur une longueur de 62.72 km.

Son relief est fort selon la classification ORSTOM, l'altitude maximale, minimale et moyenne étant respectivement de l'ordre de 1270 m, de 190 et de 682.307 m avec une dénivelée spécifique de 323.648 m. L'indice de compacité  $kc=1.44$  montre que le bassin est de forme allongée. L'oued principal draine un ensemble de régions hétérogènes, aux chaînes montagneuses de l'Ouarsenis, ces régions sont les plus dégradées, les plus difficiles à restaurer, sa destruction est profonde et dont le relief est fortement accidenté (Sari, 1977). 35% de la superficie du bassin est comprise entre 800 et 1200 m ; ou l'oued lardjem et ses affluents sont torrentiels à l'amont, vue la part importante des précipitations d'hiver reçu par cette chaîne montagneuse, à la sortie de cette dernière, l'oued pénètre dans la plaine de Chélif en perdant sa torrencialité. Le bassin est caractérisé par une pluviométrie faible (359mm en moyenne) et une structure géologique complexe dans la partie sud-ouest du bassin et une forte précipitation (605mm en moyenne) et une structure géologique simple dans zone centrale du bassin et enfin par une faible pluviométrie et une structure géologique simple dans la partie Nord-est.

Le barrage de Sidi yacoub est soumis à un envasement qui fait diminuer sa capacité initiale. La cause essentielle de cet envasement rapide de la retenue du barrage provient de la nature des caractéristiques de son bassin versant formé de roches tendres avec un couvert végétal mince et dégradé par l'homme.

Le tableau **Tableau (V.6)** rassemble les principales caractéristiques du bassin versant.

**Tableau (V.6): Caractéristiques hydro-morphométriques du bassin versant**

	Désignation	Symbole	Unité	Valeur
Caractéristiques de forme	Superficie	S	km <sup>2</sup>	918
	Périmètre	P	km	156
	Indice de compacité	Kc	/	1.44
	Longueur du Rec. Eq.	L <sub>R</sub>	Km	14.64
	Largeur du Rec. Eq.	L <sub>r</sub>	km	62.72
Caractéristiques topographiques	Altitude moyenne	H <sub>moy.</sub>	M	682.31
	Altitude minimale	H <sub>min.</sub>	M	190
	Altitude maximale	H <sub>max.</sub>	M	1270
	Indice de pente globale	I <sub>g</sub>	m/km	10.68
	Pente moyenne	I <sub>m</sub>	%	21.62
	Indice de pente de Roche	I <sub>p</sub>	%	0.48
Caractéristiques hydrographiques	Densité de drainage	D <sub>d</sub>	km/km <sup>2</sup>	4.38
	Coefficient de torrentialité	C <sub>t</sub>	/	7.98
	Densité spécifique	D <sub>s</sub>	m	323.65
	Vitesse de propagation des eaux	V <sub>p</sub>	m/s	4.52
	Coefficient de sinuosité	K <sub>s</sub>	/	0.79
	Temps de concentration	T <sub>c</sub>	heures	10.15

Le bassin versant du barrage de Sidi-Yacoub couvre une superficie de 918 km<sup>2</sup> qui s'étend en forme de croissant avec un périmètre totalisant 156 km et un indice de compacité de Gravélius de 1,44.

Le bassin du barrage de SidiYacoub comporte deux grandes unités de paysage, soit, une région montagneuse au Sud et Est et une région relativement plane, au Nord. Malgré son caractère montagneux, la première région présente quelques replats, tandis que la seconde région s'avère parsemée de quelques montagnes et collines isolées et qui s'étendent suivant une orientation du sud-ouest au nord-est. La dénivelé de ces montagnes isolées varie de 600 à 800 m et leur relief se caractérise par plusieurs zones en pente escarpée.

La dénivelée maximale du bassin atteint 1159 m, en débutant à environ 261 m à l'embouchure, pour culminer à 1820 m sur la limite Sud-Est du bassin. Bien entendu, la dénivelée des terres principales (H<sub>5%</sub> à H<sub>95%</sub>) est beaucoup moins importante, n'atteignant qu'environ 634 m. Cette valeur d'altitude correspond aussi au niveau moyen des terres. La déclivité moyenne du bassin est estimée à 21,62 %. La majeure partie des versants (40%) a entre 15 et 35% de déclivité. Les versants avec les plus grandes déclivités sont situés dans la portion Ouest du Bassin.

L'analyse de ces différents paramètres physiques et géomorphologiques (lithologiques) permettra une meilleure compréhension des causes des variations des régimes hydrologiques du bassin versant de sidi Yacoub et par conséquent leur contribution dans la genèse du transport solide. Leur interaction détermine la variabilité des phénomènes hydrologiques dans le temps et dans l'espace.

#### **V.4. Analyse des données fournis par les lèves bathymétriques:**

Les principaux résultats de la campagne bathymétrique du mois de Septembre 2004 sont les suivants :

Côte de retenue normale des eaux : 264 m

Surface du réservoir : 879ha

Volume du réservoir : 253 Hm<sup>3</sup>

Côte des plus hautes eaux exceptionnelles : 267 m

Surface du réservoir : 932 ha

Volume du réservoir : 284 Hm<sup>3</sup>

La comparaison de la capacité entre deux levés permet de mesurer le volume des sédiments accumulés.

**Tableau V.7:** Tableau comparatif de volume à la cote normale de la retenue (CRN=264.00)

Année de levé/société	1986 (Hidro-Electra)	2004 (Hydro/CTS)
Capacité (Hm <sup>3</sup> )	285	252.85
Perte de capacité	–	32.15
Nombre d'année	–	18
Perte de capacité annuelle	–	1.79

**Tableau V.8:** Tableau comparatif du surface a la cote normale de la retenue (CRN=264.00)

Année de levé/société	1986 (Hidro-Electra)	2004 (Hydro/CTS)
Surface (Ha)	925	879.18
Perte de surface	–	45.82
Nombre d'année	–	18
Perte de surface annuelle	–	2.54

#### V.4.1. Résumé des résultats obtenus :

- L'évaluation de la perte de capacité annuelle moyen de 1986 à 2004 est de 1.79 Hm<sup>3</sup>/an.
- L'évaluation de la perte de surface annuelle moyenne de 1986 à 2004 est de 2.54 Ha/année.
- Le taux d'envasement du barrage est de 11.28%.

#### V.5. Prévision de l'envasement du barrage de sidi yacoub :

La prévision de l'envasement des barrages est depuis longtemps un sujet d'intérêt pour les ingénieurs et les gestionnaires de barrage car elle donne une idée sur l'évolution de l'envasement à différents horizons.

Parmi les méthodes de prévision, on cite la relation d'Orth.

##### V.5.1. La relation d'Orth :

Le premier à avoir décrit le processus de l'envasement, c'est ORTH.F (1934).il suppose que la capacité résiduelle varie dans le temps en fonction d'une loi a décroissance exponentielle c'est-à-dire qu'après « t » années d'exploitation la capacité de la retenue sera égale a :

$$W_t = W_0 . a^t \quad (V.1)$$

$W_t$  : capacité résiduelle après « t » d'années de service ;

$W_0$  : capacité à retenue normale ;

a : paramètre propre à chaque retenue ;

Toute la difficulté réside dans la détermination du paramètre « a ». Il peut être déterminé de la façon suivante :

Si  $W_{st}$  est le volume envasé après « t » années, donc :

$$W_t = W_0 - W_{st} = W_0 \cdot a^t \quad (V.2)$$

$$W_{st} = W_0 (1 - a^t) \quad (V.3)$$

Si on suppose que durant la première année d'exploitation  $t=1$ , le volume des sédiments accumulés est égale à l'apport solide moyen annuel  $Q_s'$  déposé, ce dernier est donné par la relation suivante :

$$Q_s' = Q_s \cdot T_R \quad (V.4)$$

$Q_s'$  : apport solide annuel déposé dans la retenue ;

$Q_s$  : apport solide annuel du réseau hydrographique ;

$T_R$  : taux de rétention défini pour chaque retenue.

On aura alors :

$$Q_s' = W_0 (1 - a) \quad (V.5)$$

Ce qui entraîne que :

$$a = 1 - Q_s' / W_0 \quad (V.6)$$

La formule de prévision devient :

$$W_t = W_0 (1 - Q_s' / W_0)^t \quad (V.7)$$

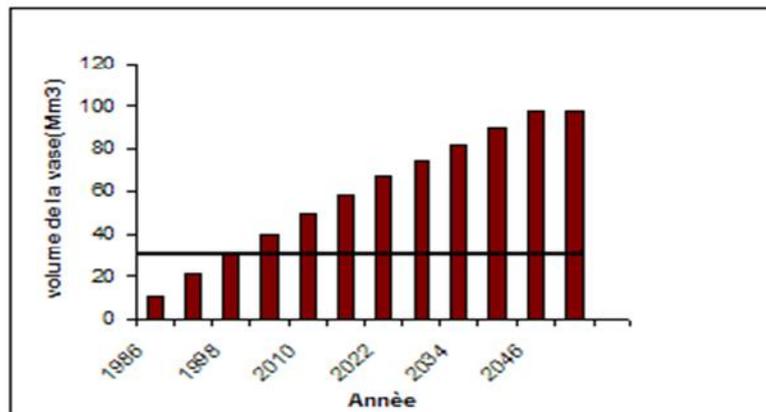


Figure V-6: Prévision de l'envasement du barrage de Sidi Yacoub

### V.7. Exploitation des données relatives au barrage :

Pour mieux comprendre le comportement du barrage vis-à-vis de l'envasement, on a recueilli les données d'exploitation du barrage ; il s'agit d'un fichier journalier regroupant les informations suivantes : côte, réserve, taux de remplissage, pertes (lâchers, évaporation, fuites, eau utilisée pour A.E.P et irrigation), et pluie.

Les valeurs des débits sortants et entrants ont été estimées et comparés, respectivement, aux pluies en amont, ainsi qu'aux mesures de la station hydrométrique située à l'aval, les lâchers du barrage contribuant naturellement à l'alimentation de l'oued aval.

Les valeurs du débit sortant et entrant ont servi pour l'étude.

**Tableau V.9:** Valeurs annuels du débit sortant et débit entrant

Année	Débit entrant	Débit sortant
1985/1986	40.88	0.69
1989/1990	11.14	45.42
1990/1991	39.18	25.49
1991/992	24.51	21.62
1992/1993	8.01	23.11
1993/1994	15.62	20.90
1994/1995	45.62	27.38
1995/1996	128.24	25.49
1996/1997	63.32	40.41
1997/1998	89.01	50.74
1998/1999	30.98	66.47
1999/2000	11.85	65.72
2000/2001	93.12	72.52
2001/2002	14.09	52.63
2002/2003	32.98	40.62
2003/2004	29.26	43.92
2004/2005	8.33	26.83
2005/2006	37.79	20.39
2006/2007	24.15	22.86
2007/2008	10.71	23.84
2008/2009	123.51	30.62
2009/2010	101.96	51.98

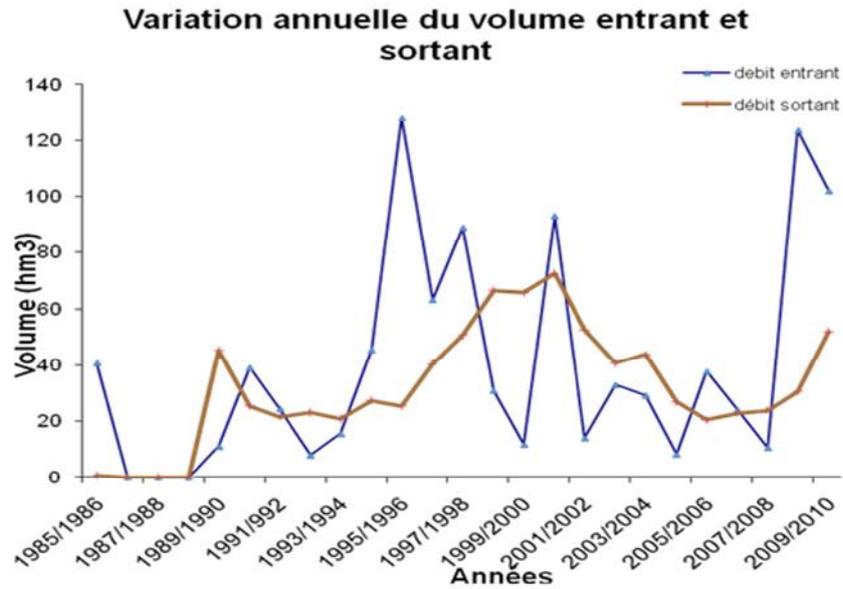


Figure V-7: Variation annuelle du débit entrant et sortant

On note une variation considérable du débit entrant et sortant de la retenue durant les années 95/96 et 2007/2008 ce qui correspond vraisemblablement à la période des crues citée précédemment.

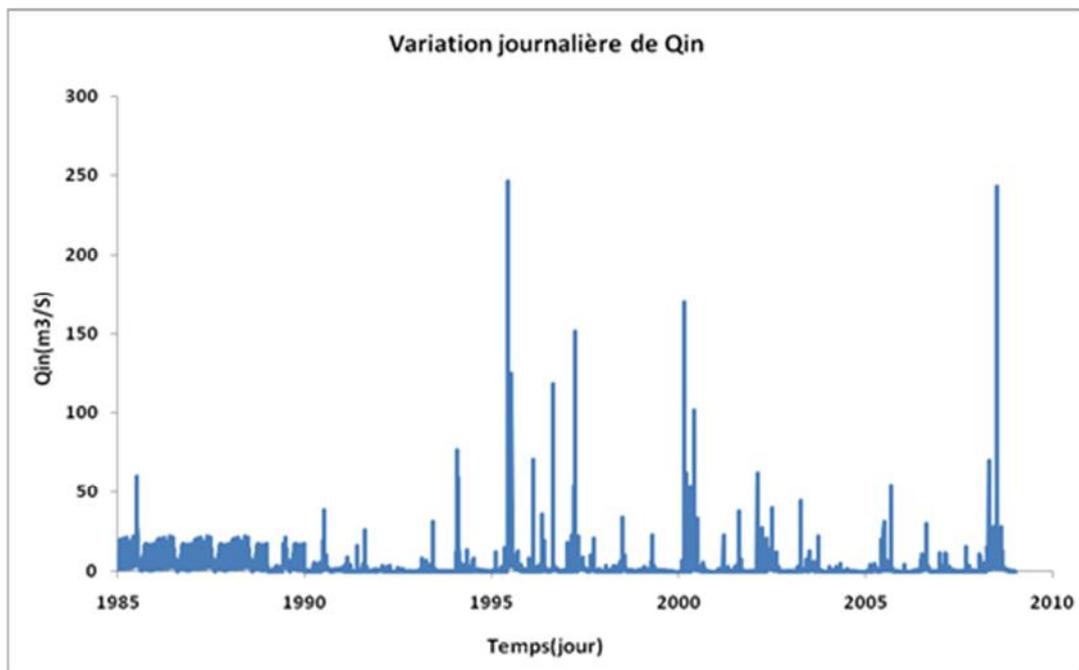
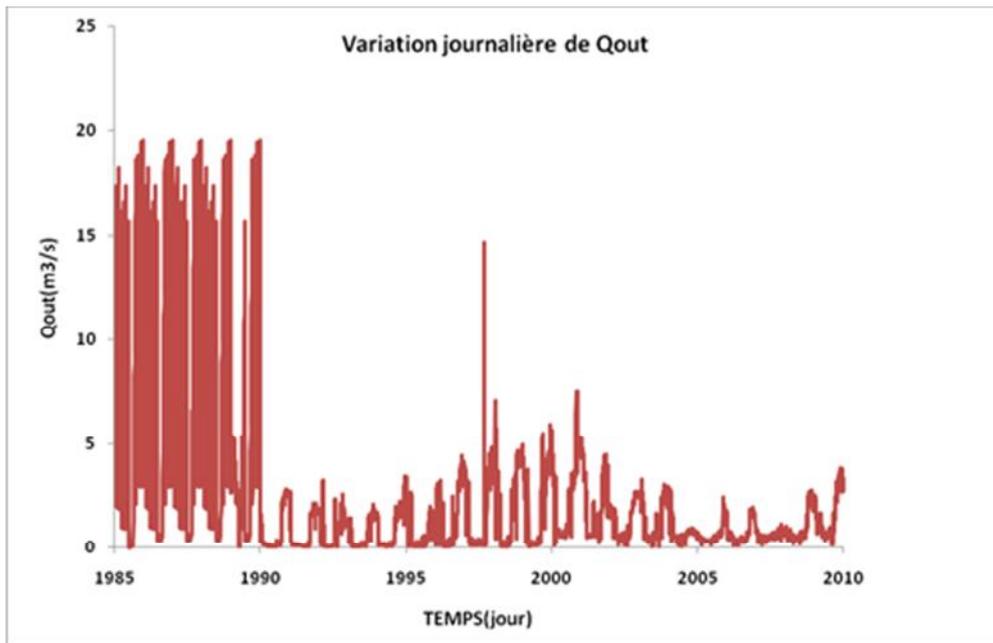
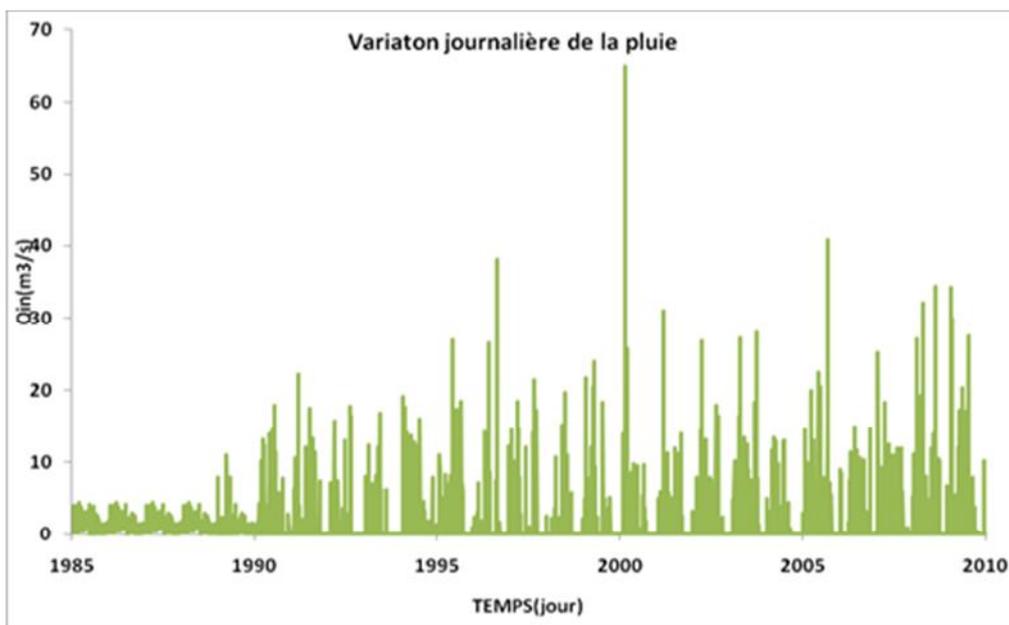


Figure V-8: Variation journalière du débit entrant



**Figure V-9:** Variation journalière du débit sortant



**Figure V-10:** Variation journalière de la pluie

Un nette secheresse enregistrée durant la période 1985/1986- 1990/1991 exige une surexploitation du volume stocké(figure 9,10 et 11).

On pourrait toujours comparer les mesures faites au niveau de la station hydrométrique située à l'aval du barrage aux données exploitées au niveau du barrage.

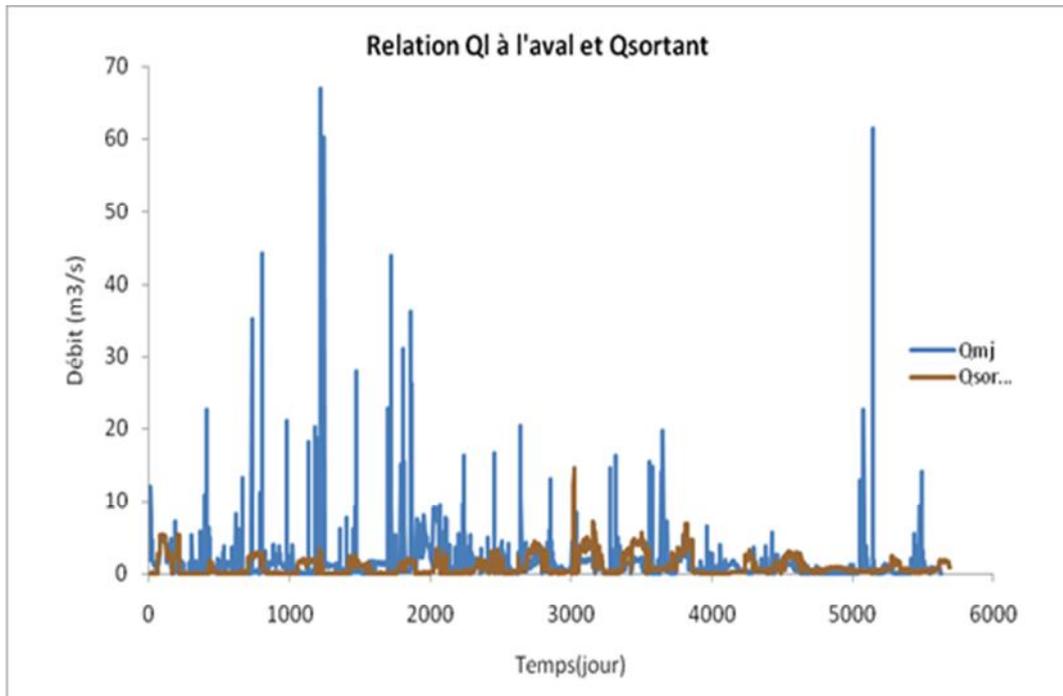
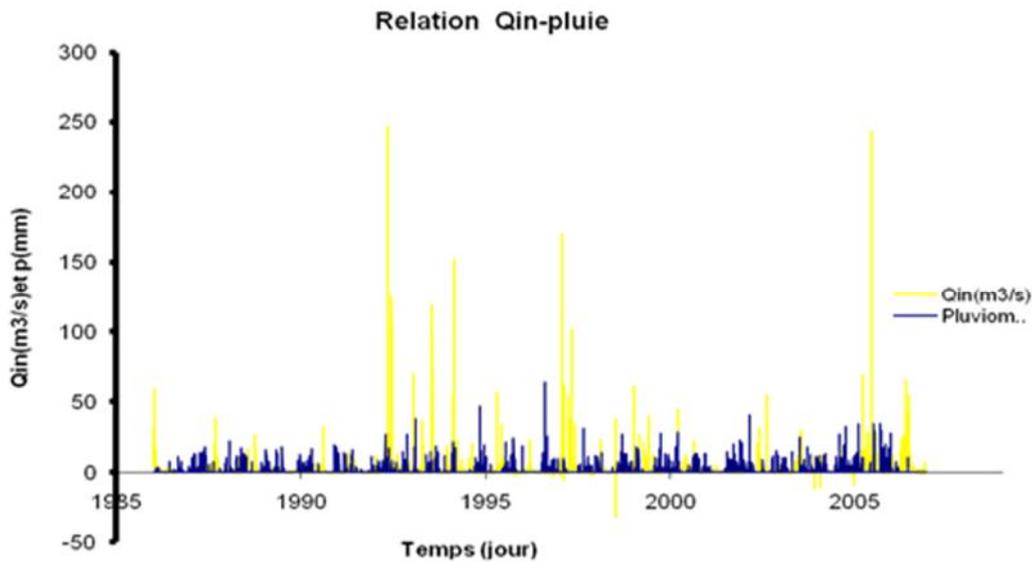
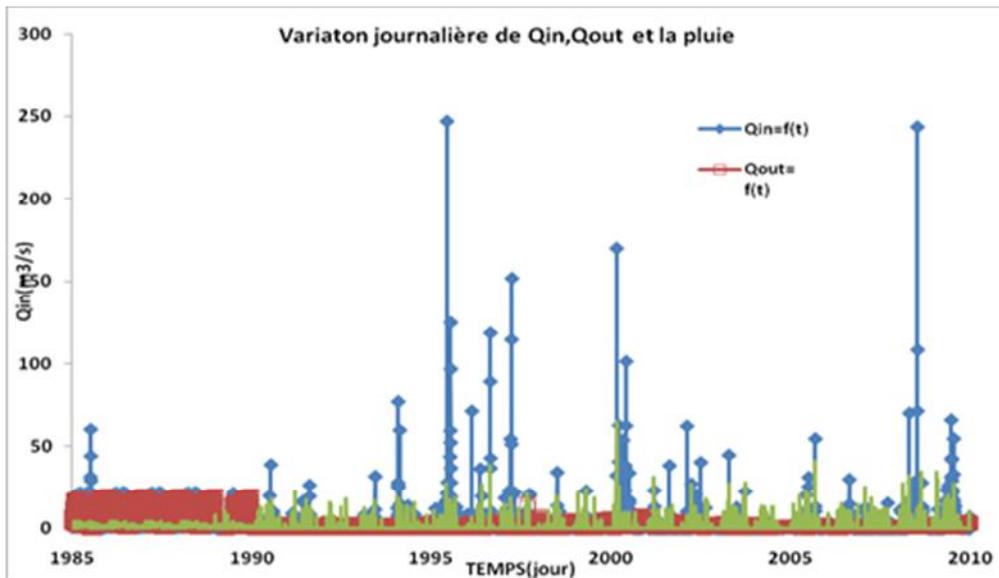


Figure V-11: Relation débit liquide à l'aval-débit sortant



FigureV-12: Relation débit entrant-pluie

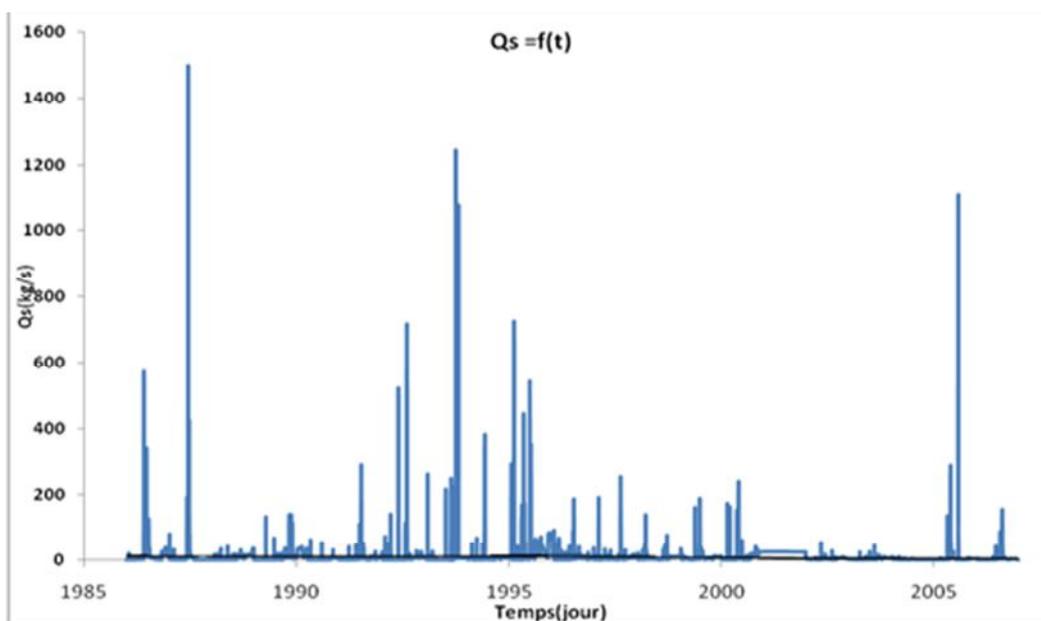


**Figure V-13:** Relation débit entrant-pluie-débit sortant

Cette comparaison laisse apparaitre une concordance entre pluie-débit entrant et débit liquide à l'aval-débit sortant, ce qui explique que les lachers du barrage contribue à l'alimentation de l'oued à l'aval(figure10,11,12,13).

Une hypothèse à été emise quant au calcul du débit solide entrant et sortant de la retenue visant à prendre l'équation de la relation débit liquide- débit solide trouvée par l'utilisation des différents modèles regressifs.

$$Q_s=4.37Q_l^{1.25}$$



**Figure V-14:** Variation du débit solide en fonction du temps

Pour vérifier la validité des résultats des levées bathymétriques quant au calcul du volume de vase déposé au sein de la retenue, un programme de calcul a été saisi avec MATLAB.

En se basant sur les équations de continuité ;

$$\begin{aligned}dV/dt &= S \cdot dz/dt = Q_{in} - Q_{out} \\dV_s/dt &= Q_{s,in} - Q_{s,out}\end{aligned}$$

Le programme permet de calculer l'inconnu  $Q_{in}$  et de déterminer par interpolation linéaire  $V_s$  ; le volume de sédiments déposés qui est évaluée à 45 millions de  $m^3$ . Une valeur qui apparaît surestimé en tenant compte de celle trouvée précédemment (32.15 millions de  $m^3$ ).

Cette surestimation est due probablement aux hypothèses émises auparavant concernant le calcul du débit solide entrant et sortant de la retenue.

Le programme de calcul est comme suit :

```
z_vinitial;
z_vfinal;
t_z;
Qout;
figure (1);
plot (z_v1986(:,2),z_v1986(:,1),'-',z_v2004(:,2),z_v2004(:,1),'-');
hold on;
t = 1;
v1986=interp1(z_v1986(:,1),z_v1986(:,2),z(:,2),'linear');
v2004=interp1(z_v2004(:,1),z_v2004(:,2),z(:,2),'linear');
v=v1986-v2004;
plot(v,z(:,2))
plot (v1986,z(:,2),'.',v2004(:,1),z(:,2),'.');
deltat=1;%deltat=1jour représente l'intervale de temps de 1jour
vs(t) = 0;
for t=2:(2004-1986)*365
    Qin(t)=t_Qout(t,2)+(v(t)-v(t-1))/deltat;
    Qsin(t)=4.37*(Qin(t)).^1.25;
    Qsout(t)=4.37*(t_Qout(t,2)).^1.25;
    vs(t)=vs(t-1)+deltat*(Qsin(t)-Qsout(t));
end
time=1986:(1/365):(2004-(1/365));
length(time)
figure (2);
plot(vs,time);
```

La validité des résultats précédents a également été vérifiée par comparaison avec des levés bathymétriques. Pour ce faire, une seconde méthode de calcul du volume d'envasement a été mise en œuvre au sein d'un S.I.G. Celle-ci consiste à comparer l'ancienne carte de la région d'étude (antérieure à la construction du barrage) et la nouvelle carte incluant la retenue.

Deux modèles numériques de terrain en ont été déduits, ainsi que leur différence qui a permis d'évaluer le volume de dépôt (figure16,17 et 18).

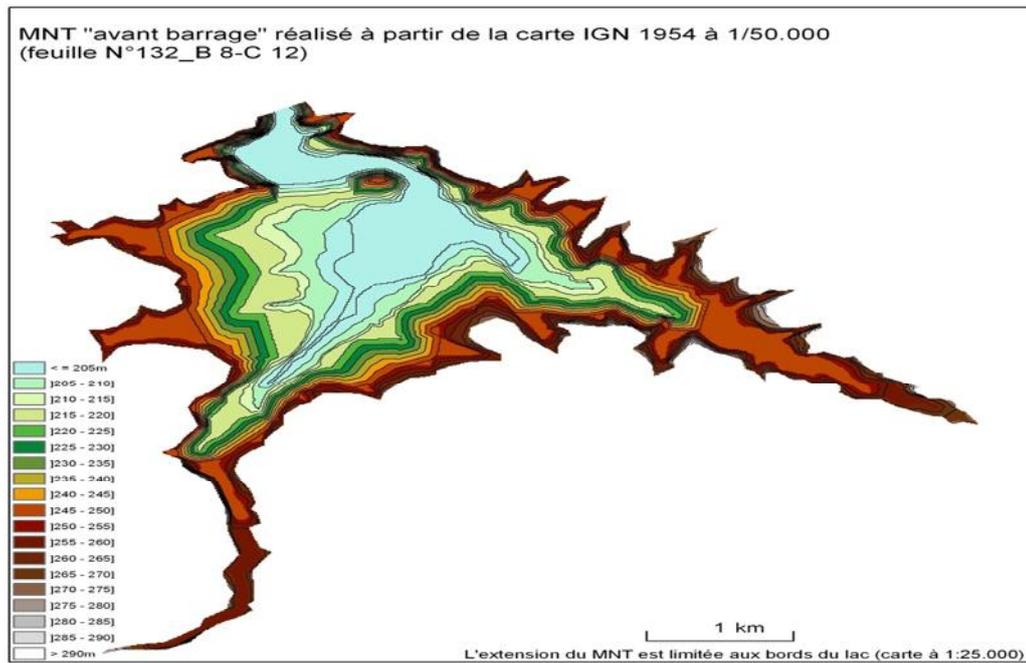


Figure V-16: MNT avant barrage

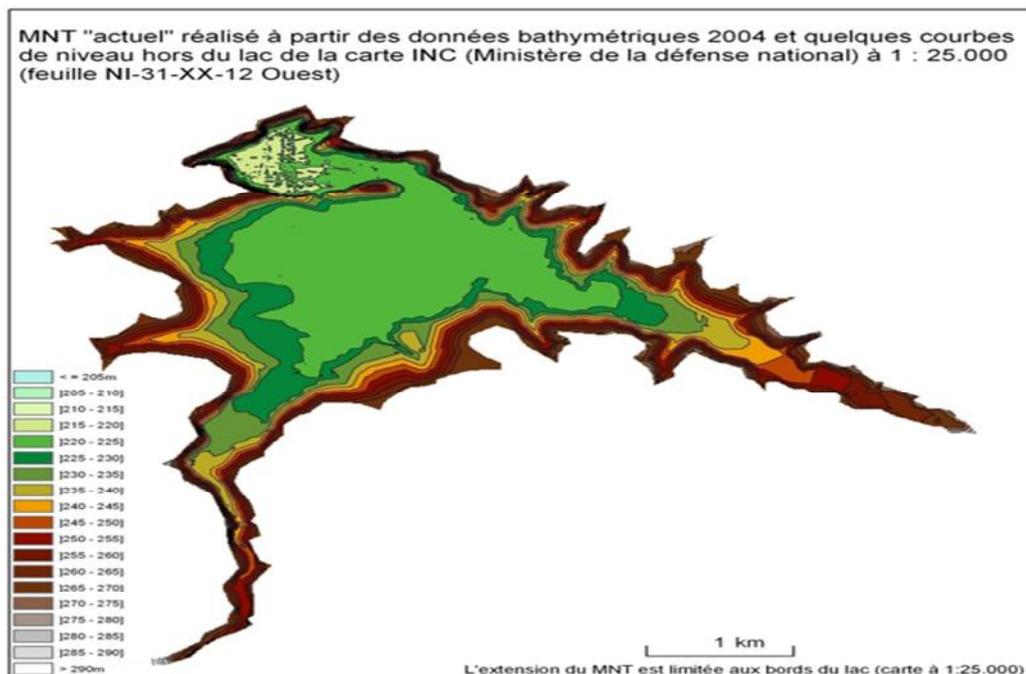
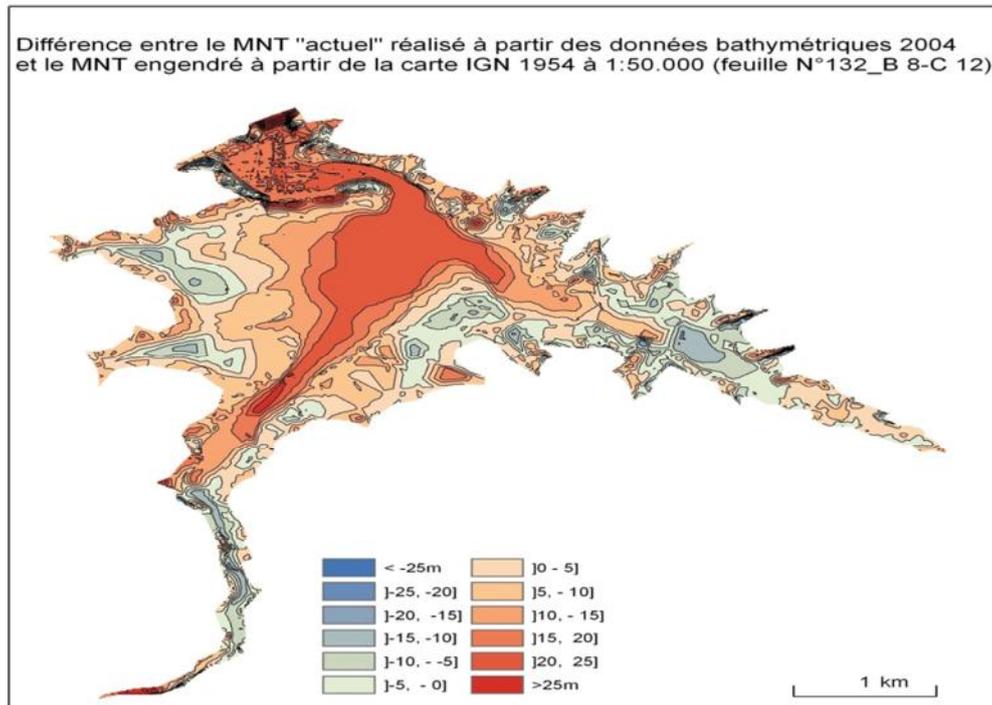


Figure V-17 : MNT avec données bathymétriques 2004



**Figure V-18:** Différence entre MNT avant barrage et MNT avec données bathymétriques 2004

Pour information, l'ancienne carte a été géo référencé en Lambert (Nord Algérie Ancienne) puis projetée dans le système de la nouvelle carte Universel Transverse Mercator (Nord Sahara 1959 UTM Zone 31 N).

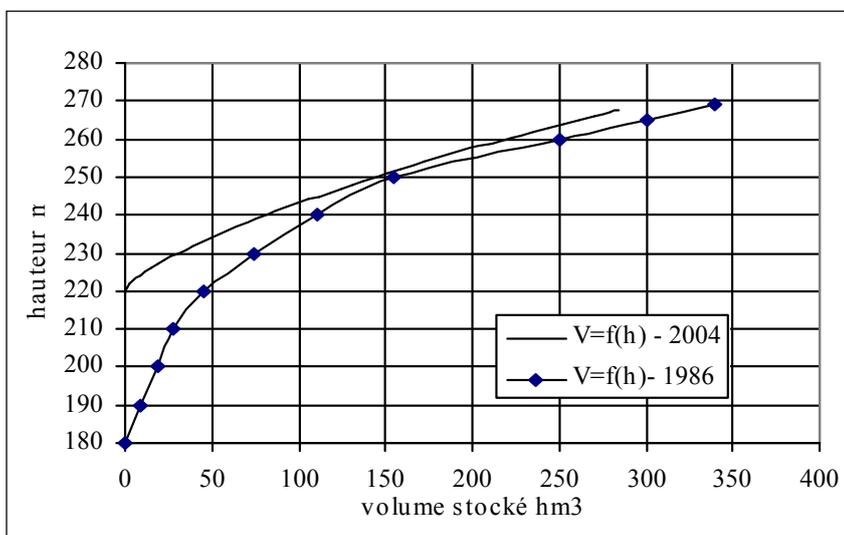
La carte nouvelle situation a été géo référencé en Universel Transverse Mercator (Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N).

Une petite translation de ( $x = -117m$ ,  $y = -70m$ ) a ensuite été appliqué à la carte ancienne situation pour assurer une meilleur superposition.

En particulier, deux fichiers de données **hauteur- surface- capacité** et deux fichiers de données topographiques  $x,y,z$  (nouvelle et ancienne situation) ont été générés. Ceux-ci constituent des données indispensables pour une modélisation numérique spatialement distribuée.

**Tableau V.10: Hauteur- surface- capacité (nouvelle et ancienne situation)**

Avant barrage					Situation 2004				
Plane height	2d_area		Volume		Plane height	2d_area		Volume	
m	m <sup>2</sup>	ha	m <sup>3</sup>	hm <sup>3</sup>	m	m <sup>2</sup>	ha	m <sup>3</sup>	hm <sup>3</sup>
267,5	9 427 617	942,76	349 939 999	349,94	267,5	9 060 433	906,04	283 790 503	283,79
264	9 201 674	920,17	317 316 396	317,32	264	8 644 713	864,47	252 807 587	252,81
260	8 525 901	852,59	281 181 137	281,18	260	8 125 382	812,54	219 263 963	219,26
250	6 452 752	645,28	201 345 219	201,35	250	6 867 445	686,74	144 313 951	144,31
245	6 030 117	603,01	170 137 127	170,14	245	6 299 380	629,94	111 427 054	111,43
240	5 605 495	560,55	141 047 312	141,05	240	5 763 812	576,38	81 254 686	81,25
235	5 178 984	517,90	114 085 323	114,09	235	5 118 211	511,82	53 921 652	53,92
230	4 750 559	475,06	89 260 666	89,26	230	4 300 803	430,08	30 502 555	30,50
220	3 322 501	332,25	46 061 724	46,06	220	230 599	23,06	18 867	0,02
215	2 867 412	286,74	30 598 852	30,60	215	0	0,00	0	0,00
210	2 197 700	219,77	17 339 962	17,34	210	0	0,00	0	0,00
200	0	0,00	0	0,00	200	0	0,00	0	0,00



**FigureV-15: Variation du volume en fonction de la côte**

## **V.8. Etablissement de la carte de sensibilité des sols à l'érosion (carte des zones à risque) dans le bassin versant d'Oued Lardjem**

Les objectifs de cette étude sont:

Objectif immédiat :

Etablissement de la carte de sensibilité des sols à l'érosion (carte des zones à risque) dans le bassin versant d'Oued Lardjem.

But recherché:

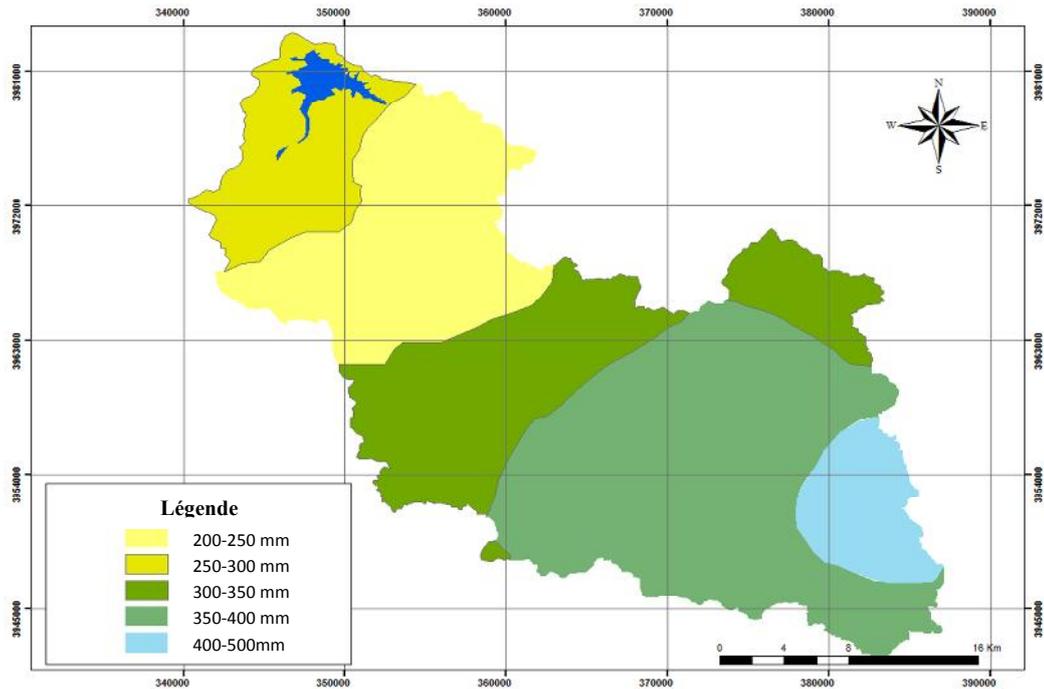
Elaborer un outil de prévision de l'envasement des barrages et retenues d'eau pour fournir une information pertinente aux aménageurs et aux ingénieurs (protection, dimensionnement des ouvrages etc.)

### **V.8.1 Cartographie des facteurs d'érosion :**

#### **V.8.1.1. Réalisation de la carte de précipitation :**

Les précipitations sont importantes à très importantes, les valeurs maximales sont enregistrées dans le Sud. Selon la carte des précipitations, il existe cinq niveaux des hauteurs :

- Niveau 1(200 – 250 mm) : localisé dans le Nord ;
- Niveau 2 (250 – 300 mm) : localisé dans le Centre ;
- Niveau 3 (300 – 350 mm) : localisé dans le Centre ;
- Niveau 4 (350 – 400 mm) : localisé dans le Sud ;
- Niveau 5 (400 – 500 mm) : localisé dans le Sud.

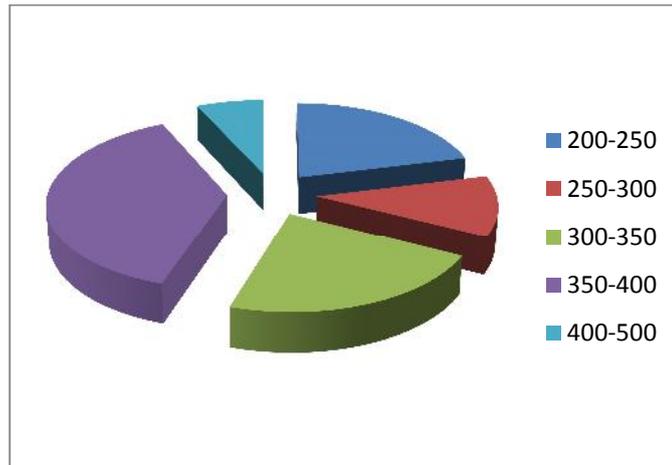


**FigureV-19:** carte des précipitations

L'analyse des données du tableau fait ressortir que le niveau 4 est plus dominant d'où il atteint 40% de la superficie totale, le niveau 1 et 3 occupent le même pourcentage (20%), le niveau 2 atteint 12% et le pourcentage le plus faible est enregistré dans le niveau 5 avec 7%.

**Tableau V.11:** superficie des hauteurs pluviométriques

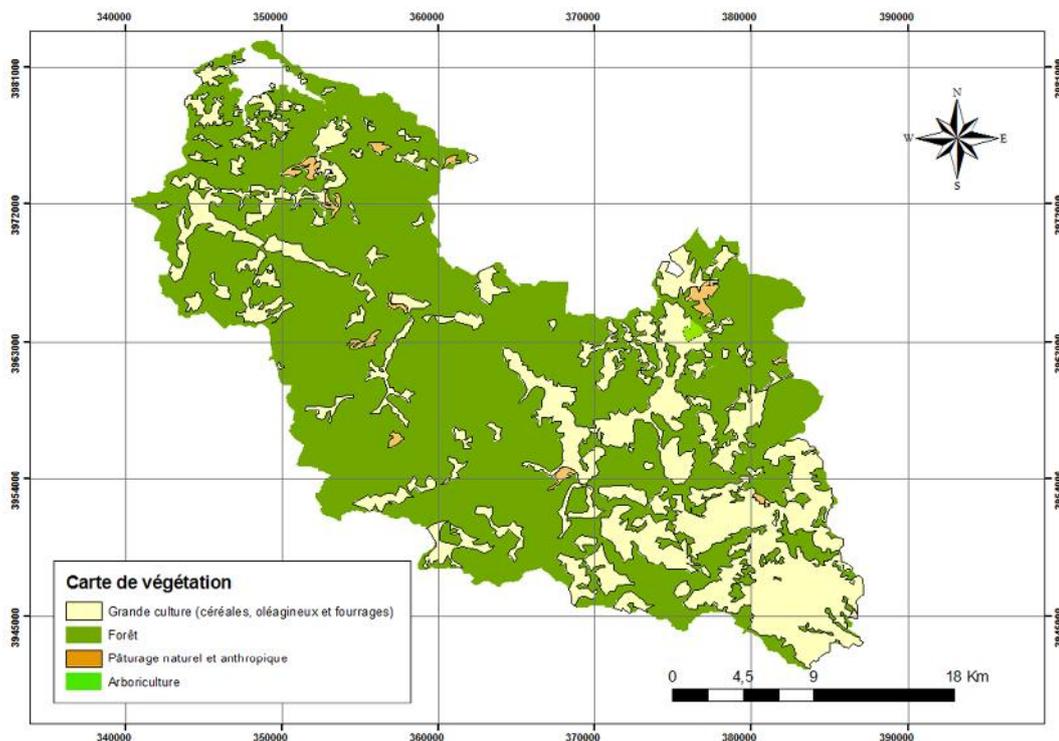
La hauteur (mm)	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie (%)
200-250	199	21.10
250-300	108	11.45
300-350	211	22.37
350-400	361	38.28
400-500	64	6.78



**Figure V-20:** Répartition spatiale de la pluviométrie par rapport à la surface

### V.8.1.2. Réalisation de la carte d'occupation des sols :

La carte d'occupation des sols est divisée en quatre classes : 1) Les forêts, 2) Sol nu, 3) Les céréalicultures, 3) L'arboriculture. La carte montre la dominance de la végétation, mais malheureusement se trouve en état dégradé.

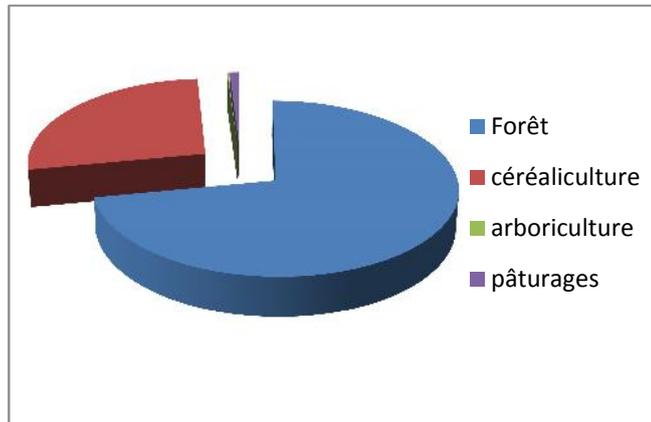


**Figure V-21:** Carte d'occupation des sols

La couverture n'est pas homogène, les forêts (association pin d'Alep, thuya et chêne vert) ainsi que le matorral (les cistes, genévrier) occupent 80% de la superficie totale, elles sont irrégulièrement réparties et apparaissent menacés par les incendies.

**Tableau V.12:** Superficies des occupations des sols

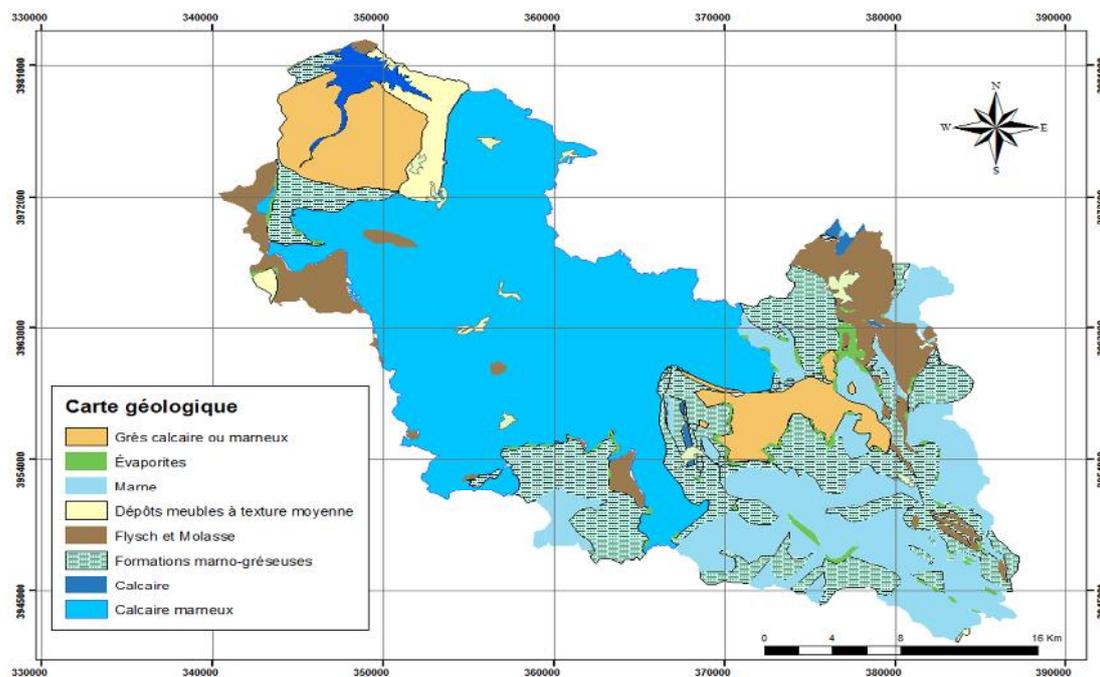
Occupations des sols	Superficie(Km <sup>2</sup> )	Superficie (%)
Forêt	669.71	71.98
céréaliculture	250.58	26.92
arboriculture	1.00	0.10
pâturages	9.18	0.98



**Figure V-22:** Répartition de la superficie par type d'occupation

**V.8.1.3. Réalisation de la carte des formations géologiques :**

La carte géologique contient des formations géologiques diverses, le calcaire prédomine surtout dans la partie médiane du bassin versant d'Oued Lardjem.

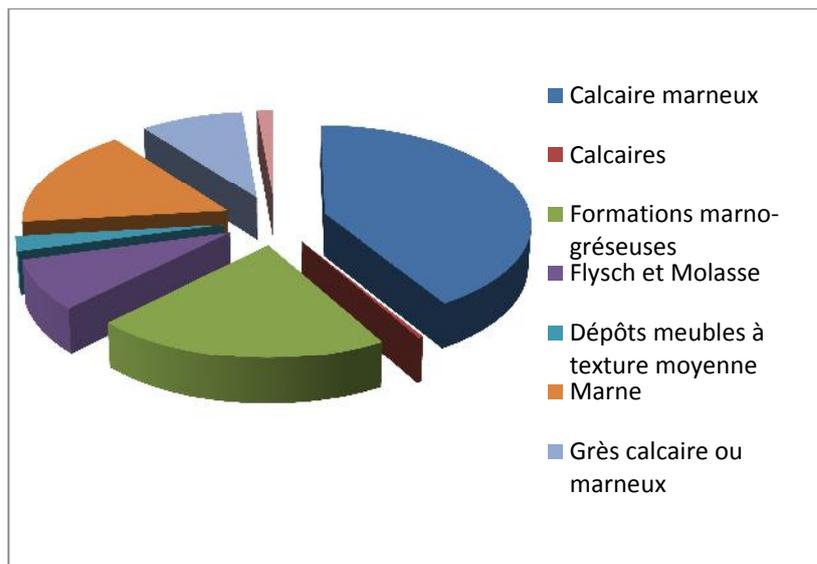


**Figure V-23:** Carte des formations géologiques

Le calcaire marneux atteint 42% de la superficie totale, les autres formations sédimentaires occupent des pourcentages faibles sauf les formations marno-gréseuses qui atteignent 21%.

**Tableau V.13 :** Superficies des formations géologiques

Formations géologiques	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie (%)
Calcaire marneux	383	41.29
Calcaires	3.48	0.37
Formations marno-gréseuses	193.41	20.85
Flysch et Molasse	76.56	8.25
Dépôts meubles à texture moyenne	22.37	2.41
Marnes	152.68	16.46
Grès calcaire ou marneux	83.06	8.95
Evaporites	12.93	1.39



**Figure V-24:** Répartition de la superficie selon la géologie

#### V.8.1.4. Réalisation de la carte des pentes :

L'altitude minimale du Bassin Versant d'Oued Lardjem est **190m**, quant à l'altitude maximale atteint 1270 m. La pente est irrégulière et crée des reliefs très accidentés, surtout dans la région Sud. La figure montre l'existence de trois zones :

**Zone plate (0 – 10 %) :** Se situe du Nord vers le centre d'Oued Lardjem ;

**Zone des piémonts (10 – 25 %) :** Se situe du Centre vers le Sud d'Oued Lardjem ;

**Zone des montagnes (25 – 80 %) :** Se situe sur la périphérique d'Oued Lardjem.

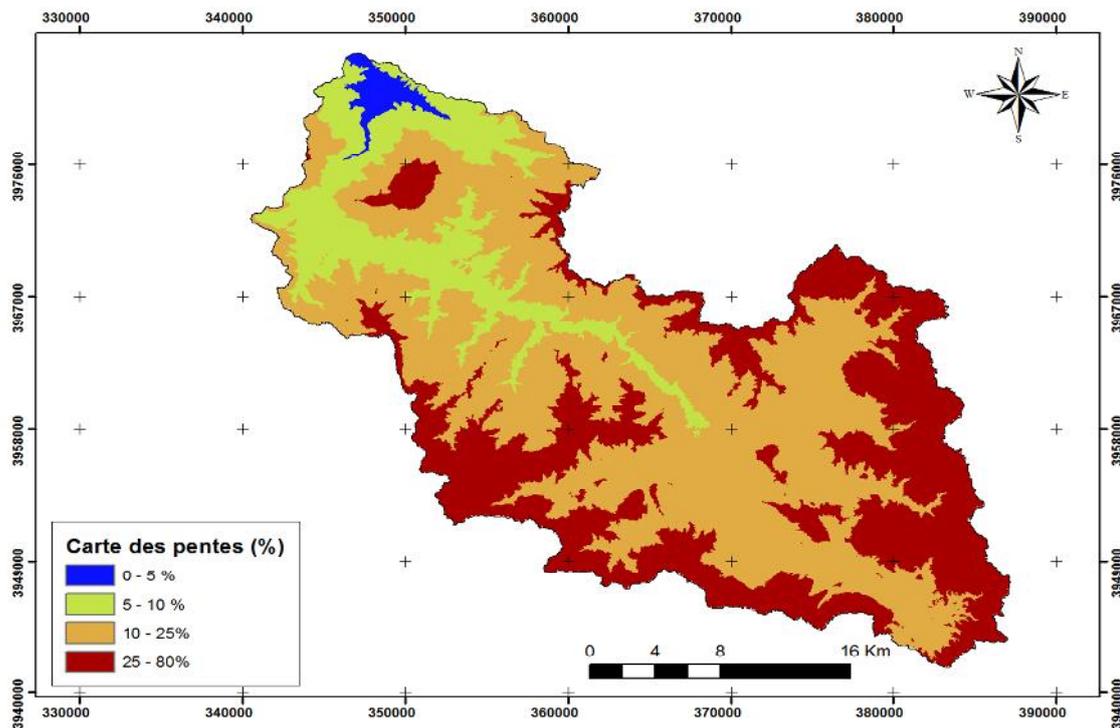


Figure V-25: Carte des pentes du Bassin d'Oued Lardjem

Le tableau suivant représente les superficies des classes des pentes, la classe 3 (10 - 25%) domine avec 46,13%.

Tableau V.14 : Superficie des pentes

Pentes	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie (%)
0 – 5 %	12	1,29 %
5 – 10 %	140	15,02 %
10 – 25 %	430	46,13 %
25 – 80 %	350	37,55 %

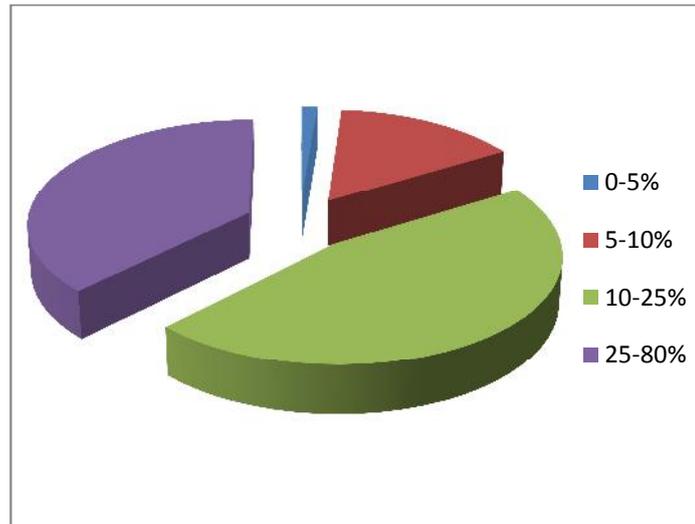


Figure V-26: Répartition de la superficie par classe des pentes

**V.8.1.5. Impacts des facteurs sur la sensibilité des terres à l'érosion :**

**V.8.1.5.1. Carte d'érosivité :**

La carte d'érosivité a été réalisée à la base de la carte des précipitations, il existe quatre classes d'érosivité, le risque le plus élevé se situe dans le Sud du Bassin Versant d'Oued Lardjem.

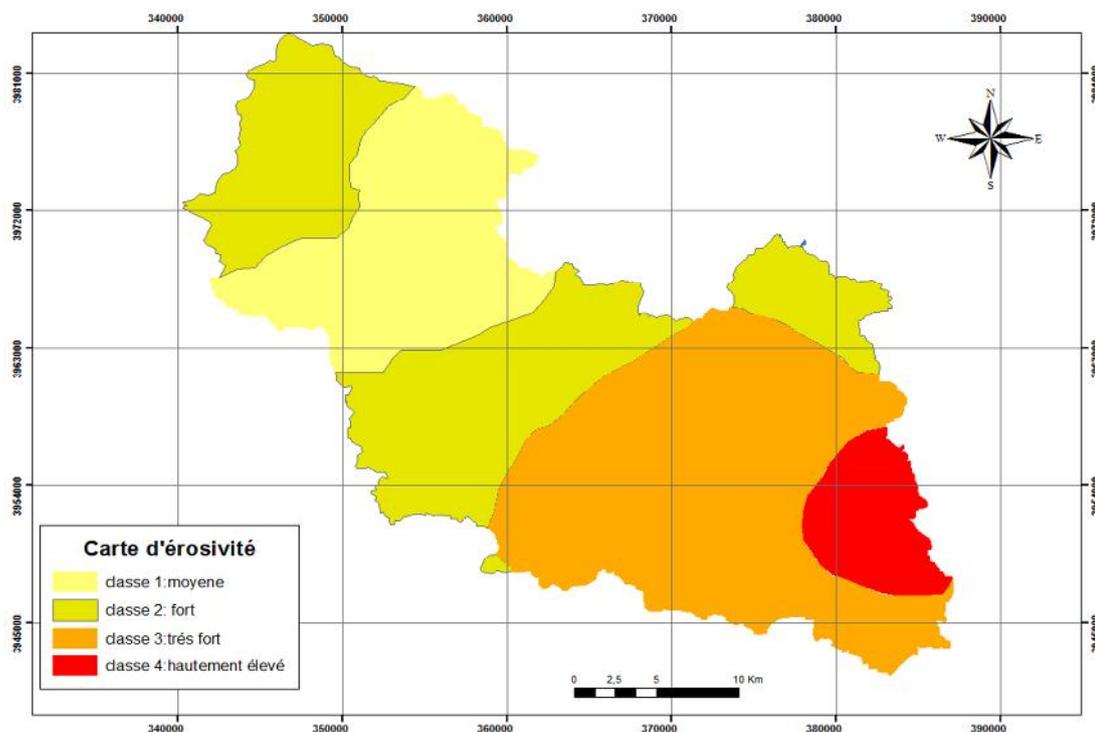


Figure V-27: Carte d'érosivité

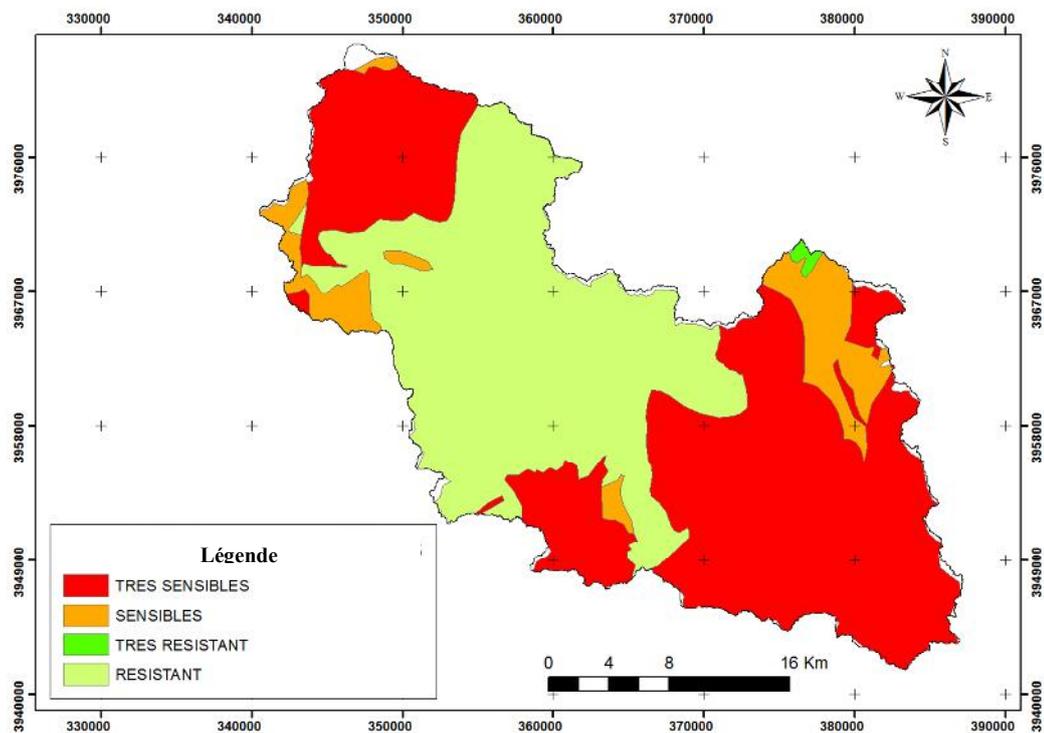
Le tableau V.15 représente le risque d'érosivité correspondant à la hauteur de précipitation.

**Tableau V.15:** Classe des risques

classes	Hauteur	Risque d'érosivité
1	250-300	Moyen
2	300-350	Fort
3	350-400	Très fort
4	400-500	Hautement élevé

**V.8.1.5.2. Carte de friabilité géologique :**

La sensibilité des formations géologiques et leurs friabilité change d'une formation à une autre, nous distinguons sur la carte quatre niveaux différents.



**FigureV-28:** Carte de sensibilité des formations géologiques

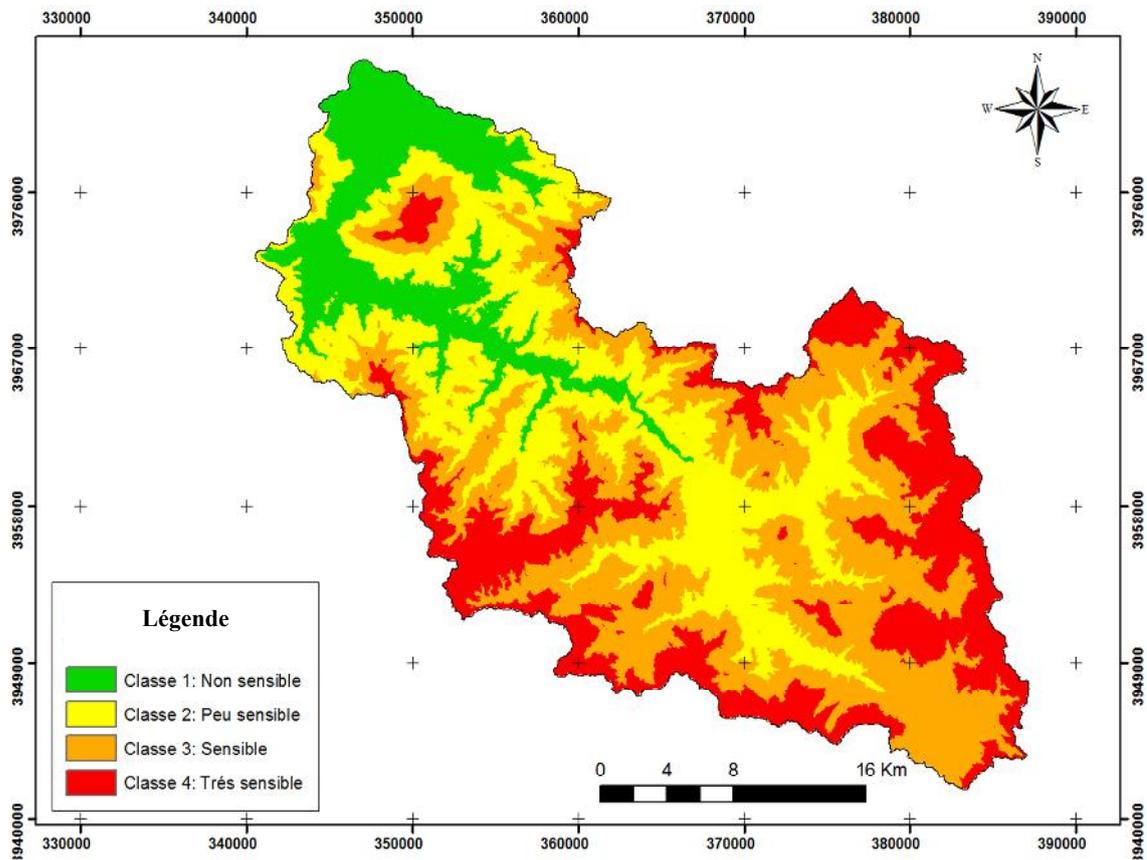
Dans la zone Nord et Sud du bassin versant d'Oued Lardjem les formations géologiques sont constitués de substrats tendres (marnes, grès, marno-gréseuse); ils occupent la plus grande partie du relief. D'autre part, la dominance et l'importance des alternances de marnes et grès en pente augmentent les potentialités érosives du bassin. L'analyse de la carte géologique a permis de distinguer quatre classes (très résistant, résistant, sensible et très sensible).

**Tableau V.16:** Classes des sensibilités géologiques

classes	érodabilité	Nature
1	Très sensible	Marne et argile gypsifères
2	Sensible	Argile et grès
3	Très résistant	Formations calcaires
4	Résistant	Alluvions

**V.8.1.5.3. Carte de l'impact de la pente sur l'érosion :**

Lorsque le terrain est très incliné le ruissellement est fort et l'érosion hydrique augmente. La vulnérabilité du bassin versant d'Oued Lardjem est très importante au Sud et à la partie médiane.



**Figure V-29:** Impact des pentes sur la vulnérabilité de l'érosion

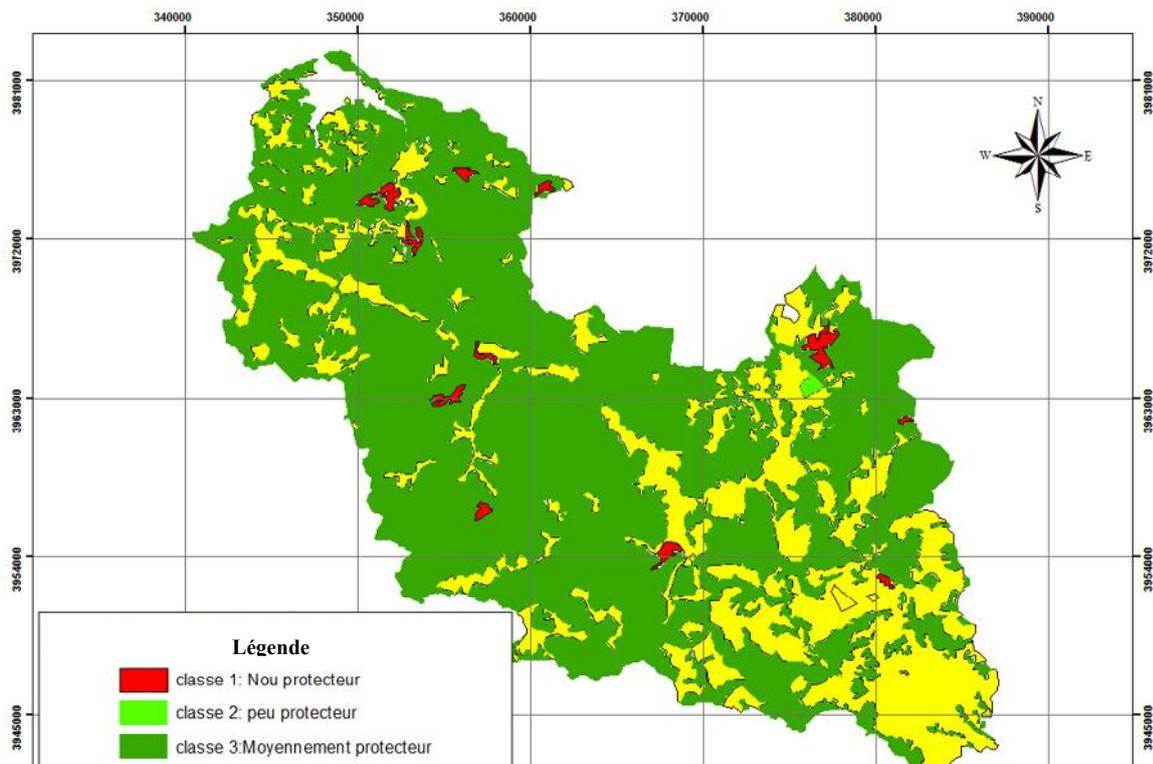
Les classes 3 et 4 dominent et occupent une superficie élevée du bassin versant d'Oued Lardjem.

**Tableau V.17:** Classes des pentes

classes	Impact de la pente	Pentes(%)
1	Non sensible	0 – 5
2	Peu sensible	5 – 10
3	sensible	10 – 25
4	Très sensible	25 – 80

**V.8.1.5.4. Carte des risques d'érosion liés au couvert végétal :**

La végétation joue un rôle important dans la protection du bassin versant. Selon la carte la partie médiane est plus couverte que les autres.



**FigureV-30:** Carte des risques liés au couvert végétal

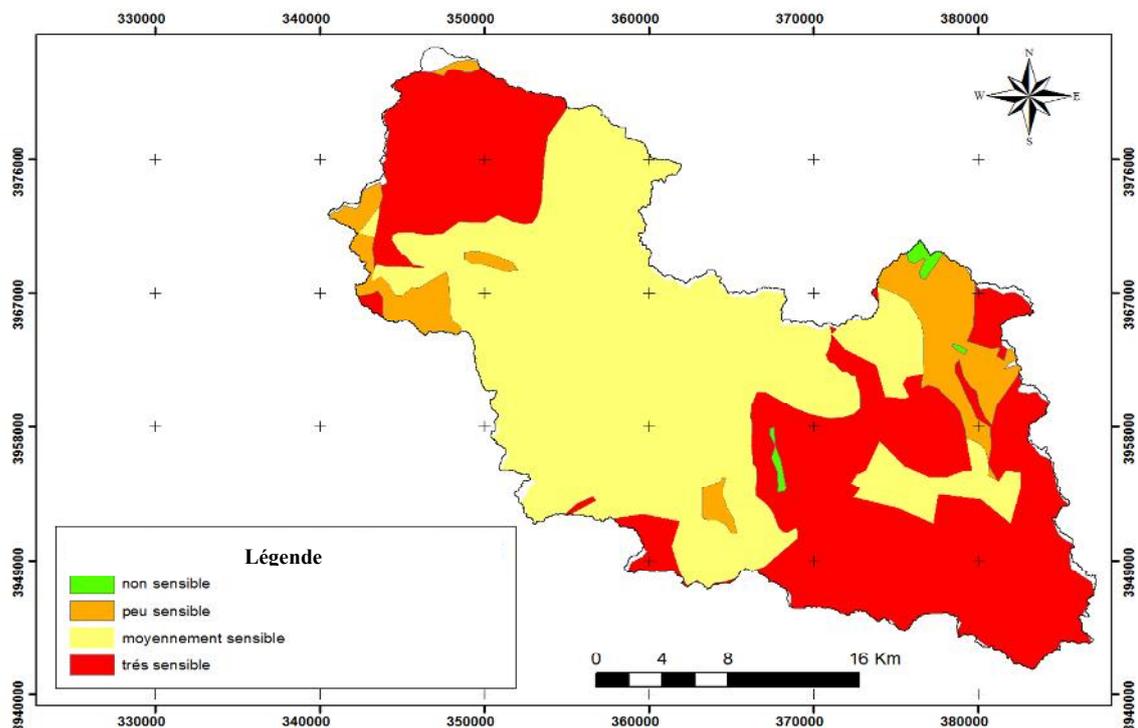
**Tableau V.18 :** Risques liées au couvert végétal

Classes	Impact de la pente	Nature du couvert
1	Non protecteur	Sol nu
2	Peu protecteur	céréaliculture
3	Moyennement protecteur	arboriculture
4	Protecteur	forêt

### V.8.1.5.5. Carte de sensibilité à l'érosion du Bassin Versant d'Oued Lardjem :

La carte de sensibilité à l'érosion du bassin versant est réalisée à partir de la superposition des quatre cartes réalisées (carte d'impact de la pente, carte de friabilité, carte d'érosivité, et carte des risques liés au couvert végétal). Nous distinguons quatre zones :

- Zone non sensible : au Sud du bassin ;
- Zone peu sensible : à l'extrémité Sud et Nord du bassin ;
- Zone moyennement sensible : partie médiane du bassin ;
- Zone très sensible : au Sud et au Nord du bassin.



**Figure V.31:** Carte de sensibilité du Bassin Versant d'Oued Lardjem

### V.8.2. Conclusion:

En fonction de l'objectif cartographique assigné à cette étude où les exigences de faire ressortir un document de synthèse répertoriant toutes les classes de sensibilité à l'érosion doivent servir de référence à d'éventuelles interprétations thématiques.

Il est possible grâce à ces cartes d'apporter une aide directe aux aménagistes pour la protection du bassin versant de l'Oued lardjem et d'agir en temps réel.

Ces méthodes demandent toutefois à être approfondies. Ainsi, l'évaluation de la sensibilité des sols à l'érosion pourrait être améliorée par la prise en compte de paramètres complémentaires à ceux que nous avons mobilisés, liés au traitement des images satellitaires qui peuvent contrôler la variation spatiale de l'érosion en fonction du temps, aux

caractéristiques de sols (profondeur du sol) et aux pratiques culturales (types de travaux du sol avant implantation de la culture.

Il s'agit donc d'une approche globale, synthétique et spatiale, permettant la compréhension des relations existantes entre les divers paramètres explicatifs et le sol.

La télédétection et les systèmes d'informations géographiques SIG présentent des avantages importants par rapport aux travaux expérimentaux, mais aussi des limites d'utilisation.

La validité des résultats ainsi obtenus, a montré une adéquation convenable entre les éléments de sensibilité obtenus par traitement cartographique et l'aspect superficiel du paysage qu'ils représentent sur terrain.

L'érosivité des pluies, l'érodibilité des sols (pédogénèse et texture ou lithologie), l'influence des pentes, le rôle du couvert végétal et des systèmes de culture, la diversité des techniques érosives ou anti-érosives, la multiplicité des actions anthropiques constituent autant de facteurs qui interagissent dans le phénomène d'érosion hydrique.

La réalisation de ce travail a connue plusieurs étapes successives:

- Récolte de l'information géographique et de données statistiques ;
  - Reconnaissances sur le terrain des différentes zones du bassin ;
  - Interviews semi structurés avec des spécialistes de différents services agricoles et forestiers ;
  - Intégration des données dans un Système d'Information Géographique (SIG) ;
  - Elaboration de cartes thématiques de base (carte des pentes, carte lithologique, carte du couvert végétal et d'occupation du sol) ;
  - Conception de matrices et fixation de classes résultantes pour permettre le croisement des cartes :
- Carte lithologique avec carte d'occupation du sol pour obtenir la carte de fragilité des terres ;
  - Carte des pentes issues du MNT avec carte de fragilité des terres pour obtenir la carte de sensibilité des sols à l'érosion.

Il est évident que ces cartes sont d'une certaine utilité pour de nombreux agents en charge des problèmes d'aménagement et de développement:

- les forestiers qui pourront choisir les techniques appropriées pour freiner ce phénomène érosif ou pour le moins en réduire les effets négatifs ;
- les agronomes et agriculteurs qui pourront adapter les techniques d'intervention sur ces sols et leur occupation par les végétaux pour en tirer les meilleures productions sans compromettre l'avenir et d'une façon générale les aménagistes soucieux d'une occupation intelligente des sols.

# **CONCLUSION GENERALE**

---

### CONCLUSION GENERALE :

L'Algérie dispose actuellement, de plus de 70 grands barrages d'une capacité totale de 7 milliards de m<sup>3</sup> d'eau. Or ce volume d'eau est fortement menacé par les dépôts de vase évaluée à 50 millions de m<sup>3</sup>/an (Remini, 2011). Ces dépôts constituent une conséquence directe de l'érosion des bassins versants du Nord algérien. La quantité de terre érodée a été estimée en 1980 par Demmak (1980) à 180 millions de tonnes par année et menace directement une vingtaine de barrages.

Dans ce contexte une étude a été menée sur le bassin versant d'oued sly et le barrage de sidi yacoub visant à éclaircir le phénomène érosion- transport solide au niveau du bassin versant et sa répercussion sur l'envasement du barrage.

On parvient au terme de cette étude aux conclusions suivantes :

Tout d'abord, à partir de la situation et la présentation de la région d'étude, on note en premier lieu que les caractéristiques du milieu prévoient l'existence d'une érosion plus ou moins remarquable.

La pente moyenne qui est de 14.17 a une influence directe sur la vitesse de l'eau. De même les caractéristiques lithopédologiques marquent l'existence de marnes en particulier et il faut noter que les marnes sont des roches friables, donc un facteur favorable à la dégradation.

Les caractéristiques biogéographiques montrent une insuffisance de la végétation toute l'année et les surfaces sont souvent soumises à la pâture.

Concernant les conditions climatiques, le climat de la région est de type semi-aride avec une moyenne de précipitation de  $P_{moy}=346\text{mm}$ .

Le bassin versant du barrage de Sidi Yacoub couvre une superficie de 918 km<sup>2</sup> qui s'étend en forme de croissant avec un périmètre totalisant 156 km et un indice de compacité de Gravélius de 1.44, comportant deux grandes unités de paysage, soit, une région montagneuse au Sud et Est et une région relativement plane au Nord. Malgré son caractère montagneux, la première région présente quelques replats, tandis que la seconde région s'avère parsemée de quelques montagnes et collines isolées et qui s'étendent suivant une orientation du sud-ouest au nord-est. La dénivelée de ces montagnes isolées varie de 600 à 800 m et leur relief se caractérise par plusieurs zones en pente escarpée.

La dénivelée maximale du bassin atteint 1270 m, en débutant à environ 190 m à l'embouchure, pour culminer à 1820 m sur la limite Sud-Est du bassin. Bien entendu, la dénivelée des terres principales ( $H_{5\%}$  à  $H_{95\%}$ ) est beaucoup moins importante, n'atteignant qu'environ 680 m. Cette valeur d'altitude correspond aussi au niveau moyen des terres. La déclivité moyenne du bassin est estimée à 21.6 %. La majeure partie des versants

(40%) a entre 15 et 35% de déclivité. Les versants avec les plus grandes déclivités sont situés dans la portion Ouest du Bassin.

L'analyse de ces différents paramètres physiques et géomorphologiques (lithologiques) permet une meilleure compréhension des causes des variations des régimes hydrologiques du bassin versant de sidi Yacoub et par conséquent leur contribution dans la genèse du transport solide. Leur interaction détermine la variabilité des phénomènes hydrologiques dans le temps et dans l'espace.

Les cartes géologiques consultées indiquent que les roches présentes dans le bassin versant sont d'origine sédimentaire d'âge compris entre le Trias et le Miocène.

Le pourcentage de boisement, d'environ 20%, est faible pour une région au relief abrupt. La forêt se trouve d'ailleurs localisé dans les terrains les plus résistants à l'érosion. Les terres cultivées représentent 42.5%. D'après les services des forêts de Chlef tout le bassin versant d'oued lardjem est très dégradé.

Le bassin versant est contrôlée par une seule station hydrométrique. L'analyse des données de cette station basée sur la méthode de régression en vue de la recherche de la meilleure relation débit solide- débit liquide aboutit à accepter le modèle régressif puissance et l'utiliser dans la quantification du transport solide. L'apport moyen calculé est de **24535.73** tonne/an d'où une érosion spécifique de **1635.72**tonnes/Km<sup>2</sup>/an. Ce taux de dégradation se situe dans la fourchette des valeurs proposées par Walling(1984) en se basant sur ses travaux réalisés au Maghreb. Il estime que la dégradation varie entre **1000 et 5000** tonnes/Km<sup>2</sup>/an.

Les principaux résultats de la campagne bathymétrique du mois de Septembre 2004 sont les suivants :

Côte de retenue normale des eaux (264 m)

Surface du réservoir : 879ha

Volume du réservoir : 253 Hm<sup>3</sup>

Côte des plus hautes eaux exceptionnelles (267 m.)

Surface du réservoir : 932 ha

Volume du réservoir : 284 Hm<sup>3</sup>

La comparaison de la capacité entre deux levés permet de mesurer le volume des sédiments accumulés.

L'apport moyen annuel de l'oued est de 98 hm<sup>3</sup>/an. L'envasement moyen annuel est de 0.17 hm<sup>3</sup>/an.

On pourrait toujours comparer les mesures faites au niveau de la station hydrométrique située à l'aval du barrage aux données exploitées au niveau du barrage.

Un relevé bathymétrique effectué en 2004 a mesuré un apport solide moyen annuel de 1,79 hm<sup>3</sup>/an depuis la mise en eau. L'évaluation de la perte de capacité annuelle moyen de

1986 à 2004 est de 1.79 Hm<sup>3</sup>/an. L'évaluation de la perte de surface annuelle moyenne de 1986 à 2004 est de 2.54 Ha/année. Le taux d'envasement du barrage est de 11.28%.

Une hypothèse a été émise quant au calcul du débit solide entrant et sortant de la retenue visant à prendre l'équation de la relation débit liquide- débit solide trouvée par l'utilisation des différents modèles regressifs.

$$Q_s=4.37Ql^{1.25}$$

La validité des résultats précédents a également été vérifiée par comparaison avec des levés bathymétriques. Pour ce faire, une seconde méthode de calcul du volume d'envasement a été mise en œuvre au sein d'un S.I.G. Celle-ci consiste à comparer l'ancienne carte de la région d'étude (antérieure à la construction du barrage) et la nouvelle carte incluant la retenue.

Deux modèles numériques de terrain en ont été déduits, ainsi que leur différence qui a permis d'évaluer le volume de dépôt.

La carte de sensibilité à l'érosion du bassin versant d'Oued Lardjem est réalisée à partir de la superposition des quatre cartes réalisées (carte impact de la pente, carte de friabilité, carte d'érosivité, et carte des risques liées au couvert végétal). Nous distinguons quatre zones :

- Zone non sensible : au Sud du bassin;
- Zone peu sensible : à l'extrémité Sud et Nord du bassin;
- Zone moyennement sensible : partie médiane du bassin;
- Zone très sensible : au Sud et au Nord du bassin.

Il est possible grâce à ces cartes d'apporter une aide directe aux aménagistes pour la protection du bassin versant de l'Oued lardjem et d'agir en temps réel.

Ces méthodes demandent toutefois à être approfondies. Ainsi, l'évaluation de la sensibilité des sols à l'érosion pourrait être améliorée par la prise en compte de paramètres complémentaires à ceux que nous avons mobilisés, liés au traitement des images satellitaires qui peuvent contrôler la variation spatiale de l'érosion en fonction du temps, aux caractéristiques de sols (profondeur du sol) et aux pratiques culturales (types de travaux du sol avant implantation de la culture).

L'érosivité des pluies, l'érodibilité des sols (pédogénèse et texture ou lithologie), l'influence des pentes, le rôle du couvert végétal et des systèmes de culture, la diversité des techniques érosives ou anti-érosives, la multiplicité des actions anthropiques constituent autant de facteurs qui interagissent dans le phénomène d'érosion hydrique.

Il est évident que ces cartes sont d'une certaine utilité pour de nombreux agents en charge des problèmes d'aménagement et de développement:

- les forestiers qui pourront choisir les techniques appropriées pour freiner ce phénomène

érosif ou pour le moins en réduire les effets négatifs ;

- les agronomes et agriculteurs qui pourront adapter les techniques d'intervention sur ces sols et leur occupation par les végétaux pour en tirer les meilleures productions sans compromettre l'avenir et d'une façon générale les aménagistes soucieux d'une occupation intelligente des sols.

L'absence de sites favorables pour la réalisation de grands barrages en Algérie, nécessite l'entretien des barrages existants. Une quinzaine de barrages existants sur les 52 grands barrages en exploitation sont menacés de comblement et nécessitent un dévasement urgent (Remini B., 2006).

Le rejet des vases à proximité des sites ou à l'aval dans l'oued pose d'énormes problèmes écologiques et environnementaux. Ceci incite à réfléchir sur la réutilisation et la valorisation de la vase dans les domaines de la construction, poterie et agronomique. Les résultats obtenus sont très encourageants pour l'utilisation de la vase comme matière première pour la fabrication de la brique, puisque elle présente les mêmes caractéristiques que celle de l'argile jaune utilisé par l'ensemble des briqueteries d'Algérie.

La vase doit être considérée désormais comme un produit bénéfique et non pas un simple rejet dont les difficultés d'élimination ou de stockage posent un problème d'environnement. La vase draguée peut être utilisée en fonction de la nature et la granulométrie des sédiments.

La vase contient une grande proportion en élément fins, ces limites de plasticité en particulier, et celles de liquidité en général, sont facilement atteintes ce qui explique la fréquence de mouvements de masse le long du versant durant les périodes de précipitations. La vase est constituée de kaolinite, illite et chlorite.

Les résultats des différentes analyses effectuées sur la vase peuvent servir pour la localisation des régions instables du bassin versant dont le but de le restaurer, aussi bien les recherches périodiques sont indispensables et pratiquement irremplaçables pour pouvoir cerner un grand nombre de phénomènes.

En effet, la valorisation des sédiments figure parmi les recommandations dans de nombreuses études effectuées sur le devenir des sédiments dragués ainsi que sur la préservation des ressources en eau et la protection de l'environnement.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## BIBLIOGRAPHIE

Albergel J., 2004. Petits barrages et lacs collinaires, aménagement originaux de conservation des eaux et de protection des infrastructures aval : exemples des petits barrages en Afrique du Nord et au Proche-Orient. *Sécheresse* 15(1): 78-86.

Amireche H., 1991. L'érosion dans le Tell Nord-Constantinois. Cas du bassin versant du barrage des Zardezas. Actes du colloque sur l'érosion et l'envasement des barrages, A.N.R.H, Alger.

Amirèche H., 1994. Formes et processus érosifs dans le Tell nord constantinois. Cas des bassins des oueds Kotton et Fessa (Algérie). *Méditerranée* 80(3/4): 41-50.

Anonyme, 1991. Actes du colloque sur l'érosion et l'envasement des barrages. Institut Supérieur de Gestion et de planification Borj-el-kiffen. Alger. 1-3 décembre 1991.

Anonyme, 1989. Transports de sédiments. *La houille blanche revue internationale de l'eau*. N°3/4. France. 1989.

Arabi M., 1991. Intensification de l'agriculture en Algérie, contraintes et espoirs. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, Alger.

Arabi M. et E. Roose, 1993. Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols en montagne semi-aride algérienne. *Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion* 13: 230-240.

Arabi M., K. O.E., et al., 2004. Bilan de l'enquête sur la défense et restauration des sols (DRS) en Algérie. *Sécheresse* 15(1): 87-95.

Atawoo M. A. et J. M. Heerasing, 1997. Estimation of soil erodibility and erosivity of rainfall patterns in Mauritania. Réunion des scientifiques agricoles, Mauritanie.

Aubert G., 1986. Réflexions sur l'utilisation de certains types de banquettes de défense et restauration des sols en Algérie. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie* XXII(2): 147-151.

Aubert G., 1987. Quelques remarques sur la susceptibilité des sols principalement de la région de Médéa vis à vis de l'érosion hydrique. *Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion* 7: 97-99.

Aubert G. and A. Monjauze, 1946. Observations sur quelques sols de l'Oranie nord- occidentale : influence du déboisement, de l'érosion, sur leur évolution. *Comptes Rendus de la Société de Biogéographie* 23: 44-51.

Belhadri M., 1997. Caractérisation et valorisation de la vase du barrage de sidi yacoub. Thèse de magistère. Centre universitaire de Chlef. Institut d'hydraulique. Chlef.

Bellatreche A., 1987. Érosion et perspectives de conservation des sols dans les bassins sédimentaires de Médéa. Beni Slimane. Thèse de doctorat. Institut des Sciences de la Terre. Spécialité : Géomorphologie. USTHB. Alger.

Benaïssa, A., 1998. Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine (Algérie). *Revue Rhumel. Revue des Sciences de la Terre et de l'Aménagement* 6: 111-120.

Benaïssa, A. et M. A. Bellouche, 1999. Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine (Algérie). *Bull. Eng. Geof. Env.* 57: 301-310.

Benblidia, M., A. Salem, et A. Demmak, 2001. Extraction de sédiments dans les retenues. *La Houille Blanche* 6/7:76-78.

Benchetrit, M., 1972. L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. Paris, Presses universitaires de France.

Benik, S. R., B. N. Wilson, et al., 2003. Evaluation of erosion control products using natural rainfall events. *Journal of Soil and Water Conservation* 58(2): 98-105.

Benkhaled, A. et B. Remini, 2003. Analyse de la relation de puissance : débit solide - débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Revue des Sciences de l'eau* 16(3): 333-356.

Benmoussa, M., M. Elyamani et A. Saidi, 1993. Application de l'équation universelle des pertes en sol du bassin versant de Oued Tasrafete. *Géo-Observateur* (Octobre): 83-93.

Bernard, C., L. Mabit, M. R. Laverdière et S. Wicherek, 1998. Césium-137 et érosion des sols." *Cahiers Agricultures* 7: 179-186.

Bouanani A., 2004. Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna. Thèse de doctorat en hydrogéologie. Université de Tlemcen.

Bouchelkia H. 2007. Etude du transport solide dans un bassin versant et son impact sur l'envasement des barrages. Thèse de doctorat en hydraulique. Université de Tlemcen.

Boudjadja, A., M. Messahel et H. Pauc, 2003. Ressources hydriques en Algérie du Nord. *Revue des Sciences de l'eau* 16(3): 285-304.

Boudjemline, D., K. Zemouri, et al. , 1993. Contribution à l'étude de l'envasement du barrage d'Irîl-Emda (Kherrata). *Réseau Erosion - Bulletin* 13: 200-214.

Boughattas, N. e. H., M. S. Felfoul, et al., 2003. Relation entre l'efficacité des lacs collinaires et la sensibilité au ravinement de leur bassin versant en Tunisie centrale. *La houille blanche* 6: 34-40.

Bouguerra, K., 1985. Analyse et interprétation des mesures effectuées sur les micro-bassins expérimentaux durant l'année 1983-1984. Journées techniques de l'étude "Érosion et transports solides en zone semi-aride", Ministère de l'Hydraulique de l'Environnement et des Forêts. Institut National des Ressources Hydrauliques.

Bouhlassa, S., A. Azenfar et A. Machrouh, 1995. Caesium fallout as a tracer of erosion-sedimentation in big catchment. *Applied Radiat. Isot.* 46(6/7): 659-660.

- Bouhlassa, S., M. Moukhchane et A. Aiachi, 2000. Estimates of soil erosion and deposition of cultivated soil of Nakhla watershed, Morocco, using  $^{137}\text{Cs}$  technique and calibration models. *Acta Geologica Hispanica* 35(3-4): 239-249.
- Bourouba, M., 1994. Bilan comparatif de l'érosion actuelle dans deux bassins-versants de l'Algérie orientale : la Seybouse et le Djendjen. *Méditerranée* 80(3/4): 31-39.
- Bourouba, M., 1996. Essai de quantification de l'érosion actuelle à partir des mesures de turbidité en Algérie orientale. *Bulletin de l'ORSTOM* 16: 232-248.
- Bourouba, M., 1997. Les variations de la turbidité et leurs relations avec les précipitations et les débits des oueds semi-arides d'Algérie orientale. *Bulletin de l'ORSTOM* 17: 345-360.
- Bourouba, M., 1998. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides de l'Oued Medjerda supérieur (Algérie orientale). *Bulletin de l'ORSTOM* 18: 76-97.
- Bourouba, M. 2003. Étude comparative de la teneur en sédiments en suspension de deux oueds méditerranéens intramontagneux du Tell oriental (Algérie). *Z. Geomorph. N.F.* 47(1): 51-81.
- Bourougaa, L. et S. Monjengue, 1989. Fixation mécanique et biologique des ravines: expérimentation dans la région semi-aride de Beni-Slimane, Algérie. *Bulletin Réseau Érosion*. 9: 19-29.
- Bouزيد, A. 1991. L'expérience de la Tunisie dans la protection des sols et des barrages. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, Alger.
- Bouvard J., 1984. Barrages mobiles et ouvrages de dérivation à partir de rivière transportant des matériaux solides. Edition Eyrolles. 359pages. Paris.
- Brahamia, K., 1993. Essai sur la dynamique actuelle dans la moyenne montagne méditerranéenne bassin versant de l'oued Mina zone de Taassalet. Algérie. *Géographie*. Grenoble, Université de Joseph Fourier: 230.
- Brahim, L. A., F. S. Alaoui, et al., 2003. Quantification des pertes en sols dans le bassin- versant Nakhla (Rif septentrional). *Sécheresse* 14(2): 101-106.
- Callaud M., 2004 Cours de mécanique de sols. Tome1. Edition : institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement. Paris. France.
- Chader A. et all, 1991. Utilisation de la télédétection pour une carte des sols dans la zone des marnes. Bassin versant de l'Oued Mina (Algérie). Actes du colloque sur l'érosion et l'envasement des barrages, A.N.R.H, Alger.
- Chadi, A. et T. Hadji, 1992. Érosion des sols et envasement des barrages. *Algérie Équipement* 5: 20-25.
- Chebbani, R., N. Mededjel, et al. 1995. Application de la G.C.E.S. dans la région de Tlemcen, Algérie. Environnement humain de l'érosion, Journées du Réseau Erosion, 20-22 septembre 1994, Bondy, FRA, Réseau Erosion - Bulletin (FRA).

Chebbani, R. et S. Belaidi, 1997. Étude de la dynamique du ravinement suivi expérimental de 2 couples de ravines près de Tlemcen (Algérie). ORSTOM Bulletin Réseau Érosion17: 152-160.

Chebbani, R., K. Djilli, et al. 1999. Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion 19: 85-95.

Chen, F., E.T.Kanemasu, L. T. West et F. Rachidi, 1993. Analysis of land use and simulation of soil erosion with GIS for the Semi-Arid region of Morocco. Géo Observateur10: 55-75.

Chenaoui B., 1992. Contribution à l'étude du transport solide à la station hydrométrique de l'Oued Haddad affluent d'Oued Mina. (Wilaya de Relizane). Mémoire d'Ingénieur d'état. Centre Universitaire de Chlef. Institut d'Agronomie.

Chenaoui B., 2002. Quantification de l'érosion à partir des différentes stations hydrométriques du bassin versant de Oued Mina. (Wilaya de Relizane). Mémoire de Magister. Université de Mascara.

Chenaoui B. et Remini B., 2014. Monitoring and modeling of sediment transport in the watershed of oued Lardjem, Algeria. DESWATER (desalination and water treatment), volume 52, issues 10-12, February 2014, 2139-2143, DOI: 10.1080/19443994.2013.877852

Chow, T. L., H. W. Rees, et al. 1999. Effectiveness of terraces/grassed waterway systems for soil and water conservation: A field evaluation. Journal of Soil and Water Conservation 54(3): 577-583.

Djabbouri S.T., 1988. Hydrology and watershed management. Masul University. IRAK.

Dai, F. C., C. F. Lee, et al. 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. Engineering Geology 64: 65-87.

Damnati, B., S. Ibrahim, et al. 2004. Utilisation du césium-137 pour l'estimation des taux d'érosion dans un bassin-versant au nord du Maroc. Sécheresse 15(2): 195-199.

Daoudi, M., A. Abdellaoui et M. S. Guettouche, 1994. SIG pour le suivi et l'évolution de l'érosion par ravinement. Actes de la Conférence Canadienne sur les SIG, Ottawa, Canada.

Demmak A., 1977. L'érosion hydrique et les transports solides en Algérie. Aspect hydrologique du phénomène. Publication interne, service des études scientifiques. A.N.R.H, 1977.

Demmak A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle. Université Pierre et Marie Curie. Paris.

Derruau M., 1974. Précis de géomorphologie. 6<sup>ème</sup> édition de Masson et Cie, 453 pages. Paris.

Despois, J. 1949. L'Afrique du Nord, P.U.F.

Dubreuil P., 1974. Initiation à l'analyse hydrologique. Edition Masson, Paris. France.

Dumouchel, D. 1991. Les méthodes de contrôle de l'érosion, Service Ressources et aménagement du territoire, vice-présidence Environnement, Hydro-Québec 179.

Fay G. 1993. Comment lutter efficacement contre l'érosion dans les montagnes rifaines et telliennes ? Réseau Erosion - Bulletin 13: 266-273.

Fellow F., 1974. Reservoir sedimentation. Hydraulic laboratory le high University Bethlehem U.S.A, 1974.

Fillat G., 1981. Pratique des sols et fondation. Edition Menitor. P 157-169.

Finkel. 1986. Engineering Measures for Soil and Water Conservation: Terracing and Benching, p. 85-91, *In* H. J. Finkel, et al., eds. Semiarid Soil and Water Conservation. CRC Press Ltd, Boca Raton, Floride.

Flanagan, D. C., L. D. Norton, et al. 2003. Using polyacrylamide to control erosion on agricultural and disturbed soils in rained areas. *Journal of Soil and Water Conservation* 58(5): 301-311.

Fleming G., 1969. Design curves for suspended load estimation. *Proc. Inst. Civ.Eng.* Vol.43, U.S.A.

Fournier F., 1960. Climat et érosion. Presse universitaire de France. Paris, 1960.

Galea G., Ramez P., 1995. Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteau. Guide à l'usage des aménageurs. Série Gestion des milieux aquatiques n°10. Cemagref, 1995.

Garouani, A. E., A. Merzouk et A. ozer , 2003. Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions*, Montpellier, France, IAHS Press.

Gavrilovic, S., 1992. Étude générale de la petite et moyenne hydraulique agricole de l'Algérie du Nord. Détermination des potentialités globales par zone homogène. Érosion. Mission 1, Dossier 2, vol 3. A. Enhyd-Energoprojekt, Ministère de l'Équipement et du Logement, Alger.

Ghachi A., 1986. Hydrologie et utilisation de ressource en eau en Algérie. Le bassin de la Seybousse. 508 pages. O.P.U. Alger, 1986.

Gomer D., 1990. Programme hydrométrique. Rapport du projet Oued Mina. Séminaire d'évaluation 1990, Projet Oued Mina.

Gomer D., Smati A., 1990. Quantification et modélisation du débit liquide et solide des microbassins versants de l'Oued Mina au Nord-Ouest d'Algérie. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, 1-3 décembre, Alger.

Gomer D., 1994. Ecoulement et érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat méditerranéen. Docteur -Ingénieur. Université de Karlsruhe.

Gomer, D. et T. Vogt, 2000. Physically based modeling of surface runoff and soil erosion under semi-arid Mediterranean conditions. The example of Oued Mina, Algeria. Soil erosion. Application of physically based models. J. Schmidt. Berlin, Springer: 59-78.

Goubay A., 1991. Rôle des associations végétales en vue d'une protection des sols du bassin versant de l'Oued Mina. Actes du colloque sur l'érosion et l'envasement des barrages. Alger.

Greco J., 1966. L'érosion, la défense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie.

Guyot J. L. et al, 1990. Transport de matières dissoutes et particulaires des Andes. Hydrological sciences-journal- des sciences hydrologiques, décembre 1990. pp. 653-665. Bolivie, 1990.

Gouvernement de Canada , 2002. La bio-ingénierie des sols. Une solution de rechange au béton. Fonds d'assainissement des Grands Lacs 2000. Burlington, Ontario.

Gray, J. M. and B. W. Murphy, 1999. Parent Material and Soils - A Guide to the Influence of Parent Material on Soil Distribution in Eastern Australia. NSW Department of Land and Water Conservation. Sydney.

GTZ , 1994. Écoulement et érosion dans des petits bassins-versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen. Eschborn, GTZ.

GTZ 1996. L'Aménagement des Zones Marneuses dans les Bassins-Versants des Montagnes de l'Atlas Tellien Semi-Aride, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

Guettouche, M. S., 1991. Essai d'une cartographie de l'érosion des sols par télédétection satellitaire SPOT. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, Alger.

Hamdani H., 1988. Statistiques descriptives et expression graphique. 381 pages. pp. 268-339. Alger, 1988.

Hammoudi, A., S. Monjengue, et al. 1989. L'enquête sur l'efficacité des aménagements de défense et restauration des sols (DRS) en Algérie. Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion 9: 14-18.

Heusch, B. 1970. L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. Toulouse, Université de Toulouse:176.

Heusch, B. et A. Milliès-Lacroix, 1971. Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin. Application au Maghreb. Mines et Géologie 33: 21-39.

Heusch, B., 1986. Cinquante ans de banquettes de D.R.S. - C.E.S. en Afrique du Nord: un bilan. Cahier ORSTOM, série Pédologie 22(2): 153-162.

Heusch, B., 1995. Pourquoi la banquette CES diminue les rendements et augmente l'érosion.

Hilborn, D., et R.P. Stone. 1996. Lutte contre l'érosion en ravin 96-118. Ministère de l'agriculture et l'alimentation, Ontario, Canada.

Honermann, H., 1991. Nécessité et possibilité d'identification des mesures pour ralentir l'envasement des barrages. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, Alger.

Husson, A. 1975. Coefficient de torrentialité et géomorphologie dynamique - Leur apport à l'étude des bassins- versants., Secrétariat d'état à l'hydraulique- Direction des études de milieu et de la recherche hydraulique - Sous-direction des ressources en eau: 17.

Hydromed, 2001. Rapport final du programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen. IRD / INRGREF Tunis.

Jaccon, G. 1974. Transports solides du Chélif à Sidi Bel Atar : note hydrologique, DEMRH.

Johnson, C. 2003. 5 low-cost methods for slowing streambank erosion. Journal of Soil and Water Conservation 58(1): 12-17.

Kouri L., 1993. L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Mina. (Algérie). Etude des processus et types fonctionnels de ravins dans la zone des marnes tertiaires. Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur Strasbourg1. Mention: Géographie physique, 03 décembre 1993.

Kadik, B.1978. L'érosion, la conservation et la restauration des sols en Algérie, Ministère de l'Hydraulique, l'Environnement et des Forêts. Institut National de Recherche Forestière.

Kalman, R., 1976. Étude expérimentale de l'érosion par griffes. Revue de géographie physique et de géologie dynamique 18(5): 395-406.

Kassoul, M., A. Abdelgader et M. Belorgey, 1997. Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. Revue des sciences de l'eau 10(3): 339-358.

Ketrouci K. 2014. Application des modèles hydrologiques dans l'estimation des crues extrêmes en Algérie. Thèse de doctorat en hydraulique. USTO. Oran.

Khai, T., J. Beauchamp, et al. 2002. Approche cartographique et analytique de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Martil (Rif, Maroc). Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen: 281-294.

Kingumbi , 1997. Caractérisation morphométrique du bassin versant du Merguellil. Application à la simulation des écoulements de surface et à l'érosion (TUNISIE). École Supérieure des Ingénieurs de l'Équipement Rural. Medjez El Bab, Ministère de l'Agriculture, Tunisie: 96.

Kouidri, R., M. Arabi, et al. 1989. Premiers résultats de quantification du ruissellement et de l'érosion en nappe sur jachères en Algérie (Wilaya de Medea). Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion 9: 33-38.

Kouidri, R., E. Roose, et al. 1989. Quantification de l'érosion en ravine. Approche dans le temps et l'espace. Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion 9: 52-54.

Kouri, L. et H. Vogt, 1996. Détermination de la sensibilité des terrains marneux au ravinement au moyen de système d'information géographique. Bassin versant de l'oued Mina; Tell oranais, Algérie." Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion 16: 412-438.

Kouri, L., H. Vogt et D. Gomer, 1997. Analyse des processus d'érosion hydrique linéaire en terrain marneux, bassin de l'oued Mina, Tell oranais, Algérie. ORSTOM Bulletin Réseau Érosion 17: 64-73.

Kouti, A., M. Taabni, et al. 1991. Aspects de l'inventaire, l'aménagement et la gestion des ouvrages de petite hydraulique dans le Tell occidental algérien. Bulletin - Réseau Erosion 11: 157-163.

Labiod Z., 2004. Traitement de la vase de Bouhanifia en vue de sa valorisation. Larhyss journal ISSN 1112- 3680 N°3 pp.7-12. 2004.

Lang M. Ouarda T.B.M.J et Bobee B., 1997. Towards operational guidelines for over threshold modeling. Journal of Hydrology 225.(3-4). P. 103-117

Liamas J.F., 1992. Hydrologie générale applications et principes. Edition gaetan morin. Canada.

Licitri, 1970. Calcul du transport solide et du transport salin d'un Oued. Publication interne I.N.R.H, service des études scientifiques. Alger, 1970.

Le Bissonnais, Y. et al., 2002. L'érosion hydrique des sols en France. INRA. IFEN. France.

Le Bissonnais, Y. Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terres sous l'action des pluies. Thèse de doctorat. Université d'Orléans. France

Lefay, O. (1986). Contribution à l'étude de l'efficacité des travaux de DRS en Algérie (Médéa: Zone de l'atlas tellien central). ORSTOM. Montpellier: 109.

Lo, A., S. A. El-Swaify, et al. (1985). Effectiveness of EI30 as an erosivity index in Hawaii. Soil Erosion and Conservation. S. A. El-Swaify, W. C. Moldenhauer et A. L., Ankeny, IA, Soil Conservation Society of America: 384-392.

Mahieddine M., 1997. Quantification et variabilité de l'érosion parcellaire sous de pluie dans le bassin versant de l'Oued Mina. Thèse de Magister, I.N.A El Harrach (Alger)

Mattauer M., 1958. Etude géologique de l'Ouarsenis oriental (Algérie). Thèse de doctorat. 343 pages. Université de Besançon. France

Mebarki A., 1984. Ressources en eau et aménagements en Algérie. -cas du bassin de Rhumel- Thèse de doctorat (3<sup>ème</sup> cycle). 302 pages. O.P.U., 1984.

Meddi M., 1994. Etude du transport solide à l'échelle annuelle dans le bassin versant de l'Oued Mina(Algérie). Annales de la recherche forestière en Algérie. 1994. (pp.58-68).

Meddi M., 1994. Etude du transport solide à l'échelle de la crue dans le bassin versant de l'Oued Mina. (Algérie). Revue «Algérie Equipement ». Revue technique de l'école nationale des travaux publics.N°13, mai 1994.pp24-30.

- Migniot C., 1989. Tassement et rhéologie des vases. Deuxième partie. Revue houille blanche N° 2, 1989. pp. 95-111.
- Miquel J., 1984. Guide pratique d'estimation des probabilités des crues. Edition Eyrolles, 160 pages. Paris, 1984.
- Ministere de l'équipement, 1995. Algérie de demain. Page 15-21 et 53-56.
- Monaco A. et Chassefiere B., 1976. On the use of Atterberg limit in soils marine. Marine geotechnology, vol.5, N°2, P. 153-179.
- Mazour, M. 1992. Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant d'Isser, Tlemcen, Algérie. Bulletin Réseau Érosion 12: 300-313.
- Mazour, M. and E. Roose 2002. Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans les bassins versants du Nord-Ouest de l'Algérie. Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion 21: 320-330.
- Meddi, M. 1999. Étude du transport solide dans le bassin versant de l'oued Ebda (Algérie). Zeitschrift für Geomorphologie 43(2): 167-183.
- Meddi, M. and B. Morsli 2001. Étude d'érosion et du ruissellement sur bassins versants expérimentaux dans les monts de Beni-Chougrane (Ouest Algérie). Zeitschrift für Geomorphologie 45(4): 443-452.
- Megnounif, A., A. Terfous et A. Bouanani 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 16(3): 369-380.
- Meunier M., 2001. Regional flow-duration-frequency model for the tropical island of Martinique, journal of hydrology, N° 247(1-2), p.31-53.
- Ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire. 1998. Plan national de l'eau. Évaluation des ressources en eaux superficielles région Cheliff-Zahrez Communauté européennes Convention 163 AI/SEM 03/208/020. Direction des grands aménagements et infrastructures hydrauliques.
- Montgomery, D. R., R. H. Wright, et al. 1991. Debris flow hazard mitigation for colluvium-filled swales. Bulletin of the Association of Engineering Geologists 28(3): 303-323.
- Morel, A. et O. Cayla 1993. Proposition d'un indice «paysage» pour l'évaluation des débits solides: application à 30 bassins-versants d'Algérie tellienne. Revue de géographie alpine 1: 15-32.
- Morsli, B., H. Benelouati, et al. 1989. Érosion et aménagement conservatoire de trois microbassins dans les monts de Benichougrane (Ain-Fares: Algérie). Bilan des études et propositions d'action en milieu paysan. Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion 9: 30-32.

Morsli, B., M. Mazour, et al. 2004. Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-est de l'Algérie. *Sécheresse* 15(1): 96-104.

Moukhchane, M., S. Bouhlassa et K. Bouaddi, 1998. Quantification de l'érosion des sols du bassin versant El Hachef, par le biais du Césium-137 (région de Tanger, Maroc). *Bulletin de l'ORSTOM* 18: 106-118.

Naimi, M., M. Tayaa, et al. 2003. Dynamique de l'érosion par ravinement dans un bassin-versant du Rif occidental au Maroc. *Sécheresse* 14(2): 95-100.

PAP/CAR, 2000. Directives pour la gestion de programmes de contrôle d'érosion et de désertification plus particulièrement destinées aux zones côtières méditerranéennes. Split, Croatie, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires.

Paschen, H., D. Gomer, et al. 1998. Management of watersheds with soils on marls in the Atlas Mountains of Algeria - A proposal for a non-conventional watershed development scheme. *Advances in GeoEcologie* 31: 1099-1106.

P.N.U.D. et O.P.E. 1987. Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord (projet RAB/80/011) - Guide maghrébin pour l'exécution des études et des travaux de retenues collinaires.

P.N.U.D. 1988. L'eau et le Maghreb. Un aperçu sur le présent, l'héritage et l'avenir.

PNUE, 2003. Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens.

Poesen, J., et G. Govers. 1990. Gully Erosion in the Loam Belt of Belgium: Typology and Control Measures, *In* J. Boardman, et al., eds. *Soil Erosion and Agricultural Land*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, Angleterre.

Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten et C. Valentin, 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133.

Poesen, J., K. Vandaele et B. v. Wesemael 1998. Gully erosion: importance and model implications. *Modelling soil erosion by water*. J. Boardman and D. Favis-Mortlock. Berlin Heidelberg. 55: 285-311.

Pouquet, J. 1952. Les Monts du Tessala, essai morphologique. Paris, S.E.D.E.S.

Probst, J. L. et P. A. Suchet, 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Journal des Sciences Hydrologiques* 37: 621-637.

Prosser, I. P. et B. Abernethy 1996. Predicting the topographic limits to a gully network using a digital terrain model and process thresholds. *Water Resources Research* 32(7):2289-2298.

Peyre Y., 1982. L'érosion par l'eau. *Techniques agricoles* 1385(Septembre 1982), pp.1-6 Grignon. Paris, 1982.

- Ramez P., 1995. Erosion et transport solide en rivière. Tome 1: Guide pour la compréhension des phénomènes. Série gestion des milieux aquatiques. N°8. Cemagref, 1995.
- Ramdane, M. 1985. Cartographie morphodynamique de l'Oued Isser : Objectifs et Intérêts. Journées techniques de l'étude "Érosion et transports solides en zone semi-aride", Ministère de l'Hydraulique de l'Environnement et des Forêts. Institut National des Ressources Hydrauliques.
- Ramdane, M. 1989. La notion de représentativité dans les études de l'érosion. Application au bassin versant de l'Isser. Revue Eaux et Sols d'Algérie 2: 40-45.
- Raunet, M. 1974. Étude morpho-pédologique dans la région des Béni-Slimane (Algérie). Contraintes pour la mise en valeur. Agronomie tropicale 29: 259-299.
- Remenieras G., 1986. Hydrologie de l'ingénieur. 2<sup>ème</sup> édition Eyrolles, 456 pages. Paris, 1986.
- Remini B., 1989. Envasement des barrages dans le Maghreb. Bulletin International de l'Eau et de l'Environnement 22: 4-8.
- Remini, B. et A. Kettab.1994. Envasement des barrages: Cas du barrage de Oued El Fodda. Algérie Équipement 15: 18-21.
- Remini, B., A. Kettab et J. M. Avenard, 1996. Évolution de la vase dans trois retenues de barrages en Algérie. Vecteur Environnement 29(3): 43-48.
- Remini, B. et H. N. ,1996. Les chasses au barrage de Beni Amrane. Algérie Équipement 26: 25-27.
- Remini, B., 1999. Quelques problèmes posés par l'envasement des barrages en Algérie. Algérie Équipement 31: 31-32.
- Remini, B. et W. Remini, 2003. Les barrages du Maghreb face au phénomène de l'envasement. Vecteur Environnement 36(6): 27-29.
- Remini B., 2006. Valorisation de la vase des barrages quelques exemples algériens, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 05.
- Remini B., 2006. La sédimentation des Barrages mécanismes et soutirage des courants de densité. Blida.
- Renard, K.G., et J.R. Freimund. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R- factor in the revised USLE. Journal of Hydrology 157:287-306.
- Roche M., 1963. Hydrologie de surface. Editeur Gauthier-Villards, pp 357-375. Paris, 1963.
- Roose, E. 1975. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. ORSTOM. 74 p.

Roose, E. 1989. Érosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols: trois années de recherche en coopération entre l'INRF et l'ORSTOM en Algérie. Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion 9: 13.

Roose, E. 1990. Méthodes traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Afrique occidentale soudano-sahélienne: définitions, fonctionnement, limites et amélioration possibles. Bulletin - Réseau Erosion 10: 98-107.

Roose, E., M. Arabi, K. Brahamia, R. Chebbani, M. Mazour et B. Morsli, 1993. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Cahiers ORSTOM. Série pédologie 28(2): 289-308.

Roose, E. 1997. La G.C.E.S. : une nouvelle stratégie de gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. FAO Bulletin.

Roose E., M. Arabi, et al. 1997. Recherches sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne. Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion 17: 161-167.

Roose E., R. Chebbani et L. Bourougaa, 2000. Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. Science et changements planétaires/Sécheresse 11(4): 317-326.

Roose, E. and G. d. Noni 2004. Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique : revue et perspectives. Sécheresse 15(1): 121-129.

Rullan-Perchirin, F. 1989. Les mouvements de masse dans le bassin-versant du Rhumel constantinois: essai méthodologique. Travaux de l'Institut de Géographie de Rheims 69-70-71-72: 151-171.

Roose, E. and M. Sabir, 2002. Stratégies traditionnelles de conservation de l'eau et des sols dans le bassin méditerranéen : classification en vue d'un usage renouvelé. Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen. 21: 33-44.

Roose, E., M. Sabir, et al. 2002. Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen, Bulletin - Réseau érosion.

Roose, E. 2002. Banquettes mécaniques et techniques traditionnelles de GCES pour la zone méditerranéenne semi-aride de Tunisie. Bulletin - Réseau Erosion 21: 130-150.

Roose, E. 2004. La gestion conservation de l'eau, et de la fertilité des sols: une stratégie nouvelle de la lutte anti-érosive pour le développement durable. Sécheresse 15(1): 5-7.

Saadaoui M., 1991. Erosion et transport solide en Tunisie. Impact sur l'infrastructure. Actes du colloque sur l'érosion et l'envasement des barrages, A.N.R.H, Alger.

Saidi A., 1991. Erosion spécifique et prévision de l'envasement. Actes du colloque sur l'érosion et l'envasement des barrages, A.N.R.H, Alger.

Sabir, M., B. Barthes, et al. 2004. Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse* 15(1): 105-110.

Sari D., 1977. L'homme et l'érosion dans l'Ouersenis (Algérie). SNED, Alger, 1977.

Scordia P. Y., 2008. Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. Thèse de l'école centrale de Lille. France.

Seklaoui O. 2016. Valorisation de la vase d'el merdja sidi abed. Etude technico économique. Thèse de doctorat en Génie civil. Université de Tizi ouzou.

Semcha A. ,2006. Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug. Thèse de doctorat. Université de Reims. France.

Serra-bertral G., 1979. Cours d'hydrologie de surface. Tome I et II I.N.A el Harrach Alger.

Shirazi, M. A., L. Boersma, et al. 2001. Particle-Size Distributions: Comparing Texture Systems, Adding Rock and Predicting Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal* 65(2): 300-310.

Sibari, H., S. Haidi, et al. 2001. Typologie des crues et érosion mécanique dans un bassin versant de zone semi-aride : bassin versant de l'Inaouène, Maroc.

Skaggs, T. H., L. M. Arya, et al. 2001. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. *Soil Science Society of America Journal* 65: 1038-1044.

Smati, A. 1996. Étude méthodologique sur l'hydrologie des retenues collinaires. Résumé et synthèse des principaux résultats et conclusions de l'étude SOGREAH, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

Sogreah, 1969. Étude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie, Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire. Alger.

Soil Survey Division Staff, 1993. Soil survey Manual. USDA Agric. Handbook 18. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

Stephan, 1974. Rapport sur la revalorisation des données hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina en amont de Relizane. A.N.R.H. Relizane, décembre 1974.

Sundborg A.white W.R., 1986 .Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants. Rapport UNESCO, 1986.

Taabni, M. and A. Kouti, 1993. Stratégies de conservation, mise en oeuvre et réactions du milieu et des paysans dans l'Ouest algérien. *Bulletin de l'ORSTOM, Réseau Érosion* 13: 215-229.

Tabni M., 1991. Instabilité du milieu naturel et charges solides des cours d'eau Telliens: exemple du bassin versant de l'Oued Ardjem (Ouersenis occidental).

- Tahri, M., A. Merzouk, H. F. Lamb et R. W. Maxted, 1993. Étude de l'érosion hydrique dans le plateau d'Imilchil dans le Haut-Atlas central. Utilisation d'un S.I.G. Géo- Observateur (Octobre): 51-60.
- Talbi, O., A. Mendas, A. Bensaid et M. A. Trache, 2002. Mise en place d'un système d'information géographique pour le suivi et la quantification de l'érosion hydrique : application au bassin versant de l'Isser (Tlemcen, Maroc). Science et changements planétaires / Sécheresse 13(3): 175-179.
- Tardy Y., 1986. Cycle de l'eau Climats, paléoclimats et géochimie globale. Edition Masson. 338 pages. (Mexico-Sao Paulo).
- Tixeront J., 1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. Extrait de la publication N° 53 de l'A.I.H.S. Commission d'érosion continentale, pp.26-41.
- Tomassone R., 1989. Comment interpréter les résultats d'une régression linéaire ? I.T.C.F (institut technique des céréales et des fourrages) I.N.A. Paris, février 1989.
- Touaïbia, B., S. Dautrebande et al., 1995. Quantification de l'érosion à partir d'implantation de quatre retenues collinaires dans la zone des marnes. Environnement humain de l'érosion, Journées du Réseau Erosion, 20-22 septembre 1994, Bondy, FRA, Réseau Erosion - Bulletin.
- Touaïbia, B., S. Dautrebande, D. Gomer et A. Aidaoui 1999. Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales: bassin versant de l'Oued Mina. Journal des Sciences Hydrologiques 44(6): 973-987.
- Touaibia B., 2000. Erosion-Transport solide-Envasement de barrage. Cas du bassin versant de l'Oued Mina - Wilaya de Relizane. Thèse de docteur d'état en sciences agronomiques, option : Aménagement et mise en valeur. I.N.A. El -Harrach- Alger.
- Touaïbia, B. et all, 2003. Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. Journal des Sciences Hydrologiques 48(2): 235-242.
- Touaibia, B., Benlaoukli B., et al. 2003. Approche quantitative de l'envasement au droit de 15 barrages en exploitation dans l'Algérie du Nord. Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides, Montpellier, France.
- Touat M., kassoul M., bouzakaria R., 1991. Contribution à l'étude de la sédimentation des barrages en Algérie. Actes du colloque sur l'érosion et l'envasement des barrages, A.N.R.H, Alger.
- Tecsult, 2006. Etude de protection du bassin versant du barrage. Sidi Yacoub. Phase I : Revue des documents existants. Version définitive (juillet 2006).
- Tecsult, 2006. Etude de protection du bassin versant du barrage. Sidi Yacoub. Phase II : Description du milieu. Version définitive (Novembre 2006).
- Tecsult, 2006. Etude de protection du bassin versant du barrage. Sidi Yacoub. Phase III : Identification et évaluation du degré d'érosion.

Tecsult, 2006. Etude de protection du bassin versant du barrage. Sidi Yacoub. Version définitive (Novembre 2006). Phase IV: Mesures de protection anti-érosive.

Tecsult, 2007. Etude de protection du bassin versant du barrage. Sidi Yacoub. Phase V: avant-projet détaillé. Dossier d'appel d'offres Version définitive(Avril 2007).

Terfous, A., A. Megnouif et A. Bouanani 2001. Étude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau* 14(2): 173-185.

Tidjani, A., D. Yebdri, et al. 1998. Ampleur de l'envasement dans les barrages algériens. *Seminaire international annuel du Groupe AMHY de Friend (1997-1998)*, Istanbul, Turquie.

Tihay, J.P. 1976. Dynamique des versants et milieux naturels. *Annales de Géographie* 469: 257-280.

Tixeront, J. 1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie, *IAHS*. 53: 26-42.

Vogt, T. et D. Gomer 1992. Estimation du ruissellement et des matières en suspension par l'utilisation d'un SIG intégrant MNT, données Landsat TM et données hydrologiques de terrain. *Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection* 128(4): 7-17.

Vogt T. Chader A. Meziani R., Ramdane M., Schweikle V., 1992. Cartographie des sols de la zone des marnes par télédétection. Rapport publié pour G.T.Z. GMBH. Eschborn.

Wischmeier, W.J. et D.D. Smith 1978. Predicting rainfall erosion loss. A guide to conservation planning. *Agricultural handbook no 537*. Washington, DC.

Yucel Ö. et Graf W.H., 1976. Modèle mathématique de la formation de deltas due au dépôt de sédiments dans les réservoirs. *Bulletin technique de la suisse romande - 102<sup>e</sup> année - N°8-15 avril 1976*.

Zaitchik, B. F. and H. M. v. Es, 2003. Applying a GIS slope-stability model to site-specific landslide prevention in Honduras. *Journal of Soil and Water Conservation* 58(1): 45-53.

Z. Duan. D Levacher et M. Sanchez, 2008. Comportement d'une couche de sédiment de dragage en séchage naturel. *Xèmes journées Nationales Genie Cotier- Genie Civil*, 14-16 octobre 2008.