

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1



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

Département d'Aménagement du Territoire

LABORATOIRE DES SCIENCES DU TERRITOIRE, RESSOURCES NATURELLES  
ET ENVIRONNEMENT (LASTERNE)

THESE DE DOCTORAT DE 3<sup>ème</sup> CYCLE (LMD)  
Spécialité : Hydrologie et gestion des hydrosystèmes

Par :

**Saadi ISKOUNEN**

Sous la direction de : Dr. Ahmed BOUGHERARA

Thème :

Etude du flux hydro-sédimentaire de la Soummam. Effets sur  
l'évolution de trait de côte et les infrastructures: port et  
aéroport de Bejaia (Est algérien)

*Thèse soutenue publiquement à Constantine le 11 / 02 / 2021 Devant le jury composé de :*

<b>Azeddine MEBARKI</b>	Professeur à l'Université Frères Mentouri Constantine 1	Président
<b>Ahmed BOUGHERARA</b>	Maître de Conférences (A) à l'Université Frères Mentouri Const.1	Rapporteur
<b>Abdelaziz LOUAMRI</b>	Maître de Conférences (A) à l'Université Frères Mentouri Const.1	Examineur
<b>Rabah BOUHATA</b>	Maître de Conférences (A) à l'Université de Batna 2	Examineur
<b>Kamel KHANCHOUL</b>	Professeur à l'Université Badji Moukhtar Annaba	Examineur
<b>Abdeslam DEMDOUM</b>	Professeur à l'Université Farhat Abbas Sétif	Examineur

## Résumé

Le flux hydro-sédimentaire qui caractérise le bassin versant de la Soummam est conditionné par des cadres morpho-structural et hydro-climatique et une occupation du sol et des pratiques culturelles qui permettent une érosion hydrique assez active sous toutes ses formes. Le nombre et la répartition des stations hydrométriques qui contrôle le bassin versant est loin d'être satisfaisant (05 stations pour une superficie de 9125 km<sup>2</sup>). Aussi, à partir de 1985, le bassin de la Soummam a connu la construction de quatre barrages Lakhel (1985), Ain Zada (1986), Tilesdit (2004) et Tichy Haf (2007), ce qui a rendu l'ancien réseau (série 1972/1985) de stations dans sa majorité caduque. Ainsi, une deuxième série de mesures sera utilisée en intégrant les barrages après leurs mises en eau. L'analyse et la comparaison des deux séries nous ont permis de suivre l'évolution du flux hydro-sédimentaire avant et après les aménagements hydrauliques. Le volume de l'apport solide à la station de Sidi Aiche (92% de la surface du bassin versant de la Soummam) est divisé par deux. Les données bathymétriques ont permis de vérifier les dégradations spécifiques obtenues par les mesures du transport en suspension. Seulement, ces résultats sont loin de nous indiquer les zones d'apport au sein du grand bassin versant de la Soummam. Le modèle USLE permet une quantification et une spatialisation de l'érosion. C'est un modèle élaboré à partir de données sur parcelles, mais qui a montré une certaine flexibilité qui autorise son application aux bassins versants. La perte moyenne annuelle en sol, par unité de surface, dépend de plusieurs facteurs à savoir : l'érosivité des pluies, l'érodibilité du sol, le couvert végétal, la topographie et les pratiques de conservation. L'apport annuel obtenu par ce modèle n'atteint pas 50% de l'apport mesuré à la station de Sidi Aiche. Cet apport est dû uniquement à l'érosion en nappe. Ainsi, pour améliorer les résultats et renforcer l'applicabilité du modèle aux bassins versants, nous avons ajouté l'apport de deux autres formes d'érosion en l'occurrence les mouvements de masse et le ravinement. Formes inexistantes sur les parcelles expérimentales utilisées par Wischmeier. La combinaison des données relatives à chaque forme et la modélisation sont effectuées dans un Système d'Information Géographique (SIG) afin d'obtenir une carte des zones d'apport en t/km<sup>2</sup>/an. Les pertes en terre du modèle sont devenues égales à la somme des apports des trois formes d'érosion et qui est estimée à 90% de l'apport annuel mesuré. Nous avons appliqué, avec succès, la même démarche aux sous bassins contrôlés par une station hydrométrique. Ces résultats encourageants atténuent largement les contradictions résultant du passage de la parcelle au bassin versant. Par ailleurs, en raison des aménagements hydrauliques réalisés dans le bassin versant de la Soummam, l'apport solide à l'embouchure est divisé par deux. Cette situation est certainement à l'origine de l'accentuation de la vitesse de recul du trait de côte au niveau de la baie de Bejaia.

## Abstract

The hydro-sedimentary flow that characterizes the Soummam watershed is conditioned by morpho-structural and hydro-climatic frameworks and land use and cultural practices that allow fairly active water erosion in all its forms. The number and distribution of hydrometric stations that control the watershed is far from satisfactory (05 stations for an area of 9125 km<sup>2</sup>). Also, from 1985, the Soummam watershed the construction of four dams Lakhel (1985), Ain Zada (1986), Tilesdit (2004) and Tichy Haf (2007), which made the old network (1972/1985 series) of stations which are mostly obsolete. Thus, a second series of measures will be used by integrating the dams after they have been filled. The analysis and comparison of the two series allowed us to follow the evolution of the hydro-sedimentary flow before and after the hydraulic developments. The volume of solid input to the Sidi Aiche station (92% of the area of the Soummam watershed) is halved. The bathymetric data made it possible to verify the specific degradations obtained by the measurements of transport in suspension. However, these results are far from indicating the areas of contribution within the large Soummam watershed. The USLE model allows quantification and spatialization of erosion. It is a model developed from data on plots, but which has shown a certain flexibility which allows its application to watersheds. The average annual loss of soil, per unit of area, depends on several factors, namely: rain erosion, soil erodibility, plant cover, and topography and conservation practices. The annual intake obtained by this model does not reach 50% of the intake measured at the Sidi Aiche station. This contribution is only due to erosion in the water table. Thus, to improve the results and strengthen the applicability of the model to watersheds, we have added the contribution of two other forms of erosion: mass movements and gullying. Nonexistent forms on the experimental plots used by Wischmeier. The combination of data relating to each form and the modeling are carried out in a Geographic Information System (GIS) in order to obtain a map of the contribution areas in t / km<sup>2</sup> / year. The model's land losses became equal to the sum of the contributions of the three forms of erosion and which is estimated at 90% of the measured annual contribution. We have successfully applied the same approach to sub-basins controlled by a hydrometric station. These encouraging results largely attenuate the contradictions resulting from the transition from the plot to the watershed. In addition, due to the hydraulic arrangements made in the Soummam watershed, the solid contribution to the mouth is halved. This situation is certainly at the origin of the increase in the speed of retreat of the coastline at Bejaia Bay.

## ملخص

التدفق الرسوبي المائي الذي يميز حوض صومام مشروط بالأطر الهيكلية المورفولوجية والمناخية المائية واستخدام الأراضي والممارسات الفلاحية التي تسمح بتعرية مائية نشطة إلى حد ما بجميع أشكالها. عدد وتوزيع المحطات الهيدرومترية التي تتحكم في أحواض المياه ليست مرضية (8 محطات تغطي مساحة 9125 كم<sup>2</sup>). أيضًا، منذ عام 1985 ، شهد حوض صومام بناء أربعة سدود لاخل (1985) ، عين زادة (1986) ، تيلسديت (2004) ، تيشي حاف (2007) ، مما جعل الشبكة القديمة (السلسلة 1972/1985) من المحطات القديمة إلى حد كبير. وبالتالي، سيتم استخدام سلسلة ثانية من القياسات من خلال دمج السدود بعد ملئها. أتاح لنا تحليل ومقارنة السلسلتين متابعة تطور التدفق الرسوبي المائي قبل وبعد انشاء الهياكل الهيدروليكية. حجم الحمولة الصلبة عند محطة سيدي عيش (92% من مساحة حوض صومام) قدر ب 4,3 مليون طن سنويا , انخفضت إلى النصف. مكنت بيانات قياس الأعماق من التحقق من التدهور النوعي الناتج عن قياسات النقل المعلق. ومع ذلك ، فإن هذه النتائج بعيدة كل البعد عن الإشارة إلى مجالات المساهمة في حوض صومام الكبير. يسمح نموذج USLE بالتقييم الكمي و المكانية للتعرية. إنه نموذج تم تطويره من البيانات الموجودة على المخططات، ولكنه أظهر بعض المرونة التي تسمح بتطبيقه على الأحواض. متوسط فقدان التربة السنوي ، لكل وحدة مساحة. ، يعتمد على عدة عوامل وهي ، تعرية المطر ، وتعرية التربة ، الغطاء النباتي ، التضاريس وممارسات الحفظ. لا يصل الاستهلاك السنوي الذي حصل عليه هذا النموذج إلى 50% من الكمية المقاسة في محطة سيدي عيش. هذه المساهمة هي فقط بسبب التعرية في منسوب المياه. وبالتالي ، لتحسين النتائج وتعزيز قابلية تطبيق النموذج على الأحواض ، أضفنا مساهمة شكلين آخرين من أشكال التعرية: التعرية الخطية و انزلاقات التربة. أشكال غير موجودة على المخططات التجريبية المستخدمة بواسطة Wischmeier. يتم الجمع بين البيانات المتعلقة بكل نموذج وتنفيذها في نظام المعلومات الجغرافية (GIS) من أجل الحصول على خريطة لمناطق المساهمة  $t / km^2$  في سنة. أصبحت خسارة التربة للنموذج مساوية لمجموع مساهمات الأشكال الثلاثة للتعرية والتي تقدر ب 90% من الحمولة الصلبة السنوية المقاسة. لقد طبقنا بنجاح نفس النهج للأحواض الفرعية التي تسيطر عليها محطة الهيدرومترية. هذه النتائج المشجعة تخفف إلى حد كبير التناقضات الناتجة عن الانتقال من المخططات إلى الأحواض. بالإضافة إلى ذلك ، نظرًا للتجهيزات الهيدروليكية التي تم إجراؤها في حوض صومام ، فإن الحمولة الصلبة في الفم قد انخفضت إلى النصف. هذا الموقف بالتأكيد هو أصل الزيادة في سرعة تراجع الخط الساحلي في خليج بجاية



## **Remerciements**

*Cette thèse constitue une expérience très enrichissante tant sur le plan scientifique que sur le plans humain. C'est aussi l'aboutissement d'un travail auquel ont pris part des scientifiques algériens et français. J'exprime ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail et à sa mise en œuvre.*

*Je tiens à exprimer en premier lieu ma vive reconnaissance à Monsieur **Bougherara Ahmed**, docteur à l'université des frères Mentouri de Constantine : il a accepté de diriger cette thèse, il a orienté mes recherches avec patience, bel humanisme et grande sagesse !*

*Ma vive gratitude va également à Monsieur **Hussein El Hage Hassan** Maitre de conférence en Géographie à Université Libanaise pour avoir dirigé une partie de mes recherches*

*Je remercie Monsieur **MEBARKI Azeddine** professeur à l'université des frères Mentouri de Constantine et directeur de laboratoire LASTERNE pour son aide et ces encouragements toute au long de mon parcours de préparation de cette thèse*

# Sommaire

Titre	Page
Résumé	02
Abstract	03
ملخص	04
Remerciements	05
<b>Introduction générale</b>	<b>12</b>
<b>Chapitre I : Synthèse bibliographique</b>	<b>14</b>
1- Introduction	15
2- Etudes et travaux réalisés sur le bassin de la Soummam	15
3- Les travaux universitaires et les articles	19
4- Etudes de l'érosion dans le bassin versant de la Soummam	22
5- Modélisation de l'érosion	22
5.1- L'équation USLE de Wischmeier	23
5.2- Révision de l'équation des pertes en sol	24
5.3- Application de l'USLE en Algérie	25
6 - Autres travaux de modélisation de l'érosion	25
6.1- Formule de Fournier (1960)	25
6.2- Formule de Tixeront (1960)	25
6.3- Indice de Heusch (1970)	26
6.4- Formule de Touaibia et al (2003)	26
7 - Conclusion	27
<b>Chapitre II : Présentation du bassin versant de la Soummam</b>	<b>28</b>
1- Introduction	29
2 - Situation géographique du bassin de la Soummam.	29
3 - Cadre morpho-structural	30
3 - 1. Les grands traits morphologiques	30
- Le flanc sud de la chaîne du Djurdjura	30
- La vallée de la Soummam	30
- Domaine des Biban	30
- Domaine des Babor	30
- Les hautes plaines Sétifiennes	30
4 - Cadre litho-stratigraphique	30

4 – 1. Formations secondaires :	31
4 – 2. Les formations tertiaires :	32
4 - 3. Les formations quaternaires :	33
5 – Cadre structural	35
6 – Le cadre morphométriques du bassin versant	36
6 - 1. L'indice de compacité de Gravelius	36
6 – 2. Dimensions du rectangle équivalent	36
6 – 3. Répartition altimétrique du bassin versant de la Soummam	38
- Dénivelée simple (D) :	39
- Indice global de pente (Ig) :	40
- Dénivelée spécifique Ds :	40
7 - Les principaux sous bassins versants de la Soummam	41
7 - 1. Sous bassin Boussellam	41
7 - 2. Sous bassin Sahel-Soummam	42
8 - Étude du réseau hydrographique	43
- La densité de drainage	44
- La densité hydrographique	44
- Coefficient de torrentialité	45
9 - Cadre hydro-climatologique	46
9 - 1. Etude des précipitations	46
9 - 2. Localisation des stations utilisées par l'étude	47
9.3- précipitations moyennes annuelles (série 1980 / 2012)	48
9.3.1- Analyse fréquentielle des précipitations annuelles.	50
9.4 - précipitations moyennes mensuelles (1980/ 2012)	55
9.4.1- Analyse fréquentielle des précipitations mensuelles (1980/2012)	56
9.5 - Précipitations moyennes saisonnières (1980 / 2012)	62
9.6 - Les pluies journalières maximales	64
9.6.1- Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales	65
9.7- Températures	68
9.8- Les étages bioclimatiques du bassin de la Soummam.	71
10 - Couvert végétal	72
11- Conclusion	73
<b>Chapitre III : Les écoulements dans bassin versant de la Soummam</b>	<b>74</b>
1- Introduction	75

2. Variation des écoulements avant les aménagements hydrauliques	76
2.1. Variation des écoulements annuels moyens	76
1- Station de Sidi Aiche (1954/1985)	76
1.2- Etude fréquentielle des débits moyens annuels de la station Sidi Aiche	79
2- Stations Sidi Yahia et Maghraoua (sous bassin de Boussellam)	80
2.1- Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (Stations Sidi Yahia, Maghraoua)	83
3- Station d'Al Assnam	84
3.1- Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (Série 1966/1993)	86
2.2- Variations des écoulements mensuels moyens	87
1- Station de Sidi Aiche	87
1.1- Fréquence des débits moyens mensuels à station Sidi Aiche	89
2- Stations Sidi Yahia et Maghraoua (sous bassin de Boussellam)	91
2.1- Etude fréquentielle des débits moyens mensuels aux stations Sidi Yahia et Maghraoua	93
3- Station Al Assnam	94
3.1- Etude fréquentielle des débits moyens mensuels de la station El Assnam	96
2.3- Variation des écoulements saisonniers	98
1- Station de Sidi Aiche	98
2- Stations de Sidi Yahia et Maghraoua (sous bassin Boussellam)	99
3- Station d'Al Assnam	99
2.4- Variations des écoulements journaliers maximum	100
1- Station de Sidi Aiche	100
1.1- Ajustement des débits journaliers maximum à station Sidi Aiche à loi de Gumbel	101
2- Stations de Sidi Yahia et Maghraoua (sous bassin de Boussellam)	101
2.1- Ajustement des débits journaliers maximum aux stations Sidi Yahia et Maghraoua à loi de Gumbel	102
3. Station d'Al Assnam	103
3.1- Ajustement des débits journaliers maximum à station d'El Assnam à loi de Gumbel	103
3- Variation des écoulements après les aménagements hydrauliques	104
3.1- Variation des écoulements annuels moyens	104
1- Station de Sidi Aiche	104
2- Station de Sidi Yahia et Maghraoua (Sous bassin de Boussellam)	105
3.2- Variation des écoulements mensuels moyens	106

1- Station de Sidi Aiche	106
2- Station de Sidi Yahia et Maghraoua (Sous bassin de Boussellam)	107
3.3- Variation des écoulements saisonniers	108
1- Station de Sidi Aiche	108
2- Station de Sidi Yahia et Maghraoua (Sous bassin de Boussellam)	109
4- Comparaison des séries des apports liquides aux stations hydrométriques avant et après la mise en eau des deux premiers barrages (Ain Zada, Lakhel)	110
5- Ressources hydriques du bassin versant de la Soummam	111
5.1- Estimation de la ressource en eau de surface selon l'ANRH	111
5.2- Ressource en eau souterraine	112
5.2.1- Répartition et caractéristiques des aquifères du Bassin Versant de la Soummam	113
6- Mobilisation de la ressource en eau de surface	115
6.1- Caractéristiques des barrages du B.V Soummam	115
6.2- L'effet de l'ensemble des barrages sur l'écoulement dans bassin de la Soummam	117
7- Conclusion	118
<b>Chapitre IV : Flux sédimentaire : mesures et estimation</b>	<b>119</b>
1- Introduction	120
2- Evaluation du transport solide en suspension aux stations hydrométriques du bassin versant de la Soummam	120
3- Variations des apports solides à la station Sidi Aiche (périodes 1975/1982 ; 1982/1992)	121
- variations annuelles des apports solides	122
- variations mensuelles des apports solides	123
- variations saisonnières des apports solides	124
4 - Évaluation du transport solide en suspension dans les principaux sous bassins	125
4.1 - Variations des apports solides dans le sous bassin de Boussellam à la station Sidi Yahia (périodes 1972/1982 ; 1982/1992)	126
- variations annuelles des apports solides	126
- variations mensuelles des apports solides	127
- variations saisonnières des apports solides	128
4.1.1- Variations des apports solides dans les parties amont et aval du sous bassin de Boussellam	129
1- Variations des apports solides dans la partie amont du sous bassin de Boussellam, à la station Maghraoua (périodes 1975/1982 ; 1982/1992)	130
- variations annuelles des apports solides	131
- variations mensuelles des apports solides	132
- variations saisonnières des apports solides	133

2- Variations des apports solides dans la partie aval du sous bassin de Boussellam, à la station Sidi Yahia (périodes 1972/1982 ; 1982/1992)	134
- variations annuelles des apports solides	134
- variations mensuelles des apports solides	135
- variations saisonnières des apports solides	136
4. 2- Variations des apports solides dans le sous bassin de Sahel - Soummam, à la station Sidi Aiche (périodes 1972/1982 ; 1982/1992)	137
- variations annuelles des apports solides	138
- variations saisonnières des apports solides	139
- variations mensuelles des apports solides	140
4.2.1- Variations des apports solides dans la partie amont du sous bassin de Sahel – Soummam, au barrage de Tilesdit.	141
4.2.2- Variations des apports solides dans la partie aval du sous bassin Sahel - Soummam, à la station Sidi Aiche (périodes 1972/1982 ; 1982/1992)	142
5- Conclusion	143
<b>Chapitre V : Estimation de l'érosion dans le bassin versant de la Soummam à l'aide des SIG et du modèle USLE</b>	<b>144</b>
1- Introduction	145
2- La méthode adoptée	146
3- Outils utilisés	146
4- Quantification et spatialisation de l'érosion hydrique	146
4.1- Quantification de l'érosion en nappe : application du model USLE	147
4.2- Quantification de l'érosion par ravinement	161
4.3- Quantification d'érosion par mouvement de masse	170
5-Rèsulat de la quantification de l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Soummam	177
6- Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant de la Soummam	179
7- Comparaison de l'érosion hydrique calculée et mesurée au niveau des stations et/ou des barrages dans le sous bassin de Boussellam	180
8- Conclusion	181
<b>Chapitre V : Aménagements hydrauliques et dynamique du trait de côte dans la baie de Bejaia (impact sur le port et l'aéroport)</b>	<b>182</b>
1. Introduction	183
2. Contexte morpho-structural de la baie de Bejaia.	183
3- Impact de la diminution du flux sédimentaire sur la dynamique de trait de côte	184
3.1- Les aménagements hydrauliques réalisés dans le bassin versant de la Soummam	184
3.2 - Résultats des derniers levés Bathymétriques des barrages de la Soummam	185
3.3- L'envasement annuel moyen des barrages du bassin de la Soummam	186

3.4- Exploitation des sédiments dans le bassin de la Soummam	186
4- Bilan sédimentaire annuel du bassin de la Soummam	187
4.1- Quantification de la production annuelle en sédiment du bassin versant de la Soummam	187
4.2- Quantification des pertes des sédiments du bassin versant de la Soummam Pertes par envasement des barrages	188
5- Les facteurs météo-marins et dynamiques du trait de côte de la baie de Bejaia	188
5.1 - Caractéristiques du littoral au niveau de la baie de Bejaia et ses environs	188
5.2- facteurs météo-marins à l'origine de la dynamique morpho-sédimentaire de la baie	189
5.2.1- Tempêtes	189
5.2.2- Les courants marins et circulation de l'eau en mer Méditerranée	190
5.2.3- Les vents à la station de Bejaia	191
5.2.4 - Les houles	192
5.2.5 - La Direction générale des houles au large de la baie de Bejaia.	192
5.2.6- Caractéristique des houles au large	193
5.2.7- Sens de propagation des houles au rivage de la baie de Bejaia	194
5.2.8- Les vagues potentiellement érosives (secteur aéroport jusqu'à Aokas)	195
5.2.9- Direction et caractéristiques des vagues potentiellement érosives	196
5.2.10 - Caractéristiques des vagues de direction Nord et Nord-Est	197
5.2.11- Les changements climatiques et la hausse du niveau de la mer	198
5.2.12- Déséquilibre sédimentaire.	199
5.2.13- La dérive littorale	200
6- Détermination de l'évolution du rivage de la baie de Bejaia par la méthode « Digital Shoreline Analysis System, (DSAS)	202
6.1- Traitements des documents cartographiques	202
6.2- Géoréférencement	202
6.3 - Numérisation des traits de côte	203
7- La dynamique détectée	203
8- Estimation en mètres du recul du trait de côte 1973/1984	205
9- Estimation du recul du trait de côte durant la période 1984/2018	205
10- Impact de la dynamique du trait de côte sur la piste d'atterrissage de l'aéroport de Bejaia	205
11- Conclusion	206
<b>Conclusion générale</b>	<b>207</b>

## INTRODUCTION GENERALE

L'érosion hydrique dans le bassin versant de la Soummam est importante du fait du climat méditerranéen (agressivité des pluies). Cependant, les actions anthropiques (pratiques culturelles et transformations du milieu) ont souvent amplifié l'apport terrigène à la baie de Bejaia.

Pour comprendre la dynamique morpho-sédimentaire et réussir la gestion du littoral béjaoui, il est indispensable d'une part, de pouvoir expliquer et évaluer la variation des apports hydro-sédimentaires en provenance du bassin versant de la Soummam en relation avec les transformations qui le caractérisent et qui affectent directement l'environnement côtier. D'autre part de pouvoir mesurer et interpréter le rôle des facteurs morpho-structuraux (néotectonique et sismicité) et météo-marins à l'origine des courants et des houles qui participent au façonnement continu du rivage.

L'objectif de ce travail est de suivre, dans le temps et dans l'espace, la variation du flux hydro-sédimentaire et son impact sur le rivage et les installations humaines de la baie de Bejaia.

La diversité des milieux qui constituent le bassin versant de la Soummam a engendré un comportement hydrologique complexe. En effet, le bassin versant de la Soummam s'étend sur une superficie de 9125 km<sup>2</sup>. Il est limité à l'ouest par la chaîne du Djurdjura, au Nord, par la mer méditerranée et les chaînes côtières de la Kabylie de la Soummam. Au Sud, il est limité par les Biban et les contreforts des monts du Hodna et à l'Est par la terminaison ouest des Babor occidentaux et les hautes plaines sétifiennes. Ainsi, sa surface est partagée entre les plateaux de Sétif et Bouira, le flanc Est du Djurdjura et la vallée de la Soummam. En effet, le bassin versant de la Soummam se caractérise par un relief hétérogène qui passe d'un secteur relativement plat et dénudé à un secteur montagneux et plus ou moins couvert, d'où résultent plusieurs étages bioclimatiques, allant du domaine humide méditerranéen à influence maritime à un domaine continental semi-aride.

Cette hétérogénéité nécessite une densité élevée de stations afin de suivre la variabilité spatio-temporelle des précipitations et des flux hydro-sédimentaires et saisir les spécificités des différents sous bassins. Cependant, les données disponibles sont loin de répondre à cette exigence d'autant plus que les aménagements hydrauliques réalisés ces dernières décennies ont réduit la majorité des stations hydrométriques caduques. De ce fait, et dans le but de surmonter cet handicap, et particulièrement concernant l'érosion hydrique et le flux sédimentaire, nous avons opté pour l'utilisation d'un modèle qui nous permet de quantifier et de spatialiser les pertes en terre, en l'occurrence l'USLE ((Universal Soil Loss Equation). Seulement, son application nécessite un enrichissement indispensable pour compenser les mesures manquantes.

La diminution du flux hydro-sédimentaire combinée aux conditions morpho-géologique et météo-marines de la baie auront un impact certain sur l'évolution du rivage.

Ainsi, ce travail est subdivisé en six chapitres qui s'articulent comme suit :



Le chapitre I « Etat de l'art » est une synthèse de tous les travaux sur le bassin versant de la Soummam.

Le chapitre II s'intéresse au complexe physique du bassin versant et tente de faire ressortir les facteurs à l'origine du comportement hydrologique et du flux sédimentaire.

Quant au chapitre III, il évoque la collecte, l'analyse et l'étude fréquentielle des données hydrologiques disponibles afin de déterminer surtout les écoulements extrêmes et leur rôle dans la production de sédiments.

Le chapitre IV est consacré à l'estimation du transport solide à partir des mesures et des données bathymétriques et à l'envasement des barrages et leurs impacts sur la diminution du flux sédimentaire.

Le chapitre V présente l'USLE et son application au bassin versant de la Soummam, ainsi que les résultats relatifs aux trois formes de l'érosion (l'érosion hydrique)

Le chapitre VI essaie d'évoquer le rôle de l'ensemble des facteurs qui conditionnent l'évolution du trait de côte et particulièrement la diminution du flux sédimentaire.

# **Chapitre I**

## **Synthèse bibliographique**

## 1. Introduction

Le bassin versant de la Soummam a rarement bénéficié d'études globales qui se basent sur des séries de données assez longues afin de saisir son comportement hydrologique en relation avec le transport solide et les aménagements hydrauliques et leurs conséquences sur la baie de Bejaia.

Les études réalisées sont dans l'ensemble spécialisées et ponctuelles (hydrogéologie, géologie, environnement, hydrologie et érosion). Nous citons, dans ce qui suit, les travaux consultés et notamment les plus récents.

## 2. Etudes et travaux réalisés sur le bassin de la Soummam

Différentes études ont été réalisées sur le bassin de la Soummam mais deux présentent un intérêt particulier :

- « *Etude de régularisation de la Soummam – Direction de l'Hydraulique de la wilaya de Sétif – Coyne et Bellier – 1973* » : Cette étude est la dernière étude s'intéressant à l'ensemble du bassin versant de la Soummam et à sa partie aval en particulier.
- « *Aménagement du barrage de Tichi Haff – Etudes complémentaires : étude hydrologique des crues – ANB – Coyne et Bellier – avril 1996* » : Cette étude est la plus récente qui traite de l'ensemble du bassin du Bou Selam dont le rôle est a priori primordial pour la genèse des crues de la Soummam.

### - **Étude de régularisation de la Soummam 1973**

L'objet de cette étude est de fournir les débits de crue à considérer pour l'étude des projets d'aménagement de la vallée de la Soummam, et de fournir une synthèse générale sur l'hydro-géomorphologie, et la géomorphologie dynamique du bassin versant de la Soummam.

Plus précisément on note :

« Le dossier concerne l'étude hydrologique qui a pour but de définir à la fois les débits et la forme des crues de l'oued Soummam pour des périodes de retour de 10, 25, 100 et 500 ans, avant la construction de barrages sur l'oued Boussellam ».

« Le dossier concerne l'étude morphologique qui a pour but de déterminer les types et les régimes de l'écoulement de bassin et les sources de matériaux alluviaux et leur transit dans le bassin ».

- **Etude du barrage de Tichi Haff 1969**

Le barrage contrôle un bassin versant de 3 980 km<sup>2</sup>. La capacité totale de la retenue est de 80 hm<sup>3</sup>.

L'objet de l'étude est de « *redéfinir les hydrogrammes des crues au site du barrage de Tichi Haff en prenant en compte les données récentes communiquées par l'Agence Nationale des Barrages* ».

**NB** : cette étude menée durant 1969 dans le but de la construction du barrage Tichi Haffe. Les travaux ont commencé dans les années soixante-dix. Malheureusement, le projet n'a pas été réalisé dans les délais à cause de désistement de l'entreprise chargée de la réalisation (une entreprise yougoslave). Il a fallu attendre jusqu'à l'année 2007 pour qu'une entreprise algérienne finisse le travail.

Les données pluviométriques disponibles dans cette étude ont été complétées jusqu'en 1993. La pluie centennale en 24 h est évaluée à 112 mm.

Le barrage amont d'Ain Zada est en service depuis 1986.

Une liste des débits de pointe rectifiés est proposée à Sidi Yahia de 1963 à 1993.

L'ajustement d'une loi de Fréchet à cet échantillon fournit :

- $Q_{10} = 845 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- $Q_{20} = 1\,326 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- $Q_{50} = 2\,377 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- $Q_{100} = 2\,742 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En l'absence d'une série hydrométrique suffisamment longue et fiable sur le Bou Selam, l'étude est basée essentiellement sur la pluie et la définition de la Crue Maximale Probable (CMP). Les résultats concernant le débit de pointe centennial à Tichi Haff sont les suivants :

- $Q_{100}$  non influencé :  $2\,742 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- $Q_{100}$  laminé par la retenue d'Aïn Zada :  **$2\,600 \text{ m}^3/\text{s}$** .

### - **Etude de la protection de la ville de BEJAIA contre les inondations**

Le but de cette étude comme l'indique le thème, est de protéger la ville de Bejaia contre le risque d'inondations.

Elle consiste en une description détaillée des crues de la Soummam en se basant sur les études antérieures, la relation débit-pluie et les débits réellement observés à la station de Sidi Aicha

Une carte des hauteurs d'eau dans la zone d'étude a été élaborée.

Des solutions d'aménagement dans la région ont été proposées pour atténuer ce risque

L'étude comprend différentes phases réparties en missions comme suit :

- Mission A : Collecte des données ;
- Mission B : Topographie ;
- Mission C : Hydrologie ;
- Mission D : Hydrodynamique ;
- Mission E : Diagnostic ;
- Mission F : Etude d'aménagement ;
- Mission G : DCE et dossier d'exécution.

Les études antérieures, de par l'absence de données de débits fiables et en nombre suffisant, ont privilégié la relation pluie-débit pour la détermination du débit des grandes crues à Sidi Aiche. De ce fait, et plus de 33 années après la réalisation de la dernière étude dans la région « *Coyne et Bellier de 1973* », l'étude de la protection de la ville de BEJAIA contre les inondations, a cherché de privilégier l'analyse des débits réellement observés à la station de Sidi Aiche. L'analyse a cependant montré la difficulté de l'opération pour plusieurs raisons.

### - **Etude pédologique de la vallée de la Soummam**

L'objet de cette étude est de déterminer les classes des sols de la zone d'étude et de fournir des cartes d'aptitudes culturales de toutes ces classes.

L'étude est basée sur plus de 900 profils réalisés dans la zone d'étude d'une profondeur de 90 à 140 cm avec un diagnostic climatique et géologique assez détaillé de la région.

## - **Atlas de la Soummam 2018**

Cet Ouvrage est réalisé sur le bassin versant de la Soummam dans le cadre du projet PHC MAGHREB « 30254WL» avec la coopération entre l'université de Rouen en France et l'université Abderrahmane Mira de Bejaia en Algérie. Il est édité sous forme de planches.

Nous citons ci-dessous la liste des planches de l'Atlas de la Soummam.

1. Un bassin versant qui s'étend sur 5 Wilaya
2. Un relief élevé dominant
3. Des bassins majeurs contrastés
4. Un secteur littoral et montagneux humide et un arrière-pays semi-aride
5. Un retour des pluies et des températures qui augmentent de plus en plus
6. Une typologie des sols soumise à des contraintes topographiques et hydriques
7. L'olivieraie, une richesse à revaloriser
8. Des massifs forestiers fragiles et menacés par une importante anthropisation
9. Répartition des centres urbains et densité de population
10. Un espace dominé par les centres urbains de petite taille
11. Une dynamique urbaine plus soutenue dans la vallée de la Soummam
12. Bejaïa, une urbanisation en trois étapes : précoloniale, coloniale et postcoloniale
13. Bejaïa, une centralité dominée par l'activité portuaire
14. L'industrie agroalimentaire nourrit l'emploi dans la vallée de la Soummam
15. Le port, une fenêtre ouverte sur le monde
16. Un trafic portuaire dominé par les hydrocarbures
17. Une vallée marquée par le poids des industries agroalimentaires et textiles
18. Une gestion des déchets contrariée par le relief et la densité de population
19. Une importante érosion de la basse vallée de la Soummam
20. Une région soumise à un risque sismique élevé
21. Le recul du trait de côte et les inondations, des aléas exacerbés par les changements climatiques
22. Un grand héritage historique et des paysages riches et variés

## - **Etude de l'établissement de la carte sédimentaire du littoral algérien**

Cette étude a ciblé tout le littoral algérien, elle est réalisée par plusieurs tranches. Cette étude s'intéresse au tronçon (la baie de Bejaia). Cette étude est réalisée en plusieurs missions (6 missions). Elles ont pour objectif d'établir la carte sédimentaire du littoral algérien, qui servira de document de base pour les aménagements littoraux (ouvrages maritimes, protection de côte, recherche de gisements de sable en mer).

### 3 - Les travaux universitaires et les articles :

**AZZI. A (2011) :** « Les Impacts potentiels des Changements Climatiques sur les ressources en eau de surface. Cas du bassin versant de la Soummam, Algérie ». *Office National de la Météorologie, dar El Beida, Alger– Algérie.*

Ce travail se propose d'évaluer les influences directes et indirectes des changements climatiques sur les ressources en eau de surface en identifiant les tendances majeures: des précipitations, des températures, des écoulements annuels et des apports aux barrages de la région.

**BENNABI. M-S (1985) :** « Contribution à l'étude hydrogéologique de la vallée de oued Sahel – Soummam (Algérie) ». *Thèse de doctorat de 3eme cycle en géologie appliquée (Option hydrogéologie).*

Ce travail s'intéresse à la partie amont du bassin de la Soummam (sous bassin de l'oued Sahel) où certains facteurs d'écoulement sont abordés comme la géologie et la climatologie pour étudier dans les détails les conditions hydrogéologiques, hydrodynamiques et les caractéristiques physico-chimique des ressources en eau souterraine.

**BECHROUNE. A (2009) :** « Elaboration d'une base de données hydrologiques du bassin versant de la Soummam via le modèle hydrologique HEC-HMS » *Thèse de magister en Hydraulique (Option : hydraulique générale).*

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la problématique liée à la lutte contre les inondations dans le bassin versant de la Soummam. Il consiste en l'élaboration d'une base de données hydrologique des caractéristiques physique et hydrologique du bassin et la simulation du comportement hydrologique de son réseau hydrographique lors des crues.

**DEMMAK. A (1982) :** « Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale ». *Thèse Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, l'Université Pierre et Marie CURIE – Paris 6.*

Ce travail constitue une base essentielle dans le domaine de la quantification de l'érosion en Algérie. Cette thèse se base sur des bassins versants, de surface modeste, considérés comme des bassins expérimentaux dans les différentes zones du Tell (un des bassins étudiés est un affluent de l'oued Boussellam).

**HAFIR. H, MANSOURI. D (2010) :** « Diagnostic, Evaluation, et Cartographie de la Qualité de la Bande Riveraine de la Vallée de la Basse Soummam (Site RAMSAR) ». *Mémoire Master II en Sciences Naturelles de l'Environnement.*

Dans le cas de cette étude, les auteurs ont essayé de mettre en évidence et cartographier la qualité des bandes riveraines de la basse Soummam.

En effet, 124 secteurs, de 1Km de long et 50 m de large, de part et d'autre de l'oued Soummam (Sidi Aich -Bejaia), et 20 secteur de chaque affluent d'une longueur de 1km et d'une largeur de 20m ont été prospectés afin de calculer l'indice de la qualité de la bande riveraine, IQBR. L'analyse montre que 84% des secteurs ont perdu leur aspect naturel en raison de plusieurs activités humaines, dont les plus importantes sont l'expansion des cultures, les décharges sauvages et les infrastructures directement en bordure des rivières, ainsi que les rejets industrielles et domestiques qui affectent la qualité de l'eau, et met en péril la vie aquatique et menace la santé publique.

**CEDDAD. S (2009) :** « apport de l'étude hydrogéologique dans l'étude et le traitement des glissements de terrains. Cas du site de Bougaa. Algérie Nord orientale ». *Mémoire de Magister en géologie. Option ressource en eau et environnement*

La zone d'étude de ce travail (Bougaa) se situe dans la partie Est du bassin versant de la Soummam. Ce travail comporte une identification hydrogéologique des différents aquifères de la zone d'étude. Pour cela, une étude géologique est menée notamment la lithostratigraphie et la tectonique en vue de définir les aquifères potentiels et de caractériser le sous-sol.

Ce travail porte aussi sur les glissements de trains proprement dits. Une cartographie des glissements et de leurs caractéristiques ont été étudiés. L'étude du sol a été entamée avec des essais in situ et complétée par une carte de vulnérabilité du secteur d'étude avec des propositions de confortement des zones de glissements.

**ICHALAL. Y, HAMDAOUL. A (2013) :** « Contribution à l'étude de la variation hydro-climatologique du grand bassin versant de la Soummam. Cas de trois sous-bassins [El-Kseur (15 10 04), Akbou (15 05 03), Bouira (15 02 04)] » *Mémoire de Master II, Spécialité : Eau et Environnement*

Les auteurs ont étudié trois paramètres : la pluviométrie, la température et le débit pour déterminer les variations climatiques au niveau du bassin versant de la Soummam.



**MAIRI. N-E (2013):** « impact du recul de côte et suivi d'aménagement de protection Sidi Ali El bahr ». *Mémoire de master aménagement du territoire option Risque Naturel.*

Cette étude a bien montré le recul de la côte au niveau de Sidi Ali El bahr depuis 1922 et la menace qui pèse sur les infrastructures de l'aéroport de Bejaia. Par contre les causes de cette érosion n'ont pas été évoquées.

**MOUNI .L, MERABET .D, ARKOUB .H, MOUSSACEB .K (2009) :** « Étude et caractérisation physico-chimique des eaux de l'oued Soummam (Algérie) ». *Sécheresse 2009 ; 20 (4) : 360-6.*

Cet article révèle que l'eau de l'oued Soummam au niveau des stations étudiées présente une pollution accrue. En effet, la majorité des paramètres mesurés ne sont pas conformes aux normes exigées. L'oued Soummam subit donc une pollution essentiellement organique suite au déversement de volumes importants des eaux usées urbaines et industrielles.

**MEBARKI. A (2005) :** « Hydrologie des bassins de l'Est algérien : Ressources en eau, aménagement et environnement » *Thèse de doctorat d'Etat, Université Mentouri de Constantine.*

Dans cette étude seulement le sous bassin de l'oued Boussellam (49% du bassin versant de la Soummam) a été étudié. Les données et les résultats de cette étude nous seront d'une grande utilité notamment pour comparer la Soummam aux autres oueds côtiers du nord constantinois.

**NEMOUCHIA (1985) :** « la mise en valeur hydro-agricole et l'aménagement des ressources en eau dans la vallée de la Soummam ». *Thèse de doctorat de 3eme cycle ; université Nancy II.*

Ce travail qui aurait pu constituer une base incontournable à notre travail, n'a pas été consulté.

**TIHAY.J-P(1976)** : « Dynamique des versants et milieux naturels [dans la vallée de la Soummam (Grande Kabylie, Algérie)] ». *Annales de Géographie*. 1976, t. 85, n°469. pp. 257-280.

Ce travail illustre d'une manière détaillée l'action anthropique dans l'évolution et la dynamique des versants dans la vallée de la Soummam.

**ZOUGGAGHE. F, MOUNI. L, TAFER .M (2014)**: « Qualité biologique du réseau hydrographique du bassin versant de la Soummam (nord de l'Algérie) » *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°17, Mars 2014, pp. 21-33.

L'objectif est d'établir une carte de qualité ou de santé du réseau hydrographique du bassin versant de la Soummam à l'aide de l'indice biologique global normalisé (IBGN ; AFNOR, 1992) et d'identifier les tronçons les plus dégradés de ce bassin versant.

#### **4 - Etudes de l'érosion dans le bassin versant de la Soummam**

Les études de l'érosion dans le bassin versant de la Soummam se résume à quelques travaux universitaires réalisés sur quelques sous bassin et quelques tentatives d'application de l'équation universelle des pertes en terre (USLE), notamment, l'Atlas de la Soummam 2018 « *planche 19 : Une importante érosion de la basse vallée de la Soummam* » et le mémoire de master présenté par CHIKHI T. et HAMICHE M.S. (2017) « *Modélisation de l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Sahel (Soummam)* ». Il traite uniquement le sous bassin du Sahel.

#### **5 - Modélisation de l'érosion**

Pour traiter efficacement un problème tel que l'érosion des sols à l'échelle d'un bassin versant, il est nécessaire de pouvoir le modéliser. Il est également important de noter que la cartographie des sols est un élément important de la modélisation de l'érosion des sols (Fullen, 2003), car la carte fournit de nombreuses variables clés du modèle. À cette fin, plusieurs modèles d'érosion des sols ont été développés au cours du XXe siècle. À bien des égards, les États-Unis ont ouvert la voie à la modélisation de l'érosion, à commencer par le développement par le Département américain de l'agriculture (USDA) de l'équation universelle de perte de sol (USLE) dans les années 1950. L'USLE a été développée pour prévoir les pertes annuelles dues à l'érosion des rigoles dans la moitié Est des États-Unis (Troeh et al, 2004). Elle a été largement utilisée et son utilisation s'est rapidement étendue au-delà de la zone pour laquelle elle a été développée, mais elle n'a pas bien fonctionné en dehors de l'Est des États-Unis. Pour résoudre ce problème, l'USLE modifié a été publié en 1978, suivi de l'USLE révisé (RUSLE) en 1992 (Troeh et al. 2004). La RUSLE et ses versions améliorées sont devenues l'un des modèles d'érosion des sols les plus utilisés dans le monde

pour estimer les pertes annuelles de sol dues à l'érosion hydrique (Pal et Al-Tabbaa, 2009; Boni et al., 2015). Ces dernières années, RUSLE a été adoptée pour une utilisation avec des systèmes informatiques, mais il a été initialement développé pour être résolu sur le terrain à l'aide de tableaux et de graphique papier (Troeh et al. 2004). RUSLE2, une amélioration du 21e siècle par rapport à RUSLE, fournit désormais des calculs aux pas de temps quotidiens, mais n'inclut toujours pas l'érosion des ravines et n'a pas été testé à l'échelle du bassin versant.

### 5.1- L'équation USLE de Wischmeier

Les premières parcelles de mesures ont été établies en 1914 à l'Université du Missouri (USA). En 1930, un programme systématique est lancé avec la création d'un réseau de stations de mesures de l'érosion à travers les États-Unis. De 1930 à 1950, 48 stations sont mises sur pied dans 26 états. Les premières tentatives de création de modèles sont apparues en 1940 (Zingg, 1940). Ce n'est qu'en 1957 que Smith et Wischmeier (1957) présentent un modèle mathématique complet de prédiction des pertes de sol connu sous le nom de l'équation universelle des pertes de sol (USLE Universal Soil Loss Equation).

L'équation universelle des pertes en terre (EUPT, mieux connue par son abréviation anglaise, USLE) prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ, en fonction de la configuration des pluies, du type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures. L'USLE prévoit uniquement l'importance des pertes de terre qui résultent des érosions en nappe ou en rigoles sur une pente simple sans toutefois tenir compte des pertes de terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol. Ce modèle de prévision de l'érosion a été conçu pour mesurer l'influence de l'assolement et du système de gestion des cultures sur l'érosion, mais il peut aussi servir à prévoir l'érosion dans un cadre qui n'est pas agricole, notamment sur des chantiers. L'USLE peut servir à comparer les pertes de terre provenant d'un champ donné soumis à un assolement et à un système de gestion des cultures particuliers, à des taux de « pertes de terre tolérables » ou à un autre type d'assolement ou système de gestion des cultures, afin de déterminer la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles.

Cinq grands facteurs servent à calculer les pertes de terre en un endroit donné. Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol à un endroit donné. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par conséquent, les valeurs obtenues par l'USLE représentent avec plus de précision les moyennes à long terme.

L'équation des pertes en sol est donnée comme suite :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Avec:

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

**R** : correspond au facteur de pluie et de ruissellement par secteur géographique. Plus les précipitations sont intenses et plus elles durent longtemps, plus grands sont les risques d'érosion

**K** : représente le facteur d'érodibilité du sol. Il s'agit de la perte de terre moyenne en tonnes/acre pour un sol particulier, dans un champ travaillé constamment laissé en jachère, qui possède une pente dont les caractéristiques ont été arbitrairement fixées à 72,6 pi pour la longueur et à 9 % pour l'inclinaison. Le facteur K est une mesure de la vulnérabilité des particules de sol au détachement et au transport par la pluie et le ruissellement. La texture est le principal facteur qui influence le facteur K, mais la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol ont aussi un rôle à jouer.

**LS** : Est le facteur de longueur et d'inclinaison de la pente. Le facteur LS représente un rapport des pertes de terre sous des conditions données, aux pertes de terre en un endroit caractérisé par une inclinaison « standard » de 9 % et une longueur de pente de 72,6 pieds. Plus la pente est forte et longue, plus élevé est le risque d'érosion. On établit le facteur LS à l'aide de l'équation servant au calcul du facteur LS.

**C** : correspond au facteur de culture (végétation) et de gestion. Ce facteur sert à déterminer l'efficacité relative des systèmes de gestion du sol et des cultures en termes de prévention des pertes de terre. Le facteur « C » est un ratio qui compare les pertes de terre provenant d'une terre faisant l'objet d'une culture et d'un système de gestion spécifiques et les pertes correspondantes dans un champ travaillé constamment laissé en jachère. On établit le facteur C en multipliant les éléments « type de culture » et « méthode de travail du sol » qui sont propres au champ.

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

**P** : correspond au facteur de pratique de conservation. Il reflète les effets des pratiques qui réduisent la quantité d'eaux de ruissellement et la vitesse de ruissellement et qui réduisent de ce fait l'importance de l'érosion. Le facteur P représente le ratio des pertes de terre associées à une pratique de conservation aux pertes de terre associées à la culture en lignes dans le sens de la pente. Les pratiques de conservation les plus couramment utilisées sont le travail du sol à contre-pente, la culture suivant les courbes de niveau et la culture en bandes.

## **5.2- Révision de l'équation des pertes en sol**

De nouvelles recherches, expériences et données ont amené l'élaboration d'une équation universelle des pertes en terre révisée (RUSLE), qui correspond à la version informatisée de l'USLE. La RUSLE reprend la même formule que l'USLE, mais avec des améliorations apportées à l'estimation de nombreux facteurs. La RUSLE peut tenir compte de combinaisons plus complexes de pratiques de travail du sol et de pratiques culturelles ainsi que d'une plus grande variété de formes de pentes.

## **5.3- Application de l'USLE en Algérie**

Plusieurs travaux ont été réalisés sur l'équation universelle des pertes en sols, en Algérie et dans d'autres pays dans le monde. Elle a été appliquée en Algérie dans le Constantinois (Sarab, 1978), les résultats obtenus quant à la valeur de l'érosion sont très variés allant de 2 à 12 T/ha.an, selon la nature et la profondeur du sol. La durée d'expérimentation étant très courte (4 mois) les résultats obtenus restent en conséquence pris avec précaution quant à leur interprétation. Les travaux de Gomer (1996), dans le bassin versant de la Mina dans le cadre de la coopération Algéro-Allemande, de même que les travaux de Touaibia (1999) sur ce même bassin ont abouti à un résultat similaire fixant le seuil tolérable de l'érosion à 10 T/ha, rejoignant les conclusions de Tixeront (1960) réalisé sur le transport solide en Algérie et en Tunisie. Roose et al (1997) se sont perchés sur la problématique de l'érosion en Algérie mais en s'intéressant à la gestion conservatoire des eaux et des sols. A l'échelle internationale citons les travaux de Bergaoui et al (1996) à l'échelle d'un micro-bassin en Tunisie; les travaux de Dogan et al (1997) sur la lutte antiérosive en Turquie ; les travaux de Zahar et al (2001) en Tunisie, où ils ont travaillé uniquement avec l'index d'érosivité R en supposant que les autres paramètres sont constants, simulant les averses dans un champ expérimental.

## 6 - Autre travaux de modélisation de l'érosion

### 6.1- Formule de Fournier (1960)

A la suite des travaux effectués sur 140 rivières en Europe, Fournier et Henin (1959) définissent un coefficient ou un indice qui exprime l'action érosive de la pluie à l'échelle d'un bassin versant. Fournier, en 1960, a montré que le sol et la végétation ont pour déterminant le climat et que ce dernier est suffisant pour estimer l'érosion des grands bassins versants

$$Q_s = \frac{1}{36} \cdot \left[ \frac{P}{P_a} \right]^{2,65} \cdot \left[ \frac{H_{moy}}{S} \right]^{0,46}$$

Avec :

Qs : l'apport solide moyen inter annuel (T/Km<sup>2</sup> .an).

P : la pluviométrie du mois le plus arrosé (mm).

Hmoy : l'altitude moyenne (mm).

Pa : la pluviométrie moyenne inter annuelle (mm).

S : la superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

### 6.2- Formule de Tixeront (1960)

Es = [S1.Ta1 + S2.Ta2 + S3.Ta3 + ..... Sn.Tan ].

Avec :

Es : Erosion spécifique (t/Km<sup>2</sup> .an).

Ta1, Ta2, Tan : Taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du sol dans les sous Bassin (T/Km<sup>2</sup>).

S : superficie totale du bassin (Km<sup>2</sup>).

S1, S2, Sn : Superficie des sous bassins(Km<sup>2</sup>).

Maintenant, si on suppose que la totalité du bassin possède une même perméabilité

On a  $E_s = K \cdot L_e$

$L_e$  : lame d'eau ruisselée moyenne interannuelle (mm).

$K$  : constante

$K$  : coefficient qui tient compte de la perméabilité des terrains.

$K = 8,5$  pour les terrains d'une perméabilité élevée.

$K = 75$  pour les terrains d'une perméabilité moyenne élevée.

$K = 350$  pour les terrains d'une perméabilité faible à moyenne.

$K = 1400$  pour les terrains d'une perméabilité faible.

$K = 3200$  pour les terrains perméables.

Tixeront (1960), dans ses travaux sur le transport solide en Algérie et en Tunisie, a classifié les bassins versants selon le degré d'érosion spécifique  $E_s$ :

Si  $E_s = 0 \div 3,2$  T/ha.an Bassin Versant à faible érosion

Si  $E_s = 3,2 \div 10$  T/ha.an Bassin Versant à moyenne érosion

Si  $E_s = 10 \div 32$  T/ha.an Bassin versant à forte érosion

Si  $E_s > 32$  T/ha.an Bassin Versant à érosion excessive

### 6.3- Indice de Heusch (1970)

Des mesures de concentration en matière solide dans les oueds et leurs débits ont été effectuées durant plusieurs années (4 à 10 ans) sur 13 stations du bassin de Sebou (Maroc). Heusch a travaillé sur l'érosion au Pré-Rif (Maroc) utilisant plusieurs méthodes : analytique et synthétique. A partir des cartes des différents facteurs de l'érosion, il a été possible de calculer l'érosion au champ pour différents secteurs du Pré-Rif. Les résultats de ce calcul sont comparés dans des tableaux d'une part l'index pluie « R » de Wischmeier et d'autre part l'érosion spécifique mesuré sur la rivière la plus proche.

Il a constaté que les pertes en terre calculées par cette méthode sont extrêmement fortes et d'une telle importance qu'un examen sommaire du terrain que ces valeurs calculées sont fausses par excès, cet échec était prévisible.

Une lecture attentive des travaux de Wischmeier montre que l'auteur exclut explicitement de la zone d'application de sa formule la Californie au climat méditerranéen ; Les montagnes rocheuses dont les pentes dépassent 25%. Ainsi, pour remédier à cet état de chose, quatre stations ont été créées au Pré-Rif.

### 6.4- Formule de Touaibia et al (2003)

Une étude approfondie sur l'érosion hydrique à différentes échelles dans le bassin versant de l'Oued Mina, a permis de trouver une relation fonctionnelle entre l'érosion spécifique, la surface et le couvert végétal. Cette équation n'est transposable qu'en zone semi-aride où elle a été élaborée.

$$E_s = 19,36 S^{-0,134} C_{veg}^{-0,134}$$

## **7 - Conclusion**

Les travaux réalisés sur le bassin versant de la Soummam touchent plusieurs domaines tels que les inondations et la qualité des eaux, par contre, la modélisation de l'érosion est moins traitée dans le bassin mis à part quelques tentatives et quelques études sur des sous bassins du grand bassin versant de la Soummam.

## **Chapitre II**

### **Conditions morpho climatiques du flux hydro sédimentaire**



## 1 - Introduction

Le but de cet aperçu général sur le bassin versant de la Soummam est de faire ressortir les caractéristiques physiques du milieu et notamment géographiques, géomorphologiques, géologiques et hydro-climatologique qui conditionnent le comportement hydrologique du bassin versant et les mécanismes régissant le flux sédimentaire.

## 2 - Situation géographique du bassin de la Soummam.

Le bassin versant de la Soummam est situé au Nord-est de l'Algérie entre les méridiens  $3^{\circ}36'$  et  $5^{\circ}34'$  et les parallèles  $35^{\circ}45'$  et  $36^{\circ}42'$ . Son thalweg principal est d'orientation Sud-ouest/Nord-est. Il est limité au Nord par la Méditerranée, à l'Ouest et au Nord-ouest par le Djurdjura et les massifs côtiers de Bejaia, à l'Est les hautes plaines sétifiennes, au Sud, le plateau de Bouira et le domaine de Biban. Sa superficie est de  $9125\text{km}^2$  (fig. 01). C'est un bassin de vie englobant plusieurs villes importantes (Bejaia, Akbou, Bouira, Sétif...) et une population d'environ 1,3 million ha (Atlas de la Soummam. 2017). La vallée de la Soummam a connu, ces dernières années, une activité économique importante représentée essentiellement par l'industrie agro-alimentaire.

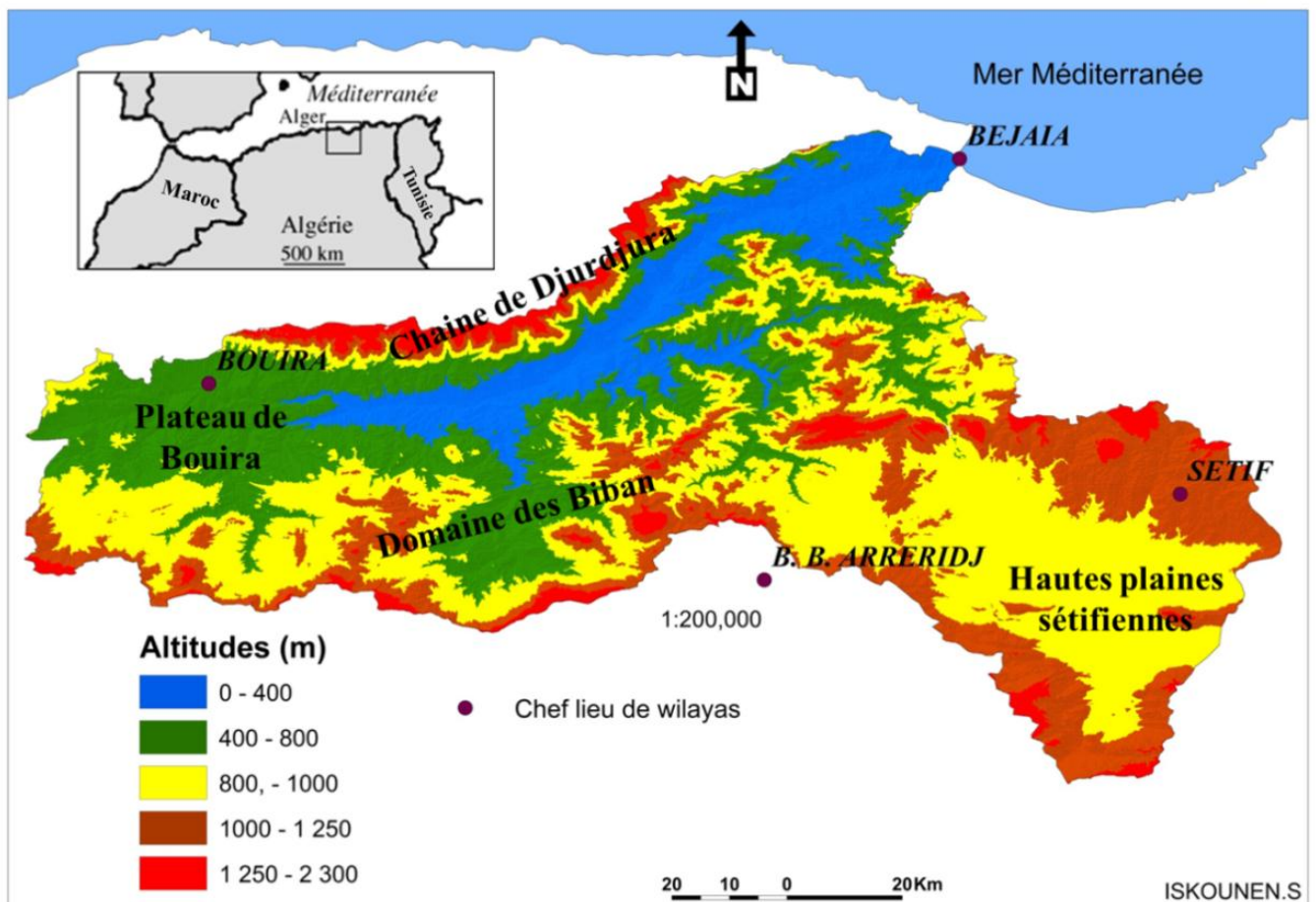


Fig. 01 : Localisation de la zone d'étude

### **3 - Cadre morpho-structural**

#### **3.1 - Les grands traits morphologiques**

Le relief du bassin versant de la Soummam est très varié (fig.01), les principales unités morphologiques sont, du Nord au Sud :

##### **- Le flanc sud de la chaîne du Djurdjura**

C'est une chaîne imposante dans le paysage de la haute Kabylie. Elle s'élève abruptement au Nord de Bouira à la hauteur de 2123m pour atteindre son point culminant près de M'Chedellah, (Lala Khadidja 2308m). Au Nord, elle se termine par la chaîne de Gouraya et son pittoresque Cap Carbon à l'origine de la baie de Bejaia.

##### **- La vallée de la Soummam**

La vallée de la Soummam est un vaste couloir à fond plat situé entre le Djurdjura à l'Ouest et les chaînes des Biban et des Babor à l'Est. Dans son cours supérieur l'Oued est connu sous le nom de l'Oued Sahel. Ce n'est qu'après la confluence avec l'Oued Boussellam qu'il prend le nom de Soummam.

Dans sa partie amont l'Oued Sahel draine successivement la plaine des Arib et le plateau de Bouira. Elle se rétrécit vers le Nord pour apparaître sous forme de goulot au niveau de Sidi Aiche. De nouveau, elle s'élargit graduellement jusqu'à la baie de Bejaia.

##### **- Le domaine des Biban**

D'orientation générale Est-ouest, la chaîne des Biban pénètre dans le bassin de la Soummam près de Sour El Ghorlane et s'étend vers djebel Anechar (1415m) en passant par Azrou N'Said (1283m). Il montre une ramification importante près de Guenzat en direction de djebel Es-Sarsara, (1487m) pour atteindre Djebel Anini (1596m) hors du bassin de la Soummam.

##### **- Le domaine des Babor**

Il apparaît à l'Est du bassin sous forme de terminaison Ouest des Babor occidentaux. Il se situe au Nord-est du cours aval du Boussellam. Il est constitué d'une série de crêtes différemment orientées. Sa hauteur moyenne varie entre 1200 et 2000m.

##### **- Les hautes plaines Sétifiennes**

Les hautes plaines occupent la partie Sud-est du bassin. C'est une vaste surface relativement plate dont l'altitude varie entre 750 m et 950 m. Des reliefs isolés surgissent de ces plaines, représentés essentiellement par les Djebels Zdim (1160 m), Youcef (1442 m) et Braou (1263 m).

### **4 - Cadre litho-stratigraphique**

Dans cette analyse du cadre litho-stratigraphique, nous nous sommes basés essentiellement sur la carte géologique de l'Algérie au 1/500 000<sup>ème</sup> (1952), l'esquisse tectonique de M. KIEKEN au 1/1 000 000<sup>ème</sup> et les quelques cartes au 1/50 000<sup>ème</sup> disponibles sur le bassin

versant de la Soummam. Les formations géologiques qui affleurent dans le bassin montrent uniquement les trois dernières ères de l'histoire de la terre (fig.03).

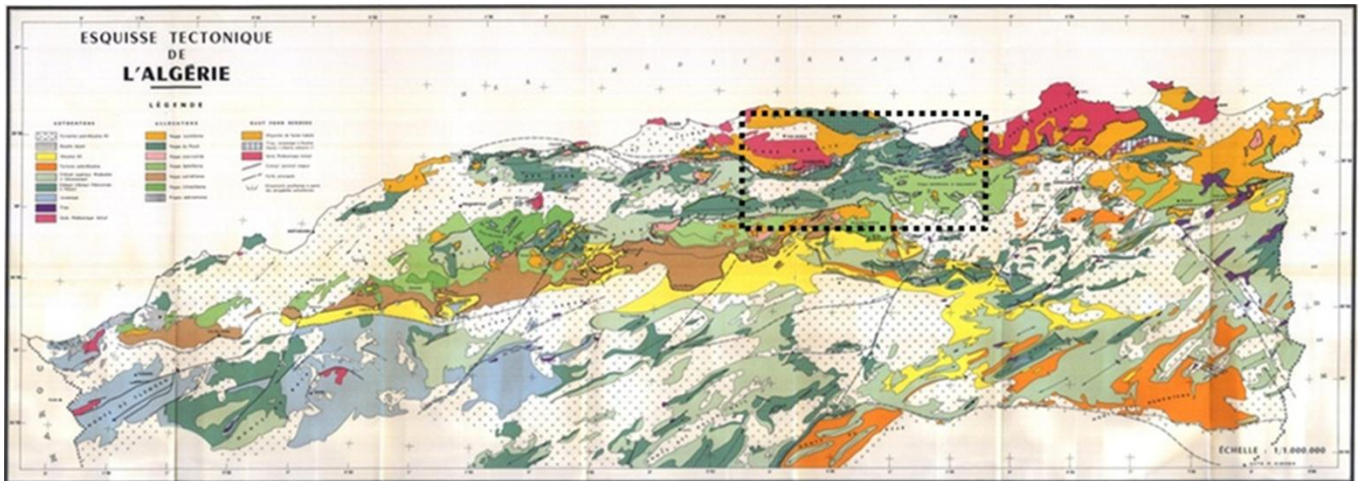


Fig. 02 : Esquisse Tectonique de L'Algérie du Nord de M. KIEKEN 1/1 000 000

#### 4 - 1. Les formations secondaires :

##### - Le Crétacé

Il occupe une partie importante du bassin versant de la Soummam et se concentre particulièrement dans la vallée de la Soummam. Il peut être subdivisé, d'après Kieken, en deux catégories : le Crétacé autochtone et le Crétacé allochtone.

##### 1- Le Crétacé autochtone :

Il est présent dans la rive droite de la Soummam (d'Akbou jusqu'à Djebel Gueldamane) où il forme un synclinal à fond plat. Il est constitué d'argiles brunes schisteuses avec lits de Quartzites, marnes et marno-calcaires noirs à gris bleuâtres allant du crétacé inférieur à moyen. Au niveau de la basse Soummam, ses formations laissent la place à des schistes noirs avec de minces intercalations de grés fins Quartzeux.

##### 2- Le Crétacé allochtone :

Il affleure dans la rive gauche de la Soummam notamment aux Djebels Arbalou, Gouraya, et au Nord d'Ilmaten. Il est constitué de flysch (crétacé inférieur) formés essentiellement d'argiles schisteuses grises, avec des intercalations de lits gréseux ou marno-calcaires.

Selon l'origine des matériaux qui constituent ses flyschs, on distingue les flyschs internes et les flyschs externes, ainsi que l'unité tellienne.

##### - Les Flyschs externes :

Ils sont constitués de marnes, de bancs calcaires, de quartzites gris, de grés fins, de pelites, de conglomérats grossiers et des microbrèches argileuses et sableuses. Ils chevauchent l'unité tellienne ainsi que les flyschs internes.

- Les Flyschs internes :

Ils affleurent le long du flanc de Djurdjura jusqu'au Sud de Bejaia. Ils sont constitués de marnes, de gré, de quartzites et de schistes à petits bancs calcaires allant du Sénonien au Cénomaniens.

- L'Unité tellienne :

Elle Chevauche les flyschs internes, du Nord de Sidi-Aiche à Bejaia. Elle montre les mêmes facies du Crétacé autochtone.

- **Le Jurassique :**

Il est constitué à la base, de calcaires dolomitiques, de dolomies et de calcaires massif et à débris. Au sommet, il affleure sous forme de calcaire gris contenant des bancs de silex à la base. Il est présent aussi dans la vallée Sahel-Soummam surtout dans la région d'Akbou.

- **Le Trias :**

Dans la basse Soummam, il est constitué d'un facies gypso-salin à argiles versicolores, cargneules et dolomies. Il se manifeste sous forme de masses plus ou moins étendues remplissant de grandes cassures et le long de contacte de nappes de Charriage notamment dans la région Nord d'Akbou, mais aussi sous forme d'épointements locaux à Sidi-Aiche et à Ilmaten.

#### **4 - 2. Les formations tertiaires :**

- **Le Mio-Pliocène :**

Cette formation est constituée de brèches, de sable et de grés surmontés d'argiles bleues. Elle est présente surtout entre la région d'Oued Ghir et de Bejaia, comme elle affleure aussi sur la rive droite de la Soummam près de l'agglomération d'Ighil-Oubarouak.

- **Le Miocène :**

Ces formations post-nappes se situent sur les bordures de la vallée de la Soummam. (Miocène moyen et supérieur). Elles sont représentées par deux types de roches : les roches éruptives qui apparaissent sous forme de taches de surface réduite dans la zone d'oued Amizour. Les roches sédimentaires qui peuvent être scindées en deux grands ensembles :

L'ensemble des dépôts marins constitué de marnes gréseuses, de conglomérats et de grés fins et grossiers. Il se localise essentiellement sur la rive gauche de la Soummam et s'étend de

Bejaia à Sidi Aiche, son épaisseur est comprise entre 10 et 15m au niveau d'Ilmaten et de 10 à 25m dans les environs de l'El-Kseur.

L'ensemble des dépôts continentaux est constitué d'une série de conglomérats de taille très variable, d'une épaisseur d'au moins 150 m et d'une couleur rougeâtre. Ces derniers sont en alternance avec des niveaux argileux caractéristiques à l'amont de la vallée et dans la partie aval ils sont en alternance avec des niveaux marneux-gréseux.

- **L'Oligocène (Grés Numidien) :**

Les Grés Numidiens représentent la dernière nappe de charriage qui coiffe la série de nappes qui s'est empilée durant la phase tectonique alpine. Ils n'affleurent qu'au Nord de la Soummam entre Bejaia et Sidi-Aiche. Ils sont composés de flysch gréseux constitué de grés quartziteux, de marnes schisteuses avec à la base des argiles sous numidiennes.

**4 - 3. Les formations quaternaires :**

Elles occupent la majeure partie de la vallée de la Soummam ainsi que la partie amont du sous bassin de Boussellam (hautes plaines sétifiennes) :

Dans la vallée de la Soummam, les alluvions anciennes et récentes tapissent les deux rives de l'oued avec des niveaux de terrasses qui s'élèvent jusqu'à 40m au-dessus du lit de l'oued (trois niveaux de terrasses). Les alluvions anciennes montrent une présence importante d'éléments grossiers. Par contre, les alluvions récentes (basse terrasse) se caractérisent par des lits de sables et de graviers avec des intercalations argileuses d'une épaisseur importante.

Au pied du flanc du Djurdjura et à la faveur des cours d'eau, se construisent des cônes de déjections et des cônes d'éboulés anciens et récents. Ces éboulis sont essentiellement constitués de gros galets ou d'argiles caillouteuses. Leur présence est plus importante sur la vallée Sahel-Soummam que sur la basse Soummam.

Des formations superficielles quaternaires tapissent aussi les hautes plaines sétifiennes et constituent les terres arables à l'origine de la réputation de la région de Sétif dans la production céréalière.





## 5- Cadre structural

Il est évident que la tectonique a conditionné dans une large mesure l'individualisation du bassin versant de la Soummam. La faille à l'origine de la vallée de la Soummam est aussi une limite entre les différents ensembles morpho-structuraux qui entourent le bassin versant de la Soummam. En effet, elle constitue la limite de la terminaison Ouest des Babor occidentaux et des Biban. Comme elle constitue la limite Est de l'ensemble du Djurdjura. Le tracé de cette même faille a été exploité par l'érosion régressive pour permettre l'installation du thalweg principal de la Soummam. Dans sa terminaison Nord, cette faille coïncide avec l'effondrement de la baie de Bejaia. Ainsi, la zone allant de la baie jusqu'au plateau de Bouira connaît une activité sismique assez importante témoignant du rôle de la néotectonique dans la région.

Ainsi, La tectonique qui, avec la lithologie dominante dans la région, ont donné l'aspect actuel à la majorité des unités physiographique qui caractérise la région. En effet, plusieurs phases tectoniques ont été reconnues par les géologues depuis les levés des premières cartes dans la région. Coutelle A. (1979) avait récapitulé les résultats obtenus par les différents géologues, selon l'ordre chronologique, comme suit :

- **La phase néocomienne :** C'est une phase de plissements assez complexes orientés NE-SO et parallèles à l'actuelle direction des couches d'Adrar N' Gueldamane, avec une fracturation locale intense. Le Néocomien est partout conglomératique, tantôt concordant avec le Jurassique, tantôt discordant et affecté de failles syn-sédimentaires.
- **La phase sénonienne :** cette phase est reconnue depuis Fisheur (1890) qui a observé que les plis à schistosité de l'unité de Bou Hamza ont la même direction que les plis à cœur Vracono-cénomaniens du Djebel Edni. Il déduit alors que ces déformations sont postérieures à celles qui affectent l'unité anté-sénonienne des Béni Ourtilène.
- **La phase éocène :** durant cette phase, la sédimentation des unités externes de la vallée de la Soummam est interrompue dès le Lutétien supérieur jusqu'au Miocène anté-nappes. Ainsi, la structuration des unités des Biban, de Bou Hamza et des Béni Ourtilène est antérieure à l'arrivée des nappes qui les recouvrent.
- **La phase miocène :** Elle est reconnue comme une phase très importante dans la région. Au Langhien a eu lieu la phase paroxysmale responsable des charriages des nappes. Cette phase a été précédée par une autre période de tectonisation (Bizon et Gélard, 1975) où les flyschs ont glissé par-dessus le domaine Kabyle. La série de la Djemaa N'schrijd, qui a été mise en évidence à Sidi Aiche, est discordante sur le Sénonien de l'unité de Barbacha. Elle est immédiatement surmontée par le Miocène post-nappe de la Soummam.
- **La tectonique post-nappes :** elle est à l'origine de l'individualisation des trois super-unités de la région d'Akbou est postérieure au dépôt du Miocène de la

Soummam. Le contact par faille séparant le Miocène continental des flyschs étant post-nappe.

- **La tectonique récente et actuelle :** A l'est d'Akbou et l'ouest de Takarite, elle est représentée par une fracturation assez importante. De nombreuses failles orientées NE – SO sont visibles telle que la faille de Tachaouaft au sud-est, la faille de Tibouamouchines et la faille de la Soummam, qui a été reconnue par Boudiaf(1999) comme étant active particulièrement dans la région de Tazmalt. Cette famille de failles est parfois décalée par une autre famille de fracturation d'orientation moyenne Nord-ouest - Sud-est, qui paraît plus ancienne que la précédente avec laquelle semble constituer un réseau ordonné.

## 6 – Le cadre morphométrique du bassin versant

Les paramètres morphométriques d'un bassin versant tels que la forme, l'altitude moyenne, la pente et la massivité du relief jouent un rôle essentiel dans le comportement hydrologique du bassin versant. Ils ont l'avantage de se prêter à une analyse quantifiée qu'il convient de préciser autant que possible dès le début de toute interprétation. A titre d'exemple, la forme du bassin conditionne l'allure de l'hydrogramme de crue résultant d'une averse donnée (Roche, 1963). Ainsi, les paramètres suivants peuvent être considérés comme des indicateurs sur le comportement hydrologique du bassin :

### 6 – 1. L'indice de compacité de Gravelius

Il est établi en comparant le périmètre stylisé du bassin comparé à celui d'un cercle ayant la même surface. L'indice de forme est égal à 1 pour un bassin circulaire et croît avec l'allongement du bassin.

$$k_G = \frac{p}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S}} = 0.28 \frac{p}{\sqrt{S}}$$

Où,  $P$  : périmètre du bassin en km et  $S$  : superficie du bassin en km<sup>2</sup>.

On obtient,  $K_G = 1,9$ , cette forme allongée signifie que le bassin de la Soummam est ne développe pas des pics de crue très importants.

### 6 – 2. Dimensions du rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent a été introduite par M. Roche (1963). Elle permet de ramener la forme quelconque d'un bassin versant à une forme rectangulaire ayant la même superficie, le même périmètre, la même hypsométrie et le même indice de compacité. Cette notion permet aussi la comparaison des bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement.

Ses dimensions sont données comme suit:



$$2(L_e + l_e) = p = \frac{1}{0.28} K_G \cdot \sqrt{S}$$

$$k_G = 0.28 \frac{p}{\sqrt{S}}$$

$$S = L_e \cdot l_e$$

Avec,  $L_e$  : longueur du rectangle équivalent ;  $l_e$  : largeur du rectangle équivalent ;  $P$  : périmètre du bassin versant ;  $S$  : superficie du bassin versant et  $K_G$  : indice de compacité.

La résolution de ce système d'équation nous donne :

$$L_e = \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{K_G} \right)^2} \right) \frac{K_G \sqrt{S}}{1,128}$$

Et

$$l_e = \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{K_G} \right)^2} \right) \frac{K_G \sqrt{S}}{1,128}$$

Avec :  $K_G = 1,9$

On obtient,  $l_e = 31,53$  km et  $L_e = 290,42$  km

*Tab.01 : éléments relatifs au rectangle équivalent du bassin versant de la Soummam*

<b>L'indice</b>	<b>valeurs</b>
Surface (S)	9125 km <sup>2</sup>
Périmètre (P)	644 km
L'indice de compacité Gravelius ( $K_G$ )	1,9
Largeur du rectangle équivalent ( $l_e$ )	31,53 km
Longueur du rectangle équivalent ( $L_e$ )	290,42 km

### 6 – 3. Répartition altimétrique des surfaces partielles du bassin versant de la Soummam

Les tranches d'altitudes du bassin versant de la Soummam sont comprises entre 0 m à l'exutoire du bassin et 2400 m sur la bordure nord-ouest du massif du Djurdjura (tab. 02).

Tab. 02: L'hypsométrie du bassin de la Soummam.

Classe des altitudes (m)	Surfaces élémentaires (km <sup>2</sup> )	Surfaces cumulées (%)	Altitudes moyennes (m)
0 – 200	379	100,00	100
200 – 400	724	95,85	300
400 – 600	1425	87,91	500
600 – 800	1825	72,30	700
800 – 1000	3119	52,30	900
1000 – 1200	1105	18,12	1100
1200 – 1400	274	6,01	1300
1400 – 1600	174	3,00	1500
1600 – 1800	50	1,10	1700
1800 – 2000	0	0,55	1900
2000 – 2200	0	0,55	2100
2200 – 2400	50	0,55	2300

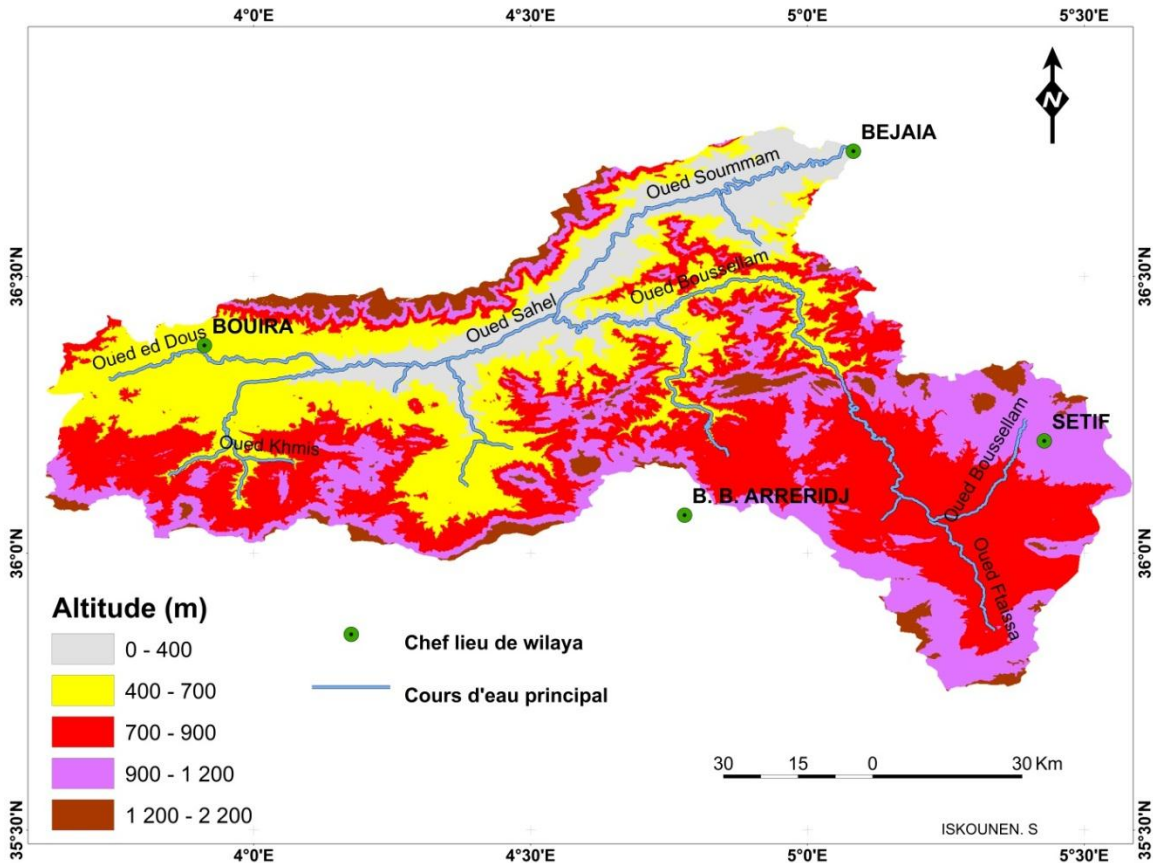


Fig. 04 : carte hypsométrique du bassin versant de la Soummam

La courbe hypsométrique du bassin versant (fig. 05) est établie à partir du tableau 02. Cette courbe montre la répartition des surfaces partielles en fonction de l'altitude et fait ressortir les valeurs remarquables suivantes :

- Altitude max : 2 308 m
- Altitude médiane : 900 m
- Altitude moyenne :  $H_{\text{moy}} = \frac{\sum H_i \cdot S_i}{S_T}$

- Avec
- $H_{\text{moy}}$  : Altitude moyenne du bassin versant en (m)
  - $S_i$  : Aire comprise entre deux courbes de niveau (km<sup>2</sup>)
  - $H_i$  : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau en (m) ;
  - On obtient  $H_{\text{moy}} = 776$  m ;
  - Altitude mini : = 0 m.

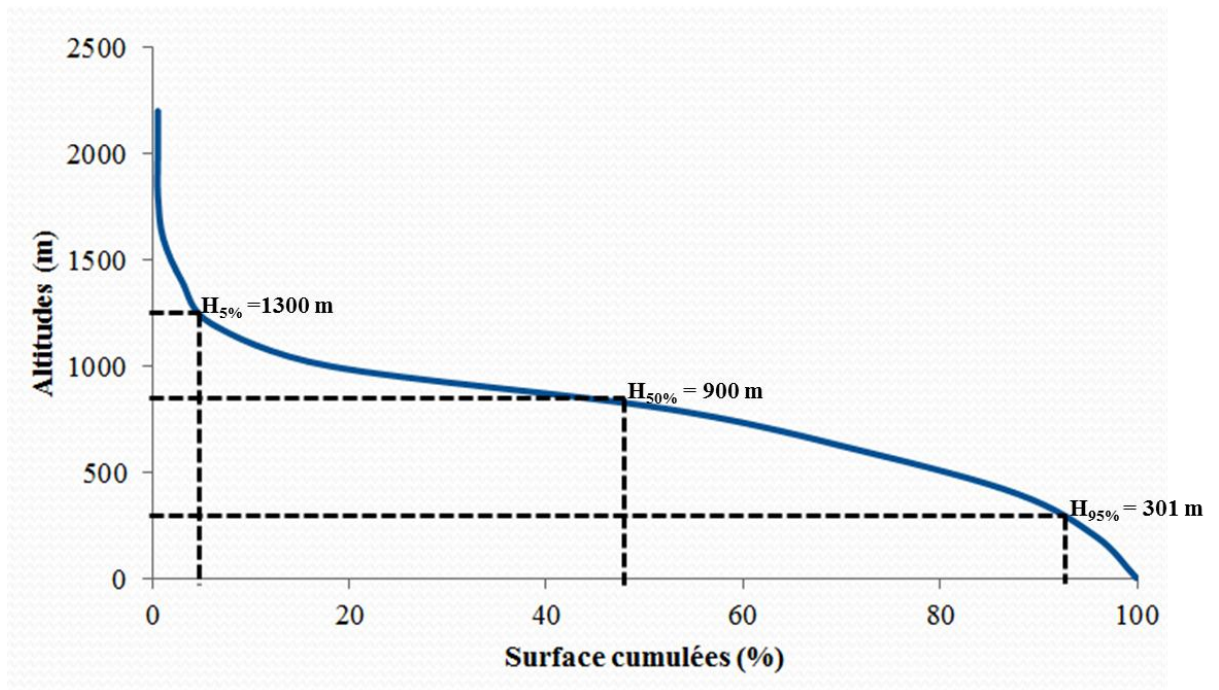


Fig. 05 : Courbe hypsométrique du bassin de la Soummam

- **Dénivelée simple (D) :**

La "dénivelée D" est définie comme étant la différence de cote entre H5 % et H95 % et exprimée par la formule suivante :  $D = H_{5\%} - H_{95\%}$

$H_{5\%}$  : l'altitude à 5% de la surface,  $H_{5\%} = 1300.5$  m.

$H_{95\%}$  : L'altitude à 95 % de la surface,  $H_{95\%} = 301$  m.

Alors : **D = 999.5 m.**

- **Indice global de pente (I<sub>g</sub>) :**

L'indice global de pente (I<sub>g</sub>) permet de caractériser une pente représentative de la pente moyenne des versants, il est défini également par Roche M. (1963).

Pour un même bassin, lorsque la longueur du rectangle équivalent augmente l'indice I<sub>g</sub> décroît.

$$I_g = D/L_e$$

Cet indice est calculé comme suit :

Avec : D : la dénivelée simple en (m).

L<sub>e</sub> : Longueur du rectangle équivalent en (km).

On a : D = 999.5 m et L<sub>e</sub> = 290 km.

Donc : **I<sub>g</sub> = 3,35 m/km**

La perte d'altitude de 3.35m pour chaque kilomètre n'est pas une dénivelée suffisante pour permettre un écoulement torrentiel de la Soummam

- **Dénivelée spécifique D<sub>s</sub> :**

La dénivelée spécifique dérive de la pente globale I<sub>g</sub> en la corrigeant de l'effet de surface admis étant inversement proportionnel à  $\sqrt{A}$ .

Elle est donnée par la formule suivante :  $D_s = I_g \sqrt{A}$

La dénivelée spécifique ne dépend donc que de l'hypsométrie (D = H5% - H95 %) et de la forme du bassin (l/L). Elle donne lieu à la classification de l'O.R.S.T.O.M suivante :

*Tab. 03 : Massivité du relief selon la classification de relief de l'O.R.S.T.O.M.*

Classe	Importance du relief	D <sub>s</sub>
R1	Relief très faible	D <sub>s</sub> < 10 m
R2	Relief faible	10 m < D <sub>s</sub> < 25 m
R3	Relief assez faible	25 m < D <sub>s</sub> < 50 m
R4	Relief modéré	50 m < D <sub>s</sub> < 100 m
R5	Relief assez fort	100 m < D <sub>s</sub> < 250 m
R6	Relief fort	250 m < D <sub>s</sub> < 500 m
R7	Relief très fort	500 m < D <sub>s</sub>

On a : D = 999.5 m, L = 290 km et l = 31km. Donc : **D<sub>s</sub> = 326,78 m.**

D'après le tableau 03 ; la massivité du relief est classée selon O.R.S.T.O.M, comme relief fort (R6). Ainsi, le bassin versant peut être soumis à un soutirage important provoquant une érosion régressive assez active.

L'étude morphométrique du bassin versant nous a permis de déduire que le bassin est soumis à une force érosive assez importante qui peut causer des dégâts remarquables par endroits (zones vulnérables).

## 7 - Les principaux sous bassins versants de la Soummam

Le bassin versant de la Soummam se compose de dix sous bassins (fig. 06) correspondant aux unités hydrologiques définies par l'ANRH dont certaines sont contrôlées par des stations hydrométriques.

A partir de la configuration globale du réseau hydrographique, le grand bassin versant de la Soummam (9125 km<sup>2</sup>) peut être subdivisé en deux sous bassins en l'occurrence le sous bassin de Boussellam d'une superficie de 4309km<sup>2</sup> et le sous bassin Sahel-Soummam avec une superficie de 4816km<sup>2</sup> (fig. 07)

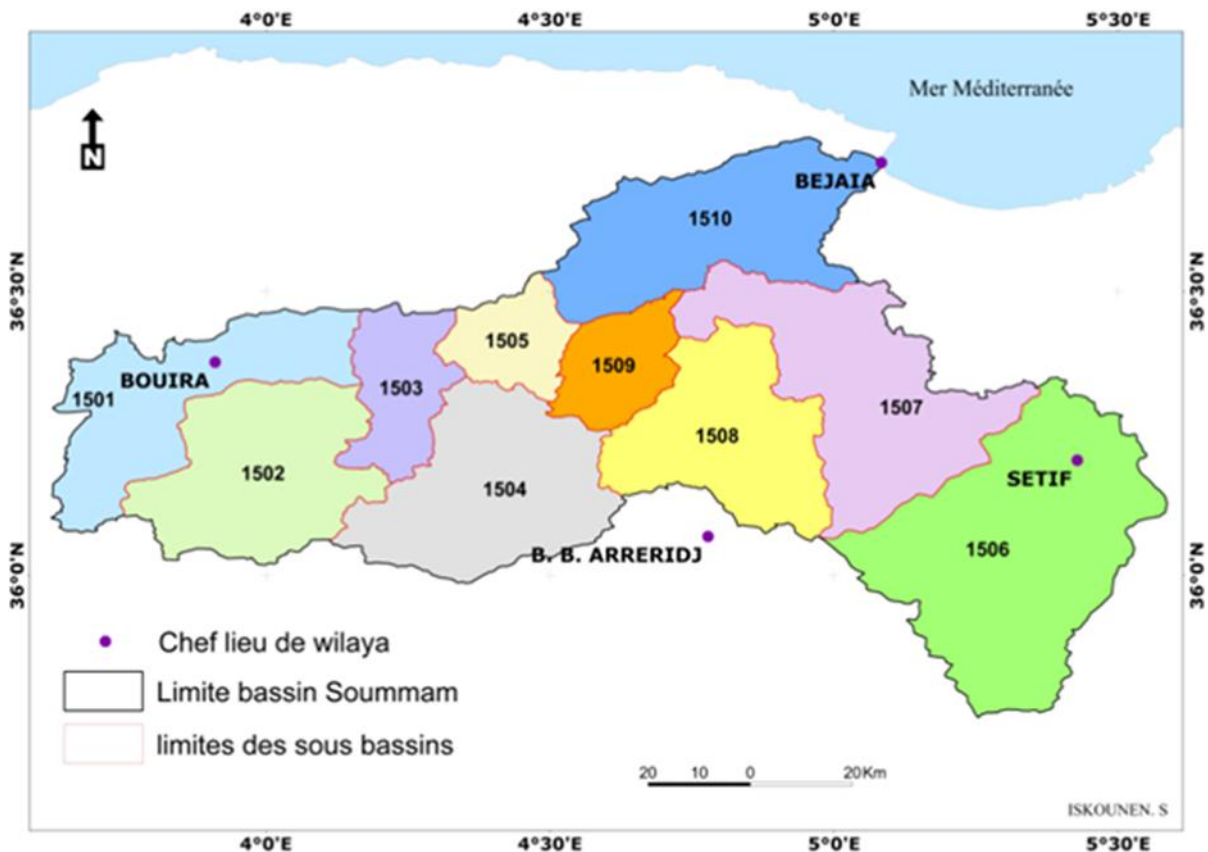


Fig. 06: les sous bassins du bassin versant de la Soummam

### 7.1- Le sous bassin de Boussellam

Ce sous bassin est constitué essentiellement par les hautes plaines sétifiennes dans sa partie amont et de la terminaison Ouest des Babor occidentaux dans sa partie aval

La partie amont du sous bassin de Boussellam est composée d'un seul sous bassin, qui porte le nom d'Oued Boussellam Amont et le code 1506 sur l'annuaire de l'ANRH. Sa superficie est de 1785 km<sup>2</sup> (fig. 06). Par contre, la partie aval est subdivisée en trois sous bassins : Oued Boussellam Moyen (1234km<sup>2</sup>), Oued El Ham (930 km<sup>2</sup>) et Oued Boussellam Aval (360 km<sup>2</sup>), qui portent respectivement les codes ; 1507, 1508, 1509 sur l'annuaire de l'ANRH. Le tableau 04, récapitule les données relatives au sous bassin Boussellam.

Tab. 4 : Sous bassins de Boussellam

Sous bassin versant	Code	Superficie (km <sup>2</sup> )
Oued Boussellam Amont	1506	1785
Oued Boussellam Moyen	1507	1234
Oued El Ham	1508	930
Oued Boussellam Aval	1509	360

## 7.2- Le sous bassin Sahel-Soummam

Ce sous bassin occupe la vallée principale du grand bassin versant de la Soummam. La partie aval est drainée par l'oued Soummam. Par contre, la partie amont est drainée par l'oued Sahel.

La partie aval qui s'étend de l'embouchure jusqu'à la confluence des oueds Boussellam et Sahel est composée par un seul sous bassin (1061 km<sup>2</sup>) qui porte le nom d'Oued Soummam et le code 1510 sur l'annuaire de l'ANRH (fig. 05).

La partie amont s'étend de la confluence des oueds Sahel et Boussellam jusqu'à la limite sud du grand bassin versant de la Soummam. Elle est constituée de cinq sous bassins en l'occurrence les sous bassins Oued Eddous (903km<sup>2</sup>), Oued Ziane (1012 km<sup>2</sup>), Oued Sahel amont (430 km<sup>2</sup>), Oued Azerou (1084 km<sup>2</sup>) et Oued Sahel Aval (326km<sup>2</sup>) qui portent respectivement les codes : 1501, 1502, 1503, 1504 et 1505 dans l'annuaire de l'ANRH (tab. 05).

Tab. 5 : Sous bassins de la vallée de la Soummam (Sahel-Soummam)

Sous bassin versant	Code	Superficie (km <sup>2</sup> )
Oued Eddous	1501	903
Oued Ziane	1502	1012
Oued Sahel amont	1503	430
Oued Azerou	1504	1084
Oued Sahel Aval	1505	326
Oued Soummam	1510	1061



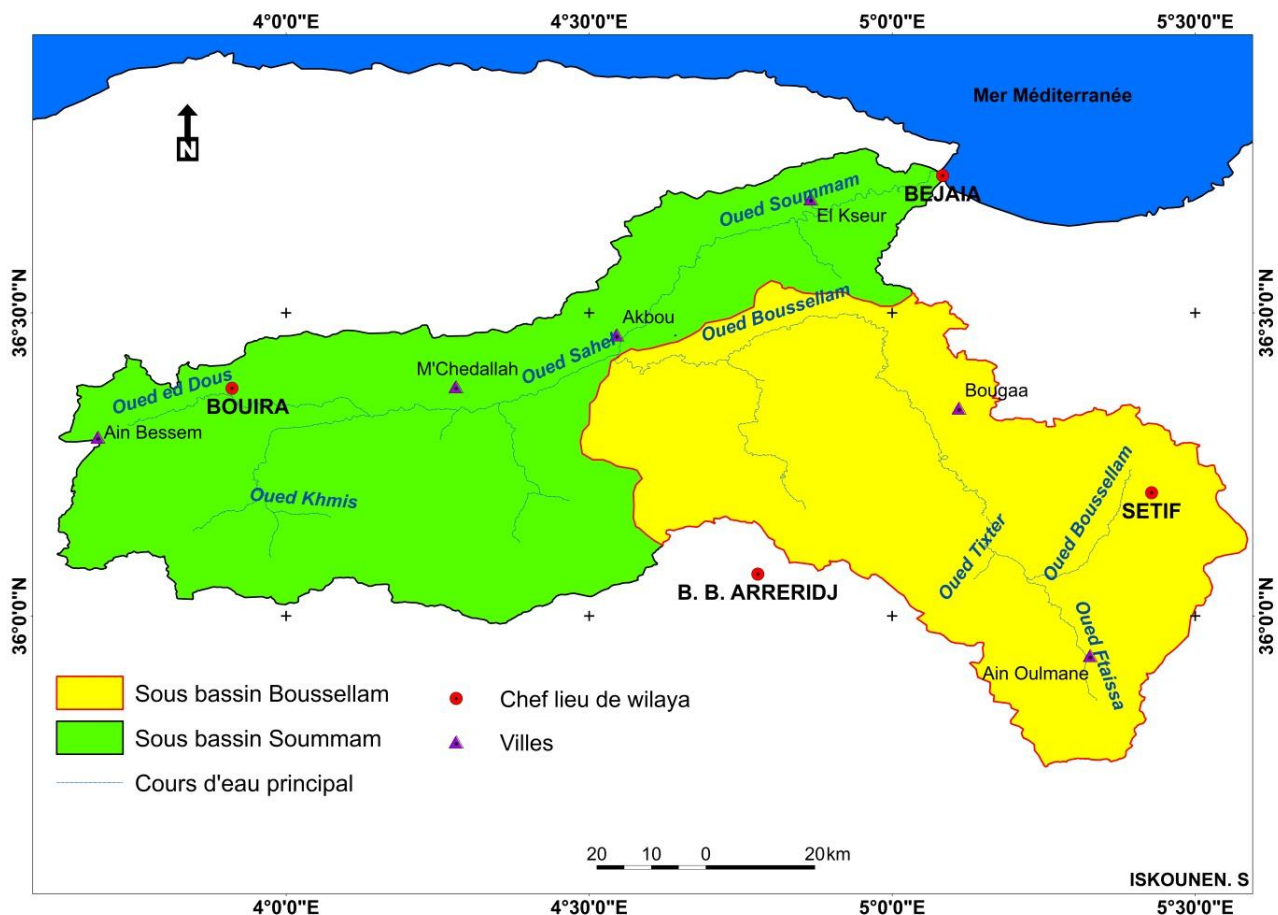


Fig. 07: Les deux principaux sous bassins de la Soummam

## 8 - Étude du réseau hydrographique

Le bassin versant de la Soummam montre un réseau de drainage bien développé avec deux principaux collecteurs en l'occurrence l'oued Boussellam et l'oued sahel (fig. 08).

L'oued Boussellam qui draine la partie Est du bassin versant représente 54,9 % de la superficie totale du grand bassin.

Il prend sa source au djebel Meghris, au Nord de Sétif. Il coule d'abord du Nord au Sud, puis vire brusquement vers l'Ouest jusqu'à la limite des hautes plaines sétifiennes où il traverse les gorges creusées dans les calcaires du Guergour, dans la région de Bougaa, pour confluer avec l'oued Sahel. Il est établi (Gautier E F. 1910) que l'oued Boussellam coulait, probablement jusqu'au quaternaire moyen, vers le Sud avant d'être capturé par l'oued Soummam lors de sa progression vers l'intérieur (Mebarki, 2004).

L'oued Sahel, qui se situe dans la continuité de l'oued Soummam dans sa partie amont, draine les eaux des oueds Azrou, Ziane et Eddous. Ainsi, de la confluence des oueds Boussellam et Sahel naît l'oued Soummam qui donne son nom au grand bassin versant.

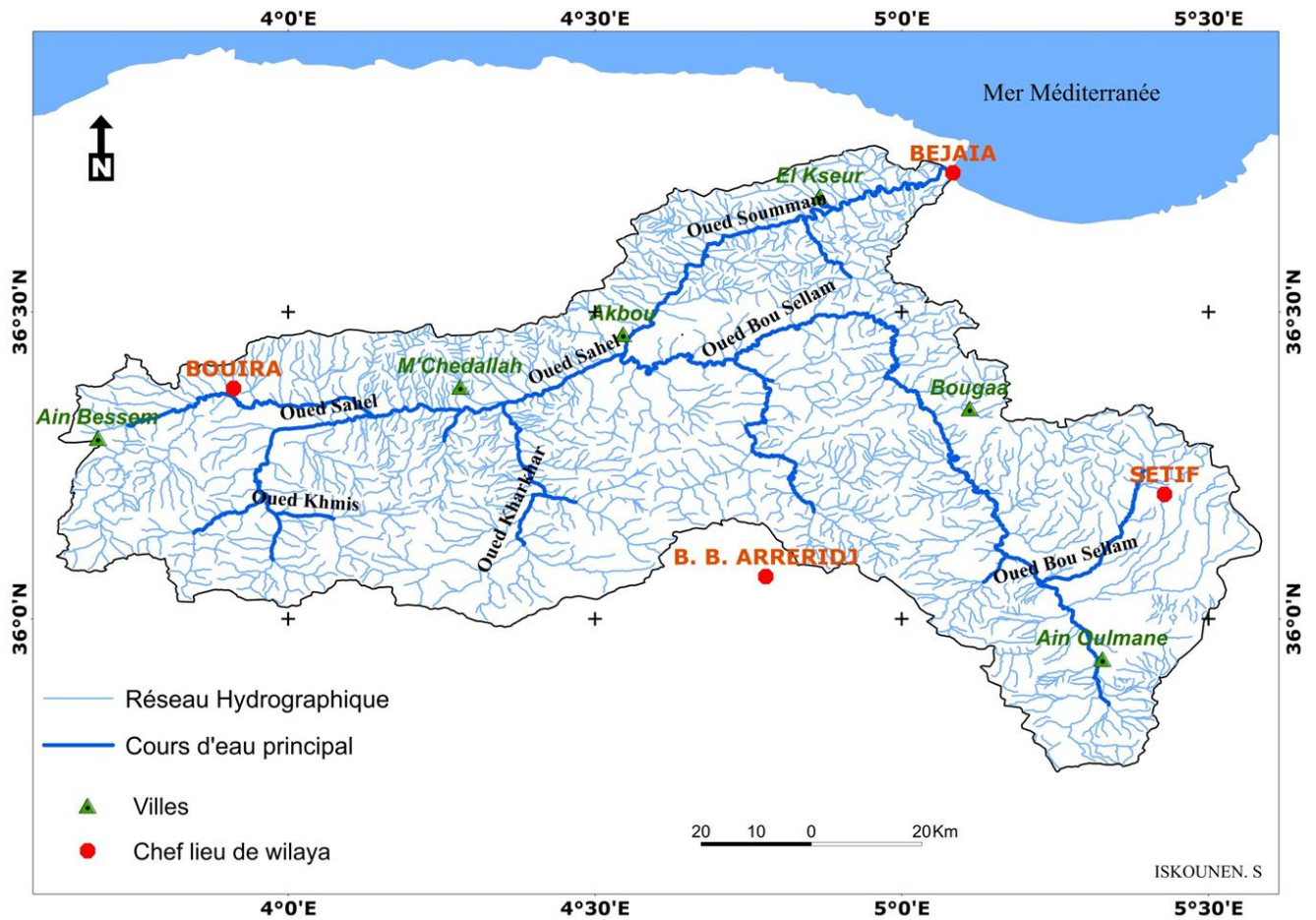


Fig. 08 : Le réseau hydrographique du bassin versant de la Soummam

Le réseau hydrographique est décomposé en différents ordres selon la méthode Strahler (1951). Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tab. 06 : Longueur des cours d'eaux de même ordre selon Strahler

Ordre des cours d'eau	1	2	3	4	5	6	Total
Longueur en (km)	3432	1155	568	239	199	102	5695

L'importance du réseau hydrographique d'ordres 1 et 2 reflète les caractéristiques d'un climat semi-aride et d'un écoulement temporaire lié directement aux averses.

#### - La densité de drainage

Le drainage du bassin est habituellement caractérisé par la densité de drainage, définie comme le rapport entre la longueur cumulée des drains du bassin et sa superficie,

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S}$$

Avec :

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

$L_i$  : longueur de cours d'eau [km];



$S$ : surface du bassin versant [ $\text{km}^2$ ],  
 On obtint  $Dd = 0,624 \text{ km/km}^2$ ,

Il est à noter que la densité de drainage dépend d'abord de l'échelle de la carte et de la résolution de l'image satellitale utilisée. Dans ce travail, nous avons utilisé l'image satellitale DEM de résolution 30m. Ainsi, le réseau hydrographique n'atteignant pas une certaine longueur ne sera pas perceptible par le satellite (SRTM). Seulement, la géologie (lithologie et structure), les caractéristiques topographiques du bassin versant et les conditions climatologiques et biogéographiques restent les facteurs déterminants de la densité de drainage. Cependant, plus la densité de drainage est élevée plus elle traduit l'existence de terrains imperméables favorisant le ruissellement.

En pratique, les valeurs de densité de drainage varient en moyenne de 2 et  $3\text{km/km}^2$ . Dans ce travail, la densité de drainage atteint uniquement  $0.62 \text{ km/km}^2$ . A notre avis, cette valeur est trop faible pour s'accommoder à la morphologie du bassin versant.

#### - Coefficient de torrentialité

Le coefficient de torrentialité est obtenu à l'aide de la relation suivante:

$$C_t = \frac{N_1}{S} \cdot D_d$$

$C_t$  : coefficient de torrentialité ;

$N_1$  : nombre de talwegs d'ordre 1;

$S$  : superficie du bassin en  $\text{Km}^2$

$D_d$  : densité de drainage en  $\text{km/km}^2$

On obtient  $C_t = 0,235$

Ce coefficient traduit l'importance des thalwegs d'ordre 1, ravineaux et ravines liées à un fort ruissellement.

Le tableau suivant récapitule les valeurs des différentes caractéristiques du réseau hydrographiques du bassin de la Soummam,

*Tab. 07 : Paramètres hydrographiques du bassin de la Soummam*

Paramètres	Valeurs
Classification du chevelu hydrographique	Ordre 6
Densité de drainage	$0,624 \text{ km / km}^2$
Densité hydrographique	$0,20 \text{ km}^{-2}$
Coefficient de Torrentialité	0,235

En fait, ces coefficients ne traduisent que des tendances moyennes supposant un bassin versant homogène, ce qui n'est pas le cas.

## 9 - Le cadre hydro-climatologique du bassin versant

### 9.1- Etude des précipitations

Le bassin versant de la Soummam est contrôlé par environ 65 stations pluviométriques dont la majorité fonctionne par intermittence. En effet, les lacunes peuvent atteindre plusieurs années au niveau de certaines stations. De ce fait, pour l'analyse des précipitations annuelles moyennes, nous avons utilisé la carte élaborée par l'ANRH (série 1969/2004).

Il est établi que la répartition des pluies en Algérie est influencée par deux groupes de facteurs, géographiques (éloignement par rapport à la mer, altitude et exposition des versants par rapport aux vents pluvieux du Nord-Ouest) et météorologiques (déplacement des masses d'air polaires et océaniques, froides et humides, des masses d'air tropicales, chaudes et humides, de l'Atlantique Sud et enfin des masses d'air tropicales continentales ou anticyclone saharien) influencent la répartition spatiale des précipitations mais aussi les structures des régimes pluviométriques (Chaumont M. et Paquin C., 1971 in Mebarki, 2004).

Le caractère d'irrégularité temporelle des précipitations est, par ailleurs, une donnée fondamentale du climat algérien. La carte pluviométrique de l'Algérie du Nord établie par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH, 2005), d'où nous avons extrait la partie couvrant le bassin versant de la Soummam (fig. 09), montre la pluie moyenne annuelle de la période 1969 – 2004. La lecture de cette carte permet les observations suivantes:

Les hauteurs de pluies les plus élevées dans la région sont enregistrées, hors du bassin, sur les hauteurs du Djurdjura à proximité de l'agglomération d'AZZAZGA à l'Ouest du bassin versant et sur les Babor occidentaux au niveau du sommet du Djebel Takoucht à l'Est du bassin versant de la Soummam.

Les hauteurs de pluies allant de 700 à 900mm apparaissent au niveau des hauteurs de Bejaia (Djebel Gouraya) et sur les sommets du flanc du Djurdjura parallèlement à la ligne de partage des eaux du bassin versant.

La zone entre Bejaia et Sidi Aiche, quoique d'altitude faible, en raison de sa proximité de la mer, elle bénéficie d'une tranche d'eau dépassant souvent les 600mm.

Au Sud du bassin versant, le sous bassin du Sahel reçoit une tranche d'eau allant de 250 à 450mm.

Le sous bassin de Boussellam reçoit, dans sa partie amont, des précipitations moyennes annuelles inférieures à 400 mm. Par contre, sa partie aval, est plus arrosée ; elle peut recevoir par endroit des hauteurs qui peuvent atteindre au même dépasser les 600mm.

Globalement, la répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles obéissent aux mêmes conditions qui régissent les précipitations au niveau du Nord de l'Algérie. Néanmoins, le déficit de précipitations au niveau du sous bassin du Sahel est dû à sa position d'abri par rapport au Djurdjura qui intercepte les masses d'air humides provenant du Nord-ouest (fig. 09).

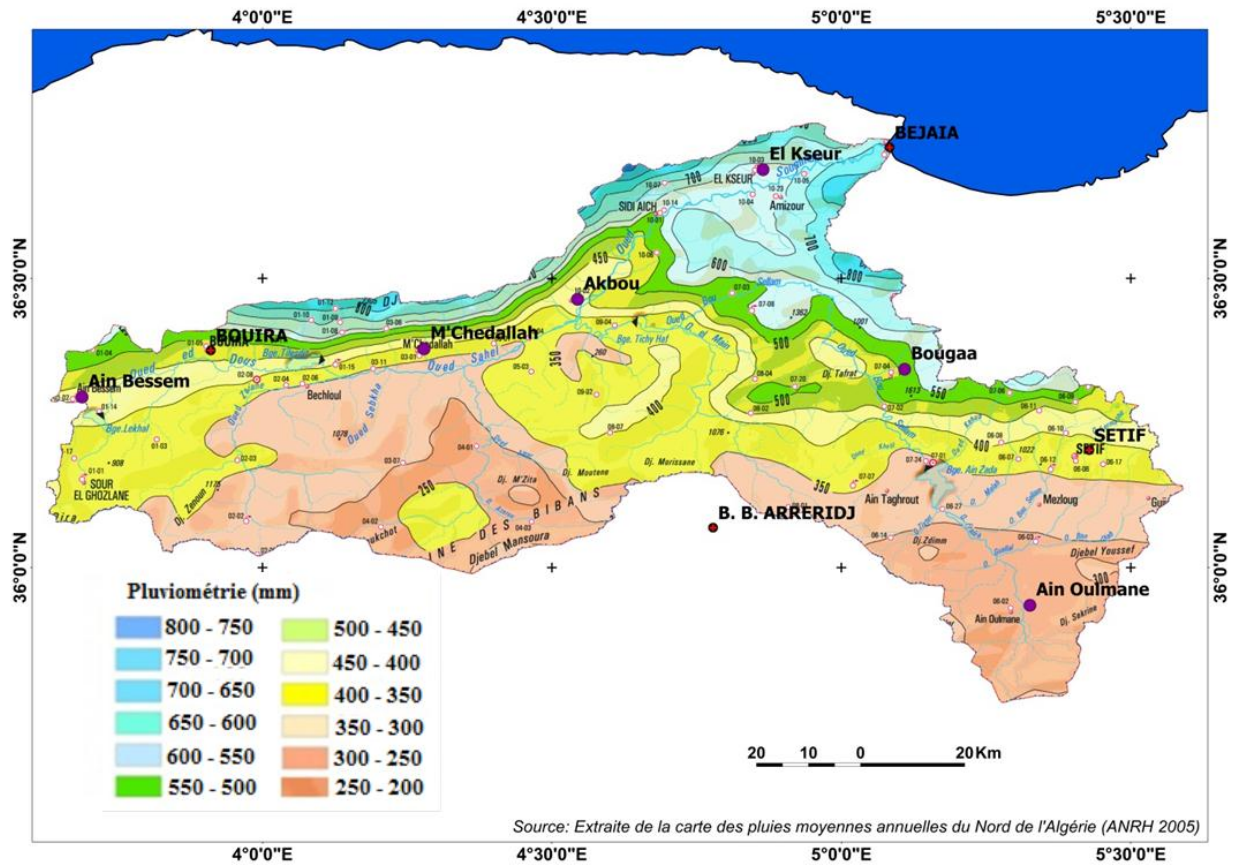


Fig. 09 : Carte des précipitations moyennes du bassin de la Soummam

Pour le présent travail nous avons choisi de présenter les mesures enregistrés aux les stations suivantes : Tifra, Aïn Arnat, Porte de fer et Aïn Bessam

## 9.2- Localisation des stations utilisées par l'étude

Le choix de présenter les données de ces stations a été fait par rapport à leurs emplacements dans le bassin versant et la qualité de leurs mesures (la continuité de la période de mesure et la longueur de cette dernière)



Fig.10 : Carte de localisation des stations pluviométriques

### 9.3- précipitations moyennes annuelles (séries 1980 / 2012)

Bien que la notion de la moyenne pluviométrique estompe la réalité des faits climatiques, notamment dans le 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. (BOUANANI. A. 2011)

Le tableau (08) récapitulant les moyennes annuelles des hauteurs de pluies (1980 / 2012), dans les stations retenues, confirme l'analyse émise plus haut. En effets, la station de TIFRA, située sur les hauteurs de Djurdjura, présente le maximum de précipitation dans le bassin versant. La station d'Ain Bessam, située dans la continuité de la vallée de la Soummam, bénéficie d'une pluviométrie plus importante (509,8mm) que les deux autres stations, en position d'abri (tab 08).

Tab. 08 : les moyennes annuelles des hauteurs de pluies en mm (1980/2012)

Année	Stations pluviométriques			
	TIFRA	AIN BESSAM	PORTE DE FER	AIN ARNAT
1979/1980	777,8	445,6	531	351,3
1980/1981	745,2	318,9	380,6	476,7
1981/1982	750,4	466,7	410,3	392,3
1982/1983	897,7	424,4	419,1	328,7
1983/1984	838	508,6	281,1	396,4
1984/1985	738,1	426,3	374,3	374
1985/1986	1054,9	417,6	369,2	488,7
1986/1987	825,9	413,2	222,7	375,2
1987/1988	878	454	261,9	417,6
1988/1989	808,9	345,6	236,2	293
1989/1990	661,8	555,6	257,7	285,8
1990/1991	709,7	369,7	282,1	402,5
1991/1992	831,4	404,1	281,6	304,7
1992/1993	766,2	587,2	231,3	183,4
1993/1994	989,8	365,1	160,4	285,3
1994/1995	945,1	591	215,4	381,5
1995/1996	995,7	458,9	219,5	207,2
1996/1997	1067,5	585,3	185	369,6
1997/1998	949,1	487,4	142,2	326
1998/1999	923,1	307	148,5	331,9
1999/2000	747,3	793,6	212,2	251,7
2000/2001	874,2	613,1	269,3	202,2
2001/2002	1158	438,8	233,9	573,7
2002/2003	819,1	584,6	267,5	380,9
2003/2004	893,5	699,1	442,7	362,9
2004/2005	833,6	423,9	402,1	364,5
2005/2006	717,4	392,9	208	438,1
2006/2007	830	443,5	478,2	341,2
2007/2008	884,8	287,8	253,5	445
2008/2009	854	859,1	280,3	405,7
2009/2010	744,5	621,8	320,3	363
2010/2011	749,8	553,4	286,3	337,7
2011/2012	789,3	573,2	505,1	389,6
<b>moyenne</b>	<b>847</b>	<b>509,8</b>	<b>296</b>	<b>352,6</b>

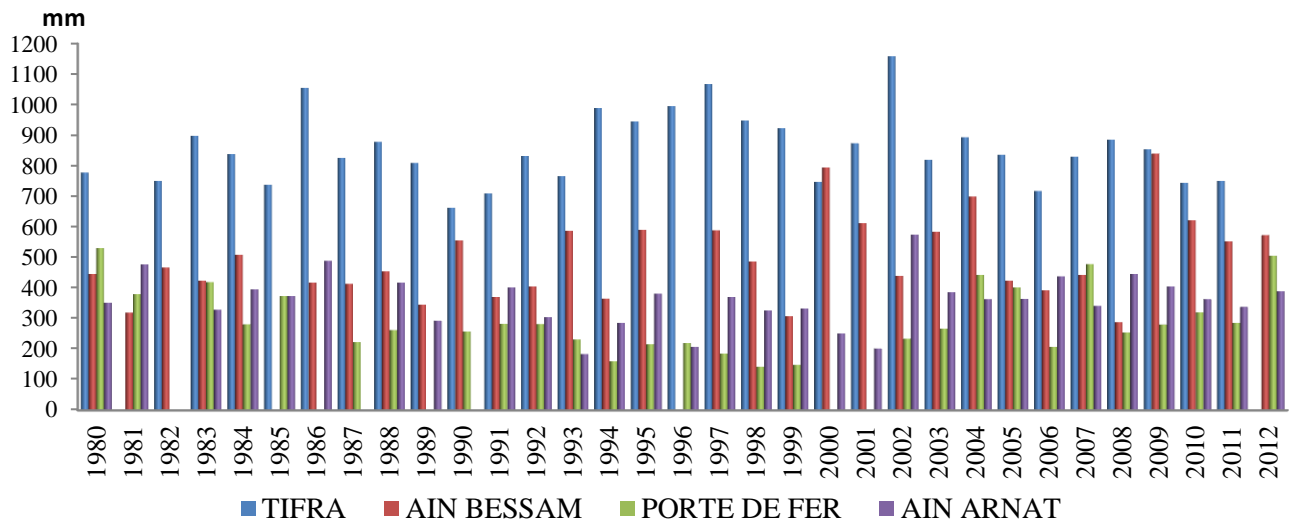


Fig. 11 : moyennes annuelles des précipitations (1980/2012)

Il est à noter que l'année 2001/2002 constitue le début d'une période humide qui a duré jusqu'à la fin de la série. Avant cette date (1980/2001) c'est plutôt la prédominance d'une période de sécheresse interrompue par quelques années humides. La longueur de la série ne permet pas de déceler les cycles climatiques habituellement admis dans le bassin méditerranéen. Aussi, les conséquences d'un probable changement climatique ne sont pas à écarter (Z. Nouacer 2017).

### 9.3.1- Analyse fréquentielle des précipitations annuelles.

Il est établi que la dispersion des valeurs enregistrées par une station conditionne le choix de la loi qui sera utilisée. Les précipitations annuelles, enregistrées dans le bassin versant de la Soummam, montrent très souvent des hauteurs proches de la moyenne, avec un minimum de dispersion (test) d'où le choix de la loi de Gauss. En effet, le modèle de distribution normale est bien adapté à la statistique des précipitations annuelles. Sur la base de la connaissance de la moyenne et de l'écart-type, nous pouvons déterminer les précipitations annuelles pour différentes fréquences au non-dépassement (année humide et année sèche) en appliquant l'équation de la variable réduite de Gauss (Laouamri. A. 2013):

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

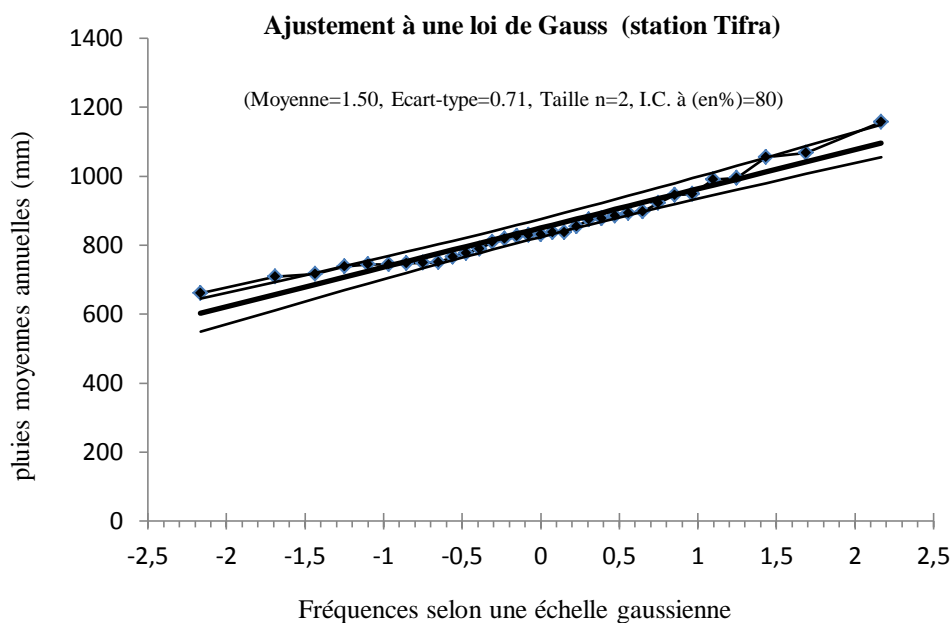
Avec :

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

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

P : moyenne des précipitations annuelles en mm ;

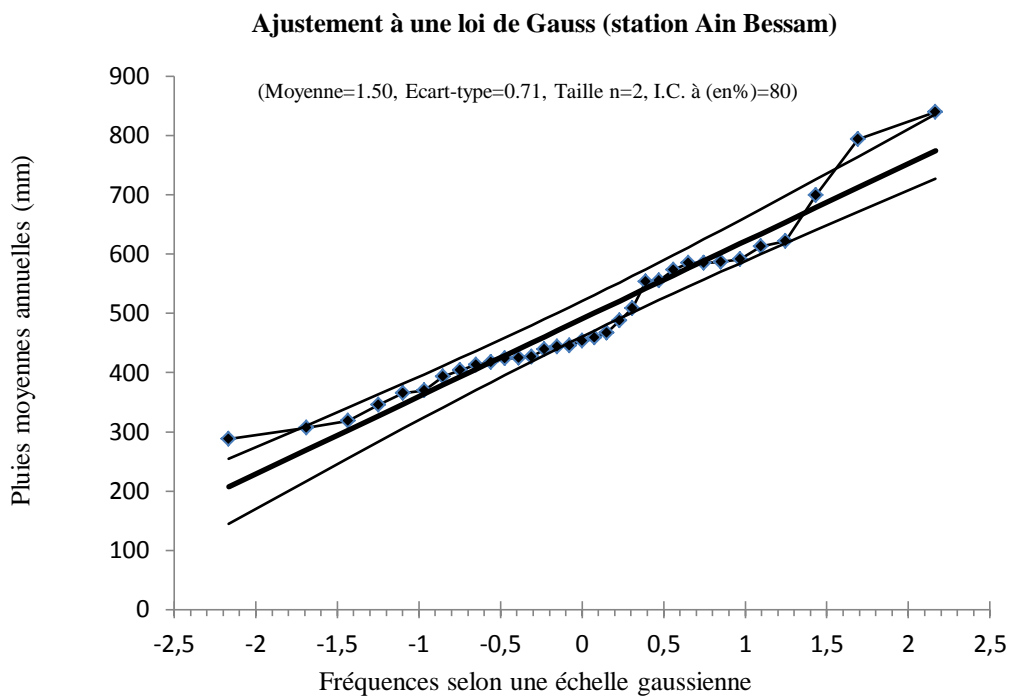
$\sigma P$  : écart-type des précipitations annuelles en mm



*Fig.12 : Ajustement à la loi de Gauss des précipitations annuelles de la station Tifra (période 1980/2012).*

*Tab.09 : Etude fréquentielle des précipitations moyennes annuelles de la station de Tifra (période 1980/2012).*

Station : Tifra													
	Période humide						moy	Période sèche					
<b>T (ans)</b>	1000	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100	1000
<b>fréquence</b>	0.999	0.99	0.98	0.95	0.9	0.8	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
<b>U Gauss</b>	3.09	2.33	2.04	1.64	1.28	0.84	00	-0.84	-1.28	-1.64	-2.04	-2.33	-3.09
<b>P (mm)</b>	1201	1115	1084	1037	995	945	850	754	704	663	616	585	498



*Fig.13 : Ajustement à la loi de Gauss des précipitations annuelles de la station Ain Bessam (période 1980/2012).*

*Tab. 10 : Etude fréquentielle des précipitations moyennes annuelles de la station d'Ain Bessam (période 1980/2012).*

Station : Ain Bessam													
	Période humide						moy	Période sèche					
<b>T (ans)</b>	1000	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100	1000
<b>fréquence</b>	0.999	0.99	0.98	0.95	0.9	0.8	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
<b>U Gauss</b>	3.09	2.33	2.04	1.64	1.28	0.84	00	-0.84	-1.28	-1.64	-2.04	-2.33	-3.09
<b>P (mm)</b>	895	795	759	706	658	601	490	380	322	275	221	186	86



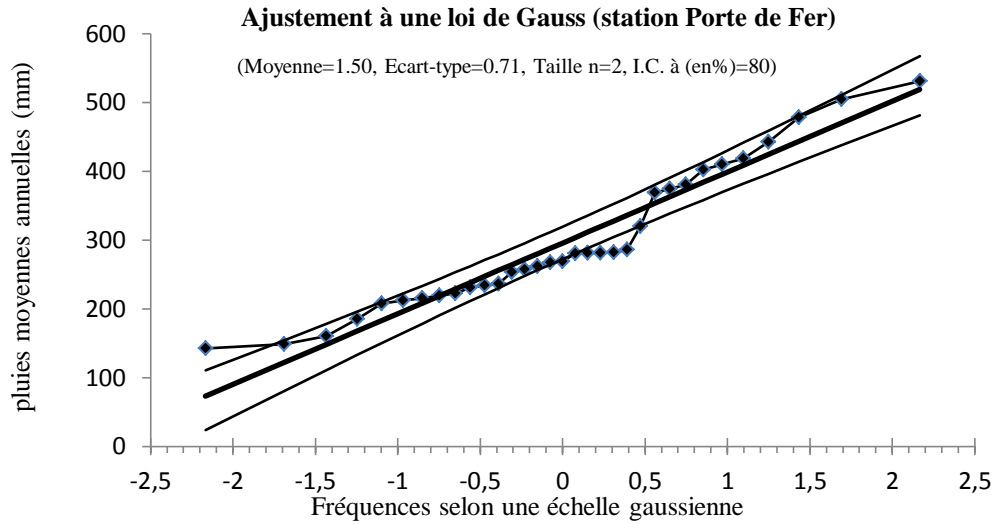


Fig.14 : Ajustement à la loi de Gauss des précipitations annuelles de la station Porte de Fer (période 1980/2012).

Tab. 10 : Etude fréquentielle des précipitations moyennes annuelles de la station de Porte de Fer (période 1980/2012).

Station : Porte de Fer													
	Période humide						moy	Période sèche					
T (an)	1000	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100	1000
fréquence	0.999	0.99	0.98	0.95	0.9	0.8	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
U Gauss	3.09	2.33	2.04	1.64	1.28	0.84	00	-0.84	-1.28	-1.64	-2.04	-2.33	-3.09
P (mm)	614	535	507	465	428	382	296	209	164	126	84	56	22

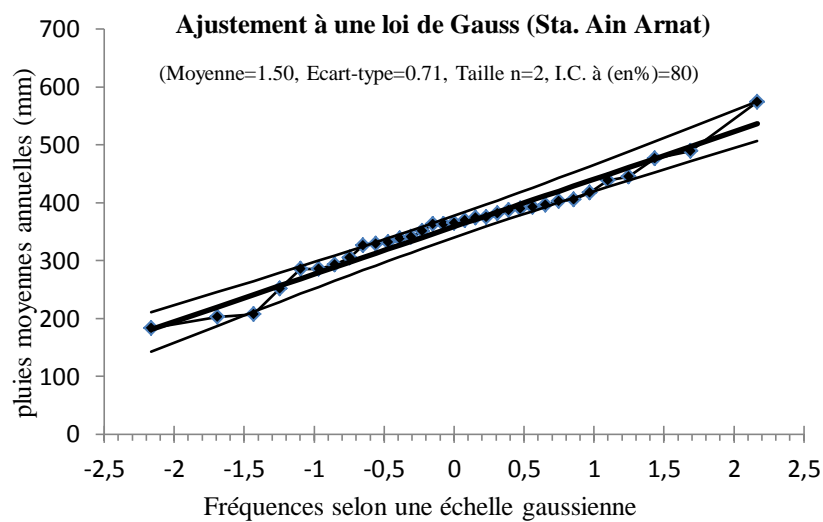


Fig.15 : Ajustement à la loi de Gauss des précipitations annuelles de la station Ain Arnat (période 1980/2012).

Tab. 11 : Etude fréquentielle des précipitations moyennes annuelles de la station de Ain Arnat (période 1980/2012).

Station : Ain Arnat													
	Période humide						moy	Période sèche					
<b>T (an)</b>	1000	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100	1000
<b>fréquence</b>	0.999	0.99	0.98	0.95	0.9	0.8	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
<b>U Gauss</b>	3.09	2.33	2.04	1.64	1.28	0.84	00	-0.84	-1.28	-1.64	-2.04	-2.33	-3.09
<b>P (mm)</b>	611	549	526	493	463	427	358	289	253	223	190	167	105

L'analyse fréquentielle des précipitations annuelles permet de montrer les hauteurs des précipitations selon les périodes humide et sèche et la période de retour dans chaque station. Les stations sous influence marines (Tifra et Ain Bassam) enregistrent durant les périodes humides des précipitations centennales qui dépassent les 1100 mm pour la station de Tifra, et peut atteindre les 800mm à la station de Ain Bessam (tab .08). Durant cette période, les stations occupent des étages bioclimatiques humides où le déficit en eau tend vers le minimum. Cette situation permet souvent un développement du couvert végétal important qui protège les sols de l'agressivité des pluies. Aussi, la céréaliculture est pratiquée sans stress hydrique. Néanmoins, la saturation du sol peut être à l'origine de déclenchements de mouvements de masses. Par contre, les périodes de sécheresse à la station d'Ain Bessam, placent la station dans l'étage semi-aride qui ne permet aucune culture céréalière sans irrigation. La dégradation du couvert végétal ne permet aucune protection efficace du sol. L'érosion par ravinement est largement favorisée.

Cependant, les stations de Porte de Fer et d'Ain Arnat, même durant les périodes humides, leurs précipitations annuelles centennales n'atteignent pas les 600mm. Elles ne permettent la pratique de la céréaliculture qu'au-delà d'une période de retour supérieure à 10 ans. Durant les périodes de sécheresses, l'aridité ne permet aucune culture extensive et la zone peut subir les effets d'un climat aride (tab10). Cette situation favorise l'agressivité des pluies et ne permet aucune protection du sol. Cependant, la répartition de ces précipitations sur l'année peut être suivie à travers l'analyse des précipitations mensuelles.

Tab. 12: Tableau récapitulatif des études fréquentielles des précipitations moyennes annuelles des 4 stations (période 1980/2012).

	Période humide						moy	Période sèche					
	1000	100	50	20	10	5		5	10	20	50	100	1000
<b>T (ans)</b>	1000	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100	1000
<b>fréquence</b>	0.999	0.99	0.98	0.95	0.9	0.8	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
<b>U Gauss</b>	3.09	2.33	2.04	1.64	1.28	0.84	00	-0.84	-1.28	-1.64	-2.04	-2.33	-3.09
<b>Ain Arnat</b>	611	549	526	493	463	427	358	289	253	223	190	167	105
<b>Porte de Fer</b>	614	535	507	465	428	382	296	209	164	126	84	56	22
<b>Ain Bessam</b>	895	795	759	706	658	601	490	380	322	275	221	186	86
<b>Tifra</b>	1201	1114	1083	1037	995	945	850	754	704	663	616	585	498

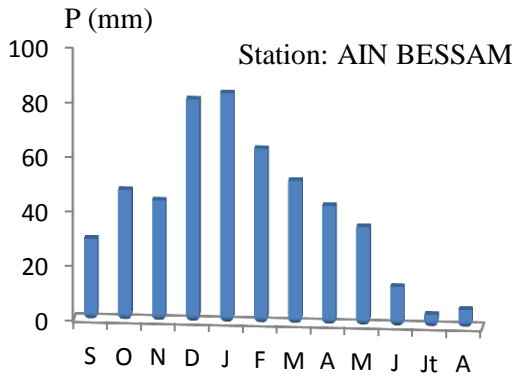
#### 9.4 - précipitations moyennes mensuelles (1980/ 2012)

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles (tab. 13) montre qu'après la saison sèche estivale, la saison des pluies débute dès le mois de septembre et se poursuit jusqu'au mois d'avril. La variabilité mensuelle exprime la prédominance des pluies hivernales. Le mois de décembre est particulièrement arrosé dans la partie nord de la Soummam (station de Tifra). Dans la partie amont du bassin, les pluies de janvier sont aussi importantes que celle de décembre (station Ain Bessam). Ailleurs, le mois de décembre reste le mois le plus humide (tab.13).

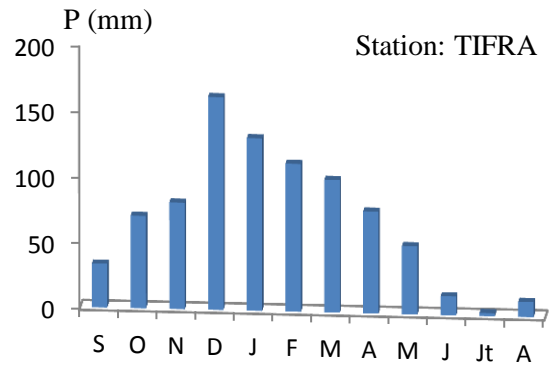
Tab. 13 : Précipitations moyennes mensuelles (1980/2012).

Station	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Année
<b>TIFRA</b>	33,2	70,1	80,8	161,6	131,1	112,2	100,8	77,4	51,8	14,3	2,3	11,4	<b>847</b>
<b>AIN ARNAT</b>	32,1	36,0	38,9	46,7	41,5	30,9	30,7	28,4	25,8	23,8	7,0	10,1	<b>352</b>
<b>PORTE DE FER</b>	24,2	29,1	32,6	43,2	40,0	29,7	27,2	25,8	22,9	11,0	4,4	5,6	<b>296</b>
<b>AIN BESSAM</b>	29,6	47,7	44,2	81,3	83,9	63,8	52,5	43,6	36,1	14,5	4,6	6,7	<b>509</b>

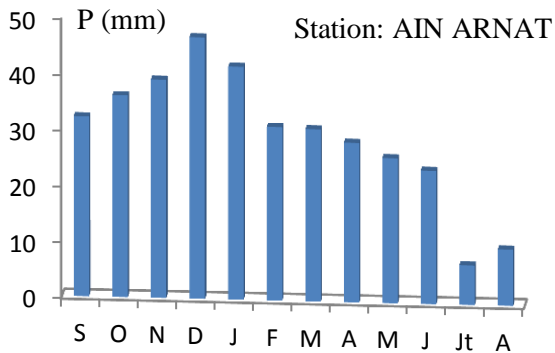
La lecture de la répartition temporelle des pluies mensuelles permet de constater que les stations de Tifra et d'Ain Bessam (sous influence maritime) ne reçoivent les pluies les plus abondantes qu'à partir du mois de décembre et de ce fait elles présentent des courbes de précipitations similaires. Par contre, les stations d'Ain Arnat et porte de Fer montrent des précipitations assez abondantes dès le mois d'octobre, avec une augmentation graduelle jusqu'au mois de janvier. Ainsi, ces deux stations peuvent être classées comme station de l'intérieur (fig.10).



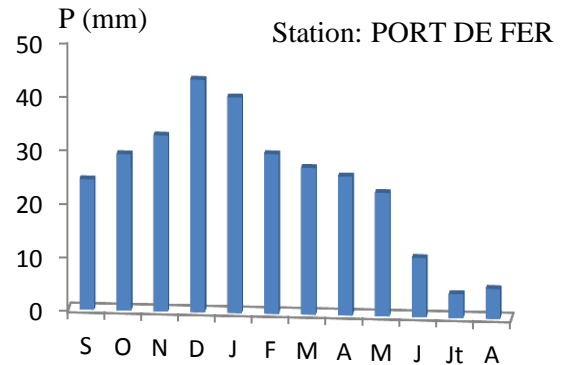
AIN BESSAM (1980 /2012)



TIFRA (1980 / 2012)



AIN ARNAT (1980/2012)



PORTE DE FER (1980 / 2012)

Fig. 16: représentation graphique des précipitations moyennes mensuelles (1980/2012).

#### 9.4.1- Analyse fréquentielle des précipitations mensuelles (1980/2012)

Nous présentons ci-dessous, les résultats de l'ajustement à la loi de Galton des précipitations mensuelles des 4 stations utilisée par l'étude.

Tab. 14 : Etude fréquentielle des précipitations moyennes mensuelles de la station de Tifra (période 1980/2012).

Station Tifra															
	T (an)	F	U	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juill	aou
Année sèche	100	0,01	-2,327	2,3	14,3	4,1	11,0	13,9	10,9	17,0	12,8	3,8	0,9	0,3	0,8
	50	0,02	-2,054	3,1	17,0	5,6	14,6	17,4	13,8	20,6	15,4	4,9	1,2	0,4	1,0
	10	0,1	-1,282	7,0	27,9	13,5	32,4	32,7	27,2	35,51	25,9	10,2	2,8	1,0	2,2
	2	0,5	0	26,1	63,2	57,0	121,4	93,1	83,9	87,26	61,2	34,6	12,0	4,2	7,3
Année humide	10	0,9	2,282	98,00	143,0	240,2	454,6	265,1	258,0	214,4	144,5	116,8	49,9	17,5	24,3
	50	0,98	3,054	217,0	234,1	571,3	1007,4	498,0	507,8	368,6	242,5	243,2	117,9	41,2	50,2
	100	0,99	2,327	287,3	278,5	775,7	1334,0	622,1	644,8	446,3	291,1	315,0	159,7	55,7	64,8

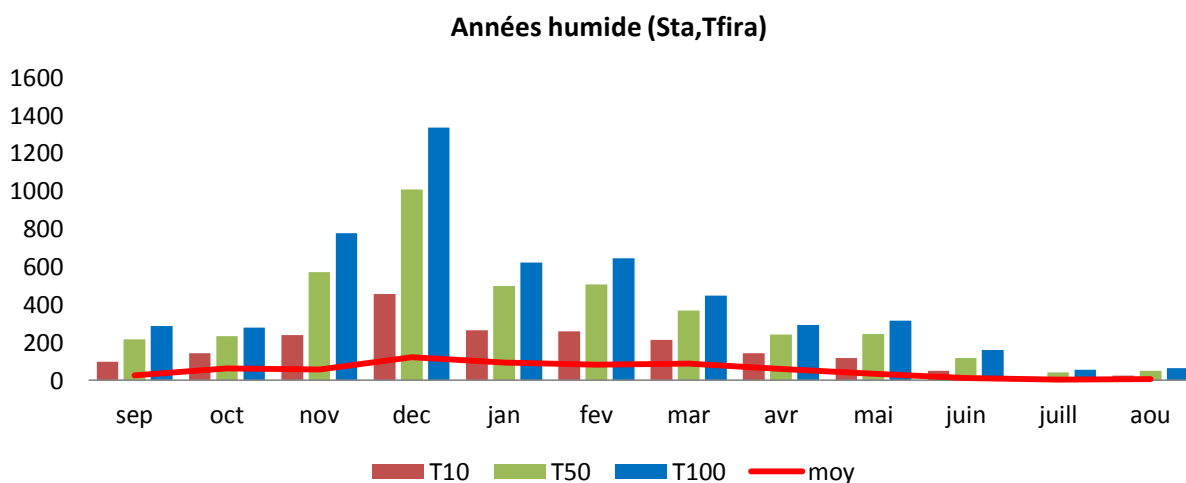
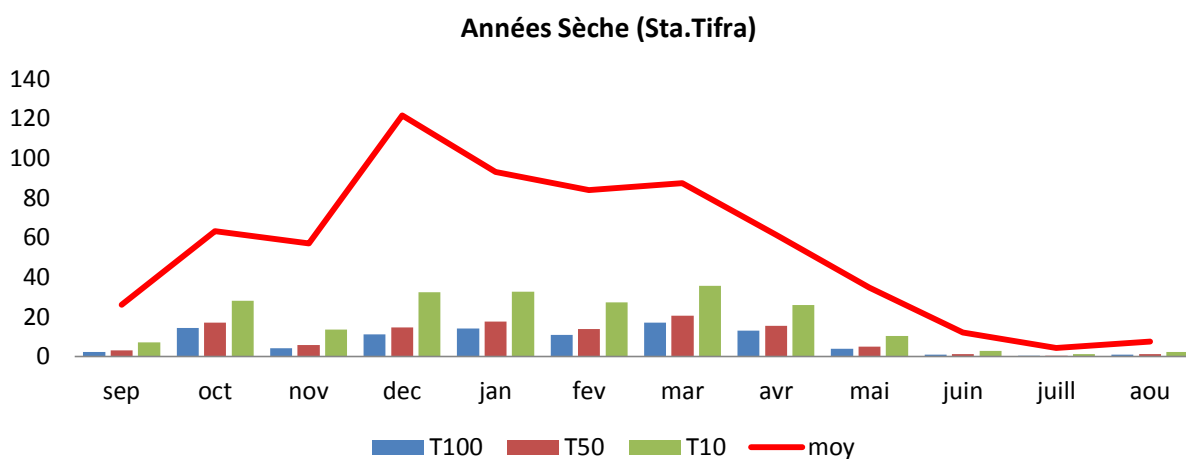


Fig. 17 : fréquences des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tifra (période 1980/2012)

Tab. 15 : Etude fréquentielle des précipitations moyennes mensuelles à la station d'Ain Arnat (période 1980/2012).

Station Ain Arnat															
T (an)	F	U	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juill	aou	
Année sèche	100	0,01	-2,327	1,2	1,7	1,8	1,4	1,7	2,2	2,2	3,5	1,0	0,8	0,3	0,4
	50	0,02	-2,054	1,5	2,1	2,2	1,9	2,3	2,7	2,6	4,2	1,3	1,1	0,4	0,5
	10	0,1	-1,282	3,2	3,6	3,9	3,7	3,7	4,5	4,4	6,7	3,0	2,2	1,0	1,3
	2	0,5	0	11,1	9,1	9,9	11,8	9,9	10,4	10,4	14,7	11,1	6,8	5,4	5,5
Année humide	10	0,9	2,282	37,74	22,5	25,1	36,8	26,0	23,9	24,3	32,2	40,9	21,0	27,3	22,6
	50	0,98	3,054	78,8	38,9	43,7	73,1	46,6	39,66	40,6	51,6	89,9	41,5	72,0	52,1
	100	0,99	2,327	102,1	47,2	53,2	93,1	57,3	47,3	48,6	60,9	118,6	52,7	101,3	70,2

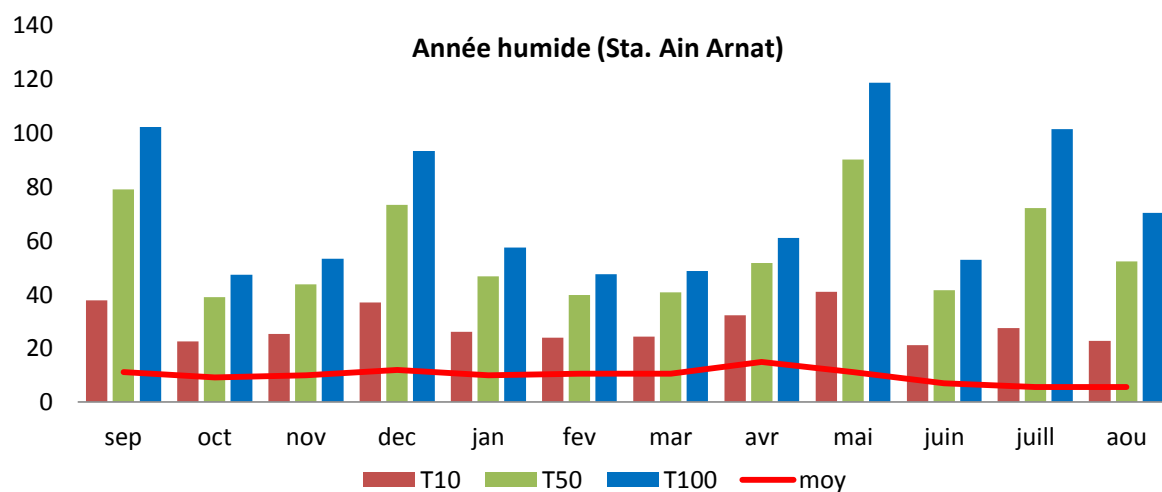
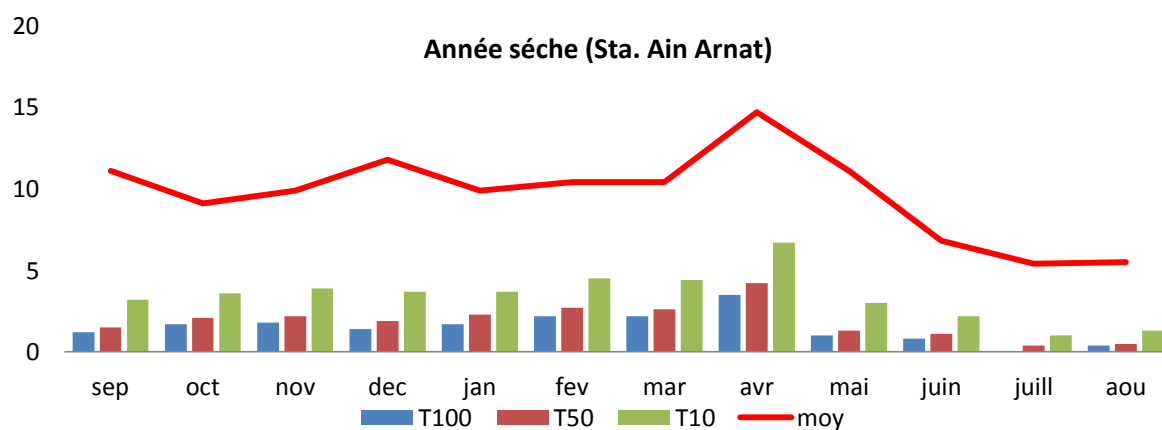


Fig. 18 : fréquences des précipitations moyennes mensuelles à la station d'Ain Arnat (période 1980/2012)

Tab. 16 : Etude fréquentielle des précipitations moyennes mensuelles à la station de Porte de Fer (période 1980/2012).

Station Porte de Fer															
T (ans)	F	U	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juill	aou	
Années sèche	100	0,01	-2,327	0,8	0,4	1,8	1,62	0,7	1,3	0,6	1,2	0,4	0,4	0,6	0,5
	50	0,02	-2,054	1,1	0,6	2,3	2,2	1,1	1,8	0,8	1,6	0,6	0,6	0,7	0,6
	10	0,1	-1,282	2,9	1,9	4,9	5,0	3,1	3,9	2,5	4,0	1,8	1,6	1,5	1,5
	2	0,5	0	14,1	11,6	16,7	19,5	16,9	14,7	14,5	17,5	11,8	8,4	4,5	5,6
Années humide	10	0,9	2,282	66,3	68,7	57,0	76,2	92,8	54,6	82,5	75,1	74,5	42,1	13,7	20,9
	50	0,98	3,054	168,6	199,9	119,5	173,0	258,3	120,3	235,3	180,	226,0	111,2	26,6	46,2
	100	0,99	2,327	234,4	291,4	155,1	231,1	370,7	158,9	340,6	246,3	334,3	156,7	33,7	61,0

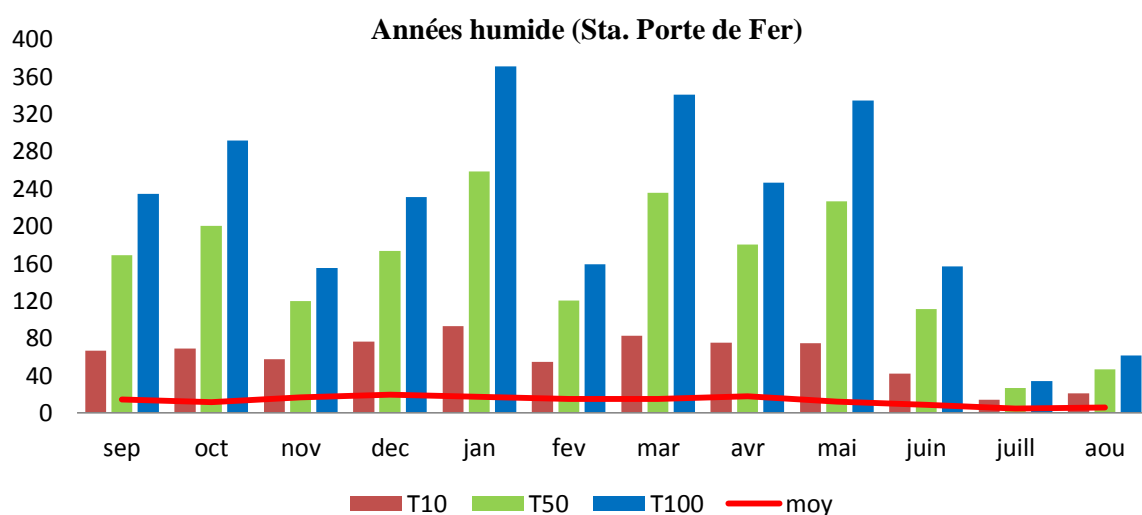
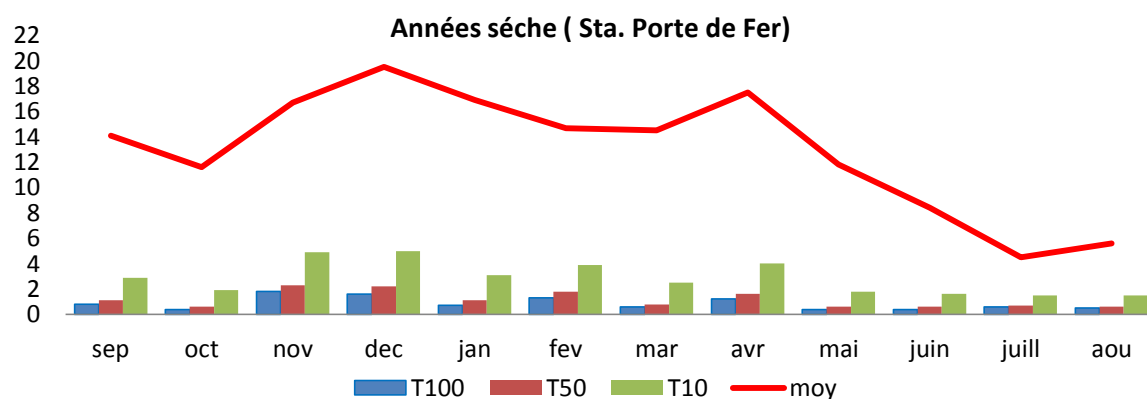


Fig. 19 : fréquences des précipitations moyennes mensuelles à la station de Porte de Fer (période 1980/2012)

Tab. 17 : Etude fréquentielle des précipitations moyennes mensuelles à la station d'Ain Bessam (période 1980/2012).

Station Ain Bessam															
T (ans)	F	U	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juill	aou	
Années sèche	100	0,01	-2,327	0,8	2,6	2,4	10,0	5,3	2,9	2,6	4,1	1,2	0,5	0,6	1,3
	50	0,02	-2,054	1,2	3,5	3,2	12,5	7,0	3,9	3,5	5,4	1,7	0,7	0,8	1,6
	10	0,1	-1,282	3,2	7,9	7,5	23,3	15,8	8,9	8,0	11,8	4,3	1,9	1,7	3,1
	2	0,5	0	17,2	30,9	30,28	65,6	60,3	34,7	31,5	42,8	20,8	9,5	6,3	8,9
Années humide	10	0,9	2,282	90,5	120,6	122,1	184,3	230,0	134,2	124,0	154,3	99,4	46,9	22,5	25,8
	50	0,98	3,054	246,1	273,8	282,8	343,4	515,4	303,2	283,1	334,0	254,9	122,7	48,3	48,8
	100	0,99	2,327	350,3	365,6	380,5	427,8	685,2	404,3	378,9	438,7	355,4	172,3	63,3	61,1

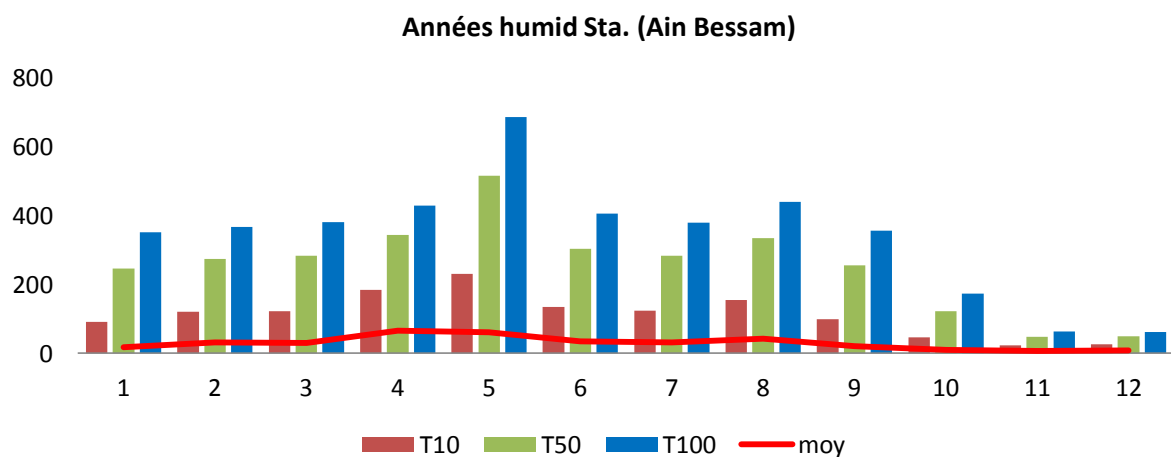
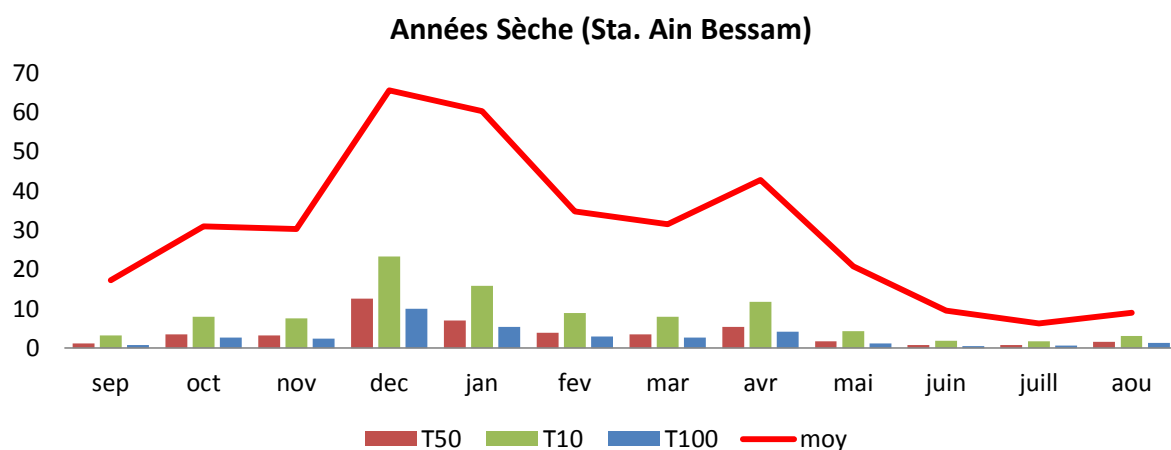


Fig. 20 : fréquences des précipitations moyennes mensuelles à la station d'Ain Bessam (période 1980/2012)



Tab.18 : Tableau récapitulative des études fréquentielles des précipitations moyennes mensuelles des 4 stations de (période 1980/2012).

		T (ans)	F	U	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juill	aou
Station Ain Bessam	Années sèche	100	0,01	-2,327	0,8	2,6	2,4	10,0	5,3	2,9	2,6	4,1	1,2	0,5	0,6	1,3
		50	0,02	-2,054	1,2	3,5	3,2	12,5	7,0	3,9	3,5	5,4	1,7	0,7	0,8	1,6
		10	0,1	-1,282	3,2	7,9	7,5	23,3	15,8	8,9	8,0	11,8	4,3	1,9	1,7	3,1
		2	0,5	0	17,2	30,9	30,28	65,6	60,3	34,7	31,5	42,8	20,8	9,5	6,3	8,9
	Années humide	10	0,9	2,282	90,5	120,6	122,1	184,3	230,0	134,2	124,0	154,3	99,4	46,9	22,5	25,8
		50	0,98	3,054	246,1	273,8	282,8	343,4	515,4	303,2	283,1	334,0	254,9	122,7	48,3	48,8
100		0,99	2,327	350,3	365,6	380,5	427,8	685,2	404,3	378,9	438,7	355,4	172,3	63,3	61,1	
Station Porte de Fer	Années sèche	100	0,01	-2,327	0,8	0,4	1,8	1,62	0,7	1,3	0,6	1,2	0,4	0,4	0,6	0,5
		50	0,02	-2,054	1,1	0,6	2,3	2,2	1,1	1,8	0,8	1,6	0,6	0,6	0,7	0,6
		10	0,1	-1,282	2,9	1,9	4,9	5,0	3,1	3,9	2,5	4,0	1,8	1,6	1,5	1,5
		2	0,5	0	14,1	11,6	16,7	19,5	16,9	14,7	14,5	17,5	11,8	8,4	4,5	5,6
	Années humide	10	0,9	2,282	66,3	68,7	57,0	76,2	92,8	54,6	82,5	75,1	74,5	42,1	13,7	20,9
		50	0,98	3,054	168,6	199,9	119,5	173,0	258,3	120,3	235,3	180,	226,0	111,2	26,6	46,2
100		0,99	2,327	234,4	291,4	155,1	231,1	370,7	158,9	340,6	246,3	334,3	156,7	33,7	61,0	
Station Ain Arnat	Années sèche	100	0,01	-2,327	1,2	1,7	1,8	1,4	1,7	2,2	2,2	3,5	1,0	0,8	0,3	0,4
		50	0,02	-2,054	1,5	2,1	2,2	1,9	2,3	2,7	2,6	4,2	1,3	1,1	0,4	0,5
		10	0,1	-1,282	3,2	3,6	3,9	3,7	3,7	4,5	4,4	6,7	3,0	2,2	1,0	1,3
		2	0,5	0	11,1	9,1	9,9	11,8	9,9	10,4	10,4	14,7	11,1	6,8	5,4	5,5
	Années humide	10	0,9	2,282	37,74	22,5	25,1	36,8	26,0	23,9	24,3	32,2	40,9	21,0	27,3	22,6
		50	0,98	3,054	78,8	38,9	43,7	73,1	46,6	39,66	40,6	51,6	89,9	41,5	72,0	52,1
100		0,99	2,327	102,1	47,2	53,2	93,1	57,3	47,3	48,6	60,9	118,6	52,7	101,3	70,2	
Station Tiffa	Années sèche	100	0,01	-2,327	2,3	14,3	4,1	11,0	13,9	10,9	17,0	12,8	3,8	0,9	0,3	0,8
		50	0,02	-2,054	3,1	17,0	5,6	14,6	17,4	13,8	20,6	15,4	4,9	1,2	0,4	1,0
		10	0,1	-1,282	7,0	27,9	13,5	32,4	32,7	27,2	35,51	25,9	10,2	2,8	1,0	2,2
		2	0,5	0	26,1	63,2	57,0	121,4	93,1	83,9	87,26	61,2	34,6	12,0	4,2	7,3
	Années humide	10	0,9	2,282	98,00	143,0	240,2	454,6	265,1	258,0	214,4	144,5	116,8	49,9	17,5	24,3
		50	0,98	3,054	217,0	234,1	571,3	1007,4	498,0	507,8	368,6	242,5	243,2	117,9	41,2	50,2
100		0,99	2,327	287,3	278,5	775,7	1334,0	622,1	644,8	446,3	291,1	315,0	159,7	55,7	64,8	

L'application de la loi de Galton aux mesures de précipitations mensuelles des quatre stations a permis des résultats qui sont récapitulés dans le tableau (tab.18). Ces résultats montrent, selon la période de retour, sèche ou humide, la participation de chaque mois aux précipitations moyennes annuelles de chaque station (tab13). Les périodes sèches, quel que soit leurs périodes de retour, montrent une participation très faible pour les mois d'automne. Elle oscille entre 4 et 10mm (période de retour 100 ans) pour le mois de septembre pour toutes les stations. Durant les périodes humides, chaque mois de la période automnale peut enregistrer des hauteurs dépassant les 80% de la moyenne annuelle. Ces pluies peuvent être enregistrées en 2 ou 3 événements (pluies torrentielles). Ainsi, l'étude fréquentielle montre une variabilité importante des pluies entraînant une fragilité du milieu durant les périodes sèches et une érosion hydrique importante due à l'agressivité des pluies.

Les mois de la saison hivernale enregistrent durant les périodes sèches des hauteurs de pluie très faibles. En effet, même les stations sous influence marine enregistrent des hauteurs ne dépassant pas 40mm. Par contre, les périodes humides peuvent connaître des précipitations mensuelles au moins égales à la moyenne annuelle (Ain Arnat, Porte de Fer). Les stations de Tifra et Ain Bessam, quel que soit la période de retour, les mois restent largement inférieurs aux précipitations moyennes annuelles, sauf le mois de décembre qui atteint pour la période de retour 100 ans, la hauteur de 1330 mm dépassant ainsi la moyenne annuelle qui est de 853mm (tab13). Enfin, nous remarquons que les stations enregistrant des moyennes annuelles faibles (Porte de Fer et Ain Arnat) montrent une variabilité très importante, au point que certains mois enregistrent, pour les faibles fréquences, des hauteurs supérieures à la moyenne annuelle. Par contre, les stations enregistrant des moyennes annuelles importantes (Tifra et Ain Bessam) montrent une variabilité plus faible d'où des hauteurs mensuelles largement inférieures à la moyenne annuelle (tab13).

### **9.5 - Précipitations moyennes saisonnières (1980 / 2012)**

L'analyse des précipitations moyennes saisonnières des stations de TIFRA, AIN ARNAT, PORTE DE FER et AIN BESSAM confirme les caractéristiques qui apparaissent déjà aux échelles annuelle et mensuelle. En effet, les deux stations sous influence marine (Tifra et Ain Bessam) montrent une participation similaire des saisons avec un ordre constant (HPAE), où l'hiver participe avec, au moins, 45% de la pluviométrie moyenne annuelle, le printemps autour de 1/3 et l'automne avec 1/4 d'où une participation de l'été ne dépassant pas les 5% du total annuel (fig.21). Par contre, les deux autres stations (Ain Arnat et Porte de Fer) montre un ordre de l'apport des saisons différent (HAPE). Cependant, la participation de la saison printanière reste la même dans toutes les stations (environ 1/4 du total annuel). La différence réside dans le fait que l'apport de l'automne est très proche de celui de l'hiver. Néanmoins, l'apport de l'été est loin d'être négligeable, car il peut atteindre 12% des précipitations annuelles (fig. 21).

Tab.19 : précipitation moyennes saisonnier

Station	Automne	Hiver	Printemps	Eté
TIFRA	184,1	404,9	230	28
AIN ARNAT	107	119,1	84,9	40,9
PORTE DE FER	85,9	112,9	75,9	21
AIN BESSAM	121,5	229	132,2	25,8

Cette analyse nous permet de constater que l'apport de l'automne reste important sur une bonne partie du bassin versant et particulièrement dans les zones représentées par les stations de Porte de Fer et Ain Arnat où les précipitations annuelles oscillent entre 352 et 296 mm/an. Cette pluviométrie (étage semi-aride) ne favorise pas l'entretien d'un couvert végétal dense et permanent qui protège les sols de l'agressivité des averses (torrentielles) automnales.

L'apport de l'hiver, particulièrement dans les zones sous influence marine, est très important. Il peut dépasser les 45% des précipitations moyennes annuelles. Avec le cumul de l'apport printanier, le sol est saturé durant des mois (jusqu'à la fin du printemps). Durant cette période, la vulnérabilité du sol aux mouvements de masse est très élevée. Cette situation peut s'accroître lors des secousses telluriques (voir cadre structural).

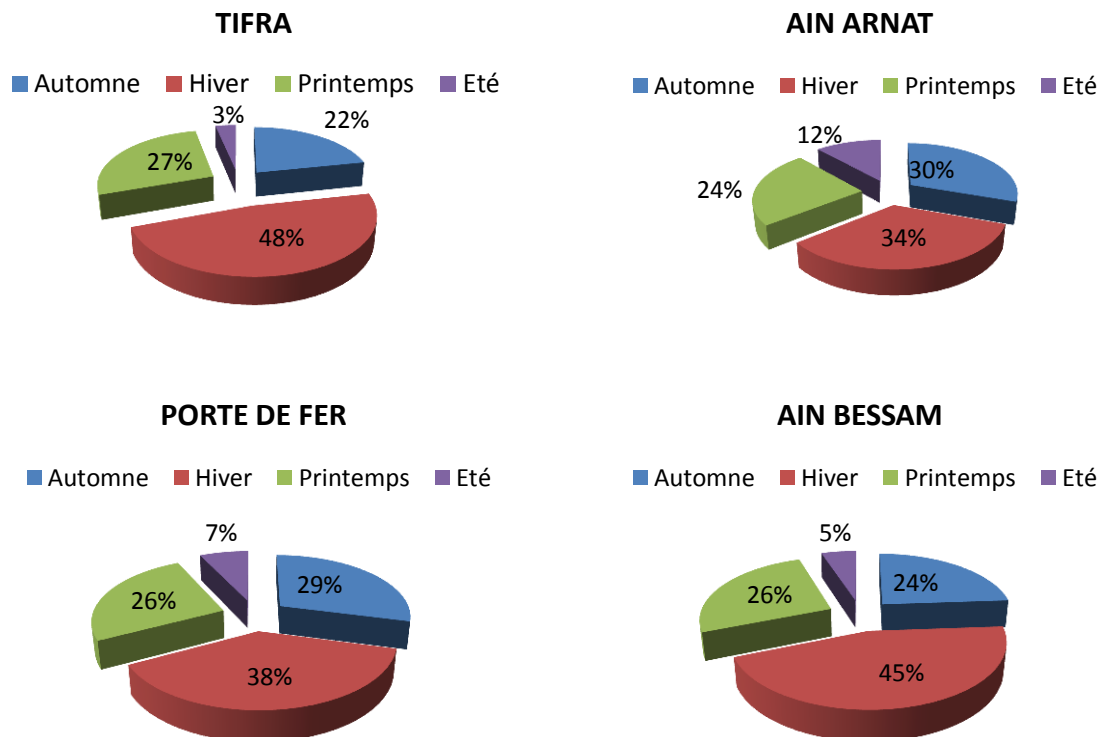


Fig. 21 : Répartition par pourcentage des précipitations saisonnières

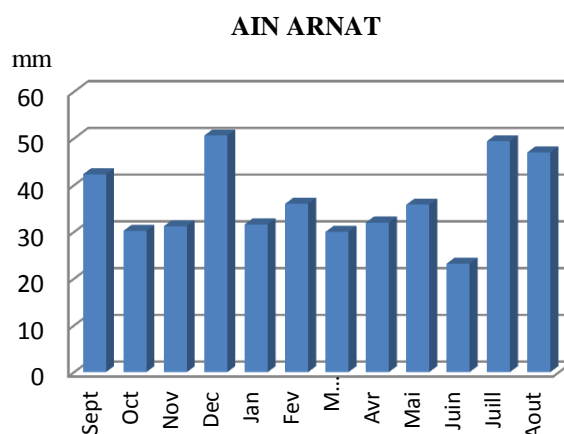
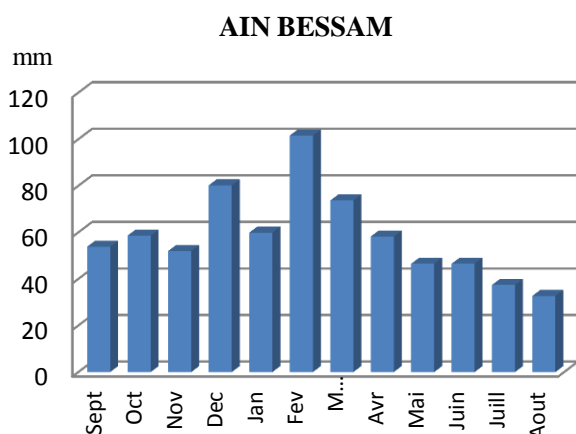
## 9.6 - Les pluies journalières maximales

Les pluies journalières maximales sont souvent à l'origine de dégâts importants dans la vallée de la Soummam. Les données des quatre stations représentatives (TIFRA, AIN ARNAT, PORTE DE FER, AIN BESSAM) permet de suivre la répartition des pluies journalières maximales (PJmax) à travers le bassin versant durant la période 1980/2012. le tableau 20 récapitule les enregistrements des quatre stations.

Tab. 20 : pluies journalières maximales

STATION	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Hauteur maximum
<b>TIFRA</b>	52	78.9	79	102.2	97.1	70.4	111	51	60.4	24.6	12.5	16.4	<b>102.2</b>
<b>AIN ARNAT</b>	42.3	30.2	31.2	50.6	31.6	36	30	32	35.8	23.2	49.4	47	<b>50.6</b>
<b>PORTE DE FER</b>	43.5	48	38.4	27.1	43.4	31.5	41	58.6	35.6	72	23.1	16.8	<b>72</b>
<b>AIN BESSAM</b>	53.8	58.6	52	80.2	59.9	101.6	73.7	58.2	46.5	46.5	37.4	32.7	<b>101.6</b>

Le tableau 20, montre que les hauteurs maximum des pluies journalières des quatre stations sont enregistrées dans des mois déferents, pour la station de TIFRA et AIN ARNAT la hauteur maximal est enregistrée au mois de mars et décembre respectivement. Par contre, les stations PORTE DE FER et AIN BESSAM la hauteur maximum est enregistrée au mois de juin et février respectivement.



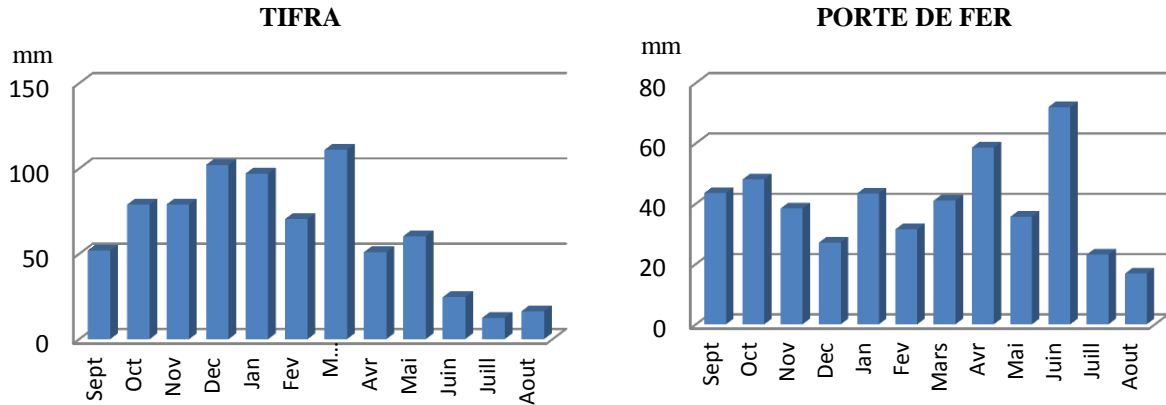


Fig. 22 : les graphes des précipitations maximum journalières

A la station de TIFRA où l'influence maritime est très importante, les pluies maximum journalières qui dépassent les 80mm/jour sont enregistrées pratiquement du début de l'automne jusqu'à la fin du printemps.

### 9.6.1- Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales

Il est établi que la dispersion des données journalières implique l'utilisation de la loi Gumbel. Les résultats représentés par les graphes Fig.23, Fig.24, Fig.25 et Fig.26 sont récapitulés dans le tableau 25

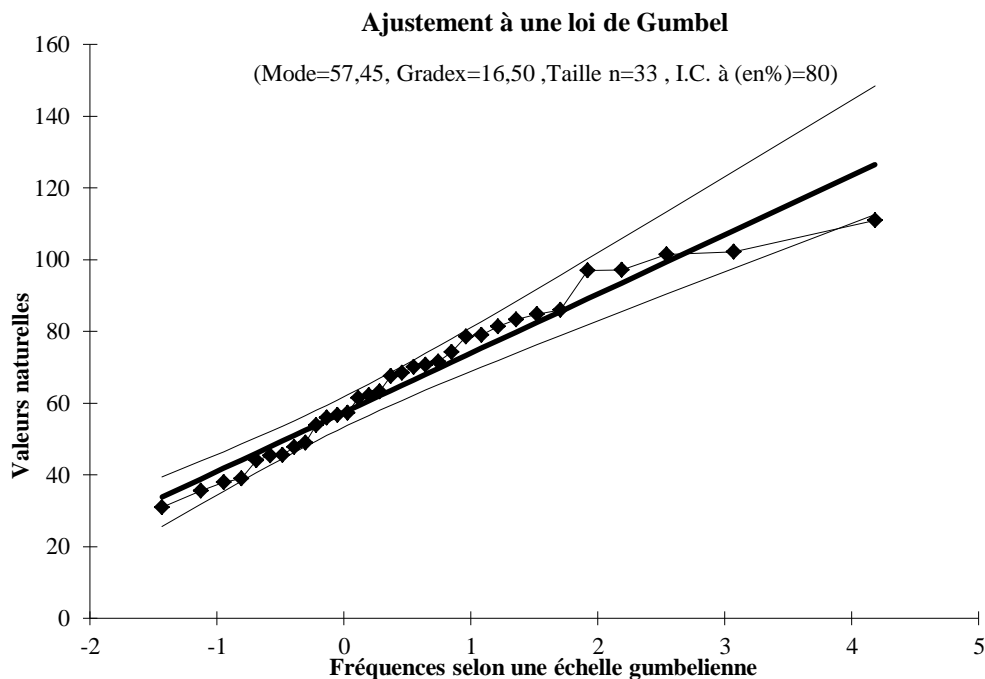


Fig.23 : Ajustement à la loi de Gumbel des précipitations journalières maximales de la station de Tifra (période 1980/2012).

Tab. 21 : Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales à la station de Tifra (période 1980/2012).

Station : Tifra						
Période de retour (ans)	2	5	10	50	100	1000
Fréquence	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
Variable de Gumbel	0,37	2,25	2,97	3,90	4,60	6,91
PJ max (mm)	63	94	106	121	133	171

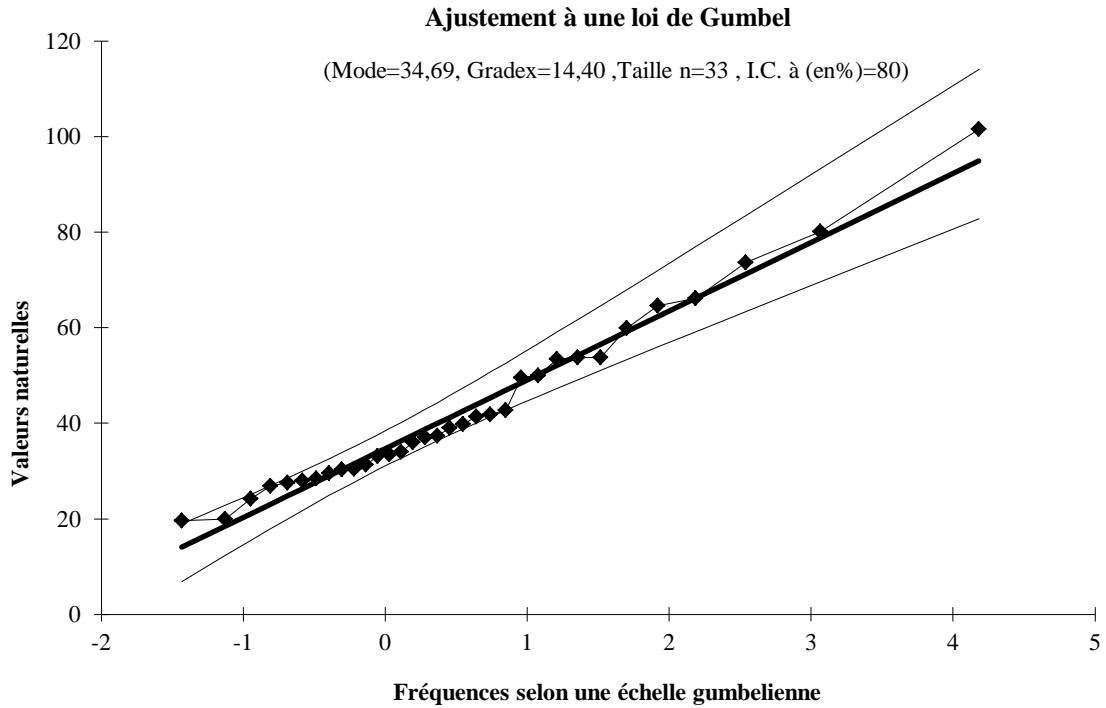


Fig.24 : Ajustement à la loi de Gumbel des précipitations journalières maximales à la station d'Ain Bessam (période 1980/2012).

Tab. 22: Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales à la station d'Ain Bessam (période 1980/2012).

Station : Ain Bessam						
Période de retour (ans)	2	5	10	50	100	1000
Fréquence	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
Variable de Gumbel	0,37	2,25	2,97	3,90	4,60	6,91
PJ max (mm)	39	67	77	90	100	134

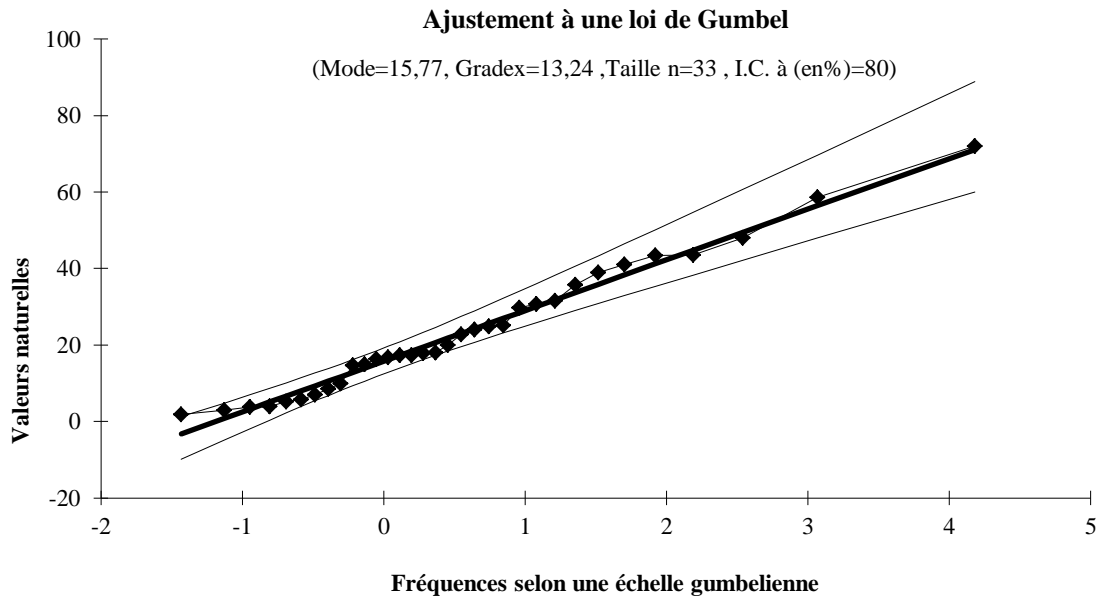


Fig.25 : Ajustement à la loi de Gumbel des précipitations journalières maximales à la station d'Ain Arnat (période 1980/2012).

Tab. 23 : Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales à la station d'Ain Arnat (période 1980/2012).

Station : Ain Arnat						
<b>Période de retour (ans)</b>	2	5	10	50	100	1000
<b>Fréquence</b>	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
<b>Variable de Gumbel</b>	0,37	2,25	2,97	3,90	4,60	6,91
<b>PJ max (mm)</b>	29	45	55	67	76	107

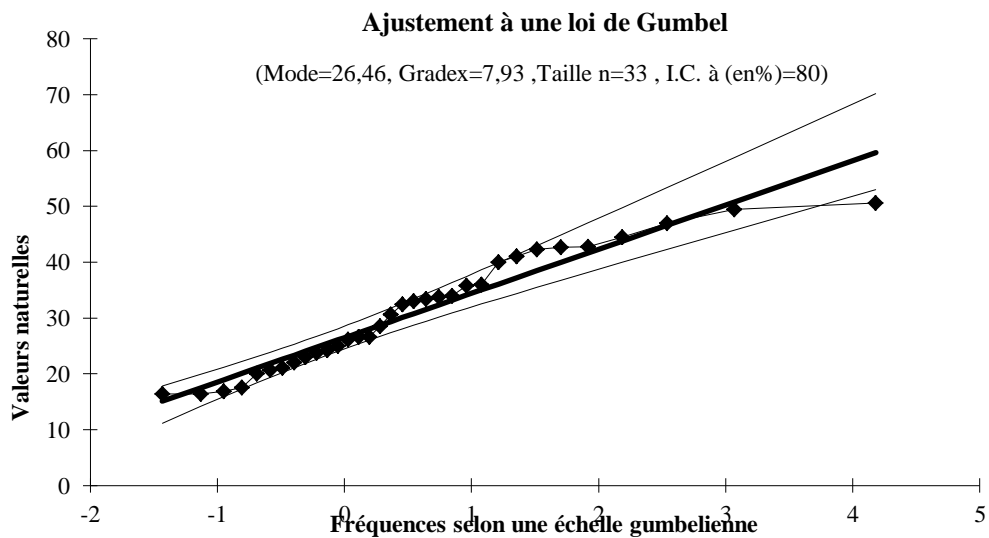


Fig.26 : Ajustement à la loi de Gumbel des précipitations journalières maximales à la station de Porte de Fer (période 1980/2012).

Tab. 24 : Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales à la station de Porte de Fer (période 1980/2012).

	<b>Station : Porte de Fer</b>					
<b>Période de retour (ans)</b>	2	5	10	50	100	1000
<b>Fréquence</b>	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
<b>Variable de Gumbel</b>	0,37	2,25	2,97	3,90	4,60	6,91
<b>PJ max (mm)</b>	20	44	49	57	62	81

Tab.25 : Tableau récapitulative des fréquentielles des précipitations journalières maximales des 4 stations (période 1980/2012).

	<b>précipitations journalières maximales</b>					
<b>Période de retour (ans)</b>	2	5	10	50	100	1000
<b>Fréquence</b>	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
<b>Variable de Gumbel</b>	0,37	2,25	2,97	3,90	4,60	6,91
<b>Tifra (mm)</b>	63	94	106	121	133	171
<b>max Ain Bessam (mm)</b>	39	67	77	90	100	134
<b>Ain Arnat (mm)</b>	20	45	55	67	76	107
<b>Porte de Fer (mm)</b>	29	44	49	57	62	81

La lecture du tableau 25 permet de constater qu'il existe une proportionnalité entre la pluie moyenne annuelle et la pluie journalière maximale. Aussi, la variabilité augmente avec la faiblesse des précipitations moyennes annuelles. En effet, la série de la station de Porte de Fer (pluie moyenne annuelle 296mm) renferme les PJmax des plus longues périodes de retour. Par contre, la série de la station de Tifra qui enregistre des précipitations moyennes annuelles égales à 850,9mm, renferme les périodes de retour les plus courtes (tab21). En effet, la faiblesse des précipitations a pour conséquence l'augmentation de la variabilité d'où l'enregistrement des PJmax plus que Bicentennales à la station de Porte de Fer et uniquement vingtennales à la station de Tifra (tab24.). Faute de données pour construire des courbes IDF (intensité-durée-fréquence), nous estimons que les hauteurs des PJmax de périodes de retour supérieures à 10 ans (Tifra : 106mm, Ain Bessam : 77mm), peuvent engendrer des crues violentes et avoir une agressivité suffisante pour provoquer une érosion importante.

### 9.7- Températures

La série (2004/2014) commune à toutes les stations situées à l'intérieur du bassin de la Soummam nous a permis de retenir 4 stations en l'occurrence les stations de Bejaia, Akbou, Bouira et Sétif. Leur répartition à travers le bassin est satisfaisante. Les stations de Bejaia, Akbou et Bouira contrôlent la vallée de la Soummam. Par contre, la station de Sétif représente les hautes plaines sétifiennes. Les données disponibles sont essentiellement les températures moyennes (max. min.) mensuelles et annuelles (Fig. 29).



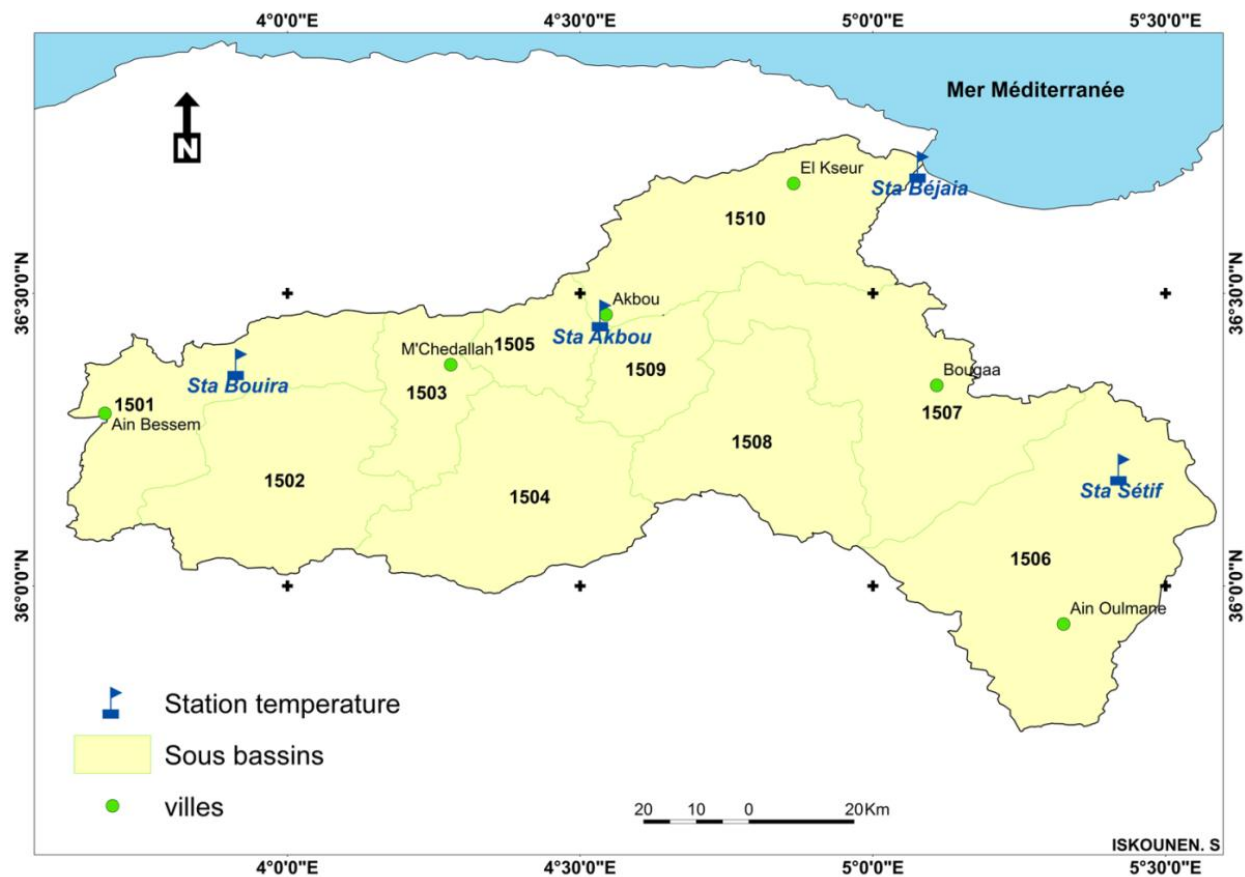


Fig. 27 : localisation des stations climatiques

Tab. 26 : stations climatiques (série 2004 / 2014)

Station		Janv	Ferv	Mars	Avri	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Octo	Nov	Dec	moy
<b>Bejaia</b>	max	16,7	16,6	18,9	20,9	23,6	26,8	30,0	30,6	28,2	26,0	21,2	17,9	23,1
	<b>moy</b>	<b>11,77</b>	<b>12,66</b>	<b>14,43</b>	<b>15,82</b>	<b>19,54</b>	<b>21,37</b>	<b>24,2</b>	<b>26,32</b>	<b>23,57</b>	<b>21,12</b>	<b>16,16</b>	<b>12,87</b>	18,3
	min	7,3	7,3	9,3	11,8	14,5	17,6	21,1	21,3	19,0	16,5	12,0	8,6	13,8
<b>Akbou</b>	max	13,78	14,43	15,87	17,35	21,35	22,78	27,34	28,44	25,98	22,34	18,43	14,23	20,1
	<b>moy</b>	<b>12,19</b>	<b>12,54</b>	<b>14,35</b>	<b>15,97</b>	<b>18,95</b>	<b>21,04</b>	<b>24,23</b>	<b>25,91</b>	<b>23,63</b>	<b>20,73</b>	<b>16,14</b>	<b>12,8</b>	18,2
	min	9,23	10,89	12,87	13,78	16,78	20,02	22,67	22,32	21,54	18,32	14,32	11,23	16,1
<b>Sétif</b>	max	10,8	10,8	15,2	18,4	23,4	30,4	34,9	34,0	27,7	23,1	15,2	10,9	21,2
	<b>moy</b>	<b>5,01</b>	<b>5,18</b>	<b>8,8</b>	<b>11,19</b>	<b>16,28</b>	<b>22,07</b>	<b>26,31</b>	<b>25,39</b>	<b>20,07</b>	<b>15,91</b>	<b>9,28</b>	<b>5,66</b>	14,2
	min	-0,3	-0,2	2,9	5,8	9,1	13,8	17,8	17,3	13,5	9,9	4,1	0,9	7,8
<b>Bouira</b>	max	14,21	13,65	15,65	17,43	21,87	23,83	28,34	28,88	25,45	23,01	18,32	15,32	20,4
	<b>moy</b>	<b>12,04</b>	<b>11,75</b>	<b>14,13</b>	<b>15,43</b>	<b>19,47</b>	<b>22,19</b>	<b>25,18</b>	<b>25</b>	<b>23,54</b>	<b>20,66</b>	<b>15,79</b>	<b>12,25</b>	18,1
	min	9,33	10,21	13,01	13,99	17,32	20,32	23,11	23,32	20,65	18,32	14,32	10,1	16,1

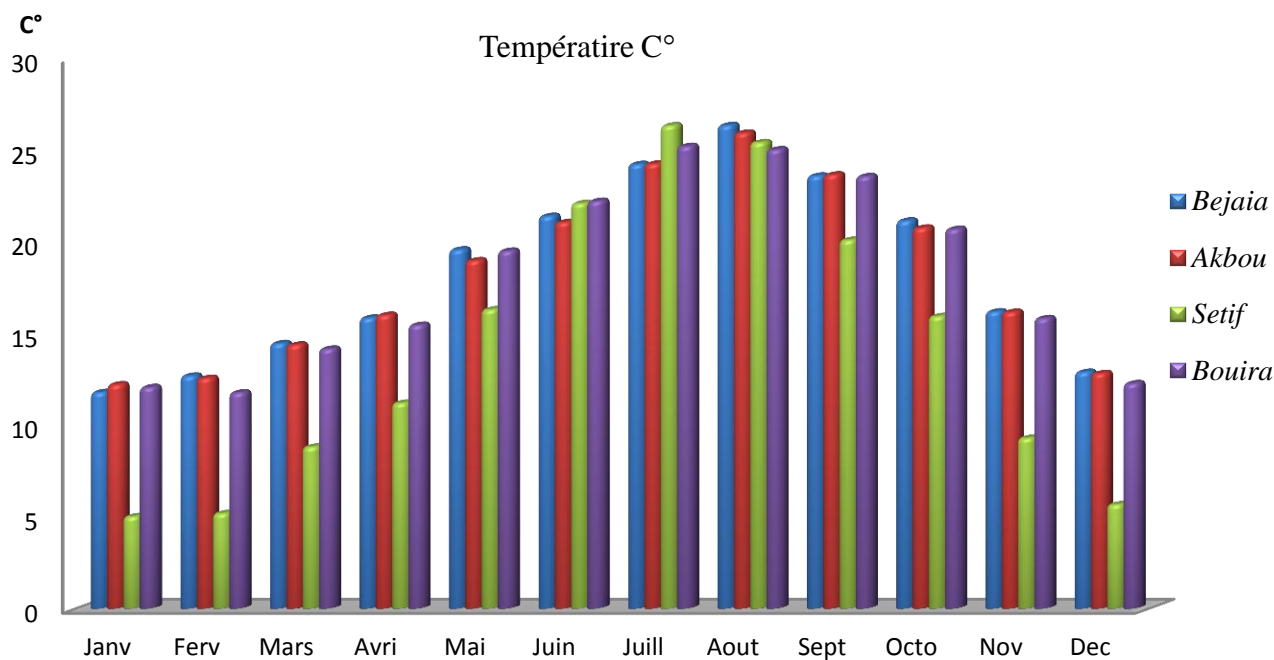
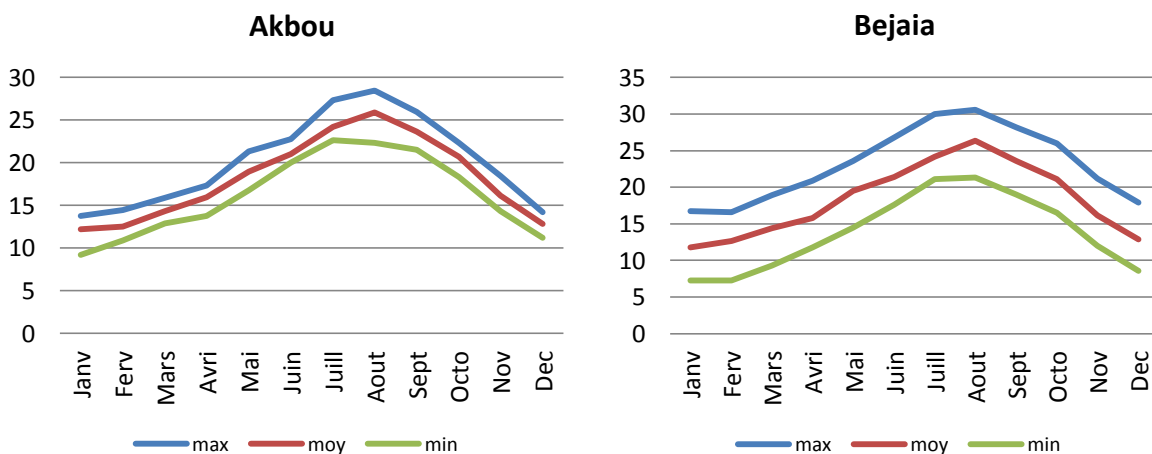


Fig.28 : températures mensuelles moyennes des 4 stations

L'étude comparative des données de température de ces quatre stations, montre une légère diminution de celles-ci à mesure que l'on s'éloigne de la mer. Le climat méditerranéen avec des hivers tempérés et des étés chauds à la station de BEJAIA, prend des caractères d'un climat continental à la station de SETIF. Cependant, ces variations sont de faibles amplitudes compte-tenu des distances qui séparent ces stations.



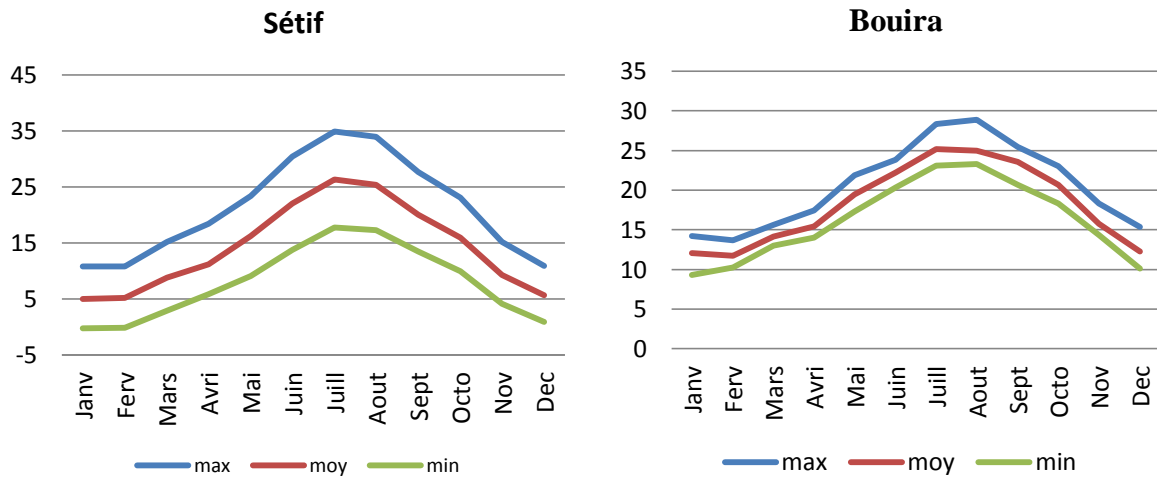


Fig.29 : température (c°) maximum, moyenne et minimum mensuels des 4 stations

La répartition des stations climatiques retenues explique les températures moyennes mensuelles et annuelles enregistrées dans chaque station. Les stations de Bejaia, Akbou et Bouira, situées dans la vallée de la Soummam et son prolongement vers le Sud enregistrent des températures plus ou moins similaires reflétant la basse altitude de la vallée et l'influence maritime. En effet, les températures moyennes aux stations d'Akbou et Bouira sont identiques. Elles diffèrent légèrement des minima et maxima de la station de Bejaia. Par contre, la station de Sétif montre des moyennes minima très basses ; elles sont négatives durant les mois de janvier et février (tab26). Ces températures conditionnent l'activité du couvert végétal dans le bassin versant de la Soummam. A la station de Sétif le froid hivernal et la sécheresse estivale rendent les périodes de dormances plus longues d'où une protection du sol moins efficace.

### 9.8- Les étages bioclimatiques du bassin de la Soummam.

La station de Bejaia qui se situe dans l'étage humide à hiver chaud (fig30) représente la partie aval du bassin versant de la Soummam. Cet étage bioclimatique favorise le développement d'un couvert végétal dense qui permet une protection efficace du sol. Les stations de Bouira et Akbou bénéficient toujours d'un hiver chaud mais dans un étage semi-aride ; c'est une situation moins contraignante qu'à la station de Sétif (hiver frais).

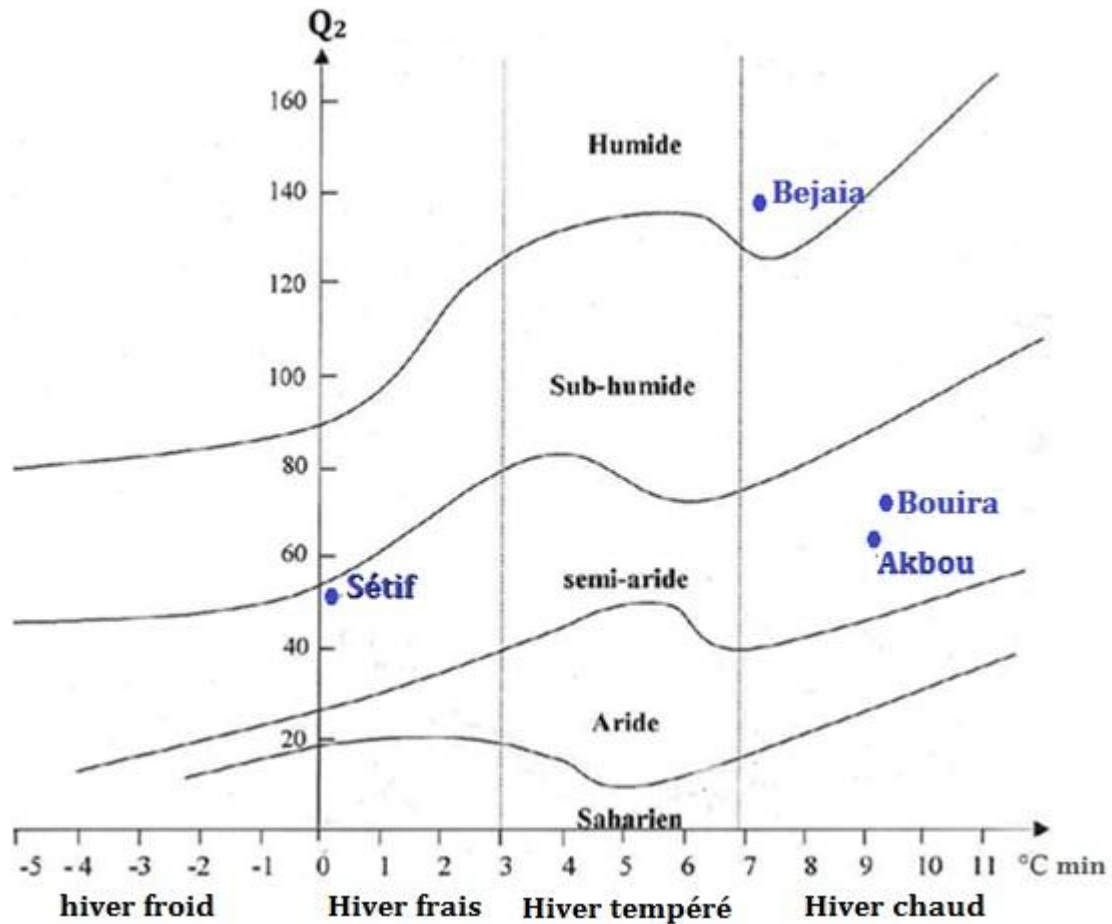


Fig. 30 : Etages bioclimatiques du bassin de la Soummam

## 10 – le Couvert végétal

La répartition de la végétation est conditionnée essentiellement par le cadre morpho lithologique, le cadre climatique et l'activité anthropique. Les zones sous influence maritime présentant un substrat de formations calcaires et gréseuses constituent un relief massif et difficilement accessible par endroit, sont couvertes par des forêts denses ou claires ainsi que des maquis denses ou dégradés selon l'altitude et l'intensité de l'action anthropique. Cette situation est représentée essentiellement par les flancs Est et Sud-est du Djurdjura, la terminaison Ouest des Babor occidentaux. Les versants dominant la vallée de la Soummam sont généralement couverts par un maquis dégradé où on constate l'intrusion de champs cultivés dans les milieux moins pentus. La partie amont, représentée par le sous bassin de l'oued Sahel, montre une dénudation complète sur de grandes surfaces ; preuve d'une action anthropique permanente (activité agricole). Les limites Sud-est du bassin versant montrent un milieu très dégradé et presque dépourvu de végétation. Aussi les hautes plaines sétifiennes, drainé par l'oued Boussellam représentent le domaine de la céréaliculture. Cette analyse montre la diversité des milieux dans le bassin de la Soummam. La partie Nord est nettement plus protégée que les parties Sud et Est. Ces dernières sont beaucoup plus vulnérables vis-à-

vis de l'agressivité climatique. Ainsi, leur apport en sédiment sera plus important. Il est à noter que les pratiques culturales sont rarement accompagnées de pratiques antiérosives.

## **11- Conclusion**

La détermination des caractéristiques du bassin versant de la Soummam permet de faire ressortir quatre milieux principaux : la vallée de la Soummam, le flanc du Djurdjura, le plateau de Bouira et les hautes plaines sétifiennes. Ces milieux s'intègrent dans une forme allongée très irrégulière, repartis dans des étages bioclimatiques allant du semi-aride, dans les parties Est et Sud-est, au subhumide dans les parties Nord et Nord-ouest. Le réseau hydrographique, très ramifié (ordre 6), permet un ruissellement dense et même un ravinement important par endroit. L'évolution morpho-structurale a conditionné l'individualisation du bassin versant de la Soummam en favorisant le développement de deux affluents principaux qui drainent le grand bassin versant de la Soummam (Sahel-Soummam, Boussellam). Cette situation conditionne le flux hydro-sédimentaire qui caractérise le bassin versant de la Soummam.

## **Chapitre III**

### **Ecoulement et ressources hydriques**

## 1- Introduction

Les stations hydrométriques qui contrôlent le bassin versant de la Soummam sont d'un nombre insuffisant et mal réparties pour permettre un suivi fiable du comportement hydrologique du bassin. A cette situation s'ajoute les aménagements hydrauliques (4 barrages), réalisés à partir de 1985, qui ont rendu certaines stations caduques. Ainsi, en se basant sur les stations hydrométriques et les barrages, selon les dates de leurs mises en eau, nous avons pu constituer deux séries de mesures :

- La première allant de 1972 jusqu'à 1985 constituée par des mesures effectuées aux stations de Sidi Aiche, Sidi Yahia, Maghraoua et El Asnam (fig31). cette période se caractérise par un écoulement naturel précédant tout aménagement hydraulique. Néanmoins, nous constatons que la partie aval, située entre la station de sidi Aiche et l'embouchure reste sans contrôle (8% du bassin versant). Aussi, la partie amont (oued Sahel) ne comporte que des stations situées sur des affluents d'une importance modeste (station Al Asnam). Par ailleurs, la période commune aux 4 stations hydrométriques n'est que de 11ans (1972/1985).
- La deuxième allant de 1985 jusqu'à 1992 où les mesures seront influencées par la mise en eau des barrages notamment, Ain Zada en amont des stations de Sidi Aiche, Sidi Yahia et Maghraoua et Lakhel en amont de Sidi Aiche. La station d'Al Asnam est la seule qui est restée à l'abri de ces perturbations. Seulement, elle présente une série très lacunaire. Aussi, la mise en eau des barrages de Tilesdit et Tichy Haf est intervenue respectivement en 2004 et 2007, plusieurs années après la fin de cette série.

Ainsi, et en tenant compte de toutes ces observations, nous essaierons, dans ce chapitre, de faire ressortir les caractéristiques du comportement hydrologique du bassin versant de la Soummam avant et après l'intervention des aménagements hydrauliques. Cependant, une estimation des ressources en eau du bassin versant de la Soummam sera tentée en utilisant notamment la lame écoulée estimée par l'ANRH (PNE 2011).

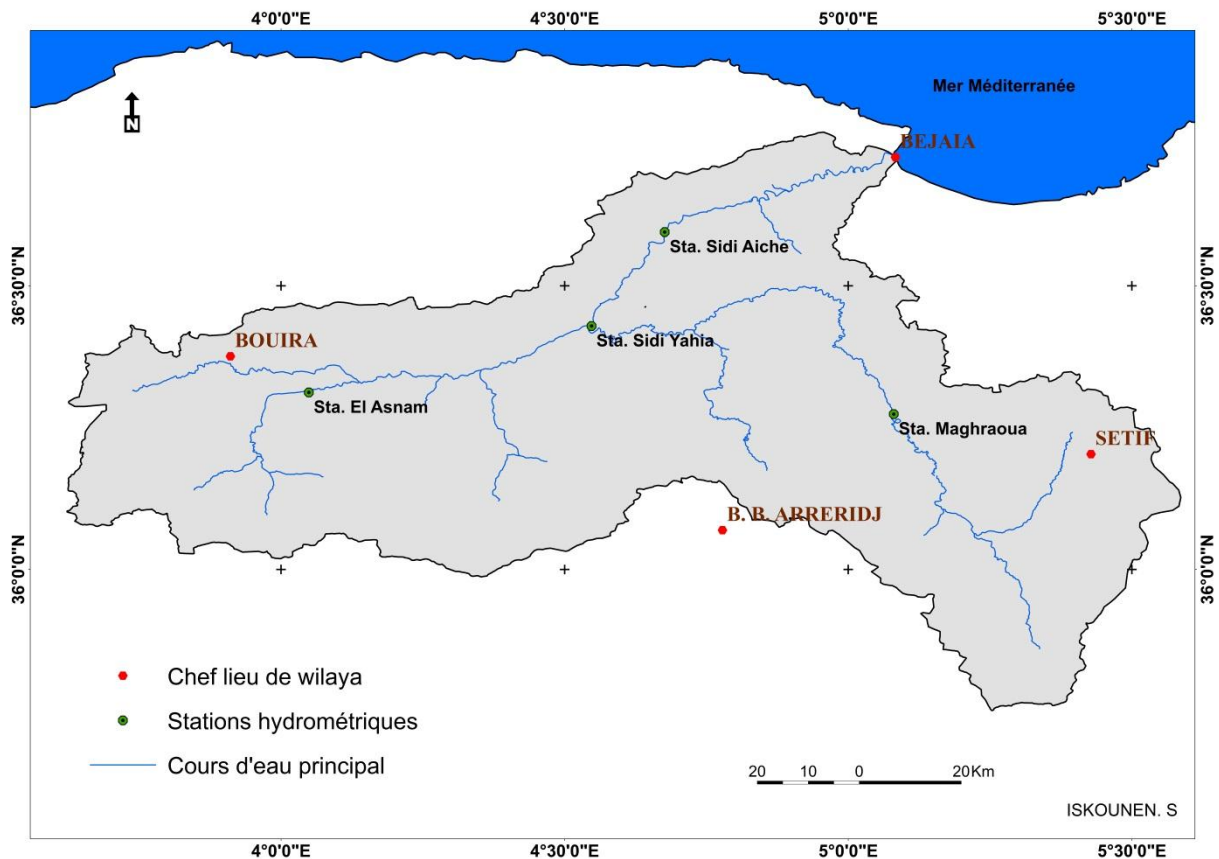


Fig. 31: Localisations des stations hydrométriques

## 2- Variation des écoulements avant les aménagements hydrauliques

### 2.1- Variation des écoulements annuels moyens

Les séries de mesures disponibles sont souvent courtes et parfois lacunaires, sauf la station de Sidi Aiche, qui contrôle la quasi-totalité du bassin versant de la Soummam (9125km<sup>2</sup>), possède une série de mesures longue et continue (31ans). Les autres séries relatives aux stations de Sidi Yahia, Maghraoua et Al Asnam possèdent des séries beaucoup plus courtes mais ont l'avantage d'être de la même période.

#### 1- Station de Sidi Aiche (1954/1985)

Le premier site de la station où les observations ont été effectuées de 1954 à 1957 était situé à environ 1,5 Km en amont du site de la station actuel. Durant cette période la station était équipée par un déversoir en béton, une échelle sur la rive gauche de l'oued et un limnigraphe téléphérique. En décembre 1957, à la suite de la grande crue, l'équipement de cette station a été endommagé. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la station a été déplacée, et à partir de décembre 1957 les observations sont effectuées au niveau du pont métallique situé au niveau de la ville de Sidi Aiche (fig32). De 1957 à 1961 les observations des hauteurs d'eau étaient effectuées à partir de l'ancien pont en fer. En juin 1961, les autorités concernées ont procédé à l'implantation d'un limnimètre permanent et un limnigraphe à environ 10 -15 m à l'aval du pont sur la rive droite. Un peu plus tard un téléphérique a été installé à environ 800-1000 m à



l'amont du pont. Ces installations ont été conservées jusqu'en 1992, date de l'arrêt de fonctionnement de la station. Ces changements de site de la station ont provoqué une légère différence de la surface totale contrôlée par la station (moins 0.2%) sans conséquences sur la précision des mesures.

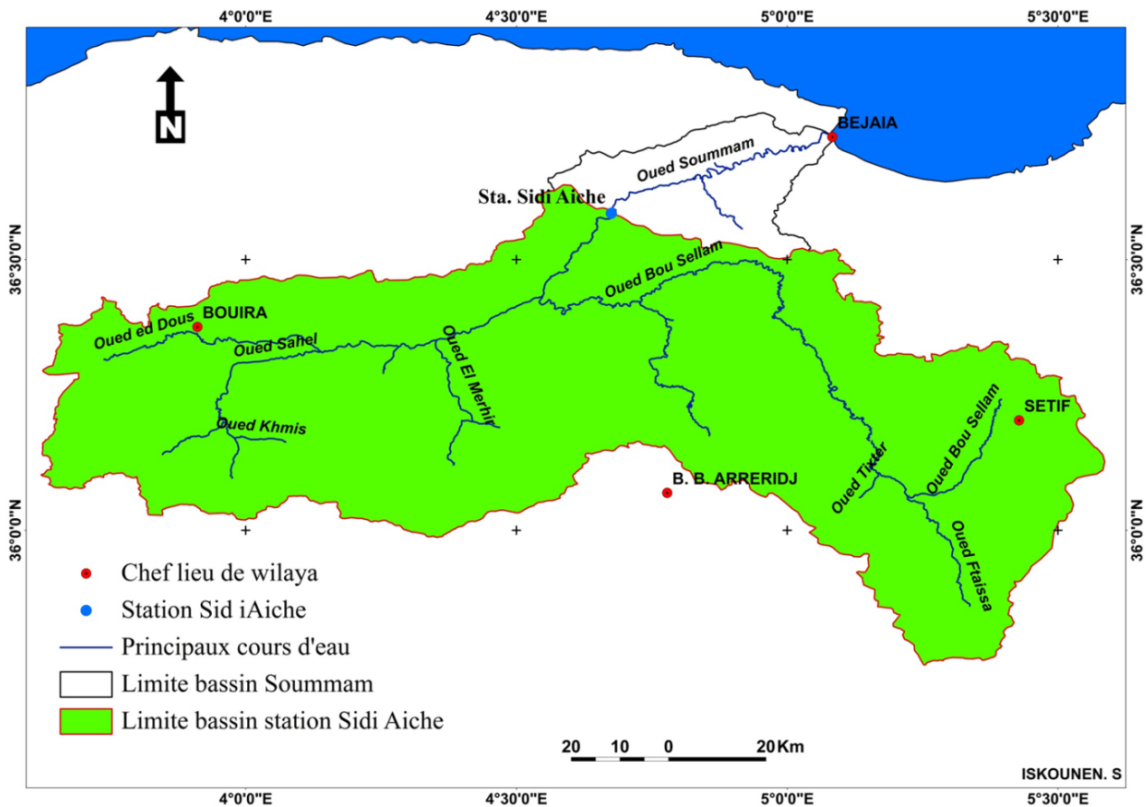
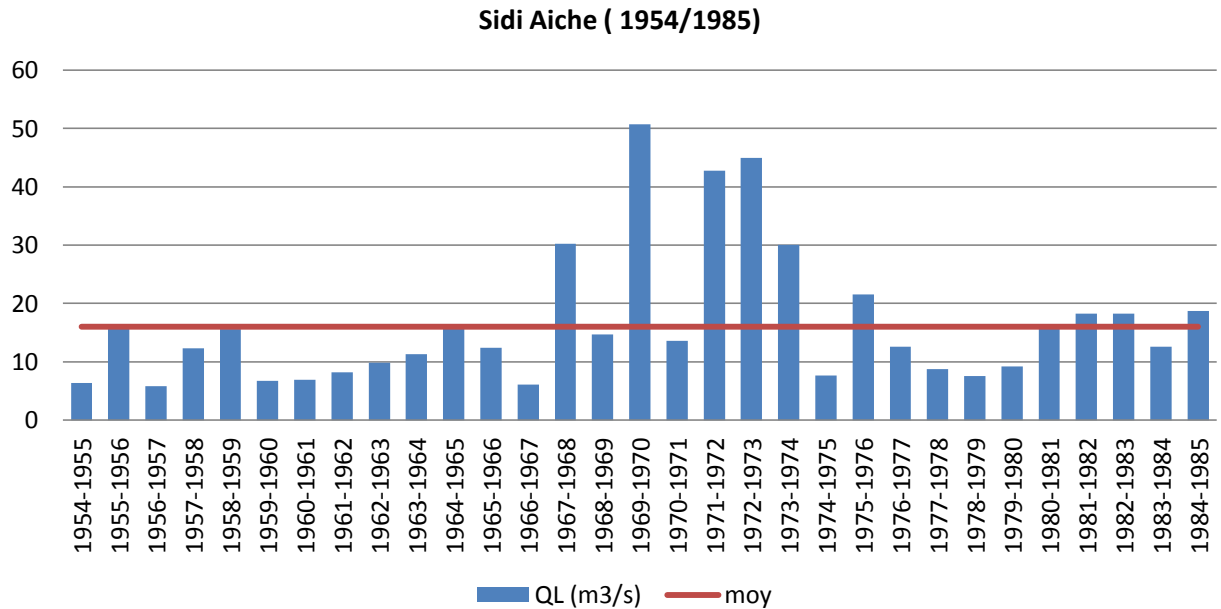


Fig.32 : Bassins versants contrôlés par les stations hydrométriques

Tab.27 : apport liquide annuel à la station de Sidi Aiche

Station de Sidi Aiche : Série (1954/1985)					
Année	(m <sup>3</sup> /s)	AL (hm <sup>3</sup> /an)	Année	QL (m <sup>3</sup> /s)	AL (hm <sup>3</sup> /an)
1954-1955	6,36	199,91	1970-1971	13,59	429,33
1955-1956	15,65	491,01	1971-1972	42,81	1344,62
1956-1957	5,82	183,102	1972/1973	44,97	1397,62
1957-1958	12,33	387,21	1973/1974	30,05	944,55
1958-1959	15,63	490,37	1974/1975	7,64	232,97
1959-1960	6,71	212,04	1975/1976	21,53	667,89
1960-1961	6,90	219,63	1976/1977	12,55	392,77
1961-1962	8,18	251,84	1977/1978	8,75	272,99
1962-1963	9,87	306,44	1978/1979	7,53	236,51
1963-1964	11,27	351,24	1979/1980	9,20	290,81
1964-1965	15,65	488,15	1980/1981	15,93	500,70
1965-1966	12,37	393,62	1981/1982	18,21	562,20
1966-1967	6,09	189,57	1982/1983	18,28	577,11
1967-1968	30,22	954,27	1983/1984	12,57	381,47
1968-1969	14,65	464,28	1984/1985	18,71	507,21
1969-1970	50,73	1609,38			
<b>moy</b>	<b>QL = 16,00 m<sup>3</sup>/s , AL = 499,13 hm<sup>3</sup>/an</b>				



*Fig. 33 : débit moyen annuel à la station de Sidi Aiche*

La lecture du tableau 27 et des figures 33 et 34 montre que le débit moyen annuel atteint  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ , l'équivalent d'un apport moyen annuel de  $499 \text{ hm}^3$ . La série de mesures (31 ans) est composée de 3 mini-cycles dont 2 constitués essentiellement d'années sèches. Le premier mini-cycle allant de 1954 à 1967 (13 ans) n'enregistre aucune mesure dépassant la moyenne annuelle. Les années 1966/1967 et 1954/1955 n'enregistrent respectivement que 6,09 et 6,36  $\text{m}^3/\text{s}$ . Le deuxième mini-cycle allant de 1975 à 1985 (10 ans) montrent une sécheresse moins sévère, où la moitié des années atteint la moyenne annuelle. Le mini-cycle de la période humide compte uniquement 7 ans. L'année la plus humide enregistre un débit moyen annuel dépassant les  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ainsi, cette série enregistre 23 sur 31 années sèches. En effet, on constate que le bassin versant de la Soummam n'est pas à l'abri d'années très sèches où l'apport moyen annuel n'atteint même pas les  $200 \text{ hm}^3$ . Par contre, les années humides peuvent engendrer des inondations catastrophiques (étude de protection de la ville de Bejaia contre les inondations 2005). Ces écoulements extrêmes sont à l'origine des aménagements hydrauliques réalisés à partir de l'année 1985.

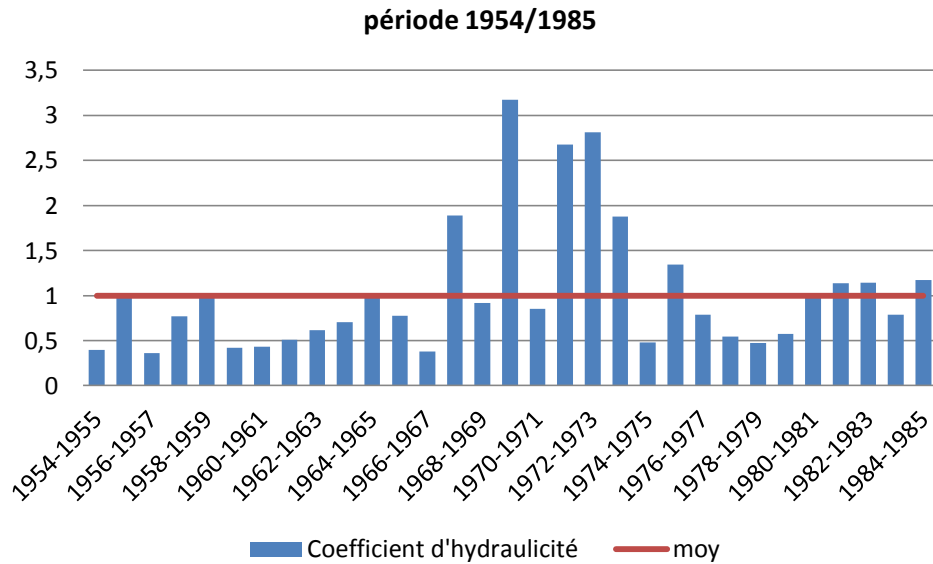


Fig.34 : coefficient d'hydraulicité à la station de Sidi Aiche (1954/1985)

### 1.1- Etude fréquentielle des débits moyens annuels à la station Sidi Aiche

Les données à l'échelle annuelle, et particulièrement les données pluviométriques, obéissent habituellement à la loi normale. Seulement, les données de l'écoulement du bassin versant de la Soummam, après test, ont montré qu'ils n'obéissent qu'à la loi de Galton. L'ajustement des données (31 ans) à cette dernière permet les observations suivantes :

La série enregistrée (1954/1985) ne renferme pas des années exceptionnelles. En effet, les années les plus sèches enregistrées ont une période de retour ne dépassant pas les 10 ans. Par contre, l'année la plus humide à une période de retour inférieure à 50 ans. Ainsi, les écoulements extrêmes de période de retour 100 ans atteignent durant la période sèche des débits inférieurs à  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $79 \text{ hm}^3/\text{an}$ ) et durant la période humide des débits supérieurs à  $67 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $2112 \text{ hm}^3/\text{an}$ ). Ces années exceptionnelles, sèches ou humides, peuvent avoir des conséquences très importantes sur la dynamique du milieu et la ressource en eau dans le bassin versant de la Soummam (tab.28).

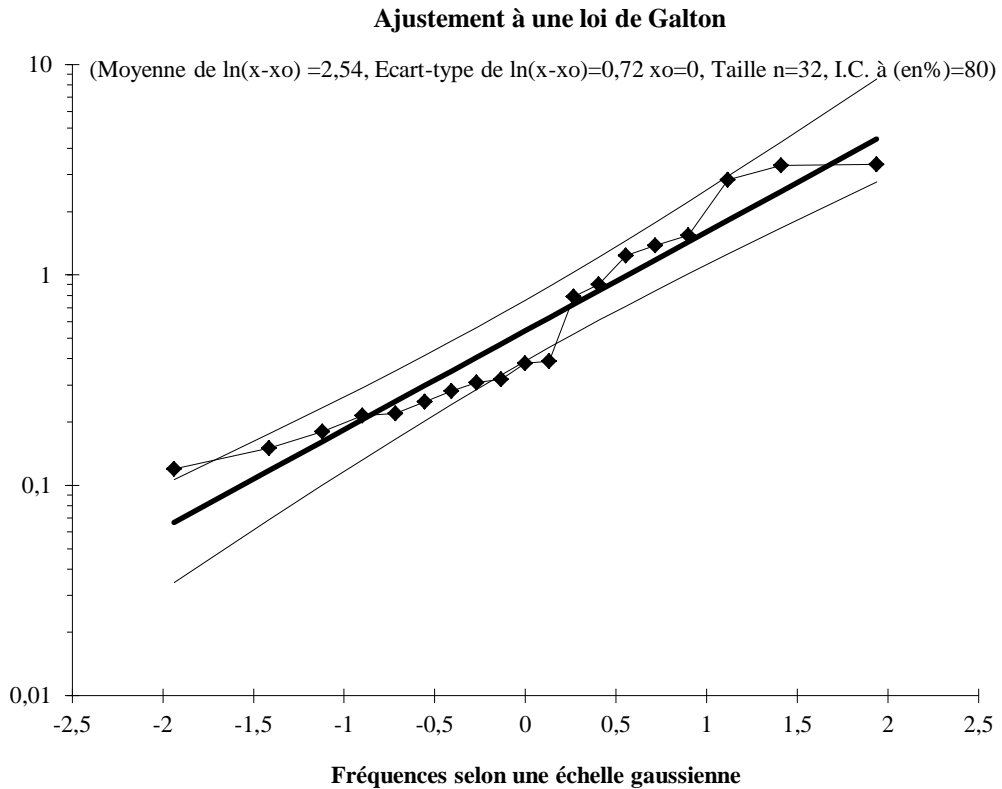


Fig. 35 : ajustement à la loi de Galton des débits moyens annuels à la station Sidi Aiche

Tab. 28 : ajustement à la loi de Galton des débits moyens annuels de à station Sidi Aiche

Sidi Aiche (série 1954/1985)							
	Années sèche			moyenne	Années humide		
<b>T (ans)</b>	100	50	10	2	10	50	100
<b>F</b>	0,01	0,02	0,1	0,5	0,9	0,98	0,99
<b>U</b>	-2,327	-2,054	-1,282	0	2,282	3,054	2,327
<b>QL (m<sup>3</sup>/s)</b>	2,38	2,90	5,05	12,68	31,84	55,45	67,44

## 2- Stations Sidi Yahia et Maghraoua (sous bassin de Boussellam)

Le sous bassin de Boussellam (4050 km<sup>2</sup>) est contrôlé par deux stations. La station de Maghraoua est située dans la partie amont (2350km<sup>2</sup>). Par contre, la station de Sidi Yahia est localisée à l'embouchure de l'oued Boussellam, avant sa confluence avec l'oued Sahel (fig.31). Nous remarquons que les séries de mesures enregistrées dans les deux stations sont très courtes (13 ans) par rapport à la série de Sidi Aiche.

Tab. 29 : apport liquide annuel aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua

Année	Station de Maghraoua (1972/1985)		Station de Sidi yahia (1972/1985)	
	QL (m <sup>3</sup> /s)	AL (hm <sup>3</sup> )	Ql (m <sup>3</sup> /s)	AL (hm <sup>3</sup> )
1971-1972	2,20	68,60	9,40	295,29
1972-1973	3,04	94,58	14,76	457,20
1973-1974	1,55	48,65	8,81	276,63
1974-1975	0,63	19,32	3,07	95,28
1975-1976	1,87	94,58	7,94	246,47
1976-1977	0,87	27,68	4,19	132,01
1977-1978	0,33	10,29	2,27	71,21
1978-1979	0,63	19,83	3,02	94,25
1979-1980	0,60	18,86	2,50	78,96
1980-1981	0,63	19,56	5,05	158,62
1981-1982	3,03	93,28	9,31	287,19
1982-1983*	1,55	49,13	6,58	208,32
1983-1984*	1,60	50,45	8,81	268,11
1984-1985	2,11	66,54	11,55	365,31
<b>moyen</b>	<b>1,47</b>	<b>48,66</b>	<b>6,94</b>	<b>216,77</b>

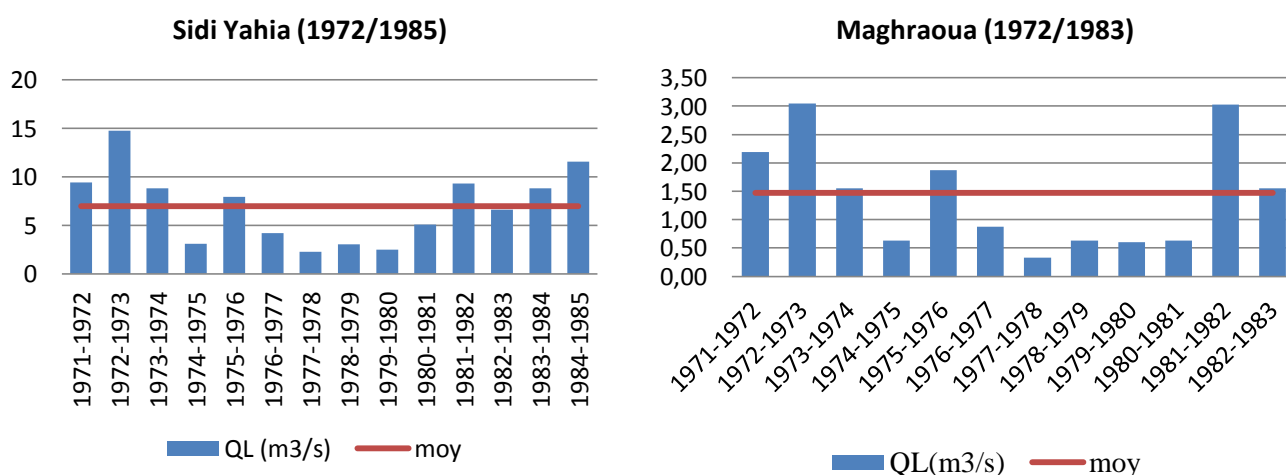


Fig. 36 : débit moyen annuel aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua

La station de Maghraoua (2350 km<sup>2</sup>) enregistre un débit moyen annuel de 1,47 m<sup>3</sup>/s. par contre, la station de Sidi yahia (4050 k m<sup>2</sup>) a enregistré une moyenne de 6,94 m<sup>3</sup>/s. Cependant, la station de Maghraoua, qui contrôle 58% de la surface du sous bassin de Boussellam, n'enregistre que 21% du débit moyen du sous bassin versant de Boussellam. Cette situation s'explique par le fait que la station de Maghraoua reçoit les écoulements du haut bassin de l'oued Boussellam situé en plein domaine des hautes plaines sétifiennes (fig. 36). L'analyse des données nous permet de constater que la période 1972/1985 a connu une

année très humide (1972-1973) où la station de Maghraoua a enregistré un débit de 3,04 m<sup>3</sup>/s et la station de Sidi Yahia, un débit de 14,76 m<sup>3</sup>/s. Par contre, l'année 1977-1978 est une année très sèche pour les deux stations. A la station de Maghraoua, le débit n'est que de 0,33 m<sup>3</sup>/s. Alors, qu'à la station de Sidi Yahia, le débit est de 2,27 m<sup>3</sup>/s (tab29). Les conditions morpho-climatiques expliquent cette situation.

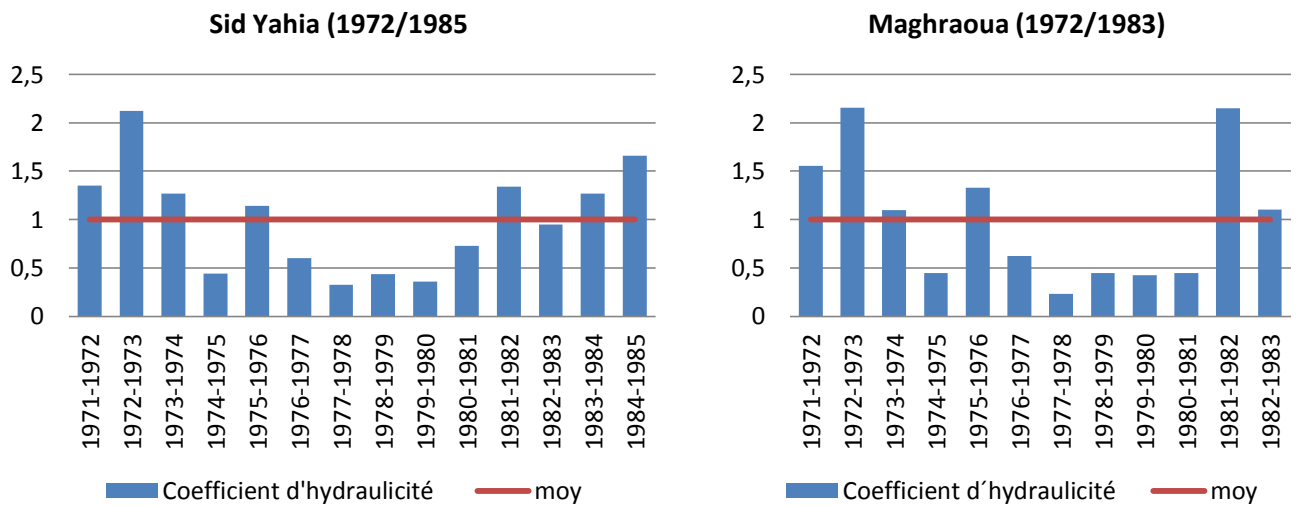


Fig. 37 : coefficient d'hydraulicité aux stations sidi Yahia et Maghraoua

Dans les deux stations, la moitié de la série montre un coefficient d'hydraulicité supérieur à 1. Ce coefficient atteint des valeurs maximales pour l'année 1972/73 au niveau de la station de Maghraoua avec une valeur de 2,16 et à la station de Sidi yahia avec une valeur de 2,30 (fig. 37). Les valeurs les plus faibles traduisent le fort déficit pluviométrique des années les plus sèches. En effet, on enregistre en 1977/1978, 0,23 à la station de Maghraoua et 0,35 au niveau de Sidi Yahia (fig. 36).

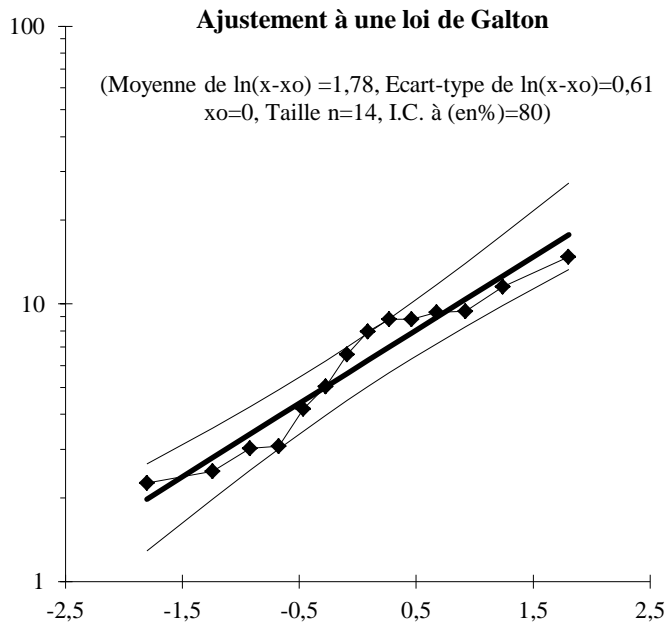
## 2.1- Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (stations Sidi Yahia, Maghraoua)

L'ajustement des données annuelles des stations de Sidi Yahia et Maghraoua à une loi de Galton permet d'obtenir des débits selon la période, sèche ou humide, et la période de retour. En effet, pour une période de retour sèche (100 ans) la station de Maghraoua n'enregistre qu'un débit de 0,20 m<sup>3</sup>/s et la station de Sidi Yahia descend jusqu'à 1,44 m<sup>3</sup>/s. par contre, pour une période de retour humide (100 ans), le débit à Maghraoua atteint 6,11 m<sup>3</sup>/s et à Sidi Yahia 24,41 m<sup>3</sup>/s. les séries courtes enregistrées aux deux stations ne montrent pas d'année exceptionnelle. Les périodes de retour les plus longues ne dépassent pas les 20 ans (tab. 30).

Tab. 30 : Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (stations Sidi Yahia, Maghraoua)

Station : Sidi Yahia: Période (1972/1985)							
	Années sèche			moyenne	Années humide		
<b>T (ans)</b>	100	50	10	2	10	50	100
<b>F</b>	0,01	0,02	0,1	0,5	0,9	0,98	0,99
<b>U</b>	-2,327	-2,054	-1,282	0	2,282	3,054	2,327
<b>QL (m<sup>3</sup>/s)</b>	1,44	1,70	2,72	5,93	12,93	20,68	24,41
Station : Maghraoua : Période (1972/1985)							
	Années sèche			moyenne	Années humide		
<b>T (ans)</b>	100	50	10	2	10	50	100
<b>F</b>	0,01	0,02	0,1	0,5	0,9	0,98	0,99
<b>U</b>	-2,327	-2,054	-1,282	0	2,282	3,054	2,327
<b>QL (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,20	0,25	0,43	1,12	2,85	5,01	6,11

### Station Sidi Yahia



### Station Maghraoua

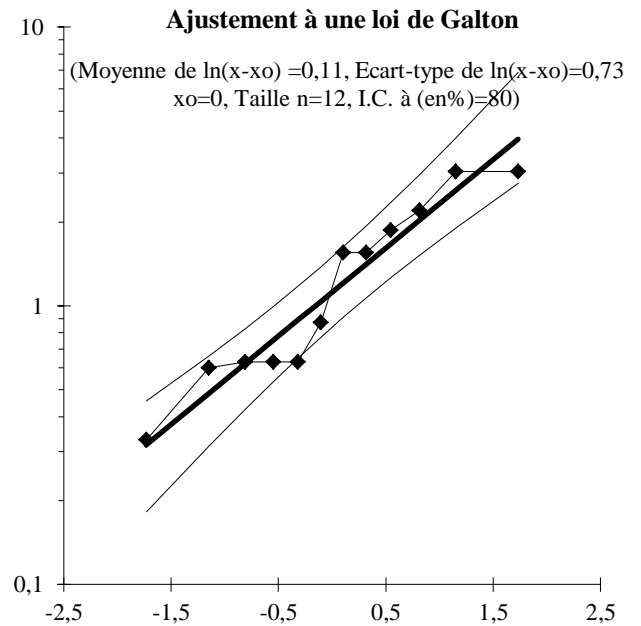


Fig. 37 : Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (stations Sidi Yahia, Maghraoua)

### 3- Station d'Al Asnam

La station d'El Asnam (800 km<sup>2</sup>) est située dans la partie amont du sous bassin Sahel-Soummam. Elle nous permet de saisir le comportement hydrologique de cette partie de ce sous bassin avec une série de mesures allant de 1966 à 1993 ; car elle n'a pas été perturbée par les aménagements hydrauliques. Ainsi, cette série ne sera pas traitée en deux périodes. La moyenne annuelle des débits est de 0,50 m<sup>3</sup>/s. elle correspond à un débit spécifique de 0,63 l/s/km<sup>2</sup>. Ce débit est inférieur aux débits spécifiques enregistré aux stations de Sidi Aiche et Sidi Yahia respectivement de 1.9 et 1.7 l/s/km<sup>2</sup> ; mais supérieur au débit spécifique à la station de Maghraoua (0.6l/s/km<sup>2</sup>) contrôlant les hautes plaines sétifiennes.



Tab. 31 : apport liquide annuel à la station d'Al Asnam

Station d'Al Asnam : Période (1966/1993)					
Année	QL (m <sup>3</sup> /s)	AL (hm <sup>3</sup> /an)	Année	QL (m <sup>3</sup> /s)	AL (hm <sup>3</sup> /an)
1966-1967	1,23	39,39	1980-1981	0,37	12,4
1967-1968	0,90	28,44	1981-1982	0,57	19,31
1968-1969	1,40	43,65	1982-1983	0,10	4,02
1969-1970	0,38	12,11	1983-1984	0,26	8,96
1970-1971	3,70	106,03	1984-1985	0,21	7,041
1971-1972	1,32	48,68	1985-1986	0,11	4,49
1972-1973	0,75	25,04	1986_1987	0,08	2,686
1973-1974	0,28	9,74	1987-1988	0,21	8,236
1974-1975	0,27	10,24	1988-1989	0,17	5,652
1975-1976	0,15	4,92	1989-1990	0,11	3,8973
1976-1977	0,12	3,63	1990-1991	0,04	1,554
1977-1978	0,20	6,78	1991-1992	0,04	1,605
1978-1979	0,18	5,79	1992/1993	0,04	1,366
1979-1980	0,23	8,15			
<b>Moyenne</b>	<b>QL = 0,50 m<sup>3</sup>/s</b>		<b>AL = 16,06 hm<sup>3</sup>/an</b>		

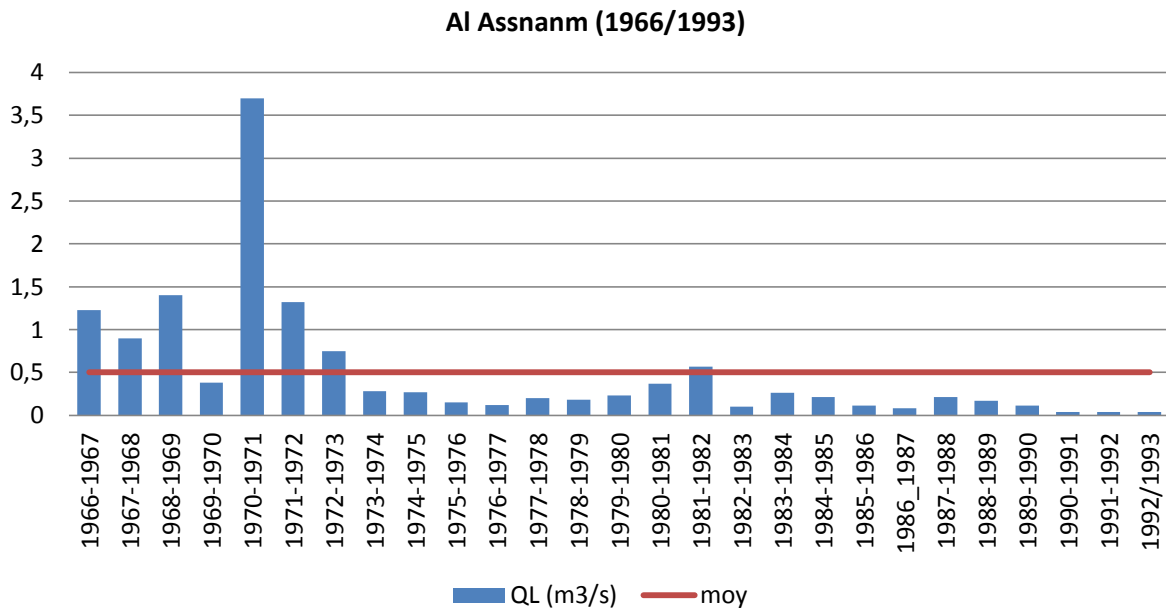


Fig. 38 : débit moyen annuel à la station d'el Asnam

Il est clair que la partie amont du bassin versant de la Soummam représentée par cette station subit des périodes de sécheresse beaucoup plus sévères et continues dans le temps (tab. 31). En effet, la série des débits montre un déficit très prononcé de 1973/1974 jusqu'à la fin de la série (1992/1993). Les deux années (1980/1982) montrent une légère reprise sans atteindre toutefois la moyenne annuelle (fig.38). Par ailleurs, la série lacunaire des précipitations ne permet pas de déduire la réaction de la partie amont du bassin aux précipitations enregistrées. Les quelques années disponibles montrent un déficit des écoulements beaucoup plus accentué

par rapport au déficit des précipitations. La lame d'eau écoulee (20mm) reste très faible par rapport à la moyenne enregistrée à la station. Néanmoins, les années 1966/1967- 1972/1973 constituent un mini-cycle d'une période humide que nous retrouvons à la station de Sidi Aiche (fig.38). Le coefficient d'hydraulicité (fig.39) confirme les observations émises à propos de la moyenne annuelle.

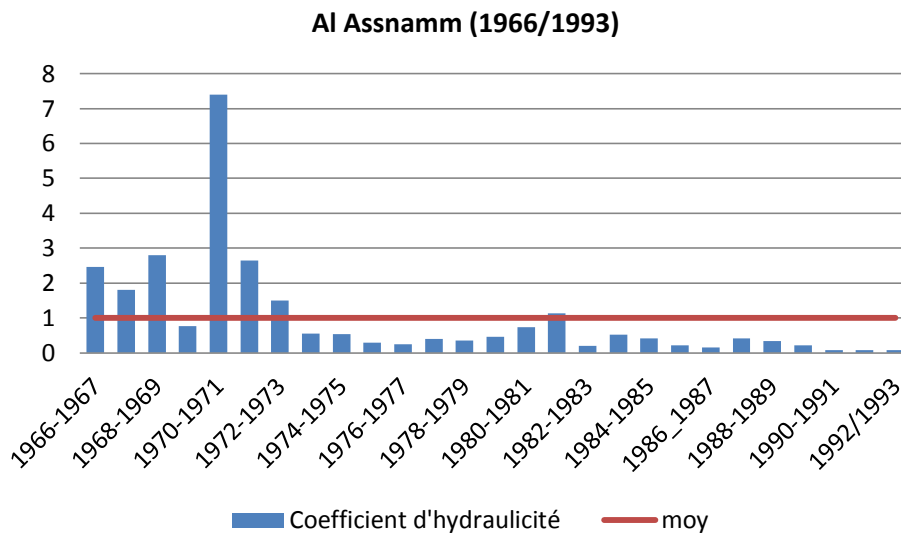


Fig. 39 : coefficient d'hydraulicité à la station d'El Asnam

### 3.1- Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (Série 1966/1993)

L'étude fréquentielle des apports moyens annuels enregistrés à la station d'al Assnam a permis l'estimation des débits, selon les périodes sèches et humides et la période de retour. L'année humide, de période de retour 100 ans, enregistre un débit de 6,74 m<sup>3</sup>/s (tab.32), l'équivalent d'un apport de 212 hm<sup>3</sup>/an. Par contre, l'année sèche de même période de retour n'enregistre que 0,04 m<sup>3</sup>/s. c'est l'équivalent d'un apport de 1,3 hm<sup>3</sup>/an. Cette sécheresse très sévère apparait à partir de l'année sèche cinquantennale (tab.32). Durant ces années l'écoulement ne dure que quelques jours par an. Cette situation catastrophique ne permet aucune recharge des nappes. Le couvert végétal herbacé ne dure probablement que quelques semaines. La protection du sol est quasi-absente. Par contre les années humides peuvent enregistrer des apports dépassant les 160 hm<sup>3</sup>/an. Il est évident que l'atténuation de cette variabilité impose une régularisation de l'oued.

Tab. 32 : Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (Série 1966/1993)

Station : Al Asnam (1966/1993)							
	Années sèche			moyenne	Années humide		
<b>T (ans)</b>	100	50	10	2	10	50	100
<b>F</b>	0,01	0,02	0,1	0,5	0,9	0,98	0,99
<b>U</b>	-2,327	-2,054	-1,282	0	2,282	3,054	2,327
<b>QL (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,04	0,05	0,13	0,59	2,17	5,01	6,738

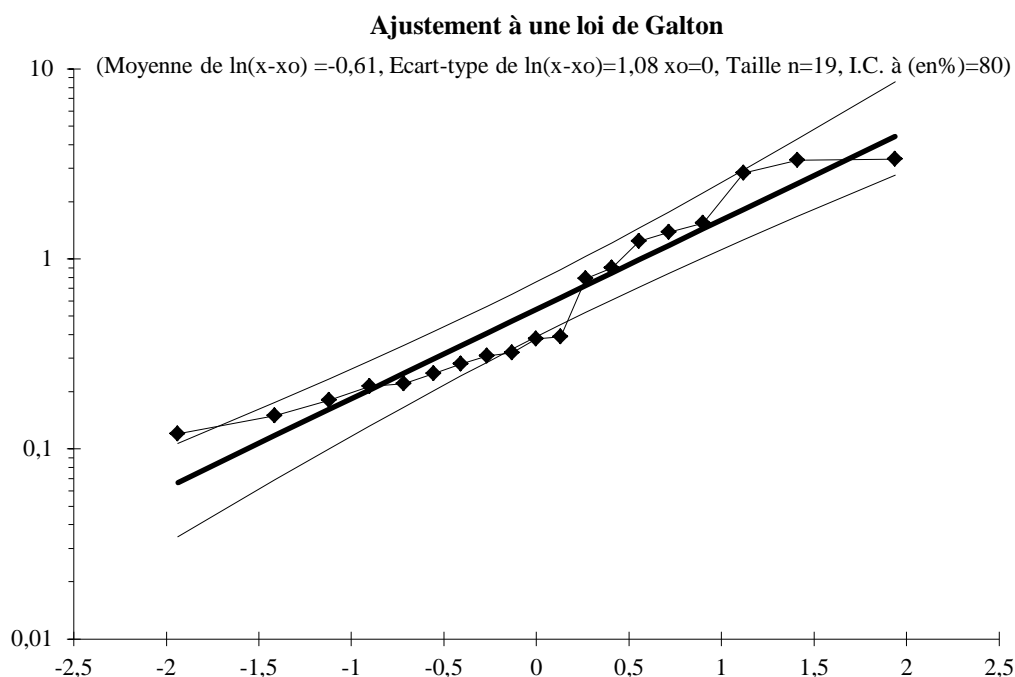


Fig. 40 : Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (Série 1966/1993)

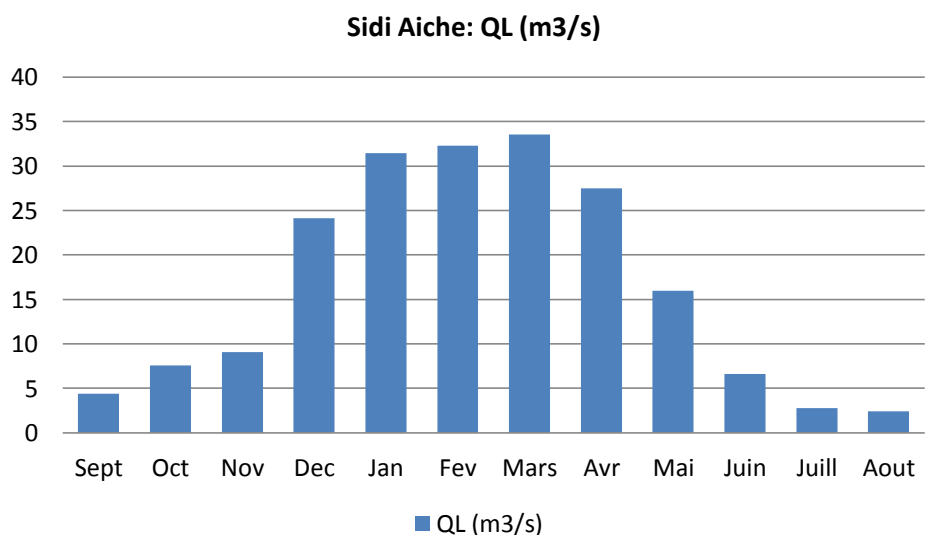
## 2.2- Variations des écoulements mensuels moyens

### 1- Station de Sidi Aiche

Les coefficients mensuels des débits (CMD) montrent une variation mensuelle des débits qui oscillent entre 0,14 enregistrés au mois d'aout et 2,09 au mois de mars. La station de Sidi Aiche enregistre un coefficient supérieur à 1 (hautes eaux) durant cinq mois (décembre à avril), la période des basses eaux persiste le reste de l'année (7 mois) (fig.42).

Tab. 33 : apport et débit liquide mensuel à la station de Sidi Aiche

Station de Sidi Aiche													
	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	année
<b>AL</b> ( $\text{mh}^3$ )	11,23	19,66	22,88	62,60	81,54	83,77	86,99	69,17	41,53	16,65	7,26	6,32	499,13
<b>QL</b> ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	4,42	7,58	9,07	24,13	31,46	32,32	33,54	27,50	15,96	6,59	2,75	2,39	16



*Fig. 41 : débit moyen mensuel à la station Sidi Aiche*

*Tab. 34 : Les coefficients mensuels des débits (CMD) à la station de Sidi Aiche*

<b>Station : Sidi Aiche (1954/1985)</b>												
	sep	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	Aou
<b>Max</b>	16,81	54,91	41,79	177,01	161,27	153,38	125,36	111,59	52,74	19,53	9,77	4,40
<b>Min</b>	0,86	1,26	1,55	1,94	2,10	3,68	1,93	5,45	4,39	1,87	0,60	1,16
<b>Ecart type</b>	3,62	11,98	11,40	34,96	36,59	31,18	30,01	26,48	13,31	4,45	1,72	1,03
<b>Cv</b>	0,82	1,57	1,25	1,44	1,16	0,96	0,89	0,96	0,83	0,67	0,62	0,43
<b>Cmd</b>	0,276	0,47	0,56	1,50	1,96	2,02	2,09	1,71	0,99	0,41	0,17	0,14

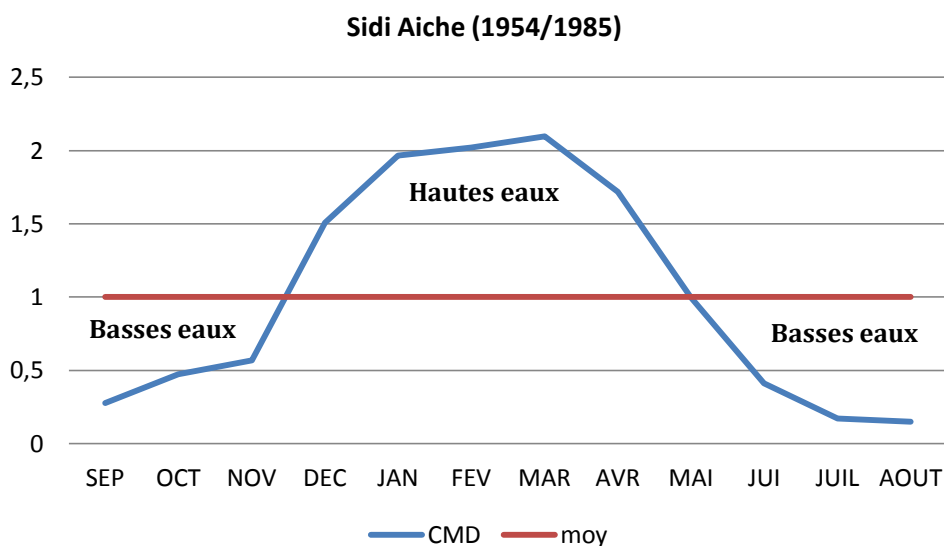


Fig. 42 : Coefficients mensuels des débits (CMD) à la station de Sidi Aiche

### 1.1- Fréquence des débits moyens mensuels de la station Sidi Aiche

L'ajustement des débits moyens mensuels à la loi de Galton permet de constater que l'apport de l'automne reste modeste quel que soit la période de retour du mois. A partir du mois de novembre, l'apport des périodes de retour cinquantennale et centennale évoluent de manière similaire jusqu'au mois de janvier ( $T_{50} = 251 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $T_{100} = 299 \text{ m}^3/\text{s}$ ), où la courbe cinquantennale fléchit indiquant une diminution de l'apport jusqu'au début de l'été où toutes les courbes se rejoignent. Quant à la courbe centennale elle atteint le pic au mois de février avec un apport du mois de mars équivalent à l'apport du mois de janvier de la courbe cinquantennale (fig.43). Ainsi, nous déduisons que la différence entre l'année humide centennale et cinquantennale réside dans l'apport des mois de février et mars (fig.43).

Tab. 35 : étude des Fréquence des débits moyens mensuels à la station Sidi Aiche

Station : Sidi Aiche (période : 1954/1985)															
	U	F	T	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Ao
Années sèche	-2,327	0,01	100	1,0	1,1	0,5	1,8	1,1	3,2	4,5	3,9	4,1	0,9	0,3	0,9
	-2,054	0,02	50	1,1	1,3	0,7	2,2	1,5	4,2	5,7	4,9	4,8	1,1	0,4	1,0
	-1,282	0,1	10	1,9	1,9	1,4	4,4	4,0	8,9	11,2	9,4	7,9	2,1	0,8	1,4
noy	0	0,5	2	4,4	6,7	8,3	23,5	30,8	31,1	33,5	27,3	14,7	5,6	2,4	2,2
Années humide	2,282	0,9	10	10,1	16,8	12,9	41,2	96,8	108,3	100,5	79,0	39,5	15,6	6,5	3,6
	3,054	0,98	50	16,6	22,0	25,1	80,5	251,4	229,5	194,6	149,8	64,2	27,9	11,9	4,8
	2,327	0,99	100	19,7	28,4	31,8	102	299,1	352,0	245,7	187,7	76,1	34,9	14,7	5,29

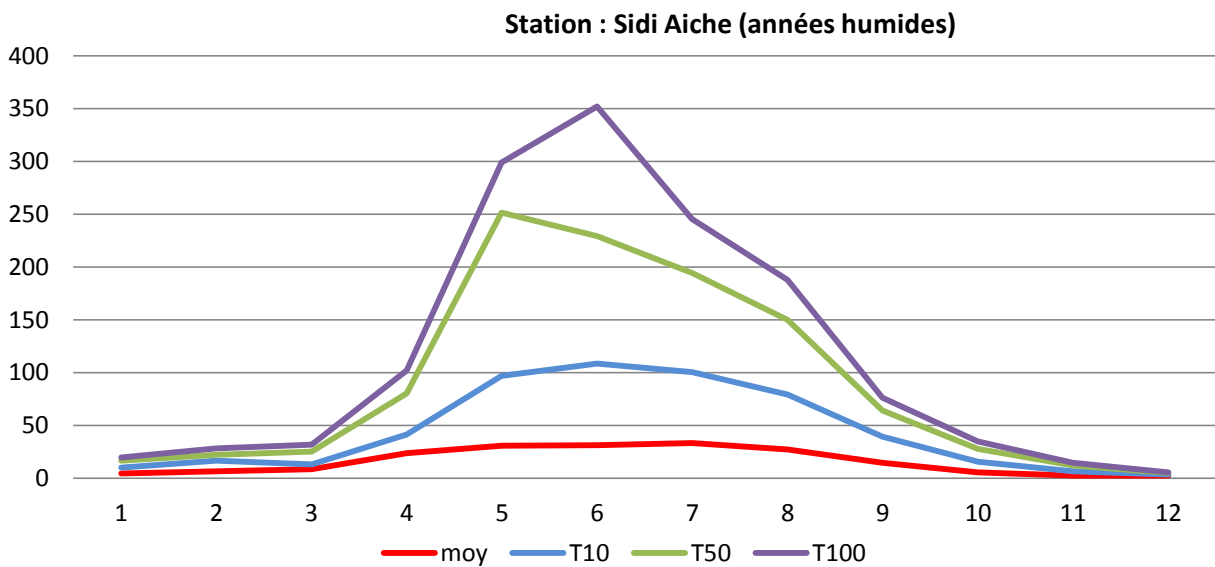


Fig. 43 : Fréquence des débits moyens mensuels à la station Sidi Aiche (années humides)

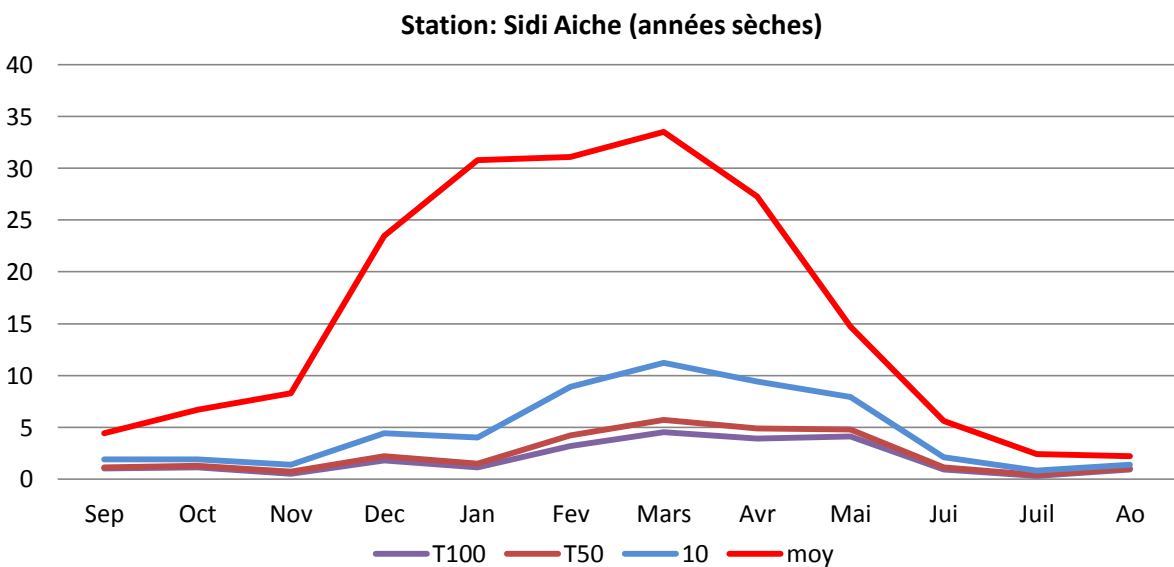


Fig. 44 : Fréquence des débits moyens mensuels à la station Sidi Aiche (années sèches)

La lecture de la période sèche de l'ajustement des débits moyens mensuels à la loi de Galton montre que la période de retour de 10 ans (T10) enregistre déjà un déficit important par rapport à la moyenne (fig. 44). L'importance du déficit diminue avec la longueur de la période de retour. En effet, les courbes cinquantennale et centennale ne se différencient réellement que durant le printemps. Finalement, l'excès de l'humidité et la sévérité de la sécheresse restent conditionnés par l'apport du printemps.

## 2- Stations Sidi Yahia et Maghraoua (sous bassin de Boussellam)

En tenant compte de la différence de la superficie et des précipitations, l'examen des variations des débits moyens mensuels dans les stations de Sidi Yahia et Maghraoua restent similaires. En effet, aux deux stations, le débit du mois de février est le plus fort, avec un débit de 3,53 m<sup>3</sup>/s à la station de Maghraoua et 19,77 m<sup>3</sup>/s à la station de Sidi yahia. Le débit minimal est enregistré au mois d'Aout. Il est de 0,19 m<sup>3</sup>/s à la station de Maghraoua et de 0,70 m<sup>3</sup>/s à la station de sidi yahia (tab. 36).

Tab. 36 : apport et débit liquide mensuel aux stations Sidi Yahia et Maghraoua

Maghraoua (1972/1985)													
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	an
AL (hm <sup>3</sup> )	2,28	1,38	0,67	4,56	5,64	11,3	9,14	7,82	5,99	1,66	0,55	0,49	48,66
QL (m <sup>3</sup> /s)	0,68	0,53	0,26	1,37	2,17	3,53	3,19	3,01	1,54	0,64	0,21	0,19	1,47
Sidi Yahia (1972/1985)													
AL (hm <sup>3</sup> )	5,88	4,58	5,697	19,21	32,80	51,25	45,46	31,19	14,88	6,62	2,72	1,83	216,7
QL (m <sup>3</sup> /s)	2,26	1,770	2,197	7,411	12,65	19,77	17,54	12,02	5,74	2,55	1,04	0,70	6,94

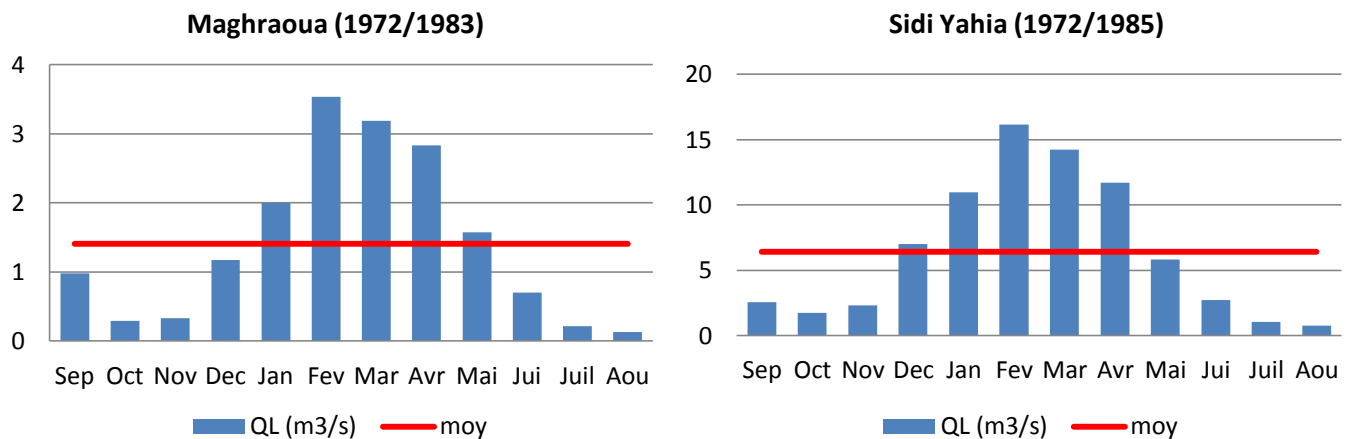


Fig. 45 : débit moyen mensuel aux stations Sidi Yahia et Maghraoua

La période des hautes eaux débute au mois de janvier pour les deux stations. A la station de Sidi Yahia elle s'arrête au mois d'avril pour ne durer que 4 mois. Par contre, à la station de Maghraoua, elle dure 5 mois et ne s'arrête qu'au mois de mai. L'effet des précipitations printanières est beaucoup plus apparent à la station de Maghraoua qu'à la station de Sidi Yahia (fig.45).

Tab.37 : Les coefficients mensuels des débits (CMD) aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua

Station : Sidi Yahia (1972/1985)												
	sep	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	Aou
<b>Max</b>	6,50	7,31	7,27	27,8	31,7	55,4	49,6	34,1	16,0	6,58	3,70	1,74
<b>Min</b>	0,25	0,43	0,53	0,73	1,29	1,26	2,48	2,83	1,81	0,61	0,22	0,29
<b>Ecarte type</b>	1,25	0,32	0,37	1,81	2,19	3,87	3,17	2,47	2,13	0,81	0,52	0,15
<b>Cv</b>	1,29	1,11	1,12	1,54	1,09	1,10	0,99	0,87	1,36	1,16	2,47	1,17
<b>Cmd</b>	0,32	0,24	0,30	0,97	1,73	2,72	2,50	1,71	0,83	0,37	0,14	0,10
Station : Maghraoua (1972/1985)												
<b>Max</b>	4,41	3,90	1,01	10,7	8,32	12,4	10,9	7,27	6,45	2,33	1,83	0,99
<b>Min</b>	0,01	0,02	0,07	0,06	0,12	0,11	0,29	0,24	0,16	0,06	0,0	0,00
<b>Ecarte type</b>	1,17	1,02	0,25	2,75	2,56	3,70	3,18	2,40	1,97	0,76	0,47	0,26
<b>Cv</b>	1,33	1,91	0,98	2,00	1,17	1,16	0,90	0,79	1,28	1,19	2,18	1,40
<b>Cmd</b>	0,60	0,36	0,17	0,93	1,48	2,18	2,41	2,06	1,05	0,43	0,14	0,13

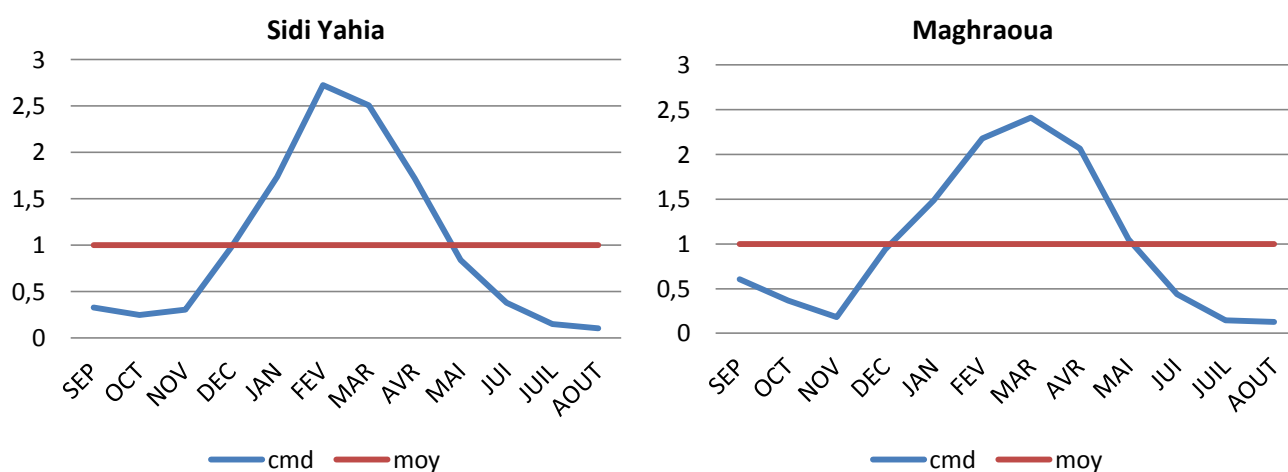


Fig. 46 : Coefficients mensuels des débits (CMD) aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua



## 2.1- Etude fréquentielle des débits moyens mensuels aux stations Sidi Yahia et Maghraoua

Les séries des débits moyens mensuels des deux stations sont trop courtes (13 ans) pour permettre une analyse statistique fiable. Néanmoins, l'ajustement de ces séries à une loi de Galton nous permet de dégager les tendances et surtout la sévérité des périodes sèches dépassant une période de retour de 20 ans. Par ailleurs, nous remarquons une différence d'apport mensuel entre les deux stations. En effet, l'apport des mois automnaux et printaniers sont beaucoup plus importants, durant la période humide, à la station de Maghraoua qu'à la station de Sidi Yahia. Par contre, durant la période sèche la forme des courbes est identique indiquant un apport mensuel similaire dans les deux stations (fig.47.).

Tab. 38 : étude des Fréquence des débits moyens mensuels aux stations Sidi Yahia et Maghraoua

<b>Sidi Yahia (période : 1972/1985)</b>															
	<b>U</b>	<b>F</b>	<b>T</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dec</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mars</b>	<b>Avr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jui</b>	<b>Juil</b>	<b>Ao</b>
<b>Année sèche</b>	-2,327	0,01	100	0,28	0,27	0,43	0,51	0,75	1,81	2,74	2,61	1,42	0,41	0,19	0,23
	-2,054	0,02	50	0,36	0,33	0,51	0,67	1,00	2,33	3,34	3,09	1,65	0,50	0,23	0,26
	-1,282	0,1	10	0,68	0,58	0,85	1,49	2,33	4,83	5,98	5,05	2,58	0,88	0,39	0,37
<b>moy</b>	<b>0</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>2,21</b>	<b>1,67</b>	<b>2,13</b>	<b>6,82</b>	<b>11,93</b>	<b>18,39</b>	<b>17,39</b>	<b>12,14</b>	<b>5,83</b>	<b>2,47</b>	<b>1,03</b>	<b>0,73</b>
<b>Années humide</b>	2,282	0,9	10	9,02	5,84	6,45	36,82	69,60	91,16	62,42	36,61	15,5	8,51	3,23	1,64
	3,054	0,98	50	22,5	13,1	13,2	114,8	232,0	258,2	143,3	73,89	29,2	19	6,80	2,77
	2,327	0,99	100	31,2	17,6	17,1	172,7	357,4	375,2	193,2	95,05	36,7	25,3	8,88	3,34
<b>Maghraoua (période : 1972/1985)</b>															
	<b>U</b>	<b>F</b>	<b>T</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dec</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mars</b>	<b>Avr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jui</b>	<b>Juil</b>	<b>Ao</b>
<b>Années sèche</b>	-2,327	0,01	100	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,14	0,3	0,27	0,06	0,02	0	0,01
	-2,054	0,02	50	0,02	0,01	0,05	0,06	0,08	0,19	0,39	0,35	0,09	0,03	0	0,01
	-1,282	0,1	10	0,08	0,04	0,15	0,16	0,23	0,48	0,82	0,75	0,22	0,09	0,01	0,02
<b>moy</b>	<b>0</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>0,54</b>	<b>0,41</b>	<b>0,25</b>	<b>0,84</b>	<b>2,06</b>	<b>3,42</b>	<b>3,11</b>	<b>2,92</b>	<b>1,33</b>	<b>0,52</b>	<b>0,18</b>	<b>0,13</b>
<b>Années humide</b>	2,282	0,9	10	3,13	2,87	1,25	6,27	15,3	19,33	17,73	15,03	8,07	3,54	1,89	1,18
	3,054	0,98	50	16,5	12,1	10,2 5	23,09	68,3	72,13	52,8	43,7	29,1	12,9	11,8	4,96
	2,327	0,99	100	26,8	20,4	18,2 5	36,87	116	115,7	78,2	64,2	46,1	20,6	22,8	8,3

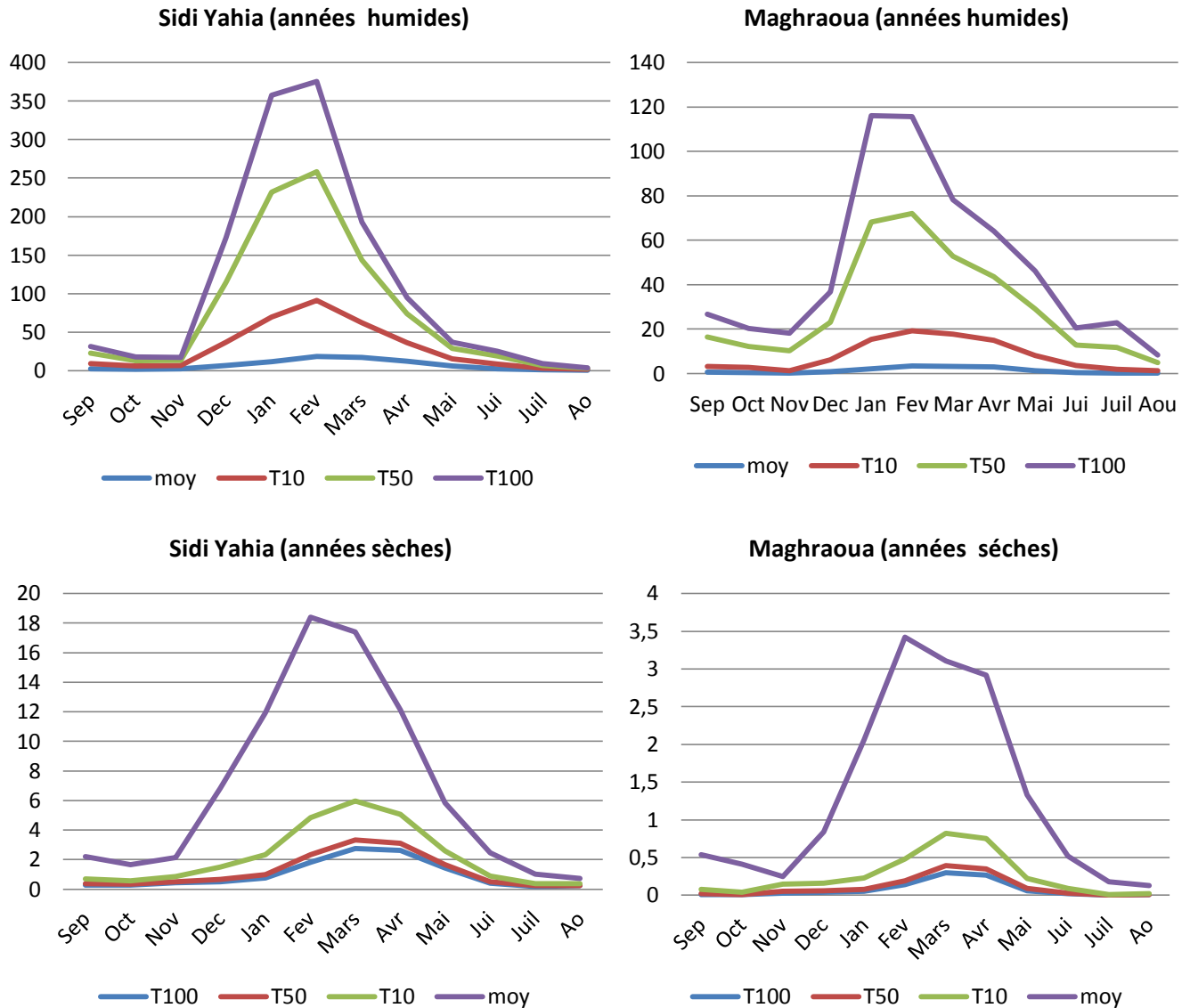


Fig. 47 : Etude fréquentielle des débits moyens mensuels aux stations Sidi Yahia et Maghraoua

### 3- Station Al Asnam

A la déference des deux stations précédentes (Sidi Yahia et Maghraoua), la station d'Al Asnam possède une série suffisamment longue (27 ans) pour permettre une analyse statistique fiable. C'est aussi la seule station représentant la partie amont du bassin versant de la Soummam où le climat semi-aride conditionne la dynamique du milieu et l'abondance de l'écoulement et des ressources en eau. Les débits moyens mensuels (tab.38) montrent un apport important de la période pluvieuse allons de décembre jusqu'au mois de mai indiquant une participation non négligeable des mois printaniers (fig.48).

Tab. 38 : apport et débit liquide mensuel à la station d'Al Asnam

Al Asnam (1966/1993)													
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	An
AL (hm <sup>3</sup> )	0,66	1,06	1,17	1,93	2,98	1,59	2,08	2,00	1,22	0,59	0,36	0,42	<b>16,06</b>
QL (m <sup>3</sup> /s)	0,25	0,40	0,45	0,74	1,15	0,71	0,80	0,77	0,47	0,22	0,14	0,14	<b>0,50</b>

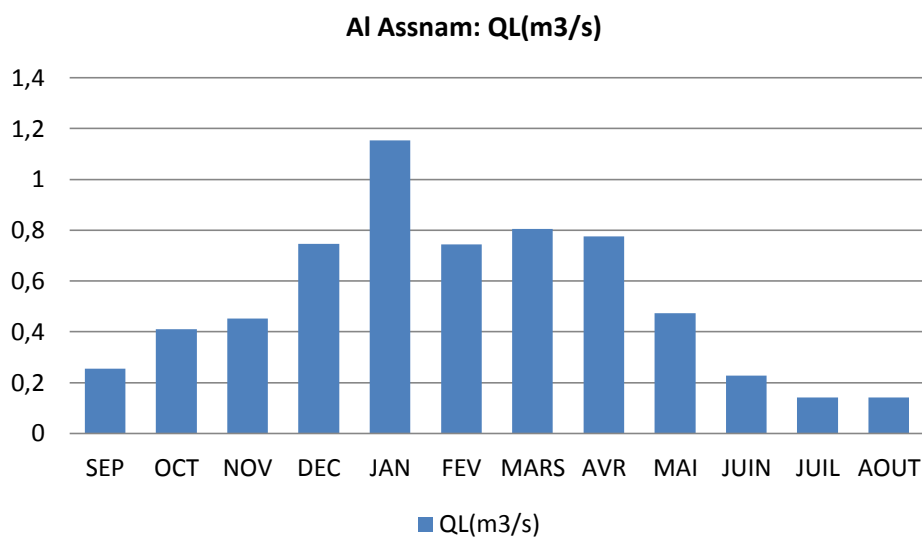


Fig. 48 : débit moyen mensuel à la station d'Al Assnam

La période des hautes eaux dure 5 mois (décembre à avril). L'apport des mois de novembre et de mai reste important. La courbe montre une période de hautes eaux bimodale, le premier pic correspond à l'apport des mois hivernaux et le deuxième pic correspondant à la participation des mois printaniers (fig.48).

Tab. 39 : Les coefficients mensuels des débits (CMD) à la station d'Al Asnam

Station : Al Assnam (1966/1993)												
	sep	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	Aou
<b>Max</b>	1,91	2,72	3,95	5,94	16,1	6,23	3,43	5,35	3,57	1,54	0,70	0,57
<b>Min</b>	0	0	0	0,01	0,05	0,02	0,05	0	0	0	0	0
<b>Ecarte type</b>	0,40	0,66	0,88	1,34	3,13	1,20	0,89	1,21	0,70	0,31	0,18	0,17
<b>Cv</b>	1,58	1,63	1,96	1,80	2,71	1,72	1,11	1,56	1,49	1,37	1,26	1,22
<b>Cmd</b>	0,50	0,81	0,89	1,48	2,29	1,39	1,60	1,54	0,94	0,45	0,28	0,28

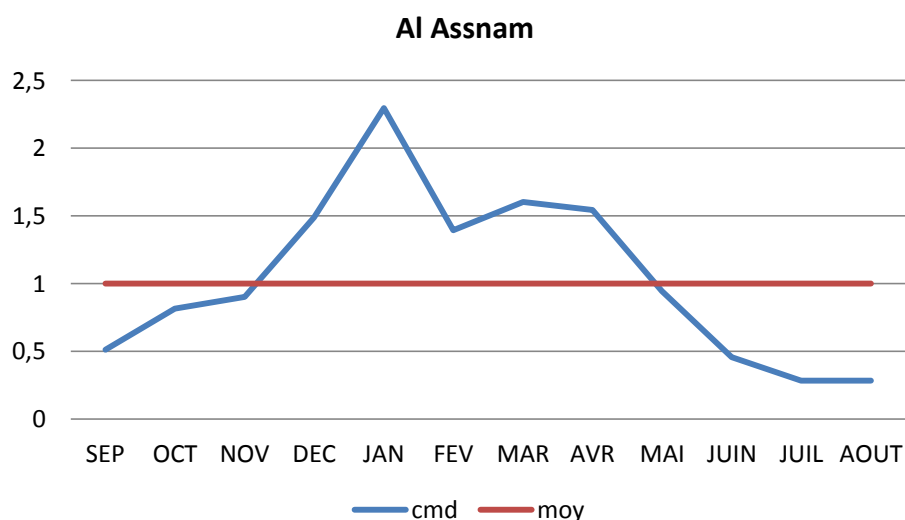


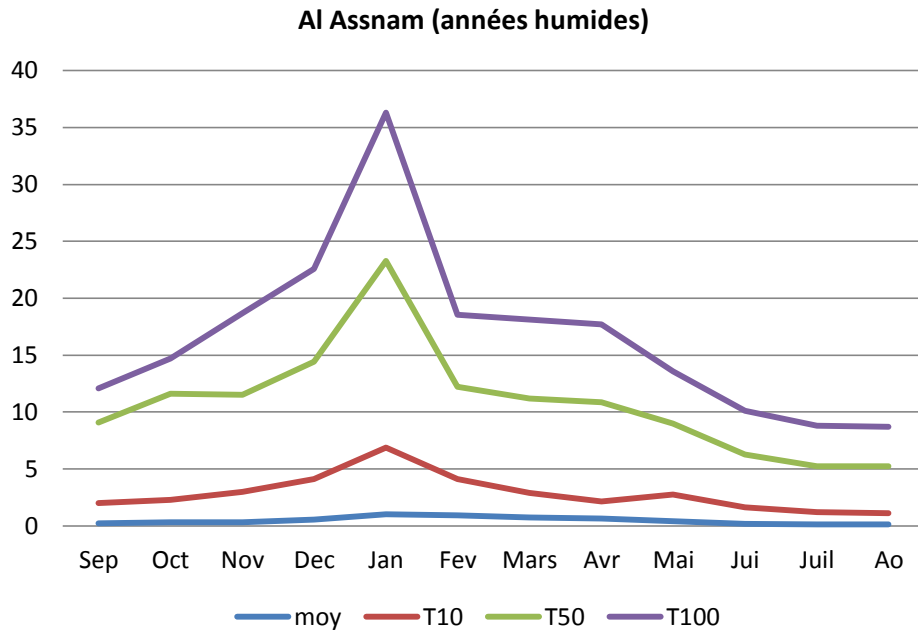
Fig. 49 : Coefficients mensuels des débits (CMD) à la station d'Al Assnam

### 3.1- Etude fréquentielle des débits moyens mensuels à la station El Assnam

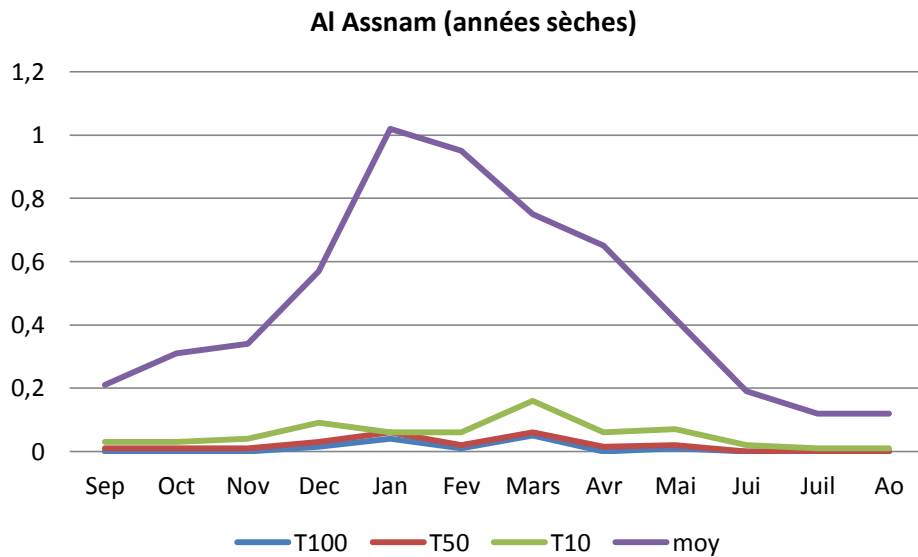
L'ajustement des débits mensuels de la station d'Al Assnam permet de constater que les débits maximum sont enregistrés au mois de janvier quel que soit la période de retour de la période humide. La participation des mois printaniers est déterminante. Les mois automnaux ne se différencient que lors des périodes de retour les plus longues. Aussi, l'apport des mois estivaux est loin d'être négligeable (fig.50). Par contre, la période sèche montre des apports mensuels très pauvres dès la période de retour de 10 ans. Les périodes de retour plus longues se caractérisent par une sécheresse très sévère et montre des courbes difficilement dissociables (fig.51). Il est évident que cette station reflète un milieu semi-aride qui conditionne la pauvreté de l'écoulement dans la partie amont du bassin versant de la Soummam.

Tab. 40 : étude des Fréquence des débits moyens mensuels à la station d'Al Assnam

Al Assnam (période : 1966/1985)															
	U	F	T	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Ao
Années sèche	-2,327	0,01	100	0	0	0	0,015	0,04	0,01	0,05	0	0,01	0	0	0
	-2,054	0,02	50	0,01	0,01	0,01	0,03	0,06	0,02	0,06	0,015	0,02	0	0	0
	-1,282	0,1	10	0,03	0,03	0,04	0,09	0,06	0,06	0,16	0,06	0,07	0,02	0,01	0,01
moy	<b>0</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>0,21</b>	<b>0,31</b>	<b>0,34</b>	<b>0,57</b>	<b>1,02</b>	<b>0,95</b>	<b>0,75</b>	<b>0,65</b>	<b>0,42</b>	<b>0,19</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>
Années humide	2,282	0,9	10	2,03	2,3	2,97	4,11	6,9	4,13	2,9	2,14	2,74	1,63	1,23	1,13
	3,054	0,98	50	9,07	11,6	11,5	14,41	23,3	12,24	11,17	10,87	8,99	6,26	5,23	5,22
	2,327	0,99	100	12,1	14,7	18,7	22,56	36,3	18,55	18,12	17,72	13,6	10,1	8,8	8,7



*Fig. 50 : Etude fréquentielle des débits moyens mensuels à la station El Assnam (années humides)*



*Fig. 51 : Etude fréquentielle des débits moyens mensuels à la station El Assnam (années sèches)*

## 2.3-Variation des écoulements saisonniers

### 1- Station de Sidi Aiche

La station hydrométrique de Sidi Aiche représente la somme des participations des différents sous bassins du grand bassin versant de la Soummam. L'ordre de participation des différentes saisons est HPAE. Néanmoins, l'apport du printemps (39%) est aussi important que l'apport de l'hiver (44%) (fig. 52). Il s'explique essentiellement par la saturation du sol lors de la saison hivernale, car les précipitations printanières dépassent rarement les 25% des précipitations annuelles. L'apport de l'automne (11%) reste très modeste avec la participation de la saison estivale (6%). Par contre, les précipitations automnales qui atteignent les 30% des précipitations annuelles, ne participent qu'à 11% dans l'écoulement annuel moyen. Les pertes par infiltration et par évaporation réduisent considérablement l'écoulement automnal (fig. 52).

Tab. 41 : apport et débit saisonniers à la station de Sidi Aiche

Sidi Aiche (1954/1985)				
Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
AL (mh <sup>3</sup> )	53,78	217,37	197,71	30,26
QL (m <sup>3</sup> /s)	7,02	29,30	25,67	3,91

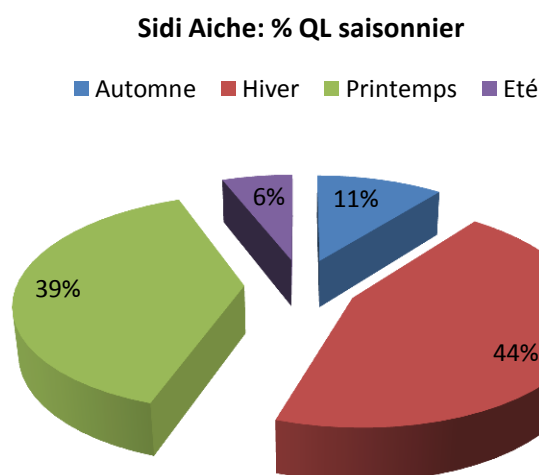


Fig. 52 : pourcentage des débits saisonniers à la station de Sidi Aiche

## 2- Stations de Sidi Yahia et Maghraoua (sous bassin Boussellam)

Ces deux stations qui contrôlent le sous bassin de Boussellam, situées plus au sud par rapport à la station de Sidi Aiche, reflètent plus la continentalité du climat et de ce fait montrent un apport printanier égal et même supérieur à l'apport hivernal. La participation de l'automne et l'été reste, tout de même, modeste (fig. 53).

Tab. 42 : *apport et débit saisonniers des stations aux Sidi Yahia et Maghraoua*

Sidi Yahia (1972/1985)				
Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
AL (mh <sup>3</sup> )	15,92	96,50	92,35	11,51
QL (m <sup>3</sup> /s)	2,02	12,24	11,714	1,46
Maghraoua (1972/1985)				
AL (mh <sup>3</sup> )	4,34	17,47	20,96	2,71
QL (m <sup>3</sup> /s)	0,55	2,24	2,69	0,34

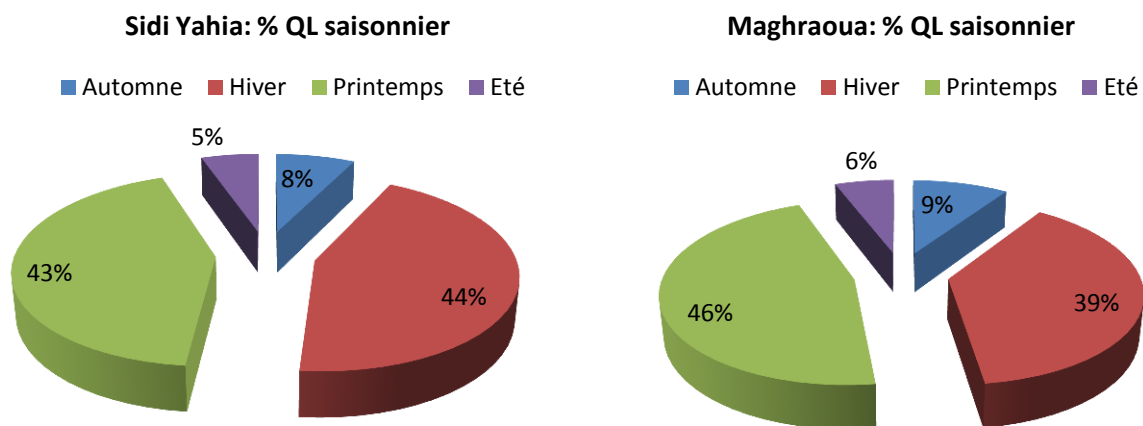


Fig. 53 : *pourcentage des débits saisonniers aux stations de sidi Yahia et Maghraoua*

## 3- Station d'Al Asnam

La station d'Al Asnam qui représente la partie sud du grand bassin versant de la Soummam, montre une participation des saisons estivale et automnale qui atteint les 27%, alors que les précipitations des deux saisons atteignent à peine les 30%. Ainsi, les pertes par infiltration et évaporation restent très limitées. Cette situation s'expliquerait par l'intensité des précipitations et l'imperméabilité des terrains (fig. 54). La transformation des pluies en écoulement se fait avec un minimum de pertes. Le printemps participe avec 34% de l'écoulement annuel en raison d'une saturation du sol durant la saison hivernale (fig.54).

Tab. 43 : apport et débit saisonniers à la station d'Al Assnam

Al Assnam (1966/1993)				
Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
AL (mh <sup>3</sup> )	2,89	6,52	5,31	1,33
QL (m <sup>3</sup> /s)	0,37	0,78	0,68	0,17

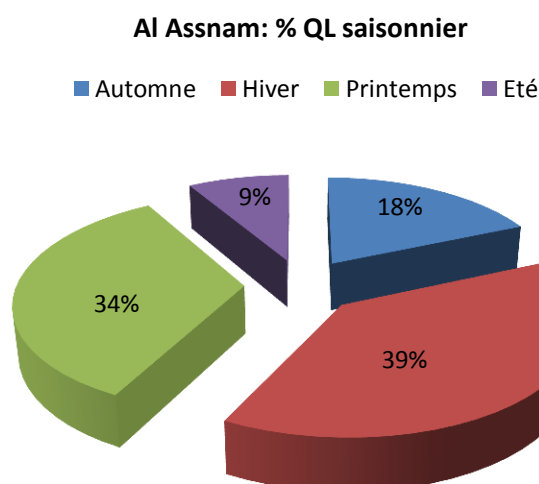


Fig. 54 : Pourcentage des débits saisonniers à la station d'Al Assnam

## 2.4- Variations des 'écoulements journaliers maximum

### 1- Station de Sidi Aiche

Les crues journalières maximales enregistrées à la station de Sidi Aiche, avant la mise en eau des barrages (1985), montrent l'importance des débits, le risque d'inondation dans la vallée et la violence des crues et leurs conséquences sur la géodynamique externe du milieu dans le bassin versant de la Soummam. La crue la plus importante de la série (31 ans) est enregistrée au mois de mars de l'année (1985/1986). Elle correspond à une année humide de période de retour de 140 ans. Seulement, les précipitations moyennes annuelles de cette année (1054 mm) ont une période de retour inférieure à 50 ans. La violence des crues pendant la saison automnale, saison où le sol est dépourvu de végétation et les pluies sont plus agressives, provoque une érosion hydrique très importante (tab. 44).

Tab. 44 : débit maximum journalier à la station de Sidi Aiche

Station de Sidi Aiche : QJ max (m <sup>3</sup> /s)												
Série	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
1954/1985	720	721	802	1196	734	746	1643	600	620	320	263	127



### 1.1- Ajustement des débits journaliers maximum à la station Sidi Aiche à loi de Gumbel

L'ajustement à loi de Gumbel des débits journaliers maximum de la station de Sidi Aiche nous a permis l'évaluation des crues de périodes de retour allant jusqu'à 1000 ans. En effet, le débit évalué pour une crue de période de retour de 10 ans dépasse 1120m<sup>3</sup>/s. par contre, pour la crue de période de retour de 1000 ans le débit est évalué à 2160 m<sup>3</sup>/s (tab. 45).

Tab. 45 : Ajustement des débits journaliers maximum à la station Sidi Aiche à loi de Gumbel

Station de Sidi Aiche : Ajustement QJ max (m <sup>3</sup> /s) loi de Gumbel						
Période de retour (ans)	2	5	10	50	100	1000
Fréquence	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
U Gumbel	0,37	2,25	2,97	3,90	4,60	6,91
QJ max (m <sup>3</sup> /s)	440	935	1124	1369	1553	2160

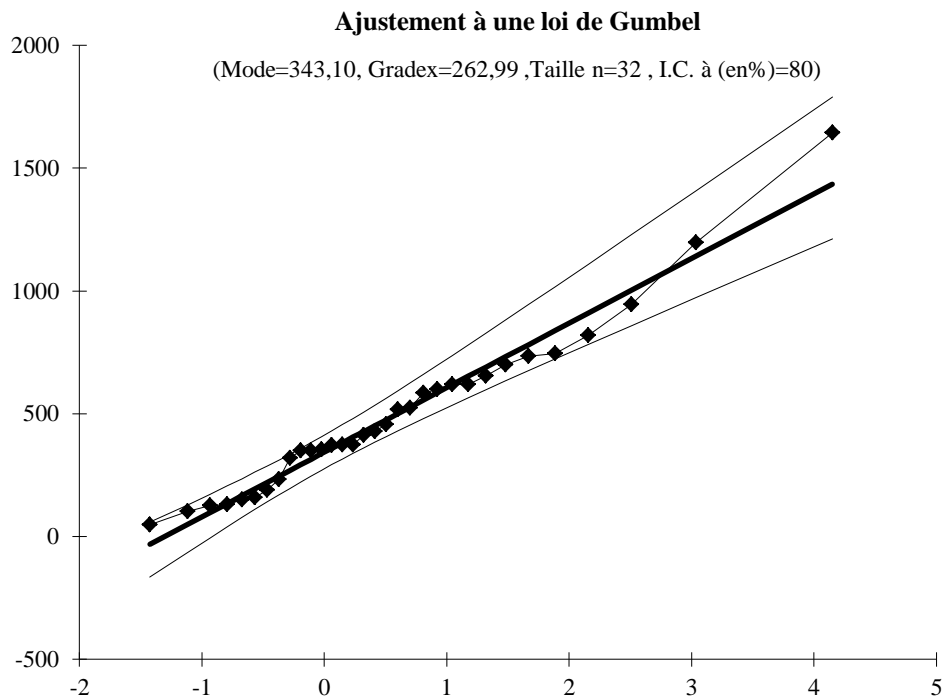


Fig. 55 : Ajustement des débits journaliers maximum à la station Sidi Aiche à loi de Gumbel

### 2- Stations de Sidi Yahia et Maghraoua (sous bassin de Boussellam)

Les crues les plus importantes dans le sous bassin de Boussellam sont enregistrées au mois de mars de l'année (1973/1974) pour la station de Sidi Yahia et le mois de mai de l'année (1975/1976) pour la station de Maghraoua qui contrôle la partie amont du sous bassin de

Boussellam (tab.45). Les crues de l'oued Boussellam ont une grande influence sur le comportement hydrologique de la partie amont de la basse vallée de la Soummam, zone de confluence de l'oued sahel et l'oued de Boussellam.

Tab. 46: débit maximum journalier des stations aus Sidi Yahia et Maghraoua

Station de Sidi Yahia : QJ max (m <sup>3</sup> /s)												
Série	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
1972/1985	902	456,6	70,5	547,6	318,5	445,8	862	298,2	370,6	92,8	95,6	44,22
	Station de Maghraoua : QJ max (m <sup>3</sup> /s)											
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
	185,4	74,35	21,98	80,05	42,6	31,24	105,3	67,9	271,1	202,2	91	50,95

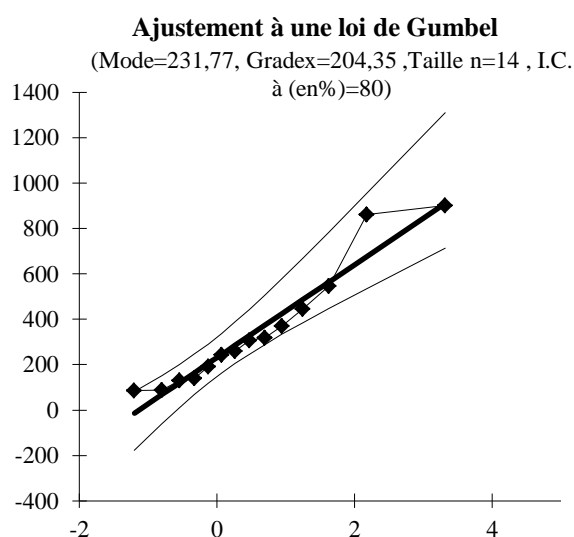
### 2.1- Ajustement des débits journaliers maximum aux stations Sidi Yahia et Maghraoua à loi de Gumbel

L'étude fréquentielle des débits journaliers maximum aux stations Sidi Yahia et Maghraoua à montrer que les crues de période de retour de 100 ans peuvent attendre un débit de 1170 m<sup>3</sup>/s (tab.46. ) dans le sous bassin de Boussellam (station Sidi Yahia) et un débit de 320 m<sup>3</sup>/s (tab. 46.) dans sa partie amont (station Maghraoua).

Tab 47 : Ajustement des débits journaliers maximum aux stations Sidi Yahia et Maghraoua à loi de Gumbel

Station de Sidi Yahia : Ajustement QJ max (m <sup>3</sup> /s) loi de Gumbel						
Période de retour (ans)	2	5	10	50	100	1000
Fréquence	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
U Gumbel	0,37	2,25	2,97	3,90	4,60	6,91
QJ max (m <sup>3</sup> /s)	306,66	691,62	838,72	1029,12	1171,80	1643,26
Station de Maghraoua : Ajustement QJ max (m <sup>3</sup> /s) loi de Gumbel						
Période de retour (ans)	2	5	10	50	100	1000
Fréquence	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
U Gumbel	0,37	2,25	2,97	3,90	4,60	6,91
QJ max (m <sup>3</sup> /s)	88,38	191,43	230,80	281,77	319,96	446,16

### Station : Sidi Yahia



### Station : Maghraoua

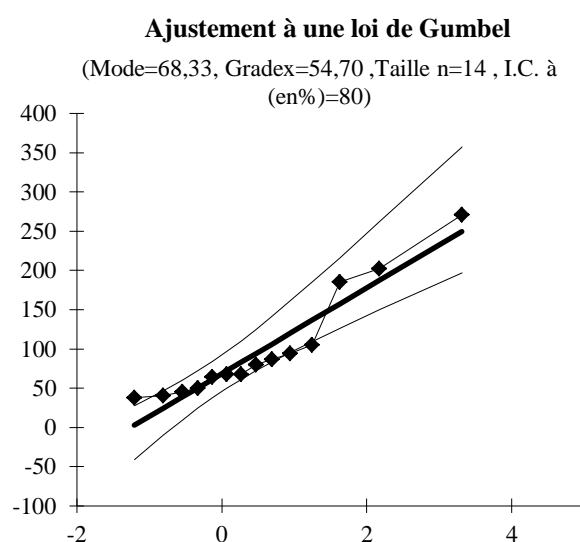


Fig. 56 : Ajustement des débits journaliers maximum aux stations Sidi Yahia et Maghraoua à loi de Gumbel

### 3. Station d'Al Asnam

A la station d'Al Asnam qui se situe dans la partie amont du grand bassin de la Soummam, les crues les plus importantes sont enregistrées durant la saison hivernale. En effet, durant les mois de décembre et janvier de l'année 1970/1971, le débit enregistré est de 274 m<sup>3</sup>/s et 220 m<sup>3</sup>/s respectivement.

Tab. 48 : débit maximum journalier à la station d'Al Asnam

Station d'Al Asnam : QJ max (m <sup>3</sup> /s)												
Série	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
1966/1985	68	168	170,6	274	220	18,54	127,2	34	59,75	18,54	25,8	81,2

#### 3.1- Ajustement des débits journaliers maximum à la station d'El Asnam à loi de Gumbel

L'ajustement des débits journaliers maximum à loi de Gumbel, de la station d'Al Asnam, nous a permis d'évaluer les débits des crues des différentes périodes de retour. La crue de période de retour 100 ans attient un débit de 256 m<sup>3</sup>/s (tab49).

Tab. 49 : Ajustement des débits journaliers maximum à la station d'El Asnam à loi de Gumbel

Station d'Al Assnam: Ajustement QJ max (m <sup>3</sup> /s) loi de Gumbel						
<b>Période de retour (ans)</b>	2	5	10	50	100	1000
<b>Fréquence</b>	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
<b>U Gumbel</b>	0,37	2,25	2,97	3,90	4,60	6,91
<b>QJ max (m<sup>3</sup>/s)</b>	37,80	135,09	172,26	220,38	256,43	375,57

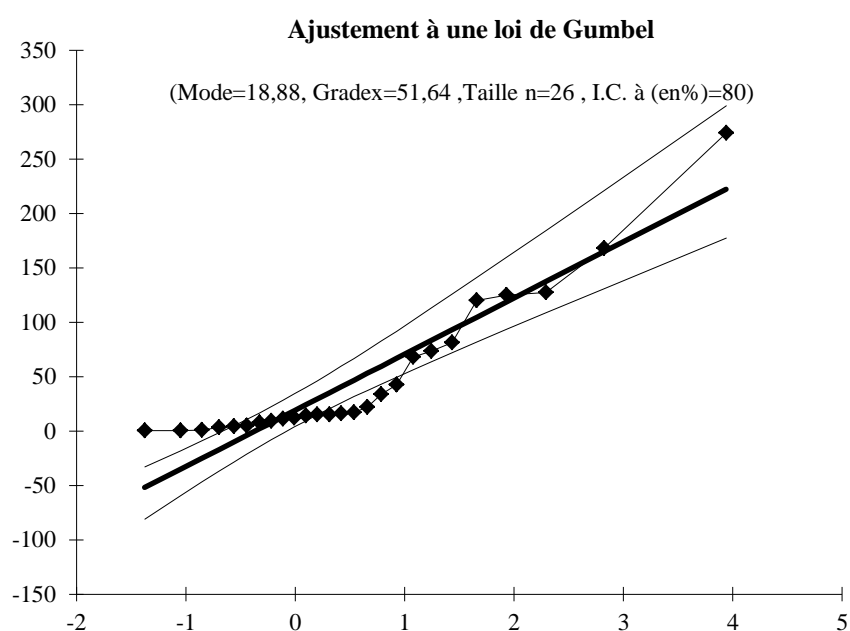


Fig. 57 : Ajustement des débits journaliers maximum à la station d'El Asnam à loi de Gumbel

### 3- Variation des écoulements après les aménagements hydrauliques

Les séries de mesures disponibles de la période des écoulements (après les aménagements hydrauliques) sont très courtes (7 ans pour la station de Sidi Aiche et 10 ans pour les stations Sidi Yahia et Maghraoua) mais ont l'avantage d'être de la même période

#### 3.1- Variation des écoulements annuels moyens

##### 1- Station de Sidi Aiche

La série des mesures que nous disposons (1985/1992) relative à la période après les aménagements hydrauliques, mesure malheureusement l'effet de deux barrage seulement (Ain zada et Lakhel mises en eau en 1985). Les mesures de cette période montrent que l'oued

Soummam enregistre un débit de 8,37 m<sup>3</sup>/s seulement l'équivalent d'un apport annuel de 264,2 hm<sup>3</sup>/an

Tab.50 : apport liquide annuel à la station de Sidi Aiche (1985/1992)

Station de Sidi Aiche : série (1985/1992)		
Année	QL (m <sup>3</sup> /s)	AL (hm <sup>3</sup> /an)
1985-1986	14,91	470,20
1986-1987	9,33	294,29
1987-1988	6,11	192,97
1988-1989	8,97	283,16
1989-1990	2,78	87,69
1990-1991	8,52	268,94
1991-1992	7,99	252,17
<b>moy</b>	<b>8,37</b>	<b>264,20</b>

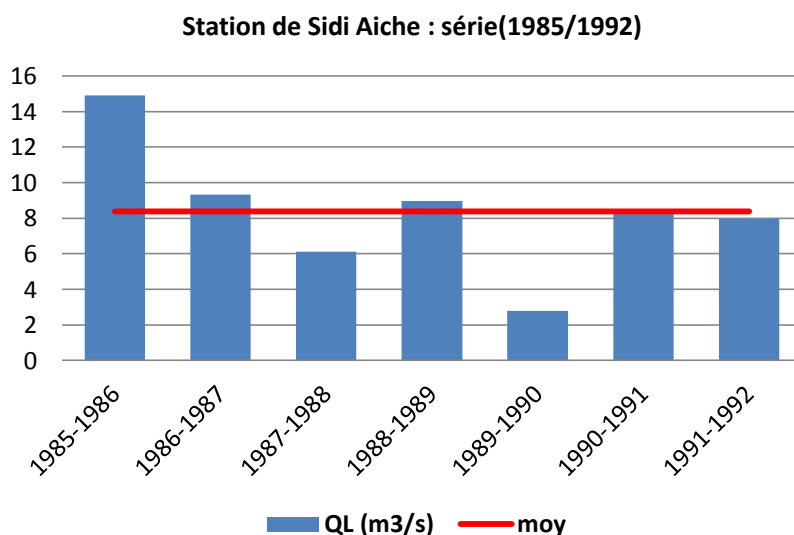


Fig. 58 : débit moyen annuel à la station sidi Aiche (1985/1992)

## 2- Stations de Sidi Yahia et Maghraoua (Sous bassin de Boussellam)

Après la mise en eau du barrage d'Ain Zada, le débit moyen annuel à la station de Maghraoua n'est que de 0,41 m<sup>3</sup>/s. Cependant, il augmente progressivement vers l'aval à sidi yahia (4,46 m<sup>3</sup>/s). Durant l'année humide de 1994/1995, la station de Maghraoua enregistre un débit de 0,91 m<sup>3</sup>/s. par contre la station de Sidi Yahia enregistre durant l'année 1985/1986 son débit le plus fort (11,56m<sup>3</sup>/s).

L'année 1987/1988 est une année très sèche pour la station Maghraoua avec un débit inférieur à 0,06 m<sup>3</sup>/s. Le débit le plus faible enregistré à la station de Sidi yahia durant l'année 1989/1990 ne dépasse pas 1,14m<sup>3</sup>/s.

Tab.51 : apport liquide annuel des stations aux Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)

Année	Station de Maghraoua (1985/1995)		Station de Sidi yahia (1985/1995)	
	QL (m <sup>3</sup> /s)	AL (hm <sup>3</sup> )	QI (m <sup>3</sup> /s)	AL (hm <sup>3</sup> )
<b>1985-1986</b>	0,30	9,74	11,56	306,59
<b>1986-1987</b>	0,88	27,76	9,85	287,09
<b>1987-1988</b>	0,06	2,07	1,34	113,91
<b>1988-1989</b>	0,32	10,09	3,61	36,10
<b>1989-1990</b>	0,27	8,58	1,14	81,50
<b>1990-1991</b>	0,29	9,36	2,61	88,41
<b>1991-1992</b>	0,33	10,66	2,81	142,36
<b>1992-1993</b>	0,56	17,93	4,50	35,35
<b>1993-1994</b>	0,11	3,67	1,27	185,35
<b>1994-1995</b>	0,91	28,93	5,88	109,18
<b>moy</b>	<b>0,41</b>	<b>12,89</b>	<b>4,46</b>	<b>138,58</b>

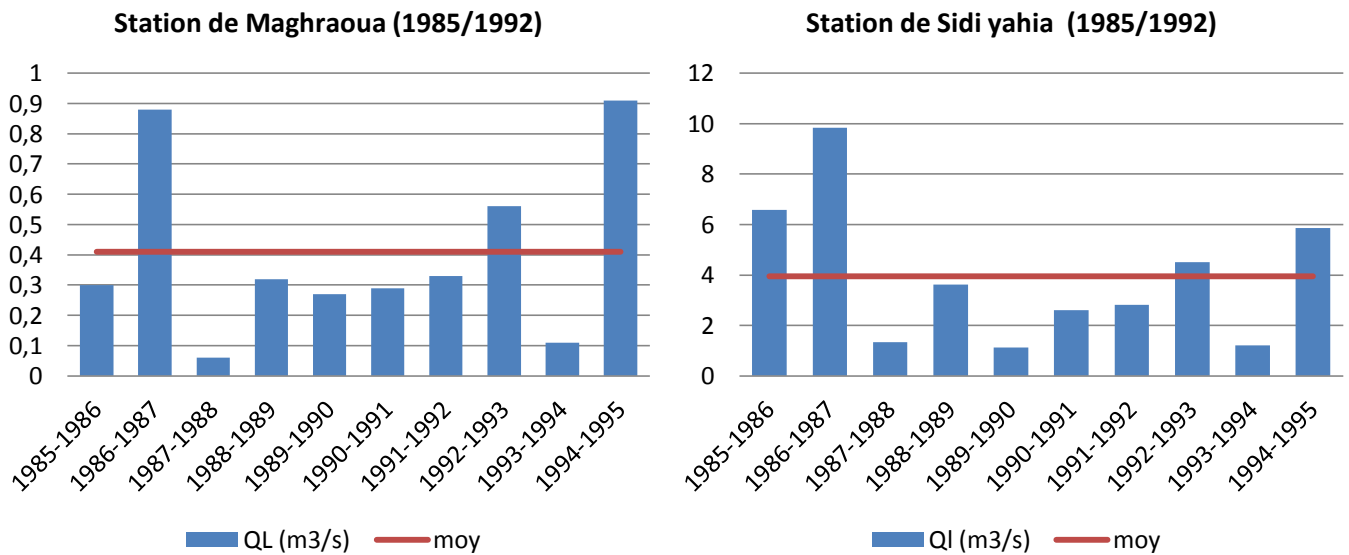


Fig. 59 : débit moyen annuel des stations aux Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)

### 3.2- Variation des écoulements mensuels moyens

#### 1- Station de Sidi Aiche

La série de mesures que nous disposons (1985/1992) à la station de Sidi Aiche ne permet pas une analyse fiable de la variation mensuelle des écoulements. Néanmoins, nous considérons que la période de 7 ans (1985/1992), traduit plus ou moins fidèlement la variation mensuelle des débits à la station de Sidi Aiche après la mise en eau des deux barrages Lakhel et Ain Zada (1985). Le débit mensuel maximum est enregistré durant le mois de mars avec 22,13 m<sup>3</sup>/s. Par contre, le débit minimum est enregistré au mois d'aout avec seulement 1,88 m<sup>3</sup>/s (tab.52).

Tab. 52 : apport liquide mensuel à la station de Sidi Aiche (1985/1992)

Station : Sidi Aiche (1985/1992)													
Année	SEP	OC	NO	DEC	JAN	FEV	MA	AVR	MAI	JUI	JUIL	AO	An
AL (hm <sup>3</sup> /an)	116,6	84,51	106,5	457,5	324,5	305,2	697,8	530,7	286,6	124,5	59,91	59,28	264
QL (m <sup>3</sup> /s)	3,70	2,68	3,38	14,51	10,29	9,68	22,13	16,83	9,09	3,95	1,90	1,88	8,37

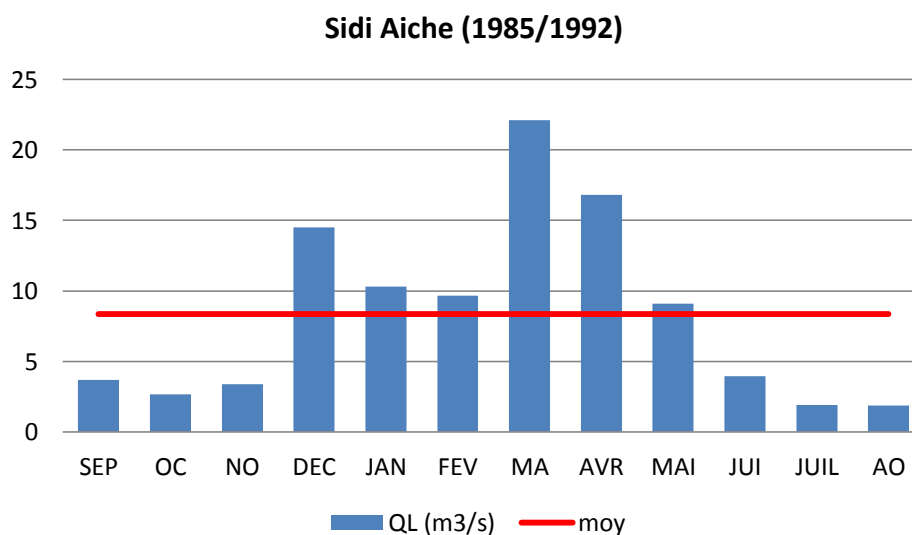


Fig. 60 : débit mensuel à la station de Sidi Aiche (1985/1992)

## 2- Stations de Sidi Yahia et Maghraoua

Nous considérons que la période de 10 ans (1985/1995), traduit plus ou moins fidèlement la variation mensuelle des débits aux deux stations (Maghraoua et Sidi yahia) après la mise en eau du barrage d'Ain Zada (1985). Le mois le plus humide est représenté par le mois de mars, avec une valeur moyenne mensuelle maximale de 0,99 m<sup>3</sup>/s pour la station de Maghraoua et de 11, 20 m<sup>3</sup>/s, pour la station de Sidi yahia. La valeur minimale du débit est de 0.08 m<sup>3</sup>/s au niveau à la station de Maghraoua enregistrée au mois de juillet et la valeur de 0.57m<sup>3</sup>/s, au niveau de la station de sidi Yahia, enregistrée au mois d'Aout (tab. 53).

Tab. 53 : apport liquide mensuel aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)

Station : Sidi Yahia (1985/1995)													
Mois	SEP	OC	NO	DEC	JAN	FEV	MA	AVR	MAI	JUI	JUIL	AO	An
AL (hm <sup>3</sup> /an)	3,88	4,01	3,86	15,05	27,11	21,82	29,03	16,51	9,25	4,14	2,41	1,47	138,6
QL (m <sup>3</sup> /s)	1,5	1,55	1,49	5,81	10,46	8,42	11,2	6,37	3,57	1,6	0,93	0,57	4,46
Station : Maghraoua (1985/1995)													
AL (hm <sup>3</sup> /an)	12,29	7,253	4,415	15,76	26,80	22,07	31,22	14,19	8,514	3,15	2,52	4,73	12,89
QL (m <sup>3</sup> /s)	0,39	0,23	0,14	0,50	0,85	0,70	0,99	0,45	0,27	0,10	0,08	0,15	0,41

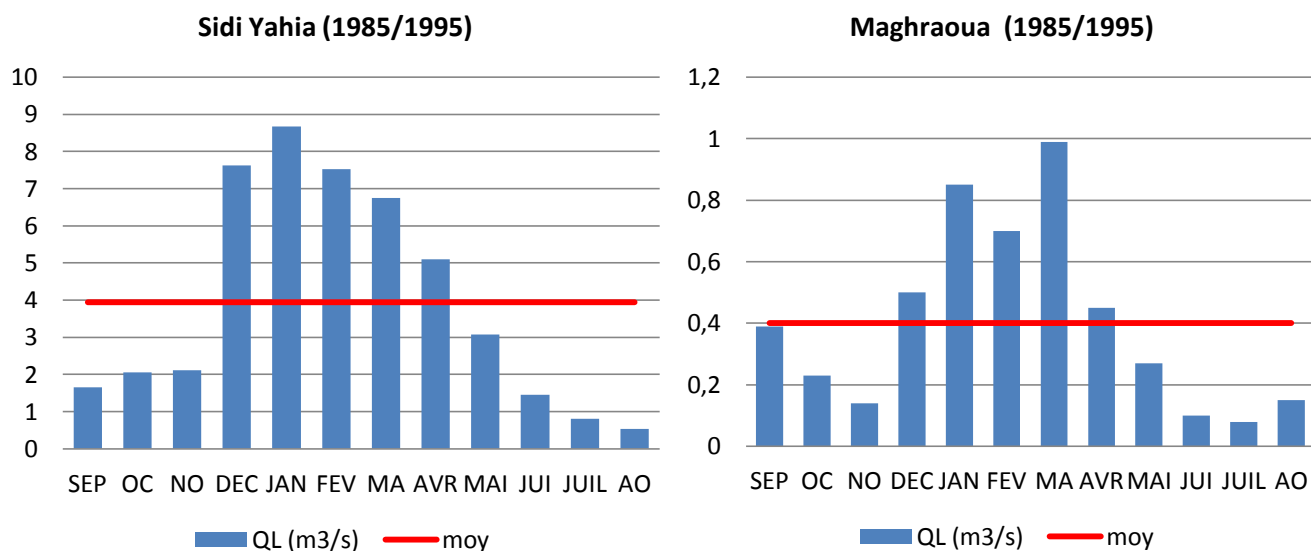


Fig. 61 : débit mensuel aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)

### 3.3- Variation des écoulements saisonniers

#### 1- Station de Sidi Aiche

L'analyse des écoulements saisonniers à la station de Sidi Aiche de la période (1985/1995), montre que 48% de l'apport annuel du bassin versant de la Soummam est enregistré en printemps (fig. 62)

Tab. 54: apport et débit saisonnier à la station de Sidi Aiche (1985/1992)

Sidi Aiche (1985/1992)				
Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Été
AL (mh <sup>3</sup> )	24,76	91,64	128,03	20,38
QL (m <sup>3</sup> /s)	3,26	11,50	16,02	2,58



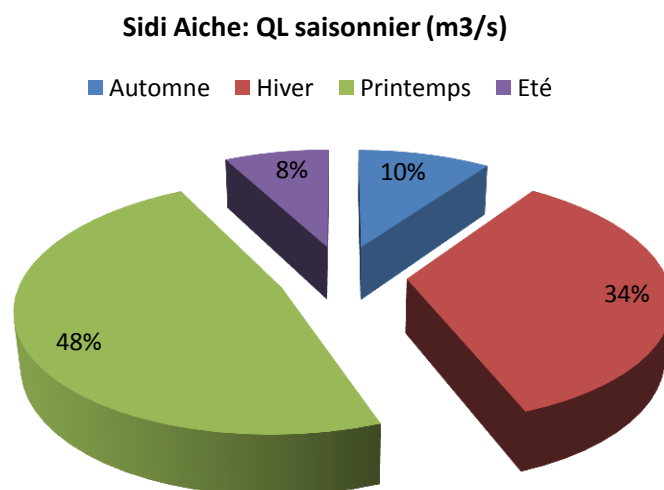


Fig. 62 : pourcentage des débits saisonnier à la station de sidi Aiche (1985/1992)

## 2- Stations de Sidi Yahia et Maghraoua (sous bassin de Boussellam)

L'analyse des écoulements saisonniers des stations de Sidi Yahia et Maghraoua de la période (1985/1995), montre que 49% de l'apport annuel du sous bassin de Boussellam est enregistré en hiver (station de Sidi Yahia). À la station de Maghraoua, la saison hivernale assure 42% de l'apport annuel de la partie amont du sous bassin.

Tab. 55 : apport et débit saisonniers aux stations Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)

<b>Sidi Yahia (1985/1995)</b>				
<b>Saisons</b>	<b>Automne</b>	<b>Hiver</b>	<b>Printemps</b>	<b>Été</b>
AL (mh <sup>3</sup> )	11,75	63,98	54,79	8,02
QL (m <sup>3</sup> /s)	1,51	8,23	7,04	1,03
<b>Maghraoua (1985/1995)</b>				
AL (mh <sup>3</sup> )	2,02	5,44	4,52	0,90
QL (m <sup>3</sup> /s)	0,26	0,69	0,57	0,11

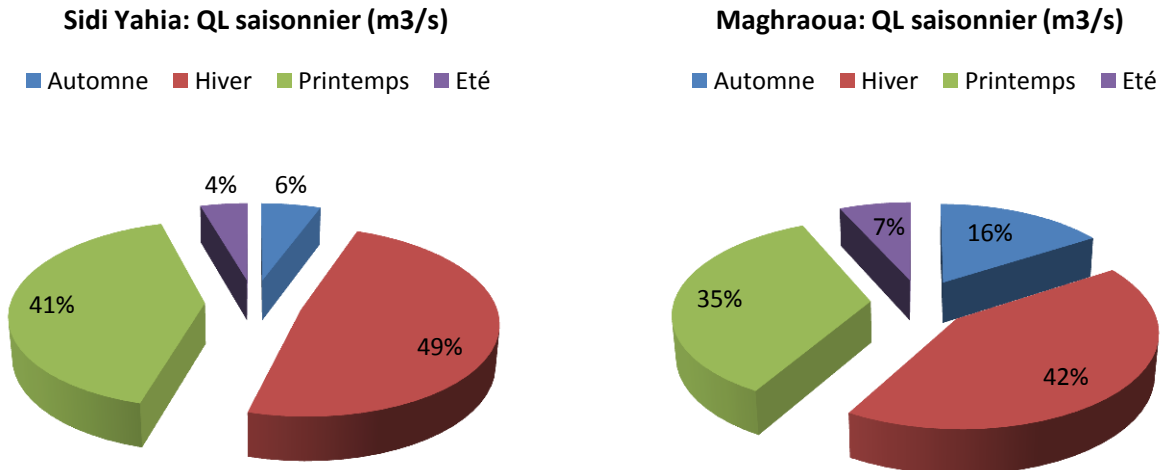


Fig. 63 : pourcentage des débits saisonniers aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)

#### 4- Comparaison des séries des apports liquides des stations avant et après la mise en eau des deux premiers barrages (Ain Zada, Lakhel)

Le manque de données des apports liquides enregistrés aux différentes stations ne permet pas une analyse détaillée du comportement hydrologique des différents sous bassins sous l'influence des aménagements hydrauliques. De ce fait, nous nous sommes contentés de récapituler dans un tableau ( tab. 56) les apports enregistrés aux différentes stations avant et après la mise en eau des deux premiers barrages. il est à signaler que la deuxième série d'enregistrement s'arrête avant l'achèvement de la construction des deux derniers barrages (1992) en l'occurrence les barrages de Tilesdit et Tichy Haf mis en eau respectivement en 2004 et 2007.

La comparaison des pertes des différents apports à l'échelle annuelle confirme la perte enregistrée à la station de Sidi Aiche (47%). Aussi, les pertes à l'échelle des saisons reflètent le comportement hydrologique des sous bassins et l'impact de la mise en eau des deux premiers barrages. En effet, la saison automnale constitue le début de la période de remplissage des barrages d'où le maximum de perte en apport liquide (tab. 56). La saison hivernale (période des hautes eaux) montre une perte minimale car elle permet le remplissage du barrage suivi de déversements réduisant les pertes à leur minimum. Par contre, les pertes printanières en apport liquide, repartent en hausse en raison de la baisse de l'apport liquide et l'augmentation de la demande particulièrement pour l'irrigation. Cette demande s'accroît durant la saison estivale qui montre des pertes de plus en plus importantes (tab. 56).

Tab. 56 : Comparaison des séries des stations avant et après 1985 (année de la mise en eau des barrages)

Comparaison des séries des stations avant et après 1985 (année mise en eau des barrages)					
Stations		Écoulement Avant 1985	Écoulement Après 1985	Écoulement Après 1985 (%)	
<b>Sidi Aiche</b>	QL annuel (m <sup>3</sup> /s)	16,00	8,37	53	
	AL annuel (hm <sup>3</sup> /an)	499,13	264,20		
	QL saisonnier (m <sup>3</sup> /s)	Automne	7,02	3,26	46
		Hiver	29,30	11,50	39
		Printemps	25,67	16,02	62
	Été	3,91	2,58	65	
<b>Sidi Yahia</b>	QL annuel (m <sup>3</sup> /s)	6,94	3,95	52	
	AL annuel (hm <sup>3</sup> /an)	216,77	124,70		
	QL saisonnier (m <sup>3</sup> /s)	Automne	2,02	0,89	74
		Hiver	12,24	7,66	67
		Printemps	11,71	6,49	60
	Été	1,46	0,71	69	
<b>Maghraoua</b>	QL annuel (m <sup>3</sup> /s)	1,47	0,41	32	
	AL annuel (hm <sup>3</sup> /an)	48,66	12,89		
	QL saisonnier (m <sup>3</sup> /s)	Automne	0,55	0,26	47
		Hiver	2,24	0,69	30
		Printemps	2,69	0,57	21
	Été	0,34	0,11	32	

## 5- Ressources hydriques du bassin versant de la Soummam

### 5.1- Estimation de la ressource en eau de surface selon l'ANRH

Dans le cadre des études d'actualisation du plan national de l'eau (PNE), l'ANRH a procédé à une évaluation des potentialités en eau de surface du bassin versant de la Soummam, par sous bassin (fig. 06 ). Ce travail se base sur la grille des écoulements moyens annuels on utilisant les couches SIG des 10 sous bassins. En effet, les sous bassins des Oueds Eddous, Boussellam moyen et Soummam Maritime présentent les apports les plus importants avec respectivement 112, 144 et 212 Hm<sup>3</sup>/an (tab.57).

Tab. 57 : Volume régularisé par sous bassin versant

Code SBV	Nom SBV	Apport Hm <sup>3</sup> /an
1501	O, Eddous	111,8
1502	O, Zaïane	44,9
1503	O, Sahel Amont	45,8
1504	O, Azerou	36,3
1505	O, Sahel Aval	44,9
1506	O, Bou Sellam Amont	41,7
1507	O, Bou Sellam Moyen	144,3
1508	O, El Main	62,4
1509	O, Bou Sellam Aval	21,8
1510	O, Soummam Maritime	212,2
<b>Total</b>		<b>766,1</b>

Nous remarquons que cette évaluation surestime l'apport annuel moyen pour la majorité des sous bassins d'où un apport global qui dépasse l'apport annuel enregistré à la station de Sidi Aiche de 35%. Il est à noter que l'évaluation de l'ANRH intègre la partie aval de la station de Sidi Ache qui atteint les 683km<sup>2</sup> (PNE 2011).

## 5.2- Ressource en eau souterraine

La mobilisation de la ressource en eau souterraine se fait par forages, puits et sources naturelles qui captent les principales nappes du bassin.

Selon les directions de l'hydraulique des wilayas (DHW) de Bejaia, Sétif, Bordj Bou Arreridj et Bouira, le bassin versant de la Soummam compte 310 forages dont 259 sont actuellement en exploitation. Le volume exploité est de 179,30Hm<sup>3</sup>/an ; répartie comme suit (tab. 58) :

- 170 forages affectés à l'alimentation en eau potable, produisant 88,3 Hm<sup>3</sup>/an
- 69 forages alloués à l'irrigation produisant 75 hm<sup>3</sup>/an
- 20 forages utilisés par l'industrie, exploitant 16 hm<sup>3</sup>/an.
- 24 forages sont à l'arrêt, dont 12 abandonnés et 27 non équipés.

Tab. 58 : répartition des forages du bassin de la Soummam par wilaya

Wilaya	Nombre de forage	Volume produit hm <sup>3</sup> /an	Affectation hm <sup>3</sup> /an		
			Eau potable	irrigation	industrie
Bouira	12	2.3	2.3	0	0
Bejaia	207	145	60	71	14
B.B.A	29	7	5	2	0
Sétif	47	25	21	2	2
<b>Total</b>	<b>310</b>	<b>179.3</b>	<b>88.3</b>	<b>75</b>	<b>16</b>

## 5.2.1- Répartition et caractéristiques des aquifères du Bassin Versant de la Soummam

### - La Basse Soummam

La nappe de la basse Soummam est comprise entre la ville de Sidi Aiche au sud-ouest, et la ville de Bejaia au nord-est.

La nappe aquifère est constituée par deux formations, les alluvions Quaternaire, reposant sur une formation beaucoup plus grossière, constituée par des galets, des graviers et des sables d'âge Miocène. Le modèle ANRH/SOGREAH, évalue la recharge à 59512 m<sup>3</sup>/jour, soit 21,7 Hm<sup>3</sup>/an.

### - La Haute et Moyenne Soummam

Cette nappe constitue le prolongement de la Haute Soummam vers le nord-est. La nappe est constituée par des alluvions Quaternaire, et les conglomérats Miocène sous-jacents. Leur épaisseur est comprise entre 30 m (M'Chadallah, Takriete) et 150 m à Akbou. Ces dépôts couvrent une superficie de 120 km<sup>2</sup>. Sa recharge est évaluée à 136 389 m<sup>3</sup>/jour (soit 49, 782 Hm<sup>3</sup>/an). A ce volume il faut ajouter les ressources en eau de la nappe de l'oued Sahel qui n'ont pas été intégrés dans le modèle ANRH (2010) dont le volume exploitable est estimé à 13,3 Hm<sup>3</sup>/an. Ainsi, la recharge totale de la nappe alluviale de la Soummam (Haute, Moyenne, et Basse Soummam) est de 21. 6+49. 8+13.3 = 84.7 Hm<sup>3</sup>/an.

### - La plaine d'El Asnam

Le plateau d'El Asnam est situé à environ 15 km à l'Est de Bouira.

La nappe d'une superficie de 22 km<sup>2</sup>, est constituée par les poudingues et conglomérats du Miocène, ainsi que par les alluvions du Quaternaire (fig. 64). Sa ressource exploitable est estimée à 1 Hm<sup>3</sup>/an.

### - La plaine de Sétif

La plaine de Sétif comprend en fait plusieurs plaines, généralement appelées, hautes plaines sétifiennes, comprenant toutes les plaines qui entourent la ville de Sétif. Sa superficie est de 3752,4 km<sup>2</sup> (fig. 64).

L'analyse des données géologiques montre l'existence de plusieurs systèmes aquifères formés par :

- Les remplissages alluviaux, et les conglomérats du Pliocène,
- Les calcaires lacustres du Pliocène,
- Les calcaires de l'Eocène inférieur,
- Les calcaires du Crétacé.

Les ressources en eau de la plaine de Sétif ont été estimées à 123 Hm<sup>3</sup>/an (ANRH/ENERGOPROJEKT-2009).

### - Le karst du djebel Arrasa

Le djebel Arrasa est situé dans le bassin de la Soummam, à la limite des wilayas de Bejaia et Sétif (fig. 64). Sa superficie est de 18,1 km<sup>2</sup>. Les formations aquifères sont constituées par les calcaires et dolomie du Jurassique, que l'on retrouve dans la région de Timezrit, au sud de la

vallée de la Soummam. Le volume de la ressource exploitable est évalué à 1,36 Hm<sup>3</sup>/an ANRH/ENERGOPROJEKT (2009).

- **La plaine de Bouira**

Le plateau de Bouira est situé, comme son nom l'indique, dans la wilaya de Bouira. Sa superficie est de 79,5 km<sup>2</sup>. Elle renferme deux nappes aquifères :

- Une nappe phréatique constituée par des sables, des graviers, et des galets d'âge Quaternaire, d'une épaisseur ne dépassant pas 10 m.
- Une nappe profonde, formée de poudingues et de graviers avec passages argileux, attribués au Miocène. L'épaisseur des dépôts est comprise entre 20 et 60 m. Ses ressources exploitables sont de l'ordre de 10,4 Hm<sup>3</sup>/an (ANRH/ENERGOPROJEKT.2009).

- **La plaine des Aribis**

La plaine des Aribis est située à environ 25 km à l'ouest de Bouira. Sa superficie est de 146,8 km<sup>2</sup> (fig. 64). L'aquifère de la plaine des Aribis est constitué par les formations du Quaternaire, représentées par des sables et des galets en continuité avec les poudingues d'âge miocène. L'estimation la plus récente des ressources en eau de la plaine des Aribis (11,3 Hm<sup>3</sup>/an) a été faite par l'ANRH/ENERGOPROJEKT (2009).

- **Les Calcaires du Djurdjura**

La chaîne du Djurdjura est délimitée au sud par le plateau de Bouira, et à l'est par la vallée de l'Oued Soummam. Sa superficie est de 201 km<sup>2</sup>. La série sédimentaire est constituée par une puissante ossature d'écaillés carbonatées d'environ 400m d'épaisseur, attribuée au Lias inférieur, et par 200m de calcaires nummulitiques du Lutétien.

Les principaux aquifères sont représentés par les calcaires dolomitiques du Lias inférieur, et de l'infra-Lias. Ce sont des formations constituées de couches fissurées et karstifiées. Selon S. Ramdane (1995) la karstification est très développée, et les calcaires sont parsemés d'avens et de dolines, qui facilitent l'infiltration. La base de données de l'ANRH fait état de l'existence de 700 sources, d'un débit inférieur à 20 l/s. Quelques sources ont cependant des débits supérieurs à 400 l/s. Les ressources exploitables ont été estimées par l'ANRH/ Energoprojekt (2009) à 20,4 Hm<sup>3</sup>/an.

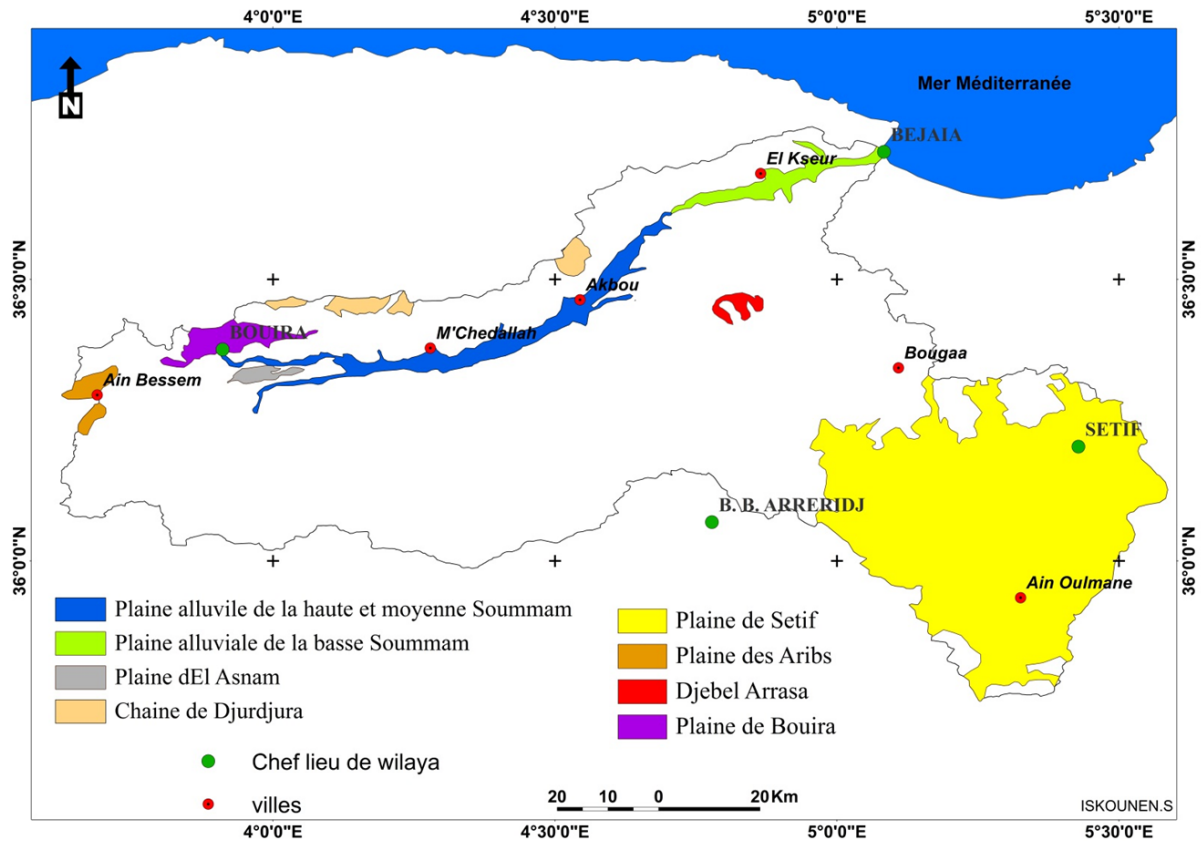


Fig. 64 : Cartes des aquifères de la Soummam

## 6- Mobilisation de la ressource en eau de surface

Avec une surface de 9125 km<sup>2</sup> le bassin versant de la Soummam présente un apport de 766 hm<sup>3</sup>/an. Environ 50% de sa surface est contrôlé par les quatre barrages en exploitation. Elle offre un apport annuel de 332,8 Hm<sup>3</sup>

La capacité initiale de ces barrages s'élève à 404 Hm<sup>3</sup>, sous l'effet de l'envasement, selon le dernier levé bathymétrique (2014), cette capacité voisine les 370 Hm<sup>3</sup>. Actuellement ces barrages régularisent un volume qui atteint parfois 319 hm<sup>3</sup>/an. (Tab. 59)

### 6.1- Caractéristiques des barrages du B.V Soummam

- **Barrage AIN ZADA** : Situé à une vingtaine de km à l'ouest de Sétif, Cet ouvrage est destiné à l'AEP des agglomérations de Ain Taghrout, Bir Kasdali, Sidi Embarek, Bordj Bou Arreridj, Medjana, Hasnaoua/ Beni Hocine, Bougaa, Ain Arnat, Setif, El Eulma, Guidjel
- **Barrage LAKHEL** : Se situe en amont du bassin de la Soummam, contrôle un bassin versant de 193 km<sup>2</sup> à l'amont du barrage de Tilesdit. Cet ouvrage est destiné à l'AEP des agglomérations de Sour El Gouzlane, Ain Bessam, El Hachemia et à l'irrigation du périmètre des Arrifs.

- **Barrage TILESDDIT** : Situé à l'aval du Barrage de Lakhel, il contrôle un bassin versant de 846 km<sup>2</sup> (649 km<sup>2</sup> en déduisant le bassin versant du barrage de Lakhel avec un volume utile de 164.6 Hm<sup>3</sup> égal à 2 fois ses apports (82 Hm<sup>3</sup>), cet ouvrage régularise entre 67 à 87 Hm<sup>3</sup> grâce aux apports dérivés à partir des prises de Zaiane, Babar et Berd. Cet ouvrage est destiné l'AEP de Bouira, et à l'irrigation des périmètres Tilesdit amont et de la vallée du Sahel
- **Barrage TICHY HAF** : Avec un volume utile de 81.8 Hm<sup>3</sup> cet ouvrage régularise entre 115 et 164 Hm<sup>3</sup>. Il est destiné à :
  - Alimenté en eau potable du Couloir : Akbou - Bejaia (590.000 hab.) : 47 hm<sup>3</sup>/an.
  - Irrigation Plaine du Sahel et Basse Soummam (6 400 ha) : 43 hm<sup>3</sup>/an.
  - Il fait aussi fonction d'écrêter de crues de l'oued Boussellam

*Tab. 59 : Caractéristiques des barrages du B.V Soummam*

<b>Barrage</b>	<b>Oued</b>	<b>Cap. Initiale (Hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Année mise en eau</b>	<b>Surf. (BV) (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Apports moyens annuels (Hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume régularisable (Hm<sup>3</sup>/an)</b>
<b>Ain zada</b>	Boussellam	125	1986	2 080	64,6	54.5
<b>Lakhel</b>	Lakhel	30	1985	193.1	15,8	12,5 à 13
<b>Tilesdit</b>	Eddous	167	2004	649.2	82	65 à 87,5
<b>Tichy Haf</b>	Boussellam	82	2007	1 727	170,4	115 à 164
<b>Total</b>		<b>404</b>		<b>4649,3</b>	<b>332,8</b>	<b>247 à 319</b>



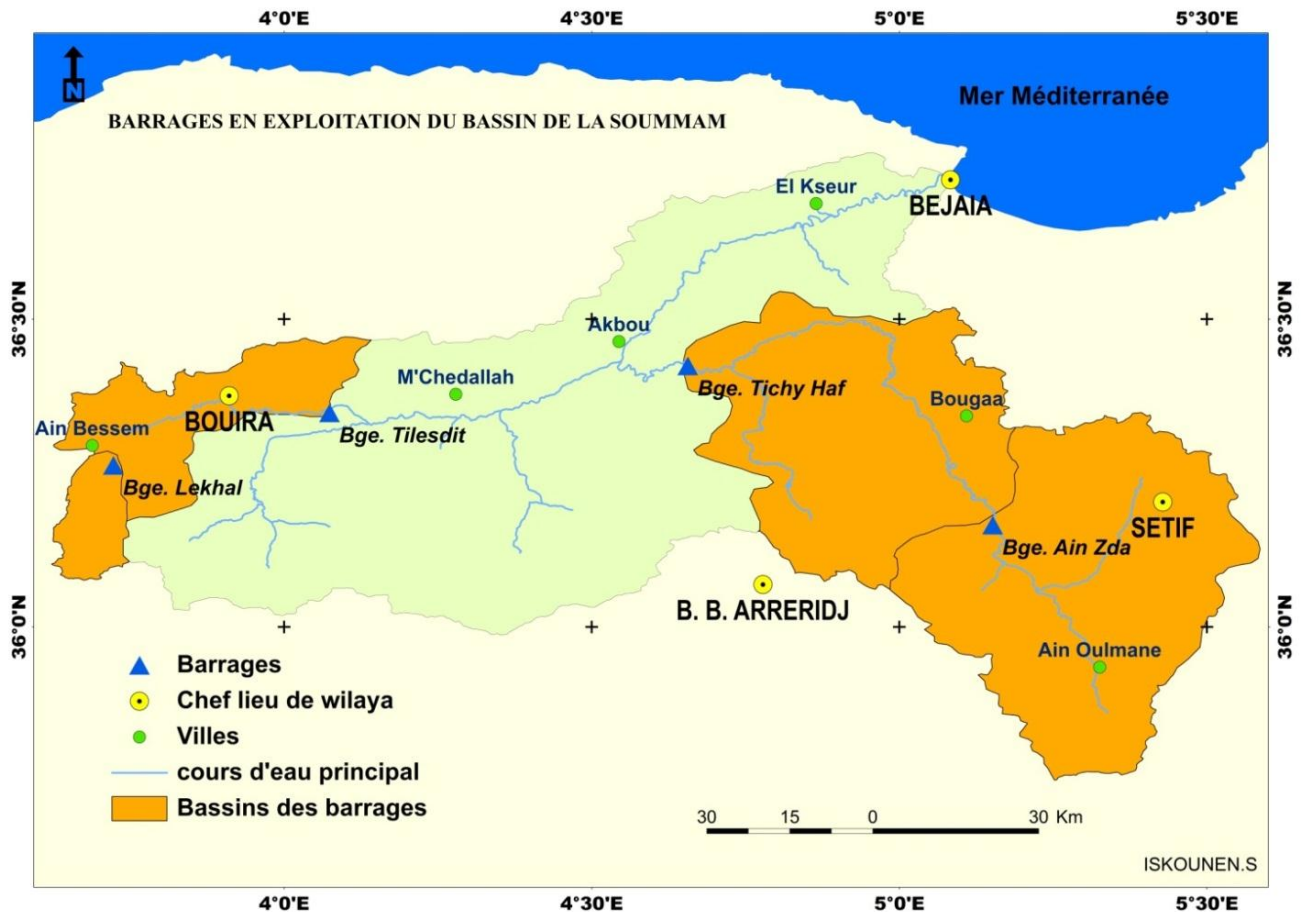


fig. 65 : Localisation des barrages en exploitation du bassin de la Soummam

## 6.2- L'effet de l'ensemble des barrages sur l'écoulement dans bassin de la Soummam

L'exploitation des données lacunaires enregistrées au niveau des barrages nous permet de déduire successivement l'effet des deux premiers barrages (Lakhel et Ain Zada) qui arrivent à retenir 47% de l'apport annuel de l'oued Soummam, sachant que la somme des capacités des deux barrages n'attend que 155 hm<sup>3</sup>. De ce fait, nous déduisons que l'exploitation des deux barrages nécessite le remplissage plus d'une fois par année. Cependant, la mise en eau des deux autres barrages (Tichy Haf et Tiledit) n'ont pu retenir annuellement que 30% de leur capacité. Ainsi, leur ponction de l'apport annuel de la Soummam ne dépasse pas les 70 hm<sup>3</sup>/an, soit 14%. Il est à noter que le rythme d'exploitation des barrages diffère d'une année à l'autre, selon les besoins des secteurs économiques et notamment le secteur agricole.

Tab. 60 : effet de l'ensemble des barrages sur l'écoulement dans bassin de la Soummam

<b>L'effet de l'ensemble des barrages sur l'écoulement dans bassin de la Soummam</b>						
<b>Apport (Avant la construction des barrages)</b>		<b>Sous bassins aménagés</b>		<b>Sous bassins non aménagés</b>		<b>Écoulement (Après la construction des barrages)</b>
Station : Sidi Aiche		Surface km <sup>2</sup>	Apports (Hm <sup>3</sup> /an)	Surface km <sup>2</sup>	Apport Hm <sup>3</sup> /an	Apport actuel du bassin Hm <sup>3</sup> /an
Surface km <sup>2</sup>	Apport Hm <sup>3</sup> /an					
<b>8420</b>	<b>500</b>	<b>4649</b>	<b>333</b>	<b>3771</b>	<b>167</b>	<b>229</b>

## 7- Conclusion

L'apport annuel moyen de l'oued Soummam enregistré à la station de Sidi Aiche est de 500 hm<sup>3</sup>. La variabilité de l'écoulement est assez importante. L'étude fréquentielle annuelle et mensuelle montre le risque de sécheresse et d'inondation dans la vallée de la Soummam. Cette situation était considérée comme un handicap pour tout développement de la vallée. Ainsi, des aménagements hydrauliques ont été proposés afin de subvenir aux besoins en eau nécessaires pour les différentes activités économiques et de protéger les installations humines des risques d'inondations. Quatre barrages ont été construits durant la période 1985-2007. Ils mobilisent environ 400 hm<sup>3</sup>. Ils retiennent plus de 65% de l'apport annuel moyen de la Soummam. Cette situation, nous a obligé d'étudier le comportement hydrologique du bassin versant de la Soummam en deux périodes : la première s'intéresse à la période avant les aménagements (écoulement naturel). La deuxième étudie la période après les aménagements qui se caractérise par une anthropisation très importante et un écoulement artificiel. Ces aménagements hydrauliques ont finalement perturbé le réseau des stations hydrométrique existant d'où des séries de mesures lacunaires et courtes. Cette situation ne favorise pas un traitement statistique fiable. Néanmoins, ces données nous ont permis d'étudier avec précision les sous bassin contrôlés par des stations hydrométriques et de déduire certaines caractéristiques des sous bassins non contrôlés. Ce manque de données est resté un handicap important particulièrement concernant le transport solide et l'érosion hydrique.

# **Chapitre IV**

## **Flux sédimentaire : mesures et estimation**

## **1- Introduction :**

L'érosion hydrique en Algérie a été de tout temps un souci majeur pour les services concernés. Les travaux récents s'accordent pour estimer l'érosion à l'Ouest, centre et Est algérien respectivement à 47%, 27% et 26 % de l'ensemble des terres (Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire 2000). Aussi, la perte annuelle de la capacité de l'ensemble des barrages est de  $20.10^6 \text{ m}^3$  (Remini. B. 1999).

De par sa situation, dans le Nord-est algérien (rive Sud de la méditerranée), le bassin versant de la Soummam subit une érosion hydrique intense à très intense par endroit. En effet, l'agressivité des pluies affecte la quasi-totalité du bassin versant et notamment sa partie Nord-est. Les formations géologiques qui se caractérisent par une grande hétérogénéité, montrent, dans leur majorité, une sensibilité (vulnérabilité) importante à l'érosion hydrique. Aussi, l'action anthropique est loin d'être négligeable. En effet, le développement du bassin a nécessité jusqu'à présent la construction de quatre barrages d'une capacité globale d'environ  $400 \text{ Mm}^3$  (Etude d'actualisation du PNE Algérie 2011).

L'estimation globale du transport solide en suspension à la station de Sidi Aiche (92% du bassin versant de la Soummam), est de  $4,6.10^6$  tonnes. Avec cette perte en terre, la Soummam se classe, dans le Nord algérien, parmi les bassins subissant une dégradation moyenne (DAMMAK 1982).

Les stations hydrométriques qui contrôlent le bassin versant sont insuffisantes et mal réparties d'où l'impossibilité de quantifier l'apport de plusieurs sous bassins. Cette situation se complique progressivement avec l'impact des barrages construits à partir de 1985 (Ain Zada) et l'octroi d'autorisation pour l'installation de sablières au niveau de l'oued Soummam et la partie amont de l'oued Sahel (1983). Ainsi, dans ce chapitre, nous avons scindé les séries de mesures en deux périodes (1972/1982 ; 1982/ 1992).

Aussi, afin de pouvoir estimer l'apport de chaque sous bassin, nous avons opté pour l'utilisation de l'équation universelle de perte de terre (Wischmeier et Smith 1978).

## **2- Evaluation du transport solide en suspension dans le bassin versant de la Soummam**

Afin d'évaluer le transport solide en suspension dans le bassin versant de la Soummam, nous avons préféré de ne pas effectuer une extension des données hydrométriques car il semble préférable de baser notre analyse sur des données réellement observées et non théoriquement extrapolées, d'autant plus que l'étendue des échantillons et la forte irrégularité du régime hydrologique des bassins ne justifient guère une telle opération

L'étude du transport solide en suspension est basée sur les mesures instantanées des débits liquides ( $Q_L$ ), donnés en  $\text{m}^3/\text{s}$ , mesurés aux différentes stations. A chaque mesure effectuée correspond une charge de matière en suspension obtenue à partir d'échantillons d'eau prélevés sur les rives de l'oued au moyen d'un conteneur de 50cl. La boue recueillie sur un papier filtre est pesée après séchage à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 30 minutes. On détermine ensuite la charge correspondante à un litre d'eau prélevé, ce qui établit la concentration, donnée en g/l. La fréquence des prélèvements effectués dépend de la variation de la hauteur

d'eau. En période de crue, à chaque variation de 10 cm de hauteur d'eau, on prélève un échantillon. En période normale on effectue un prélèvement tous les deux jours. Le calcul du débit solide en suspension est basé sur la mesure du débit liquide de l'écoulement (Aïcha El Mahi et al 2012) :

$$Q_{SS} = C Q_L$$

$Q_{SS}$  : Débit solide en suspension (kg/s)

$Q_L$  : Débit liquide ( $m^3/s$ )

$C$  : Concentration (turbidité) (g/l).

**Remarque :** Si les sédiments en suspension étaient uniformément distribués dans la section du cours d'eau, un échantillon prélevé à n'importe quel point dans la section donnerait une mesure de la concentration moyenne des sédiments suspendus. Mais cette concentration connaît une variabilité spatiale et temporelle. En effet, la concentration en sédiments varie le long d'une section de mesure, du fond du cours d'eau vers la surface et d'un instant à l'autre. La principale difficulté de mesure des concentrations réside donc dans le prélèvement d'un échantillon qui représente fidèlement l'écoulement ; d'où le caractère approché de cette méthode.

Dans ce chapitre, nous traiterons le transport solide sur la base de l'apport liquide estimé et des mesures de la concentration (turbidité) à l'échelle journalière, au niveau des stations. Nous essayons de calculer l'apport solide aux échelles annuelle, mensuelle et saisonnière.

La station de Sidi Aiche est la dernière station avant l'embouchure. Elle contrôle 92% de la surface total du bassin versant de la Soummam. Ainsi, l'exploitation de ses données reste indispensable dans l'étude du transport solide en suspension dans le bassin versant de la Soummam d'autant plus qu'elle possède la série la plus longue de toutes les stations du bassin versant de la Soummam (1954/1992).

### **3- Variations des apports solides à la station Sidi Aiche (périodes 1975/1982 ; 1982/1992)**

Lors du traitement des données d'écoulement, et en raison des aménagements hydrauliques installés à partir de 1985, Nous avons scindé les données disponibles en deux séries distinctes (1972/1982 ; 1982/ 1992), soit deux fois 10 années d'observations. Aussi, la disponibilité des mesures sur la concentration, nous a permis d'extraire le TSS équivalent en utilisant la corrélation débits liquides – débits solides (fig. 66) avec un coefficient de corrélation significatif ( $R=0,69$ ). Ainsi, la loi obtenue est de la forme :

$$Q_s = 3,432 Q_L^{1,226} \text{ ( fig. 66).}$$

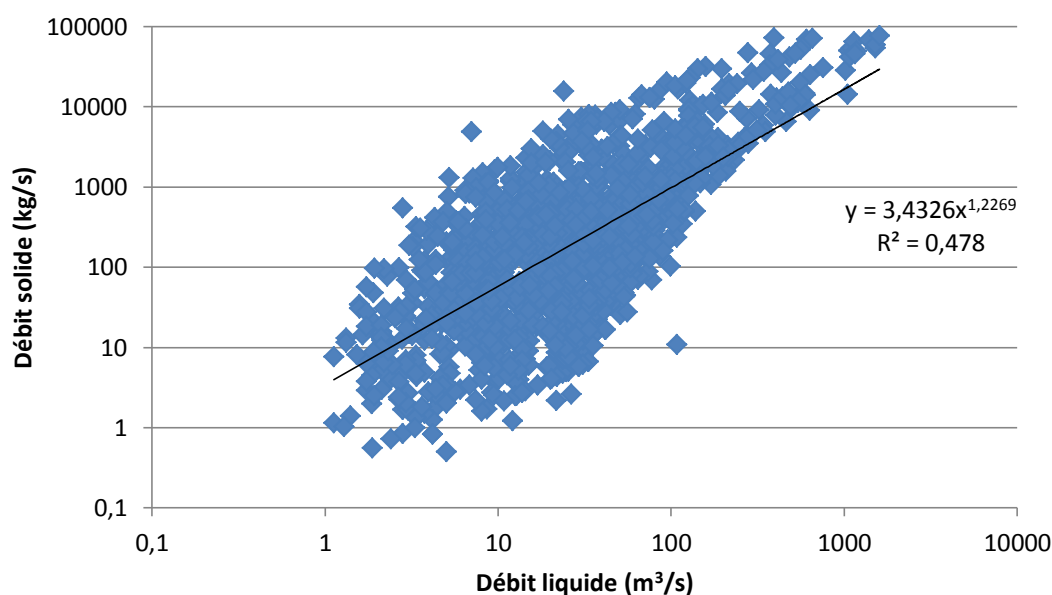


Fig.66 : Relation débits liquides-débits solides à la station de Sidi Aiche

- **variations annuelles des apports solides**

Il est à noter que les échantillons sont pris durant les basses eaux quotidiennement. Par contre, Au moment des crues, les prélèvements sont intensifiés d'où un pas de temps réduit. Cependant, le transport solide enregistré est essentiellement engendré durant les périodes de crues.

Le tableau ci-dessous présente les apports solides et la dégradation spécifique au niveau de la station de Sidi Aiche durant les périodes 1972/1982 et 1982/1992.

Tab. 61: apports solides et transport solide spécifique au niveau de la station de Sidi Aiche.

<b>Station SIDI AICHE : variations annuelles des apports solides (surface 8420) km<sup>2</sup></b>					
<b>Période 1972/1982</b>			<b>Période 1982/1992</b>		
<b>Année</b>	<b>Apport solide (tonne/an)</b>	<b>transport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)</b>	<b>Année</b>	<b>Apport solide (tonne/ an)</b>	<b>transport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)</b>
1972-1973	13923920	1650,89	1982-1983	4947841,83	587,43
1973-1974	10487727	1239,63	1983-1984	2960327,4	351,32
1974-1975	1468907,2	174,1	1984-1985	4159939,92	493,35
1975-1976	5458260,2	644,91	1985-1986	2610108,3	309,81
1976-1977	2881599,4	340,92	1986-1987	2023538,42	239,47
1977-1978	1840949,2	217,92	1987-1988	1357118,08	160,26
1978-1979	1465104,4	173,36	1988-1989	1826307,64	216,28
1979-1980	2016371,3	234,66	1989-1990	491578,35	58,34
1980-1981	3118028,1	370,31	1990-1991	1889073,93	224,28
1981-1982	3612890,6	429,08	1991-1992	1969550,36	233,56
<b>Moyen</b>	<b>4627375,74</b>	<b>547,58</b>	<b>Moyen</b>	<b>2423538,42</b>	<b>287,51</b>

<b>Min</b>	<b>1465104,40</b>	<b>173,36</b>	<b>Min</b>	<b>491578,35</b>	<b>58,34</b>
<b>Max</b>	<b>13923920</b>	<b>1650,89</b>	<b>Max</b>	<b>4947841,83</b>	<b>587,43</b>

Le tableau 61 regroupe les valeurs annuelles des apports solides et des dégradations spécifiques au niveau de la station Sidi Aiche pendant la durée d'observation allant de 1972 à 1982 et de 1982 à 1992. Ces mesures varient d'une année à l'autre en relation avec les changements qui caractérisent l'occupation du sol, les précipitations et les écoulements.

Les données enregistrées durant la période 1972/1982 (avant tout aménagement hydraulique) à la station de Sidi Aiche (8400Km<sup>2</sup>) montrent que l'oued Soummam, charrie annuellement un apport solide en suspension de l'ordre de  $4,6.10^6$  tonnes.

Les valeurs des apports solides spécifiques pour cette période, varient entre un minimum de 173,36 et un maximum de 1650,89 t/km<sup>2</sup>/an, soit une moyenne de 547,58t/km<sup>2</sup>/an (tab. 61).

Pour la période 1982/1992, qui correspond à la période de début d'exploitation des sédiments au niveau des lits des oueds (13 sablières) et la construction des deux premiers barrages (Ain Zada et Lakhel) dans le bassin, l'apport solide moyen annuel enregistré à la station de Sidi Aiche est de  $2,4.10^6$  tonnes. La dégradation spécifique varie de 58,34 à 587,43 t/km<sup>2</sup>/an, soit une moyenne de 287,51t/km<sup>2</sup>/an (tab.61).

On remarque qu'après la mise en eau des deux premiers barrages, le transport solide enregistré à la station de Sidi Aiche atteint à peine 52% de l'apport avant tout aménagement hydraulique.

#### - **variations mensuelles des apports solides**

Les valeurs mensuelles de la charge en suspension et les apports solides, révèlent une forte variabilité mensuelle. Les enregistrements de la charge en suspension durant la période 1972/1982, à l'échelle mensuelle de l'oued Soummam, indique que c'est au mois de janvier que les apports solides atteignent leurs maximums. Par contre, durant la période 1982/1992, c'est au mois de mars qu'on enregistre l'apport le plus important.

Le déplacement de l'apport solide mensuel maximal du mois de janvier, durant la première période, vers le mois de mars durant la deuxième période s'explique par le fait qu'après la mise en eau des barrages, l'apport solide est conditionné par le déversement.

Cependant, les valeurs minima pour les deux périodes sont enregistrées au mois d'Aout.

Tab. 62 : Valeurs mensuelles de transport solide spécifique et apports solides à la station de Sidi Aiche durant les deux périodes.

Station Sidi Aiche : variations mensuelles des apports solides (surface 8420 km <sup>2</sup> )					
période 1972/1982			période 1982/1992		
Mois	Apport solide (tonnes/mois)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /mois)	Mois	Apport solide (tonnes/mois)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /mois)
SEP	75754,27	8,76	SEP	45291,57	5,38
OCT	164634,99	18,93	OCT	68284,14	8,11
NOV	179097,34	20,59	NOV	117529,92	13,96
DEC	611393,18	70,18	DEC	412441,20	49,00
JAN	811920,14	93,19	JAN	248161,73	29,48
FEV	661422,37	75,92	FEV	361667,52	42,97
MAR	803979,40	92,28	MAR	659354,71	78,34
AVR	653042,25	74,97	AVR	284673,39	33,82
MAI	343447,73	37,82	MAI	135233,30	15,61
JUI	106015,05	12,21	JUI	53544,76	6,36
JUIL	36040,00	4,19	JUIL	19355,17	2,29
AOUT	30543,93	3,56	AOUT	18000,96	2,13

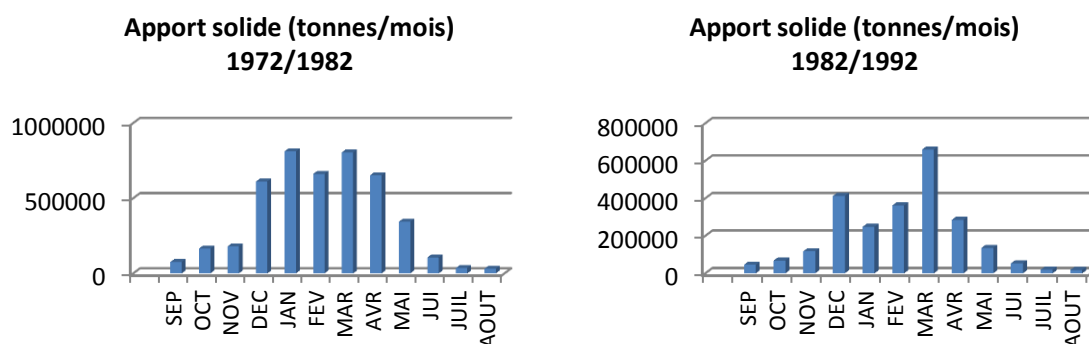


Fig. 67: apports solides (tonnes/mois) à la station de Sidi Aiche pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).

- **variations saisonnières des apports solides**

C'est en hiver qu'on enregistre les forts écoulements qui engendrent les plus importants apports en suspension. En effet, durant la période 1972/1982, l'oued Soummam véhicule 47% de son apport solide annuel durant la saison hivernale. Cependant, elle n'atteint que 42% pendant la seconde période (fig. 68).

L'automne survient après une saison sèche. Les pluies d'octobre et de novembre arrachent de grandes quantités de sédiments. Seulement, le volume de l'écoulement reste modeste d'où un



apport solide limité. Aussi, malgré une concentration élevée, la saison d'été reste une saison sèche avec un apport solide très limité (tab. 63).

Tab. 63 : apport solide et transport solide spécifique saisonniers à la station de Sidi Aiche

Station Sidi Aiche : variation saisonnière des apports solides (surface 8420 km <sup>2</sup> )					
Période 1972/1982			Période 1982/1992		
Saison	Apport solide (tonnes/saison)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /saison)	Saison	Apport solide (tonnes/saison)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /saison)
Automne	419486,61	48,28	Automne	231105,64	27,46
Hiver	2084735,70	239,30	Hiver	1022270,46	121,46
Printemps	1800469,39	205,07	Printemps	1079261,41	127,78
Eté	172598,99	19,97	Eté	90900,90	10,80

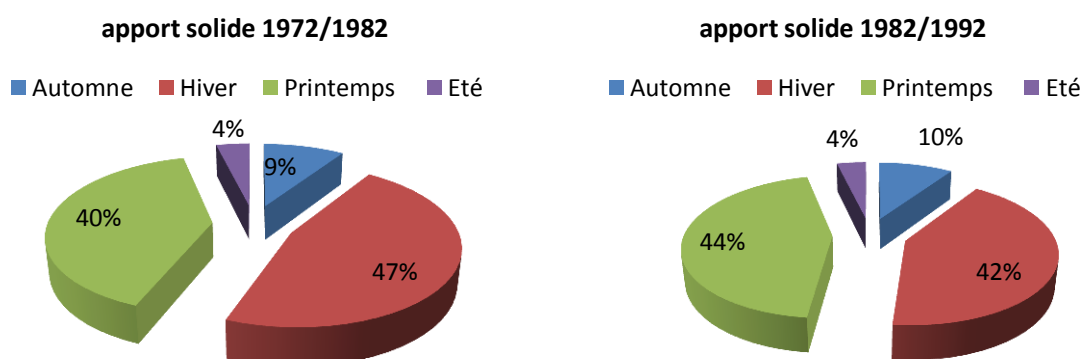


Fig. 68 : pourcentage de l'apport solide saisonnier à la station de Sidi Aiche pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).

#### 4- Évaluation du transport solide en suspension dans les principaux sous bassins

Dans cette partie de l'étude nous tenterons d'étudier le transport solide en suspension dans les grands sous bassins de la Soummam (Boussellam et le sous bassin Sahel-Soummam) que nous avons abordé auparavant sous le titre « Les principaux sous bassins versants de la Soummam » et l'illustration sur la figure 06.

#### 4.1- Variations des apports solides dans le sous bassin de Boussellam à la station Sidi Yahia (périodes 1972/1982 ; 1982/1992)

Dans une première étape, nous essayons d'évaluer l'apport solide annuel et le transport solide spécifique dans tous le sous bassin de Boussellam. Dans une deuxième étape, nous procédons à la quantification de l'apport solide annuel et le transport solide spécifique pour les parties amont et aval de ce sous bassin.

##### - Relation débits liquides-débits solides à la station de Sidi Yahia

La transformation des données de concentration en données de débit solide en suspension est basée sur les débits liquides correspondant enregistrés au niveau de la station de Sidi Yahia. La corrélation utilisée est considérée comme positive car le coefficient de corrélation est significatif ( $R=0,79$ ). La loi testée est de la forme :  $Q_s = 5,484QL^{1,206}$ . (fig.69)

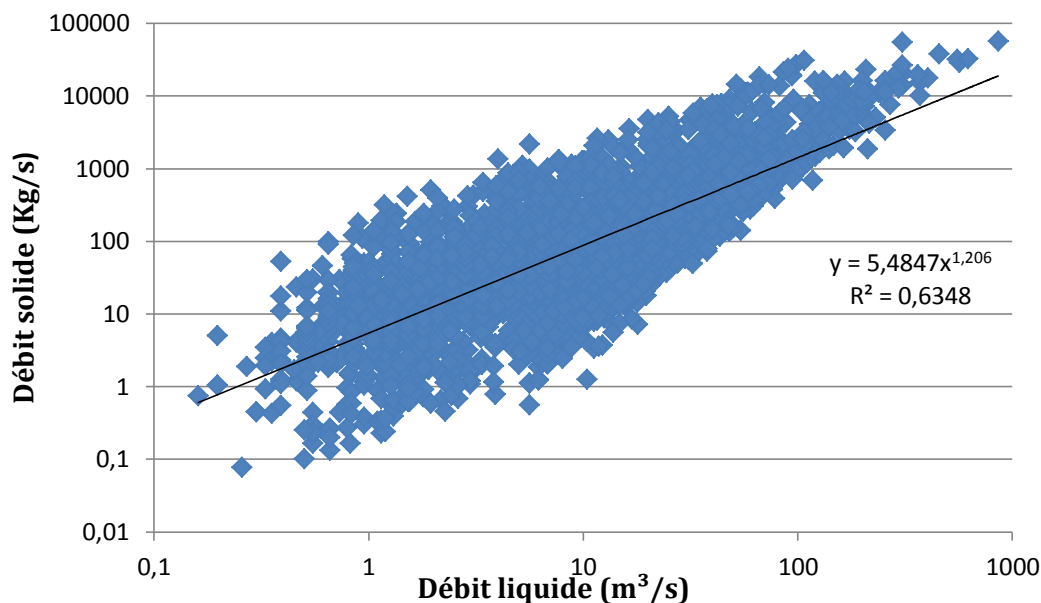


Fig.69 : Relation débits liquide-débits solides à la station de Sidi Yahia

##### - variations annuelles des apports solides

A la Station de Sidi Yahia (4050 Km<sup>2</sup>), on enregistre annuellement un apport solide moyen de  $2,17 \cdot 10^6$  tonnes, pour la période 1972/1982. La dégradation spécifique varie de 142,50 à 1785,90 t/km<sup>2</sup>/an et une moyenne de 503,77 t/km<sup>2</sup>/an.

Pour la période 1982/1992, l'apport solide moyen annuel enregistré à la station Sidi Yahia est de  $1,92 \cdot 10^6$  tonnes, La dégradation spécifique varie de 61,89 à 1011,81 t/km<sup>2</sup>/an et une moyenne de 474,23 t/km<sup>2</sup>/an.

Les mesures de la station de Sidi Yahia montrent que le bassin de Boussellam a perdu 10% de son apport annuel en sédiment après la construction de barrage Ain Zada en 1986 dans la partie amont.

Tab. 64 : Apport solide et transport solide spécifique annuel à la station Sidi Yahia

<b>Station SIDI YAHIA : variations annuelles des apports solides (surface 4050km<sup>2</sup>)</b>					
<b>Période 1972/1982</b>			<b>Période 1982/1992</b>		
<b>Année</b>	<b>Apport solide (tonne/an)</b>	<b>transport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)</b>	<b>Année</b>	<b>Apport solide (tonne/ an)</b>	<b>transport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)</b>
1972-1973	7232913,91	1785,90	1982-1983	1702639,66	420,40
1973-1974	3330004	822,22	1983-1984	1817822,44	448,84
1974-1975	813731,70	200,92	1984-1985	2987190,25	737,57
1975-1976	2457931,20	606,89	1985-1986	4097864,29	1011,81
1976-1977	2031645,94	501,64	1986-1987	3131465,72	773,20
1977-1978	2272060,64	561,00	1987-1988	2821051,86	696,55
1978-1979	577140,89	142,50	1988-1989	974535,45	240,62
1979-1980	800131,55	197,56	1989-1990	250681,32	61,89
1980-1981	684584,41	169,03	1990-1991	661180,71	163,25
1981-1982	1507611,13	372,24	1991-1992	761938,02	188,13
<b>Moyen</b>	<b>2170775,54</b>	<b>535,99</b>	<b>Moyen</b>	<b>1920636,97</b>	<b>474,23</b>
<b>Min</b>	<b>577140,89</b>	<b>142,50</b>	<b>Min</b>	<b>250681,33</b>	<b>61,89</b>
<b>Max</b>	<b>7232913,90</b>	<b>1785,90</b>	<b>Max</b>	<b>4097864,3</b>	<b>1011,81</b>

- **variations mensuelles des apports solides**

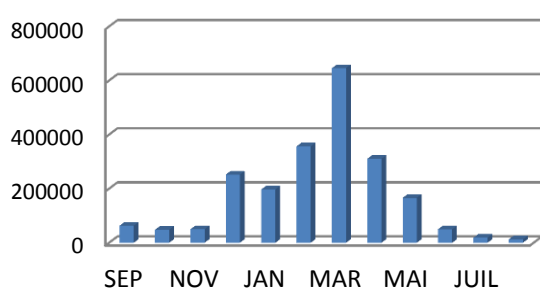
L'étude de l'apport solide mensuel du bassin de Boussellam à la station Sidi Yahia montre que l'apport maximum est enregistré durant le mois de Mars avec plus de 645817 tonnes pendant la période 1972/1982. Pour la seconde période, l'apport maximum est enregistré au niveau du mois de Février.

Par contre, les valeurs minima pour les deux périodes sont enregistrées au mois d'Aout.

Tab. 65 : Apport solide et transport solide spécifique mensuels à la station Sidi Yahia

Station SIDI YAHIA : variations mensuelles des apports solides (surface 4050km <sup>2</sup> )					
période 1972/1982			période 1982/1992		
Mois	Apport solide (tonne/mois)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /mois)	Mois	Apport solide (tonne/mois)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /mois)
SEP	63414,29	14,71	SEP	21496,05	4,98
OCT	48211,47	11,18	OCT	24385,84	5,65
NOV	49999,45	11,60	NOV	28978,11	6,72
DEC	252184,18	58,52	DEC	173633,90	40,29
JAN	196969,21	45,71	JAN	334338,93	77,59
FEV	356469,68	82,72	FEV	476292,01	110,53
MAR	645817,28	149,87	MAR	455454,96	105,69
AVR	310586,96	72,07	AVR	225633,97	52,36
MAI	165992,78	38,52	MAI	110529,11	25,65
JUI	49876,09	11,57	JUI	34692,91	8,05
JUIL	18649,48	4,32	JUIL	21908,52	5,08
AOUT	12604,61	2,92	AOUT	13292,61	3,08

apport solide (tonnes/mois) 1972-1982



apport solide (tonnes/mois) 1982-1992

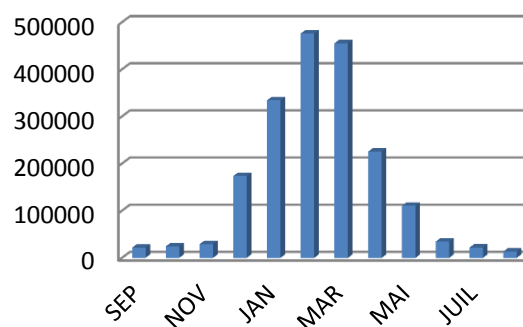


Fig. 70 : apport solide (tonnes/ mois) à la station Sidi Yahia pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992)

#### - variations saisonnières des apports solides

Les variations des apports solides saisonniers du bassin de Boussellam à la station de Sidi Yahia sont très importante.

L'apport le plus important est enregistré durant la saison du printemps avec 1,13.10<sup>6</sup> tonnes. Cette quantité représente 52% de l'apport annuel du bassin (période 1972/1982).

Pour la période 1982/1992, la saison la plus productrice est la saison d'hiver avec 984264.84 tonne (51% de l'apport annuel du bassin).

Tab. 66 : Apport solide et transport solide spécifique saisonniers à la station Sidi Yahia

Station SIDI YAHIA : variations saisonnières des apports solides (surface 4050km <sup>2</sup> )					
Période 1972/1982			Période 1982/1992		
Saison	Apport solide (tonne/saison)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /saison)	Saison	Apport solide (tonne/saison)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /saison)
Automne	161625,21	37,50	Automne	74860,01	17,37
Hiver	805623,08	186,96	Hiver	984264,84	228,42
Printemps	1122397,03	260,47	Printemps	791618,05	183,71
Été	81130,19	18,82	Été	69894,05	16,22

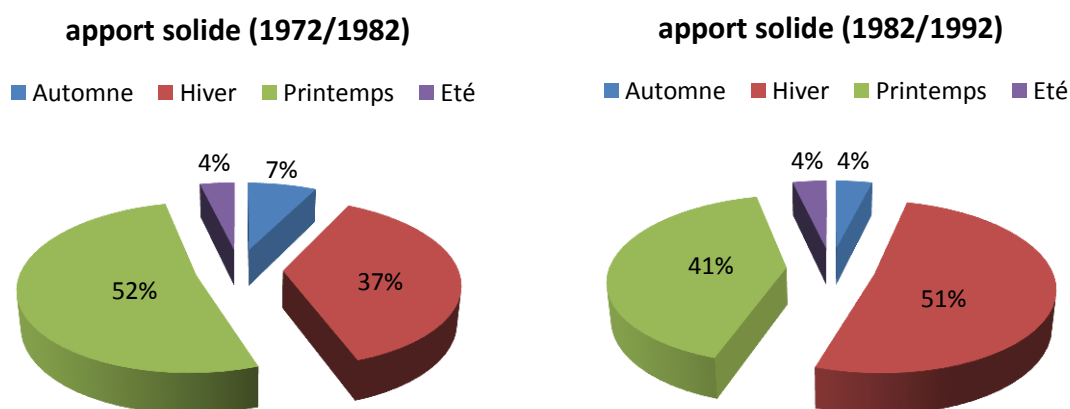


Fig. 71 : pourcentage de l'apport solide saisonnier à la station Sidi Yahia pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).

#### 4.1.1- Variations des apports solides dans les parties amont et aval du sous bassin de Boussellam

La partie amont du grand sous bassin de Boussellam, contrôlée par la station de Maghraoua (fig. 72), est occupée principalement par les hautes plaines sétifiennes. Par contre, la partie aval de Boussellam est caractérisée par un relief assez fort, occupée pour sa grande partie par la terminaison ouest des Babor occidentaux, cette partie est contrôlée principalement par la station Sidi Yahia.

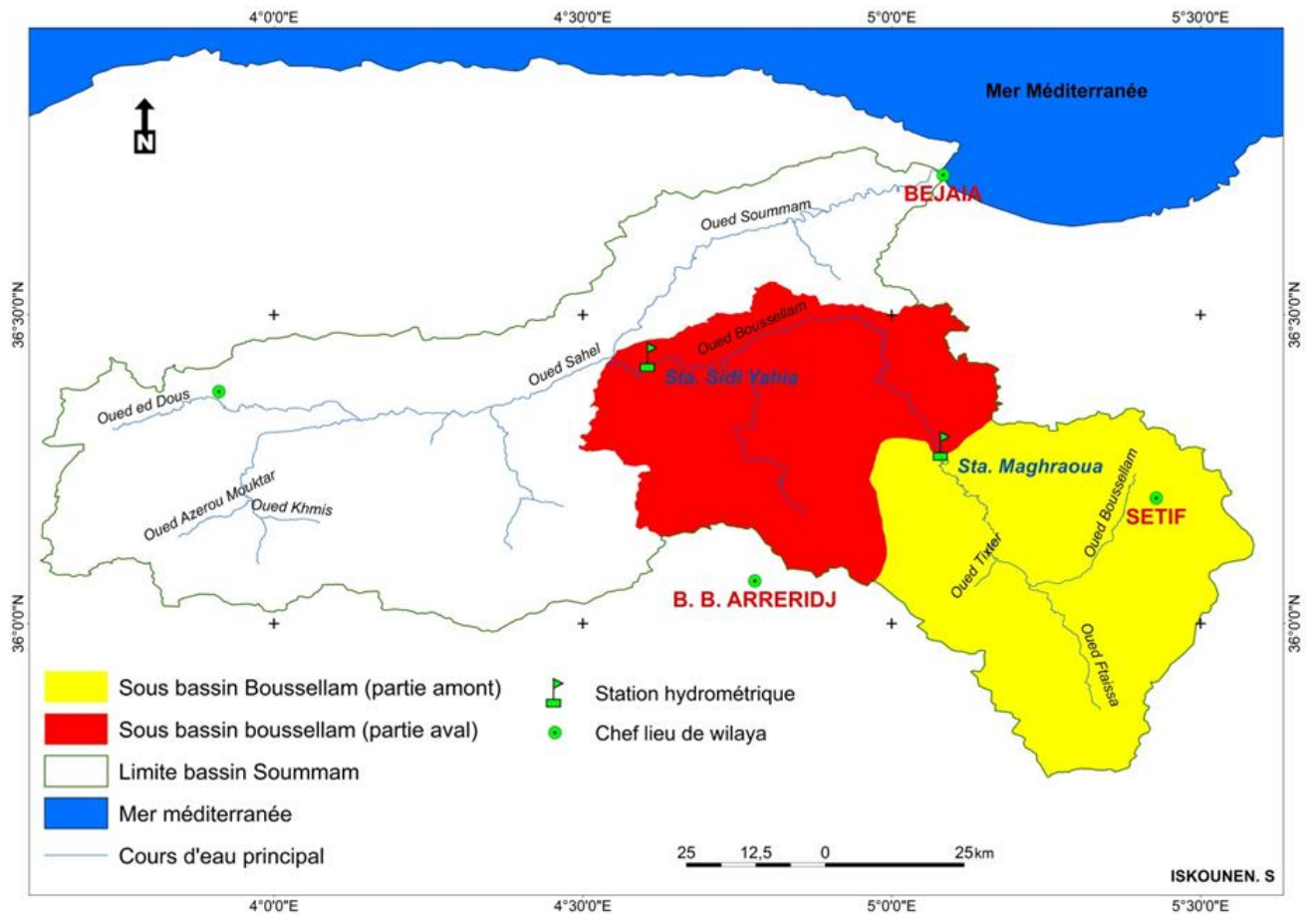
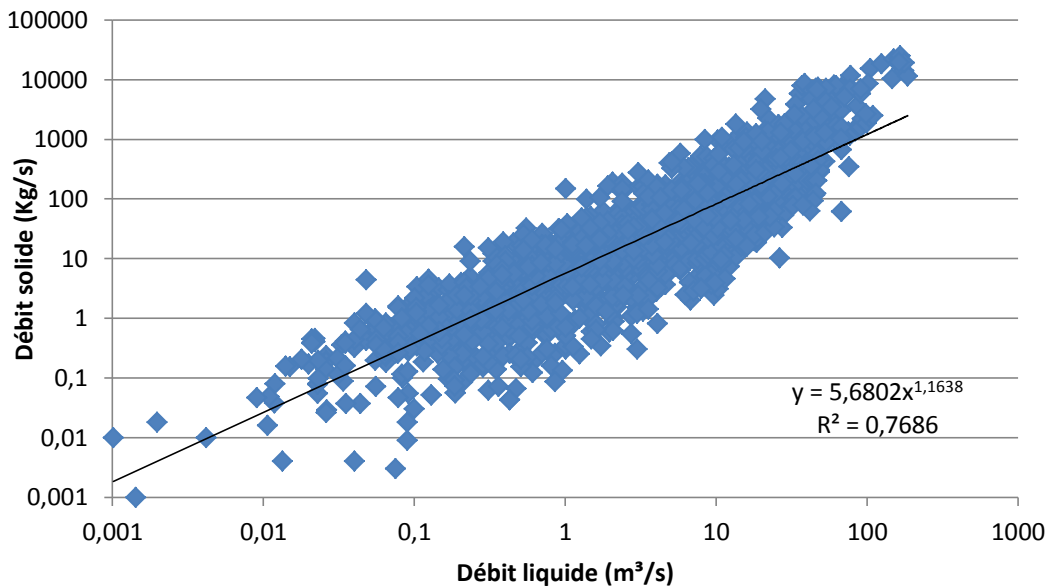


Fig. 72 : les parties amont et aval du Sous bassin Boussellam

### 1- Variations des apports solides dans la partie amont du sous bassin de Boussellam, à la station Maghraoua (périodes 1975/1982 ; 1982/1992)

#### - Corrélation débits liquides-débits solides à la station de Maghraoua

Au niveau de cette station, nous avons repris la même démarche adoptée lors du traitement des données des deux stations précédentes. La relation débits liquides-débits solides de la station de Maghraoua montre un coefficient de corrélation très significatif ( $R=0,87$ ). Aussi, la loi testée est de la forme :  $Q_s = 5,68QL^{1,163}$ . (fig.73).



*Fig.73 : Relation débits liquides-débits solides à la station de Maghraoua*

- **variations annuelles des apports solides**

La station de Maghraoua est installée dans la partie amont du bassin de Boussellam. Elle contrôle un bassin de 2350 km<sup>2</sup>.

L'apport solide annuel moyen enregistré à cette station est de 346422,03 tonnes durant la période 1972/1982 et 110288,01 tonnes seulement pendant la seconde période (1982/1992), soit une diminution de 67%.

Cette importante diminution de l'apport solide annuel peut être expliquée par le piégeage des sédiments au niveau du lac du barrage Ain Zada (construit en 1985) qui se situe à 20 km en amont de la station Maghraoua (fig.72).

Tab.67: Apport solide et transport solide spécifique annuel à la station de Maghraoua

<b>Station MAGHRAOUA : la partie amont du sous bassin de Boussellam (surface 2350km<sup>2</sup>)</b>					
<b>Période 1972/1982</b>			<b>Période 1982/1992</b>		
<b>Année</b>	<b>Apport solide (tonnes/an)</b>	<b>transport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)</b>	<b>Année</b>	<b>Apport solide (tonnes/ an)</b>	<b>transport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)</b>
1972-1973	756268,74	321,81	1982-1983	382192,50	162,63
1973-1974	411391,07	175,06	1983-1984	138485,5	58,93
1974-1975	131095,91	55,78	1984-1985	82085,5	34,93
1975-1976	756268,74	321,81	1985-1986	64456,68	27,42
1976-1977	187404,52	79,74	1986-1987	181907,83	77,40
1977-1978	64210,16	27,32	1987-1988	9587,18	4,07
1978-1979	136106,40	57,91	1988-1989	59826,65	25,45
1979-1980	148579,11	63,22	1989-1990	63529,32	27,03
1980-1981	124243,29	52,86	1990-1991	54862,80	23,34
1981-1982	748652,43	318,57	1991-1992	65941,13	28,06
<b>Moyen</b>	<b>346422,03</b>	<b>147,41</b>	<b>Moyen</b>	<b>110288,01</b>	<b>46,93</b>
<b>Min</b>	<b>64210,16</b>	<b>27,32</b>	<b>Min</b>	<b>9587,18</b>	<b>4,07</b>
<b>Max</b>	<b>756268,74</b>	<b>321,81</b>	<b>Max</b>	<b>382192,5</b>	<b>162,63</b>

- **variations mensuelles des apports solides**

A la station de Maghraoua l'apport mensuel le plus fort est enregistré durant le mois de mars avec 92460 tonnes/mois pendant la période 1972/1982. Par contre, durant la seconde période (1982/1992), après la mise en eau du barrage Ain Zada, le mois de mars enregistre seulement 12124 tonnes/mois, cela peut être expliqué par la rétention de la majorité des crues du printemps par le barrage d'Ain Zada.



Tab. 68 : Apport solide et transport solide spécifique mensuels à la station de Maghraoua

Station MAGHRAOUA : la partie amont du sous bassin de Boussellam (surface 2350km <sup>2</sup> )					
Période 1972/1982			Période 1982/1992		
Mois	Apport solide (tonnes/mois)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /mois)	Mois	Apport solide (tonnes/mois)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /mois)
SEP	20570,18	8,75	SEP	7237,28	3,07
OCT	3223,80	1,37	OCT	4886,41	2,07
NOV	3173,43	1,35	NOV	4707,59	2,00
DEC	11586,70	4,93	DEC	30210,96	12,85
JAN	35902,59	15,27	JAN	17063,42	7,26
FEV	77593,79	33,01	FEV	14144,79	6,01
MAR	92460,37	39,34	MAR	12124,34	5,15
AVR	67777,76	28,84	AVR	6768,29	2,88
MAI	16602,19	7,06	MAI	5447,68	2,31
JUI	15579,04	6,62	JUI	1692,66	0,72
JUIL	655,03	0,27	JUIL	1916,27	0,81
AOUT	1297,09	0,55	AOUT	4088,27	1,73

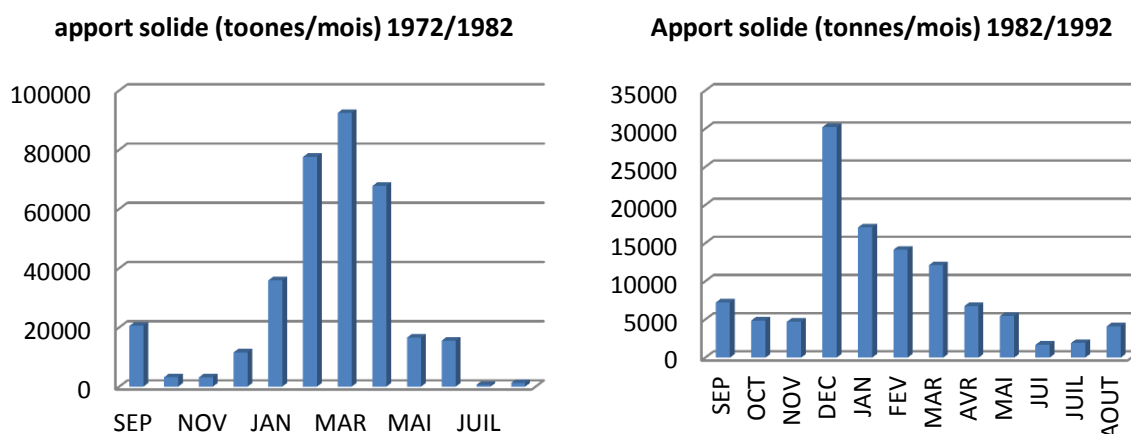


Fig. 74 : apport solide (tonnes/ mois) à la station de Maghraoua pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992)

- **variations saisonnières des apports solides**

L'apport du printemps durant la première période (1972/1982) représente la moitié de l'apport annuel, par contre, durant la deuxième période (1982/1992), l'apport du printemps ne représente que 22%.

Cette situation témoigne de l'impact du barrage d'Ain Zada sur les apports liquides et les solides de l'oued Boussellam.

Tab. 69 : Apport solide et transport solide spécifique saisonniers à la station Maghraoua

Station MAGHRAOUA : la partie amont du sous bassin de Boussellam (surface 2350km <sup>2</sup> )					
période 1972/1982			période 1982/1992		
Saison	Apport solide (tonne/saison)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /saison)	Saison	Apport solide (tonne/saison)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /saison)
Automne	26967,42	11,47	Automne	16831,29	7,16
Hiver	125083,09	53,22	Hiver	61419,18	26,13
Printemps	176840,34	75,25	Printemps	24340,32	10,35
Eté	17531,17	7,46	Eté	7697,21	3,27

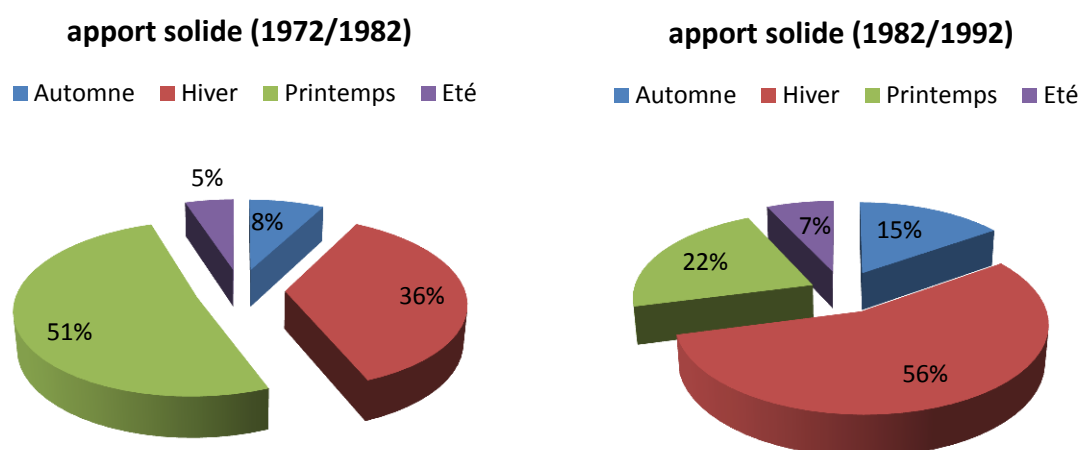


Fig. 75 : pourcentage de l'apport solide saisonnier à la station Maghraoua pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).

## 2-Variations des apports solides dans la partie aval du sous bassin de Boussellam, à la station de Sidi Yahia (périodes 1972/1982 ; 1982/1992)

### - variations annuelles des apports solides

L'apport moyen annuel de cette partie du bassin de Boussellam est de 1824353,50 tonnes pour la période 1972/1982 et  $1,67 \cdot 10^6$  tonnes pour la période 1982/1992.

La légère diminution de l'apport durant la seconde période est due probablement à l'installation de quelques sablières au niveau de la partie aval de l'oued Boussellam.

Il est à noter qu'on ne peut pas apprécier l'effet du barrage de Tichy Haf pendant la période 1982/1992 car, sa mise en eau ne s'est effectuée qu'en 2007.

L'apport solide spécifique de cette partie du bassin de Boussellam varie entre 800 à 900 t/km<sup>2</sup>/an en moyenne pour les deux périodes.

L'apport solide moyen annuel enregistré à la station de Sidi Yahia, pour la partie aval du bassin de Boussellam est nettement plus élevé que l'apport mesuré à la station Maghraoua pour la partie amont du bassin, pour les deux périodes (Tab. 70).

L'augmentation de l'érodibilité, en allant de l'amont du bassin vers l'aval, est due principalement à la vulnérabilité du substratum. En effet, nous constatons une augmentation de l'érodibilité avec l'affleurement des formations meubles à relief accidenté dans la partie aval du bassin (fig. 03)

Tab. 70 : Apport solide et transport solide spécifique annuels à la station SIDI YAHIA (partie aval du sous bassin Boussellam)

<b>Station sidi yahia (partie aval du sous bassin Boussellam (surface 1959km<sup>2</sup>))</b>					
<b>période 1972/1982</b>			<b>période 1982/1992</b>		
<b>Année</b>	<b>Apport solide (tonnes/an)</b>	<b>transport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)</b>	<b>Année</b>	<b>Apport solide (tonnes/ an)</b>	<b>transport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)</b>
1972-1973	6476645,17	3306,09	1982-1983	1320447,16	674,04
1973-1974	2918612,93	1489,84	1983-1984	/	/
1974-1975	682635,797	348,46	1984-1985	/	/
1975-1976	1701662,46	868,63	1985-1986	4033407,61	2058,91
1976-1977	1844241,42	941,41	1986-1987	2949557,89	1505,64
1977-1978	2207850,48	1127,02	1987-1988	2811464,68	1435,15
1978-1979	441034,493	225,13	1988-1989	914708,801	466,92
1979-1980	651552,446	332,59	1989-1990	187152,008	95,53
1980-1981	560341,124	286,03	1990-1991	606317,915	309,50
1981-1982	758958,7	387,42	1991-1992	695996,891	355,28
<b>Moyen</b>	<b>1824353,5</b>	<b>931,26</b>	<b>Moyen</b>	<b>1689881,62</b>	<b>862,62</b>
<b>Min</b>	<b>441034,49</b>	<b>225,13</b>	<b>Min</b>	<b>187152,00</b>	<b>95,53</b>
<b>Max</b>	<b>6476645,17</b>	<b>3306,09</b>	<b>Max</b>	<b>4033407,61</b>	<b>2058,91</b>

#### - variations mensuelles des apports solides

L'apport solide mensuel le plus fort, de la partie aval de Boussellam, est enregistré durant le mois de mars ; ce dernier reste toujours le mois où on enregistre le plus fort apport mensuel pour le sous bassin de Boussellam durant les deux périodes.

Tab. 71 : Apport solide et transport solide spécifique mensuels à la station SIDI YAHIA  
(partie aval du sous bassin Boussellam)

Station SIDI YAHIA : partie aval du sous bassin Boussellam (surface 1959km <sup>2</sup> )					
Période 1972/1982			Période 1982/1992		
Mois	Apport solide (tonnes/mois)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /mois)	Mois	Apport solide (tonnes/mois)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /mois)
SEP	42844,11	21,87	SEP	14258,77	7,27
OCT	44987,67	22,96	OCT	19499,43	9,95
NOV	46826,02	23,90	NOV	24270,52	12,38
DEC	240597,48	122,81	DEC	143422,94	73,21
JAN	161066,62	82,21	JAN	317275,51	161,95
FEV	278875,89	142,35	FEV	462147,22	235,90
MAR	553356,91	282,46	MAR	443330,62	226,30
AVR	242809,19	123,94	AVR	218865,68	111,72
MAI	149390,59	76,25	MAI	105081,43	53,64
JUI	34297,05	17,50	JUI	33000,25	16,84
JUIL	17994,45	9,18	JUIL	19992,25	10,20
AOUT	11307,52	5,77	AOUT	9204,34	4,69

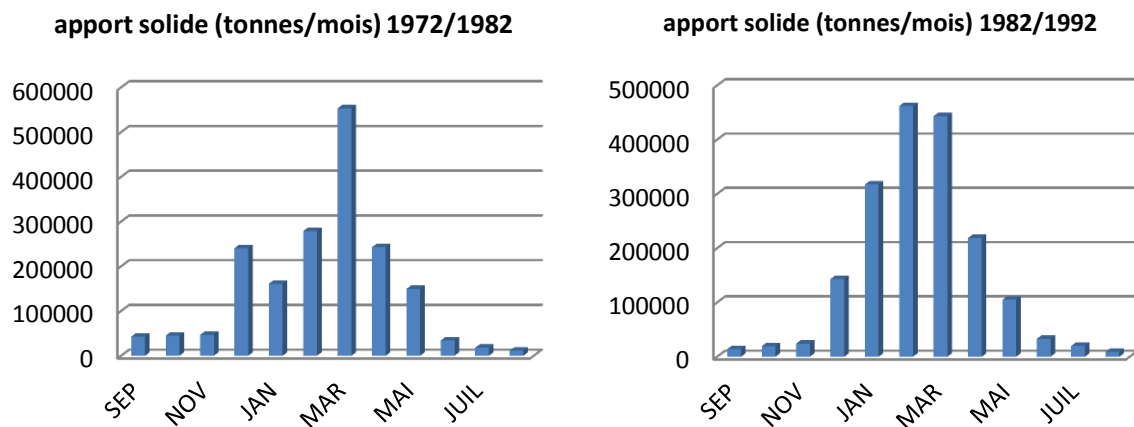


Fig. 75 : apport solide (tonnes/ mois) à la station SIDI YAHIA (partie aval du sous bassin Boussellam) pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992)

#### - variations saisonnières des apports solides

On remarque que pour la partie aval de Boussellam l'apport du printemps n'a pas beaucoup diminué durant la seconde période (fig. 34), il est passé de 52% durant la première période (1972/1982) à 42% pendant la seconde période (1982/1992), cela signifie que la partie aval de Boussellam n'a pas beaucoup subi les impacts du barrage d'Ain Zada sur les écoulements et le transport solide et que cette partie produit la majorité de l'apport solide de l'oued Boussellam.

Tab. 72 : Apport solide et transport solide spécifique saisonniers à la station SIDI YAHIA  
(partie aval du sous bassin Boussellam)

Station SIDI YAHIA : partie aval du sous bassin Boussellam (surface 1959km <sup>2</sup> )					
Période 1972/1982			Période 1982/1992		
Saison	Apport solide (tonnes/saison)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /saison)	Saison	Apport solide (tonnes/saison)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /saison)
Automne	134657,79	68,73	Automne	58028,72	29,62
Hiver	680539,99	347,39	Hiver	922845,66	471,07
Printemps	945556,69	482,67	Printemps	767277,73	391,66
Été	63599,02	32,46	Été	62196,84	31,74

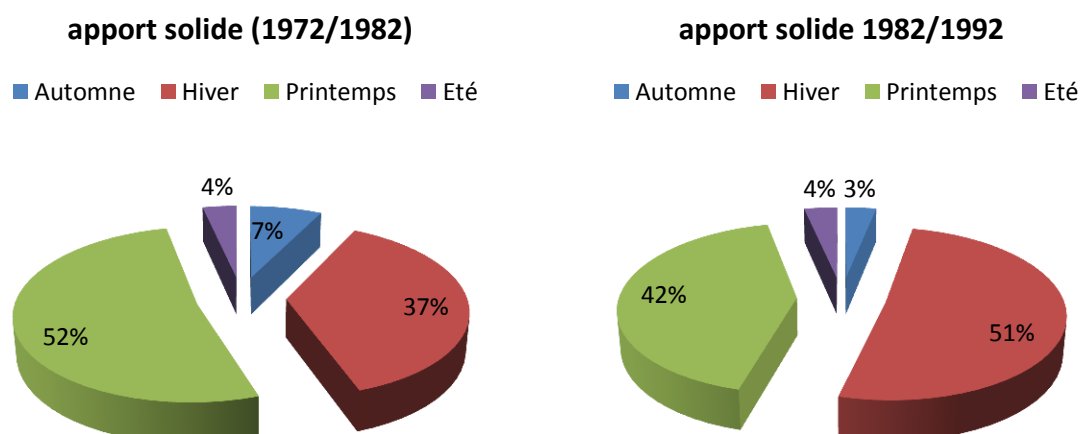


Fig. 76 : pourcentage de l'apport solide saisonnier à la station SIDI YAHIA (partie aval du sous bassin Boussellam) pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).

#### 4- 2. Variations des apports solides dans le sous bassin de Sahel - Soummam, à la station Sidi Aiche (périodes 1972/1982 ; 1982/1992)

Nous avons déjà vu que la station Sidi Aiche contrôle la quasi-totalité (92%) de la surface du bassin de la Soummam, son emplacement dans la zone de Sidi Aiche, sur l'oued Soummam, lui a permis de contrôler le sous bassin de Boussellam, le sous bassin de Sahel et une partie de la vallée de la Soummam.

Dans ce travail, nous essayons de calculer l'apport solide du sous bassin Sahel – Soummam en soustrayant l'apport du sous bassin de Boussellam (mesuré à la station de sidi Yahia) de l'apport total enregistré à la station de Sidi Aiche.



Tab.73: Apport solide et transport solide spécifique annuels à la station SIDI AICHE ( sous bassin Sahel - Soummam)

<b>Station SIDI AICHE : sous bassin de Sahel – Soummam (surface 4370 km<sup>2</sup>)</b>					
<b>Période 1972/1982</b>			<b>Période 1982/1992</b>		
<b>Année</b>	<b>Apport solide (tonnes/an)</b>	<b>Apport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)</b>	<b>Année</b>	<b>Apport solide (tonnes/an)</b>	<b>Apport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)</b>
1972-1973	6691006,09	1531,12	1982-1983	3245202,17	742,60
1973-1974	7157723,01	1637,92	1983-1984	1142504,96	261,44
1974-1975	655175,50	149,92	1984-1985	1172749,67	268,36
1975-1976	3000329,00	686,57	1985-1986	1487755,99	340,44
1976-1977	849953,46	194,49	1986-1987	/	/
1977-1978	431111,44	98,65	1987-1988	1863933,78	426,52
1978-1979	887963,51	203,19	1988-1989	851772,19	194,91
1979-1980	1216239,75	278,31	1989-1990	240897,03	55,12
1980-1981	2433443,69	556,85	1990-1991	1227893,22	280,98
1981-1982	2105279,47	481,75	1991-1992	1207612,34	276,34
<b>Moyen</b>	<b>2542822,49</b>	<b>581,88</b>	<b>Moyen</b>	<b>1382257,93</b>	<b>316,30</b>
<b>Min</b>	<b>431111,44</b>	<b>98,65</b>	<b>Min</b>	<b>240897,03</b>	<b>55,12</b>
<b>Max</b>	<b>7157723,01</b>	<b>1637,92</b>	<b>Max</b>	<b>3245202,17</b>	<b>742,60</b>

- **variations mensuelles des apports solides**

L'apport solide mensuel, le plus fort du sous bassin Sahel – Soummam est enregistré, durant la période 1972/1982, au mois de janvier. Par contre, durant la seconde période, c'est le mois de décembre qui enregistre le plus fort apport (tab. 74).

Tab. 74 : Apport solide et transport solide spécifique mensuels à la station SIDI AICHE (sous bassin Sahel - Soummam)

Station SIDI AICHE sous bassin de Sahel – Soummam (surface 4370 km <sup>2</sup> )					
période 1972/1982			période 1982/1992		
mois	apport solide (tonnes/mois)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /mois)	mois	apport solide (tonnes/mois)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /mois)
SEP	12339,98	2,82	SEP	23795,52	5,44
OCT	136423,52	31,21	OCT	128744,68	29,46
NOV	216307,31	49,49	NOV	118551,81	27,12
DEC	359209,01	82,19	DEC	238807,31	54,64
JAN	614950,93	140,72	JAN	186977,21	42,78
FEV	304952,69	69,78	FEV	214624,49	49,11
MAR	287260,01	65,73	MAR	103899,75	23,77
AVR	342455,29	78,36	AVR	159039,42	36,39
MAI	177454,95	40,60	MAI	124704,19	28,53
JUI	56138,96	12,84	JUI	48851,85	11,17
JUIL	17390,52	3,97	JUIL	16553,35	3,78
AOUT	17939,32	4,10	AOUT	17708,35	4,05

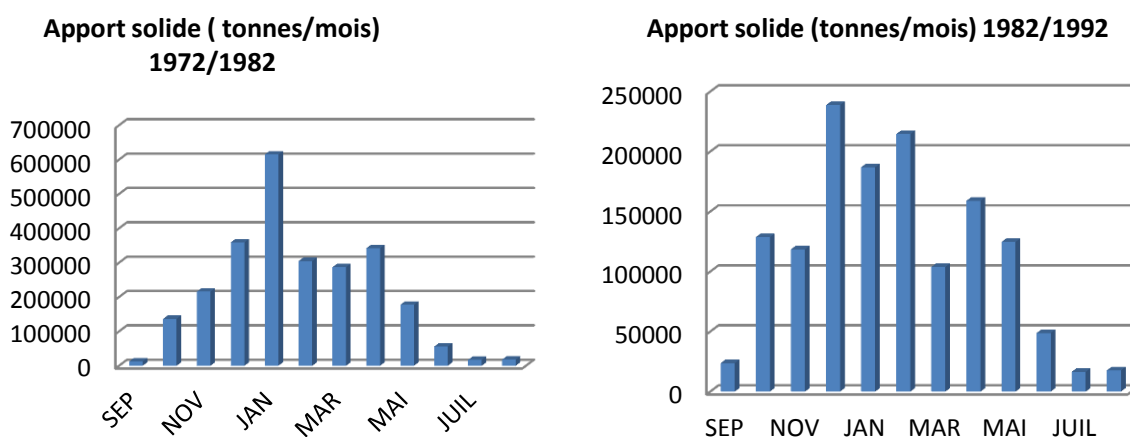


Fig. 78: apport solide (tonnes/ mois) à la station SIDI AICHE (sous bassin Sahel – Soummam) pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992)

- **variations saisonnières des apports solides**

Pour le sous bassin Sahel-Soummam, la saison d’hiver enregistre l’apport solide le plus fort pour les deux périodes (fig. 79).



Tab. 75 : Apport solide et transport solide spécifiques saisonniers à la station SIDI AICHE (sous bassin Sahel-Soummam)

Station SIDI AICHE : sous bassin de Sahel – Soummam (surface 4370 km <sup>2</sup> )					
Période 1972/1982			Période 1982/1992		
Saison	Apport solide (tonnes/saison)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /saison)	Saison	Apport solide (tonnes/saison)	transport solide spécifique (t/km <sup>2</sup> /saison)
Automne	365070,81	83,54	Automne	271092,01	62,03
Hiver	1279112,63	292,70	Hiver	640409,01	146,54
Printemps	365070,81	83,54	Printemps	387643,36	88,70
Eté	91468,80	20,93	Eté	83113,55	19,01

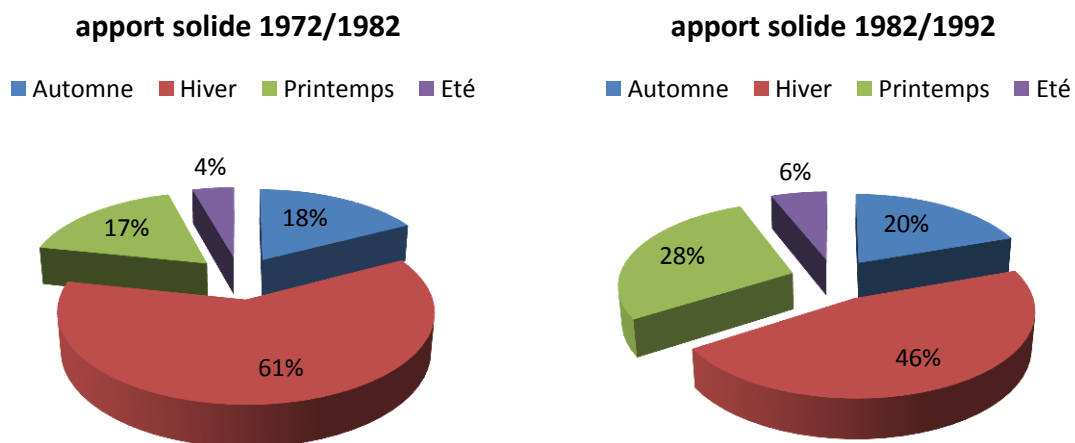


Fig. 79: pourcentage de l'apport solide saisonnier à la station SIDI AICHE (sous bassin Sahel-Soummam) pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).

#### 4.2.1- Variations des apports solides dans la partie amont du sous bassin de Sahel – Soummam, au barrage de Tilesdit.

Malheureusement, pour la partie amont du sous bassin Sahel – Soummam nous n'avons pas pu avoir les mesures de la station hydrométrique. La seule station qui existe dans cette partie est la station El-Asnam, avec une série de mesures de quelques années (4ans). Néanmoins, les mesures de l'envasement du barrage de Tilesdit (fig.80) nous renseignent sur l'apport solide annuel et le transport solide spécifique d'une surface limitée (643km<sup>2</sup>) de cette zone.

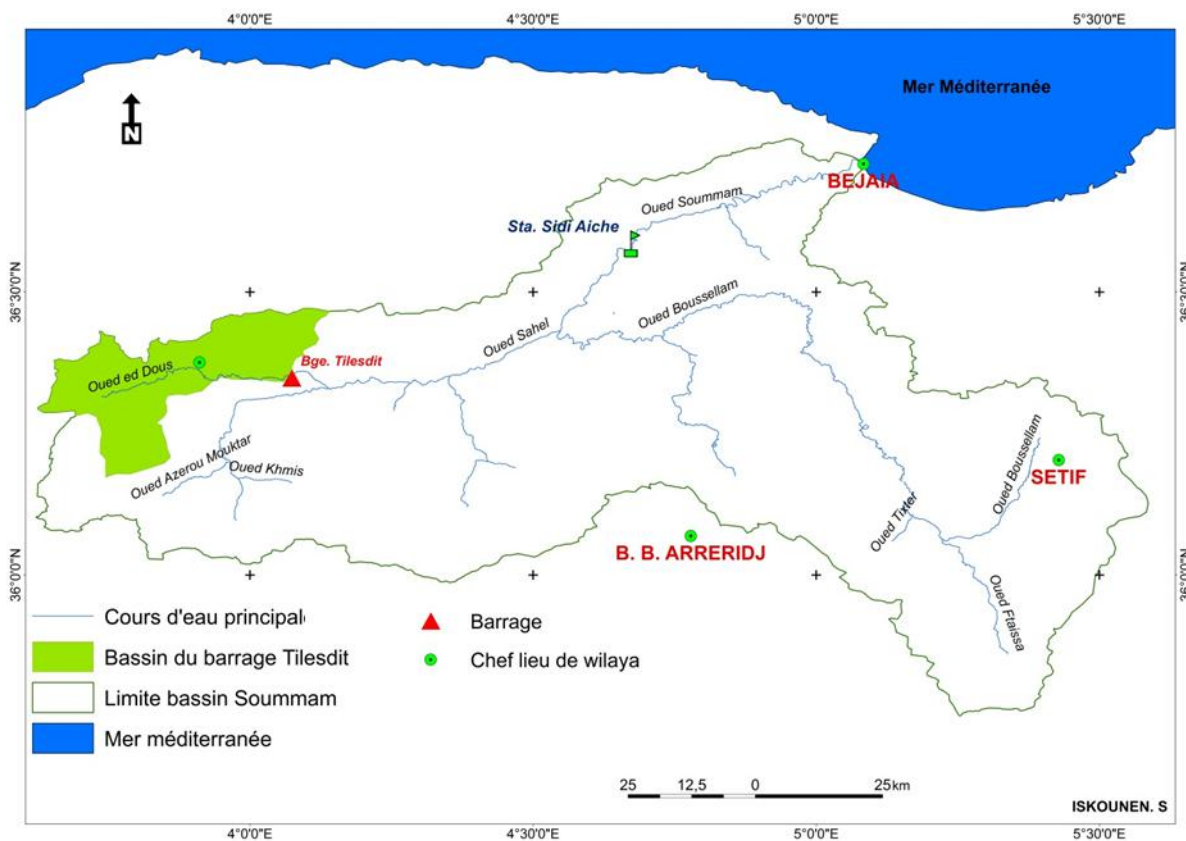


Fig. 80: Surface contrôlée par le barrage Tiledit

L'étude de l'envasement du barrage Tiledit (tab.76) montre que l'envasement annuel de ce dernier est de l'ordre de 0,62 millions de tonnes. Cette quantité révèle un transport solide spécifique de 955 t/km<sup>2</sup>/an dans cette partie du Sous bassin. Cette quantité dépasse largement la moyenne générale du sous bassin qui est de l'ordre de 581t/km<sup>2</sup>/an. En effet, cette partie amont du ce sous bassin est beaucoup plus dégradée.

Tab. 76 : envasements du barrage Tiledit

Barrage	Année de mise en eau	Capacité initiale (hm <sup>3</sup> )	Surface (bassin versant) (km <sup>2</sup> )	Taux d'envasement annuel (hm <sup>3</sup> )	Taux d'envasement annuel (M.de tonnes)	Dégradation spécifique (t/ km <sup>2</sup> )
Tiledit	2004	167	649	0,41	0,62	955,2

#### 4.2.2- Variations des apports solides dans la partie aval du sous bassin Sahel - Soummam, à la station Sidi Aiche (périodes 1972/1982 ; 1982/1992)

Pour calculer l'apport solide de cette partie nous avons soustrait l'apport solide de la partie amont du sous bassin, calculé à partir de l'envasement du barrage Tiledit, de l'apport général du sous bassin mesuré à la station de Sidi Aiche (tab.41).

Tab. 77 : apports solides et transport solide en suspension de la partie aval du sous bassin Sahel - Soummam (période : 1972/1982, 1982/1992)

<b>Station SIDI AICHE : partie aval du sous bassin Sahel – Soummam (surface 3727 km<sup>2</sup>)</b>					
<b>Période 1972/1982</b>			<b>Période 1982/1992</b>		
<b>Surface km<sup>2</sup></b>	<b>Apport solide (tonne/an)</b>	<b>transport solide en suspension (t/km<sup>2</sup>/an)</b>	<b>Surface km<sup>2</sup></b>	<b>Apport solide (tonne/an)</b>	<b>transport solide en suspension (t/km<sup>2</sup>/an)</b>
3727	1922822,49	515,91	3727	762257,93	204,52

Les calculs du transport solide dans la partie aval du sous bassin, pour la période 1972/1982, montrent un transport solide spécifique de 515,91 t/km<sup>2</sup>/an. Cette valeur est proche du transport solide spécifique relatif à l'ensemble du bassin versant. Néanmoins, durant la deuxième période (1982/1992) le transport solide spécifique a beaucoup diminué pour atteindre 204,52 t/km<sup>2</sup>/an. Cette diminution est due à la grande exploitation des sédiments du lit de l'oued Sahel-Soummam.

## 5- Conclusion

Les mesures du transport solide sont lacunaires dans le temps et dans l'espace. Cette situation se complique avec la construction des quatre barrages. Les mesures sont ainsi scindées en deux périodes : la période d'avant aménagements et la période post-aménagements. Les enregistrements à la station de Sidi Aiche nous permettent d'estimer l'apport solide de l'ensemble (92%) du bassin versant de la Soummam avant et après les premiers aménagements. Car la station s'est arrêtée bien avant la mise en eau des deux derniers barrages, en l'occurrence Tichy Haf et Lakhel. Cependant, nous constatons une diminution de moitié de l'apport solide à la station de Sidi Aiche. Faute d'enregistrements (précipitations, flux hydro-sédimentaire) au niveau de l'ensemble des sous bassins, il est difficile d'expliquer cette diminution. Les données relatives aux stations de Maghraoua et de Sidi Yahia, partie amont et partie aval de Boussellam, respectivement, montrent une nette différence de sensibilité à l'érosion entre les deux zones. Aussi, le rythme d'envasement des différents barrages montre l'importance de la discontinuité spatiotemporelle du phénomène érosif dans le bassin versant de la Soummam. Seulement, ces données qui nous permettent de déceler les mécanismes à l'origine du transport solide, de l'échelle journalière à l'échelle annuelle, dans les sous bassins contrôlés par une station hydrométrique, ne sont pas généralisables à toute la surface du bassin versant de la Soummam. Ainsi, et dans l'objectif de pallier à cet inconvénient, nous avons tenté une spatialisations du phénomène érosif en appliquant l'USLE.

# **CHAPITRE V**

**Estimation de l'érosion dans le bassin versant de la  
Soummam à l'aide des SIG et du modèle USLE**

## 1-Introduction

L'objectif de ce chapitre est de quantifier et de spatialiser l'érosion hydrique au niveau du bassin versant de la Soummam en se basant sur l'équation universelle des pertes en sol dans sa version originale (USLE).

Cependant, cette équation élaborée à partir de mesures à l'échelle de la parcelle, ne prend en compte que l'érosion en nappe (P.Kinnell 2010). De ce fait, les résultats obtenus ne représentent moins que 50% du transport solide en suspension mesuré dans le bassin versant de la Soummam.

Par ailleurs, l'érosion hydrique qui affecte le bassin versant de la Soummam se caractérise par la présence des trois formes de l'érosion hydrique, en l'occurrence l'érosion en nappe, l'érosion par ravinement et l'érosion par mouvement de masse. En effet, la participation de ces trois formes d'érosion au transport solide a fait que ce dernier est le double des pertes en terre estimées par l'équation universelle.

Cependant, les données qui ont servi à établir l'USLE concernaient l'érosion de petites parcelles (100 m<sup>2</sup>). Ainsi, elle ne devrait s'appliquer qu'à l'érosion en nappe à l'échelle de la parcelle. Car elle ne prend pas en compte les autres types d'érosion. En effet, à ce niveau scalaire, le ravinement et les mouvements de masse sont absents. Ainsi, nous considérons que l'applicabilité de ce modèle aux bassins versants et en l'occurrence au bassin de la Soummam (9125 km<sup>2</sup>) nécessite l'intégration des deux autres formes d'érosion (ravinement et mouvements de masse).

De ce fait, nous avons adopté la démarche de l'équation universelle pour calculer l'apport des deux autres formes d'érosion (ravinement et mouvement de masse) en déterminant les facteurs propres à chaque forme.

Ainsi, la somme des apports de chaque forme d'érosion permettra une estimation globale de l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Soummam. L'organigramme ci-dessous récapitule la démarche adoptée (fig. 81).

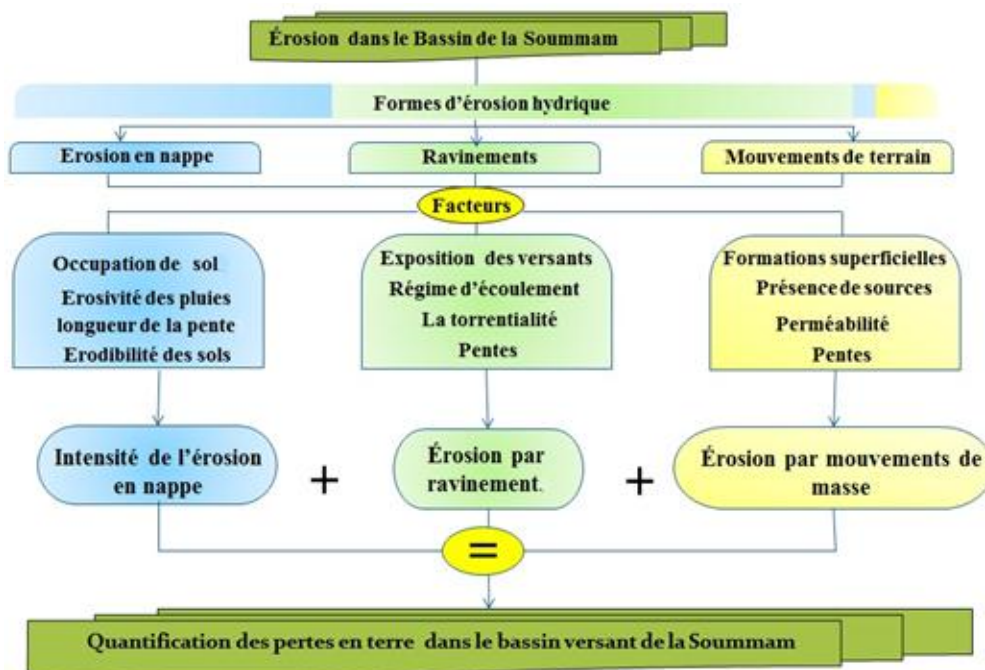


Fig. 81 : organigramme du modèle adopté

## **2- La méthode adoptée :**

Les données disponibles à la station de Sidi Aiche peuvent être réparties en deux catégories : La première catégorie relative à la période (1954/1985) correspond aux flux hydro-sédimentaire ( $4,6.10^6$  tonnes) de la période avant tout aménagement (débits naturel). La deuxième (1985/1992) correspond au début des aménagements hydrauliques (mise en eau des barrages Ain Zada et Lakhal) avec un apport solide de  $2,1.10^6$  t/an (Iskounen. S et al 2015). La diminution de l'apport solide de la deuxième période est visiblement très importante par rapport au volume des sédiments retenus dans les deux barrages. Néanmoins, la quantification des sédiments retenus est réalisée par bathymétrie donc incluant le charriage (charriage estimé à 25% de l'apport solide).

La campagne bathymétrique réalisée en 2014 estime un volume global de vase pour les quatre barrages à  $2,56.10^6$  m<sup>3</sup>/an (soit  $3,84.10^6$  t/an) (Remini. B. 2017). Cette moyenne cache une différence importante de la dégradation spécifique d'un barrage à l'autre.

Pour saisir cette différence et localiser les plus importantes zones d'apport de sédiment, nous avons opté pour l'application de l'équation universelle des pertes de terre afin de confirmer les apports mesurés de sédiments et de prévoir l'apport des sous bassins non jaugés qui recevront probablement d'autres barrages. Cependant, l'application de ce modèle n'a pas donné les résultats escomptés (43% de l'apport solide mesuré). Finalement, cet apport ne représente que la forme de l'érosion en nappe. En raison de la présence d'autres formes d'érosion hydrique dans le bassin versant, en l'occurrence l'érosion par ravinement et l'érosion par mouvement de masse, nous avons utilisé un modèle qui nous permet d'additionner les effets des trois formes d'érosion en tenant compte des facteurs relatifs à chaque forme (fig.81).

## **3- Outils utilisés :**

La caractérisation des différents facteurs qui conditionnent les flux hydro-sédimentaires dans le bassin de la Soummam a nécessité l'exploitation de différentes cartes, d'images satellitales et de logiciels de traitement numérique de l'image ( Global Mapper 15.0) et SIG (ArcGis 10).

## **4- Quantification et spatialisation de l'érosion hydrique**

Après avoir cartographié les facteurs liés à chaque forme d'érosion, nous avons créé les couches thématiques représentant ces facteurs sous format Raster.

Chaque raster (couche thématique) présente 3 à 4 classes (selon le facteur). Les valeurs d'indice des classes de chaque raster (couche thématique) varient de 0 à 1,6. Chaque intervalle est déterminé en tenant compte des nomogrammes établis par Wischmeier (R.P. Stone. 2000) et selon la disponibilité des données exigées par chaque facteur. Ainsi, chaque indice apparaît sur la légende sous forme d'un seuil représenté par une seule valeur, dans le but de faciliter la lecture de la carte. En réalité, ce seuil représente un intervalle reflétant les variations au sein de la classe. Il est évident que l'indice reflète l'importance du phénomène. Néanmoins, nous signalons que le facteur de protection du couvert végétal (C) est représenté par des indices proportionnellement inverses à la densité du couvert végétal. Cette démarche sera appliquée à tous les facteurs des formes d'érosion à l'origine des pertes en terre dans le bassin versant de la Soummam.

#### 4.1- Quantification de l'érosion en nappe : application du modèle USLE

En se basant sur le modèle USLE (Universel SoilLoss Equation) élaboré par Wischmeier et Smith (1978) sous la forme suivante :

$$A = R . K . LS . C . P$$

Les pertes en terre (A) exprimée en t/ha/an est le produit de 5 facteurs : érosivité de la pluie (R), l'érosabilité des sols (K), la longueur de la pente (LS), l'occupation du sol (C) et les pratiques antiérosifs (P) (Stone. R.P et al 2000).

Pour ce travail, nous avons adopté la démarche de l'équation universelle des pertes en terre, avec des modifications en raison du manque de données relatives à l'intensité des pluies et à la texture des sols (El Garouani. A. et al 2008, Zouagui. A et al 2018). Ainsi, les facteurs se présentent comme suit :

- **L'érosivité des pluies (R) :**

L'intensité et la fréquence des pluies tombant sur des sols nus ont une influence déterminante sur les différents mécanismes qui conditionnent l'érosion hydrique (Meddi. M. et al 2016).

Le facteur d'érosivité des pluies de Wischmeier (R) est calculé de la manière suivante :  $R = I30 . Ec . K$  où **R** est l'indice d'érosivité de la pluie ou (agressivité de la pluie), exprimé en MJ.mm/ha.H.an, **Ec** l'énergie cinétique de l'averse, exprimé en joules/m<sup>2</sup>/mm, **I30** l'intensité maximale pendant 30 mn de l'averse, exprimée en mm/heure, **K** le coefficient qui dépend de système d'unités.

En raison de l'absence de mesures d'intensité des pluies de 30 minutes dans la zone d'étude, nous avons utilisé le modèle de Kalman ( $R_{kal} = 143 . \log (P . P_{24} . 10^{-6}) + 89,7$ ) proposé pour la zone Nord-africaine (Sadiki. A. et al 2009). En effet, les termes du facteur R ont été remplacés par les précipitations moyennes annuelles (P) et les précipitations maximales en 24 heures pour une période de retour de 20 ans (P<sub>24</sub>).

Ainsi, nous avons calculé le facteur R pour 23 stations pluviométriques avec une période de mesure qui dépasse les 20 ans. Pour la spatialisation des valeurs du facteur R, nous avons utilisé la méthode de Krigeage (fig.82).

Tab. 78 : calcul du facteur (Erosivité des pluies (R))

Calcul du facteur R						
Nom de la	code	Altitude	période	P <sub>24</sub> (mm)	P (mm)	R

<b>station</b>		<b>(m)</b>				
Sour el ghozlane	150101	882	1972/1999	70,49	437,89	137,98
El hachemiaa	150103	719	1972/1999	56,68	370,86	100,58
Souk el khemis	150201	1055	1972/1998	59,03	439,32	116,15
El asnam.	150204	430	1972/1998	48,47	340,53	75,86
Bouira	150208	520	1971/2004	78,64	408,02	147,18
Porte de fer	150401	410	1980/2012	64,49	296,49	101,96
Bougoune	150402	1028	1969/2004	51,32	241,86	70,26
Tazmalt	150501	324	1966/1998	63,92	388,09	118,34
Ighil ali	150503	700	1922/1998	68,89	400,74	129,62
Allaghane	150504	205	1977/2004	89,65	525,92	179,22
Ain arnat	150607	1020	1980/2012	50,24	352,31	83,48
Bouhira	150608	525	1975/2002	49,03	393,65	86,28
Mahouane	150611	1177	1951/1998	68,45	437,92	134,34
Tixter	150614	960	1912/1998	33,55	351,31	90,23
Ouled mossly	150627	1100	1987/2012	38,74	247,43	83,48
Boubirek	150703	400	1942/2000	98,69	414,66	176,40
Sidi yahia	150904	220	1973/2004	59,60	372,81	107,16
Sidi Aiche	151001	80	1967/1997	89,19	509,30	179,57
Maouchi ahmed	151004	50	1967/1997	66,45	480,35	136,40
Seddouk	151006	370	1922/2000	67,92	492,02	140,61
Tifra	151007	785	1980/2012	107,13	846,29	220,87
Sidi said	151008	700	1974/2008	63,17	419,40	121,69
Amizour	151023	53	1991/2012	75,58	573,05	163,35

### - Méthode de Krigeage

Le terme Krigeage provient du nom de famille de l'ingénieur minier sud-africain Danie G. Krige. Il a été formalisé pour la prospection minière par Georges Matheron (1930) au BRGM puis à l'École des mines de Paris. Depuis, le domaine de ses applications a largement été étendu, touchant notamment la météorologie, les sciences de la terre et de l'environnement.

Le Krigeage réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental. C'est le meilleur estimateur linéaire non-biaisé ; il se fonde sur une méthode objective. Il tient compte non seulement de la distance entre les données et le point d'estimation, mais également des distances entre les données deux-à-deux.

### - Cartographie du facteur R

Après avoir calculé le facteur R aux niveaux des 23 stations pluviométrique et spécialisé ce facteur à l'aide de méthode Krigeage, nous avons ainsi distingué quatre classes d'agressivité des pluies : classe d'agressivité très forte, moyenne et classe à faible agressivité. À chaque classe est assigné un indice variant entre 0,6 et 1,6 (tab. 79). 0,6 est affecté à la classe à faible agressivité et 1,6 à la classe la plus agressive.



Tab. 79 : classes du facteur (R)

Facteur R		
Classe (R)	Agressivité	Indice attribué
90 - 110	faible	0,4
110 - 130	moyenne	0,8
130 - 150	forte	0,12
150 - 170	Très forte	1,60

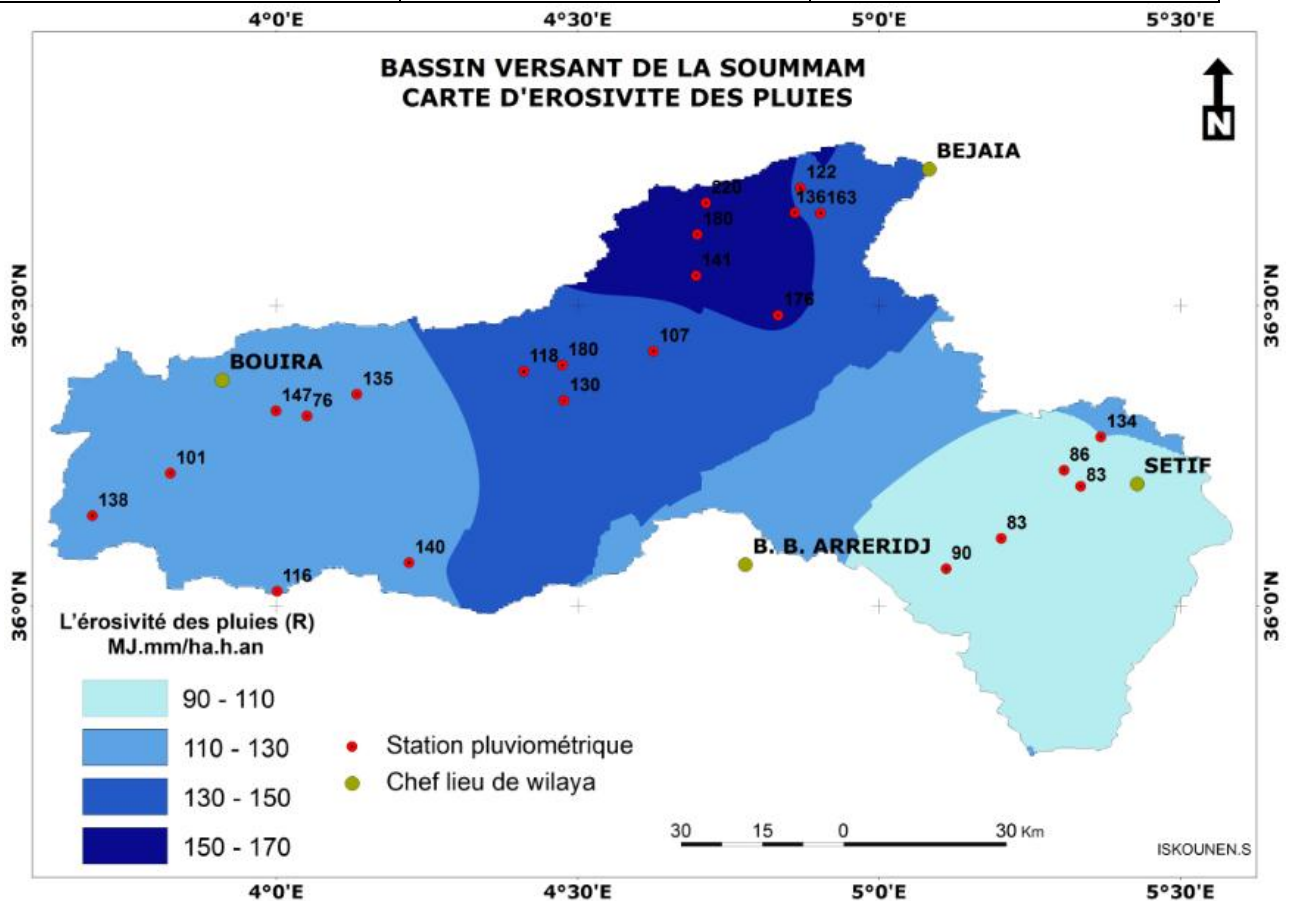


Fig.82: Carte d'érosivité des pluies dans le bassin versant de la Soummam

L'agressivité des pluies est conditionnée par l'altitude, l'éloignement de la mer et l'exposition aux vents Nord et Nord-ouest. De ce fait, les hautes plaines sétifiennes sont les moins exposées à l'agressivité des pluies. Par contre, les hauteurs du Djurdjura subissent l'agressivité la plus intense (fig. 82).

- **Le facteur topographique (LS)**

Ce facteur représente l'effet combiné de la longueur et l'inclinaison de la pente. Le facteur topographique (LS) est calculé à partir de l'inclinaison des pentes et de leur longueur par la formule de Wischmeier et Smith:  $LS = (L/22,13) \cdot (0,065 + 0,045 \cdot S + 0,065 \cdot S^2)$

Où :

- L : la longueur de pente en m,
- S : l'inclinaison de la pente en %,

- M : paramètre tel que  $m = 0,5$  si la pente est  $> 5\%$ ,  $m = 0,4$  si la pente est de  $3,5$  à  $4,5\%$ ,  $m = 0,3$  si la pente est de  $1$  à  $3\%$  et  $m = 0,2$  si la pente est  $< 1\%$ .

Le facteur topographique se limite uniquement à l'utilisation de la pente. Car, dans un bassin accidenté le facteur longueur de pente n'a pas la même efficacité que dans les milieux moins tourmentés. La pente est divisée en 5 classes afin de laisser les paysages facilement lisibles. Aussi, les seuils sont fixés dans le but de lier les catégories de pentes avec les différentes formes d'érosion.

#### - Réalisation de la carte des pentes

On utilisant le modèle numérique du terrain MNT (fig. 83), à résolution 30mètre, nous avons pu générer les courbes de niveaux du bassin versant de la Soummam (fig. 84)

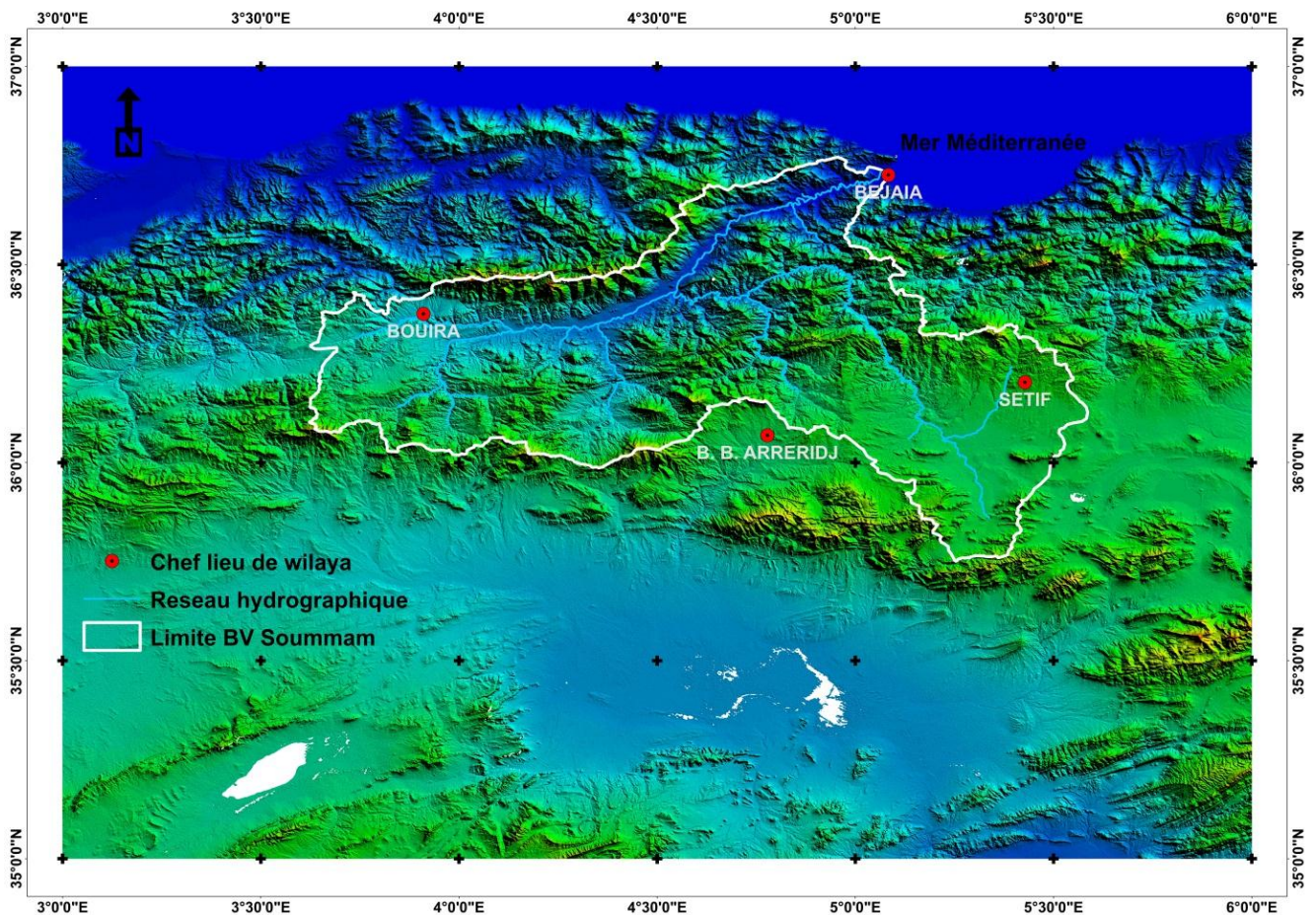


Fig. 83 : modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant de la Soummam

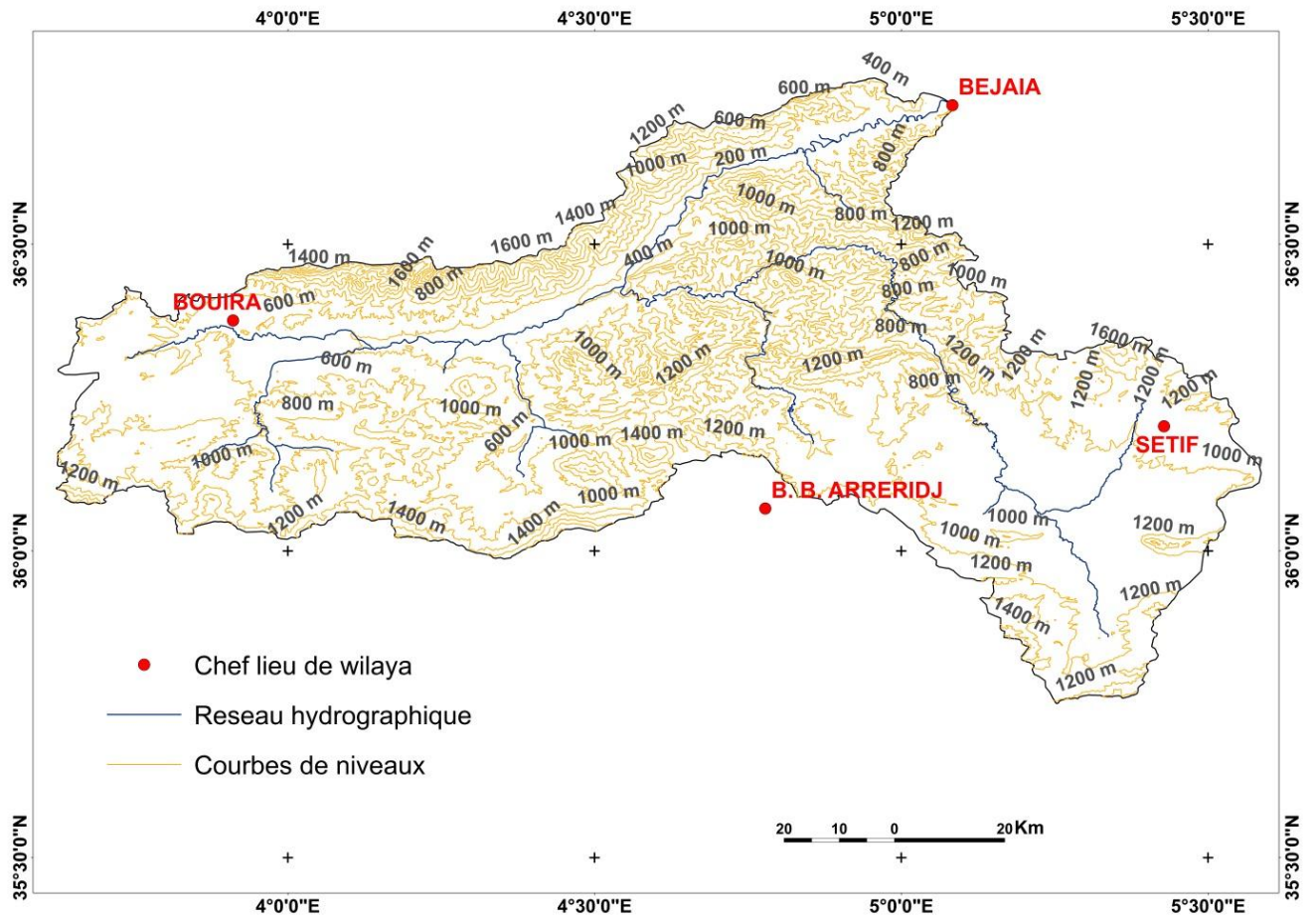


Fig. 84 : topographie du bassin versant de la Soummam

L'exploitation des courbes de niveaux avec le logiciel Arcgis nous a permis de réaliser la carte des pentes du bassin de la Soummam



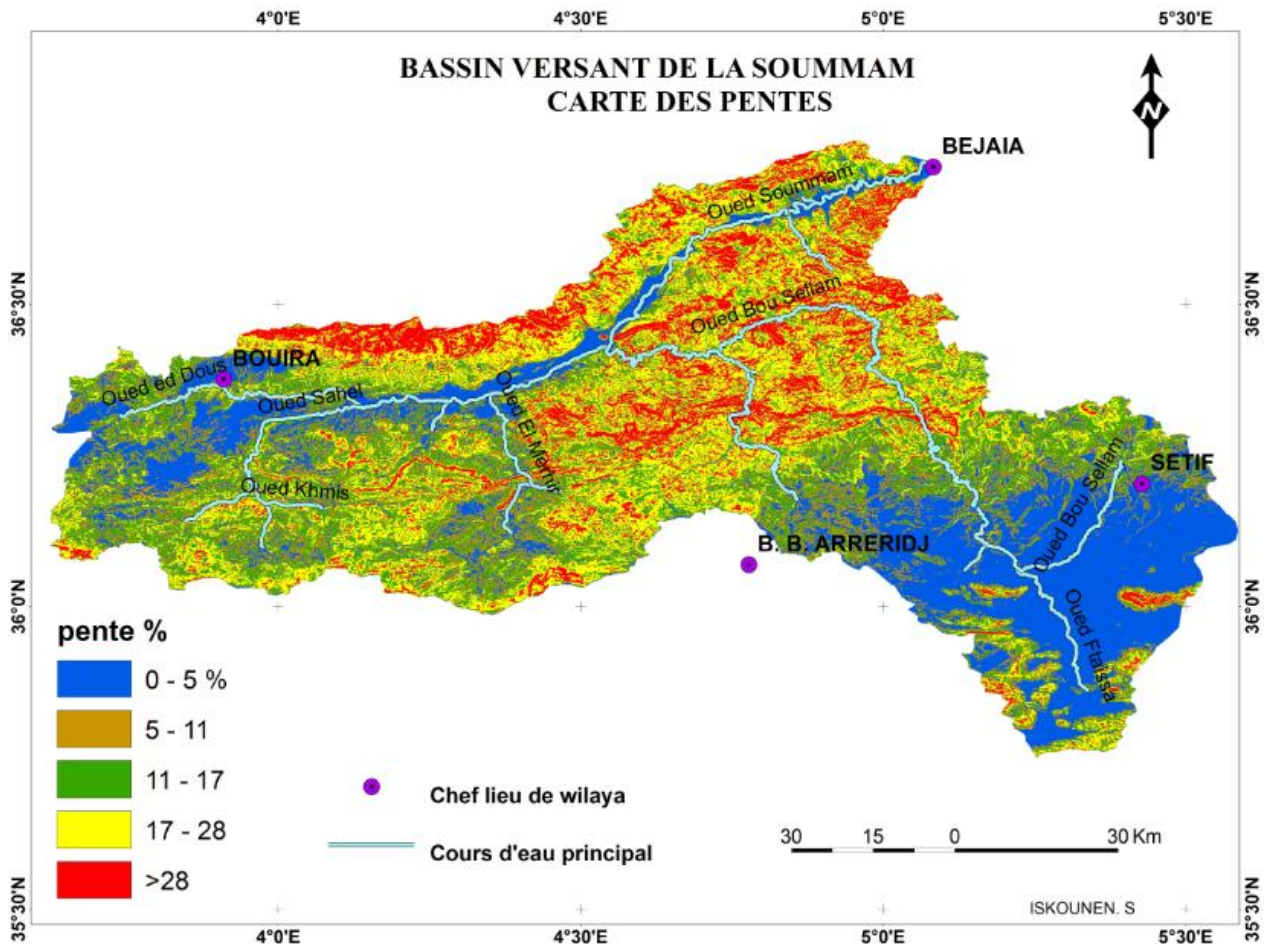


Fig. 85 : Carte des pentes du bassin versant de la Soummam

La lecture de la carte des pentes (fig. 85) montre que la classe 0 – 5% prédomine essentiellement dans la vallée de la Soummam jusqu’au plateau de Bouira et sur les hautes plaines sétifiennes. Par contre les fortes pentes caractérisent le flanc Sud-est du Djurdjura et la partie Nord des Biban (>28%). Cependant, la partie Sud des Biban montre un relief chahuté (5 - 28%).

#### - Cartographie du facteur Topographique

La classification de la pente en quatre classes nous a permis d’assigné un indice variant entre 0,6 et 1,6 pour chaque classe (tab. 80). 0,6 est affecté à la classe de pente faible et 1,6 à la classe de pente la plus forte (fig. 86).

Tab. 80 : classes du facteur Topographique (LS)

Facteur Topographique		
Classes de pentes (%)	Impacte érosif	Indice attribué
0 - 11	Faible	0,4
11 - 17	Moyenne	0,8
17- 28	Forte	1,20
>28	Très forte	1,60

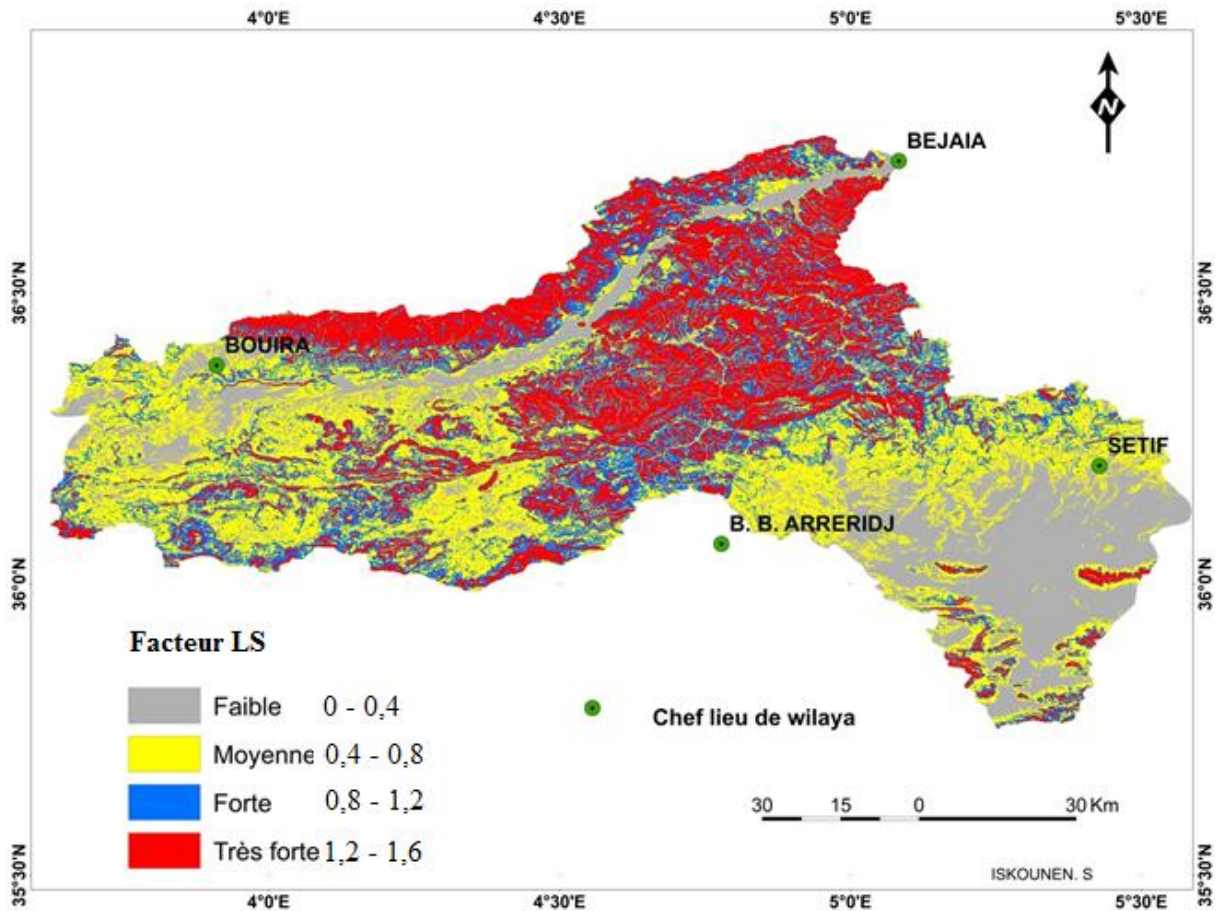


Fig. 86 : carte du facteur topographique (LS) du bassin versant de la Soummam

- **L'occupation du sol (C) :**

Dans le modèle de Wischmeier, ce facteur incorpore les effets du couvert végétal et l'influence des méthodes culturales sur l'érosion des sols (Pham. T.G. 2018).

La carte d'occupation du sol est dressée à partir des cartes d'occupation du sol des wilayas composant le bassin versant de la Soummam (wilayas de Bejaia, Bouira, Tizi Ouzou et Bordj Bou Arreridj). Ces cartes sont établies par l'institut national des sols, de l'irrigation et de drainage (INSID) en collaboration avec le bureau national d'études pour le développement rural (BNEDER), à l'échelle de 1/25 000. Après la construction de la mosaïque, nous avons procédé à la classification des différentes occupations du sol en quatre classes par ordre de protection du sol (tab. 81).

Tab. 81 : Classes d'occupation du sol selon leurs protections du sol

Type d'occupation du sol	Classe selon la protection du sol	SurfaceKm <sup>2</sup>	Surface %
Forêt et maquis	Classe protectrice	2857	43
Oléiculture		1077	
Cultures maraichères	Classe moyennement protectrice	325	36
Cultures en sec		2981	
Parcours	Classe non protectrice	1508	17
Sol nu		67	
Plan d'eau	Apport (nul)	69	4
Espace bâti		241	

L'occupation du sol (fig.87) est déterminée par la lithologie, conditions édaphiques et le relief d'un côté et du climat de l'autre. De ce fait, nous constatons la prédominance des céréalicultures dans les haute plaines sétifiennes et le plateau de Bouira. Cependant, l'oléiculture occupe les versants dominant la partie Nord de la vallée de la Soummam. Par contre, les cultures maraichères, très discontinues, sont disséminées au sein des champs de l'oléiculture et des terrains forestiers.

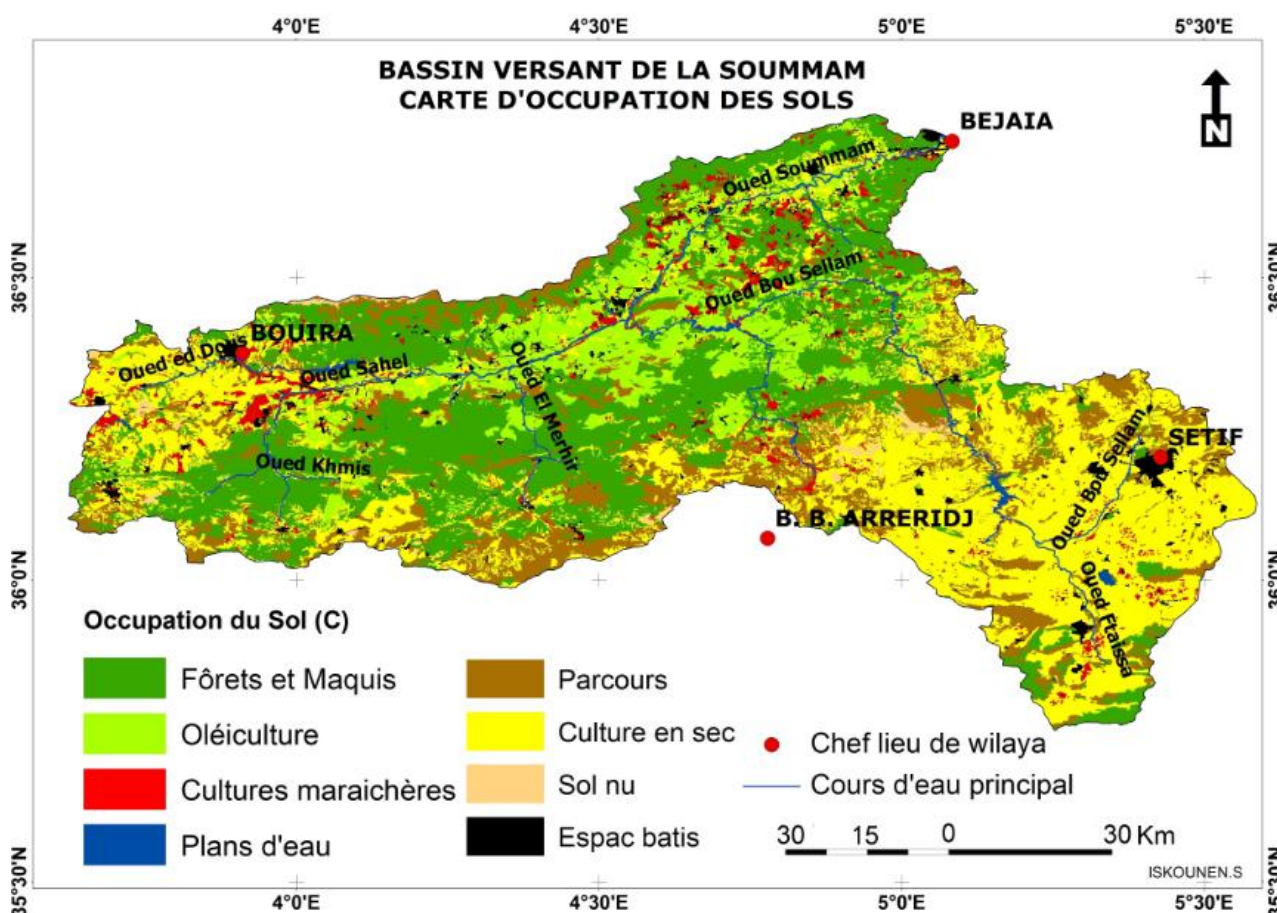


Fig. 87 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Soummam

#### - Cartographie du facteur C

Après avoir procédé à la classification des différentes occupations du sol en classes par ordre de protection du sol (tab. 80), on peut ainsi distinguer quatre classes d'occupation du sol :



classe d'occupation du sol avec une protection du sol très forte, forte moyenne et classe à faible protection. À chaque classe est assigné un indice variant entre 0,6 et 1,6 (tab. 81). 0,6 est affecté à la classe la plus protectrice du sol et 1,6 à la classe non protectrice (fig. 86).

Tab. 81 : classe du facteur occupation du sol (C)

Facteur (C)		
Classe	protection du sol	Indice attribué
Espace bâti	Très forte	0 (Apport nul)
Forêt et maquis, Oléiculture	forte	0,6
Cultures maraichères, Cultures en sec	Moyenne	1,2
Parcours, Sol nu	Faible	1,6

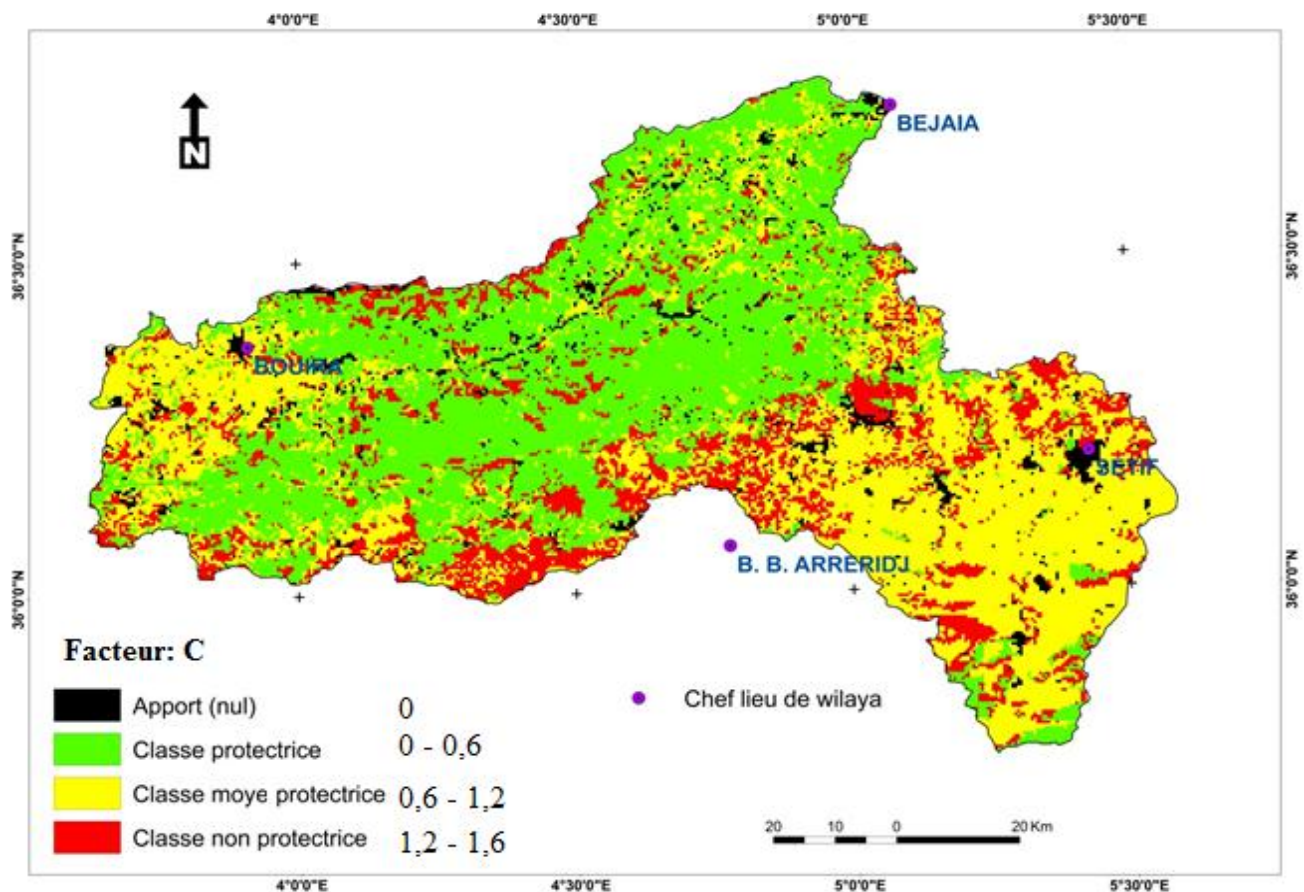


Fig. 88 : carte du facteur (C) du bassin versant de la Soummam

#### - L'érodibilité des sols (K)

Le facteur (K) exprime la vulnérabilité du sol à être érodé par la pluie. Ce facteur dépend des propriétés physiques et chimiques du sol (granulométrie, agrégation, stabilité structurale, porosité, teneur en matière organique, etc.) (Stone. R.P et al. 2000).

Une équation a été établie pour estimer la valeur de l'érodibilité des sols (K) (Wischmeier et Smith. 1978):  $K = 2,8 \cdot 10^{-7} M^{1,14} (12 - M.O.) + 0,0043 (b - 2) + 0,0033 (c - 3)$

Où :

- M = facteur granulométrique (% limon + % sable très fin) (100 - % argile)
- M.O = matière organique (%)
- b = code de la structure du sol (granulaire très fine : 1; granulaire fine : 2; granulaire moyenne et grossière : 3; en bloque ou massive : 4)
- c = code de la classe de perméabilité (rapide : 1; modéré à rapide : 2; modérée : 3; lente à modérée : 4; lente : 5; très lente : 6).

Malheureusement nous ne disposons pas de données suffisantes pour pouvoir calculer le facteur K à partir de cette équation.

Pour pallier à cet inconvénient, nous avons appliqué la démarche proposée par : (Sadiki.A et al 2004, Toumi. S et al. 2013, Boukheir et al. 2001). Elle consiste en la classification des affleurements géologiques par ordre de résistance à l'érosion hydrique. Pour atteindre cet objectif, nous avons exploité 26 cartes géologiques à l'échelle 1/50 000, complétées, par endroit, par des cartes aux 1/200 000 et 1/500 000. Ces cartes, en plus de leurs échelles différentes, elles ont été établies à différentes époques (entre 1922 et 1988), d'où la différence importante de l'information concernant la même formation géologique. Cette situation nous a imposé un travail d'homogénéisation des données extraites des différentes cartes (26 cartes géologiques 1/50 000, 02 cartes 1/200 000). Ainsi, la carte lithologique élaborée (fig.89) est une synthèse d'une lecture et une interprétation de tous les documents cartographiques disponibles.

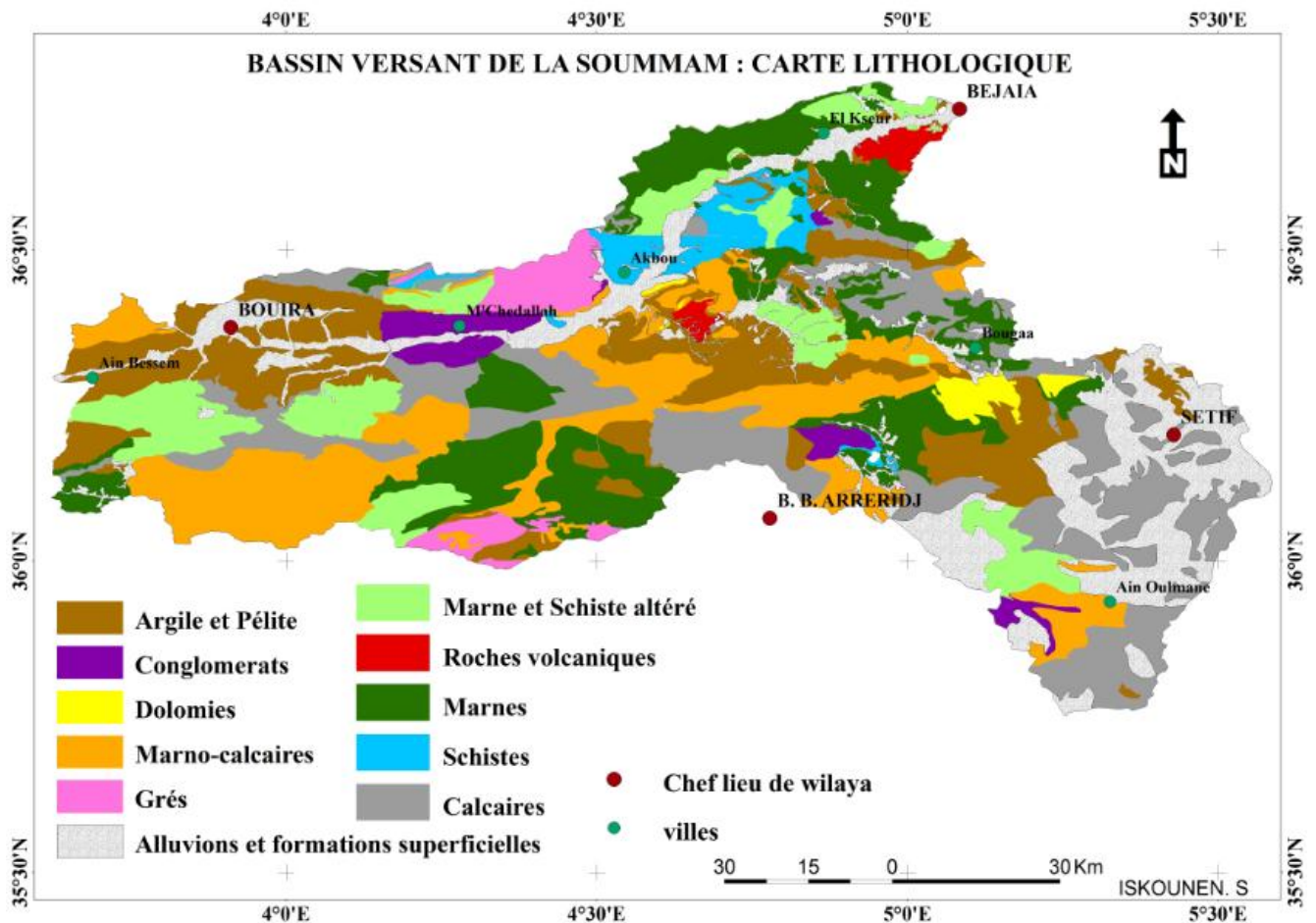


Fig. 89: Carte lithologique du bassin versant de la Soummam



Le but recherché est de faire ressortir les caractéristiques lithologiques de chaque formation et ses réactions vis-à-vis de l'agressivité du climat, ce qui nous a permis de les réunir en quatre classes selon leurs résistances à l'érosion (tab. 82).

Tab. 82 : Classes des formations lithologiques selon leur résistance à l'érosion

Lithologie	Résistance à l'érosion	Surface km <sup>2</sup>	Surface %
Calcaire	Résistantes	1687	26
Grés		261	
Conglomérat		222	
Dolomie		90	
Roches volcaniques		69	
Schiste	Moyennement résistantes	250	18
Marno-calcaires		1345	
marne et schiste altéré	Faible résistance	846	24
Marne		1374	
Argile et Pélite	Très faible résistance	1539	32
Alluvions et formations superficielles		1435	

#### - Cartographie du facteur K

Après avoir réuni les formations géologiques en classes selon leurs résistances à l'érosion (tab. 82), on peut ainsi distinguer quatre classes de matériaux: résistants, moyennement résistants, faible résistance et très faible résistance. À chaque classe est assigné un indice variant entre 0,4 et 1,6 (tab. 83). 0,4 étant affecté aux matériaux moins exposés à l'érosion et 1,6 aux matériaux les plus exposés à l'érosion (fig. 90).

Tab. 83 : classes du facteur de l'érosabilité des sols (K)

Facteur (K)		
Classe	Erodibilité	Indice attribué
Calcaire, Grés, Conglomérat, Dolomie, Roches volcaniques	faible	0,4
Schiste, Marno-calcaires	Moyenne	0,8
marne et schiste altéré, Marne	forte	1,2
Argile et Pélite, Alluvions et formations superficielles	Très forte	1,6

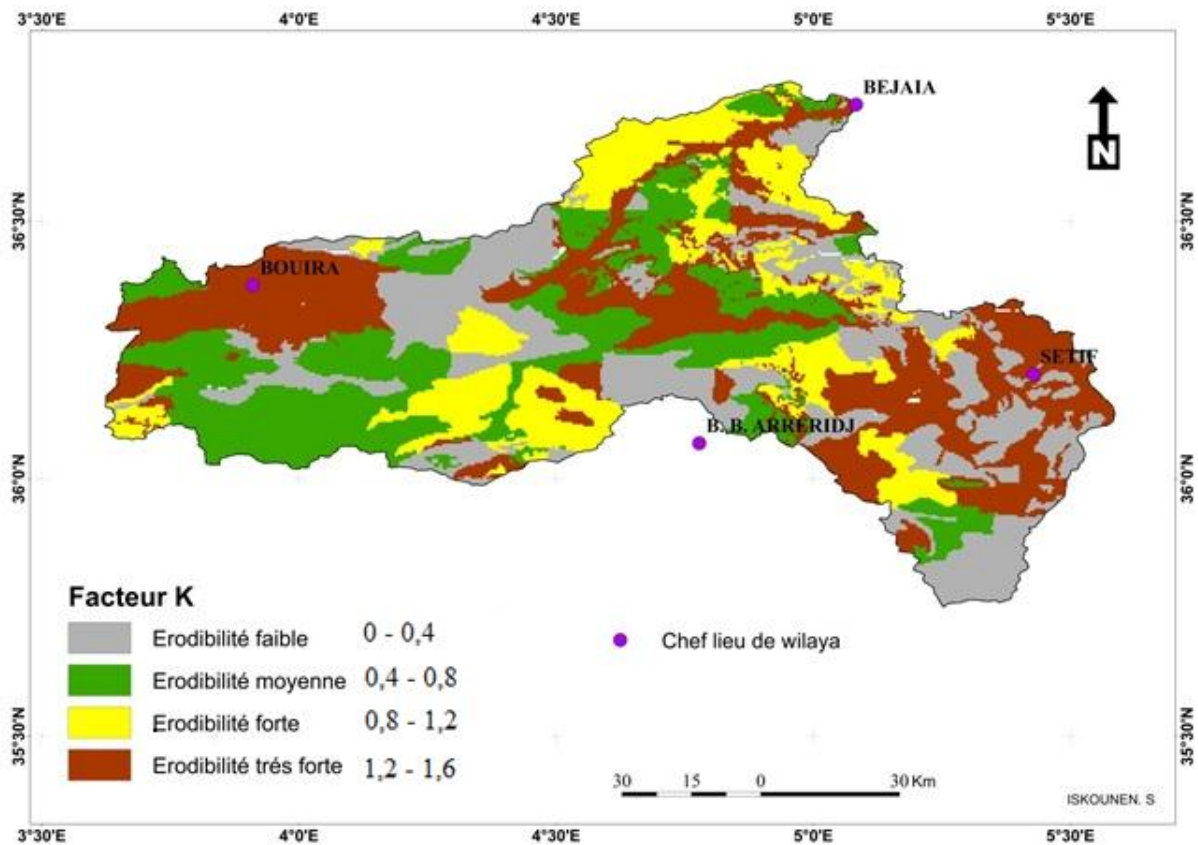


Fig. 90 : carte du facteur (K) du bassin versant de la Soummam

- **pratiques antiérosifs**

Face au problème de l'érosion qui affecte les sols en Algérie, les différentes tentatives à travers les programmes de "défense et de restauration des sols (DRS)" d'abord, puis de "rénovation rurale" ensuite, ont globalement échoué (D. HEDDADJ 2002)

- **Résultats de la quantification de l'érosion en nappe**

Après avoir cartographié et rastérisés les différents facteurs (l'érodibilité des sols, l'érosivité des pluies, l'occupation du sol et la pente), la quantification et la spatialisation de l'érosion en nappe est réalisée par la multiplication de ces derniers.

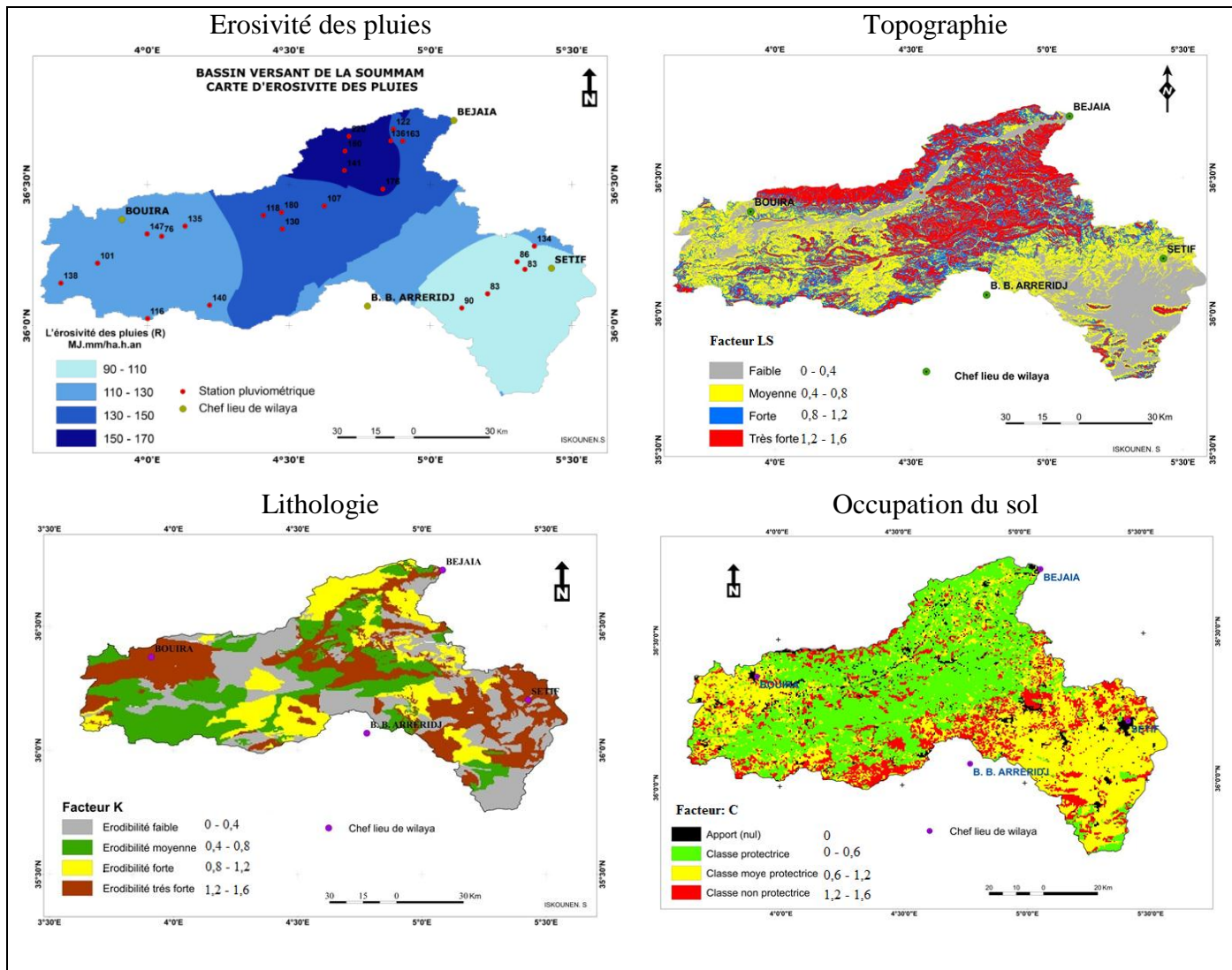


Fig. 91 : planche des cartes des facteurs de l'érosion en nappe

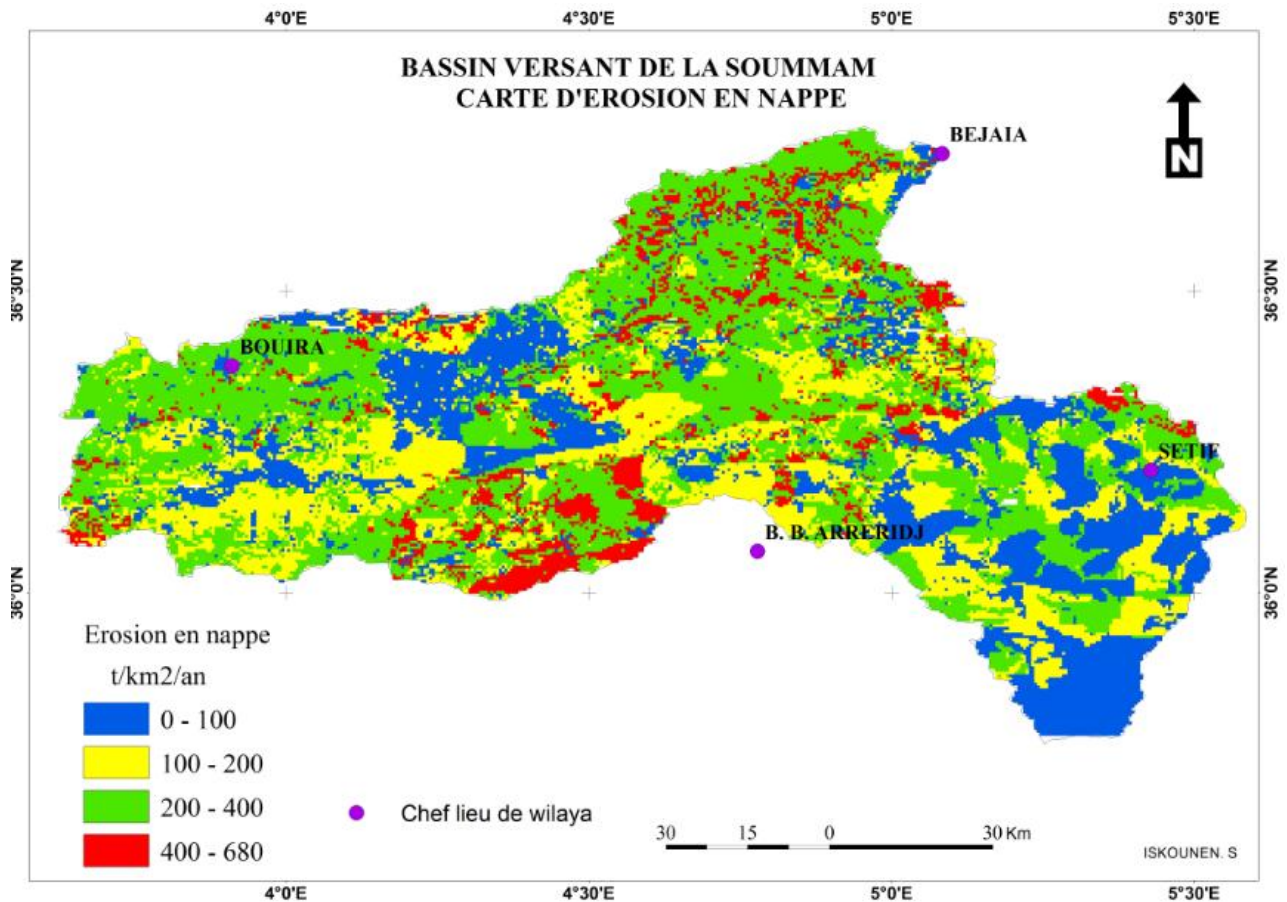


Fig.92: Carte des pertes en terre par érosion en nappe du bassin versant de la Soummam

La répartition des classes d'érosion spécifique, de la plus faible (0 – 100 t/km<sup>2</sup>/an) à la plus forte (400 - 700 t/km<sup>2</sup>/an) est le résultat de la multiplication de l'ensemble des facteurs retenus par l'USLE. En effet, la classe à très faible érosion apparaît essentiellement dans les hautes plaines sétifiennes et la terminaison Sud des Biban. La classe d'érosion faible (100 – 200 t/km<sup>2</sup>/an) partage les mêmes espaces avec la première classe. Comme elle apparaît d'une manière beaucoup plus discontinue dans le reste du bassin versant de la Soummam. Par contre la classe d'érosion moyenne (200 – 400 t/km<sup>2</sup>/an) occupe le Nord-ouest et l'extrême Sud du bassin versant. La classe (400 – 700 t/km<sup>2</sup>/an) d'érosion forte apparaît sous forme de taches très réduites éparpillées surtout au sein de la deuxième et la troisième classe (fig. 92).

La quantification des pertes en terre par classe d'érosion en nappe permet de constater que les classes d'érosion très faible et faible occupent plus de 50% de la surface du bassin versant avec un apport moyen annuel égale à 447000 t/an. Quant à la classe d'érosion moyenne, elle couvre, à elle seule, 35,6% de la surface du bassin avec un apport de 974100 t/an. Cependant, la classe d'érosion forte n'occupe que 12% de la surface du bassin et participe avec un apport de 588060 t/an. On remarque que la faiblesse de la surface des classes à moyenne et forte érosion est compensée par l'intensité de l'érosion (tab. 84).

Tab.84 : Répartition des classes de perte en terre par érosion en nappe

Classe	Perte en terre t/km <sup>2</sup> /an	Surface km <sup>2</sup>	Surface %	Apport moyen t/an
Très faible	0 - 100	2708	29,7	135400
faible	100 - 200	2081	22,8	312150
moyenne	200 - 400	3247	35,6	974100
forte	400 - 680	1089	12	588060
<b>total</b>		<b>9125</b>	<b>100</b>	<b>2009710</b>

Les pertes en terre estimées par l'équation universelle atteignent  $2,01.10^6$  t/an. Elles ne représentent que 43% de l'apport moyen annuel mesuré à la station de Sidi Aiche ( $4,60.10^6$  t/an).

La faiblesse de l'érosion estimée par l'USLE est due essentiellement à la prise en compte uniquement de l'érosion en nappe. Les tentatives d'adaptation et d'amélioration du modèle dues au manque de données ou à la différence du milieu n'ont pas apporté les solutions attendues ; d'où notre démarche qui considère que l'USLE n'a pris en compte qu'une seule forme d'érosion hydrique. En effet l'érosion hydrique à l'origine des pertes en terre, dans le bassin versant de la Soummam est due notamment à d'autres formes d'érosion hydrique telle que le ravinement et les mouvements de masse. Ainsi nous avons adopté la même démarche que l'USLE pour la spatialisation des facteurs relatifs aux deux nouvelles formes d'érosion proposées.

#### 4.2- Quantification de l'érosion par ravinement

Cette forme d'érosion est omniprésente dans le bassin de la Soummam. Elle est reconnue par plusieurs travaux réalisés ces dernières années (Tihay. J. P. 1976, Haddad. S et al 2015).

Les facteurs qui conditionnent cette forme d'érosion sont représentés essentiellement par les différents régimes d'écoulement notamment la torrencialité et les autres types de ruissellements (modeste, fort et très fort), la pente et l'exposition des versants.

Il est à noter que le facteur pente est utilisé dans la quantification d'érosion par ravinement de la même manière que dans la quantification de l'érosion en nappe. De ce fait, nous nous référons à la carte des pentes (fig. 86).

##### - La torrencialité

Le coefficient de torrencialité (Strhaler. 1978) est calculé pour chaque sous bassin, ce qui nous permet de caractériser les bassins de point de vue ruissellement et les classer par ordre de torrencialité. Ces bassins sont ensuite répartis dans trois classes de torrencialité (faible, moyenne et forte). Cette classification nous a permis de spatialiser ce facteur sur l'ensemble du bassin de la Soummam (fig. 94).

- **Calcul du coefficient de torrentialité des sous bassins**

Comme nous l'avons déjà vu lors du calcul de ce coefficient pour le grand sous bassin de la Soummam, le coefficient de torrentialité est obtenu à l'aide de la relation suivante:

$$C_t = \frac{N_1}{S} \cdot D_d$$

C<sub>t</sub> : coefficient de torrentialité

N<sub>1</sub> : nombre de talwegs d'ordre 1

S : superficie du bassin en Km<sup>2</sup>

D<sub>d</sub> : densité de drainage en km/km<sup>2</sup> : (D<sub>d</sub> = L/S)

L : longueur du réseau hydrographique

*Tab. 85 : calcul du coefficient de torrentialité des sous bassins*

<b>Calcul du coefficient de torrentialité des sous bassins</b>						
<b>Sous bassin versant</b>	<b>Code</b>	<b>S (km<sup>2</sup>)</b>	<b>N<sub>1</sub></b>	<b>L</b>	<b>D<sub>d</sub></b>	<b>C<sub>t</sub></b>
Oued Eddous	1501	903	116	635	0,70	0,09
Oued Zaiane	1502	1012	119	689	0,68	0,08
Oued Sahel amont	1503	430	128	475	1,10	0,32
Oued Azerou	1504	1084	131	671	0,62	0,07
Oued Sahel Aval	1505	326	71	272	0,83	0,18
Oued Bouselam Amont	1506	1785	208	1092	0,61	0,07
Oued Bouselam Moyen	1507	1234	168	871	0,71	0,09
Oued El Ham	1508	930	146	637	0,68	0,11
Oued Bouselam Aval	1509	360	30	192	0,53	0,04
Oued Soummam	1510	1061	277	931	0,88	0,23



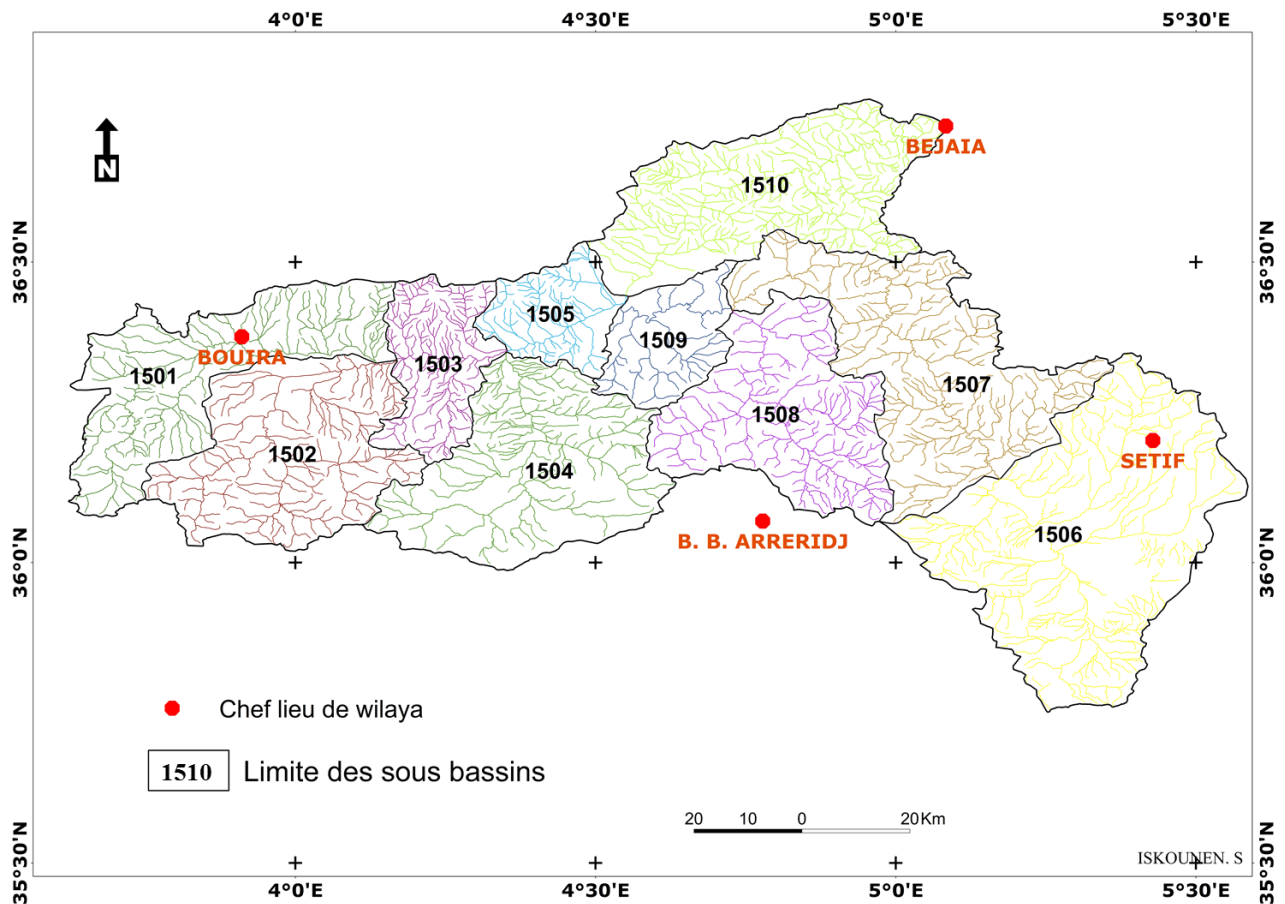


Fig. 93 : carte des limites des sous bassins de la Soummam

- **Cartographie du facteur : torrentialité**

Après avoir calculé le coefficient de torrentialité pour les 10 sous bassin de la Soummam nous avons divisé ces sous bassin en trois classes

- $0 < TC < 0,1$  : cette classe regroupe la majorité des sous bassins (Oued Eddous, Oued Zaiane, Oued Azerou, Oued Boussemam Amont, Oued Boussemam Moyen et Oued Boussemam Aval)
- $0,1 < TC < 0,2$  : cette classe regroupe le sous bassin Oued Sahel Aval et Oued El Ham
- $TC > 0,2$  : cette classe regroupe le sous bassin Oued Sahel amont et Oued Soummam

Ensuite, à chaque classe est assigné un indice variant entre 0,6 et 1,6 (tab. 86). 0,6 est affecté à la classe avec un coefficient de torrentialité faible et 1,6 à la classe de coefficient de torrentialité plus forte (fig. 94).

Tab. 86 : classes du facteur Torrentialité

Facteur : Torrentialité		
Classe (CT)	Niveau de torrentialité	Indice attribué
0 - 0,1	Torrentialité faible	0,6
0,1 - 0,2	Torrentialité Moyenne	1
> 0,2	Torrentialité Fort	1,6

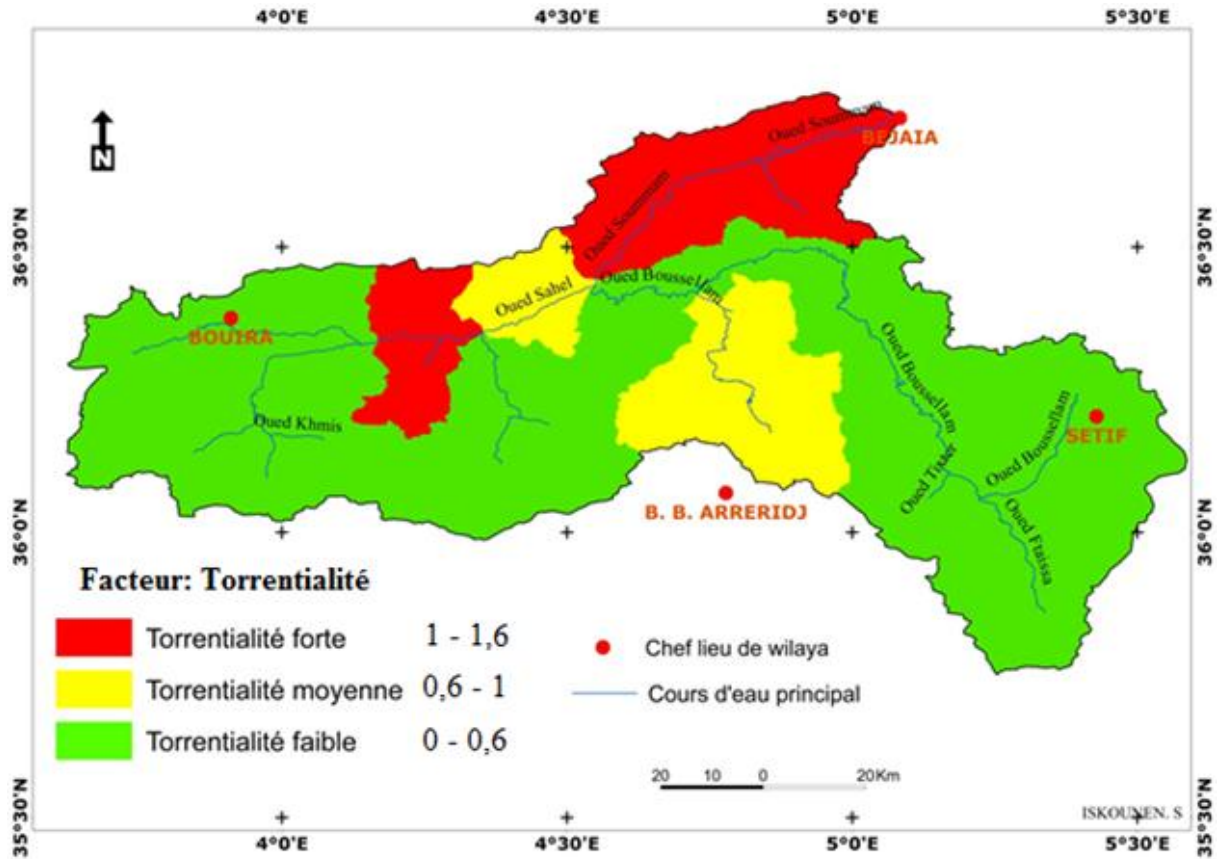


Fig. 94 : Carte de torrentialité du bassin versant de la Soummam

Le Nord du bassin et l'extrême Sud-est montrent une torrentialité faible. Par contre les Biban se caractérisent par une torrentialité moyenne. La torrentialité considérée comme forte affecte uniquement la partie aval de l'oued Sahel.

#### - L'exposition des versants

Ce facteur permet de classer les versants en 4 catégories réparties entre les classes les plus défavorisées jusqu'aux classes les plus exposées aux masses d'air humides.

On utilisant un MNT de résolution 30 mètres et à l'aide du logiciel ArcGis10 nous avons déterminé les expositions des versants du bassin de la Soummam (fig.83).

Initialement, nous avons opté pour huit orientations. Seulement, la carte obtenue est pratiquement illisible De ce fait, nous n'avons retenu que les quatre orientations principales.

Ainsi, la carte montre la prédominance de deux grandes orientations, en l'occurrence l'exposition Nord qui occupe 29% de la surface totale du bassin et apparait essentiellement sur les parties sud du bassin et des hautes plaines sétifiennes. Par contre, l'exposition Sud-est représentée par le flanc Sud et Sud-est de la chaîne du Djurdjura (tab. 87).

Tab. 87 : Répartition des surfaces selon les expositions principales



Classe d'exposition	Superficie km <sup>2</sup>	Superficie %
Nord	2681	29
Est	1986	22
Sud	2886	32
Ouest	1572	17

- **Cartographie de facteur : exposition des versants**

Après avoir classifié l'orientation des versants en 4 classes, nous avons assigné à chaque classe un indice variant entre 0,6 et 1,6 (tab. 88). 0,6 est affecté à la classe d'orientation la plus défavorisée aux masses d'air humides et 1,6 à la classe la plus exposée aux masses d'air humides (fig. 95).

Tab. 88 : classes du facteur (Exposition des versants)

Facteur : Exposition des versants		
Classes	Influence de l'exposition	Indice attribué
Exposition Sud	faible	0,6
Exposition Ouest	Modeste	0,8
Exposition Est	moyenne	1,2
Exposition Nord	Grande	1,6

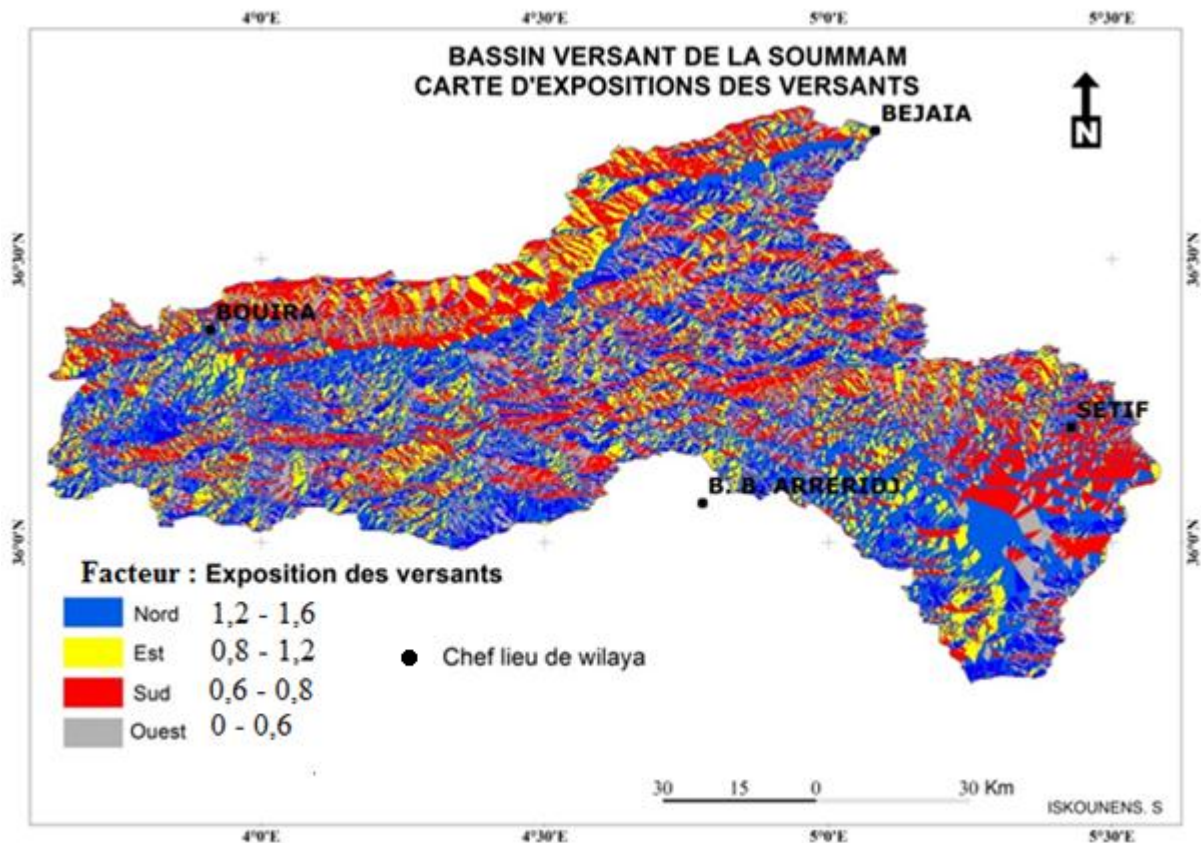


Fig. 95: Carte d'exposition des versants du bassin versant de la Soummam

- **Les régimes d'écoulements**

Ce facteur est utilisé afin de classer les types d'écoulement superficiel reconnus dans le bassin versant de la Soummam. Ce travail utilise les résultats d'une étude sur la régularisation de la Soummam (Coyne et Bellier 1973). Trois type d'écoulement sont identifiés (Ruissellement : modeste, fort et très fort).

- **Cartographie du facteur : régime des écoulements**

Après l'identification des types de ruissellements du bassin versant de la Soummam (selon le travail de Jean Tricart 1972) et leur classement en ruissellement modeste, fort et très fort, nous avons assigné à chaque classe de ruissellement un indice variant entre 0,6 et 1,6 (tab. 89). 0,6 est affecté à la classe de ruissellement faible et 1,6 à la classe de ruissellement très fort (fig. 96)

Tab. 89 : classes du facteur (Régime des écoulements)

Facteur : Régime des écoulements		
Classes	Influence sur le ravinement	Indice attribué
Ruissellement modeste	Faible	0,8
Ruissellement fort	moyenne	1,2
Ruissellement très fort	forte	1,6

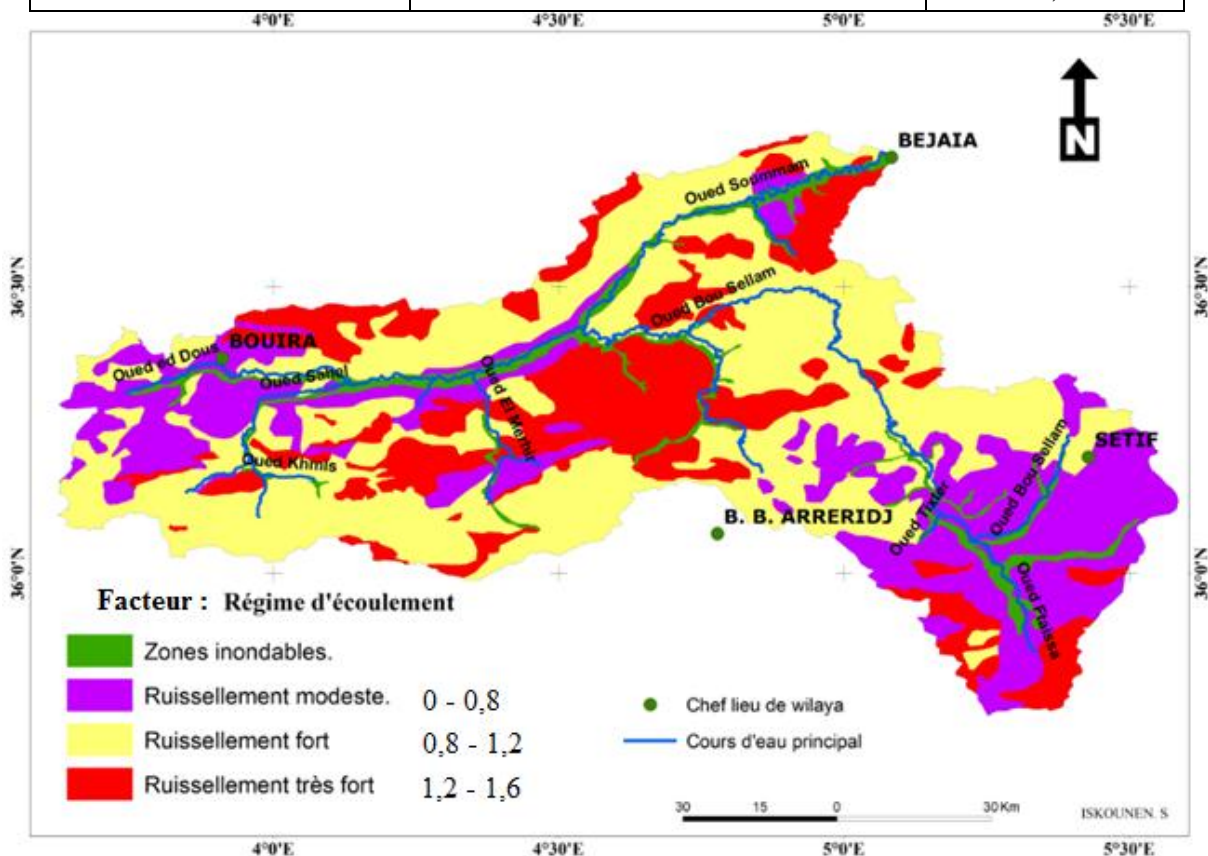


Fig. 96 : Carte des régimes d'écoulement du bassin versant de la Soummam

Le ruissellement est la résultante de la combinaison des facteurs liés à la pente, à la lithologie, à l'occupation du sol, et au régime des précipitations. Ainsi, la carte (fig.96) montre quatre

types de ruissellement, allant du ruissellement modeste qui apparaît sur le plateau de Bouira et les plaines sétifiennes. Le ruissellement fort affecte la majorité de la surface du bassin. Cependant, le ruissellement très fort se généralise essentiellement sur les Biban. Comme il affecte quelques zones isolées sur le flan du Djurdjura.

#### - **Résulta de la quantification de l'érosion par ravinement**

La carte de l'érosion par ravinement issue de la multiplication des facteurs (torrentialité, régime d'écoulement, exposition des versants et la pente) nous a permis d'avoir une estimation et une répartition des pertes en terre par ravinement du bassin versant de la Soummam (fig. 98).

La répartition de l'érosion par ravinement est représentée par quatre classes (ravinement faible, moyen, fort et très fort) avec une estimation des pertes en terre annuelles pour chaque classe.

Le ravinement considéré comme faible apparaît essentiellement dans les plaines sétifiennes. Le ravinement moyen affecte surtout l'extrême Nord du bassin et l'extrême Sud du bassin. Cependant, le ruissellement fort apparaît dans les Biban et certaines zones du flanc du Djurdjura, comme il s'étale sur les hauteurs limitant les plaines sétifiennes. Le ruissellement très fort caractérise particulièrement la partie aval de l'oued Sahel (fig. 98).

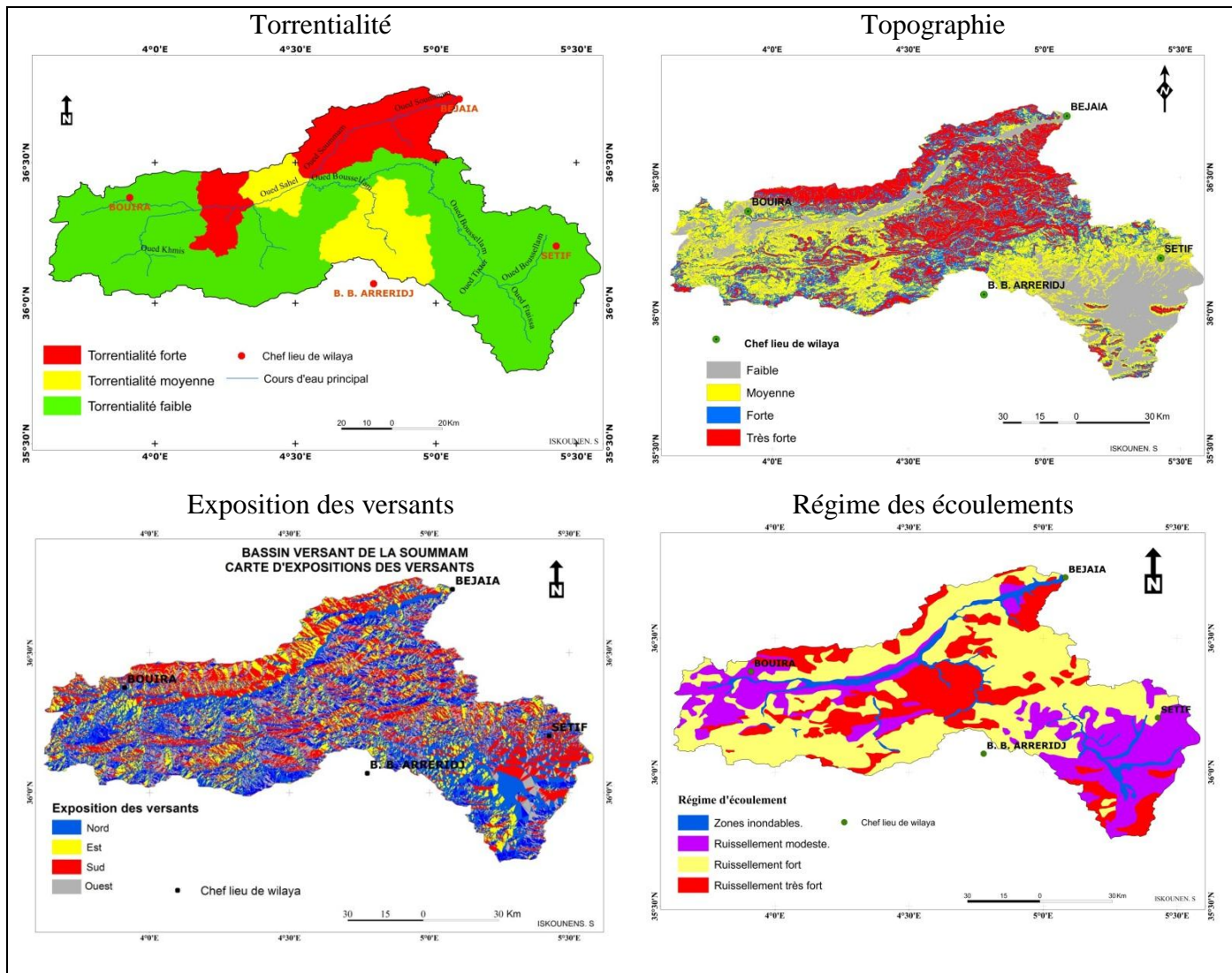


Fig. 97 : planche des facteurs de l'érosion par ravinement

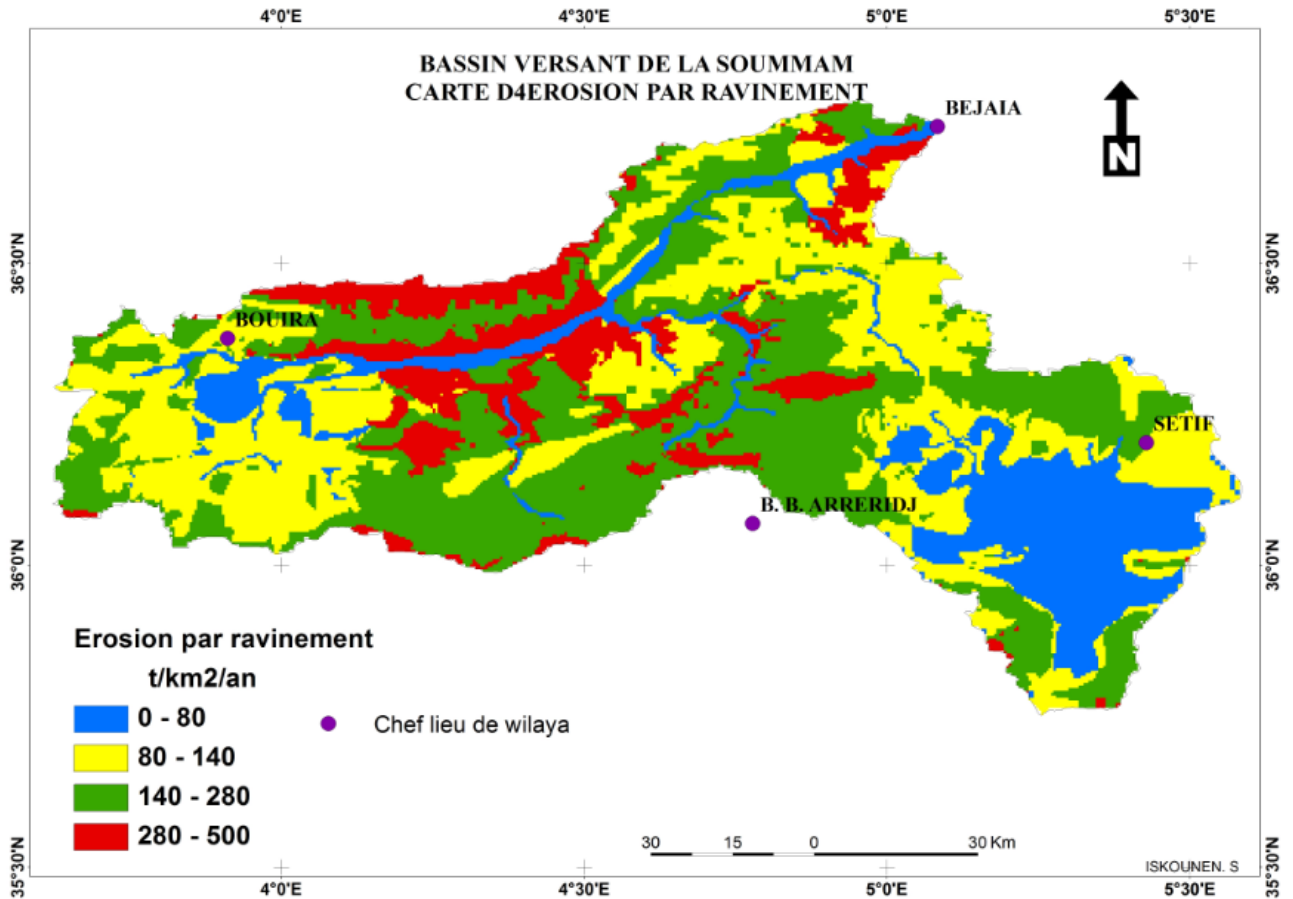


Fig. 98: Carte d'érosion par ravinement du bassin de la Soummam

L'érosion par ravinement affecte le bassin d'une manière inégale et très discontinue. En effet, 17% de la surface du bassin subit une érosion très faible et participe donc à l'apport moyen annuel avec 60200t/an. L'érosion considérée forte n'affecte que 11% de la surface totale mais participe avec 407160 t/an. Le reste de la surface du bassin (72%) subit une érosion faible à moyenne et ne participe qu'avec 1200000 t/an. En effet, avec sept fois la surface de l'érosion forte, elle ne produit que trois fois son apport (tab.90).

Tab. 90: Répartition des surfaces selon les classes de perte en terre par ravinement

Classe	Pertes en terre (t/km <sup>2</sup> /an)	Surface km <sup>2</sup>	Surface %	Apport moyen annuel : t/an
Très faible	0 - 80	1505	17	60200
Faible	80 - 180	3016	33	392080
Moyenne	180 - 280	3560	39	818800
Forte	280 - 500	1044	11	407160
Total		9125	100	1678240

Le ravinement est une forme d'érosion qui participe au flux sédimentaire d'une manière efficace. Il est le produit du ruissellement fort à très fort et de la torrentialité élevée. Sa présence dans le bassin versant de la Soummam a nécessité sa prise en compte dans la



quantification des pertes en terre. Par ailleurs, la localisation des surfaces affectées par cette forme d'érosion notamment le ravinement fort permet une lutte efficace contre la réduction du transport solide.

#### 4.3- Quantification d'érosion par mouvement de masse

La dynamique par mouvement de masse est conditionnée par plusieurs facteurs notamment, les formations meubles et particulièrement les formations superficielles dépassant les 50cm d'épaisseur, une pente suffisante et une présence de l'eau (présence de source et/ou infiltration).

##### - Formation meubles et formations superficielles

Le facteur lithologique se base sur la présence des formations meubles et particulièrement les formations superficielles.

Ce facteur est obtenu en combinant les informations obtenues à partir des cartes géologiques et l'utilisation de la carte des formations superficielle et leurs sensibilités à l'érosion au 1/200 000 élaborée par J.Tricart dans le cadre de l'étude de la régularisation du bassin de la Soummam (1972).

Ainsi, la cartographie de ces formations est réalisée en tenant compte de leurs sensibilités à l'érosion hydrique en trois catégories principales (fig. 99) :

1. formations superficielles d'épaisseur inférieure à 50cm laissant apparaître uniquement la roche en place (érodibilité faible) et qui se localisent uniquement sur le plateau de Bouira et les hautes plaines sétifiennes.
2. formation superficielles (érodibilité moyenne) assez épaisses subissant une érosion linéaire très localisée et se localisent sur les bordures des hautes plaines sétifiennes et le long de la vallée de la Soummam. Comme elles apparaissent sous forme d'éboulis au pied de la paroi rocheuse de la chaîne du Djurdjura.
3. formation superficielles (érodibilité forte) épaisses et souvent perméables montrant des aspects d'instabilité essentiellement par mouvements de masse. Elles occupent une surface importante et continue dans le bassin versant et particulièrement les zones des Biban et le piedmont de la chaîne du Djurdjura.

Ainsi, nous avons assigné à chaque classe un indice variant entre 0,6 et 1,6 (tab. 91). 0,6 est affecté à la classe de formations superficielles à érodibilité faible et 1,6 à la classe de formations superficielles à érodibilité forte (fig. 99).

Tab. 91 : classes du facteur (Formations superficielles)

<b>Facteur : Formations superficielles</b>		
<b>Classes</b>	<b>Influence sur les mouvements de masse</b>	<b>Indice attribué</b>
Affleurement à érodibilité faible	<b>faible</b>	0,6
Formations superficielles à érodibilité moyenne	<b>moyenne</b>	1,2
Formations superficielles à érodibilité forte	<b>fort</b>	1,6

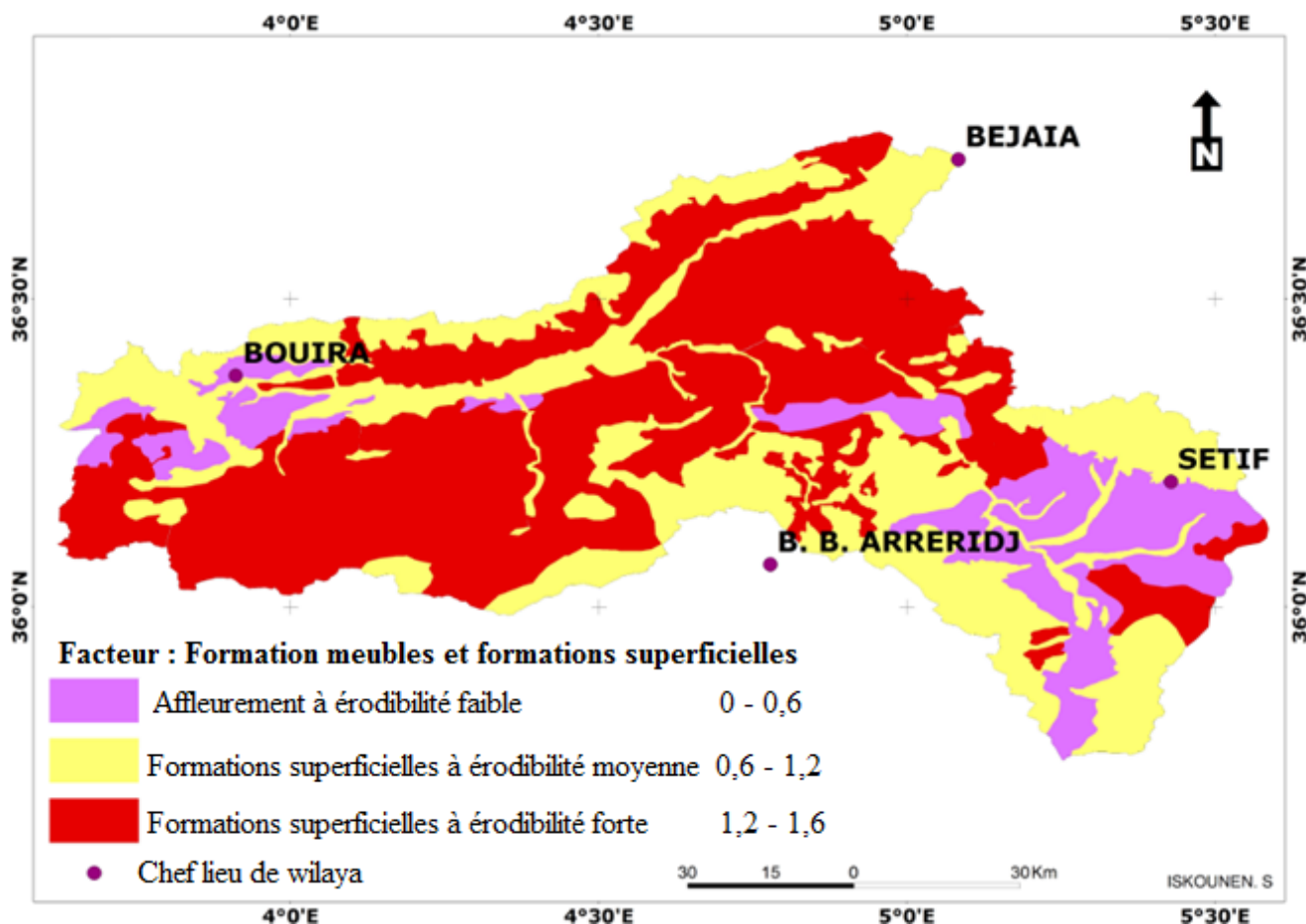


Fig. 99 : Carte des affleurements et des formations superficielles du bassin versant de la Soummam

#### - Perméabilité

L'eau joue un rôle primordial dans le déclenchement des mouvements de masse. Lorsque l'eau s'infiltré suffisamment pour permettre au sol de franchir certains seuils (limite de plasticité des formations), des déformations et parfois des ruptures s'amorcent (Avenard J. A. 1990). Ainsi, la prise en considération de la perméabilité des formations et la présence des sources est essentielle dans l'étude des mouvements de masse.

#### - Cartographie du facteur Perméabilité

Afin de spatialiser le facteur de perméabilité, nous avons repris la carte des régimes d'écoulement du bassin de la Soummam au 1/200 000, réalisée dans le cadre de l'étude de la régularisation du bassin de la Soummam (1972). Il est établi que les milieux à régime d'écoulement de surface très fort coïncident avec les zones à perméabilité faible (relation antinomique). Les milieux à régime d'écoulement hypodermique et à ruissellement moyen correspondent aux zones à perméabilité moyenne. Cependant, les milieux à régime d'écoulement hypodermique avec un ruissellement modeste se superposent aux zones à perméabilité forte. Ainsi, après avoir cartographié les différents niveaux de perméabilité, nous avons assigné à chaque classe un indice variant entre 0,6 et 1,6 (tab. 92). 0,6 est affecté à la classe de perméabilité faible et 1,6 à la classe de perméabilité forte (fig. 100).

Tab. 92 : classes du facteur (Perméabilité)

Facteur : Perméabilité		
Classes	Influence sur les mouvements de masse	Indice attribué
Zones inondables	Nul	0
Perméabilité faible	faible	0,6
Perméabilité moyenne	moyenne	1,2
Perméabilité forte	fort	1,6

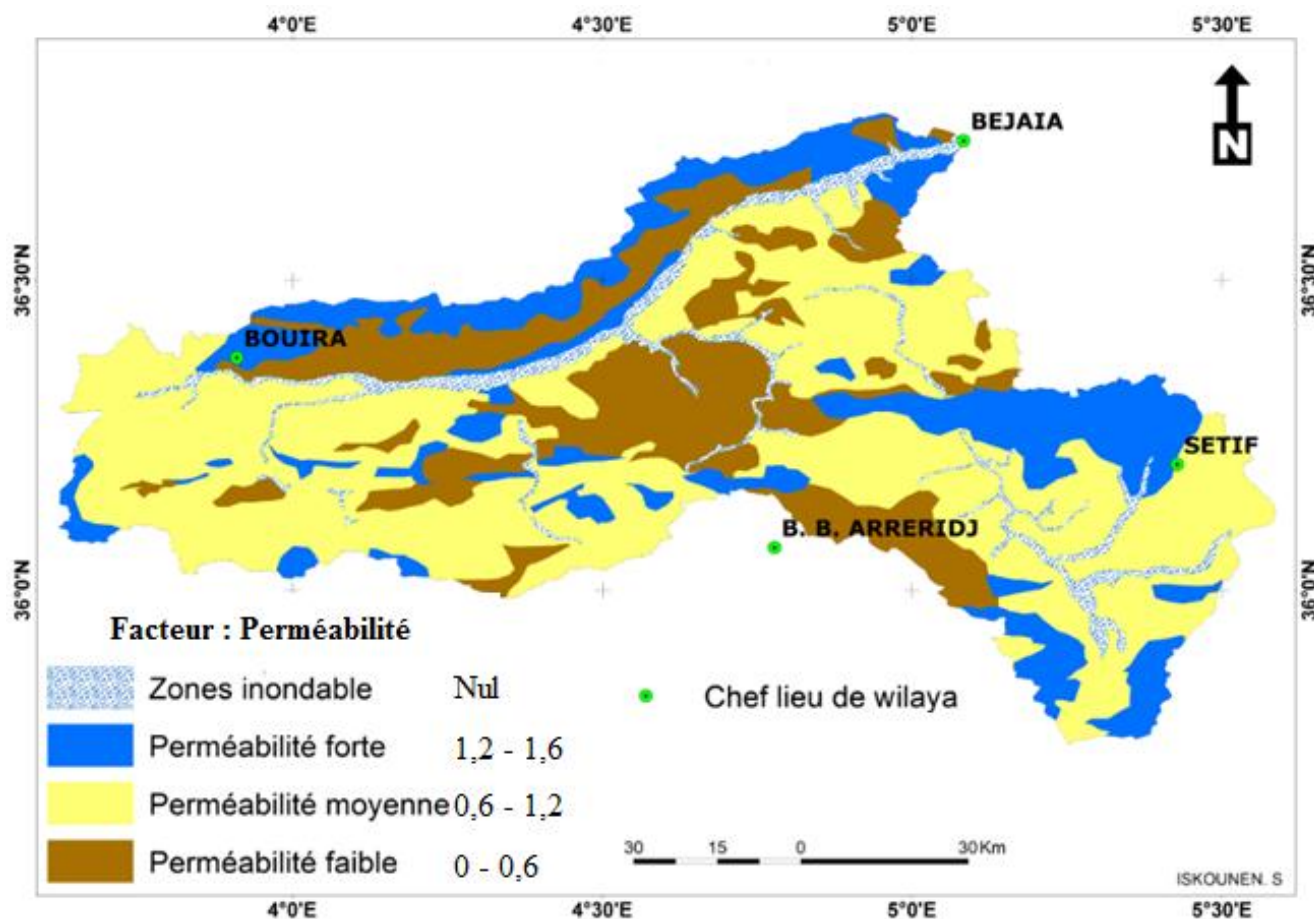


Fig.100 : Carte de perméabilité du bassin versant de la Soummam

#### - Répartition des sources

Les eaux souterraines (nappes, karst) quand elles rencontrent une formation imperméable apparaissent à la surface sous forme de sources (résurgences). Leurs apparitions sont souvent accompagnées de mouvements de masse avec niche d'arrachement. Comme elles imbibent continuellement la partie aval au point de provoquer une instabilité chronique. De ce fait, nous avons considéré la présence des sources comme facteur déstabilisant des formations sensibles à l'eau.



- **Cartographie du facteur : Répartition des sources**

Afin de repérer les sources dans le bassin versant de la Soummam nous avons utilisé les cartes topographiques à 1/50 000. Pour couvrir la totalité du bassin versant de la Soummam, nous avons réuni 20 cartes. Ensuite, nous avons procédé à la digitalisation de ces sources (fig. 101). En deuxième étape, et avec la fonction « Densité de points » d'Arcgis10 qui sert à calculer une grandeur par unité de surface à partir d'entités ponctuelles qui se trouvent dans un voisinage donné de chaque cellule, nous avons réalisé la hiérarchisation de la densité des sources (densité faible, moyenne et forte) dans le bassin de la Soummam (fig.102).

Ainsi, après avoir cartographié les différentes classes de densité des sources, nous avons assigné à chaque classe un indice variant entre 0,6 et 1,6 (tab. 93). 0,6 est affecté à la classe de densité des sources faible et 1,6 à la classe de densité des sources forte (fig. 102).

Tab. 93 : classes du facteur (Densité des sources)

Facteur : Densité des sources		
Classes	Influence sur les mouvements de masse	Indice attribué
densité des sources forte	fort	1,6
densité des sources moyenne	moyenne	1,2
densité des sources faible	faible	0,8

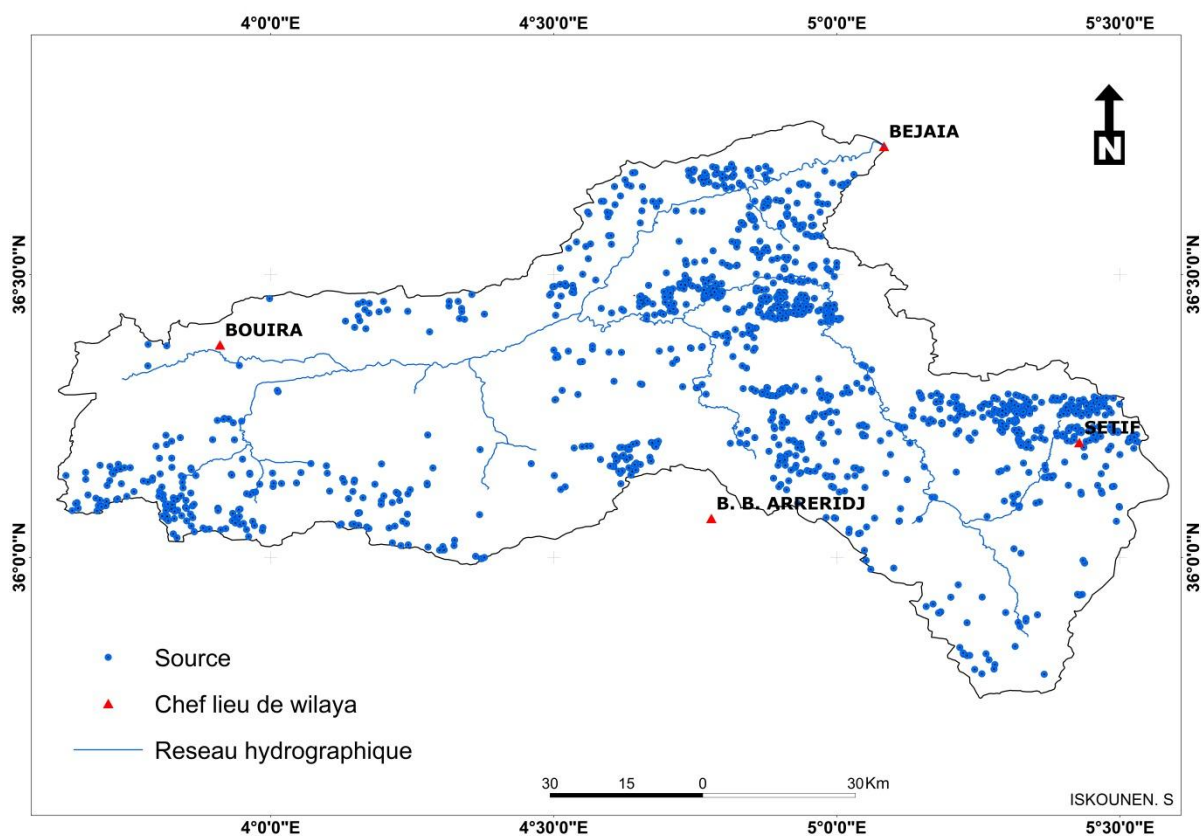


Fig.101 : Carte de répartition des sources dans le bassin versant de la Soummam

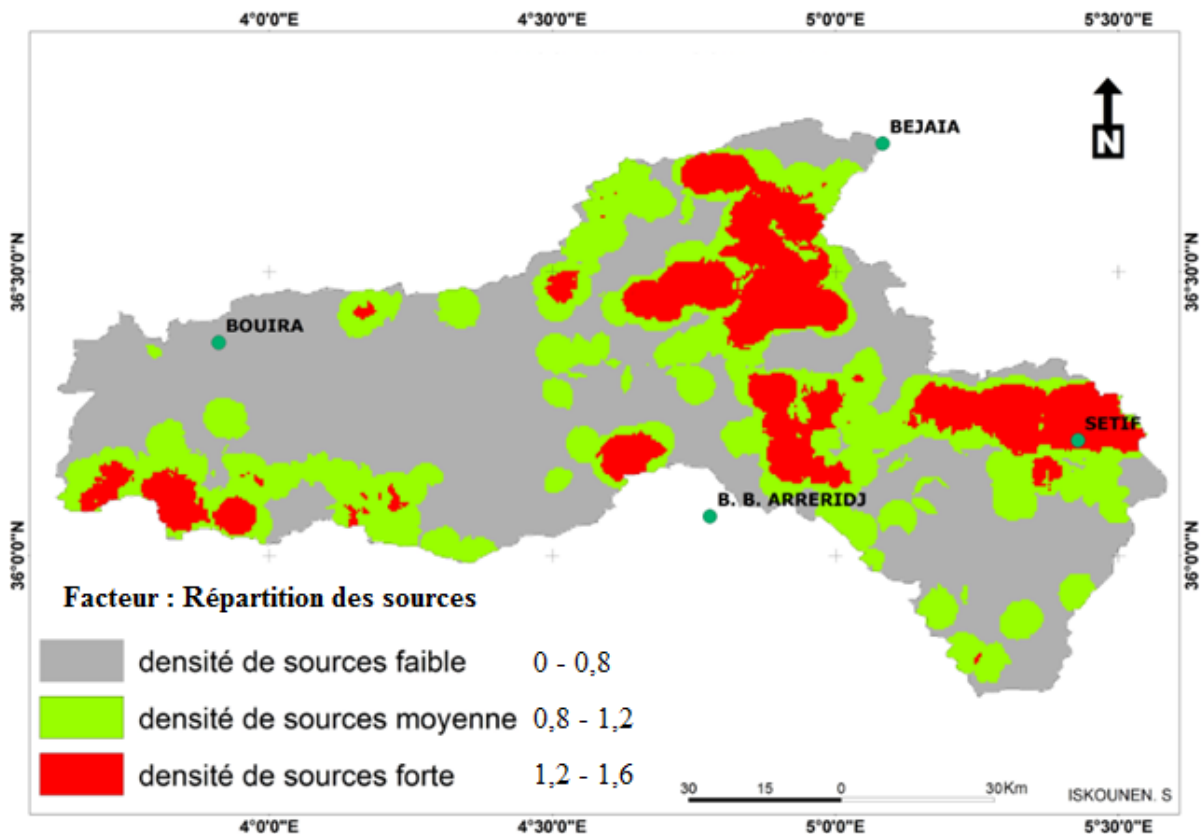


Fig.102 : Carte de densité des sources dans le bassin versant de la Soummam

La lecture de la carte (fig. 90) permet de constater que la répartition des densités moyennes se localise essentiellement sur les limites du bassin versant de la Soummam. Les fortes densités se situent plutôt dans la partie Nord du bassin.

#### - **Résultat de la quantification de l'érosion par mouvements de masse**

La multiplication des indices représentant les différents facteurs qui conditionnent la dynamique par mouvements de masse, nous a permis d'avoir une spatialisation et une estimation des pertes en terre par mouvements de masse (fig.104).

La carte obtenue fait ressortir un zonage (apport très faible à fort) d'érosion par mouvements de masse dans tout le bassin versant de la Soummam. En raison des conditions favorables, dans la partie nord du bassin, nous constatons une extension assez importante des zones susceptibles d'être affectées par une forte activité de mouvement de masse. Certaines zones, montrant des densités élevées de sources sont classées comme zones vulnérables malgré l'absence de facteurs importants.

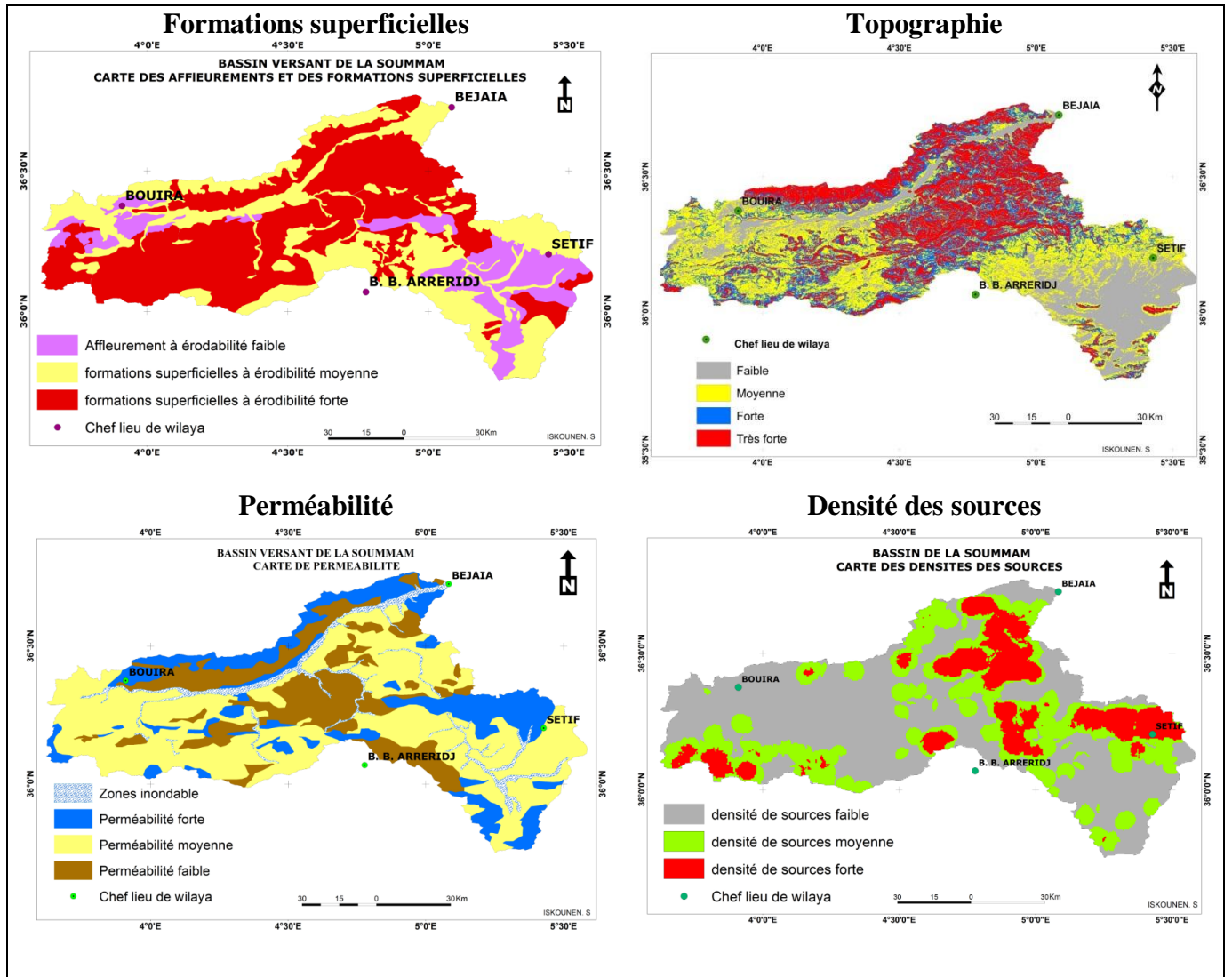
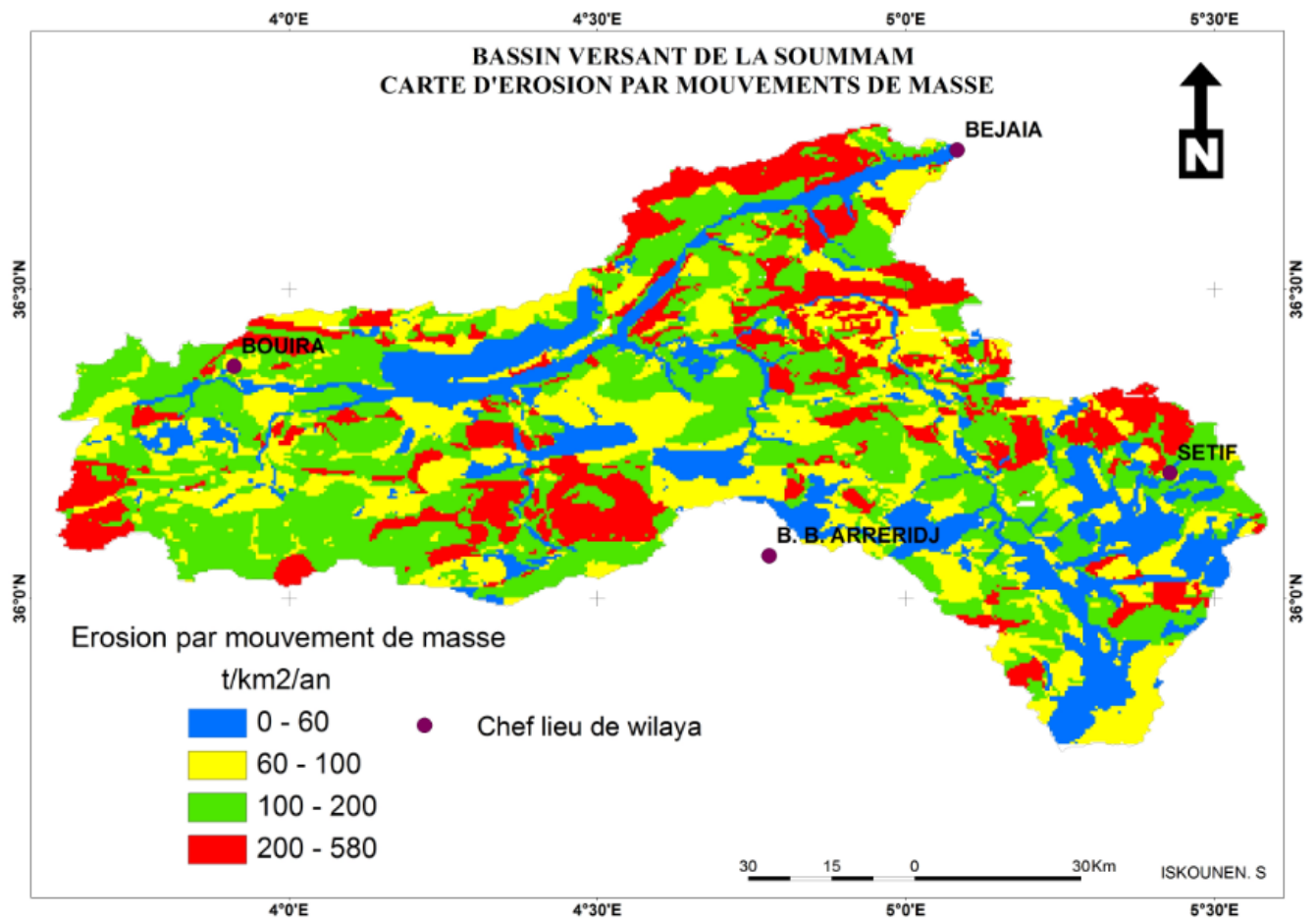


Fig. 103 : planche des facteurs de l'érosion par mouvements de masse



*Fig. 104 : Carte des pertes en terre par mouvements de masse du bassin versant de la Soummam*

Le tableau récapitulatif l'apport des différentes zones permet de constater que les zones les plus vulnérables (apport fort) n'occupent que 12% de la surface totale du bassin. Néanmoins, elles participent avec un apport quasi-égal à l'apport de la zone à vulnérabilité moyenne qui représente 37% de la surface totale du bassin versant (tab. 94)

Tab. 94 : Répartition des classes de perte en terre par mouvements de masse

Classe	Perte en terre t/km <sup>2</sup> /an	Surface km <sup>2</sup>	Surface %	apport moyen t/an
Très faible	0 - 60	1853	20	55590
faible	60 - 100	2859	31	228720
moyenne	100 - 200	3372	37	505800
forte	200 - 580	1041	12	405990
total		9125	100	1196100

Des trois formes d'érosion à l'origine des pertes en terre, l'apport des mouvements de masse vient en troisième position et participe avec 24% de l'apport global. Cette forme d'érosion qui est absente dans la formulation de l'USLE occupe dans le bassin versant de la Soummam une proportion non négligeable. Ainsi, son intégration dans la quantification des pertes en terre ne peut que renforcer l'applicabilité de l'équation universelle des pertes en terre.

#### **5-Rèultat de la quantification de l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Soummam**

L'addition de la spatialisation des apports des trois formes d'érosion a permis d'obtenir une carte d'érosion hydrique spatialisée et quantifiée dans le bassin versant de la Soummam.

Les zones d'apport réparties en quatre classes sont le résultat de la superposition des différentes classes relatives aux trois formes d'érosion calculées (fig. 93).

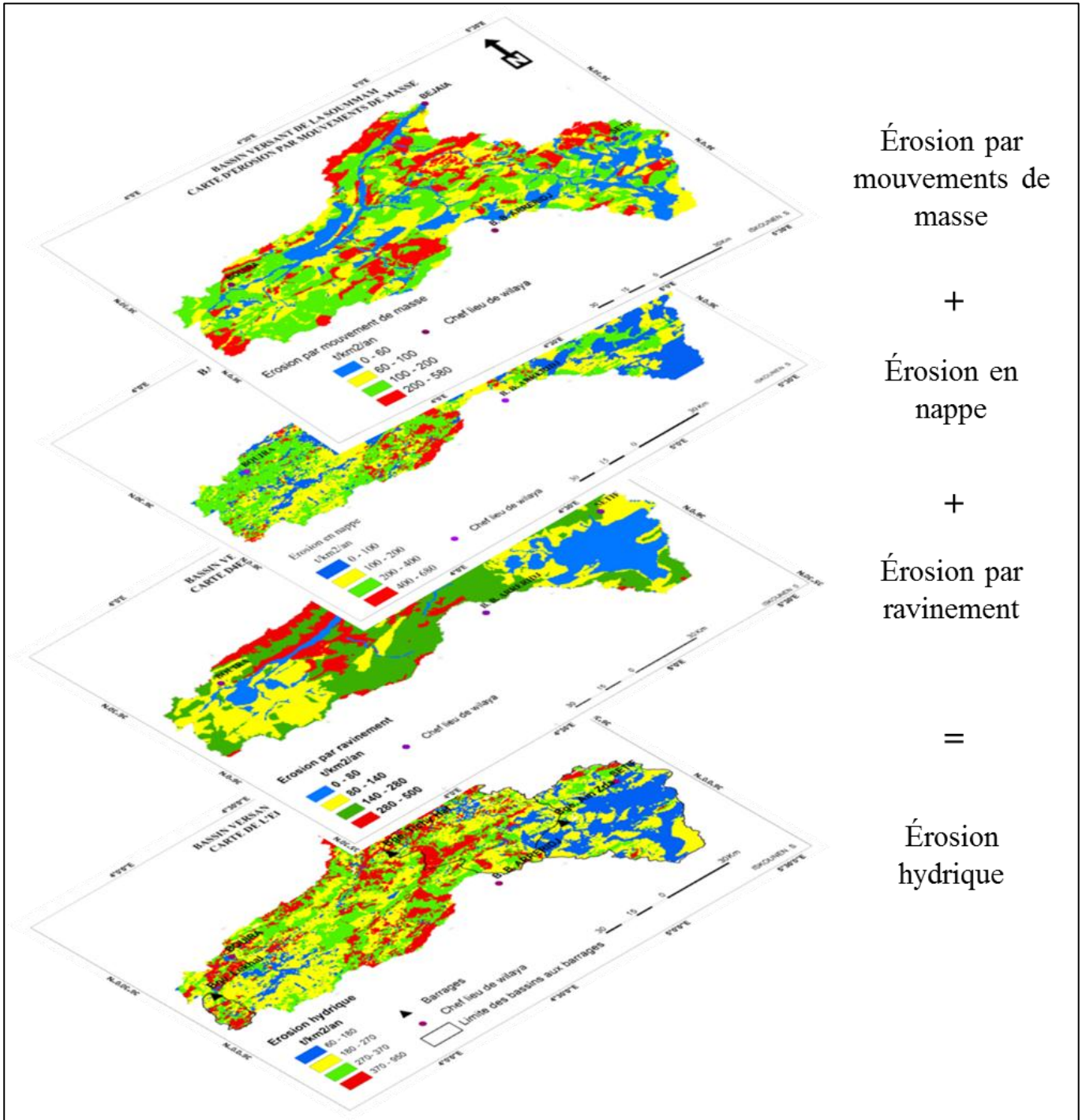


Fig. 105 : les trois formes d'érosion constituant l'érosion hydrique



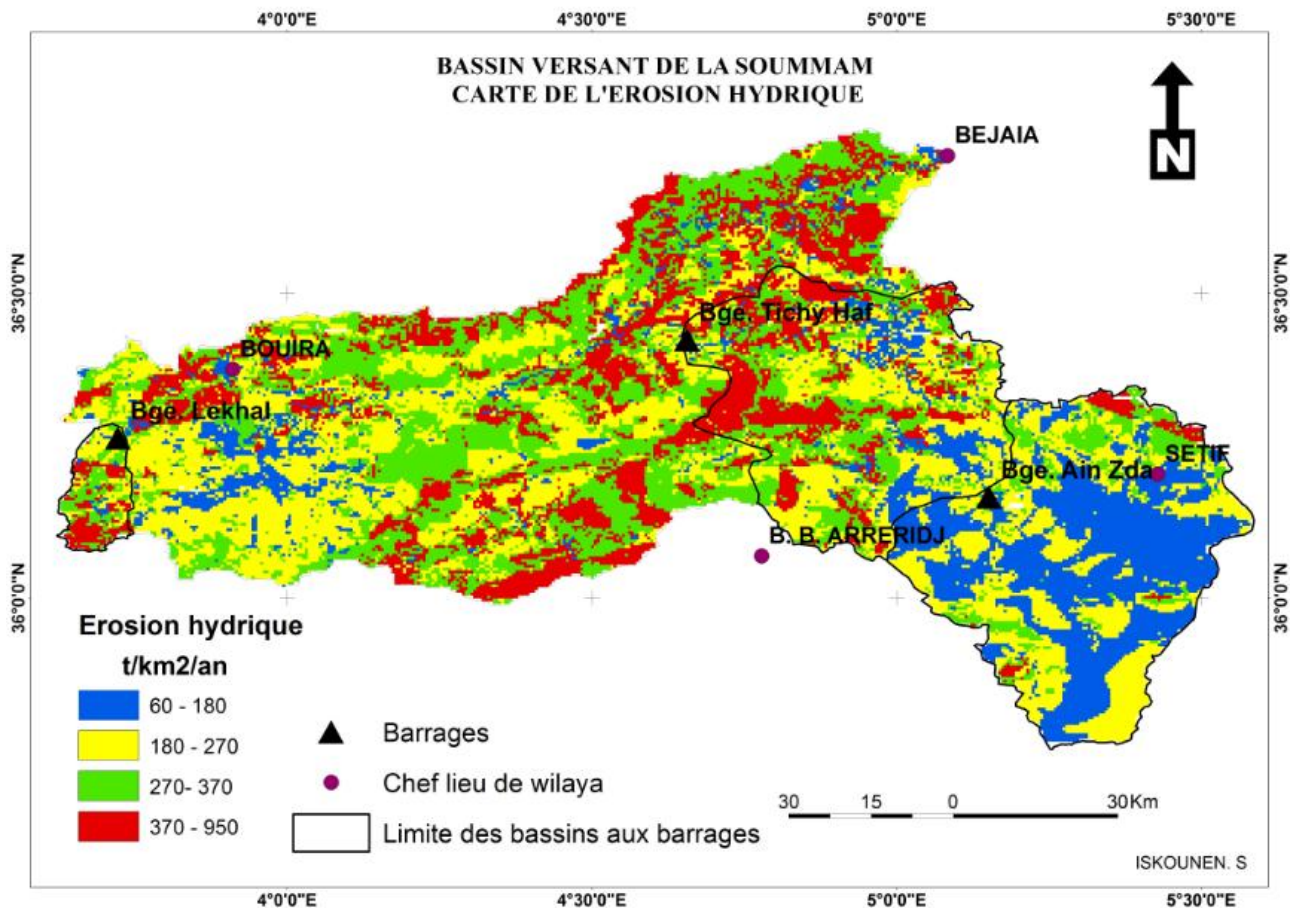


Fig. 106 : Carte d'érosion hydrique du bassin versant de la Soummam

La répartition spatiale des différentes classes permet de confirmer les résultats partiels obtenus pour chaque forme d'érosion. Seulement, en additionnant l'apport de chaque forme nous avons obtenu des dégradations spécifiques cumulées donc largement supérieures à la dégradation spécifique relative à chaque forme d'érosion. En effet, les hautes plaines et le plateau de Bouira montre toujours l'apport le plus faible du bassin versant. Par contre, la partie Nord du bassin est affectée beaucoup plus par une érosion forte. Le domaine des Biban subit une érosion faible à moyenne en générale et forte par endroit (fig. 93)

## 6- Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant de la Soummam

L'apport total de l'érosion hydrique du bassin versant de la Soummam atteint 4883897 t/an. La part de l'érosion en nappe atteint 41% de l'apport annuel. De ce fait, elle est la première forme à l'origine des pertes en terre dans le bassin. Avec 34,4 % de l'apport annuel, l'érosion par ravinement vient en deuxième position. Cette situation s'explique par le fait que la surface affectée par le ravinement, et particulièrement le ravinement fort, est très limitée. Cependant, l'érosion par mouvements de masse, avec 24,6% de l'apport annuel occupe la troisième et dernière place. Ce classement se justifie par le fait que cette forme d'érosion occupe une surface assez réduite et ne participe au flux sédimentaire que durant une période limitée dans l'année (printemps) (tab. 95).

Tab. 95: Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant de la Soummam

forme d'érosion	Apport %	apport: t/an
Erosion en nappe	41	2009710
Erosion par ravinement	33	1678240
Erosion par mouvements de masse	26	1195947
total	100	4883897

## 7- Comparaison de l'érosion hydrique calculée et mesurée au niveau des stations et/ou des barrages dans le sous bassin de Boussellam

Le sous bassin de Boussellam qui représente 50% de la surface totale de la Soummam est contrôlé par deux stations hydrométriques qui correspondent à deux barrages : le barrage de Ain Zada recevant les eaux de la partie amont de l'oued Boussellam et le barrage de Tichy Haf contrôlant la partie aval, avant la confluence avec l'oued Soummam (Fig. 79). La partie amont fait partie des hautes plaines sétifiennes qui se caractérisent par un climat semi-aride, l'absence de reliefs importants et la prédominance de la céréaliculture. Par contre la partie aval qui fait partie de la terminaison ouest des Babor occidentaux est beaucoup plus accidentée, plus humide et subissant une énergie érosive plus importante.

La comparaison de l'érosion hydrique, calculée et mesurée aux stations et aux barrages, permet les observations suivantes :

Au niveau de l'ensemble du sous bassin de Boussellam (tab. 85), l'érosion en nappe calculée représente moins de 40% de l'érosion mesurée. Sans le charriage la dégradation spécifique calculée dépasserait la dégradation spécifique mesurée à la station de 10%. Par contre, Si on ajoute au transport en suspension les sédiments charriés (estimés à 25%), la dégradation spécifique calculée serait inférieure à la dégradation spécifique mesurée de 16%. Dans les deux cas de figure les résultats restent très encourageants.

Tab.96: Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant de Boussellam

Bassin versant Boussellam	Erosion (t/an)	Erosion(t/km <sup>2</sup> /an)
Erosion en nappe	965515	238
Ravinement	663560	163
Mouvement de masse	452575	108
Total (érosion calculé)	2081650	509
Station Sidi Yahya (+25% charriage)	2476149	611

Au niveau de la partie aval (tab.97), La dégradation spécifique due à l'érosion en nappe ne représente que 35% de la dégradation spécifique liée à la bathymétrie. Avec l'ajout du ravinement et des mouvements de masse, la dégradation spécifique calculée atteint 79% de la dégradation spécifique déduite de la bathymétrie. Comme on constate un léger recul de la dégradation spécifique de l'érosion en nappe et une légère augmentation de la dégradation liée au ravinement ; ces résultats sont conformes avec l'état de dégradation de cette partie du bassin.



Tab.97 : Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant du barrage TICHY HAF

Bassin du barrage Tichy Haf	Erosion (t/an)	Erosion(t/km <sup>2</sup> /an)
Erosion en nappe	379010	219
Ravinement	296225	171
Mouvement de masse	174744	102
Total (érosion calculé)	849979	492
Bathymètre 2014	1079375	625

Par contre, la partie amont (tab.98) qui se caractérise par des conditions morpho-climatiques spécifiques aux Hautes plaines sétifiennes, montre une dégradation spécifique due à l'érosion en nappe de 83%. A elle seule, elle atteint le pourcentage cumulé des trois formes d'érosion dans la partie aval comme dans l'ensemble du sous bassin de Boussellam. En effet, en ajoutant l'apport des deux autres formes d'érosion (ravinement et mouvements de masse), la dégradation spécifique calculée atteindrait les 227t/km<sup>2</sup>/an. C'est 40% de plus que la dégradation spécifique estimée à partir de la bathymétrie (135t/km<sup>2</sup>/an). Cette situation permet de dire que, dans cette partie amont, l'apport des deux formes d'érosion (ravinement et mouvement de masse) est légèrement exagéré. Néanmoins, la sédimentation le long des affluents est favorisée par la morphologie de cette zone.

Tab.98: Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant du barrage AIN ZADA

Bassin du barrage Ain Zada	Erosion (t/an)	Erosion(t/km <sup>2</sup> /an)
Erosion en nappe	231451	112
Ravinement	186876	89
Mouvement de masse	55152	26
Total (érosion calculé)	473479	227
Station Maghraoua (2350 km <sup>2</sup> )	453279	192
Bathymètre 2014	280800	135

## 8- Conclusion

Après avoir analysé les flux hydro-sédimentaires et passé en revue les différents processus qui caractérisent les sous bassins contrôlés (chap. 4), nous avons appliqué l'USLE pour estimer et spatialiser l'érosion et la charge sédimentaire livrée à la mer par l'oued Soummam. Sachant que le modèle ne calcule que l'érosion en nappe et comparativement aux mesures, il sous-estime largement le transport solide, nous avons opté pour l'ajout des deux autres formes d'érosion notamment le ravinement et les mouvements de masse. Les résultats obtenus, que ce soit au niveau du grand bassin versant de la Soummam ou au niveau des sous bassins sont encourageants. En effet, avec cette amélioration, les pertes en terre qui étaient liées uniquement à l'érosion en nappe, peuvent être considérées comme le produit d'une érosion hydrique. Aussi, cette démarche justifie et renforce l'applicabilité de l'USLE et atténue les contradictions dues au passage de la parcelle au bassin versant.

## **CHAPITRE VI**

### **Aménagements hydrauliques et dynamique du trait de côte dans la baie de Bejaia**

## **1. Introduction**

Plusieurs études à travers le monde ont montré que la construction des barrages sur les cours d'eau a eu des effets non négligeables sur l'équilibre des espaces côtiers. Ces aménagements hydrauliques sont de véritables pièges à sédiments qui empêchent les apports en sédiments d'atteindre les rivages (Quinquis M. 2017).

Après avoir mesuré le flux sédimentaire du bassin de la Soummam avant et après la construction des barrages dans les chapitres précédents, le but de ce chapitre est de comparer la dynamique du trait de côte de la baie de Bejaia avec la diminution du flux sédimentaires provenant du bassin versant de la Soummam. Néanmoins, il est établi que l'évolution du trait de côte dépend aussi bien des conditions morpho-géologiques, hydrologiques et anthropiques que météo-marins à l'origine des houles, des courants marins et des variations du niveau de la mer.

## **2. Contexte morpho-structural de la baie et évolution du trait de côte**

Il est indéniable que l'origine de la baie de Bejaia est un effondrement récent dû à une activité néotectonique qu'a connu le littoral algérien. L'activité sismique actuelle qui affecte la vallée de la Soummam et particulièrement la baie de Bejaia participe certainement dans le façonnement du trait de côte. En effet, depuis 1972 jusqu'aujourd'hui (48 ans), la baie de Bejaia et ses environs (fig.107) ont été secoués par une centaine de secousses. Ces séismes ont une magnitude inférieure à 5 sur l'échelle ouverte de Richter et une profondeur inférieure à 10 km. Une partie importante de ces séismes se situe au large de la baie et peuvent donc engendrer des vagues qui participent à la dynamique morpho-sédimentaire de la zone côtière. Aussi, les formations meubles accumulées par les courants et les apports de l'oued Soummam peuvent être déstabilisées lors d'un séisme et glisser vers les profondeurs sous forme de mouvements de masse sous-marins.

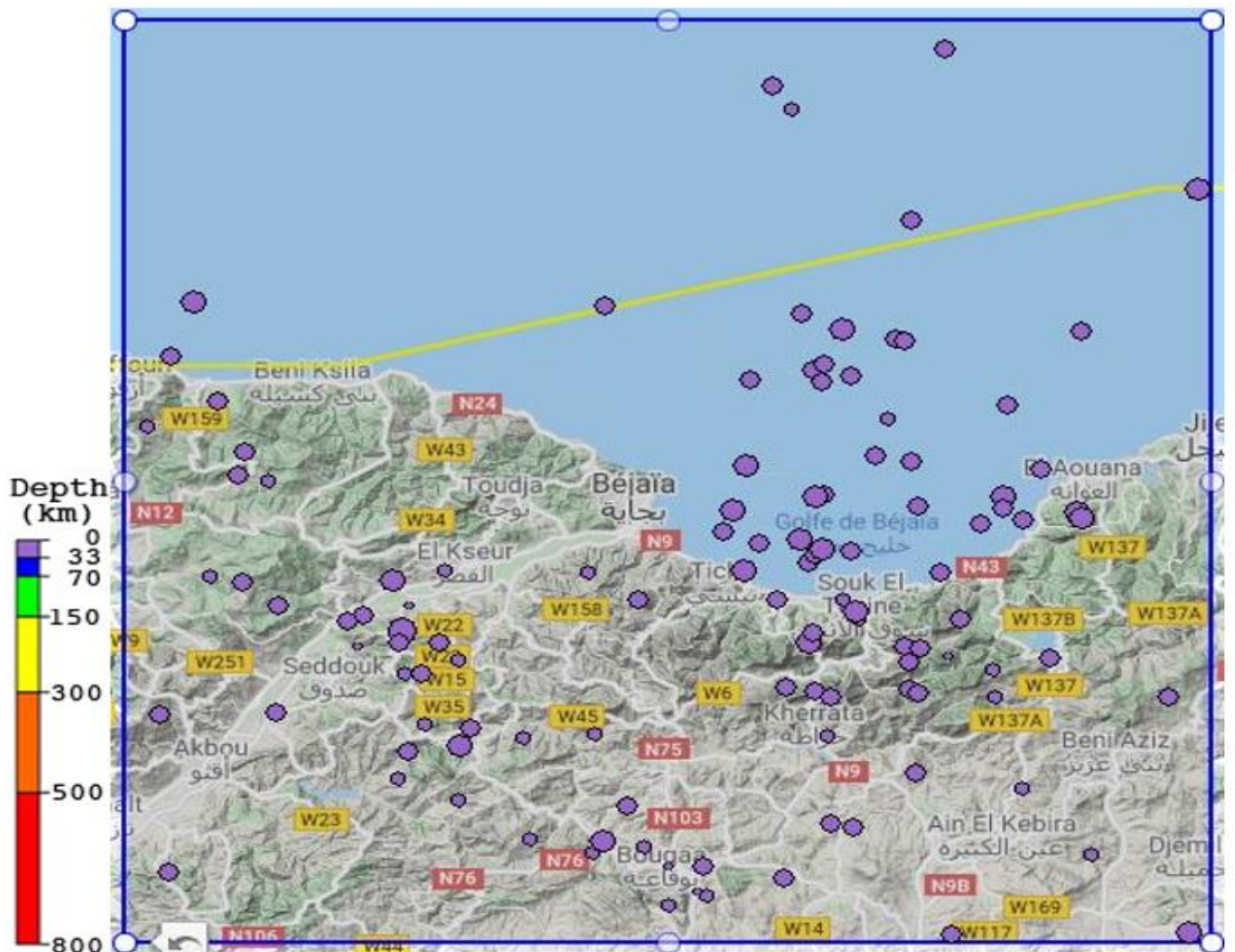


Fig.107 : Répartition des séismes selon la magnitude et la profondeur dans la baie de Bejaia et ses environs (période 1972-2020).

### 3- Impact de la diminution du flux sédimentaire sur la dynamique de trait de côte

#### 3.1- Les aménagements hydrauliques réalisés dans le bassin versant de la Soummam

La basse vallée de la Soummam est un secteur en pleine expansion économique. Les installations humaines : aéroport, voie ferrée, routes, zones industrielles, université, zones d’habitation étaient soumises au risque d’inondation. En effet, le risque d’inondation était considéré, depuis longtemps comme une entrave au développement de la vallée. Selon les conclusions du rapport de synthèse de l’étude Coyne et Bellier 1972 « *L’oued Soummam fait donc peser une menace grave et continue, à la fois sur les cultures et sur toutes les infrastructures. Outre les pertes provoquées à ce qui existe, cette menace de destruction des investissements que l’on pourrait réaliser constitue un frein au développement. C’est pourquoi l’aménagement rationnel de la vallée repose sur la maîtrise de l’oued* ».

Néanmoins, une telle expansion économique et démographique, en plus de l’augmentation du risque d’inondation, a engendré des besoins considérables en eau potable ainsi que pour l’industrie et l’irrigation. La réponse à cette problématique est venue sous forme de projets isolés sans études d’impact et sans conception globale qui permet la réalisation d’ouvrages dans une vision

systémique. Ainsi, la construction des barrages est arrivée dans l'ordre suivant : *barrage Lakhel*, *barrage d'Ain Zada*, *barrage Tilesdit* et *barrage de Tichy-Haf*

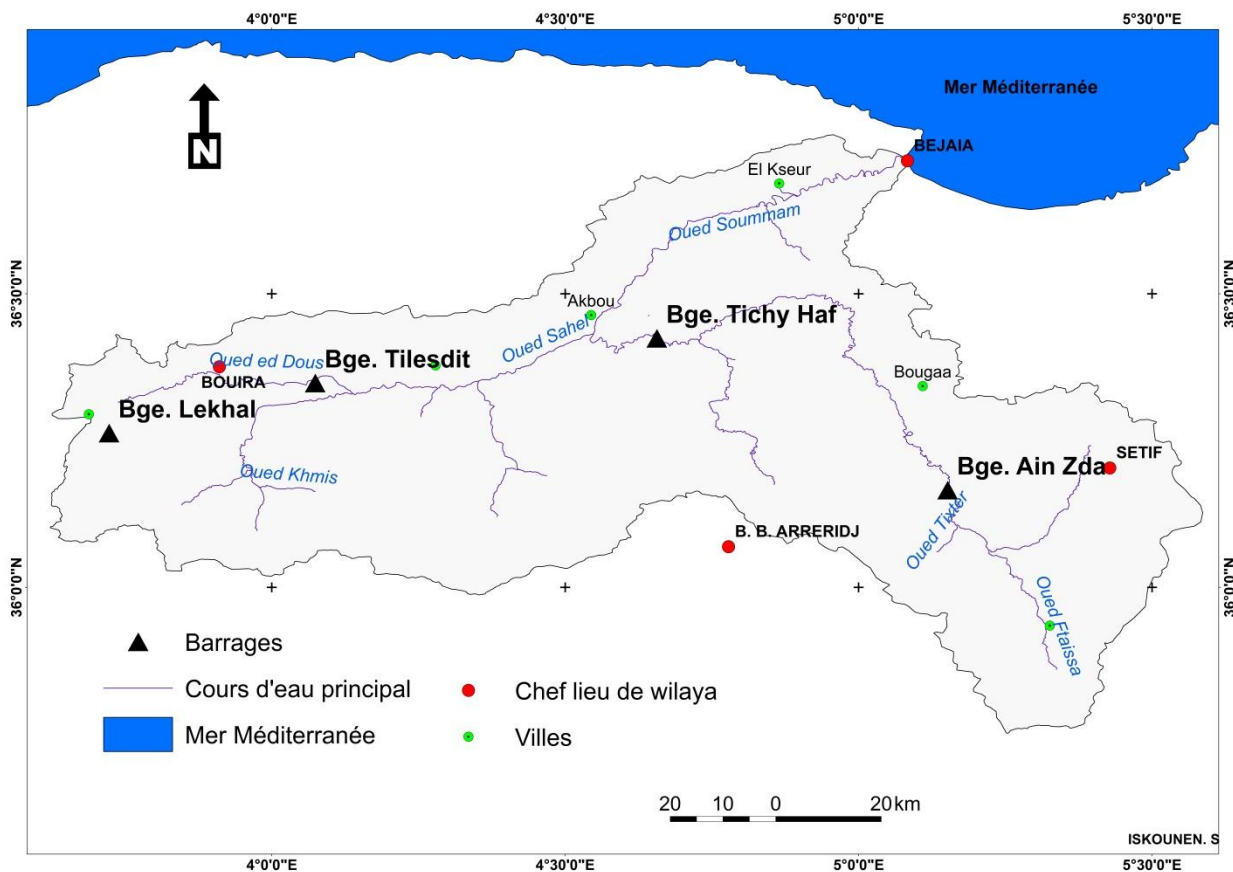


Fig. 108: localisation des barrages en exploitation du bassin de la Soummam

### 3.2 - Résultats des derniers levés Bathymétriques des barrages de la Soummam

Cette analyse de l'envasement des barrages du bassin de la Soummam est basée sur les données des levés bathymétriques effectuées par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) sur l'ensemble des barrages de l'Algérie, durant la période 2004/2014.

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats des dernières campagnes bathymétriques réalisées au niveau des quatre barrages du bassin versant de la Soummam.

Tab. 99: résultats des dernières campagnes de bathymétrie des barrages du bassin de la Soummam.

Barrage	Année de mise en eau	Wilaya	Cap. initiale $m^3 \cdot 10^6$	Cap. dernier levé $m^3 \cdot 10^6$	Date du Levé bathymétrique
Lakhel	1985	Bouira	30	27,16	2005
Ain Zada	1986	Bordj Bou Arreridj	125	121,4	2004
Tilesdit	2004	Bouira	167	164,55	2010
Tichy Haf	2007	Bejaia	80	74,96	2014
<b>Total</b>			<b>402</b>	<b>388,07</b>	

### 3.3- L'envasement annuel moyen des barrages du bassin de la Soummam

Remini a constaté qu'à l'échelle nationale, le taux d'envasement moyen a atteint 65 millions de m<sup>3</sup>/an durant la période 2004-2014 (Remini. B. 2017).

Tab. 100 : envasement annuel des barrages de la Soummam

Barrage	Année de mis en eau	Capacité initiale (hm <sup>3</sup> )	Capacité dernière levé (hm <sup>3</sup> )	Taux d'envasement annuel (hm <sup>3</sup> )	Taux d'envasement annuel (Millions de tonnes)
Lakhel	1985	30	27,16	0,14	0,21
Ain Zada	1986	125	121,40	0,20	0,30
Tilesdit	2004	167	164,55	0,41	0,62
Tichy Haf	2007	80	74,96	0,72	1,08
<b>Total</b>		<b>402</b>	<b>388,07</b>	<b>1,47</b>	<b>2,21</b>

Selon le classement de Remini (2017) de l'envasement des barrages en Algérie, le barrage Lakhel avec 0.14 million de m<sup>3</sup>/an est classé parmi les barrages faiblement envasés. Par contre, les barrages Ain Zada, Tilesdit et Tichy Haf, avec 0.20, 0.41 et 0.72 millions de m<sup>3</sup>/an respectivement, sont classés plutôt parmi les barrages moyennement envasés (tab. 100).

L'étude de l'envasement de ces quatre barrages a montré que la quantité totale des sédiments piégés dans leurs lacs est de l'ordre de 1,47 million de m<sup>3</sup>/an. Avec une densité de la vase égale à 1,5, nous estimons que l'envasement reçoit 2,21 millions de tonnes/an, soit 41% du flux sédimentaire annuel de la Soummam.

### 3.4- Exploitation des sédiments dans le bassin de la Soummam

L'exploitation industrielle des sédiments de la Soummam n'a commencé qu'au tout début des années 1983, lorsque l'Etat avait accordé des concessions de 10 ans renouvelables à des investisseurs privés.

Néanmoins, l'extraction de matériaux alluvionnaires du lit d'un oued est une activité dûment réglementée et balisée par trois textes de loi. Le décret 86/226 du 2 septembre 1986 relatif à la concession d'extraction des matériaux, ainsi que la loi 05/12 du 4 août 2005 relative à l'eau, ainsi que le cahier des charges relatif à la concession d'extraction de matériaux auquel tout investisseur est censé se conformer.

Actuellement nous enregistrons 13 sablières autorisées à exploiter les sédiments du lit de l'oued Soummam et Sahel, avec un cahier des charges qui fixe la quantité autorisée à l'exploitation à 120 tonnes par jour et par sablière.

Ces installations sont localisées dans la partie aval de l'oued Sahel et dans la partie amont de l'oued Soummam sur des tronçons d'une trentaine de kilomètres.

Théoriquement, avec une capacité d'extraction de 120 tonnes par jour par sablière, ces entreprises soustraient 570 960 tonnes/an. Cette quantité est loin de la réalité car plusieurs sablières dépassent largement la quantité autorisée par le cahier des charges. En effet, selon Baaziz. A 1986, elles arrivent à extraire jusqu'à 440 tonnes/ jour. Aussi, il faut ajouter un nombre important de sablières illicites.



Cependant, l'extraction des sédiments ne sera pas compensée par les apports de l'oued, d'où le déséquilibre qui peut influencer la dynamique fluviale, l'équilibre écologique, la stabilité des rives de l'oued, ainsi que les réserves des nappes phréatiques.

#### 4- Bilan sédimentaire annuel du bassin de la Soummam

Dresser le bilan annuel sédimentaire du bassin de la Soummam, consiste en l'estimation de la quantité de sédiments qui transite par l'oued Soummam vers la mer Méditerranée. Pour cela, nous avons essayé de quantifier la production totale de tout le bassin versant et les pertes en sédiments dues à l'envasement des lacs des barrages et à l'extraction directe des sédiments par les sablières au niveau du lit de l'oued. Ensuite, nous déduisons la quantité qui atteint actuellement la Méditerranée.

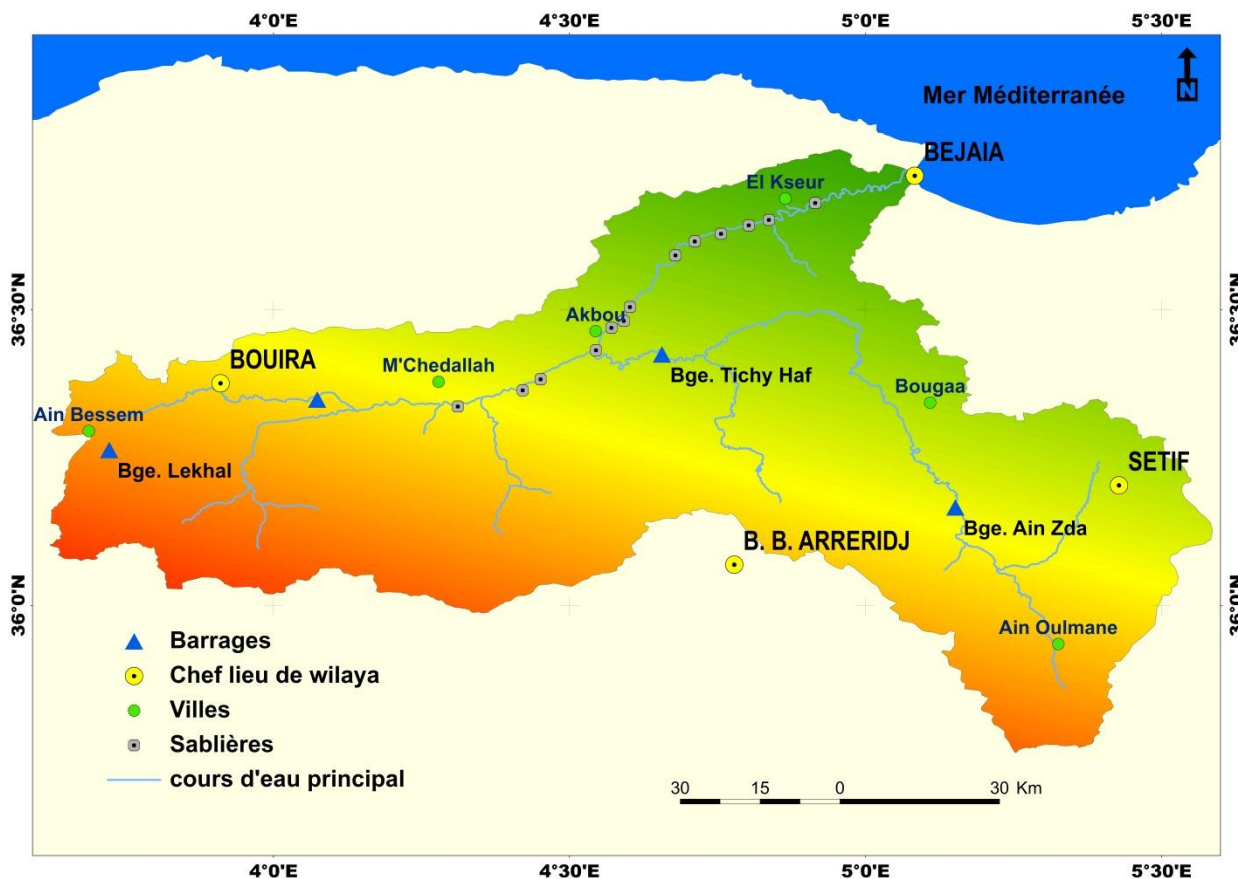


Fig. 109 : localisation des barrages et des sablières dans le bassin de la Soummam

#### 4.1- Quantification de la production annuelle en sédiment du bassin versant de la Soummam

Pour la quantification de la production annuelle des sédiments du bassin versant, nous avons exploité les mesures de la station de Sidi Aiche qui couvre 92% de la surface du bassin pour la période de 1954-1983. En sachant que l'année 1983 est l'année du début des aménagements du bassin versant, la période de mesure de la station de Sidi Aiche 1954-1983 est considérée comme la période où le bassin est dans son état naturel, sans aucune anthropisation.

Les mesures de la station de Sidi Aiche montrent que le bassin de la Soummam produit plus  $4,6 \cdot 10^6$  de mètres cubes de matière en suspension annuellement. En ajoutant 25% de l'apport charrié, la production de sédiments de la Soummam s'élèverait à  $5,37 \cdot 10^6$  de tonnes par an jusqu'à 1983.

## 4.2- Quantification des pertes des sédiments du bassin versant de la Soummam

### - Pertes par envasement des barrages

Le bassin versant de la Soummam compte quatre barrages en exploitation. La quantification de l'envasement de ces barrages révèle que 2,21 millions de tonnes de sédiment sont pigés annuellement dans leurs lacs.

### - Pertes par extraction de sédiments

Actuellement treize sablières sont autorisées à exploiter des sédiments au niveau du lit de la Soummam, avec une cadence de 120 tonnes par jour par sablière. Ainsi, l'oued Soummam perd plus de 0,57 millions de tonne de sédiments par an (tab.101).

*Tab. 101 : bilan sédimentaire annuel du bassin versant de la Soummam*

La production (Mt/an)				Les pertes (Mt/an)				Quantité atteignant la mer Mt/an
Période	TSS	Charriage	Total	Période	Envasement des barrages	Extraction des sablières	Total	
1954/1983	4,3	1,15 (25%)	5,37	1983/2004	0,51	0.57	1,08	<b>4,67</b>
				2004/2014	2,21	0.57	2,78	<b>2,97</b>

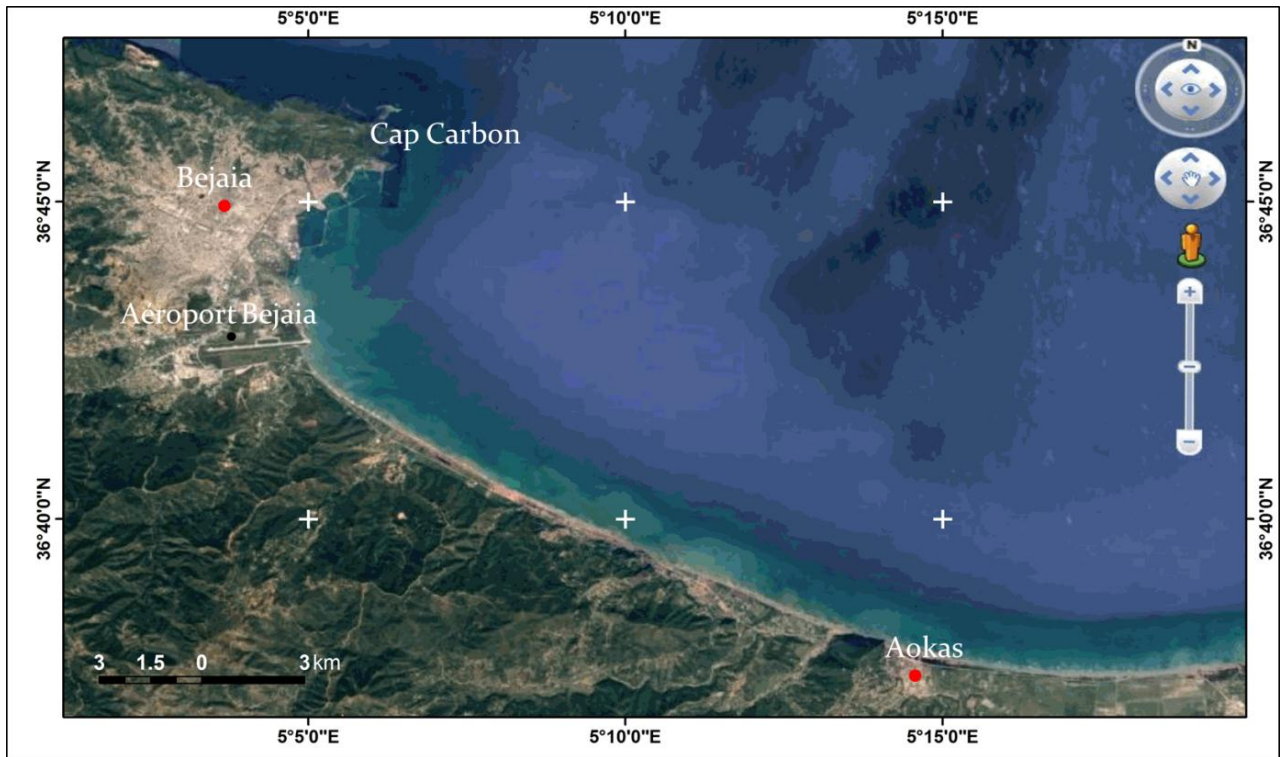
L'addition des pertes en sédiment nous révèle que l'oued Soummam perd de 2.78 millions de tonnes de sédiment annuellement, ce qui représente plus de 48.5% de la production annuelle du bassin versant Soummam. Ainsi, la quantité qui atteint la mer Méditerranée est actuellement inférieure à 3 millions de tonnes par an (tab.101).

## 5- Les facteurs météo-marins et dynamiques du trait de côte de la baie de Bejaia

### 5.1 - Caractéristiques du littoral au niveau de la baie de Bejaia et ses environs

La baie de Bejaia est limitée principalement par le cap Carbon dans sa partie occidentale, ce dernier, offre une protection naturelle très efficace pour le port de Bejaia. Les parties Nord et l'est orientales ont largement ouvertes sur la mer (fig. 110). L'ensemble de la baie de Bejaia a une longueur supérieure à 27 km.





*Fig. 110: Baie de Bejaia (image Google Earth 2018)*

Aucun port ni ouvrage pouvant entraver la dérive littorale n'est présent dans ce secteur de la baie. Entre Tichy et Lamaadhane, la plage disparaît et le bord de mer est occupé par la route.

## **5.2- facteurs météo-marins à l'origine de la dynamique morpho-sédimentaire de la baie**

### **5.2.1- Tempêtes**

Bien que les tempêtes soient de faibles fréquences, et qu'elles ne doivent avoir d'impact significatif sur les littoraux que lorsqu'elles se produisent lors des marées hautes, elles demeurent, toutefois, des phénomènes naturels les plus génératrices de vagues de vents qui font vraisemblablement évoluer les côtes. Leur agressivité sur les littoraux est plus significative, notamment, lorsque les vagues sont forcées par les vents parvenant d'une direction où leur course est longue. Cependant, Savard (1998), constate que le volume des sédiments déplacés lors des événements extrêmes dépasserait largement celui mis en mouvement par les processus hydrodynamiques Normaux.

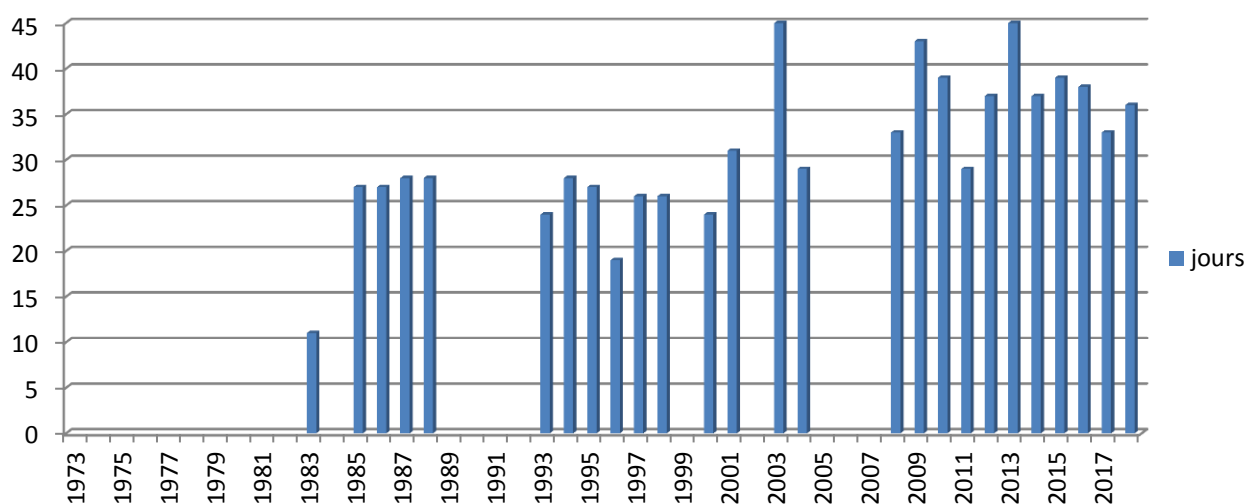


Fig.111 : Total jours de tempêtes durant l'année (source : <https://fr.tutiempo.net/>)

### 5.2.2- Les courants marins et circulation de l'eau en mer Méditerranée

La vitesse du courant général des eaux de l'atlantique, transitant par Gibraltar et se déplaçant vers l'Est, évolue généralement avec une vitesse de 0.5 m/s au large des côtes Algériennes. Ce courant crée dans la plupart des baies, un contre-courant littoral évoluant vers l'ouest. (DAGHBADJ. A et SALEM CHERIF. Y 2015)

La circulation de l'eau en mer Méditerranée est liée à la configuration de mer quasiment fermée. Les apports en eau douce par les fleuves, les précipitations et les ruissellements sont faibles et ne compensent pas l'évaporation importante (environ 3500 km<sup>3</sup> d'eau par an).

Si le détroit de Gibraltar se fermait le niveau de la mer Méditerranée baisserait de 80 cm par an. Le déficit est comblé par des entrées d'eaux atlantiques par le détroit de Gibraltar.

Les courants de surface longent les côtes africaines. Ce courant va se diviser en deux branches principales à la hauteur de l'Algérie orientale. Une branche remonte directement vers le Nord et longe les côtes occidentales de la Sardaigne et de la Corse (Quinquis M. 2017). L'autre branche se scinde en deux peu avant le détroit de Sicile. Une veine de courant se dirige (déplacement vers l'Ouest le long des côtes françaises et espagnoles).

Le dernier courant pénètre dans le bassin oriental de la Méditerranée, longe toutes les côtes et circule dans la mer Adriatique puis repart vers le Sud (côtes libyennes).

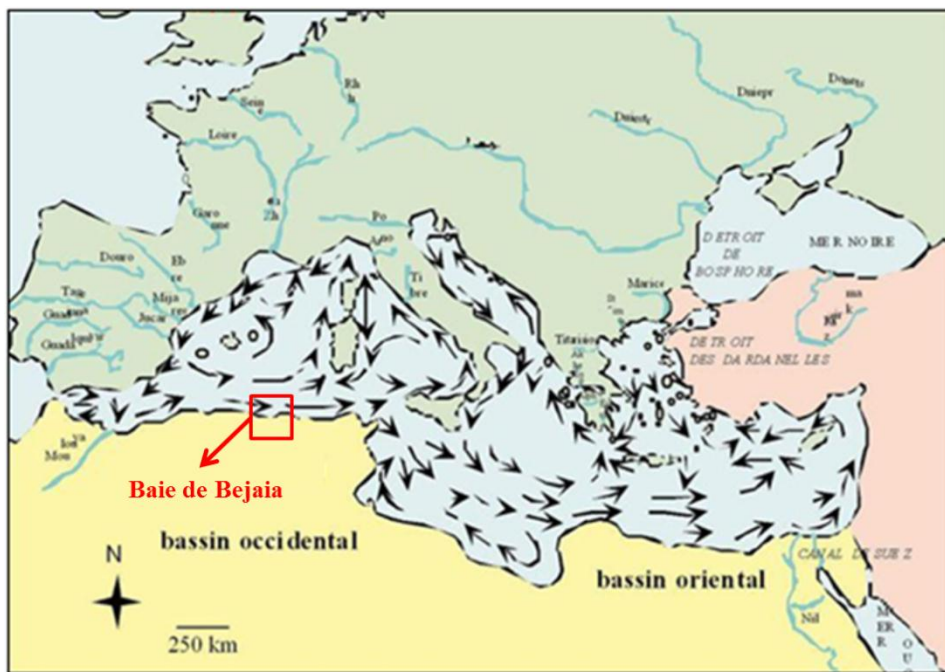


Fig. 112 : courants marins et circulation de l'eau en mer Méditerranée

Toutefois, la branche de courants marins qui longe les côtes algériennes avec une direction Ouest-Est, n'aura pas une influence directe sur l'évolution du littoral de la baie Bejaia (Quinquis M. 2017). En effet, sa partie Ouest est protégée par le cap Carbone qui joue le rôle d'une barrière naturel qui dévie les courants de direction Ouest-Est.

### 5.2.3- Les vents à la station de Bejaia

Sous une forme associée, les informations sur la vitesse et la direction du vent peuvent être représentées sur des roses des vents. Elles donnent la répartition du vent pour les différentes directions. La distribution des vitesses et des directions peut-être divisée en 8, 12, 16 ou 32 secteurs qui représentent les différentes directions. Une rose des vents peut représenter trois types d'informations, à savoir : la fréquence, la vitesse moyenne et la direction moyenne.

Dans ce travail nous représentons la fréquence, la vitesse et la direction des vents enregistrés à la station de Bejaia, pour la période 2010 à 2018 (fig. 113).

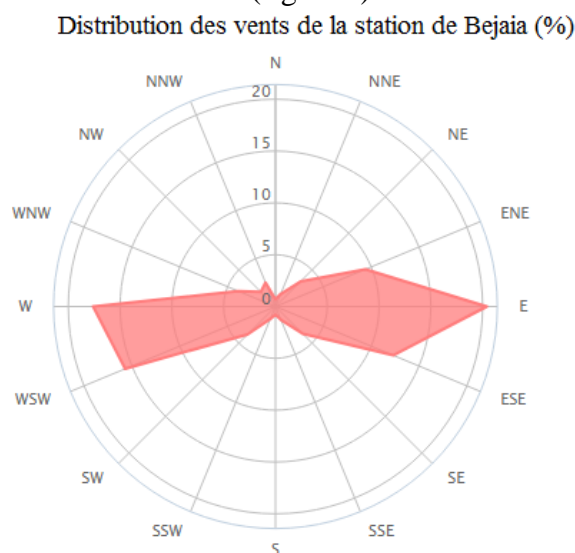


Fig. 113 : Rose des vents à la station de Bejaia

La rose des vents à la station de Bejaia indique la dominance des vents de direction Est-Ouest et Ouest-Est. La vitesse moyenne annuelle des vents est de 3.16 m/s. Par contre, cette dernière couvre une gamme qui s'étend jusqu'à 8m/s en hiver, 7m/s en Automne et n'excède pas 6m/s en été et au printemps. La vitesse moyenne des vents varie en fonction des saisons avec une moyenne maximale en hiver égale à 3.5m/s et une moyenne minimale égale à 2.95m/s en été (*BOUDIA SM. 2014, Atlas vent de l'Algérie 1991*).

Tab. 102 : Les moyennes mensuelles de la vitesse du vent (m/s) à 10 m du sol à la station de Bejaia (2010-2018)

Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Bejaia	3,62	3,41	3,22	3,00	2,85	2,94	2,97	2,92	2,88	3,11	3,41	3,78

#### 5.2.4 - Les houles

Les houles sont des ondulations de surface qui se propagent vers la côte mais ne déplacent pratiquement pas les masses d'eau. Les particules fluides parcourent des trajectoires en mouvements orbitaux. Au large, ces mouvements sont circulaires et diminuent rapidement avec la profondeur jusqu'à s'annuler avant d'atteindre le fond, et ce d'autant plus que la période est courte. Lorsque la profondeur diminue, les particules fluides sont mises en mouvement sur toute la colonne d'eau et décrivent des trajectoires elliptiques d'autant plus plates qu'elles sont près du fond... » (Le Hir P. et all ; 2001)

Les données de base qui nous ont permis de déterminer les caractéristiques de la houle au large de Bejaia sont tirés de l'atlas « Wind and Wave Atlas of the MediterraneanSea », issu d'une collaboration entre 6 sociétés françaises dont ; (Météo France), italiennes et grecques (Cavaleri, 2005).

Cet atlas présente des statistiques annuelles de données de vents et de houles au moyen du modèle de propagation WAM qui se base sur des champs de vents et de pressions, des données de bouées de houles situées au large, ainsi que de données satellites (ERS1, ERS2, Topex-A, Topex-B, ...). Après calibration, un modèle est établi à partir de ces informations, et un maillage est proposé pour différentes zones de Méditerranée.

Cependant, il était difficile, voire impossible, d'utiliser des données houlographiques détaillées, car la zone d'étude reste très pauvre en termes de mesures in-situ. Aussi nous avons été obligés de recourir à cet atlas.

#### 5.2.5 - La Direction générale des houles au large de la baie de Bejaia.

La figure ci-dessous (*Fig. 114*) issue des données fournies par : *Wind and Wave Atlas of the MediterraneanSea*, (2004), indique que les houles dominantes au large de Bejaia ont trois composantes principales : une première de secteur Ouest, une seconde de secteur Nord-Nord-Ouest, et la dernière, de secteur Est. Compte tenu de la configuration géographique de la baie de Bejaia, on peut présumer que les directions de ces trois composantes vont être très influencées à l'approche du rivage. La houle de secteur Ouest ne pourra pas atteindre directement le rivage de la baie, ou alors en étant fortement réfractée et diffractée.

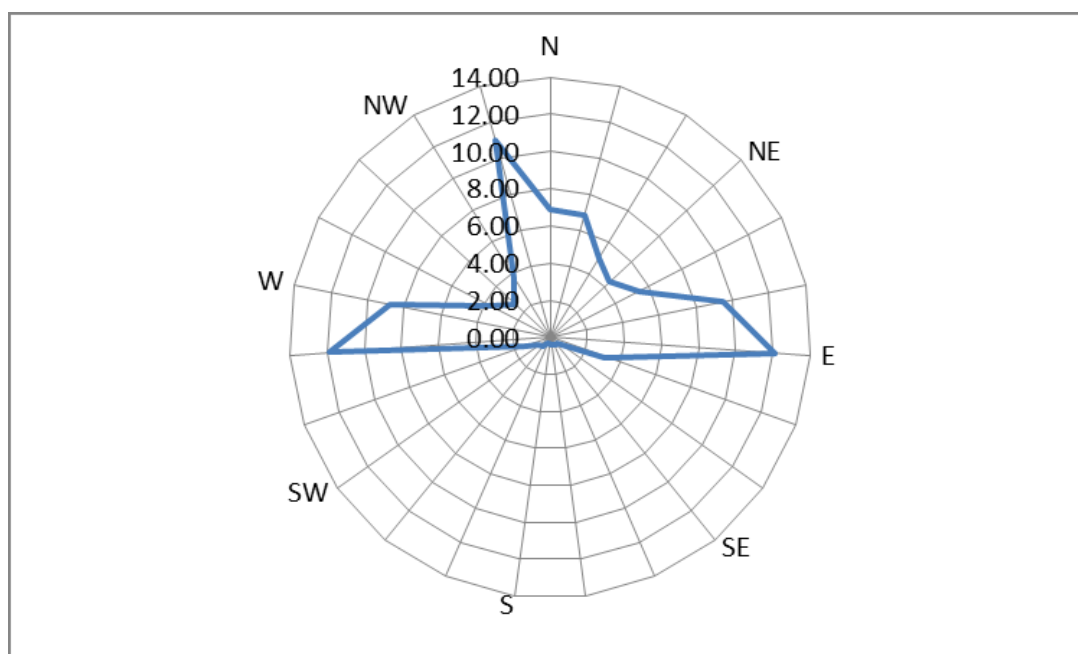


Fig.114 : Rose des houles (%) du littoral de la baie de Bejaia (d'après The Medatlas Group, 2004).

### 5.2.6- Caractéristique des houles au large

Le traitement statistique des fréquences mensuelles des directions des houles au large publié par *Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea* nous a permis de déterminer l'ampleur et les directions de houles prédominantes.

Tab.103: fréquences mensuelles de la houle au large selon les directions.

Mois	Ouest	Nord-Ouest	Nord	Nord-est	Est
Janvier	30.8	14	11.5	7.2	16.4
Février	39.6	14.5	8.4	6	12.4
Mars	35.5	20.4	8.5	5.5	12.9
Avril	39.4	18.6	6.4	8.8	15.2
Mai	31.7	13.1	8.6	15.9	17.3
Juin	30.1	14.6	10.1	15.3	19.5
Juillet	20.1	17.1	12.3	19.8	22.5
Aout	18.5	16.9	12.4	19.9	24.9
Septembre	17.7	15.8	12	14.2	29.2
Octobre	30.4	11.1	8.2	11	19
Novembre	40.1	19.6	4.2	3.6	7.9
Décembre	38.6	19.2	6.7	4.5	6

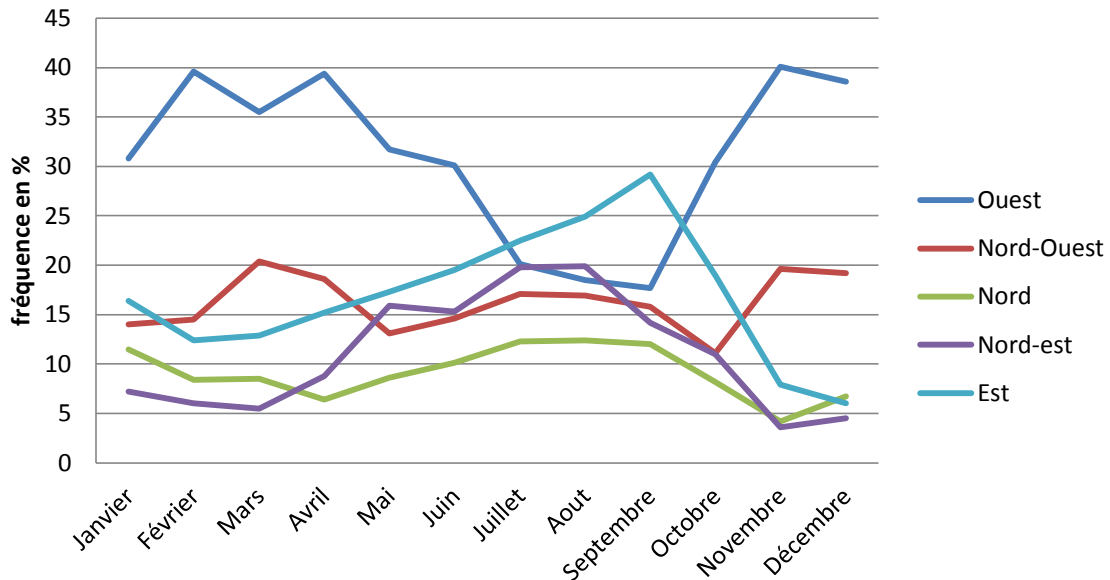


Fig. 115 : fréquences mensuelles de la houle au large selon les directions

L'observation des fréquences mensuelles des houles, au large de la région de Bejaia, selon les directions, montre une domination des houles de direction Ouest sous l'influence des vents et probablement aussi à cause de la circulation générale des eaux de la Méditerranée, comme nous l'avons déjà vue, et les courants transitant par Gibraltar et se déplaçant vers l'Est. Les houles de direction Nord apparaissent avec la fréquence la plus faible pendant la majeure partie de l'année. Les houles de direction Est, Nord-Est et Nord-Ouest se distinguent par une fréquence assez moyenne, avec une légère augmentation des houles de direction Est en automne (fig. 115).

### 5.2.7- Sens de propagation des houles au rivage de la baie de Bejaia

Les études de la houle au large du littoral de Bejaia montrent qu'il existe Cinq directions différentes de propagation. Cependant, la configuration géographique de la baie de Bejaia influence leurs trajets jusqu'au rivage (fig. 116).

Le cap Carbon enfoncé dans la mer par rapport à l'alignement général de la côte d'environ 5 km, joue le rôle d'une barrière naturelle qui dévie carrément les houles de direction Ouest et Nord-Ouest. Par contre, les houles de direction Nord et Nord-Est atteignent régulièrement le rivage. Les houles de direction Est qui ont la même direction du trait de côte, atteignent la partie ouest du rivage occupé principalement par le port de Bejaia.



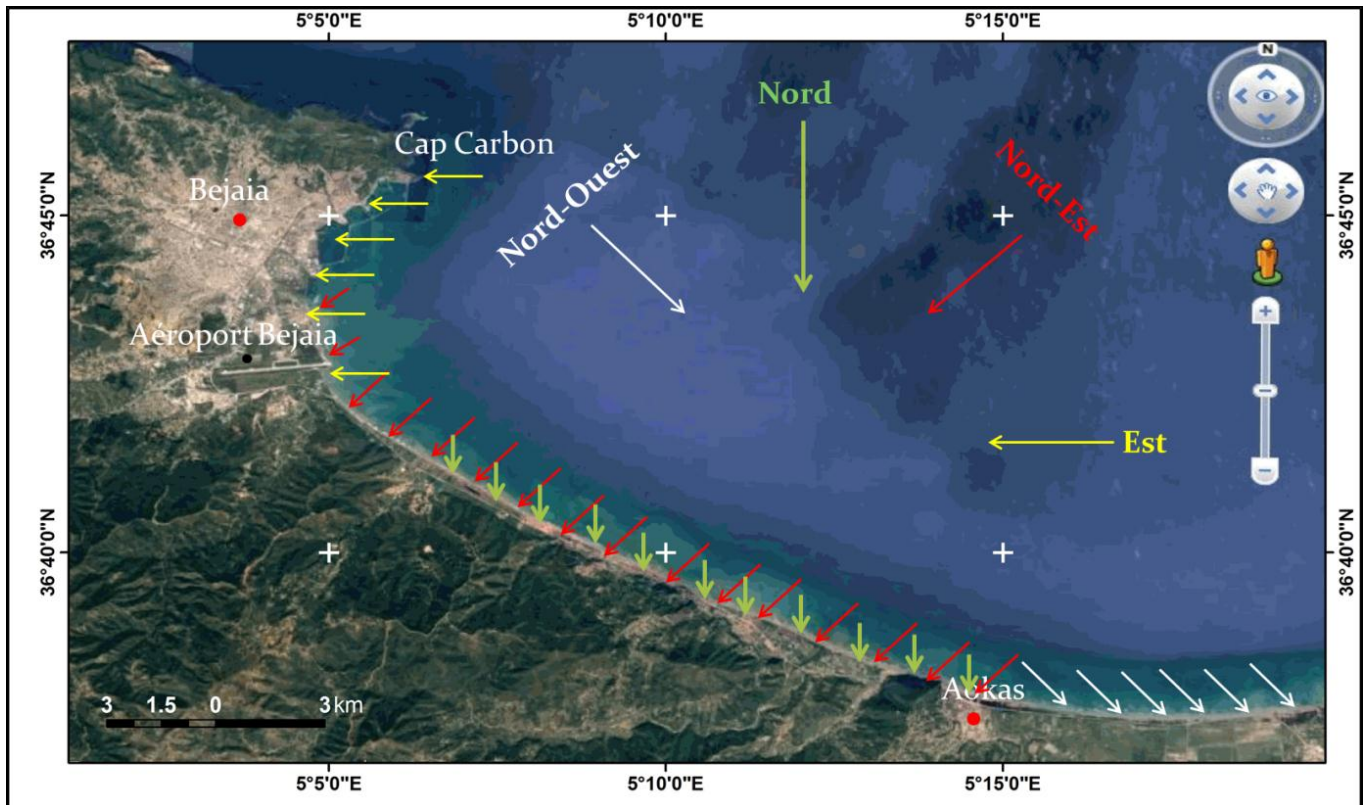


Fig. 116 : Sens de propagation des houles au rivage de la baie de Bejaia

### 5.2.8- Les vagues potentiellement érosives (secteur aéroport jusqu'à Aokas)

#### - Orientation générale du trait de côte

On peut distinguer deux orientations générales du trait de côte ; Cap Carbon - Aokas.

Le premier secteur à l'orientation NE-SO, s'étale de la pointe du Cap Carbon jusqu'à l'embouchure de l'oued Soummam, principalement, occupé par le Port de Bejaia (fig. 117)

Le deuxième secteur à l'orientation NO-SE, s'étale de l'aéroport de Bejaia jusqu'à la ville de Aokas (fig. 103)

La partie entre l'embouchure de l'oued Soummam et l'aéroport de Bejaia s'étale sur environ deux kilomètres, fortement urbanisée et exposée à une importante érosion, d'où la réalisation de plusieurs aménagements en 2004, tel que l'enrochement de la côte ou des épis en forme de T dans le but de protéger le littoral, notamment, la piste d'atterrissage de l'aéroport (fig. 117).

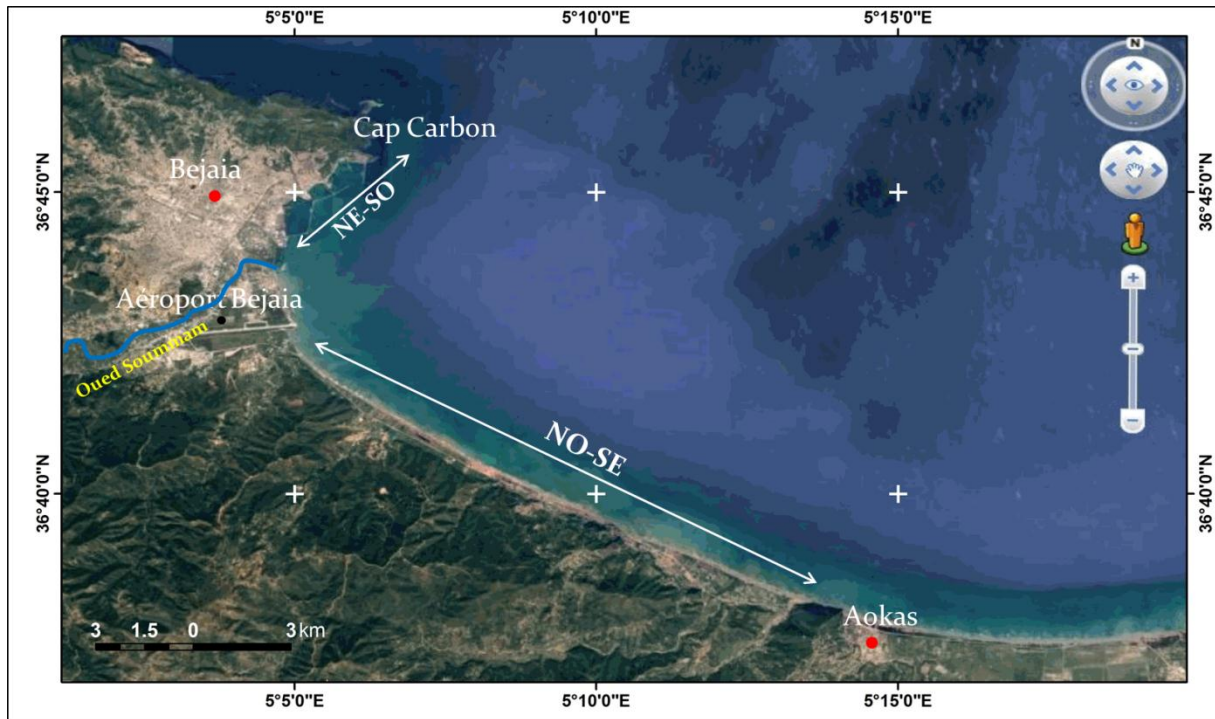


Fig. 117 : Orientation générale du trait de côte à la baie de Bejaia

### 5.2.9- Direction et caractéristiques des vagues potentiellement érosives

En domaine côtier méditerranéenne, la hauteur significative moyenne annuelle des houles est comprise entre 1 m et 1,2 m pour des périodes moyennes de  $T=7$  s. Le long du littoral maghrébin, la probabilité d'avoir des houles ayant une hauteur significative inférieure à 1,25 m est donc élevée et de l'ordre de 80 % sur l'année. (QUINQUIS M. 2017)

A la proche du rivage, la profondeur devienne faible, les orbitales des houles se déforment et deviennent elliptiques. Un mouvement de va-et-vient apparaît sur le fond qui peut déplacer les particules. Lorsque la profondeur devient très faible, comme sur une plage, la vague se déforme ; la partie supérieure se déplace plus vite que celle frottant sur le fond et la vague se casse ou déferle en produisant une libération d'énergie (QUINQUIS M. 2017).

A la rencontre du rivage l'énergie est dissipée sous forme de mouvement de va-et-vient après déferlement, de choc, de surpression et de succion...L'eau peut soulever et projeter des graviers et galets sur le rivage: ce mitraillage est le jet de rive. L'action des vagues se produit donc sur le fond quand la profondeur est faible et au contact de la ligne de côte.

On considère les vagues potentiellement érosives, celles avec un déferlement plus ou moins perpendiculaire par rapport à l'alignement général du rivage.

La direction générale du secteur étudié (aéroport-Aokas) est de Nord-Ouest/Sud-Est par conséquent, les vagues potentiellement plus érosives au niveau de ce secteur, sont celles avec une direction Nord et Nord-Est (fig. 118).



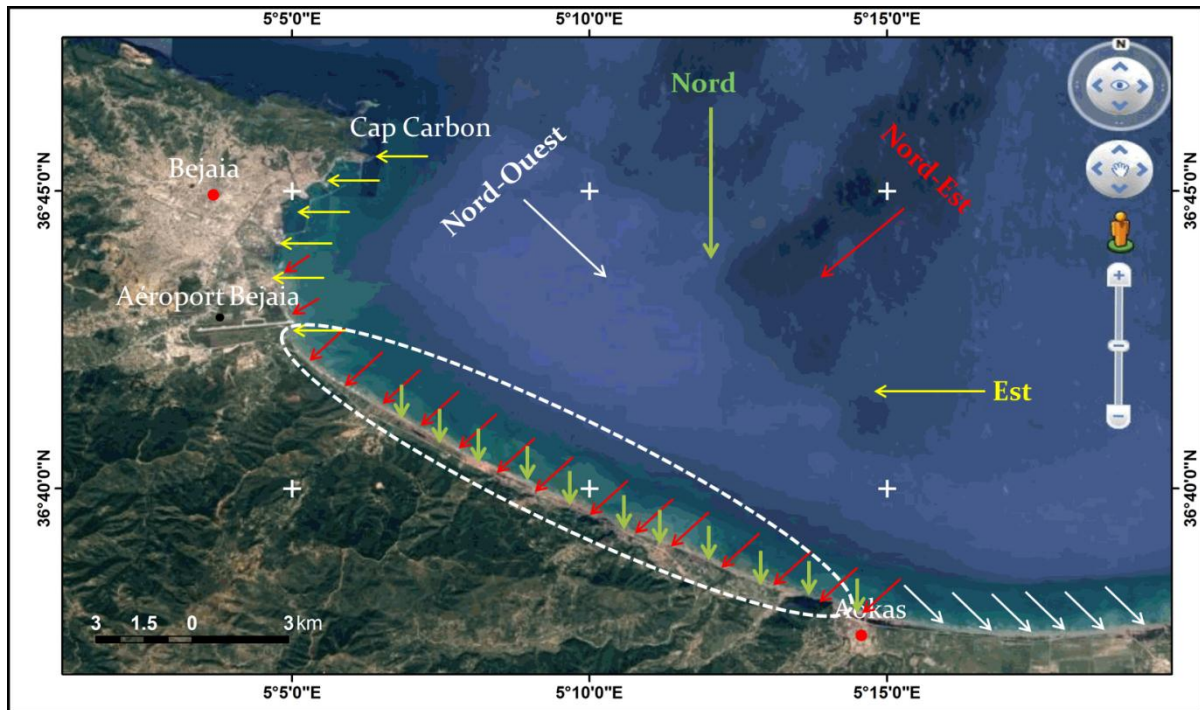


Fig. 118 : Direction et caractéristiques des vagues potentiellement érosives

### 5.2.10 - Caractéristiques des vagues de direction Nord et Nord-Est

L'observation des données de hauteur des vagues fournies par *Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea* montre que les vagues du secteur Nord sont plus importantes que celles des secteurs nord-Est (tab.104).

L'étude des périodes de retour des vagues pour ces deux secteurs a été faite en fonction de la répartition des probabilités de dépassement d'une houle d'amplitude donnée. Les houles de fortes amplitudes, ont une probabilité d'apparition relativement faible. Les périodes de houle considérées dans le cadre de cette étude sont: 6, 8 et 10 secondes pour les houles annuelles.

Tab. 104 : Caractéristiques des vagues de direction Nord, Nord-Est

Fréquence	Nord (0°)	Nord-est (45°)
Biennale	4,99 m	3,77 m
Quinquennale	5,91 m	4,38 m
Décennale	6,60 m	4,83 m
Vingtennale	7,29 m	5,29 m
Cinquantennale	8,20 m	5,09 m
centennale	8,89 m	6,36 m

L'observation des hauteurs des vagues des deux directions Nord et Nord-est montre que les vagues du secteur Nord sont plus importantes que celles des secteurs Nord-Ouest. A titre d'exemple, pour la période de retour biennale, elles atteignent les valeurs de 4.99 m, 3.77 m respectivement pour les secteurs Nord et Nord-est. En ce qui concerne la période de retour décennale, les vagues atteignent des hauteurs de 6.60 m pour les vagues de direction Nord et 4.83 m pour les vagues de direction Nord-est.

### **5.2.11- Les changements climatiques et la hausse du niveau de la mer**

Résultant d'une forte émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre à la suite d'une importante industrialisation du monde d'aujourd'hui, mais également d'une destruction massive du couvert végétal et d'une perturbation de l'activité photosynthétique marines, les changements climatiques sont à l'origine de variations de régime des températures et des précipitations à l'échelle planétaire (Paskoff, 2001).

La concentration du dioxyde de carbone, a augmenté de près de 30% depuis l'ère industrielle, bien que plus de la moitié des émissions anthropiques ait été absorbée par la biosphère terrestre et les phytocénoses marines. L'augmentation des gaz à effet de serre liée à des effets anthropiques comme le refroidissement dû aux aérosols, le changement de vocation des terres, la modification de l'albédo se traduisent par un forçage radiatif considérable. Ce réchauffement global entraîne des modifications importantes, à présent visibles dans de nombreux domaines.

Le contenu moyen de l'atmosphère en vapeur d'eau s'est accru au-dessus des terres et des océans, ainsi que dans la haute troposphère en accord avec l'idée qu'un air plus chaud peut contenir un supplément de vapeur d'eau.

Les observations depuis 1961 montrent que la température moyenne des océans a augmenté jusqu'à des profondeurs de 3000 mètres et que ces derniers ont absorbé plus de 80% de la chaleur ajoutée au système climatique. Un tel réchauffement provoque une expansion thermique, contribuant ainsi à l'augmentation du niveau marin mondial (Delecluse, 2007).

En Algérie, les changements climatiques se caractérisent souvent par le bouleversement de régime des précipitations (Zaza. B et al 2015)

L'élévation du niveau planétaire des mers et des océans, représente une des conséquences à attendre du réchauffement de l'atmosphère terrestre que l'on constate aujourd'hui, et pour lequel on prévoit une accélération en liaison avec l'effet de serre additionnel dû aux activités humaines (Paskoff, 2000). La décroissance généralisée des glaciers et des calottes glaciaires a également contribué à l'augmentation du niveau de la mer.

L'augmentation totale du niveau marin à l'échelle mondiale sur le XXe siècle est estimée entre 12 et 22 cm, avec une vitesse moyenne de 1,8mm par an de 1961 à 2003 ( Delecluse, 2007). Cette vitesse a été plus rapide de 1993 à 2003, soit environ 3.8 mm/an (tab.105).

Tab. 105 : Vitesse d'élévation du niveau de la mer (mm/an)  
 Source: Ifen-Observatoire du littoral, d'après EuroSIONdatabase, 2007

Facteur d'élévation du niveau de la mer	1961-1993	1993-2003
Dilatation thermique	0.42±0.12	1.6±0.5
Glaciers et calottes glacières	0.50±0.18	0.77±0.22
Fonte du Groenland	0.50±0.12	0.21±0.07
Fonte de l'Antarctique	0.14±0.041	0.21±0.35
Somme des contributions liées aux climats	1.1±0.5	2.8±0.7
Elévation total observé du niveau de la mer	1.8±0.5	3.1±0.7
Différence (observation moins la somme des contributions du climat)	0.7±0.7	0.3±1
N.B : les données antérieures à 1993 proviennent de marégraphes, celles postérieures à 1993 d'altimétrie satellitaire.		

Dans ce travail, nous n'avons pas tenu compte du rôle de la montée du niveau marin, dont les effets sur les côtes maghrébines restent limités comparativement aux impacts des barrages (*Walling et Fang, 2003*)

En effet, lorsqu'on quantifie l'impact du changement du niveau marin, on trouve les résultats suivants, selon les données de bases que l'on utilise :

- **Premier cas** : La moyenne de la montée du niveau marin évaluée pour l'Afrique : 4,4 mm/an (*Eriscon et al., 2006*), ce qui donnerait un recul du trait de côte de 32 m pour 100 ans, en prenant la pente moyenne des sites retenus (0,78°). Sachant que les deltas méditerranéens de la côte maghrébine sont les plus modestes d'Afrique, on peut estimer à juste titre que ce résultat est largement surestimé.
- **Deuxième cas** : La moyenne de la montée du niveau marin au niveau mondial : 2,5 mm/an (*Eriscon et al., 2006*), ce qui donnerait un recul du trait de côte de 18,3 m pour 100 ans.
- **Troisième cas** : La moyenne de la montée du niveau marin calculé par les satellites TopexPoseidon et Jason pour le Maroc de 1993 à 2004 : 3 mm.an-1 (*Snoussi et al., 2007*), ce qui donnerait un recul du trait de côte de 22 m pour 100 ans

### 5.2.12- Déséquilibre sédimentaire.

Par définition, les plages, étant des formes d'accumulation. Leur érosion actuelle témoigne d'un renversement de leur tendance évolutive. L'amplification et l'intensification du phénomène de l'érosion côtière à l'échelle du globe tiennent avant tout à une cause naturelle de portée planétaire, qui est un déficit en sédiments (*Paskoff, 2001*).

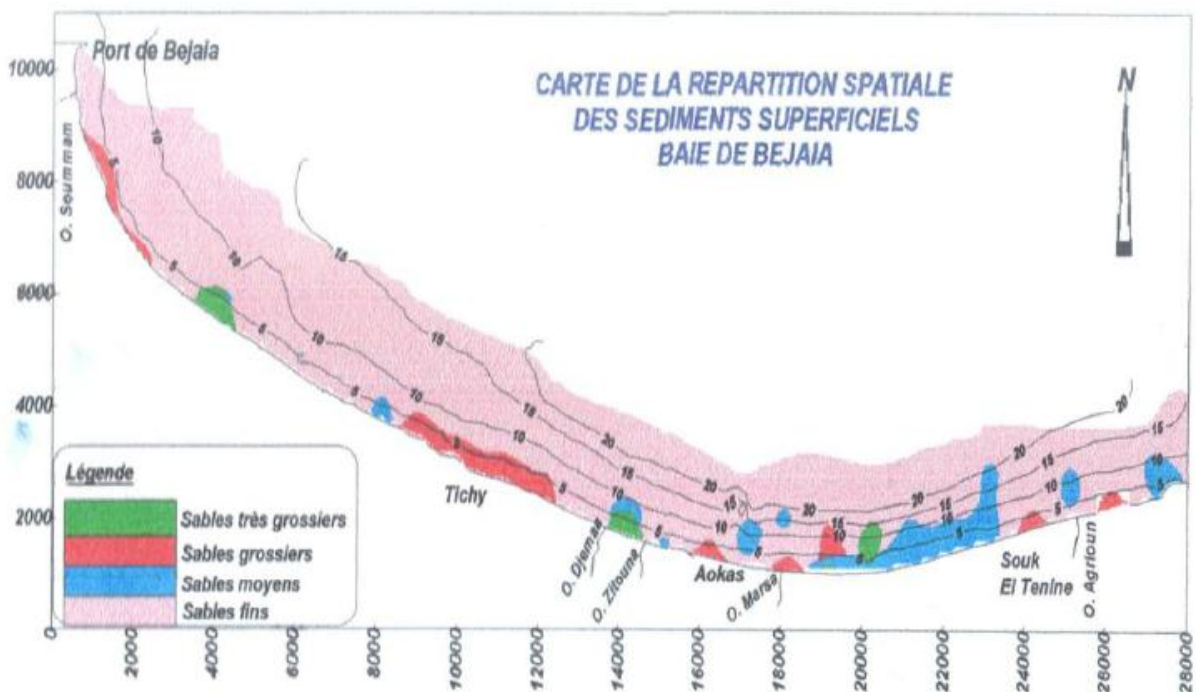


Fig. 119: carte de la répartition spatiale des sédiments superficiels dans la baie de Bejaia

La carte de répartition des sédiments dans la Baie de Bejaia met en évidence la prédominance des sables fins dans partie occidentale de la baie. Par contre les sédiments superficiels de la partie orientale de la baie sont constitués de sables fins, de sables moyens et de sables grossiers.

En effet, la cartographie des stocks granulométriques définie à partir de l'analyse modale, la répartition spéciale des Pélite, ainsi que celle de la médiane granulométrique (D 50), nous a permis de reconnaître une province occidentale et une province orientale bien différenciées de par la nette prédominance dans la zone Est des sables moyens à grossiers sur les sables fins surtout visibles dans la frange côtière. Cette tendance s'inverse au profit des sables fins dans la partie ouest du secteur.

On assiste donc à une diminution de la taille des particules de l'Est vers l'Ouest. Ceci pourrait s'expliquer par la configuration géographique de la baie ainsi que la présence du port, qui protège le secteur Ouest de la zone d'étude des houles du secteur Nord-Ouest qui sont significatives en fréquence et en amplitude.

### 5.2.13- La dérive littorale

#### - Principes généraux sur la dérive littorale

Le transport sédimentaire longitudinal (TSL) est très important dans le budget sédimentaire littoral à moyen et long terme, pouvant aussi bien apporter des sédiments à la cellule littorale que les faire sortir de celle-ci. Le maximum de transport longitudinal s'effectue dans la zone de déferlement des vagues, lorsque les sédiments sont remis en suspension et transportés par le courant de dérive littorale (Fig. 120).

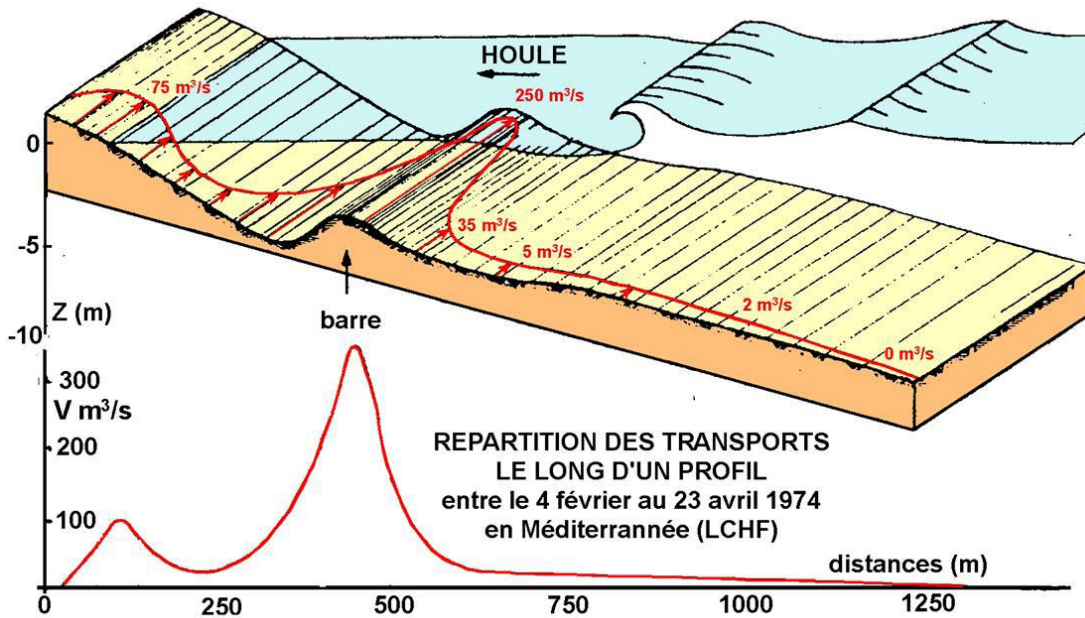


Fig.120 : schéma de Transport sédimentaire en zone de déferlement (d'après Migniot, 1990).

La dérive littorale étant difficile à mesurer directement sous l'action de la houle et l'évaluation du budget net à long terme nécessitant un trop grand nombre de mesures sur de nombreux sites, on procède souvent de façon indirecte pour la déterminer:

- Mesure du taux d'accrétion de sable contre une barrière placée sur le littoral tel qu'une jetée ou un épi.
- Mesures directes par des pièges à sédiments et des données de courantologie (Kraus, 1987).
- Calcul de la dérive littorale à partir de données statistiques de houles en utilisant une ou des équations de transport long-shore (Komar, 1976). Cette méthode sera appliquée à la zone d'étude.

Le manque de données sur la houle et la morphologie du rivage nous a empêchés d'appliquer l'une des formule de calcul du potentiel de Transport Sédimentaire Longitudinal (TSL) pour le secteur d'étude, néanmoins, dans son étude sur les relations entre bassins versants et cellules sédimentaires littorales du Maroc, de l'Algérie et de la Tunisie, *QUINQUIS Michel (date)* a pu mesurer le TSL pour la baie de Bejaia.

Selon *QUINQUIS Michel* Le potentiel de TSL est au maximum à la bordure Ouest de la baie, puis diminue en se dirigeant vers la partie centrale de la baie, ensuite, devient quasi nul, à l'extrême Est de la baie.

#### - Calcul du transit sédimentaire entre Cap Carbon et Cap Aokas

Le calcul du transit sédimentaire par la relation de *Komar 1976* :

$$Q = \frac{K}{C} g H_{s,2} T \cdot f(\alpha)$$

Avec :

Q : volume de sable transporté (m<sup>3</sup>)

K : coefficient de transport di sable (2,5 10<sup>-6</sup>)

g : accélération de la pesanteur (m/s)

C : cambrure de la houle (0,03)

Hs : amplitude significative de la houle (m)

T : période de la houle (s)

f ( $\alpha$ ) : fonction de l'obliquité «  $\alpha$  » de la crête de la houle avec la côte.

Cette estimation révèle un volume global résultant déplacé de l'Ouest vers l'Est de :

**67000 m<sup>3</sup>/an.**

## **6. Détermination de l'évolution du rivage de la baie de Bejaia par la méthode « Digital Shoreline Analysis System, (DSAS)**

Le logiciel gratuit développé en partenariat entre United States Geological Survey (USGS) et Innovate ! Inc., DSAS est une extension du logiciel de cartographie ArcGis de la société Esri, dont le but initial est l'étude des variations du rivage.

A partir d'une ligne de base qui est généralement tracée sur la terre ferme, appelée « Baseline », et les traits de côtes vectorisés correspondant aux différentes dates de l'étude, DSAS permet d'analyser les variations de rivage par calculs statistiques, en comparant les distances respectives de ces traits de côtes par rapport à la « Baseline », et ce, pour les différentes dates. Pour chaque site, le long de cette ligne de base, nous avons établi des transects espacés de 250 m afin de mesurer les variations du rivage. Les valeurs que nous utilisons correspondent :

1. au mouvement total (indice Net Shore Movement dans DSAS) des variations du rivage durant la période d'étude exprimé en mètres.
2. à la vitesse annuelle (indice End Point Rate dans DSAS) des variations du rivage, exprimée en m.an-1 car cet indice est largement utilisé dans la littérature et permet de comparer des périodes de temps différentes.

### **6.1- Traitements des documents cartographiques**

La partie cartographie est capitale pour visualiser l'évolution sur le long terme des différents traits de côtes étudiés. Elle concerne à la fois les traitements faits sur les cartes anciennes et ceux réalisés sur les images satellites récentes.

Les documents cartographiques utilisés dans cette étude sont les suivant :

- Photo aérienne de la baie de Bejaia de 1972 à l'échelle 1/20 000
- Carte topographique de Bejaia de 1983 à l'échelle 1/50 000
- Image satellitaire Google Earth de 2018

Les opérations cartographiques réalisées sur ces documents se décomposent en étapes suivantes :

### **6.2- Géoréférencement**

La première étape consiste à afficher avec ArcMap (Société Esri) chaque carte ancienne préalablement scannée pour la géo-référencer.

Deux méthodes sont possibles :

- 1- En utilisant le quadrillage de coordonnées existant. On se place à une intersection de ce quadrillage et on inscrit la coordonnée précise du point dans le système de projection correspondant. On réitère cette opération en prenant des points répartis sur l'ensemble de la carte.



Au-delà de six points de recalage, on peut utiliser une transformation polynomiale du deuxième ordre qui transforme le document cartographique pour le mettre en plan.

2- En utilisant des points d'amer communs entre la carte ou la photographie aérienne à géo-référencer et l'image satellite. Aucune coordonnée n'est alors donnée au système qui va directement caler la carte ou la photo dans le système de référence de l'image. Plus le nombre de points d'amer est important et bien réparti sur l'ensemble de la carte, plus la précision obtenue sera grande.

Dans cette étude, les deux méthodes ont été utilisées. Cependant, il est important de préciser que la première méthode donne la plus grande précision. Toutefois, la photographie aérienne de 1972 a été géo-référencée par la deuxième méthode.

Chacun de ces documents raster a été ensuite projeté dans le système de coordonnées des images satellitaires qui est UTM WGS84, zone 31 Nord.

### **6.3 - Numérisation des traits de côte**

Cette étape consiste, toujours sous ArcMap, à vectoriser le trait de côte pour chaque date sur les cartes anciennes et photos aériennes, ainsi que sur les images satellitaires. L'objectif à atteindre étant de pouvoir comparer les traits de côte afin de mettre en évidence les zones en érosion, celles en accrétion, et celles qui ne montrent aucune dynamique. Ces différences (avancées/reculs) de trait de côte sont ensuite analysées par le logiciel DSAS (Digital Shoreline Analysis System) de l'USGS.

### **7-La dynamique détectée**

Sur le littoral de la baie de Bejaia, l'érosion côtière est très active le long de la rive orientale. L'estimation du recul du trait de côte dans ce secteur montre une régression maximale dans la zone aménagée (mise en place des épis) de part et d'autre de l'aéroport.

On relève ainsi, pour le secteur étudié, un recul de 417m durant la période 1973/2018

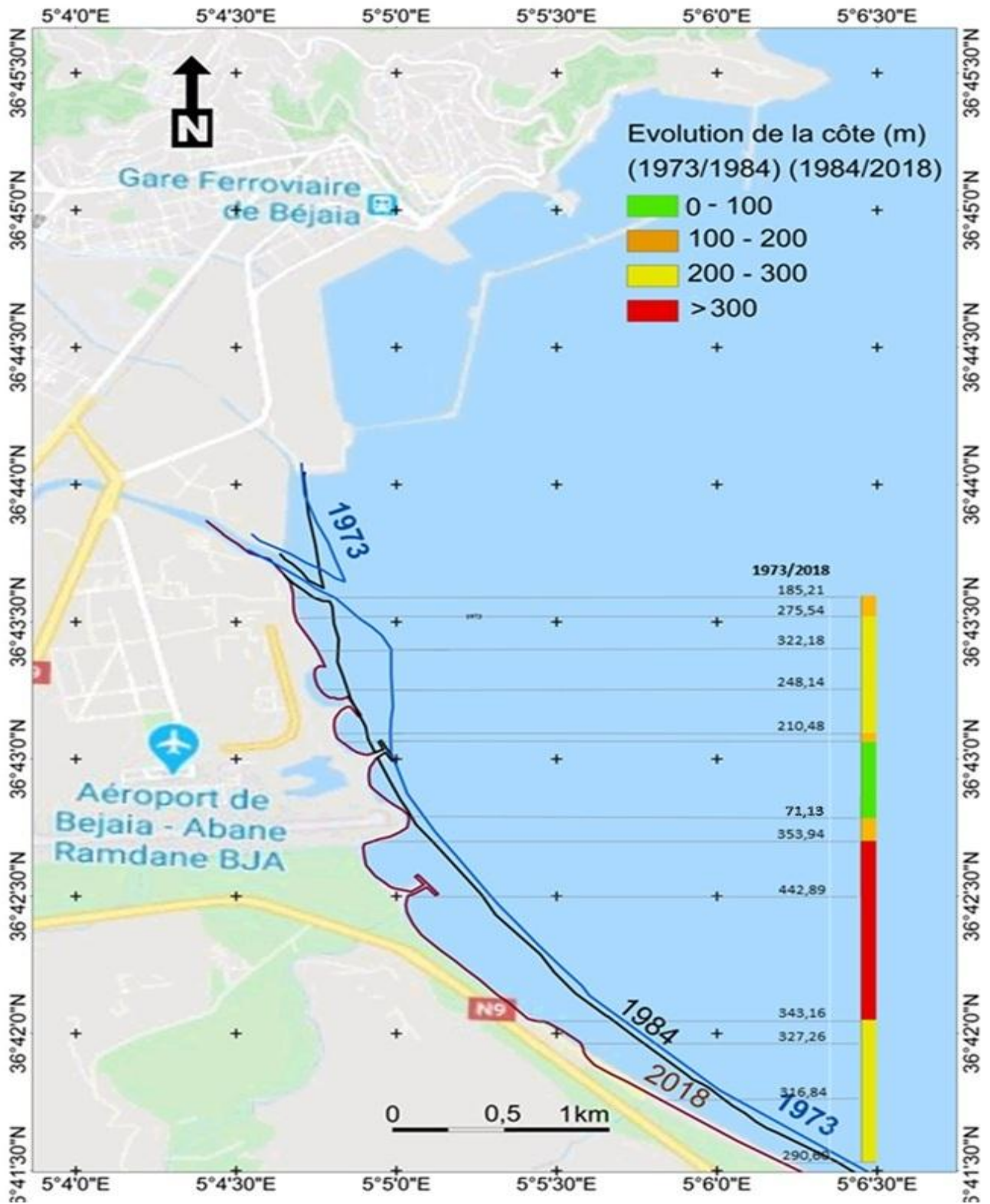


Fig. 121: Quantification de la dynamique du trait de côte dans la baie de Bejaia



Tab. 106 : mesures de recul de trait de côte à la baie de Bejaia (1973/2018)

Variation net de trait de côte		
Période	Recul moyen (m)	vitesse (m/an)
1973/2018 (45ans)	281,83	6,26

### 8-Estimation du recul du trait de côte 1973/1984

L'estimation du recul de trait de côte pour la période 1973/1984 qui correspond à la période d'avant l'aménagement du bassin versant de la Soummam nous donne une idée sur l'évolution du trait de côte durant laquelle l'oued Soummam acheminait la totalité de la production en sédiments du bassin versant de la Soummam.

La vitesse de recul de trait de côte durant cette période (1973/1984) et d'environ 4m/an (tab. 107)

Tab. 107 : mesure du recul de trait de côte à la baie de Bejaia (1973/1984)

Variation net de trait de côte		
Période	Recul moyen (m)	Moyenne (m/an)
1973/1984 (11ans)	51,55	4,68

### 9-Estimation du recul du trait de côte durant la période 1984/2018

L'estimation du recul du trait de côte, pour la période 1984/2018, qui correspond à la période post-aménagement du bassin versant de la Soummam, montre une vitesse de recul de trait de côte de 10 m/an.

En effet, après la mise en eau des 4 barrages dans le bassin versant de la Soummam, le flux sédimentaire est divisé par deux. Durant cette même période la vitesse du recul de trait de côté est passée de 4,68 à plus de 6 m/an.

Tab. 108 : mesure du recul du trait de côte à la baie de Bejaia (1984/2018)

Variation net de trait de côte		
Période	Recul moyen (m)	Vitesse (m/an)
1984/2018 (34ans)	230,28	6,77

### 10- Impact de la dynamique du trait de côte sur la piste d'atterrissage de l'aéroport de Bejaia

L'aéroport de Bejaia a été ouvert à la circulation aérienne en 1958. À l'époque, l'aéroport est seulement exploité par des avions légers d'une capacité de 6 à 7 passagers .C'est en 1960 que fut construit en bordure du golfe, soit à quelques kilomètres de la ville, un aérodrome de classe C.

Les travaux de réalisation de l'aéroport de Bejaia sont arrêtés en 1960 et l'aéroport a été dotée d'une aérogare passagers, d'une piste principale de 1 800 m de longueur et de 40 m de largeur, d'une aire de stationnement, d'un parking d'une tour de contrôle et de plusieurs hangars et bâtiments

administratifs. Cependant l'aéroport a été fermé à la circulation aérienne en 1972 par décision gouvernementale pour être rouvert quelques années plus tard en 1982.

La première et importante innovation apportée à l'aéroport de Bejaia consiste en l'extension de la piste d'atterrissage. En effet, en 1982 une étude a été réalisée proposant une longueur pour la piste de 2 400 mètres. Seulement, comme la plate-forme aéroportuaire est bordée côté Ouest par la RN 24 et l'oued Soummam du côté Nord, exposé sources de crues violentes et soudaines, le prolongement de la piste ne peut s'effectuer que du côté Est, c'est-à-dire vers la mer, ce qui permettrait un prolongement plus important, de l'ordre de 600 mètres.

En 1998 la piste est immédiatement au bord du rivage. Ainsi, elle est menacée par la mer (érodé sur 30 m). Une protection lourde en enrochement en blocs de béton pour la protéger est réalisée. Sa côte par rapport au niveau moyen de la mer est de l'ordre de +3,00 m.

Afin d'arrêter l'avancée de la mer et de permettre l'exploitation de l'aéroport qui risquait d'être fermé, la piste d'aéroport est prolongée par un remblai de terre végétale sur 50 mètres environ. Cependant, en raison du franchissement (observée sur le site pour de faibles houles) et de l'attaque de la houle, ce remblai est en recul, mettant à nouveau en danger la chaussée de la piste d'aéroport. Des observations continues (jusqu'à 1987) ont permis de constater que des houles faibles de l'ordre de 50 cm créaient des franchissements. Cela est dû à la pente des fonds et à l'effet de réflexion créé par la verticalité du remblai. Aussi, lors des houles très fortes la terre du remblai est projetée jusqu'aux limites de la piste d'aéroport créant un obstacle dangereux lors du décollage des avions.

Par ailleurs, nous ne possédons aucune information sur le port qui a été construit par les Phéniciens et qui a connu plusieurs extensions dont la dernière en date effectuée parallèlement à l'installation de la zone industrielle. Aussi, nous signalons deux opérations de dévasement réalisés respectivement en 1976 et 2005. Ces travaux ont certainement eu un impact important sur l'évolution du trait de côte.

## **11- Conclusion**

Ce travail n'a bénéficié d'aucune donnée sur la houle et les aménagements relatifs au port et l'aéroport pour pouvoir expliquer les mécanismes à l'origine de cette dynamique. Néanmoins, l'analyse des documents cartographiques et photographiques (étude diachronique) nous a permis de suivre l'évolution du trait de côte de la baie de Bejaia qui montre un recul sous l'effet d'une érosion continue. Cette dernière s'est accentuée avec le début de la mise en eau des barrages et l'installation des sablières dans la vallée de la Soummam. Le flux sédimentaire du bassin versant de la Soummam qui atteint la baie de Bejaia (Méditerranée) avant tout aménagement hydraulique est estimé à 5,73 millions de tonnes de sédiments annuellement. L'autorisation de l'exploitation des sédiments du lit de l'oued en 1983 a ouvert la voie devant les entreprises pour une exploitation exagérée et souvent non contrôlée des sédiments de la Soummam. Les prélèvements sont estimés à plus de d'un demi-million de tonnes par an. La mise en eau des barrages a débuté en 1985 par le barrage Lakhel. Aujourd'hui, on compte 4 barrages en exploitation. La quantité de sédiments piégée dans ces barrages est de 2,21 millions de tonnes par an.

Ainsi, la somme des pertes du flux sédimentaire, par envasement des barrages et extraction des sables atteint  $2,78.10^6$  de tonnes par an. Cette situation, se traduit par un déséquilibre qui peut affecter la dynamique fluviale, l'équilibre écologique, la stabilité des rives de l'oued, les réserves des nappes phréatiques ainsi que le trait de côte particulièrement au niveau de la baie de Bejaia.

## CONCLUSION GENERALE

Les travaux réalisés sur le bassin versant de la Soummam touchent plusieurs domaines notamment les inondations l'environnement et la qualité des eaux, par contre, les thèmes tels que la modélisation de l'érosion et l'impact des aménagements hydrauliques sur le flux hydro-sédimentaire et sur baie de Bejaia sont moins traités, mis à part quelques tentatives sur des sous bassins du grand bassin versant de la Soummam.

Ce travail consiste en l'étude de l'évolution du flux hydro-sédimentaire et son impact sur le trait de côte de la baie de Bejaia. Ainsi, la détermination des caractéristiques physiques du bassin versant de la Soummam permet de faire ressortir les éléments à l'origine de son comportement hydrologique et de son flux hydro-sédimentaire. En effet, quatre principaux milieux se partagent la surface du bassin : la vallée de la Soummam, le flanc du Djurdjura, le plateau de Bouira et les hautes plaines sétifiennes. Ces milieux s'intègrent dans une forme allongée très irrégulière, repartis dans des étages bioclimatiques allant du semi-aride, dans les parties Est et Sud-est, au subhumide dans les parties Nord et Nord-ouest. Le réseau hydrographique, très ramifié (ordre 6), permet un ruissellement dense et même un ravinement important par endroit. L'évolution morpho-structurale a conditionné l'individualisation du bassin versant de la Soummam en favorisant le développement de deux affluents principaux qui drainent le grand bassin versant de la Soummam (Sahel-Soummam, Boussellam). Cette situation conditionne le flux hydro-sédimentaire qui caractérise le bassin versant de la Soummam.

L'insuffisance des données enregistrées aux différentes stations pluviométriques et hydrométriques ne permet pas une analyse détaillée du comportement hydrologique des différents sous bassins et particulièrement ceux qui ont accueillis des aménagements hydrauliques. Ainsi, nous nous sommes contentés de ranger les données disponibles dans deux séries distinctes : la première récapitulant les données d'avant-aménagements, la deuxième les données post-aménagements. Il est à signaler que la deuxième série d'enregistrement s'arrête avant l'achèvement de la construction des deux derniers barrages (1992) en l'occurrence les barrages de Tiledit et Tichy Haf mis en eau respectivement en 2004 et 2007. La comparaison des apports des deux séries, aux échelles annuelle et saisonnière permet de calculer les pertes enregistrées à la station de Sidi Aiche (53%) et d'estimer l'impact de la mise en eau des deux premiers barrages sur le comportement hydrologique des sous bassins en relation avec le remplissage et l'utilisation des barrages. Cependant, faute d'enregistrements (précipitations, écoulements, flux hydro-sédimentaire) au niveau de l'ensemble des sous bassins, il est difficile de donner une explication convaincante à certaines valeurs qui apparaissent sous formes d'anomalies.

Par ailleurs, Les données relatives au transport solide des stations de Maghraoua et de Sidi Yahia, partie amont et partie aval de Boussellam, montrent une nette différence de sensibilité à l'érosion entre les deux zones. Aussi, le rythme d'envasement des différents barrages confirme l'importance de la discontinuité spatiotemporelle du phénomène érosif dans le bassin versant de la Soummam. De ce fait, ces données qui nous permettent de déceler les mécanismes à l'origine du transport solide, de l'échelle journalière à l'échelle annuelle, dans les sous bassins contrôlés par une station hydrométrique, ne sont pas généralisables à toute la surface du bassin versant de la Soummam. Ainsi, et pour pallier cette difficulté, nous avons opté pour l'utilisation du modèle de l'équation universelle des pertes en sol, dans le but de tenter une spatialisation de l'intensité du phénomène érosif et de pouvoir estimer l'apport solide au niveau du grand bassin versant et des sous bassins.

Les applications du modèle USLE sont divers, notamment la prédiction des pertes en terre sur les terrains agricoles à pente modérée, le choix des sites de retenues le moins exposé à l'érosion dans une zone donnée et la détermination du flux sédimentaire à n'importe quel point sur réseau hydrographique. Néanmoins, ce modèle montre quelques limites. En effet, le modèle ne s'applique qu'à l'érosion en nappe. Ainsi, la quantification de l'érosion par mouvements de masse et par ravinement est exclue. Comme il a été testé et vérifié uniquement dans des paysages de pénélaines et de collines sur des pentes de 1 à 20 % à l'exclusion des montagnes jeunes où le ruissellement est une source d'énergie plus grande que les pluies et où les mouvements de masse sont importants.

Si on tient compte de toutes ces limites, l'application de l'USLE aux vastes bassins versants devient problématique. Aussi, notre démarche d'intégrer les deux autres formes d'érosion est devenue inévitable. Cette démarche logique ne peut qu'atténuer les contradictions d'une extrapolation entre des niveaux scalaires qui engendrent des géodynamiques différentes et par conséquent des apports solides différents.

IL est indéniable que les résultats de l'application de l'USLE (version enrichie) restent encourageants et justifient largement l'introduction des deux formes d'érosion (ravinement et mouvements de masse). En effet, avec cette « amélioration », les pertes en terre qui étaient liées uniquement à l'érosion en nappe ne dépassaient guère les 43% de l'apport solide globale, atteignent avec l'intégration des deux formes d'érosion (érosion hydrique) plus de 90% de l'apport solide mesuré. Ainsi, nous considérons ce résultat comme une validation du modèle sous sa nouvelle forme. Aussi, cette démarche, qui tient compte de la relation surface-formes d'érosion, justifie et renforce l'applicabilité de l'USLE en l'adaptant au passage de la parcelle au vaste bassin versant.

Toutefois, nous avons amélioré le modèle en proposant une variante mieux adaptée aux milieux qui caractérisent le bassin versant de la Soummam. En effet, cette variante est plus performante tout en étant simple à mettre en œuvre.

Avec cette variante du modèle qui se révèle être plus adaptée à la géodynamique externe d'un vaste bassin versant, nous avons spatialisé et évalué l'intensité de l'érosion et/ ou les flux sédimentaires des différents affluents et notamment le Boussellam et les impacts des barrages sur les volumes sédimentaires transportés. Cette démarche nous a permis aussi de d'estimer le rythme d'envasement des futures barrages qui seront construits sur les affluents non jaugés. Comme, elle confirme les quantités de sédiments qui atteignent la baie de Bejaia.

Par ailleurs, la baie de Bejaia constitue une zone complexe du littoral de la région. Elle est soumise à des processus hydrodynamiques et sédimentaire qui n'ont pas fait l'objet d'études approfondies. Ces processus varient considérablement dans le temps et dans l'espace, et semblent être profondément modifiés par les actions anthropiques. Située entre deux embouchures (Soummam et Agrioun), la zone de la baie est la seule côte sableuse du littoral béjaoui. Ce littoral s'étend sur plus de vingt kilomètres et présente une grande variété morphologique (estuaire, baie, plages et falaises rocheuses).

La complexité des processus hydrodynamiques est principalement liée à la forme très particulière de la houle au niveau de la baie. Cette particularité résulte de la déformation de l'onde incidente venant du NW par l'obstacle que représente le cap Carbon.

Aussi, la dynamique morpho-sédimentaire de la baie a été certainement très perturbée à plusieurs reprises par des travaux importants comme la construction et l'extension du port ainsi que les deux

opérations de son dévasement effectuées en 1976 et en 2005, puis la construction et l'élargissement de l'aéroport et les aménagements importants pour sa protection. Cependant, ces ouvrages perpendiculaires au trait de côte (épis en T), constituent un obstacle devant le transit sédimentaire résultant de la dérive littorale

Par ailleurs, les événements météo-marins et les effets induits de l'activité sismique, d'apparition rare et plus aléatoire (vents forts, énergie des hautes vagues, mouvements puissants des tempêtes et séismes) représentent des moments très défavorables pour la stabilité du rivage. Aussi, l'accélération du changement climatique général, constaté actuellement, produit des effets sur la montée moyenne du niveau de la mer, que ce soit par dilatation de la masse d'eau ou par le nombre accru de tempêtes d'où l'exacerbation de l'érosion du rivage.

Aussi, à partir des caractéristiques sédimentologique des sédiments superficiels de la baie, nous distinguons deux secteurs différents : le secteur ouest de la baie qui correspond à sa partie la moins pentue et qui se caractérise par l'abondance de sédiments fins (vase et sables fins) matérialisant un milieu de faible énergie ; et le secteur Est de la baie où les courants induisent une agitation importante du milieu d'où des dépôts de sédiments plus grossiers. Par ailleurs, les sédiments fins occupent un domaine beaucoup plus large. Cependant, les zones occupées par les sables grossiers (sables grossiers et galets) sont moins étendues et discontinues. Ainsi, il est paradoxal de constater que la zone la plus agitée montre le trait de côte le plus stable ; à moins de considérer la quasi-absence de l'anthropisation est l'explication de cette stabilité. Par contre, l'embouchure de l'oued Soummam est aujourd'hui bien trop anthropisée pour que sa morphologie et ses variations du rivage puissent être interprétées uniquement en termes de direction des transits longitudinaux.

Dans le but d'assurer la protection de la vallée des inondations, l'approvisionnement des populations urbaines, l'irrigation des surfaces cultivées et l'alimentation des industries en eau, quatre barrages ont été construits dans le bassin versant de la Soummam, réduisant l'alimentation de la baie en sédiments (sables et galets). Privée de sédiments, la côte s'érode et la ligne de rivage recule.

En raison de l'absence d'une base de données fiable donnant des informations relativement sûres sur l'hydrodynamique des courants et de la houle, sur la morphologie et la bathymétrie de la baie et sur la répartition des sédiments superficiels, ce travail ne peut être qu'une ébauche pour caractériser l'évolution hydrodynamique et morpho-sédimentaire de la baie de Bejaia afin de l'insérer dans un contexte régional en constante évolution.

Néanmoins, l'analyse des documents cartographiques et photographiques (étude diachronique) nous a permis de suivre l'évolution du trait de côte de la baie de Bejaia qui montre un recul sous l'effet d'une érosion continue. Cette dernière s'est accentuée avec le début de la mise en eau des barrages et l'installation des sablières dans la vallée de la Soummam. Le flux sédimentaire du bassin versant de la Soummam qui atteint la baie de Bejaia avant tout aménagement hydraulique est estimé à  $5,73.10^6$  de tonnes de sédiments annuellement. L'autorisation de l'exploitation des sédiments du lit de l'oued en 1983 a ouvert la voie devant les entreprises pour une exploitation exagérée et souvent non contrôlée des sédiments de la Soummam. Les prélèvements sont estimés à plus de d'un demi-million de tonnes par an. La mise en eau des barrages a débuté en 1985 par le barrage Lakhel. Aujourd'hui, on compte 4 barrages en exploitation. La quantité de sédiments piégée dans ces barrages est de  $2,21.10^6$  de tonnes par an. Ainsi, la somme des pertes du flux sédimentaire, par envasement des barrages et extraction des sables atteint  $2,78.10^6$  de tonnes par an. Cette situation, se

traduit inévitablement par un déséquilibre qui peut affecter la dynamique fluviale, l'équilibre écologique, la stabilité des rives des affluents, les réserves des nappes phréatiques ainsi que le trait de côte particulièrement au niveau de la baie de Bejaia.

## Liste des figures

N° figure	Titre de la figure	Page
Fig. 01	Localisation de la zone d'étude	29
Fig.02	Esquisse Tectonique de L'Algérie du Nord de M. KIEKEN 1/1 000 000	31
Fig.03	Formation stratigraphique du bassin de la Soummam (extraite de la carte géologique de L'Algérie du Nord 1/500 000)	34
Fig.04	Carte hypsométrique du bassin versant de la Soummam	38
Fig.05	Courbe hypsométrique du bassin de la Soummam	39
Fig.06	Les sous bassins du bassin versant de la Soummam	41
Fig. 07	Les deux principaux sous bassins de la Soummam	43
Fig. 08	Le réseau hydrographique du bassin versant de la Soummam	44
Fig. 09	Carte des précipitations moyennes du bassin de la Soummam	47
Fig.10	Carte de localisation des stations pluviométriques	48
Fig. 11	Moyennes annuelles des précipitations (1980/2012)	50
Fig.12	Ajustement à la loi de Gauss des précipitations annuelles de la station Tifra (période 1980/2012).	51
Fig.13	Ajustement à la loi de Gauss des précipitations annuelles de la station Ain Bessam (période 1980/2012).	52
Fig.14	Ajustement à la loi de Gauss des précipitations annuelles de la station Porte de Fer (période 1980/2012).	53
Fig.15	Ajustement à la loi de Gauss des précipitations annuelles de la station Ain Arnat (période 1980/2012).	53
Fig. 16	Représentation graphique des précipitations moyennes mensuelles (1980/2012).	56
Fig. 17	Fréquences des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tifra (période 1980/2012)	57
Fig. 18	Fréquences des précipitations moyennes mensuelles à la station d'Ain Arnat (période 1980/2012)	58
Fig. 19	Fréquences des précipitations moyennes mensuelles à la station de Porte de Fer (période 1980/2012)	59
Fig. 20	Fréquences des précipitations moyennes mensuelles à la station d'Ain Bessam (période 1980/2012)	60
Fig. 21	Répartitions par pourcentage des précipitations saisonnier	63
Fig. 22	Les graphes des précipitations maximum journalières	65
Fig.23	Ajustement à la loi de Gumbel des précipitations journalières maximales de la station de Tifra (période 1980/2012).	65
Fig.24	Ajustement à la loi de Gumbel des précipitations journalières maximales de la station d'Ain Bessam (période 1980/2012).	66
Fig.25	Ajustement à la loi de Gumbel des précipitations journalières maximales de la station d'Ain Arnat (période 1980/2012).	67
Fig.26	Ajustement à la loi de Gumbel des précipitations journalières maximales de la station de Porte de Fer (période 1980/2012).	67
Fig. 27	Localisation des stations climatiques	69
Fig.28	Températures mensuelles moyennes des 4 stations	70
Fig.29	Température maximum et minimum mensuelle des 4 stations	71
Fig.30	Etages bioclimatiques du bassin de la Soummam	72
Fig.31	Localisations des stations hydrométriques	76
Fig.32	Bassins versants contrôlés par les stations hydrométriques	77

Fig.33	Débit moyen annuel de à station de Sidi Aiche	78
Fig.34	Coefficient d'hydraulicité à la station de Sidi Aiche (1954/1985)	79
Fig.35	Ajustement à la loi de Galton aux débits moyens annuels de la station Sidi Aiche	80
Fig.36	Débit moyen annuel des stations aux Sidi Yahia et Maghraoua	81
Fig.37	Coefficient d'hydraulicité aux stations sidi Yahia et Maghraoua	82
Fig.37	Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (Station Sidi Yahia, Maghraoua)	84
Fig.38	Débit moyen annuel à la station d'el Asnam	85
Fig.39	Coefficient d'hydraulicité à la station d'El Asnam	86
Fig.40	Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (Série 1966/1993)	87
Fig.41	Débit moyen mensuel à la station Sidi Aiche	88
Fig.42	Coefficients mensuels des débits (CMD) à la station de Sidi Aiche	89
Fig.43	Fréquence des débits moyens mensuels à la station Sidi Aiche (années humides)	90
Fig.44	Fréquence des débits moyens mensuels à la station Sidi Aiche (années sèches)	90
Fig.45	Débit moyen mensuel aux stations Sidi Yahia et Maghraoua	91
Fig.46	Coefficients mensuels des débits (CMD) aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua	92
Fig.47	Etude fréquentielle des débits moyens mensuels aux stations Sidi Yahia et Maghraoua	94
Fig.48	Débit moyen mensuel à la station d'Al Asnam	95
Fig.49	Coefficients mensuels des débits (CMD) à la station d'El Asnam	96
Fig.50	Etude fréquentielle des débits moyens mensuels à la station d'El Asnam (années humides)	97
Fig.51	Etude fréquentielle des débits moyens mensuels à la station El Asnam (années sèches)	97
Fig.52	Pourcentage des débits saisonnier à la station de sidi Aiche	98
Fig.53	Pourcentage des débits saisonnier aux stations de sidi Yahia et Maghraoua	99
Fig.54	Pourcentage des débits saisonnier à la station d'Al Asnam	100
Fig.55	Ajustement des débits journaliers maximum à la station Sidi Aiche à loi de Gumbel	101
Fig.56	Ajustement des débits journaliers maximum aux stations Sidi Yahia et Maghraoua à loi de Gumbel	103
Fig.57	Ajustement des débits journaliers maximum à la station d'El Asnam à loi de Gumbel	104
Fig.58	Débit moyen annuel à la station sidi Aiche (1985/1992)	105
Fig.59	Débit moyen annuel aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)	106
Fig.60	Débit mensuel de la station à Sidi Aiche (1985/1992)	107
Fig.61	Débit mensuel des stations à Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)	108
Fig.62	Pourcentage des débits saisonnier à la station de sidi Aiche (1985/1992)	109
Fig.63	: pourcentage des débits saisonnier aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)	110
Fig.64	Cartes des aquifères de la Soummam	150
Fig. 65	Localisation des barrages en exploitation du bassin de la Soummam	117
Fig.66	Relation débits liquides - débits solides à la station de Sidi Aiche	122
Fig.67	Apports solides (tonnes/mois) à la station de Sidi Aiche pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).	124
Fig.68	Pourcentage de l'apport solide saisonnier à la station de Sidi Aiche pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).	125



Fig.69	Relation débits liquides - débits solides à la station de Sidi Yahia	126
Fig.70	Apport solide (tonnes/ mois) à la station Sidi Yahia pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992)	128
Fig.71	Pourcentage de l'apport solide saisonnier à la station Sidi Yahia pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).	129
Fig.72	Les parties amont et aval du Sous bassin Boussellam	130
Fig.73	Relation débits liquides - débits solides à la station de Maghraoua	131
Fig.74	Apport solide (tonnes/ mois) à la station de Maghraoua pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992)	133
Fig.75	Apport solide (tonnes/ mois) à la station SIDI YAHIA (partie aval du sous bassin Boussellam) pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992)	134
Fig.76	Pourcentage de l'apport solide saisonnier à la station SIDI YAHIA (partie aval du sous bassin Boussellam) pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).	136
Fig.77	Sous bassin Sahel – Soummam à la station Sidi Aiche	137
Fig.78	Apport solide (tonnes/ mois) à la station SIDI AICHE (partie du sous bassin Sahel – Soummam) pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992)	138
Fig.79	Pourcentage de l'apport solide saisonnier à la station SIDI AICHE (partie du sous bassin Sahel-Soummam) pour les périodes (1972/1982) et (1982/1992).	140
Fig.80	Surface contrôlée par le barrage Tilesdit	142
Fig.81	Organigramme du model adopté	145
Fig.82	Carte d'érosivité des pluies dans le bassin versant de la Soummam	149
Fig.83	Modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant de la Soummam	150
Fig.84	Courbes de niveaux du bassin versant de la Soummam	151
Fig.85	Carte des pentes du bassin versant de la Soummam	152
Fig.86	Carte du facteur topographique (LS) du bassin versant de la Soummam	153
Fig.87	Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Soummam	154
Fig.88	Carte du facteur (C) du bassin versant de la Soummam	155
Fig.89	Carte lithologique du bassin versant de la Soummam	156
Fig.90	Carte du facteur (K) du bassin versant de la Soummam	158
Fig.91	Planche des cartes des facteurs de l'érosion en nappe	159
Fig.92	Carte des pertes en terre par érosion en nappe du bassin versant de la Soummam	160
Fig.93	Carte des limites des sous bassins de la Soummam	163
Fig.94	Carte de torrentialité du bassin versant de la Soummam	164
Fig.95	Carte d'explosion des versants du bassin versant de la Soummam	165
Fig.96	Carte des régimes d'écoulement du bassin versant de la Soummam	166
Fig.97	Planche des facteurs de l'érosion par ravinement	168
Fig.98	Carte d'érosion par ravinement du bassin de la Soummam	169
Fig.99	Carte des affleurements et des formations superficielles du bassin versant de la Soummam	171
Fig.100	Carte de perméabilité du bassin versant de la Soummam	172
Fig.101	Carte de répartition des sources dans le bassin versant de la Soummam	173
Fig.102	Carte de densité des sources dans le bassin versant de la Soummam	174
Fig.103	Planche des facteurs de l'érosion par mouvements de masse	175
Fig.104	Carte des pertes en terre par mouvements de masse du bassin versant de la Soummam	176
Fig.105	Les trois formes d'érosion constituant l'érosion hydrique	178

Fig.106	Carte d'érosion hydrique du bassin versant de la Soummam	179
Fig.107	Répartition des séismes selon la magnitude et la profondeur dans la baie de Bejaia et ses environs (période 1972-2020).	184
Fig.108	Localisation des barrages en exploitation du bassin de la Soummam	185
Fig.109	Localisation des barrages et des sablières dans le bassin de la Soummam	187
Fig.110	Baie de Bejaia (image Google Earth 2018)	189
Fig.111	Total jours de tempêtes durant l'année	190
Fig.112	Courants marins et circulation de l'eau en mer Méditerranée	191
Fig.113	Rose des vents à la station de Bejaia	191
Fig.114	Rose des houles (%) du littoral de la baie de Bejaia (d'après The Medatlas Group, 2004).	193
Fig.115	Fréquences mensuelles de la houle au large selon les directions	194
Fig.116	Sens de propagation des houles au rivage de la baie de Bejaia	195
Fig.117	Orientation générale du trait de côte à la baie de Bejaia	196
Fig.118	Direction et caractéristiques des vagues potentiellement érosives	197
Fig.119	Carte de la répartition spatiale des sédiments superficiels dans la baie de Bejaia	200
Fig.120	Schéma de Transport sédimentaire en zone de déferlement (d'après Migniot, 1990).	201
Fig.121	Quantification de la dynamique du trait de côte dans la baie de Bejaia	204

## Liste des tableaux

N° tableau	Titre du tableau	Page
Tab. 01	Eléments relatifs au rectangle équivalent du bassin versant de la Soummam	37
Tab.02	L'hypsométrie du bassin de la Soummam	38
Tab.03	Massivité du relief selon la classification de relief de l'O.R.S.T.O.M.	40
Tab.04	Sous bassins de Boussellam	42
Tab.05	Sous bassins de la vallée de la Soummam (Sahel-Soummam)	42
Tab.06	Longueur des cours d'eaux de même ordre selon Strahler	44
Tab.07	Paramètres hydrographiques du bassin de la Soummam	45
Tab.08	Les moyennes annuelles des hauteurs de pluies en mm (1980/2012)	49
Tab.09	Etude fréquentielle des précipitations moyennes annuelles à la station de Tifra (période 1980/2012).	51
Tab.10	Etude fréquentielle des précipitations moyennes annuelles de la station d'Ain Bessam (période 1980/2012).	52
Tab.11	Etude fréquentielle des précipitations moyennes annuelles de la station d'Ain Arnat (période 1980/2012).	54
Tab.12	Tableau récapitulatif des études fréquentielles des précipitations moyennes annuelles des 4 stations (période 1980/2012).	55
Tab.13	Précipitations moyennes mensuelles (1980/2012).	55
Tab.14	Etude fréquentielle des précipitations moyennes mensuelles de la station de Tifra (période 1980/2012).	57
Tab.15	Etude fréquentielle des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain Arnat (période 1980/2012).	58
Tab.16	Etude fréquentielle des précipitations moyennes mensuelles de la station de Porte de Fer (période 1980/2012).	59
Tab.17	Etude fréquentielle des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain Bessam (période 1980/2012).	60
Tab.18	Tableau récapitulative des études fréquentielles des précipitations moyennes mensuelles des 4 stations de (période 1980/2012).	61
Tab.19	Précipitation moyennes saisonnier	63
Tab.20	Pluies journalières maximales	64
Tab.21	Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales de la station de Tifra (période 1980/2012).	66
Tab.22	Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales de la station d'Ain Bessam (période 1980/2012).	66
Tab.23	Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales de la station d'Ain Arnat (période 1980/2012).	67
Tab.24	Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales de la station de Porte de Fer (période 1980/2012).	68
Tab.25	Tableau récapitulative des fréquentielles des précipitations journalières maximales de 4 stations (période 1980/2012).	68
Tab.26	Stations climatiques (série 2004 / 2014)	69
Tab.27	Apport annuel à la station de Sidi Aiche	77

Tab.28	Ajustement à la loi de Galton des débits moyens annuels à la station Sidi Aiche	80
Tab.29	Apport liquide annuel aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua	81
Tab.30	Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (Station Sidi Yahia, Maghraoua)	83
Tab.31	Apport liquide annuel à la station d'Al Asnam	85
Tab.32	Ajustement des débits moyens annuels à la loi de Galton (Série 1966/1993)	86
Tab.33	Apport et débit liquide mensuel à la station de Sidi Aiche	87
Tab.34	Les coefficients mensuels des débits (CMD) à la station de Sidi Aiche	88
Tab.35	Etude des Fréquence des débits moyens mensuels à la station Sidi Aiche	89
Tab.36	Apport et débit liquide mensuel aux stations Sidi Yahia et Maghraoua	91
Tab.37	Les coefficients mensuels des débits (CMD) aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua	92
Tab.38	Apport et débit liquide mensuel à la station d'Al Asnam	93
Tab.39	Les coefficients mensuels des débits (CMD) à la station d'Al Asnam	95
Tab.40	Etude des Fréquence des débits moyens mensuels de la station d'Al Asnam	95
Tab.41	Apport et débit saisonnier à la station de Sidi Aiche	96
Tab.42	Apport et débit saisonnier aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua	98
Tab.43	Apport et débit saisonnier à la station d'Al Asnam	99
Tab. 44	Débit maximum journalier à la station de Sidi Aiche	100
Tab.45	Ajustement des débits journaliers maximum à la station Sidi Aiche à loi de Gumbel	101
Tab.46	Débit maximum journalier des stations à Sidi Yahia et Maghraoua	102
Tab.47	Ajustement des débits journaliers maximum des stations Sidi Yahia et Maghraoua à loi de Gumbel	102
Tab.48	Débit maximum journalier à la station d'Al Asnam	103
Tab.49	Ajustement des débits journaliers maximum à la station d'El Asnam à loi de Gumbel	104
Tab.50	Apport liquide annuel à la station de Sidi Aiche (1985/1992)	105
Tab.51	Apport liquide annuel aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)	106
Tab.52	Apport liquide mensuel à la station de Sidi Aiche (1985/1992)	107
Tab.53	Apport liquide mensuel aux stations de Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)	107
Tab.54	Apport et débit saisonnier à la station de Sidi Aiche (1985/1992)	108
Tab.55	Apport et débit saisonnier aux stations Sidi Yahia et Maghraoua (1985/1992)	109
Tab.56	Comparaison des séries des stations avant et après 1985 (année mise en eau des barrages)	111
Tab.57	Volume régularisé par sous bassins versants	112
Tab.58	Répartition des forages du bassin de la Soummam par wilaya	112
Tab.59	Caractéristiques des barrages du B.V Soummam	116
Tab.60	Effet de l'ensemble des barrages sur l'écoulement dans bassin de la Soummam	118
Tab.61	Apports solides et dégradation spécifique au niveau de la station de Sidi	122

	Aiche.	
Tab.62	Valeurs mensuelles de la dégradation spécifique et apports solides à la station de Sidi Aiche durant les deux périodes.	124
Tab.63	Apport solide et dégradation spécifique saisonniers à la station de Sidi Aiche	125
Tab.64	Apport solide et transport solide spécifique annuel à la station Sidi Yahia	127
Tab.65	Apport solide et transport solide spécifique mensuels à la station Sidi Yahia	128
Tab.66	Apport solide et transport solide spécifique saisonnière à la station Sidi Yahia	129
Tab.67	Apport solide et transport solide spécifique annuel à la station de Maghraoua	132
Tab.68	Apport solide et transport solide spécifique mensuels à la station de Maghraoua	133
Tab.69	Apport solide et transport solide spécifique saisonnière à la station Maghraoua	134
Tab.70	Apport solide et transport solide spécifique annuels à la station SIDI YAHIA (partie aval du sous bassin Boussellam)	135
Tab.71	Apport solide et transport solide spécifique mensuels à la station SIDI YAHIA (partie aval du sous bassin Boussellam)	136
Tab.72	Apport solide et transport solide spécifique saisonniers à la station SIDI YAHIA (partie aval du sous bassin Boussellam)	137
Tab.73	Apport solide et transport solide spécifique annuels à la station SIDI AICHE (partie du sous bassin Sahel - Soummam)	139
Tab.74	Apport solide et transport solide spécifique mensuels à la station SIDI AICHE (partie du sous bassin Sahel - Soummam)	140
Tab.75	Apport solide et transport solide spécifique saisonniers à la station SIDI AICHE (partie du sous bassin Sahel-Soummam)	141
Tab.76	Envasements du barrage Tilesdit	142
Tab.77	Apports solides et transport solide en suspension de la partie aval du sous bassin Sahel - Soummam (période : 1972/1982,1982/1992)	143
Tab.78	Calcul du facteur (Erosivité des pluies (R))	148
Tab.79	Classes du facteur (R)	149
Tab.80	Classes du facteur Topographique (LS)	152
Tab.81	Classes d'occupation du sol selon leurs protections du sol	154
Tab.82	Classe des formations lithologiques selon leur résistance à l'érosion	157
Tab.83	Classes du facteur de l'érosivité des sols (K)	157
Tab.84	Répartition des classes de perte en terre par érosion en nappe	161
Tab.85	Calcul du coefficient de torrentialité des sous bassins	162
Tab.86	Classes du facteur Torrentialité	163
Tab.87	Répartition des surfaces selon les expositions principales	165
Tab.88	Classes du facteur (Exposition des versants)	165
Tab.89	Classes du facteur (Régime des écoulements)	166
Tab.90	Répartition des surfaces selon les classes de perte en terre par ravinement	169
Tab.91	Classes du facteur (Formations superficielles)	170
Tab.92	Classes du facteur (Perméabilité)	172
Tab.93	Classes du facteur (Densité des sources)	173

Tab.94	Répartition des classes de perte en terre par mouvement de masse	177
Tab.95	Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant de la Soummam	180
Tab.96	Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant de Boussellam	180
Tab.97	Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant du barrage TICHY HAF	181
Tab.98	Apport annuel des formes d'érosion dans le bassin versant du barrage AIN ZADA	181
Tab.99	Résultats des dernières campagnes de bathymétrie des barrages du bassin de la Soummam.	185
Tab.100	Envasement annuel des barrages de la Soummam	186
Tab.101	Bilan sédimentaire annuel du bassin versant de la Soummam	188
Tab.102	Les moyennes mensuelles de la vitesse du vent (m/s) à 10 m du sol à la station de Bejaia (2010-2018)	192
Tab.103	Fréquences mensuelles de la houle au large selon les directions.	193
Tab.104	Caractéristiques des vagues de direction Nord, Nord-Est	197
Tab.105	Vitesse d'élévation du niveau de la mer (mm/an) Source: Ifen-Observatoire du littoral, d'après EuroSION database, 2007	199
Tab.106	Mesures de recul de trait de côte à la baie de Bejaia (1973/2018)	205
Tab.107	Mesure du recul de trait de côte à la baie de Bejaia (1973/1984)	205
Tab.108	Mesure du recul du trait de côte à la baie de Bejaia (1984/2018)	205

## Références bibliographiques

**Aicha El Mahi et al 2012.** Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord). *Hydrological Sciences Journal*

**Atlas de la Soummam 2017.** *Cet ouvrage a été réalisé dans le cadre du projet PHC MAGHREB*

**Ayadi, K. et al (2015).** Détection and analysis of historical variations in the shoreline, using digital aerial photos, satellite images, and topographic surveys DGPS: case of the Bejaia bay (East Algeria). *Saudi Society of Geosciences*.

**Avenard J. A. 1990.**Sensibilité aux mouvements en masse (solifluxion).*Cahier ORSTOM, sér. pédol, vol. XXV, no 1-2, 1989-90: 119-129.*

**Boukheir et al.2001.** Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens. *Etude et Gestion des sols*, Tome 8.

**BOUANANIH. A. 2011.** Hydrologie, transport solide et modélisation. *Thèse de doctorat d'état université ABOU BEKR BELKAID Tlemcen*

**BOUDIA. SM. 2014.** Atlas vent de l'Algérie 1991.

**BAXTER, R. 1980.** Les effets des barrages et des retenues d'eau sur l'environnement au Canada. *Ministère des Pêches et des Océans. Ottawa 1980*

**Bowman, et al 2009.** Planview Geometry and morphological characteristics of pocket beaches on the Catalan coast (Spain). *Geomorphology 108*

**BAPE, 2009.** Projet d'aménagement d'un complexe hydroélectrique sur la rivière Romaine. *Rapport d'enquête et d'audiences publiques*

**Carte d'occupation du sol 1/25 000** des wilayas : Bejaia, Bouira, Tizi Ouzou et Bordj Bou Arreridj) *l'institut national des sols, de l'irrigation et de drainage (INSID)*

**Carte géologique 1/50 000, 1/200 000** du Nord Est Algérien. *Service des cartes géologiques de l'Algérie.*

**Cavaleri, I. 2005.** The wind and wave atlas of the Mediterranean Sea – The calibration phase. *Advances in Geosciences, 2.*

**Carte du réseau hydro-climatologique et de la surveillance de la qualité des eaux 1/500 000**  
*Agence national des ressources hydraulique*

**Castelle, et al 2012.** Morpho dynamique des barres sableuses de déferlement le long des plages en baies. XIIèmes *Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Cherbourg. Edition Paralia CFL.*

**Coyne et Bellier 1973.** Étude de la régularisation de la Soummam

**DELECLUSE, P 2007.** Changements climatiques et prévention du risque sur le littoral. Séminaire sur les risques naturels majeurs en date du 19 septembre 2008.

Site internet: <http://www.littoral.ifen.fr/uploads/media/risquesJittoral.pdf>.

**Demmak A. 1982.** Contribution à l'étude de l'érosion et de transport solides en suspension en Algérie septentrionale. *Thèse de docteur-Ingénieur, Univ. Paris IV, France*

**El Garouani. A et al 2008.** Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du Sig Idrisi au Nord-est du MAROC. *Téledétection, Editions scientifiques GB, 2008.*

**Etude d'actualisation du PNE Algérie 2011.** *Mission 2 : Ressources et demandes. Volet 1 : les ressources en eau superficielle. Tome 2 : Etude des volumes régularisables.*

**Haddad. S et al 2015.** Impact des aménagements hydrauliques sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de Boussellam. *Mémoire de Master en eau et aménagement durable*

**Iskounen. S. et al. 2015.** Impact des aménagements hydrauliques des sous bassin (Boussellam, Tilesdit, Lekhal) sur le fonctionnement hydrologique de l'Oued Soummam. *5<sup>ème</sup> colloque international « eau et climat : Regards croisés Nord-sud » Constantine*

**Kraus, N.C. (1987).** Application of portable traps for obtaining point measurement of sediment transport rates in the surf zone. *Journal of Coastal Research.*

**Komar, P.D., (1976).** Beach processes and sedimentation. *New-Jersey.*

**Le hir P. ET ALL, 2001 ;** Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau ; *IFREMER ; programme scientifique Seine-Aval*

**Meddi. M et al. 2016.** Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria. *Arabian urnal of Geosciences.*

**Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire. 2000** Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement.

**MIOSSEC, A. 1998.** L'érosion entre nature et société: *Rythmes et bilans dans les domaines littoraux. Édition SEOES (1998)*



- Nouacer. Z. et al 2013.** Vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ?  
revue : *physio-Géo*
- Pham. T.G. 2018.** Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*
- PASKOFF, R.2001.** L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers, le mythe et la réalité.  
*Paris, Institut Océanographique.*
- PASKOFF, R. 2000.** Les changements climatiques et les espaces côtiers "L'élévation du niveau de la mer: Risques et réponses" : *Actes du colloque d'Arles (Arles, 12-13 octobre 2000).*
- P.Kinnell. 2010.** Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models.  
*Journal of Hydrology*
- PNE. 2011.** L'étude d'actualisation du plan national de l'eau.
- Quinquis M. 2017.** Relations entre bassins versants et cellules sédimentaires littorales : les exemples du Maroc, de l'Algérie et de la Tunisie *thèse de doctorat université de D'AIX-MARSEILLE*
- R.P. Stone et al. 2000.** *Fiche technique* de l'équation universelle des pertes en terre (USLE)  
*ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de la province de l'Ontario.*  
(Canada)
- Remini B. 1999.** Les conséquences de l'envasement des barrages: quelques exemples algériens.  
*Revue Techniques sciences méthodes, n°4, avril, pp. 55-62.*
- Remini. B.2017.** Une nouvelle approche de gestion de l'envasement des barrages *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°31, Sept 2017, pp. 51-81*
- SAVARD, J.-P. 1998.** Avis scientifique sur la dynamique sédimentaire dans l'estuaire de la rivière Pornneuf. *Rapport d'étude préliminaire pour Hydro-Québec, BaieComeau,.*
- Sadiki. A et al. 2004.** Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre,*
- Sadiki. A et al. 2009,** Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla Rif central Maroc. *Cahiers géographiques - N° 06/2009.*

- Stone.R.P et D. Hilborn 2000.**Fiche technique équation universelle des pertes en terre (USLE).  
*www.gov.on.ca/omafra.*
- Short. AD. 1992.** Beach systems of the central Netherlands coast: processes, morphology and structural impacts in a storm driven multi-bar system. *Marine Geology, 107*
- Strhaler. 1978.** Introducing Physical Geography, 6th Edition
- Toumi. S et al 2013.** Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological Sciences Journal.*
- Tihay. J.1976.**Dynamique des versants et milieux naturels [dans la vallée de la Soummam (Grande Kabylie, Algérie)].*Annales de Géographie.*
- Tricart .J 1978.** Étude de la régularisation du bassin de la Soummam
- Walling, D.E., Fang, D., (2003).** Recent trends in the suspended sediment loads of the World's Rivers. *Global and Planetary Change 39*
- Wind and Wave.** Atlas of the Mediterranean Sea 2004.
- Wischmeier et Smith. 1978.** Predicting Rainfall Erosion losses, *Agriculture Handbook no. 57, US Department of Agriculture.* Washington DC. USA
- Zouagui. A et al 2018.** Modélisation Du Risque D'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Des Pertes En Terre Dans Le Rif Occidental: Cas Du Bassin Versant De Moulay Bouchta (Maroc). *European Scientific Journal January.*
- Zaza. B et al 2015.** Les incidences du changement climatique sur l'espace pastoral steppique de l'Algérie occidentale (cas de la commune de Ras El Ma). *Les Cahiers d'Outre-Mer*