

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

**Université Mohamed Khider – Biskra**  
**Faculté des Sciences et de la technologie**  
**Département : Hydraulique**



## **THÈSE**

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat En Sciences Hydrauliques

## **THEME**

***CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA STRUCTURE DU  
RESEAU HYDROGRAPHIQUE SUR LE RISQUE HYDROLOGIQUE  
« Cas des bassins de l'Est de l'Algérie »***

Présentée par : ABDEDDAIM Hakima

Soutenue publiquement le : 28/06/2018

Devant le jury :

<b>LABADI</b>	<b>Abdellah Essedik</b>	<b>MCA</b>	<b>Université de Biskra</b>	<b>Président</b>
<b>BENKHALED</b>	<b>Abdelkader</b>	<b>Pr</b>	<b>Université de Biskra</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>MESSAMEH</b>	<b>Abdelhamid</b>	<b>MCA</b>	<b>Université de Biskra</b>	<b>Examineur</b>
<b>HOUICHI</b>	<b>Larbi</b>	<b>Pr</b>	<b>Université de Batna</b>	<b>Examineur</b>
<b>BOUDOUKHA</b>	<b>Abderrahmane</b>	<b>Pr</b>	<b>Université de Batna</b>	<b>Examineur</b>
<b>ELAHCENE</b>	<b>Omar</b>	<b>MCA</b>	<b>Université de Djelfa</b>	<b>Examineur</b>

2017-2018

## AVANT PROPOS

Q u'il me soit permis de remercier en premier lieu Dieu pour sa clémence et sa miséricorde.

Ensuite, tous ceux qui se sont intéressés de près ou de loin à cette humble œuvre et qui ont contribué à sa concrétisation, particulièrement :

Mon directeur de thèse **Monsieur BENKHALED Abdelkader** pour son aide, ses précieux et judicieux conseils, ses critiques fructueuses, sa disponibilité et ses encouragements incessants.

**Monsieur LABADI Abdellah** pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

Messieurs **MESSAMEH Abdelhamid**, **HOUICHI Larbi**, **BOUDOUKHA Abderrahmane** et **ELAHCENE Omar** pour m'avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail, et ce, en tant que membres du respectable jury.

Mes remerciements vont également à tous les responsables du département d'hydraulique, ceux de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, de l'Agence des Bassins Hydrographiques et de la Direction Générale des Forêts.

Aussi, j'aimerais bien adresser mes vifs remerciements à tous mes collègues du Laboratoire d'Etudes Maritimes pour leur soutien, en particulier Monsieur Le Président Directeur Général.

Je tiens à remercier chaleureusement toute ma famille qui m'a encouragé au cours de mon parcours (ma mère, mes frères et mes sœurs, ainsi que ma belle-mère, mes beaux frères et sœurs).

Sans pour autant oublier de remercier tout cordialement mon mari Kadèche et mes deux anges : Mohamed Arafat et Racha pour leur soutien, leur compréhension et pour l'aération d'esprit, si importants pour moi.

Enfin, si par mégarde j'ai oublié quelqu'un, qu'il me pardonne et qu'il soit spécialement remercié.

## ملخص

ازدادت وتيرة الكوارث الطبيعية باستمرار في العقود الأخيرة. هذه الكوارث لها تأثير سلبي على البنية التحتية الاجتماعية والاقتصادية للبلدان ، لا سيما البلدان التي هي في طريق النمو.

وبعيداً عن الأرقام ، يمكن لكارثة أن تؤثر على عملية التطور وتمحو سنوات من الجهد، دافعة أحيانا بالشعوب إلى مستويات دنيا من الفقر. ولتعريف السكان الأكثر هشاشة، فإنهم الأكثر عرضة للمخاطر و المحرومون من وسائل التعويض ومن هنا تأتي أهمية و ضرورة الاهتمام بمختلف القضايا في مجال الهيدرولوجيا. ومع ذلك فإنه لا توجد طريقة تسمح بقياس، بصفة شاملة ومستمرة، الدور الذي تلعبه المكونات الجيومورفولوجية والمناخية و الهيدروغرافية على الديناميكية الهيدرولوجية لحوض منحدر، أين يكون تدفق السيول مرتبط أساسا بالجمع بين هطول الأمطار، نظام الميول، تنظيم شبكات الأودية و شكل الأحواض المنحدرة. من المهم اذا، الشروع في تفكير حقيقي حول أصل ديناميكية هطول الأمطار و خاصة فيما يتعلق بتحليل هيكل الشبكات و الهيدروغرافية للأحواض المنحدرة و تأثيرهن في الاستجابة الهيدرولوجية.

و بالاعتماد على الدراسة الخاصة بالمقارنة بين 43 حوض منحدر بالشمال الشرقي الجزائري، أضحي من الممكن معرفة مختلف مواضيع الأحواض المنحدرة الضرورية لتلخيص كل المكونات التي تعرف بـ جيومورفولوجية هذه الأحواض، أي : الطوبوغرافيا والميول والخصائص الصخرية و عامل التعرية وشغل الأراضي والمناخ و كذا الأمطار.

بتعيين الواصفات المورفومترية للأحواض المنحدرة والتي قسمت الى ثلاثة أصناف رئيسية : واصفات الشكل، واصفات الشبكة و واصفات الحجم، و بتجميع المعطيات التدفق سمح بحصر معضلة التهامل مما أعطى مفهوم أفضل للأداء الهيدرولوجي للأحواض.

واستخدمت الدراسة المتعددة الأبعاد للمعطيات عن طريق تحليل المكونات الرئيسية (ACP) للأحواض المدروسة كأداة للتأكد من النتائج المتحصل عليها و التي خلصت إلى أن الاستجابة الهيدرولوجية تعتمد أساسا على واصفات الشكل بنسبة ارتباط **73%**، و بـ **71%** لواصفات الحجم، وبـ **59%**، لواصفات الشبكة.

• **الكلمات الرئيسية** : حوض منحدر، تصنيف الشبكة الهيدروغرافية، الاستجابة الهيدرولوجية، تحليل المكونات الرئيسية، شمال شرق الجزائر.

## RÉSUMÉ

La fréquence des catastrophes naturelles n'a pas cessé de s'accroître au cours de ces dernières décennies. Ces catastrophes influent de manière négative sur l'infrastructure sociale et économique des pays, particulièrement pour ceux en voie de développement.

Au-delà des chiffres, une catastrophe peut compromettre le processus d'évolution et effacer des années d'efforts, faisant parfois régresser les peuples à des niveaux de pauvreté inférieurs. Les populations vulnérables sont, par définition, à la fois les plus exposées aux aléas et les plus dépourvues de moyens de récupération déjà démunies, d'où l'importance à accorder aux différentes questions en matière d'hydrologie. Il n'existait cependant aucune méthode permettant de mesurer, de manière synthétique et continue, le rôle de la composante géomorphologique climatique et hydrographique sur la dynamique hydrologique d'un bassin versant, où le débit des crues est principalement lié à la combinaison entre les précipitations, le système de pentes, l'organisation des réseaux de talwegs et la forme des bassins versants. Il est important donc, d'entreprendre une véritable réflexion sur la genèse de la dynamique des crues, notamment l'analyse des structures des réseaux hydrographiques des bassins versants et leurs impacts sur la réponse hydrologique.

En s'appuyant sur l'approche comparative menée sur 43 sous bassins versants du Nord Est de l'Algérie, il a été possible de connaître les différentes thématiques, des bassins versants, qui sont nécessaires pour synthétiser toutes les composantes qui définissent leur géomorphologie à savoir : topographie, pentes, lithologie, érosion, occupation du sol, climatologie et précipitation.

La détermination des descripteurs morphométriques des bassins versants, qui ont été dissociés en trois catégories principales : descripteurs de forme, de réseau et de volume, et l'association des données hydrométriques a permis de cerner la complexité du problème des crues, et a offert une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins.

L'étude multidimensionnelle des données par l'analyse en composantes principales (ACP) des sous bassins versants étudiés, a été utilisée comme outil de confirmation des résultats obtenus, et qui a permis de conclure que la réponse hydrologique dépend essentiellement des descripteurs de forme avec une corrélation de (73%), une corrélation de 71% aux descripteurs de volume, et une corrélation de (59%), aux descripteurs de réseau.



- **Mots-clés** : Bassin versant, Typologie du réseau hydrographique, Réponse hydrologique, Analyse en composantes principales, Nord-Est de l'Algérie.

## **ABSTRACT**

The frequency of natural disasters has steadily increased in recent decades. These disasters have a negative impact on the social and economic infrastructure of countries, especially those in developing.

Beyond the numbers, a disaster can compromise the process of evolution and erase years of effort, sometimes pushing people back to lower levels of poverty. By definition, the vulnerable populations are both the most exposed to hazards and the most deprived of recovery means already poor, whence the importance to be given to the various issues in hydrology. However, there was no method to measure, in a synthetic and continuous manner, the role of the climatic and hydrographic geomorphological component on the hydrological dynamics of a watershed, where the flood flow is mainly related to the combination of rainfall, the slope system, the organization of thalweg networks and the shape of watersheds. It is so important to undertake a real reflection on the genesis of flood dynamics, in particular the analysis of watershed hydrographic network structures and their impacts on the hydrological response.

Based on the comparative approach conducted on the 43 sub-watersheds of North-East Algeria, it was possible to know the different watershed themes which are necessary to synthesize all the components that define their geomorphology, namely : topography, slopes, lithology, erosion, land occupation, climatology and rainfall.

The determination of the morphometric descriptors of watersheds, which were divided into three main categories: shape, network and volume descriptors, and the combination of hydrometric data identified the complexity of the flood problem, and provided better understanding of the hydrological functioning of the watersheds.

The multidimensional study of data by principal component analysis (PCA) of the subwatersheds studied was used as a confirmation tool for the results obtained, and which led to the conclusion that the hydrological response depends essentially on shape, volume and network descriptors, with respective correlations of 73%, 71% and 59%.

- **Keywords**: Watershed, Hydrographic network typology, Hydrological response, Principal component analysis, North-East Algeria.

## SOMMAIRE

<b>AVANT PROPOS</b> .....	2
<b>RESUME</b> .....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	15
<b>PREMIERE PARTIE : ETAT DES CONNAISSANCES EN MATIERE DE RISQUE HYDROLOGIQUE..</b>	26
<b>I. Les processus hydrologiques</b> .....	27
<b>Introduction</b> .....	27
I.1    Processus de genèse des crues .....	27
I.1.1    Les différents types des écoulements.....	27
I.1.2    Réponse hydrologique .....	31
I.1.3    Genèse des crues et facteurs d'influence de la réponse hydrologique.....	33
I.2    Séparation des écoulements sur l'hydrogramme de crue .....	34
I.2.1    Transformation de la pluie en hydrogramme de crue .....	34
I.2.1.1    Fonction de production.....	34
I.2.1.2    Fonction de transfert.....	35
I.2.2    Différentes méthodes de séparation des écoulements.....	35
I.2.2.1    Méthodes analytiques ou graphiques .....	35
I.2.2.2    Procédés de détermination isotopiques ou hydrochimiques .....	36
I.2.2.3    Discretisation des crues par l'analyse des événements pluies-débit .....	38
I.3    Prédétermination des débits des crues .....	40
I.3.1    Méthodes approximatives .....	40
I.3.1.1    Méthodes analogiques .....	40
I.3.1.2    Méthodes régionales.....	40
I.3.1.3    Méthodes empiriques .....	40
I.3.1.4    Méthodes pseudo-empiriques .....	40
I.3.2    Méthodes déterministes.....	41
I.3.2.1    Approche événementielle simple .....	41
I.3.2.2    Approches multi-événementielles .....	41
I.3.2.3    Simulation continue.....	41
I.3.2.4    Modèles synthétiques .....	41
I.3.3    Méthodes statistiques .....	42
I.3.3.1    Analyse fréquentielle.....	42
I.3.3.2    Méthode de Gradex .....	42
<b>Conclusion</b> .....	42
<b>II. Le risque hydrologique</b> .....	44
<b>Introduction</b> .....	44
II.1    Typologie du phénomène des crues .....	44

II.2	Evaluation du risque hydrologique .....	44
II.2.1	Période de retour de l'aléa : TAL (Ans) .....	46
II.2.2	Période de retour de la vulnérabilité : TOP (Ans).....	47
II.3	Analyse du risque.....	49
<b>Conclusion</b>	.....	<b>50</b>
<b>III. Typologie des réseaux hydrographiques</b>	.....	<b>51</b>
<b>Introduction</b>	.....	<b>51</b>
III.1	Genèse des réseaux hydrographiques .....	51
III.2	Méthodes de classification des réseaux hydrographiques.....	52
III.3	Influence des caractéristiques morphométriques sur le comportement hydrologique des bassins versants .	56
III.4	Processus d'extraction du réseau hydrographique.....	59
III.4.1	Calcul du sens d'écoulement.....	60
III.4.2	Traitement des dépressions et des zones plates.....	63
III.4.3	Extraction du réseau hydrographique.....	64
<b>Conclusion</b>	.....	<b>65</b>
<b>DEUXIEME PARTIE : HYDROMORPHOLOGIE ET CLIMATOLOGIE DE LA REGION D'ETUDE</b>	.....	<b>66</b>
<b>IV. Caractéristiques générales des bassins versants</b>	.....	<b>67</b>
<b>Introduction</b>	.....	<b>67</b>
IV.1	Présentation de la région d'étude.....	67
IV.1.1	Bassin de la Medjerda.....	71
IV.1.2	Bassin des Côtiers Constantinois .....	73
IV.1.3	Bassin de la Seybouse.....	76
IV.1.4	Bassin de Kebir Rhumel .....	77
IV.1.5	Bassin des Hauts Plateaux Constantinois .....	79
<b>Conclusion</b>	.....	<b>80</b>
<b>V. Description hydro géomorphologique et climatique des bassins versants</b>	.....	<b>81</b>
<b>Introduction</b>	.....	<b>81</b>
V.1	Contexte géomorphologique .....	81
V.1.1	Régions d'étude.....	81
V.1.2	Topographie et relief .....	82
V.1.3	Pentes.....	84
V.1.4	Aperçu lithologique .....	84
V.1.5	Occupation du sol.....	87
V.1.6	Erosion.....	87
V.2	Contexte climatique .....	91
V.2.1	Température .....	91
V.2.2	Climat .....	91
V.2.3	Précipitation .....	94
V.3	Contexte hydrographique .....	97
V.3.1	Réseau hydrographique.....	98

<b>Conclusion</b> .....	<b>100</b>
<b>TROISIEME PARTIE : INFLUENCE DE LA STRUCTURE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE SUR LA REPONSE HYDROLOGIQUE</b> .....	<b>106</b>
<b>VI. Détermination des descripteurs morphométriques</b> .....	<b>107</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>107</b>
VI.1 Descripteurs de forme .....	<b>108</b>
VI.1.1 Coefficient de compacité « Kc ».....	<b>109</b>
VI.1.2 Facteur de forme « Ff ».....	<b>109</b>
VI.1.3 Rapport d'élongation « Re » .....	<b>109</b>
VI.1.4 Rapport de circularité « Rcir » .....	<b>109</b>
VI.2 Descripteurs de réseau.....	<b>112</b>
VI.2.1 Ordre du cours d'eau « i ».....	<b>113</b>
VI.2.2 Rapport de confluence et rapport des longueurs « Rc et RI ».....	<b>114</b>
VI.2.3 Longueur de ruissellement « Lr ».....	<b>115</b>
VI.2.4 Dimension fractale « Df ».....	<b>115</b>
VI.2.5 Classification des réseaux hydrographiques .....	<b>117</b>
VI.2.5.1 Classification selon l'endoréisme .....	<b>117</b>
VI.2.5.2 Classification selon la longueur des cours d'eau .....	<b>118</b>
VI.2.5.3 Classification selon la nature des cours d'eau .....	<b>119</b>
VI.2.5.4 Classification selon l'ordre des cours d'eau .....	<b>119</b>
VI.2.5.5 Classification selon le type des réseaux hydrographiques .....	<b>120</b>
VI.2.6 Pente du cours d'eau principal « Ptce ».....	<b>124</b>
VI.3 Descripteurs de volume : .....	<b>128</b>
VI.3.1 Hypsométrie .....	<b>129</b>
VI.3.2 Temps de concentration « Tc » .....	<b>133</b>
VI.3.3 Densité de drainage « Dd » .....	<b>133</b>
VI.3.4 Fréquence des cours d'eau « Fi » .....	<b>133</b>
VI.3.5 Longueur du bassin versant « Lbv ».....	<b>133</b>
VI.3.6 Coefficient de torrencialité « Ct ».....	<b>133</b>
VI.3.7 Exonération (Relief) totale « H » .....	<b>134</b>
VI.3.8 Dénivelée spécifique « Ds ».....	<b>134</b>
VI.3.9 Constante d'entretien du cours d'eau « Cec ».....	<b>134</b>
VI.3.10 Rapport de relief « Rrf ».....	<b>134</b>
VI.3.11 Rapport de finesse « Rfn ».....	<b>134</b>
VI. Nombre de rugosité « Nr ».....	<b>134</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>138</b>
<b>VII. Débits des crues</b> .....	<b>147</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>147</b>
VII.1 Processus de formation des crues .....	<b>147</b>
VII.2 Transformation de la pluie en hydrogramme de crue .....	<b>150</b>
VII.3 Débits des crues de la région d'étude.....	<b>151</b>
VII.4 Hydrogrammes des crues .....	<b>163</b>

VII.5	Prédétermination des débits des crues :	170
VII.5.1	Analyse des précipitations	173
VII.6	Analyse des débits de crues	177
<b>Conclusion</b>		<b>180</b>
<b>VIII. Application de la méthode ACP</b>		<b>183</b>
<b>Introduction</b>		<b>183</b>
VIII.1	La méthode ACP à l'échelle (1) des 43 sous bassins versants	187
VIII.2	Interprétation des résultats de l'échelle (1) des 43 sous bassins versants	193
VIII.3	La méthode ACP à l'échelle (2) des 3 zones	195
VIII.3.1	Zone I	195
VIII.3.2	Zone II	201
VIII.3.3	Zone III	207
VIII.4	Interprétation des résultats de l'échelle (2) des 3 zones	213
VIII.4.1	Zone I	213
VIII.4.2	Zone II	217
VIII.4.3	Zone III	218
VIII.5	La méthode ACP à l'échelle (3) des cinq bassins versants	221
VIII.5.1	Bassin versant de la Medjerda codé 12	221
VIII.5.2	Bassin versant des Côtiers Constantinois codé 03	221
VIII.5.3	Bassin versant de la Seybouse codé 14	227
VIII.5.4	Bassin versant de Kebir Rhumel codé 10	233
VIII.5.5	Bassin versant des Hauts Plateaux Constantinois codé 07	239
VIII.6	Interprétation des résultats de l'échelle (3) des 5 bassins versants	245
VIII.6.1	Bassin versant 03	245
VIII.6.2	Bassin versant 14	247
VIII.6.3	Bassin versant 10	252
VIII.6.4	Bassin versant 07	255
<b>Conclusion</b>		<b>257</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		<b>261</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>		<b>267</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Nombre d'événements et de victimes dans le monde pour la période 2001-2015 .....	18
Figure 2: Nombre d'événements et de victimes dans le monde par origine d'aléa entre 2001 et 2015.....	18
Figure 3: Nombre d'événements dans le monde par type d'aléa entre 2001 et 2015 .....	19
Figure 4: Extension des surfaces contributives « saturées ». Musy, (2005) et Chorley, (1957).....	29
Figure 5: Processus d'écoulement de l'eau sur un versant. Ambroise, (1999).....	31
Figure 6: Principe de la réponse hydrologique d'un bassin versant. Legout, (2005).....	33
Figure 7: Représentation de la transformation de la pluie brute en débit. Musy, (2005). .....	35
Figure 8: Méthode graphique de Blavoux de séparation des écoulements. Blavoux (1978).....	36
Figure 9: Exemple de décomposition d'un hydrogramme de crue .....	37
Figure 10: Analyse des événements pluies-débits. Roche, (1963).....	39
Figure 11: Représentation des différents processus de génération de l'écoulement.....	39
Figure 12: Vision spatiale de l'aléa et la vulnérabilité. Bernardara, (2005) .....	45
Figure 13: Modèle Conceptuel du Risque hydrologique. Abdeddaim., (2008). .....	46
Figure 14: Détermination de TAL à partir d'un modèle QdF. Gilard,(1998) .....	46
Figure 15: Détermination de TOP pour un objectif de protection défini par (Tobj, dobj). Gilard, (1998). ..	48
Figure 16: Cartographie du risque. Cemagref, (2005). .....	49
Figure 17: Classification des réseaux hydrographiques selon Gravellius, Horton, Schumm et Strahler ....	53
Figure 18: Classification des réseaux hydrographiques selon Scheidegger, Shreve, et Howard .....	54
Figure 19: Classification des réseaux hydrographiques selon Howard, Cazabat, Gagnon et Weishar. ....	55
Figure 20: Influence de la forme du bassin versant sur l'hydrogramme de crue. Musy et al; (2005) .....	56
Figure 21: Influence de la pente sur la forme de l'hydrogramme. Musy et al., (2005).....	57
Figure 22 : Influence du coefficient des bifurcations sur l'hydrogramme de crue.....	57
Figure 23: Influence de l'occupation du sol sur la réponse hydrologique du bassin. Musy,1998 .....	58
Figure 24: Extraction du réseau hydrographique à partir d'algorithmes hydrologiques.....	60
Figure 25: Dispersion des flux selon la méthode DEMON. Marechal, (2011). .....	62
Figure 26: Calcul de la nappe d'écoulement (DEMON).....	62
Figure 27: Carte de log(A) estimée par cinq différents algorithmes hydrologiques.....	63
Figure 28: Traitement des dépressions à partir d'un MNT. Rucquoi, (2014) .....	64
Figure 29: Extraction du réseau hydrographique. Charleux et al., (2000).....	64
Figure 30: Limites des bassins versants de l'Algérie. ....	69
Figure 31: Présentation des wilayas relatives aux bassins d'étude. ....	70
Figure 32: Carte de situation des bassins versants du Nord Est de l'Algérie .....	71
Figure 33: MNT et réseau hydrographique du bassin de la Medjerda.....	73
Figure 34: MNT et réseau hydrographique du bassin des Côtiers Constantinois.....	75
Figure 35: MNT et réseau hydrographique du bassin de la Seybouse.....	76
Figure 36: MNT et réseau hydrographique du bassin de Kebir-Rhumel.....	78
Figure 37: MNT et réseau hydrographique du bassin des Hauts Plateaux Constantinois.....	80
Figure 38: Carte des régions d'étude. ....	82
Figure 39: Carte altimétrique.....	83
Figure 40: Carte des pentes. ....	85
Figure 41: Carte lithologique.....	86
Figure 42: Carte d'occupation du sol.....	89
Figure 43: Carte d'érosion.....	90
Figure 44: Carte des températures moyennes annuelles. ....	92
Figure 45: Carte climatologique. (.....	93
Figure 46: Carte pluviométrique de l'Algérie de Seltzer, 1938 .....	94
Figure 47: Carte des précipitations moyennes annuelles de l'Est Algérien.....	95
Figure 48: Carte des précipitations. ....	97
Figure 49: Réseau hydrographiques des bassins versants.....	99
Figure 50: Représentation des trois zones du réseau hydrographique .....	100
Figure 51: Zone I : Réseau hydrographique, altitudes, lithologie, pentes et précipitations.....	102
Figure 52: Zone II: Réseau hydrographique, altitudes, lithologie, pentes et précipitations .....	103

Figure 53: Zone III : Réseau hydrographique, altitudes, lithologie, pentes et précipitations.....	104
Figure 54: Sous bassins ayant les valeurs extrêmes des descripteurs de forme.....	111
Figure 55: Classification d'un réseau hydrographique (SBV0309) selon Strahler.....	113
Figure 56: Représentation graphique de Rapport de confluence et des longueurs (Rc et RI) .....	114
Figure 57: Angles de jonction entre les cours d'eau .....	115
Figure 58: Histogramme du nombre des cours d'eau à la longueur moyenne . .....	115
Figure 59: Distribution des valeurs du nombre des cours d'eau à la longueur moyenne .....	117
Figure 60: Classification des réseaux hydrographiques selon l'endoréisme.....	118
Figure 61: Classification des réseaux hydrographiques selon la longueur du cours d'eau.....	118
Figure 62: Classification des réseaux hydrographiques selon la nature du cours d'eau.....	119
Figure 63: Classification des réseaux hydrographiques selon l'ordre du cours d'eau.....	120
Figure 64: Caractéristiques angulaires des réseaux hydrographiques. ....	120
Figure 65: Réseau hydrographique dendritique (SBV1201) .....	121
Figure 66: Réseau hydrographique parallèle.....	121
Figure 67: Réseau hydrographique rectangulaire .....	122
Figure 68: Réseau hydrographique multi-bassins (SBV0701) .....	122
Figure 69: Classification du réseau hydrographique selon le type de drainage «B.Deffontaines. 1990 »..	123
Figure 70: Taux des types des réseaux hydrographiques .....	123
Figure 71: Profil en long de l'oued Medjerda.....	124
Figure 72: Sous bassins ayant les valeurs extrêmes des descripteurs de réseau.....	127
Figure 73: Etapes de calcul des surfaces entre les courbes de niveau. « logiciel Global mapper 16.0 ». ...	131
Figure 74: Courbe hypsométrique des bassins de la zone I.....	132
Figure 75: Courbe hypsométrique des bassins de la zone II .....	132
Figure 76: Courbe hypsométrique des bassins de la zone III.....	132
Figure 77: Sous bassins ayant les valeurs extrêmes des descripteurs de volume.....	137
Figure 78: Relation linéaire entre les superficies (S) des bassins versants et leurs périmètres (P). .....	138
Figure 79: Relation linéaire entre les périmètres (P) et les longueurs équivalentes (Leq). .....	138
Figure 80: Relation exponentielle entre les périmètres (P) et les rayons des cercles (R).....	139
Figure 81: Relation de puissance entre les largeurs équivalentes et les coefficients de compacité.....	139
Figure 82: Relation exponentielle entre les rapports de circularité et les coefficients de compacité. ....	139
Figure 83: Relation de puissance entre les rayons des cercles (R) et les largeurs équivalentes (leq).....	140
Figure 84: Relation de puissance entre les rapports de circularité et les largeurs équivalentes. ....	140
Figure 85: Relation linéaire entre les rapports d'élongation (Re) et les facteurs de forme (Ff).....	140
Figure 86: Relation linéaire entre les indices de pente de roche et les indices de pente globaux. ....	141
Figure 87: Relation de puissance entre les dimensions fractales et les rapports des longueurs. ....	141
Figure 88: Relation logarithmique entre les nombres des cours d'eau (N) et leurs ordres (i). .....	141
Figure 89: Relation exponentielle entre les longueurs moyennes des cours d'eau et leurs ordre. ....	142
Figure 90: Les sous bassins caractérisés par le saut d'ordre.....	143
Figure 91: Relation linéaire entre le temps de concentration et la Longueur du bassin versant. ....	143
Figure 92: Relation de puissance entre la densité de drainage (Dd) et le coefficient de torrentialité (Ct) .....	143
Figure 93: Relation linéaire entre la fréquence du cours d'eau (Fi) et le coefficient de torrentialité (Ct). .....	144
Figure 94: Relation de puissance entre la constante d'entretien du cours d'eau et le Ct.....	144
Figure 95: Relation logarithmique entre le nombre de rugosité (Nr) et le rapport de relief (Rrf). ....	144
Figure 96: Relation de puissance entre la fréquence du cours d'eau et la densité de drainage. ....	145
Figure 97: Relation de puissance entre le nombre de rugosité (Nr) et la densité de drainage (Dd).....	145
Figure 98: Relation de puissance entre les surfaces des bassins (S) et les temps de concentration (Tc)..	146
Figure 99: Relation de puissance entre les surfaces des bassins et les sommes des longueurs .....	146
Figure 100: Types des écoulements, (Dunne, (1978)). .....	148
Figure 101: Principe de la réponse hydrologique d'un bassin versant. ....	149
Figure 102: Fonction de production .....	150
Figure 103: Fonction de transfert.....	151
Figure 104: Codes et débit max des stations hydrométriques considérées .....	152
Figure 105: Box plot des débits observés .....	153
Figure 106: Chroniques des débits des crues du sous bassin 1201.....	156
Figure 107: Chroniques des débits des crues du sous bassin 1204.....	156



Figure 108: Chroniques des débits des crues du sous bassin 0303.....	157
Figure 109: Chroniques des débits des crues du sous bassin 0304.....	157
Figure 110: Chroniques des débits des crues du sous bassin 0309.....	158
Figure 111: Chroniques des débits des crues du sous bassin 0311.....	158
Figure 112: Chroniques des débits des crues du sous bassin 0316.....	159
Figure 113: Chroniques des débits des crues du sous bassin 1403.....	159
Figure 114: Chroniques des débits des crues du sous bassin 1406.....	160
Figure 115: Chroniques des débits des crues du sous bassin 1006.....	160
Figure 116: Chroniques des débits des crues du sous bassin 1007.....	161
Figure 117: Chroniques des débits des crues du sous bassin 0705.....	161
Figure 118: Chroniques des débits des crues des sous bassins concernés.....	162
Figure 119: Hydrogramme des crues du sous bassin 1201.....	163
Figure 120: Hydrogramme des crues du sous bassin 1204.....	164
Figure 121: Hydrogramme des crues du sous bassin 0303.....	164
Figure 122: Hydrogramme des crues du sous bassin 0304.....	165
Figure 123: Hydrogramme des crues du sous bassin 0309.....	165
Figure 124: Hydrogramme des crues du sous bassin 0311.....	166
Figure 125: Hydrogramme des crues du sous bassin 0316.....	166
Figure 126: Hydrogramme des crues du sous bassin 1403.....	167
Figure 127: Hydrogramme des crues du sous bassin 1406.....	167
Figure 128: Hydrogramme des crues du sous bassin 1006.....	167
Figure 129: Hydrogramme des crues du sous bassin 1007.....	168
Figure 130: Hydrogramme des crues du sous bassin 0705.....	168
Figure 131: Typologie des crues et structure des réseaux hydrographique.....	169
Figure 132: Box plot des précipitations.....	174
Figure 133: Pluie annuelle par la méthode des isohyètes du sous bassin 0317.....	177
Figure 134: Débits des crues estimés et observés des stations considérées.....	179
Figure 135: Débits simulés et observés.....	179
Figure 136: Classification des bassins versants de la région d'étude selon les plages des débits.....	180
Figure 137: Représentation des descripteurs de forme et 43 sous bassins sur les deux plans factoriels...	188
Figure 138: Représentation des descripteurs de réseau et 43 sous bassins sur les deux plans factoriels..	190
Figure 139: Représentation des descripteurs de volume et 43 sous bassins sur les deux plans factoriels	192
Figure 140: Représentation des descripteurs de forme et des sous bassins de la zone I.....	196
Figure 141: Représentation des descripteurs de réseau et des sous bassins de la zone I.....	198
Figure 142: Représentation des descripteurs de volume et des sous bassins de la zone I.....	200
Figure 143: Représentation des descripteurs de forme et sous bassins de la zone II.....	202
Figure 144: Représentation des descripteurs de réseau et sous bassins de la zone II.....	204
Figure 145: Représentation des descripteurs de volume et sous bassins de la zone II.....	206
Figure 146: Représentation des descripteurs de forme et sous bassins de la zone III.....	208
Figure 147: Représentation des descripteurs de réseau et sous bassins de la zone III.....	210
Figure 148: Représentation des descripteurs de volume et sous bassins de la zone III.....	212
Figure 149: Relation exponentielle entre le débit (Q) et le coefficient de compacité (Kc).....	213
Figure 150: Relation linéaire entre le débit (Q) et le rapport de circularité (Rcir).....	213
Figure 151: Relation de puissance entre le débit (Q) et la longueur du talweg principal (Lt).....	214
Figure 152: Relation exponentielle entre le débit (Q) et la pente du cours d'eau (Ptce).....	214
Figure 153: Relation exponentielle entre le débit (Q) et le coefficient de boisement (Cb).....	214
Figure 154: Relation exponentielle entre le débit (Q) et le temps de concentration (Tc).....	214
Figure 155: Relation logarithmique entre le débit (Q) et l'exonération totale (H).....	215
Figure 156: Relation logarithmique entre le débit (Q) et le rapport de relief (Rrf).....	215
Figure 157: Relation de puissance entre le débit (Q) et le rapport de finesse (Rfn).....	215
Figure 158: Relation exponentielle entre le débit (Q) et la pente du cours d'eau (Ptce).....	218
Figure 159: Représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 03.....	222
Figure 160: Représentation des descripteurs de réseau et du bassin versant 03.....	224
Figure 161: Représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 03.....	226
Figure 162: Représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 14.....	228



Figure 163: Représentation des descripteurs de réseau et du bassin versant 14 .....	230
Figure 164: Représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 14.....	232
Figure 165: Représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 10.....	234
Figure 166: Représentation des descripteurs de réseau du bassin versant 10 .....	236
Figure 167: Représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 10.....	238
Figure 168: Représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 07.....	240
Figure 169: Représentation des descripteurs de réseau et du bassin versant 07 .....	242
Figure 170: Représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 07.....	244
Figure 171: Relation exponentielle entre le débit (Q) et la pente du cours d'eau principal (Ptce). .....	245
Figure 172: Relation de puissance entre le débit (Q) et la surface (S).....	247
Figure 173: Relation exponentielle entre le débit (Q) et l'indice de pente de Roche (Ipr). .....	247
Figure 174: Relation de puissance entre le débit (Q) et le rayon (R). .....	248
Figure 175: Relation exponentielle entre le débit (Q) et l'indice de pente globale (Ipg). .....	248
Figure 176: Relation de puissance entre le débit (Q) et la somme des longueurs des cours d'eau ( $\sum Li$ )..	248
Figure 177: Relation de puissance entre le débit (Q) et le coefficient de boisement (Cb).....	249
Figure 178: Relation de puissance entre le débit (Q) et le temps de concentration (Tc). .....	249
Figure 179: Relation exponentielle entre le débit (Q) et le rapport de relief (Rrf). .....	249
Figure 180: Relation linéaire entre le débit (Q) et la longueur du bassin versant (Lbv).....	250
Figure 181: Relation exponentielle entre le débit (Q) et la dénivelée spécifique (Ds).....	250
Figure 182: Relation exponentielle entre le débit (Q) et la (DH).....	250
Figure 183: Relation linéaire entre le débit (Q) et le facteur de forme (Ff). .....	252
Figure 184: Relation linéaire entre le débit (Q) et rapport d'élongation (Re). .....	253
Figure 185: Relation de puissance entre le débit (Q) et la somme des longueurs des cours d'eau ( $\sum Li$ )..	253
Figure 186: Relation logarithmique entre le débit (Q) le rapport de finesse (Rfn). .....	253
Figure 187: Relation exponentielle du débit (Q) avec la fréquence du cours d'eau (Fi). .....	253
Figure 188: Relation logarithmique entre le débit (Q) et la fréquence du cours d'eau (Fi). .....	255
Figure 189: Résultats de la méthode ACP de l'échelle (1). .....	258
Figure 190: Résultats de la méthode ACP de l'échelle (2). .....	258
Figure 191: Résultats de la méthode ACP de l'échelle (3). .....	259

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Echelle de gravité des événements naturels de la base de données CATNAT.....	17
Tableau 2: Evénements météorologiques et hydrologiques les plus meurtriers entre 2001 et 2015 .....	20
Tableau 3: Inventaire des importantes inondations à travers l'Algérie (1971-2012) .....	21
Tableau 4 : Noms, codes des bassins versants de l'Algérie et leurs nombres des sous bassins. ....	68
Tableau 5: Détermination des degrés de stabilité à l'érosion (Insid, 2006) .....	87
Tableau 6: Descripteurs de forme .....	108
Tableau 7: Valeurs des descripteurs de forme des bassins versants .....	110
Tableau 8: Descripteurs de réseau .....	112
Tableau 9: Valeurs des descripteurs de réseau des bassins versants .....	125
Tableau 10: Descripteurs de volume .....	128
Tableau 11: Répartition de la surface du bassin versant de la Medjerda en fonction de son altitude. ....	130
Tableau 12: Valeurs des descripteurs de volume des sous bassins versants .....	135
Tableau 13: Caractéristiques des stations hydrométriques de la région d'étude .....	153
Tableau 14: Résumé des caractéristiques des crues observées lors des inondations suscitées .....	154
Tableau 15: Statistiques descriptives des données pluviométriques .....	173
Tableau 16: Caractéristiques des postes pluviométriques.....	175
Tableau 17: Valeurs des débits des crues estimés et observés des stations considérées .....	178
Tableau 18: Statistiques descriptives des descripteurs de forme .....	185
Tableau 19: Statistiques descriptives des descripteurs de réseau .....	185
Tableau 20: Statistiques descriptives des descripteurs de volume .....	186
Tableau 21: Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (1)» .....	187
Tableau 22: Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (1)» .....	189
Tableau 23: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (1)» .....	191
Tableau 24: Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (2) ; zone I» .....	195
Tableau 25: Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (2) ; zone I» .....	197
Tableau 26: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (2) ; zone I» .....	199
Tableau 27: Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (2) ; zone II».....	201
Tableau 28: Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (2) ; zone II» .....	203
Tableau 29: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (2) ; zone II».....	205
Tableau 30: Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (2) ; zone III» .....	207
Tableau 31: Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (2) ; zone III» .....	209
Tableau 32: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (2) ; zone III» .....	211
Tableau 33: Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (3) ; BV 03» .....	221
Tableau 34: Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (3) ; BV 03» .....	223
Tableau 35: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (3) ; BV 03».....	225
Tableau 36: Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (3) ; BV 14» .....	227
Tableau 37: Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (3) ; BV 14» .....	229
Tableau 38: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (3) ; BV 14».....	231
Tableau 39: Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (3) ; BV 10» .....	233
Tableau 40: Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (3) ; BV 10» .....	235
Tableau 41: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (3) ; BV 10».....	237
Tableau 42: Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (3) ; BV 07».....	239
Tableau 43: Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (3) ; BV 07» .....	241
Tableau 44: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (3) ; BV 07».....	243
Tableau 45: Résultats des corrélations en % entre les débits max et les descripteurs. ....	257

## **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

### Contexte et problématique de recherche

Le problème des inondations n'est pas une nouveauté. Les inondations sont parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes. Elles constituent un phénomène courant et récurrent dans l'histoire de l'humanité. Les inondations touchent d'une manière erratique la majorité des pays et révèlent un risque majeur sur la plupart des territoires à travers le monde.

Selon la grille de qualification d'importance des événements qui sont basés sur les données du cabinet d'étude spécialisé dans les études des risques naturels, depuis 2001 CATNAT «Catastrophes naturelles», le bilan en termes de conséquences humaines et matérielles des catastrophes naturelles, donné au **tableau 1** dresse un classement par ordre de gravité d'événements naturels, selon 7 niveaux où :

- 1,5% des catastrophes recensées atteignent le niveau 0 «Phénomène remarquable» ;
- 25% des catastrophes recensées atteignent le niveau 1 «Petit événement» ;
- 43% des catastrophes recensées atteignent le niveau 2 «Événement notable» ;
- 23% des catastrophes naturelles référencées du niveau 3 «Événement grave» ;
- 06% des événements de niveau 4 «Catastrophe» ;
- 1,4 % des événements de niveau 5 «Catastrophe majeure» ;
- 0,1 % des événements de niveau 6 «Cataclysme».

La base de données CATNAT reprend l'intégralité des événements d'origine naturels dommageables constituant l'actualité quotidienne des catastrophes naturelles dans le monde depuis janvier 2001.

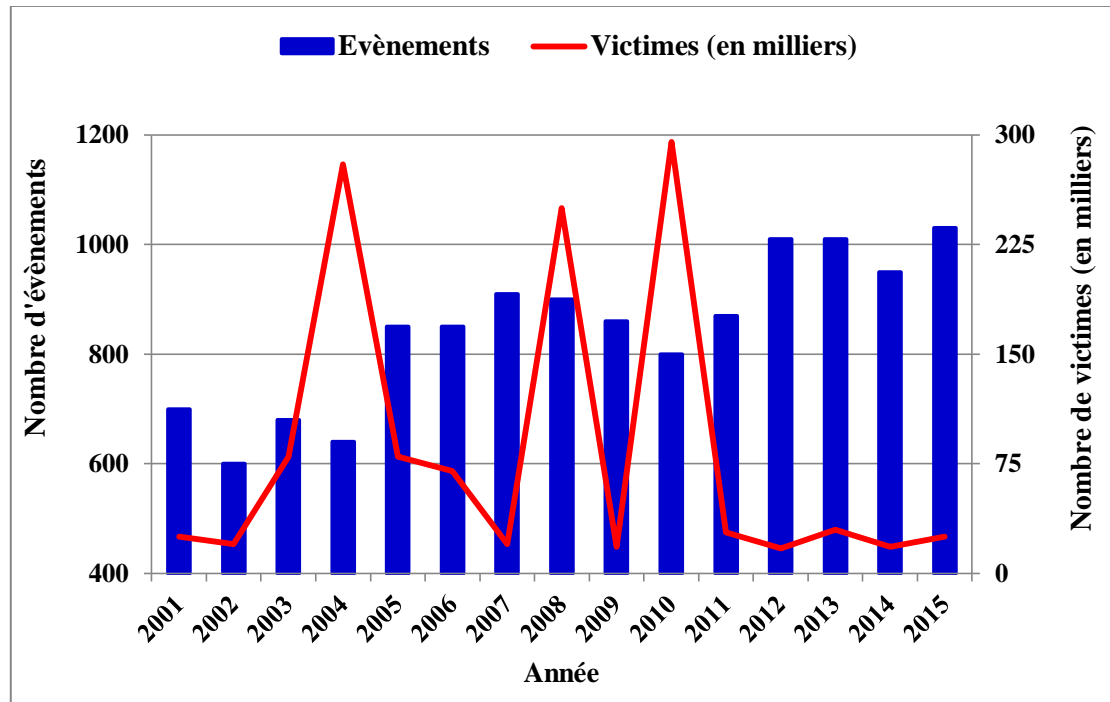
Le bilan de la période du 1er janvier 2001 au 31 décembre 2015 est de 12657 catastrophes naturelles qui ont été recensées dans le monde soit en moyenne 844 événements par an sur la période étudiée, (**figure 1**).

D'une manière générale, 42,3 % des événements naturels dommageables sont d'origine météorologiques (tempêtes, cyclones, intempéries, tornades orages, grêle, neige), 23 % d'origine hydrologique (inondations et coulées de boue), 18,7 % climatique (incendies de forêt, sécheresse, canicule, vague de froid) et 15,1 % d'origine géologique (séismes, mouvements de terrain), (**figure 2**).

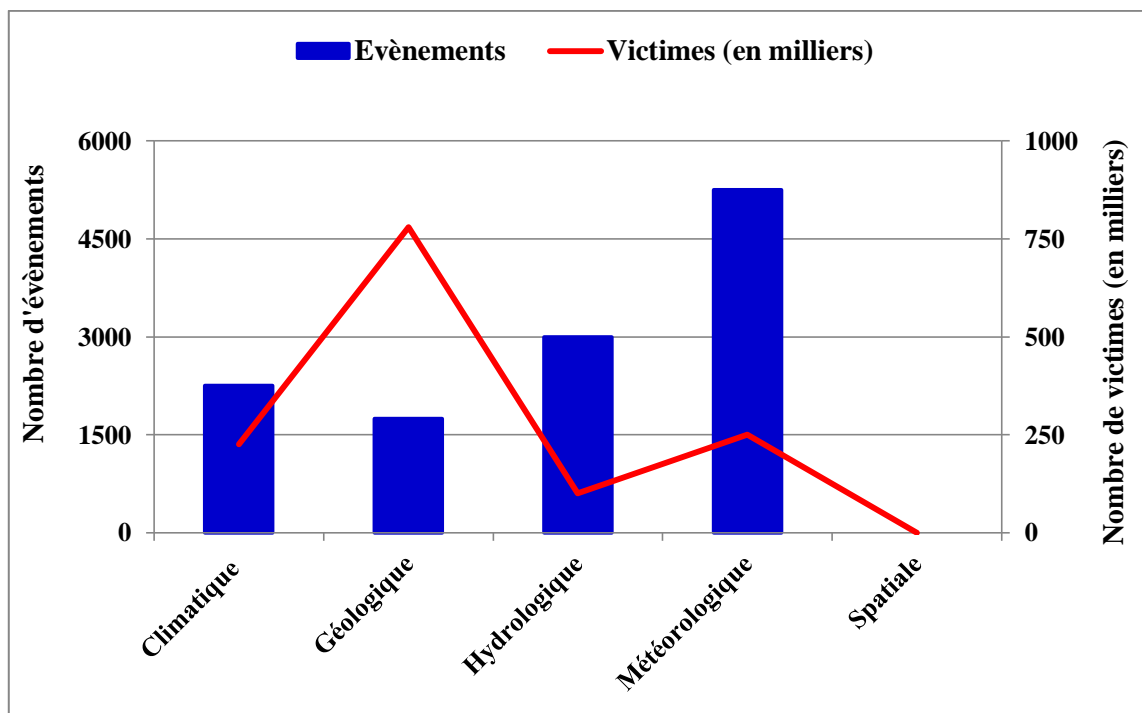
**Tableau 1:** Echelle de gravité des événements naturels de la base de données CATNAT

GRAVITE		CONSEQUENCE HUMAINES				CONSEQUENCES MATERIELLES
Niveau	Qualification	Evacués	Sans-abris	Blessés	Tués	Caractérisation des dommages matériels
<b>0</b>	Phénomène remarquable	-	-	-	-	Pas de dommages
<b>1</b>	<b>Petit événement</b>	Possible	-	Possible (< 10)	-	Dommages partiels aux bâtiments (1-10) Dommage possible aux infrastructures
<b>2</b>	<b>Événement notable</b>	Oui	Possible	Possible (> 10)	≤ 5	Dommages partiels aux bâtiments (10-100) Dommages totaux aux bâtiments (< 100) Dommage aux infrastructures
<b>3</b>	<b>Événement grave</b>	Oui	Possible	Oui	6-50	Nombreux dommages partiels aux bâtiments (100 - 500) Nombreux dommages totaux aux bâtiments (100-500) Dommages notables aux infrastructures Conséquences économiques sectorielles locales
<b>4</b>	<b>Catastrophe</b>	Oui	Oui	Oui	51-500	Nombreux dommages partiels aux bâtiments (500-1000) Nombreux dommages totaux aux bâtiments (> 5000) Dommages importants aux infrastructures Conséquences économiques sectorielles régionales
<b>5</b>	<b>Catastrophe majeure</b>	Oui	Oui	Oui	501 à 50 000	Très nombreux dommages partiels et totaux aux bâtiments Dommages très importants aux infrastructures Conséquences économiques sectorielles nationales et / ou internationales
<b>6</b>	<b>Cataclysm</b>	Oui	Oui	Oui	> 50 000	Dommages partiels et totaux aux bâtiments extrêmement important Dommages aux infrastructures très étendus Dommages matériels dépassant les capacités de gestion d'un pays et nécessitant une aide extérieure Conséquences économiques sectorielles nationales et / ou internationales très importantes

(CATNAT Ubyrisk Consultants, 2015)



**Figure 1:** Nombre d'évènements et de victimes dans le monde pour la période 2001-2015 (CATNAT Ubyrisk Consultants, 2015).

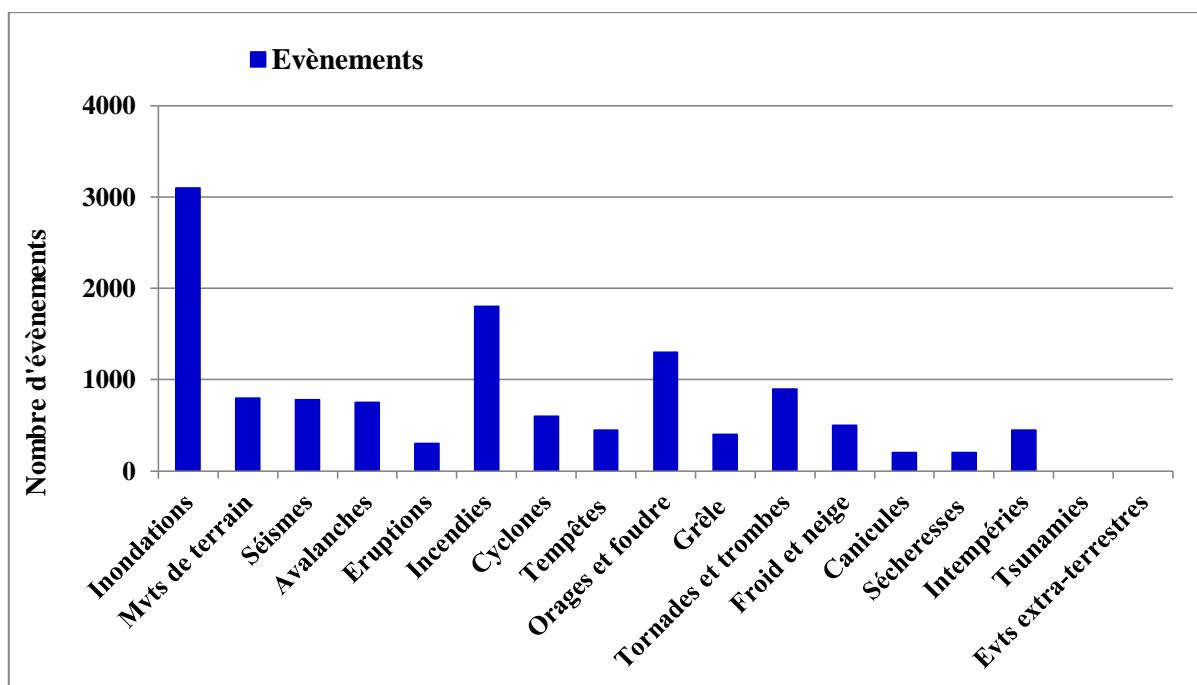


**Figure 2:** Nombre d'évènements et de victimes dans le monde par origine d'aléa entre 2001 et 2015. (CATNAT Ubyrisk Consultants, 2015).

En termes de géographie, et sur la période étudiée (2001-2015), le continent Américain est le plus fréquemment touché avec 3735 événements recensés, suivi par le continent Asiatique avec 3704 événements, l'Europe (3160 événements) et l'Afrique qui est touché par des événements qui ne dépassent pas les 1500.

Lorsque l'on considère les 20 pays ayant subi le plus d'événements au cours de la décennie, cette hiérarchie est un peu différente puisque 7 pays d'Asie sont touchés, 6 pour l'Europe, suivi par le continent Américain avec 3 pays.

En termes de fréquence de typologie d'aléa, avec 3101 événements recensés les inondations constituent plus d'un quart des catastrophes, (**figure 3**) suivies par les incendies de forêt (1840 événements soit 14,5% des événements recensés) et les orages / foudre (1354 événements soit près de 11 %).



**Figure 3:** Nombre d'événements dans le monde par type d'aléa entre 2001 et 2015

(CATNAT Ubyrisk Consultants , 2015)

Le coût total des catastrophes naturelles entre 2001 et 2015 est estimé à 2132 milliards de \$.

Un aperçu historique sur les importants événements météorologiques et hydrologiques les plus meurtriers et les plus coûteux à travers le monde, engendrant les dégâts humains et matériels est représenté dans le **tableau 2**.

**Tableau 2:** Evénements météorologiques et hydrologiques les plus meurtriers et les plus et les plus coûteux survenus dans le monde entre 2001 et 2015

Pays	Date début	Type d'événement	Victimes	Coût (Millions de \$)
Indonésie, Thaïlande, Inde...	26/12/2004	Tsunami et séisme	270000	-
Myanmar	02/05/2008	Cyclones (Nargis)	138373	-
Corée du Sud / Nord	10/07/2006	Cyclones (Ewiniar)	55700	-
Japon	11/03/2011	Tsunami et séisme	19846	210000
Philippines, Chine, Vietnam	06/11/2013	Cyclones (Haiyan)	7370	-
Inde, Pakistan, Bangladesh	16/06/2013	Inondations	6288	-
Inde et Bangladesh	14/11/2007	Cyclones (Sidr)	4234	-
Inde et Bangladesh	11/06/2007	Inondations	3536	-
Haïti, Rép. Dominicaine	23/05/2004	Inondations	3344	-
Amérique Centrale	03/10/2005	Cyclones (Stan)	2252	39063
USA et Caraïbes	26/08/2005	Cyclones (Katrina)	1836	125000
Thaïlande, Cambodge, Vietnam	08/09/2011	Inondations	1193	40775
Chine	14/06/2010	Inondations	686	18000
USA et Caraïbes	24/10/2012	Cyclones (Sandy)	210	70000
Haïti	07/09/2008	Cyclones (Ike)	157	38000
Caraïbes	07/09/2004	Cyclones (Ivan)	117	23128
Europe Centrale	08/08/2002	Inondations	113	17430
USA et Caraïbes	15/10/2005	Cyclones (Wilma)	47	20000
USA	19/09/2005	Cyclones (Rita)	33	16000
USA et Caraïbes	12/08/2004	Cyclones (Charley)	27	18000
Europe Centrale	01/06/2013	Inondations	25	16500

(CATNAT Ubyrisk Consultants, 2015)

Le cas de l'Algérie n'est pas cité dans cette référence. Selon (Lahlah, 2004) et (DGPC, 2015), le coût des dégâts engendrés par les inondations de Bab El Oued en Novembre 2001 ont été estimés à 33 milliards de DA.

L'inventaire des importantes inondations à travers l'Algérie pour la période allant de 1971 jusqu'à 2012 est illustré dans le tableau 3 suivant :



**Tableau 3:** Inventaire des importantes inondations à travers l'Algérie (1971-2012)

Régions	Date	Dégâts
Tizi-Ouzou Azazga	12 Octobre 1971	40 morts et des centaines d'habitations détruites
Alger et Tizi-Ouzou	28 au 31 Mars 1974	/ 52 morts et 4570 maisons détruites 130 villages isolés et plus de 18 000 sinistrés. 13 ponts détruits et des dizaines kilomètres de routes emportés. dégâts matériels des divers services techniques évalués à 27 Millions de DA
El Eulma	01 Septembre 1980	44 morts, 50 blessés et 365 familles sinistrées
Est Algériens (Jijel, Constantine, Skikda, Guelma, Khenchla, Oum El Bouaghi)	03 Février 1984	20 morts, 03 disparus, 2346 familles sinistrées, 500 têtes de bétail emportées, 02 ponts détruits, canalisations d'AEP détruites à 100 %.et dégâts évalués à plus de 50 millions DA
Oued R'hiou	20 Octobre 1993	22 morts, 20 blessés et plusieurs disparus. Des dizaines de familles sinistrées et d'importants dégâts matériels
Bordj Bou Arréridj, Msila, Djelfa, Medea, Bouira, Ain Defla et Tiaret	23 Septembre 1994	27 morts, 84 blessés et 941 familles sinistrées
Alger « Bab el oued »	10/11/2001	752 morts 33 milliards DA
Ghardaia	01/10/2008	Plus de 30 morts 600 constructions démolies
El Taref	22-23/02/2012	03 morts Dégâts d'environ 2 milliards de DA. (constructions, terrains agricoles.)

(Lahlah, 2004) et (DGPC, 2015)

Selon (Beloulou, 2008), les inondations de Bechar en Octobre 2008 ont causé la mort de huit personnes et des dommages importants des infrastructures de base ( routes bloquées et effondrement de plusieurs ponts).

En Algérie les causes des inondations peuvent être classées en trois types :

- Le premier type se définit par les situations météorologiques remarquables se traduisant par une forte pluviosité « inondations de Mars 1974 sur les bassins des côtières Algérois et celle de décembre 1984 sur l'Est algérien ».
- Le second type se décrit par les actions anthropiques s'expliquant essentiellement dans la défaillance des différents réseaux et l'urbanisation anarchique.
- Le troisième type s'explique par les situations topographiques i) des montagnes - plaines : Annaba-Biskra par exemple, ii) par des localités traversées par les oueds : Bordj Bou Arreridj-Sidi Bel Abbes par exemple, iii) par des villes situées au piémont des montagnes : Batna- Médéa par exemple.

L'Algérie est soumise aux inondations qui se manifestent de façon catastrophique. Selon les services de la protection civile, une commune sur trois est susceptible d'être inondée en partie ou en totalité, par conséquent la réduction des risques est devenue une préoccupation majeure pour toutes les grandes organisations internationales. Depuis quelques décennies le rythme des inondations s'est accéléré et devient potentiellement plus dangereux et plus dévastateur. Les exemples de Bab- el-oued 2001 avec 752 morts, une centaine de disparus et des dégâts matériels considérables, Ghardaïa 2008 avec plus de 30 morts et El Taref sont les plus graves.

Désormais, il est impératif de raisonner à une échelle spatiale, plus intégrée, prenant en compte tout le bassin versant, où on accorde un intérêt particulier à la structure des réseaux hydrographiques et à la composante morphostructurale des bassins-versants et leurs effets sur la réponse hydrologique.

Dans ce contexte, le travail que nous présentons s'inscrit dans le cadre des travaux de recherche engagés par le Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface « LARHYSS » depuis quelques années. Cette étude se rapporte à une analyse de l'influence de la structure du réseau hydrographique sur la réponse hydrologique des bassins versants, notamment ceux du Nord-Est de l'Algérie.

### **Enjeux de la recherche**

Bien que les enjeux soient relatifs, concernant l'influence des réseaux de drainage, leur analyse détaillée a été faiblement effectuée dans la région méditerranéenne, en particulier les

bassins du Nord-Est de l'Algérie, mise à part quelques études, dont nous citons celle de (Mebarki, 2005), qui est penchée sur les ressources en eau, aménagement et environnement au Nord Est Algérien. En conséquence, notre contribution est de répondre à cette insuffisance. Il devient primordial d'établir une étude dans ce contexte, où les résultats obtenus présenteront des intérêts sur le plan du développement local et scientifique. Concernant le choix de la zone, c'est un espace d'étude qui contient globalement trois régions principales (Nord-est et les Hauts plateaux). Ce choix se justifie par la fréquence des événements des crues- inondations d'où la diversité des bassins versants de l'Est Algérien et la disponibilité relative des données.

### **Objectifs de la recherche**

Ce travail nous permet de statuer sur les spécificités morphologiques des 43 sous bassins versants objet de cette étude, et de vérifier la plus forte prédisposition au risque des crues.

Au préalable, la présentation se propose de rappeler les principaux éléments structurants les bassins, ensuite quantifier les descripteurs morphométriques, pour comparer les caractéristiques morphologiques des bassins versants, et pour quantifier leur comportement hydrologique potentiel.

Plusieurs objectifs sont clairement dissociés. On veut, d'une part, améliorer les connaissances sur les phénomènes des inondations qui apparaissent dans le Nord-Est de l'Algérie, et d'autre part, utiliser de nouvelles méthodes d'analyse spatiale pour étudier les interactions entre les caractéristiques morpho structurales internes d'un bassin versant et sa dynamique potentielle de ruissellement et en fin mettre à la disposition des acteurs publics un outil pertinent pour une analyse et aide à la prise de décision en matière du développement durable.

### **Méthodologie de la recherche**

La genèse des crues et la réponse hydrologique dépendent de deux facteurs essentiels, l'un est externe (les conditions climatiques et pluviométriques du milieu) et l'autre est interne (la morphologie du bassin versant ; les propriétés physiques du bassin et la structuration du réseau hydrographique).

Cette recherche se focalise sur l'étude d'une méthode d'évaluation de manière quantitative, l'influence de la structuration interne du bassin versant sur sa dynamique potentielle.

Les caractéristiques géomorphologiques et les descripteurs morphométriques ont été déterminés par les méthodes classiques en profitant du développement du SIG (Système d'Information Géographique) en utilisant les logiciels ArcGis 10.0 pour la représentation cartographique des différentes thématiques et Global Mapper 16.0 qui offre des informations sur le relief à travers les MNT (Modèle Numérique de Terrain).

L'analyse des réseaux hydrographiques joue un rôle important dans la compréhension des mécanismes de ruissellement induisant des inondations, leurs caractéristiques dépendent des conditions climatiques et physiographiques régionales. La surface du bassin, la longueur du cours d'eau et la nature du sol constituant le bassin, ont été largement utilisés pour les applications hydrologiques y compris les inondations, à travers le calcul des débits fréquents et des débits des projets (méthodes classiques). Les données pluviométriques et hydrométriques ont été recueillies au niveau de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). Les cartes présentant les caractéristiques géomorphologiques ont été produites à partir des données numériques de la Direction Générale des Forêts (DGF).

La quantification de l'influence des descripteurs morphométriques des 43 bassins versants du Nord Est de l'Algérie sur leurs réponses hydrologiques a été déterminée en appliquant une des méthodes statistiques. Il s'agit de la méthode Analyse en Composantes principales (ACP).

### **Structuration de la thèse**

La thèse est structurée en 3 parties et huit chapitres

**Première partie :** « Etat des connaissances en matière du risque hydrologique ». Cette partie est scindée en trois chapitres.

- Le premier chapitre synthétise les processus hydrologiques.
- Le deuxième chapitre définit le risque hydrologique.
- Le troisième chapitre est consacré à la typologie des réseaux hydrographiques.

**Deuxième partie :** « Hydromorphologie et climatologie de la région d'étude ». Cette partie est scindée en deux chapitres.

- Le quatrième chapitre présente les caractéristiques générales des bassins versants.
- Le cinquième chapitre est illustré par des cartes des différentes thématiques de la région d'étude (topographie et relief, pentes, lithologie, érosion, occupation du sol,

climatologie et précipitation), nécessaires pour la description hydro géomorphologique et climatique des bassins versants.

**Troisième partie :** « Influence de la structure du réseau hydrographique sur la réponse hydrologique ». Cette partie contient deux chapitres

- Le sixième chapitre est consacré à la détermination quantitative des descripteurs morphométriques des bassins versants qui sont dissociés en trois catégories principales, descripteurs de forme, de réseau et de volume.
- Le septième chapitre discute les données hydrométriques (observés ou prédéterminés) qui offrent une meilleure analyse du fonctionnement hydrologique, et dresse un historique des événements hydrologiques à travers quelques hydrogrammes de crues des stations hydrométriques recueillies au niveau de l'Agence Nationale de Ressources Hydrauliques (ANRH).
- Le huitième chapitre propose d'intégrer une méthode statistique d'analyse des résultats obtenus, c'est l'Analyse en Composantes Principale, pour déterminer les affinités entre les descripteurs morphométriques des sous bassins versants, et d'en déduire ceux « descripteurs de forme, de réseau ou de volume » qui sont plus caractéristiques avec les débits Max.

**PREMIERE PARTIE :**  
**ETAT DES CONNAISSANCES EN MATIERE DE RISQUE**  
**HYDROLOGIQUE**

- **Chapitre I : Les processus hydrologiques.**
- **Chapitre II : Le risque hydrologique.**
- **Chapitre III : La typologie des réseaux hydrographiques**

## I. Les processus hydrologiques

### Introduction

L'hydrologie des bassins versants, depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle, a fait l'objet de nombreuses études. L'origine et le devenir des eaux précipitées sont ainsi toujours l'objet de concepts et de discussions liés à la complexité des systèmes hydrologiques.

Ce premier chapitre tente de résumer l'ensemble des concepts utilisés en hydrologie des bassins versants et les différents processus hydrologiques responsables de la genèse des écoulements.

Les processus hydrologiques sont des phénomènes complexes, à cause de l'interaction de plusieurs facteurs, allant de la structure du bassin versant, à son régime d'alimentation, en passant par la topologie de ses cours d'eau et la structure de son substratum géologique. De par les interventions anthropiques par le biais d'aménagements importants, les régimes hydrologiques évoluent désormais à des petites échelles temporelles et non selon des temps géologiques.

### I.1 Processus de genèse des crues

Une abondante littérature existe sur les tentatives d'explication des causes et des mécanismes des générations des crues et des écoulements induisant des inondations. Par ailleurs, cette littérature s'accompagne d'un nombre important de paramètres qui peuvent agir d'une façon directe ou indirecte sur les processus hydrologiques.

#### I.1.1 Les différents types des écoulements

Pendant la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, un concept hydrologique est universellement admis sur la formation des écoulements visibles dans le réseau hydrographique, ces écoulements sont constitués d'eau préalablement infiltrée et d'eau ruisselée n'ayant jamais pénétrée dans le sol. La genèse de ce ruissellement et sa modélisation ont été systématisés par l'agronome ([Horton, 1933](#)) pour expliquer les mécanismes de formation des crues. Cette théorie s'appuie sur le partage de la pluie disponible au niveau de la surface du sol après éventuelle interception par la végétation. Dès que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol (elle-même variable selon l'humidité du sol), c'est une saturation de la surface par le haut. Après avoir rempli les dépressions de surface, l'eau en excès est évacuée par ruissellement en surface pour former l'écoulement rapide de crue. Ce mécanisme de

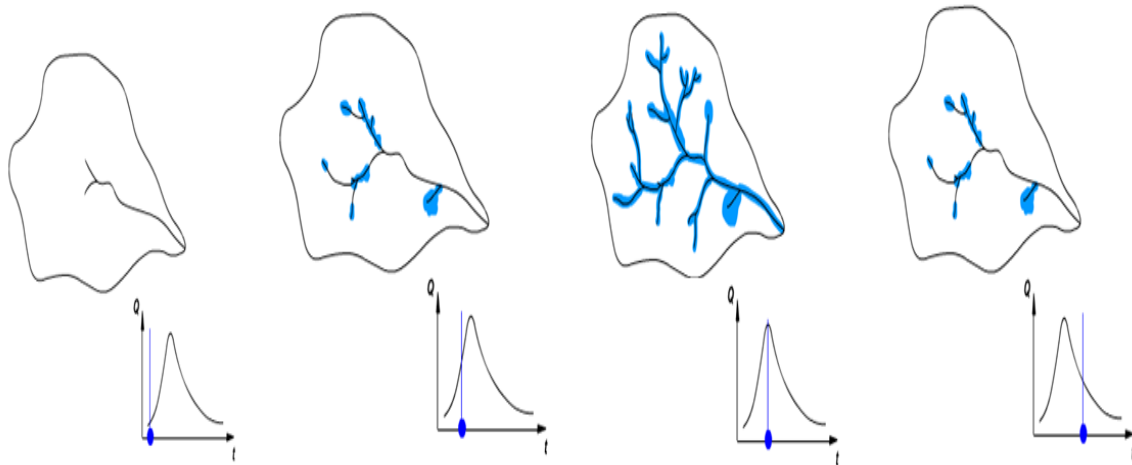
ruissellement est considéré comme dominant pendant les épisodes pluvieux intenses et tenu pour responsable des hautes et moyennes eaux s'écoulant dans le réseau hydrographique. Le reste de l'eau (la partie qui n'est pas ruisselée) s'infiltré et va percoler par un écoulement plus lent à travers le sol, jusqu'à rejoindre une nappe. La fraction d'eau infiltrée contribuera ainsi à recharger la nappe et participera avec retard, au soutien des débits de base.

Cette représentation a rencontré un grand succès, notamment en ingénierie hydrologique. Ce n'est qu'au début des années 1960 qu'une conception alternative à l'école hortonienne apparaît. Des observations de terrain montraient que sous certaines conditions, l'écoulement souterrain de l'eau participait directement ou indirectement à la formation des crues. Cette représentation du ruissellement, notamment en milieu tempéré, correspondait à un cas particulier extrême, puisque des crues sont fréquemment observées pour des intensités de pluie inférieures à la capacité d'infiltration des sols.

Le ruissellement n'est souvent actif que sur une partie du bassin, il n'est pas généralisé à tout le bassin. Selon la localisation de la zone concernée, l'eau ruisselée pourra, soit participer aux débits de crue ou s'infiltrer plus en aval sur le versant (partial area concept), (Betson, 1964). La conception d'un bassin composé des zones d'extension variable, plus ou moins actives hydrologiquement selon les événements, a été suggérée par (Hursch et Brater, 1941), formalisée par (Cappus, 1960), qui a démontré la variabilité des zones et confirmée plus tard par (Dosseur, 1964).

D'autres types de ruissellement ne peuvent être écartés, dans les zones humides où le sol est saturé jusqu'en surface. La pluie qui tombe sur ces surfaces ne peut que ruisselée ou libérer un volume d'eau ancienne par effet piston, (Cappus, 1960). Il répartit alors le ruissellement en une zone de ruissellement d'extension et une zone d'infiltration d'extension. Le coefficient de ruissellement indépendant de l'intensité de la crue et de la couverture végétale naîtra de la répartition de ces surfaces contributives, la **figure 4** montre l'extension des surfaces saturées ainsi que le réseau hydrographique durant un événement pluvieux pour quatre pas de temps. Par conséquent, la quantité d'eau supérieure à la capacité du sol au stockage et à la transmission latérale par écoulement de sub-surface ne pourra pas s'infiltrer et va s'écouler totalement en surface. Cette définition implique que l'écoulement par saturation est produit seulement par les précipitations. Toutefois, les précipitations sur les surfaces saturées représentent seulement une des composantes de cet écoulement, l'autre étant l'écoulement de retour.





**Figure 4:** Extension des surfaces contributives « saturées » (Musy, 2005) et (Chorley, 1957).

L'exfiltration d'eau provenant de l'écoulement souterrain (Dunne et Black, 1970) constitue un autre type de ruissellement, fréquemment observé sur les zones hydromorphes où affleurent les nappes. Ces ainsi que les auteurs ont démontré l'importance des facteurs de différenciation géomorphologiques et pédologiques à l'échelle du versant. Ces différentes contributions s'ajoutent aux précipitations directes sur le réseau de drainage.

Pour (Hewlett, 1961), la part dominante des écoulements est générée sur une surface correspondant à l'extension de la zone saturée. Ce résultat, particulièrement observé en zone forestière montre que l'écoulement est majoritairement constitué de l'écoulement sub-superficiel. Le premier processus invoqué pour expliquer la contribution souterraine a été celui d'un écoulement hypodermique dans le sol en conditions saturées (Whipkey, 1965) ou non saturées (Hewlett et Hibbert, 1967). L'écoulement observé à l'exutoire d'un bassin versant provient des zones d'extension limitée, pratiquement assimilables à des nappes d'eau libres sur lesquelles les coefficients d'écoulement sont voisins de l'unité. (Dunne, 1978) introduit un coefficient d'écoulement sub-superficiel variant de 0.20% à 20%.

L'eau de surface s'infiltré dans le sol non saturé et percole en profondeur en poussant par effet piston l'eau déjà présente. La percolation verticale de l'eau peut être ralentie ou encore bloquée par un niveau moins perméable du sol. L'augmentation des gradients latéraux de potentiel hydraulique procure des conditions plus humides à ce niveau du sol, favorisant un écoulement latéral sur le versant. Ce flux latéral rejoindra le ruisseau ou les nappes en aval. (Hewlett et Hibbert, 1963) ont prouvé que ce type d'écoulement ne suffit qu'exceptionnellement à générer des crues, il a un rôle de soutien du débit de base.

En revanche, dans les parties inférieures plus humides des versants ou encore dans les nappes peu profondes rechargées rapidement à travers la faible épaisseur du sol non saturé, un petit apport d'eau sur une zone de saturation sous tension suffit à convertir cette dernière en surface libre et/ou à augmenter rapidement le niveau de la nappe. (Hewlett et Hibbert, 1967) localisent les surfaces de contribution aux pieds des versants, là où la capacité du sol à transmettre l'écoulement latéral n'est plus suffisante et où l'eau retourne par conséquent à la surface. Ce phénomène peut faire contribuer la nappe au soutien des hautes eaux de manière importante (Sklash et Farvolden, 1979).

Bien que chaque colonne de sol juxtaposée pour continuer le massif poreux du bassin soit identique en termes de matrice poreuse, il se développe, à cause de la capillarité, un état initial très différencié au fur et à mesure que l'on s'approche de la rivière. Le déficit en volume d'eau à combler pour atteindre la saturation étant de plus en plus réduit aux abords des berges, et le sol étant d'autant plus conducteur qu'il est humide, la progression des eaux vers la nappe est accélérée, c'est le phénomène d'intumescence de nappe (Ambroise, 1991).

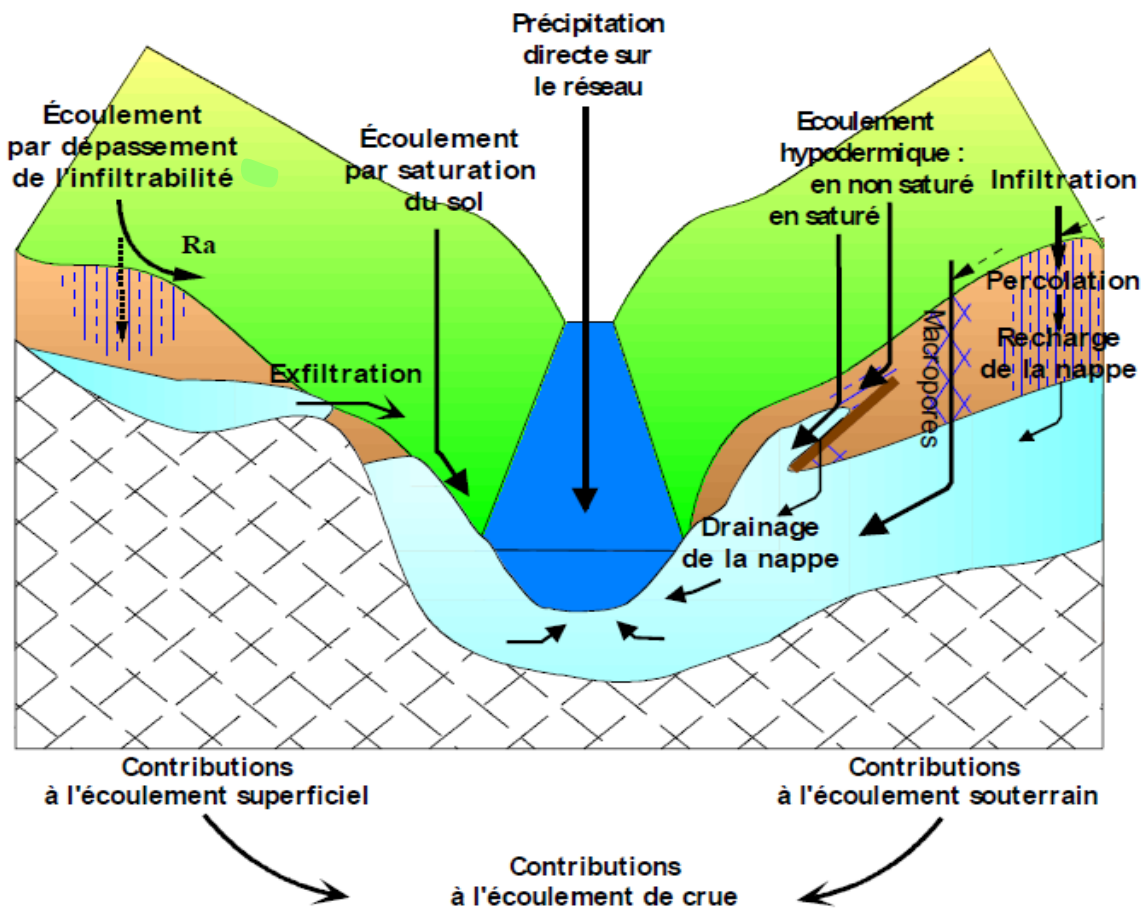
(Pearce, 1990) a montré que des eaux anciennes constituent majoritairement les volumes écoulés, les coefficients auraient plaidé en faveur d'une forte proportion d'eau en provenance directe de l'averse génératrice de la crue. L'onde de perturbation liée à cet apport d'eau est transmise de l'amont vers l'aval jusqu'au ruisseau qui draine à une vitesse supérieure au déplacement gravitaire de l'eau (Beven, 1989).

Globalement, les processus des écoulements ont été résumés en quatre cheminements principaux d'après (Robinson, 1990) :

1. Précipitations directes à la surface libre du cours d'eau (direct précipitation).
2. Ecoulement de surface ou ruissellement de surface (overland flow), qui peut être décomposé en :
  - Ecoulement par dépassement de la capacité d'infiltration ou ruissellement hortonien (excess infiltration overland flow).
  - Ecoulement par saturation constitué par l'écoulement en surface des précipitations directes tombées sur les surfaces saturées ou de l'exfiltration (return flow).
3. Ecoulement de sub-surface ou hypodermique ou écoulement rapide interne (subsurface flow, throughflow, interflow) où on distingue plusieurs mécanismes d'écoulement :
  - Ecoulement par effet piston (translatory flow).

- Ecoulement par intumescence de la nappe à proximité du cours d'eau (Groundwater ridging).
  - Ecoulement par macroporosité tybulaire (macropores flow).
4. Ecoulement souterrain (groundwater flow).

La **figure 5** schématise les différents processus de génération de l'écoulement.



**Figure 5:** Processus d'écoulement de l'eau sur un versant. (Ambroise, 1999)

### I.1.2 Réponse hydrologique

La manière dont réagit le bassin versant lorsqu'il est soumis à une sollicitation se nomme réponse hydrologique, (**figure 6**). Celle-ci peut être nulle (absence de modification de l'écoulement ou absence de crue) ou positive (écoulement modifié ou crue).

La réponse hydrologique peut-être caractérisée spatialement en étant rapide ou retardée, temporellement en étant totale ou partielle.

La rapidité des réponses des bassins versants est généralement expliquée par la formation de ruissellement à la surface du sol dont le temps de transfert est court. La compréhension des phénomènes régissant le ruissellement est donc un élément clé pour l'amélioration de la prévision des crues.

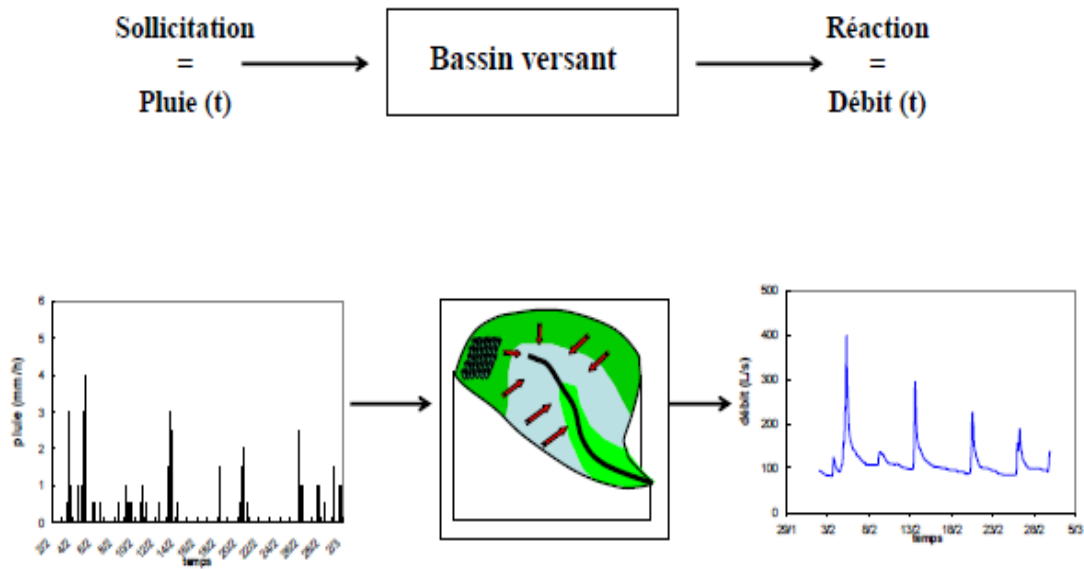
Les facteurs météorologiques tels que la nature des précipitations (pluie, neige...), leur intensité et leur durée, la distribution temporelle et spatiale de la pluie, le trajet des orages... influent fortement sur la réponse hydrologique du bassin.

Le but d'étudier la réponse hydrologique est de comprendre les mécanismes qui génèrent de tels phénomènes, notamment la réponse à un épisode pluvieux en termes des ruissellements sur les bassins versants. Cette réponse est régie par les transferts d'eau dans les zones non saturées.

Parmi les études récentes de la réponse hydrologique d'un bassin urbain, on cite :

- i. L'identification d'un hydrogramme unitaire à partir d'une banque de données (Rodriguez, 1999),
- ii. Modèle linéaire non linéaire semi-distribué de la transformation précipitation - ruissellement (Aronica et al., 2005).

La réponse hydrologique d'un bassin versant à une averse est un processus complexe. La modélisation de ce processus comporte plusieurs étapes : i) modélisation de la pluie dont le modèle représente l'entrée fondamentale aux modèles de ruissellement et ii) modélisation du ruissellement. La conception et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques nécessitent la connaissance des pluies estimées pour une « période de défaillance » appropriée aux ouvrages et, par conséquent, de la réponse hydrologique du bassin versant à ces pluies. Le modèle pluviométrique, courbes intensité-durée-fréquence (IDF), demeure l'approche statistique la plus courante, particulièrement en hydrologie urbaine, pour établir la relation pluie-débit. La méthodologie d'établissement des courbes IDF en Algérie, est basée généralement et pour longtemps sur l'utilisation du modèle statistique de Gumbel et du modèle empirique de type Montana, (Achite et Meddi, 2005). Toutefois (Hebbal et Remini, 2011) ont montré que la loi de distribution Gamma est la meilleure pour ajuster les débits extrêmes des crues aux bassins du Nord Algérien (Isser, Cheliff et Cotiers Algérois Ouest). Tandis que (Benkhald et al., 2013) ; (Benameur et al., 2017) ont démontré que les deux lois Log-normale (LN2) et GPD (Generalized Pareto Distribution) s'adaptent mieux pour ajuster les débits liquides et solides au niveau du bassin de l'oued Abiod du barrage Foum Gherza de Biskra.



**Figure 6:** Principe de la réponse hydrologique d'un bassin versant. Legout, (2005).

### I.1.3 Genèse des crues et facteurs d'influence de la réponse hydrologique

La nature et l'origine des crues ou « hautes eaux » sont liées aux régimes hydrologiques et à la taille du bassin versant. On distingue les crues généralement selon leur cause, à savoir :

- Les crues d'averses (fortes pluies de plusieurs jours ou averses orageuses localisées) ;
- les crues de fonte de neige ;
- les crues d'embâcle et de débâcles de glace.

Les facteurs d'influence de la réponse hydrologique peuvent être des :

- Facteurs « externes » :
  - Les conditions climatiques du milieu ;
  - La pluviosité (durée de l'averse, intensité, variations spatiales).
- Facteurs « internes » :
  - La morphologie du bassin versant ;
  - Les propriétés physiques du bassin ;
  - La structuration du réseau hydrographique ;
  - L'état antécédent d'humidité.

## **I.2 Séparation des écoulements sur l'hydrogramme de crue**

La séparation des écoulements sur l'hydrogramme de crue comprend, d'une part l'identification des portions d'hydrogrammes provenant des différents types d'écoulement en fonction de leur mécanisme de production, zone d'origine sur les versants et vitesse de propagation. D'autre part elle doit permettre l'individualisation d'évènements élémentaires permettant d'établir une relation significative entre la quantité de pluie et d'écoulement. Une présentation non exhaustive des méthodes de séparation des écoulements est exposée ci-dessous :

### **I.2.1 Transformation de la pluie en hydrogramme de crue**

La modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant est généralement abordée de façon globale (en traitant le bassin comme une seule entité globale), car les modèles globaux sont, les mieux adaptés aux besoins opérationnels, (Danniel, 2002). Dans ce cas, un comportement pour la fonction de production du bassin est imposé a priori. La transformation de la pluie en hydrogramme de crue se traduit par l'application successive de deux fonctions, nommées respectivement fonction de production et fonction de transfert :

#### **I.2.1.1 Fonction de production**

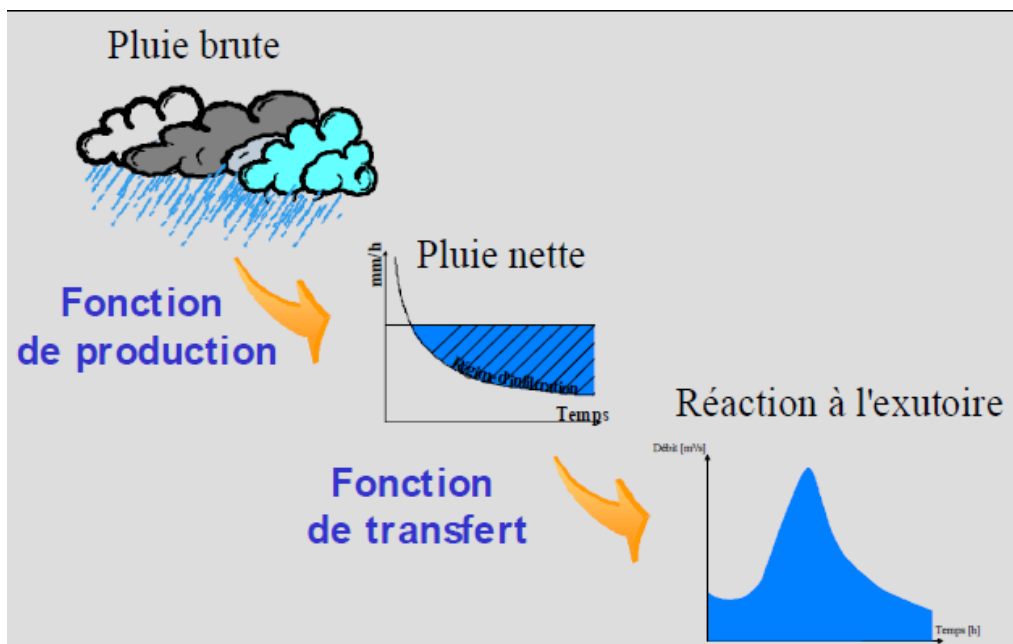
La fonction de production permet de déterminer la portion de la pluie brute (appelée pluie nette ou efficace) qui va participer à l'écoulement et contribuer au débit à l'exutoire. Elle cherche à représenter l'interaction entre le sol et la lame d'eau précipitée pour connaître quelle part de la pluie va être stockée dans le sol, quelle sera celle qui va ruisseler et dans quelles conditions.

La pluie de projet constitue l'entrée fondamentale des modèles de ruissellement. Elle représente une donnée nécessaire pour étudier les projets hydrauliques. La pluie de projet est l'un des moyens de représenter la pluviométrie locale. Les ouvrages hydrauliques considérés doivent être dimensionnés avec cette pluie de projet, pour permettre le passage de cette crue critique sans dommage, avec une certaine fréquence exprimée en temps de retour, (Roux, 1996)

### I.2.1.2 Fonction de transfert

Une fois la pluie nette calculée, il faut établir une fonction de transfert pour déterminer la distribution dans le temps de ces volumes d'eau à l'exutoire. La fonction de transfert permet de déterminer l'hydrogramme de crue résultant d'une pluie (souvent considérée comme la pluie nette), (**figure 7**). Plusieurs méthodes (hydrogramme unitaire – SCS - Synder) existent pour déterminer la fonction de transfert d'un bassin. Les plus complexes utilisent les équations de Barre Saint Venant avec les modèles d'onde diffusante ou d'onde cinématique, qui est basée sur l'équation de conservation de masse et équation de conservation de la quantité de mouvement. Les plus simples utilisent la distance de chaque point de la grille à l'exutoire et affectent une vitesse, (méthode de Muskingum) qui est basée sur la fonction

$$\text{d'acheminement } \frac{dv}{dt} = Q_e - Q_s \dots\dots\dots(0)$$



**Figure 7:** Représentation de la transformation de la pluie brute en débit. (Musy, 2005).

### I.2.2 Différentes méthodes de séparation des écoulements

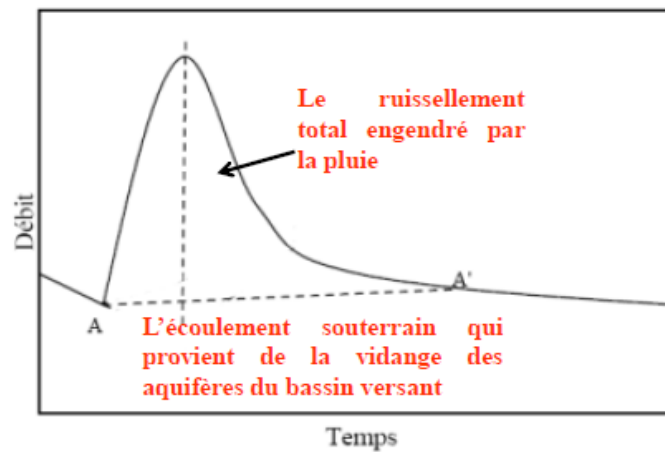
Plusieurs méthodes utilisées pour séparer les écoulements dans le but de trouver la fonction qui relie les pluies aux débits, parmi ces méthodes on cite celles qui sont fréquemment appliquées.

#### I.2.2.1 Méthodes analytiques ou graphiques

Ces méthodes ont pour objectif la simplification des composantes de l'hydrogramme de crue en supposant qu'au niveau d'un cours d'eau en crue, le débit associé est le résultat de la

superposition de deux écoulements : l'écoulement souterrain qui provient de la vidange des aquifères du bassin versant et le ruissellement total engendré par la pluie. Ce dernier regroupe à la fois le ruissellement direct et celui retardé (hypodermique).

- La méthode la plus simple citée par (Blavoux, 1978), consiste à tracer une horizontale du point (A) de la **figure 8** qui marque le début de la courbe de concentration (cru) jusqu'à l'intersection (A') avec la courbe de tarissement.



**Figure 8:** Méthode graphique de Blavoux de séparation des écoulements. (Blavoux, 1978)

### I.2.2.2 Procédés de détermination isotopiques ou hydrochimiques

Dans le domaine de l'hydrologie, les premières applications des traceurs environnementaux datent de la fin des années soixante, dans le but d'estimer l'origine des eaux durant les crues, (Musy, 1998). En effet le traçage environnemental permet d'effectuer une analyse des processus hydrologiques en recourant soit à des traceurs isotopiques (Oxygène 18 ( $^{18}\text{O}$ ), Deutérium) soit à d'autres traceurs de type chimique, tels que :

- Des cations : Calcium, Magnésium, Sodium, Potassium.
- Des anions : Chlorure, Nitrates, Sulfates ainsi que la silice.

Les méthodes de traçages isotopiques se basent principalement, sur le fait que la composition isotopique de l'eau contenue dans les sols est différente de celle de l'eau de pluie et de celle de l'eau des rivières.

- L'eau contenue dans les sols est dite l'eau "ancienne" ou pré-existante.
- L'eau de pluie est dénommée eau "nouvelle".



La teneur en isotope de l'eau de la pluie est ( $\delta_n$ ), la teneur en isotope de l'eau du sol est ( $\delta_a$ ) et celle de la rivière est ( $\delta$ ) étant connues (par un échantillonnage répété), il est alors possible de déterminer les contributions d'eau ancienne et d'eau nouvelle d'un débit mesuré  $Q$  à l'aide d'un système de deux équations à deux inconnues ( $Q_n$ ) et ( $Q_a$ ) :

$$\begin{cases} Q = Q_a + Q_n & \dots\dots(1) \\ \delta \cdot Q = \delta_a \cdot Q_a + \delta_n \cdot Q_n & \dots\dots(2) \end{cases} \Rightarrow Q_a = Q \cdot \frac{\delta - \delta_n}{\delta_a - \delta_n} \text{ et } Q_n = Q - Q_a \dots\dots(3)$$

Avec

$Q$  : Débit total du cours,

$Q_a$  : Débit d'eau ancienne,

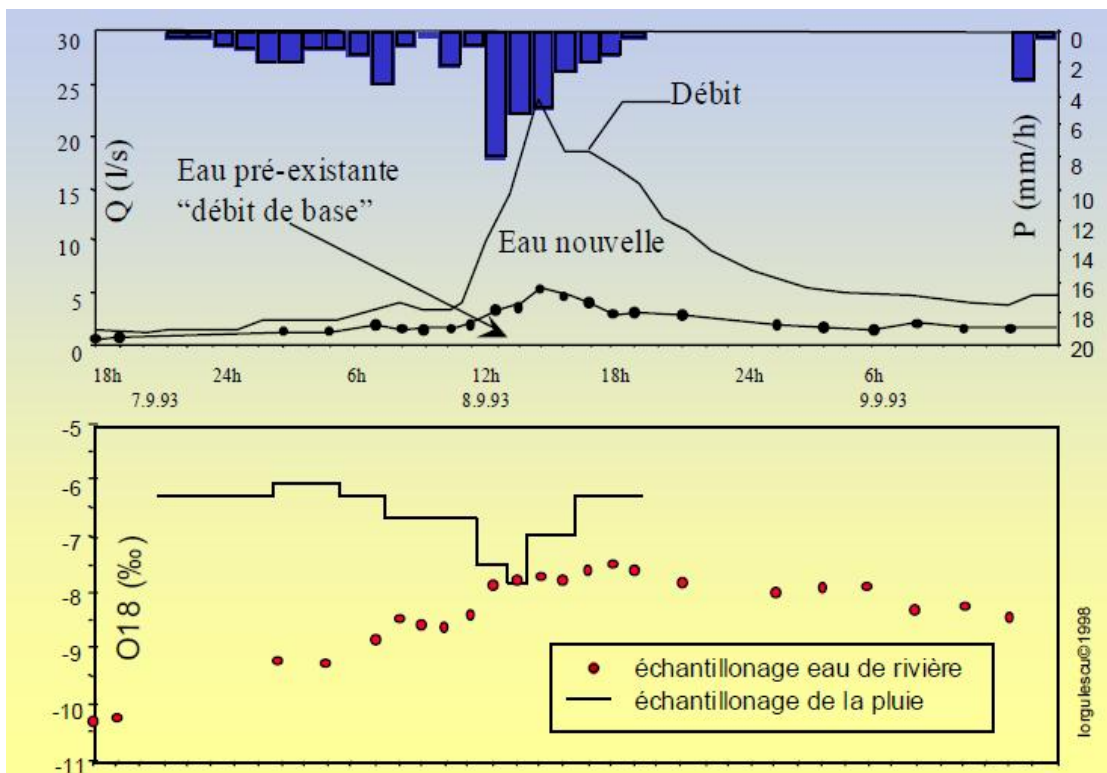
$Q_n$  : Débit d'eau nouvelle,

$\delta$  : Concentration «Teneur isotopique» du cours d'eau,

$\delta_a$  : Concentration «Teneur isotopique» ancienne,

$\delta_n$  : Concentration «Teneur isotopique» d'eau nouvelle.

Cette méthode « traçage environnemental (Oxygène 18) » permet de décomposer l'hydrogramme de crue comme le montre l'exemple de la **figure 9** suivante :



**Figure 9:** Exemple de décomposition d'un hydrogramme de crue par des méthodes de traçage environnemental (Oxygène 18). (Joerin, 2005)

### I.2.2.3 Discrétisation des crues par l'analyse des événements pluies-débit

L'analyse des événements pluies-débits requiert la connaissance d'un certain nombre d'éléments caractéristiques de la crue (forme et durées caractéristiques), (**figure 10**).

La forme de l'hydrogramme de crue se caractérise par :

- Temps de réponse du bassin : Intervalle de temps qui sépare le centre de gravité, de la pluie nette et de la pointe de crue ou parfois du centre de gravité de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.
- Temps de montée : Temps qui s'écoule entre l'arrivée à l'exutoire de l'écoulement rapide et le maximum de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.
- Temps de concentration : Temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée « hydrologiquement » de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. On peut estimer  $T_c$  en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct.
- Temps de base : Durée du ruissellement direct, c'est-à-dire la longueur sur l'abscisse des temps de la base de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.
- Ruissellement : la fraction de la pluie nette qui s'écoule en surface. C'est la surface comprise entre la courbe de l'écoulement retardé (courbe hypodermique) et l'hydrogramme de crue/décru.
- Ecoulement hypodermique ou retardé : La portion des précipitations infiltrées dans le sol se rendant au cours d'eau, mais n'atteignant pas la nappe. C'est la surface entre la courbe de l'écoulement retardé de sub-surface et celle de l'écoulement souterrain.
- Ecoulement souterrain ou débit de base : Partie de l'écoulement provenant des aquifères.
- Débit max : Le pic de crue correspond au débit maximum.

D'après Lagacé, (2012 b), cette séparation de l'hydrogramme de crue se fait par le logiciel VisuHydro selon une méthode linéaire.

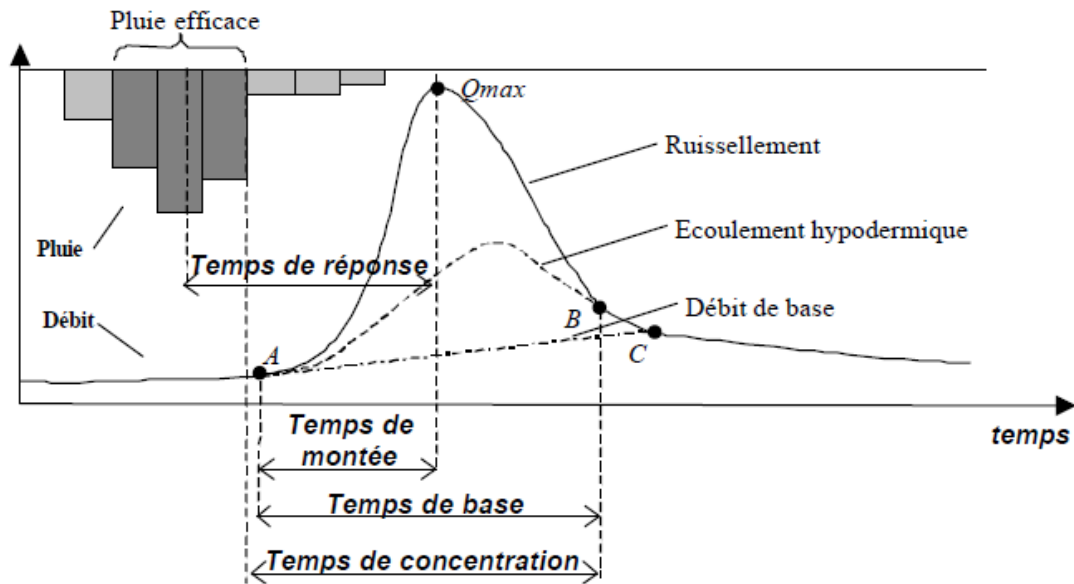


Figure 10: Analyse des événements pluies-débits. (Roche, 1963).

Les méthodes exposées ne sont pas uniques, mais elles constituent une approche opérationnelle capable de mettre en évidence les processus dominants de la génération de l'écoulement sur un bassin versant.

La figure 11 permet de replacer les différents types d'écoulement dans leur contexte géomorphologique en faisant intervenir les facteurs sols, climat et topographiques.

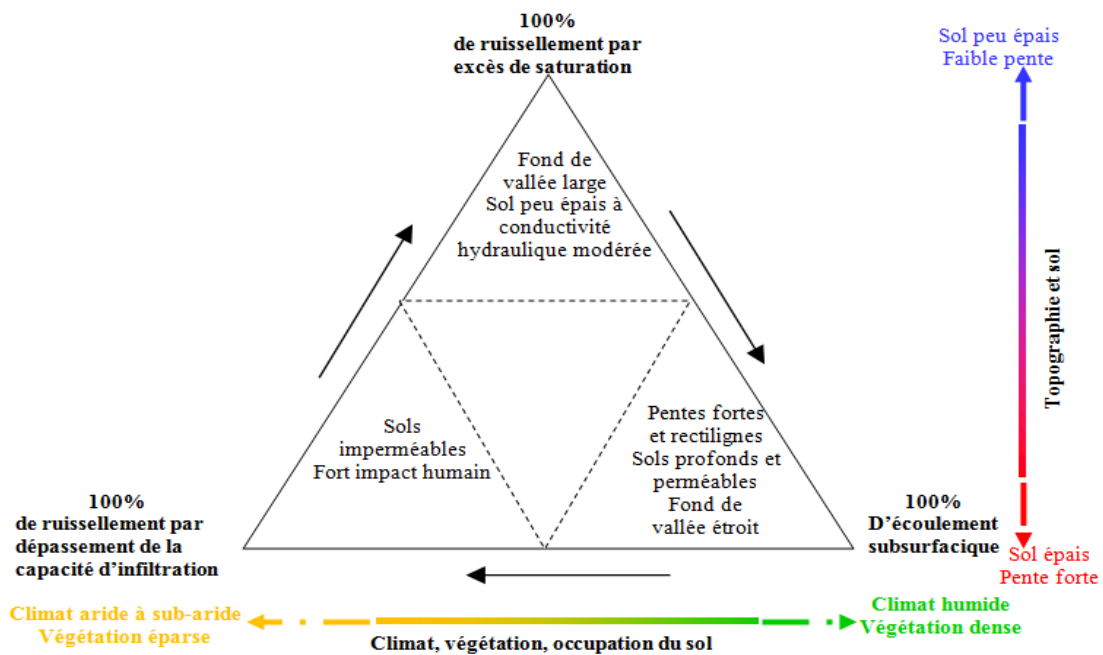


Figure 11: Représentation des différents processus de génération de l'écoulement en fonction du milieu naturel. (Dunne, 1983).

### **I.3 Prédétermination des débits des crues**

En dehors de l'utilisation directe d'hydrogrammes de crues observés, divers outils existent pour la prédétermination des crues et le calcul des débits maxima, soit que l'on ne dispose pas de données hydrométriques à l'endroit où l'on réalise l'étude, soit que l'on souhaite obtenir des données fréquentielles ou synthétiques.

Plusieurs méthodes ont été conçues pour la prédétermination des débits des crues, et de nombreuses techniques et procédures ont été proposées et utilisées dans diverses régions du monde. En fonction de la disponibilité des données il se présente trois cas :

#### **I.3.1 Méthodes approximatives**

Les méthodes déterministes s'appliquent dans le cas d'absence ou insuffisance de données. Dans certains cas, une estimation grossière des débits des crues est effectuée, sans faire appel à des méthodes complexes. Les méthodes approximatives sont classées à quatre modèles qui s'appliquent aux situations évoquées.

##### **I.3.1.1 Méthodes analogiques**

L'indisponibilité des données hydrométriques au niveau du bassin d'étude, impose l'étude hydrologique sur un ou plusieurs autres bassins analogues, pour lesquels les mesures sont disponibles. Les résultats issus de telles études peuvent être transposés sur le bassin d'étude, en utilisant un coefficient de transfert lié au rapport des surfaces contributives de chaque bassin considéré.

##### **I.3.1.2 Méthodes régionales**

Les méthodes régionales s'appliquent en comparant le bassin d'étude avec les bassins versants voisins jaugés.

##### **I.3.1.3 Méthodes empiriques**

Parmi les méthodes empiriques sont celles de type Meyer, abaque de Sogréah, la méthode de Crupedix, Turraza, Possenti, Coutagne, Fuller, Muller, Iskowski.

##### **I.3.1.4 Méthodes pseudo-empiriques**

Parmi les méthodes pseudo-empiriques **citons** la méthode rationnelle, Socose, SCS, méthode des isochrones.

### **I.3.2 Méthodes déterministes**

Les méthodes déterministes s'appliquent dans le cas de disponibilité de données concomitantes des pluies et de débits (au même pas de temps).

Ces méthodes font appel aux notions de fonction de production et de transfert permettant l'évaluation d'un hydrogramme de crue et d'extraire des caractéristiques pour dimensionner les ouvrages. Selon (Musy , 1998), les méthodes déterministes peuvent être classées en quatre approches.

#### **I.3.2.1 Approche événementielle simple**

Cette approche consiste à définir une pluie de projet locale, puis choisir des conditions antécédentes d'humidité représentative afin d'obtenir un hydrogramme de crue à partir d'une fonction de transfert. Cette fonction est calée sur la base de séries courtes de précipitations et de débits mesurés au même pas de temps. Le temps de retour est attribué au volume de la pluie en fonction de la durée choisie. Ce temps de retour est attribué à toutes les caractéristiques de l'hydrogramme (Débit de pointe et volume).

#### **I.3.2.2 Approches multi-évènementielles**

Ces approches sont analogues aux approches événementielles simples avec des événements répétés. A l'aide d'un traitement statistique adéquat, une extraction des caractéristiques est possible pour quantifier les événements étudiés. Pour envisager ce type d'analyse, il faut recourir aux simulations.

#### **I.3.2.3 Simulation continue**

La simulation continue permet la reconstitution des catalogues de crues à partir soit de longues chroniques continues de précipitations, soit de séries courtes, continues et concomitantes de précipitations et de débits.

#### **I.3.2.4 Modèles synthétiques**

Ces modèles représentent de manière synthétique le comportement homogène d'un bassin ou d'une zone soumise à divers sollicitations, à travers certains paramètres ou fonctions.

Divers modèles synthétiques peuvent être utilisés pour identifier des fonctions de transfert, en l'absence de données sur le site d'étude.

En matière de crues, une méthode particulière peut être appliquée dans certains cas, celle du QdF en l'occurrence, cette méthode repose sur une typologie des régimes de crue en trois

familles de bassins versants, une normalisation des faisceaux de courbes QdF et un critère de choix parmi les trois modèles de référence basé sur le régime des pluies. Elle permet de valoriser au maximum l'information disponible, bien au-delà de la simple fourniture d'un débit de pointe, mais demande d'importants moyens de mise en œuvre. (Brouquisse et al; 2004).

### **I.3.3 Méthodes statistiques**

Les méthodes statistiques s'appliquent dans le cas de disponibilité de données des pluies et des débits en suffisance. Ces méthodes **qui** peuvent être couplées aux méthodes déterministes. Les méthodes statistiques correspondent au traitement statistique des séries d'observation de débits maxima annuels, ce qui implique que l'étude de la genèse des crues soit plus complète, (Acquet et Jacquet, 1964).

#### **I.3.3.1 Analyse fréquentielle**

La méthode d'analyse fréquentielle se base sur le principe de l'ajustement d'une série d'observation à une loi de distribution statistique connue, il convient de vérifier son adéquation. Il est alors possibles d'en extraire des résultats relatifs à des phénomènes rares.

#### **I.3.3.2 Méthode de Gradex**

La méthode de Gradex est conçue, mise au point, testée et validée par (Guillot et Duband , 1967). Elle a pour but de rechercher les débits maximum des crues pour des fréquences d'apparition très rares (temps de retour plus de 100 ans). Elle permet l'estimation de débits de très faible fréquence crue millénaire et même décennaire, (Brigode et al; 2015) et non seulement du débit centennal. La méthode de Gradex est basée sur l'hypothèse qu'à partir d'une certaine période de retour la pente de la distribution des débits est supposée égale à la pente de la distribution des pluies. En d'autres termes au-delà d'un certain seuil la rétention demeure constante et tout surplus précipité ruisselle. Il y a toutefois trois points délicats dans la méthode : le choix de la valeur pivot ("seuil de ruissellement"), la durée de l'événement caractéristique et le coefficient de forme.

La méthode Agrégée ou Gradex progressif arrondit le raccordement entre les deux ajustements et tempère la surestimation des débits rares parfois reprochée au Gradex.

### **Conclusion**

Ce chapitre a permis de connaître des aspects descriptifs de l'hydrologie par le biais de la compréhension des processus sous-jacents à la notion de réponse hydrologique. Arrivant au terme de ce chapitre, une conclusion est faite sur :

Les processus hydrologiques régissant les mécanismes des écoulements est un domaine complexe car On doit répondre aux questions :

- La provenance de l'eau des cours d'eau et le devenir des eaux de pluies
- La détermination les principaux facteurs qui conditionnent le comportement hydrologique d'un bassin versant (topographie, occupation du sol, conditions initiales d'humidité du sol , météorologie).

## II. Le risque hydrologique

### Introduction

Le risque hydrologique est le déclenchement d'un phénomène naturel destructeur, susceptible d'atteindre des biens, des personnes et des activités.

Le risque est traduit sous la forme d'une modélisation, il est représenté schématiquement en exposant les relations entre les composantes du phénomène modélisé.

### II.1 Typologie du phénomène des crues

- **Crue de type cévenol ou torrentielle :**

Elles se caractérisent par des cours d'eau ayant une pente plus forte, en zone montagneuse, ou à l'aval immédiat des reliefs marqués, l'écoulement des rivières en crue est beaucoup plus rapide et peut charrier des volumes importants de matériaux. Ces crues sont particulièrement dangereuses et les délais de prévision, souvent trop courts, laissent très peu de temps pour réagir.

- **Crue de plaine ou fluviale :**

Elles se caractérisent par des montées relativement lentes des eaux et peuvent être prévues plusieurs heures, voire plusieurs jours à l'avance. En dépit de leur évolution lente, les crues de plaine peuvent être accompagnées localement de phénomènes très dangereux, notamment lors d'une débâcle, c'est à dire lors de la rupture d'un obstacle d'un cours d'eau, après que l'écoulement des flots ait été bloqué par des embâcles (amoncellement de débris) sous les ponts, ou lors de la rupture ou la submersion de digues ou de levées de protection.

### II.2 Evaluation du risque hydrologique

L'évaluation des risques hydrologiques à petite échelle passe par des méthodes qualitatives, permettant de prioriser les zones à risques. Ensuite, il est nécessaire de choisir des méthodes plus quantitatives permettant une application à plus grande échelle. Elles permettent de préciser les impacts humains, matériels et financiers, et d'évaluer la nécessité des mesures de protection. Les analyses de risque n'abordant cette problématique que par la notion de dommages et donc de quantification monétaire ne peuvent intégrer tous les critères du concept (en particulier humain et environnemental). Néanmoins, ces méthodes réductrices



restent quelquefois les plus parlantes pour les acteurs locaux. Il faut donc les utiliser à grande échelle, ponctuellement, pour préciser des études plus globales et qualitatives.

Donc les méthodes d'évaluer les risques hydrologiques restent divergentes et selon les usages auxquels est destinée la cartographie des zones inondables, selon les services qui ont la charge d'établir cette cartographie, et selon les bureaux d'études qui la réalisent.

Pour une meilleure adaptabilité des méthodes, il serait souhaitable de discuter la typologie des objets à protéger avec les acteurs locaux (communes en particulier) et les différents services concernés afin de prendre en compte les spécificités régionales et locales du terrain étudié.

D'après (O.Gilard, 1998) la méthode « Inondabilité » est un exemple méthodologique disponible pour réaliser un diagnostic sur les zones à risque hydrologique. C'est une méthode d'aménagement intégré du territoire à l'échelle du bassin versant.

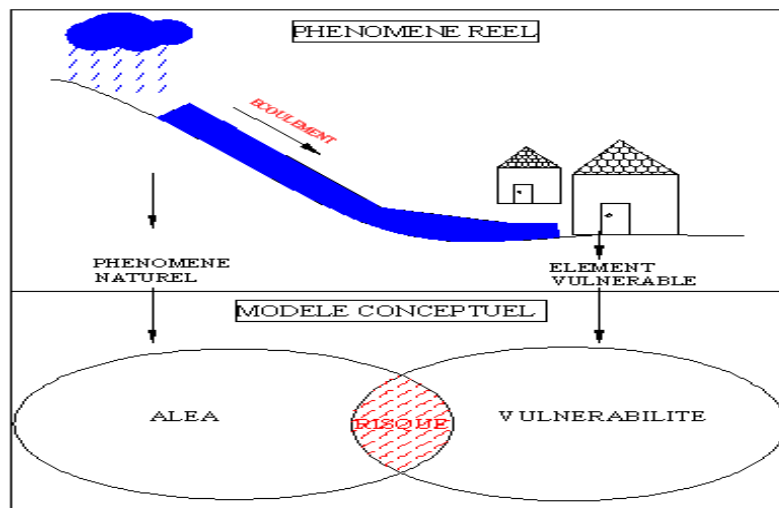
La méthode inondabilité définit le concept du risque d'inondation par le croisement de deux composantes, (figure 12) :

- Le phénomène aléatoire d'origine hydrométéorologique dénommé l'aléa, qui représente la dynamique spatio-temporelle des pluies de forte intensité mérite d'être étudiée pour mieux caractériser le forçage climatique et sa variabilité spatiale.
- La structure sur laquelle s'écoule la crue composée de biens de toute nature (occupation du sol) dénommée la vulnérabilité, Elle a un rôle fondamental sur la dynamique du ruissellement. Son influence a souvent été mise en avant mais, de manière surprenante, plusieurs crues sont apparues sur des bassins où la part des cultures est faible à l'échelle globale.



**Figure 12:** Vision spatiale de l'aléa et la vulnérabilité. (Bernardara, 2005)

- L'intersection de deux entités aléa et vulnérabilité est appelée : Risque, (**figure 13**).



**Figure 13:** Modèle Conceptuel du Risque hydrologique. (Abdeddaim, 2008).

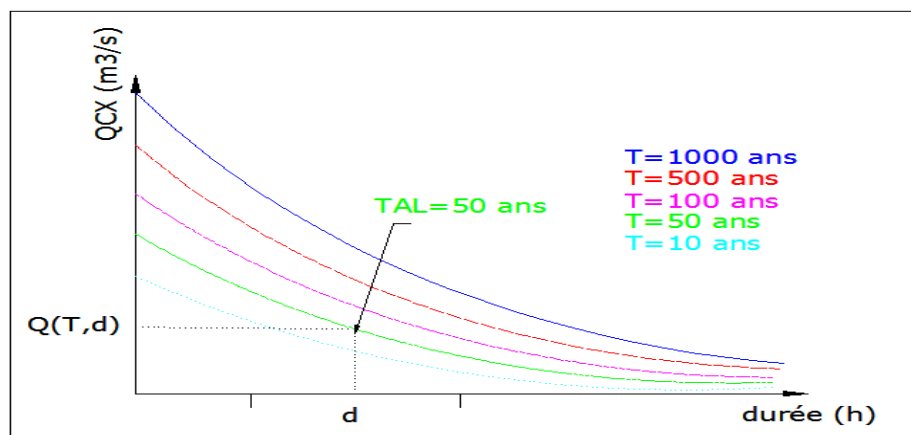
L'objectif de cette méthode est d'analyser chaque composante du risque hydrologique afin de détecter des seuils de déclenchement et de mettre à jour des critères de sensibilité.

L'identification du rôle joué par chacune des deux variables (aléa et vulnérabilité) est une première étape vers une meilleure compréhension de la complexité des processus étudiés.

Une quantification de l'aléa et de la vulnérabilité suivant une même unité de mesure est nécessaire pour comparer ces deux paramètres et obtenir le résultat du risque. Cette unité de mesure est l'année. Elle représente la période de retour de chaque paramètre.

### II.2.1 Période de retour de l'aléa : TAL (Ans)

La période de retour de l'aléa est déterminée graphiquement à partir d'un modèle QdF comme le montre la **figure 14**



**Figure 14:** Détermination de TAL à partir d'un modèle QdF. (Gilard, 1998).

**Si**  $0,5 < T_1 < 20$  ans :

$$Q(T, d) = \left[ \left( \frac{1}{X_1 \frac{d}{D} + X_2} + X_3 \right) \cdot \ln(T) + \left( \frac{1}{X_4 \frac{d}{D} + X_5} + X_6 \right) \right] QIXA10 \dots\dots\dots(4)$$

**Si**  $20 < T_1 < 1000$  ans :

$$Q(T, d) = Q(10, d) + \left[ \left( \frac{1}{X_7 \frac{d}{D} + X_8} + X_9 \right) \cdot \ln \left( 1 + \frac{\frac{1}{X_1 \frac{d}{D} + X_2} + X_3}{\frac{1}{X_7 \frac{d}{D} + X_8} + X_9} \cdot \frac{T - 10}{10} \right) \right] QIXA10 \dots\dots\dots(5)$$

$Q(T, d)$  : Quantile de crue relatif au débit moyen ou au débit seuil de période de retour  $T$  et de durée  $d$  ;

$Q(10, d)$  : Quantile de crue décennal ;

$d$  : Durée pendant laquelle le débit dépasse la moitié du débit de pointe  $QIX$  ;

$T$  : Période de retour ;

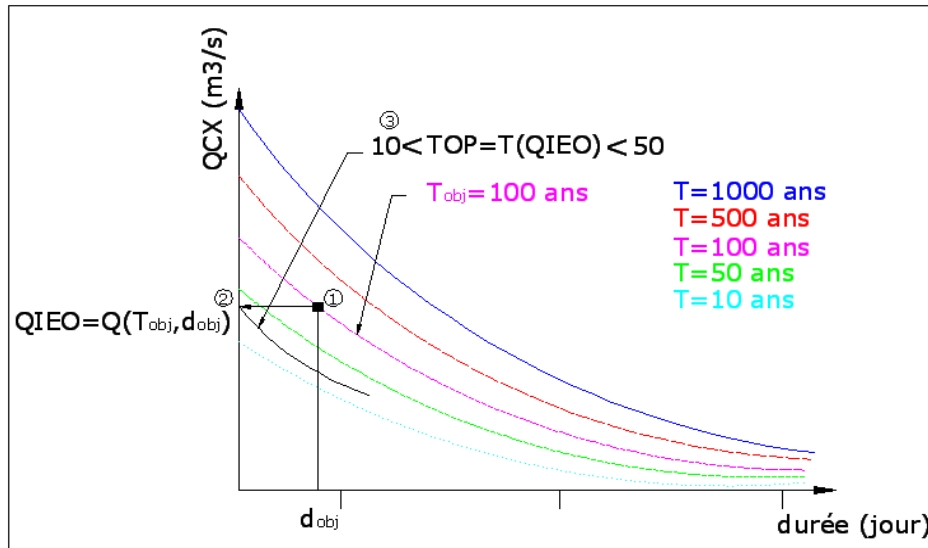
$D$  : Valeurs médiane de la durée ( $d$ ) pour une classe de  $QIX$  : Durée caractéristique d'un bassin versant ;

$X_i$  : Paramètres fixés une fois le modèle hydrologique choisi ;

$QIXA10$  : Débit instantané maximum annuel décennal.

## II.2.2 Période de retour de la vulnérabilité : TOP (Ans).

La période de retour de la vulnérabilité « Objectif de Protection » est déterminée graphiquement à partir d'un modèle QdF comme le montre la **figure 15**



**Figure 15:** Détermination de TOP pour un objectif de protection défini par  $(T_{obj}, d_{obj})$ . (Gilard, 1998)

Si  $0,5 < T_{obj} < 20$  ans :

$$Q(T_{obj}, d_{obj}) = \left[ \left( \frac{1}{X_1 \frac{d_{obj}}{D} + X_2} + X_3 \right) \cdot \ln(T_{obj}) + \left( \frac{1}{X_4 \frac{d_{obj}}{D} + X_5} + X_6 \right) \right] \cdot Q_{IXA10} \dots\dots\dots(6)$$

Si  $20 < T_{obj} < 1000$  ans :

$$Q(T_{obj}, d_{obj}) = Q(10, d_{obj}) + \left( \frac{1}{X_7 \frac{d_{obj}}{D} + X_8} + X_9 \right) \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\left( \frac{1}{X_1 \frac{d_{obj}}{D} + X_2} + X_3 \right)}{\left( \frac{1}{X_7 \frac{d_{obj}}{D} + X_8} + X_9 \right)} \cdot \left( \frac{T_{obj} - 10}{10} \right) \right] \cdot Q_{IXA10} \dots\dots\dots(7)$$

QIEO : Débit instantané équivalent à l'objectif de protection,  $QIEO = Q(T_{obj}, d_{obj}) = TOP$

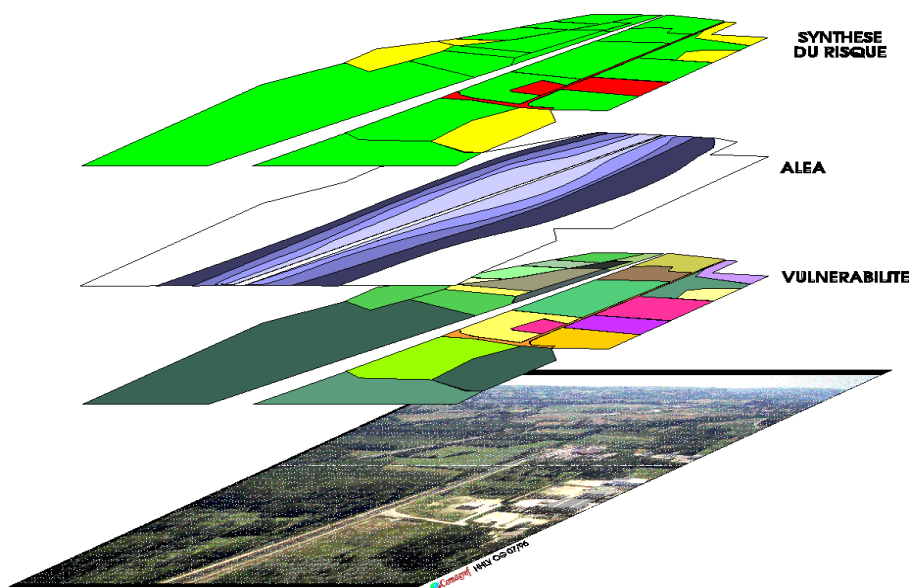
Xi : Paramètres pour les modèles en débits seuil (QCX) utilisés dans le cadre d'inondabilité.

### II.3 Analyse du risque.

L'intérêt de déterminer la période de retour de l'aléa et celle de la vulnérabilité est de décrire la situation du risque. Analyser le risque est le résultat de la méthode Inondabilité, qui se présente sous forme de cartes de synthèse regroupant les informations relatives à l'aléa et à la vulnérabilité. L'analyse du phénomène naturel repose sur une connaissance du fonctionnement hydrologique du bassin versant et hydraulique des cours d'eau. Il est ainsi possible de déterminer les zones très souvent inondées, souvent inondées ou jamais inondées. Une première carte de l'aléa peut être établie : elle présente toutes les zones susceptibles d'être touchées par des inondations. La carte de vulnérabilité représente l'occupation des sols : zones de friche, de culture, urbaines, industrielles. La vulnérabilité dépend de l'usage que l'on fait du sol et des enjeux socio-économiques qui y sont liés. En superposant ces deux cartes, on obtient une carte de synthèse qui fait apparaître les zones en situation à risques.

La comparaison entre la période moyenne de retour de l'aléa (TAL) et celle de la vulnérabilité (TOP) est donc possible car ils sont exprimés avec la même unité. Il est alors concevable de décider objectivement quelles sont les zones en sécurité et celles qui sont à risque d'inondation, (**figure 16**) :

- Pour une zone à risque élevé (aléa fort) :  $TAL \leq TOP$  (couleur rouge) ;
- Pour une zone en sécurité (aléa faible) :  $TAL > TOP$  (couleur verte) ;
- Pour une zone non inondable (aléa très faible) :  $TAL > 1000$  ans (couleur jaune).



**Figure 16:** Cartographie du risque. (Cemagref, 2005).

**Conclusion**

La méthode d'évaluation du risque hydrologique et les cartes qui en résultent, mettent en évidence des zones sous-protégées et des zones surprotégées. Les cartes de synthèse constituent des outils facilement lisibles et directement utilisables, dans le but de prévoir des aménagements adéquats pour participer à la réduction des conséquences des écoulements provoquant les inondations, et atténuer le risque soit en matière d'aléa soit en vulnérabilité. Ces aménagements peuvent être prévus au niveau du bassin versant, dans les réseaux primaires et dans les lits des cours d'eau. Puisque l'aléa est une contrainte naturelle que l'on ne peut empêcher, il est possible d'agir au niveau de l'occupation des sols.

### III. Typologie des réseaux hydrographiques

#### Introduction

L'organisation des réseaux hydrographiques est un facteur fondamental dans le fonctionnement des systèmes des écoulements. Il représente la signature d'un certain nombre de processus de transfert d'eau.

#### III.1 Genèse des réseaux hydrographiques

Pour expliquer la genèse du réseau hydrographique, trois théories ont été proposées par de nombreux géomorphologues.

La première théorie est celle de (Glock, 1931) in (Cudennec, 2000). Elle propose quatre étapes :

- Initiation par creusement rapide d'un squelette général.
- Elongation vers l'amont jusqu'à l'extension maximale.
- Développement des affluents par bifurcation.
- Simplification de l'ensemble par disparition de certains affluents, en raison de l'atténuation du relief.

La deuxième théorie est celle de (Horton, 1945), décrite en deux étapes :

- Ecoulement diffus sur le versant jusqu'à un seuil d'arrachement de matière permettant la création de rigoles parallèles dans le sens de la pente, et à l'origine d'une non-linéarité.
- Migration des confluences de l'aval vers l'amont en raison de l'évolution des gradients transversaux.

La troisième théorie est celle de (Schumm, 1956), qui propose une seule explication globale :

- Une onde de dissection progresse de l'exutoire vers l'amont, se traduisant par la croissance et la bifurcation des têtes des talwegs.

Les réseaux hydrographiques ont montré leur impact sur le transport des débits liquides et solides, importants eu égard à la conception et la construction des ouvrages hydrauliques, comme solutions adéquates aux problèmes posés. Les hydrologues vont parallèlement tirer profit de la morphométrie, pour comprendre la dynamique des processus hydrologiques, notamment par le biais du système d'indexation des réseaux hydrographiques, et des lois de développement des cours d'eau, établis par (Horton, 1945), En 1957 Strahler et Arthur,

confirment que les indices morphométriques sont un important sujet d'investigation dans la compréhension du dynamisme d'une rivière, tout comme l'hydrologie l'est pour l'analyse d'un bassin versant.

Les indices morphométriques ont constitué les premières formes de réflexion menées sur le transfert d'échelle en géomorphologie (Hauchard et al., 2013). Ils deviennent de plus en plus utilisés pour confirmer les hypothèses de l'évolution des réseaux hydrographiques. Plusieurs travaux tentent de connaître les lois d'organisation qui régissent un bassin versant comme l'encaissement ou la distribution des réseaux (Douvinet et al., 2007)).

En raison des différentes propriétés des réseaux et leur impact sur le régime hydrologique, des études ont été menées pour développer des méthodologies quantitatives pour la reconnaissance et la caractérisation des réseaux de drainage. (Zhang et Gilbert, 2012) ont présenté une méthode basée sur des indicateurs géométriques quantitatifs pour reconnaître automatiquement les schémas de drainage dans un réseau fluvial. (Ichoku et Chorowicz, 1992), ont utilisé les modèles numériques de terrain (MNT) pour proposer un système de classification basé sur seize caractéristiques des réseaux. (Mejía et Niemann, 2008) ont proposé une classification dérivée d'invariance d'échelle en enquêtant sur cinquante réseaux de canaux pour caractériser cinq types de réseaux, y compris dendritique, parallèle, et rectangulaires. Plus récemment (Kichul et al; 2015) ont analysé les caractéristiques géométriques des structures de drainage sur la base de la dimension fractale des réseaux fluviaux. Ils ont étudié la région montagneuse Nord Est des Emirats Arabes Unis et le Nord d'Oman où treize oueds ont été classés comme des réseaux rectangulaires et deux oueds présentent des réseaux parallèles.

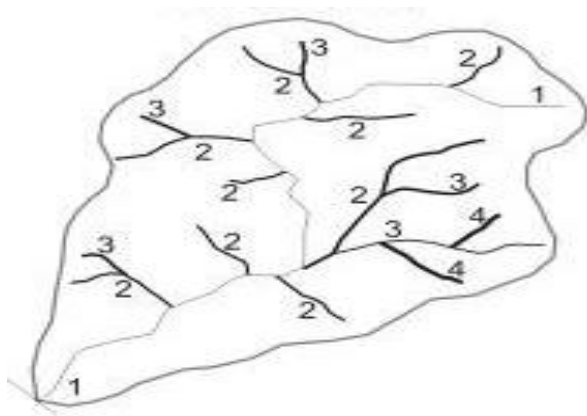
### **III.2 Méthodes de classification des réseaux hydrographiques**

L'analyse et la classification des réseaux de drainage ont été établies pour traduire la position d'un bief dans un réseau hydrographique. Plusieurs auteurs ont proposé des méthodes d'indexation. (Campbell, 1896) ; (Zernits, 1932) puis (Deffontaines, 1990) ont été probablement les précurseurs dans ce domaine. Ils ont regroupé sous forme de catalogues certains types de réseaux hydrographiques et leurs dérivés. (Parvis, 1950) a développé et complété cette classification tout en présentant de nombreux exemples. (Strandberg, 1967) s'est inspiré, et a été repris récemment par (Scanvic, 1983) ; (Miller, 1961) ; (Morisawa, 1963) ; (Fairbridge, 1968) et (Gregory et Walling, 1974) ont proposé aussi des classifications descriptives. (Prud'homme, 1972), (Chorley et al ; 1984), et (Baker, 1986) ont donné, un

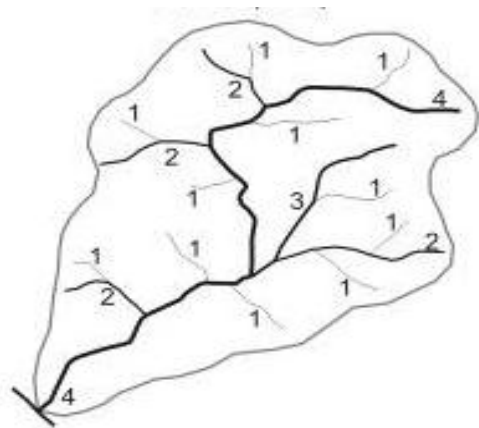


tableau assez complet récapitulant tous les types de réseaux hydrographiques étudiés (réseaux géométriques, arborescents et divers) à partir de l'analyse de photographies aériennes. (Gagnon, 1974) insista sur les drainages climatiques et anthropiques. (Argialas et al., 1988) ont proposé une reconnaissance et une hiérarchisation automatique de certains réseaux de drainage. (Howard, 1997) a continué cet effort de description, et mise en évidence d'anomalies. Récemment, (Weishar, 2005) a proposé une indexation inversée des biefs (de l'exutoire vers la ligne de partage des eaux du bassin).

Les principales méthodes de classification des réseaux hydrographiques sont présentées dans les **figures 17 ; 18 ; 19**



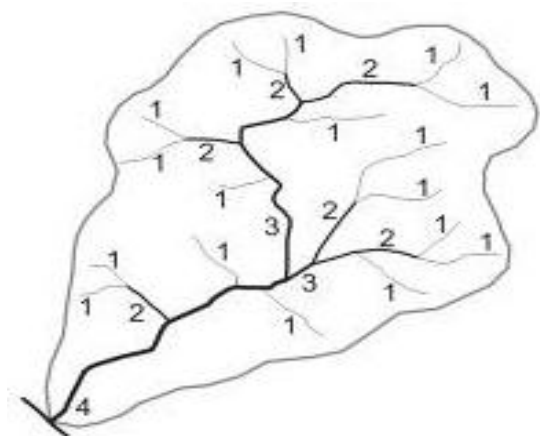
(Gravellius, 1914)



(Horton, 1945)

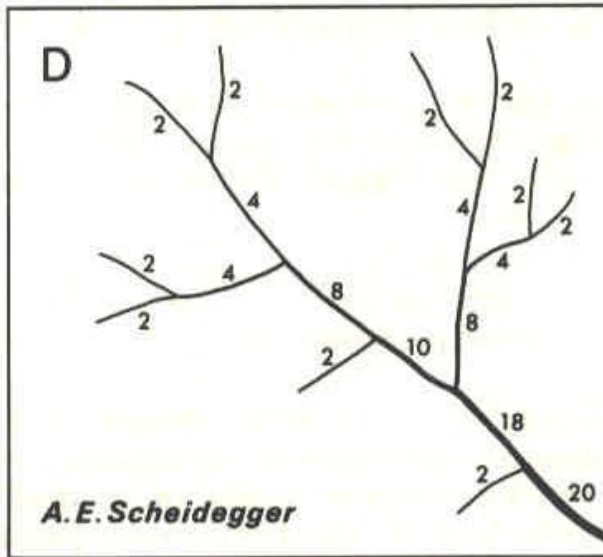


(Schumm, 1956)

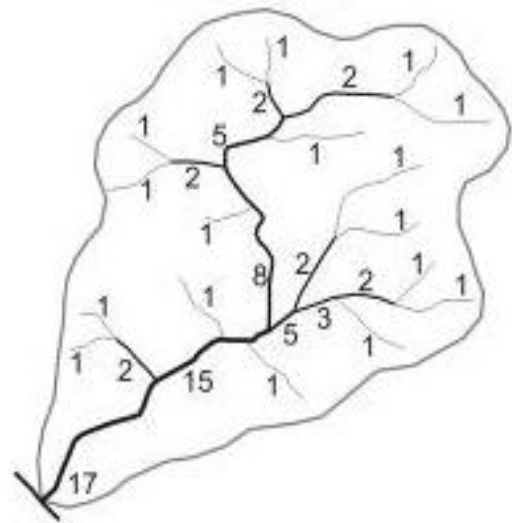


(Strahler, 1957)

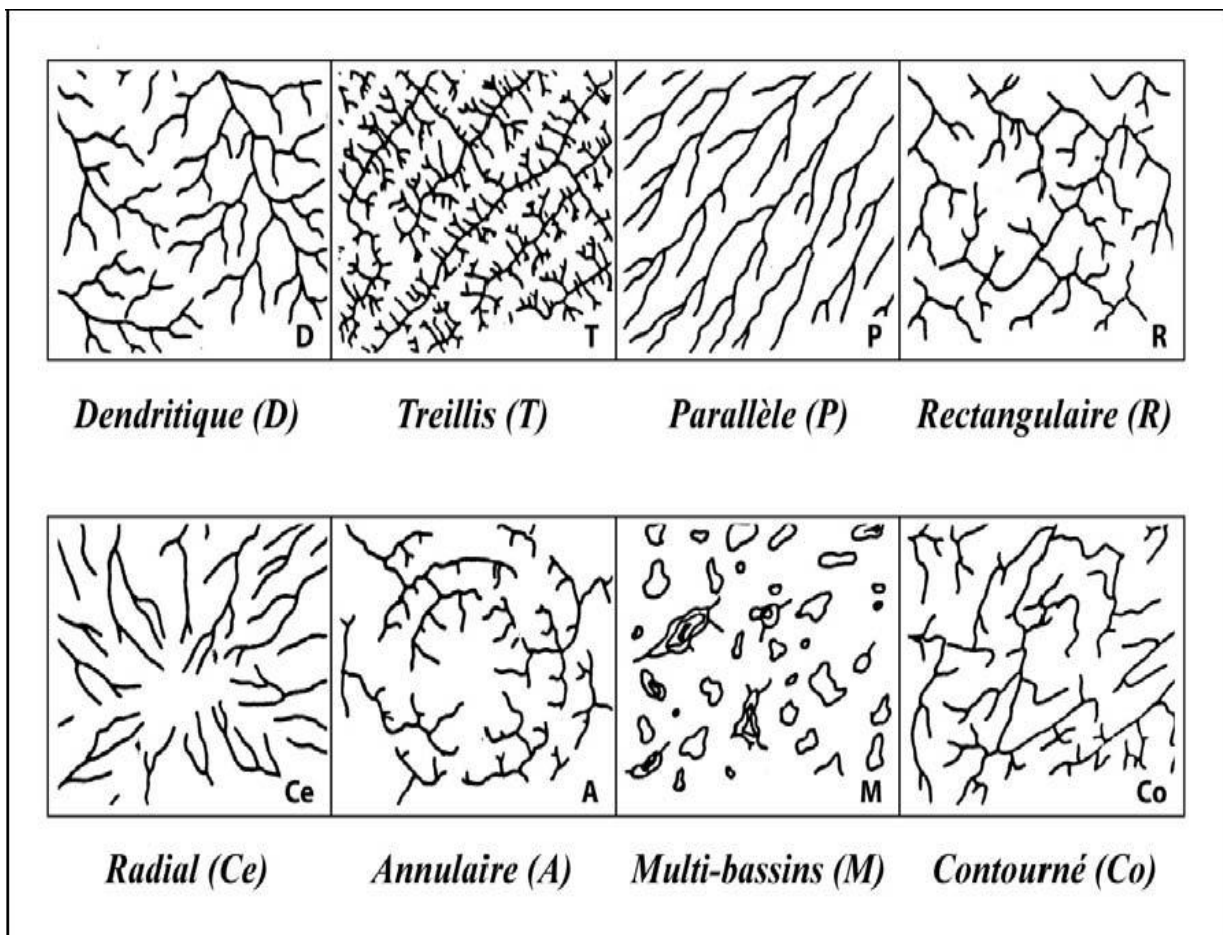
**Figure 17:** Classification des réseaux hydrographiques selon Gravellius, Horton, Schumm et Strahler



(Scheidegger, 1965)

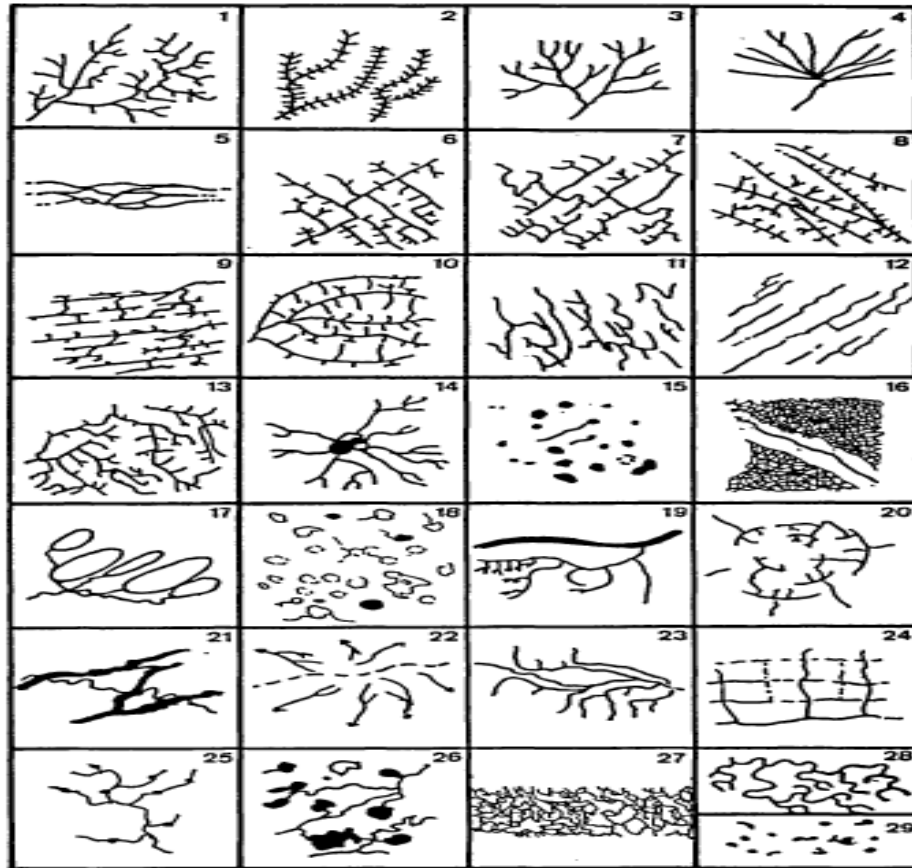


(Shreve, 1966)



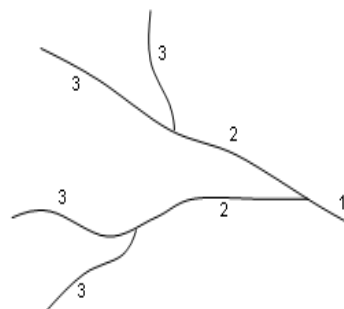
Deffontaine, 1990 d'après (Howard, 1967)

Figure 18: Classification des réseaux hydrographiques selon Scheidegger, Shreve, et Howard



- |                  |                 |                    |                      |
|------------------|-----------------|--------------------|----------------------|
| 1. Subdendritic  | 2. Pinnate      | 3. Dichotomic      | 4. Distributary      |
| 5. Anastomosé    | 6. SubTrellis   | 7. Directionnal T. | 8. Fault Trellis (T) |
| 9. Joint Trellis | 10. Recurved T. | 11. Subparallel    | 12. Colinear         |
| 13. Angulate     | 14. Centripetal | 15. Karstic        | 16. Thermokarstic    |
| 17. Elongate bay | 18. Glacial     | 19. Irregular      | 20. Composed         |
| 21. Palimpsest   | 22. Palimpsest  | 23. Yazoo          | 24. Anthropogenic    |
| 25. Deranged     | 26. Complex     | 27. Reticulate     | 28. Enteromorphous   |
| 29. Amorphous    |                 |                    |                      |

(Howard, 1967) ; (Cazabat, 1969) ; (Gagnon, 1974).



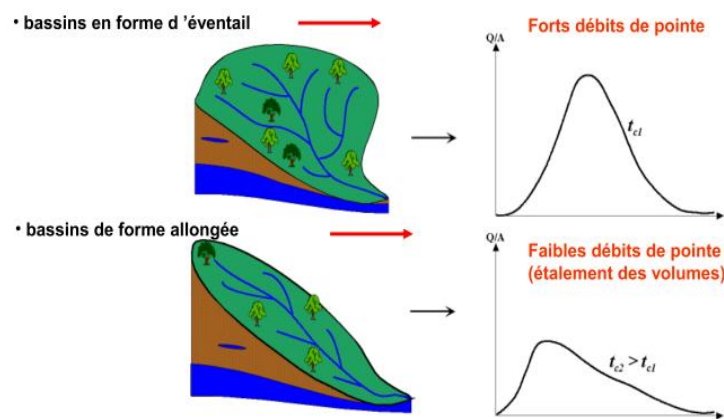
(Weishar, 2005)

Figure 19: Classification des réseaux hydrographiques selon Howard, Cazabat, Gagnon et Weishar.

### III.3 Influence des caractéristiques morphométriques sur le comportement hydrologique des bassins versants

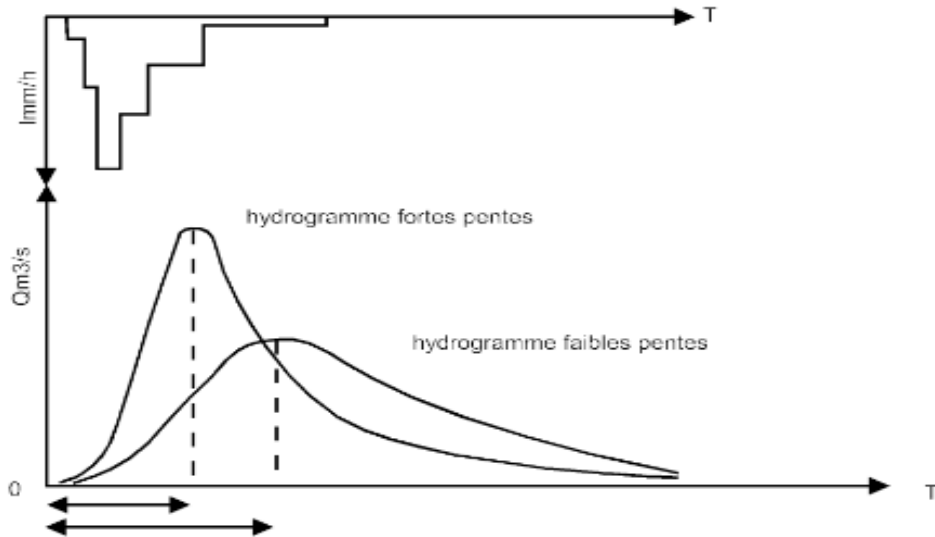
Le comportement hydrologique des bassins versants face à une sollicitation dépend de plusieurs caractéristiques morphométriques :

- Forme du bassin versant : Elle est exprimée par l'indice de compacité de Gravellius, ce dernier est fonction de la surface du bassin et son périmètre. La forme du bassin influe sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin. Pour une même superficie et pour une même averse l'hydrogramme est différent. Cette influence est liée au temps de concentration, (**figure 20**).



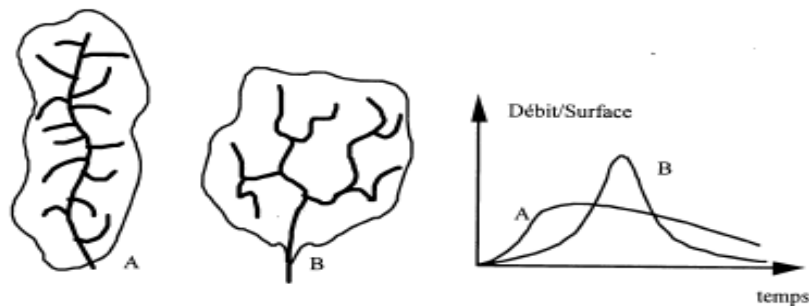
**Figure 20:** Influence de la forme du bassin versant sur l'hydrogramme de crue (Musy et al; 2005)

- Pente du bassin versant : Elle est définie par l'indice de pente global et de roche, qui sont fonction des altitudes, des surfaces (courbe hypsométrique) et des rectangles équivalents (Dubreuil, 1966). Elle contrôle le chemin des eaux infiltrées qui alimentent les aquifères, et détermine la direction de l'écoulement des eaux souterraines, (**figure 21**).



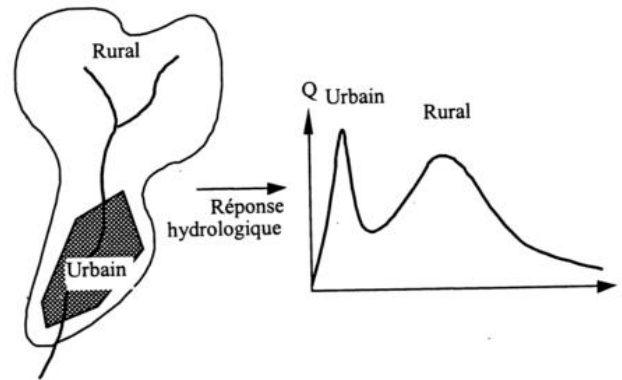
**Figure 21:** Influence de la pente sur la forme de l'hydrogramme (Musy et al., 2005).

- Réseau hydrographique et ses indices (longueur du talweg principal, rapport de confluence dit aussi coefficient des bifurcations, rapport des longueurs et la densité de drainage). Le principe de la description est de définir les types des chemins des écoulements, (figure 22). Cette description topologique repose sur une schématisation du réseau hydrographique selon la classification de Horton-Strahler.



**Figure 22 :** Influence du coefficient des bifurcations sur l'hydrogramme de crue (Musy, 1998) et (Strahler, 1964)

- Géologie du bassin versant, la nature du substratum influence sur la forme du réseau hydrographique par sa sensibilité à l'érosion. L'importance et la direction des écoulements dépend de la structure du substratum (forme, les failles, les plissements, forcent le courant à changer de direction).
- Occupation du sol, soit le bassin rural, urbain ou mixte, (figure 23). Cette caractéristique des bassins est importante lors de l'identification des paramètres de la fonction de transfert.



**Figure 23:** Influence de l'occupation du sol sur la réponse hydrologique du bassin (Musy, 1998).

D'autres facteurs d'ordre anthropique caractérisés par des aménagements, sont considérés comme des effets positifs ou négatifs sur les tracés des réseaux hydrographiques et sur les écoulements.

D'après ce descriptif des influences des caractéristiques morphométriques, l'incidence de ces paramètres a été confirmée dans tous les exemples des études d'inondations qui mettent en évidence l'importance du système des pentes au sein des bassins, la nature du sol et de l'organisation spatiale des réseaux de talwegs (Delahaye, 2003) et (Hauchard et al., 2001).

Les apports de la morphométrie sont considérables, car ils ont constitué des formes de réflexion sur le transfert d'échelle en géomorphologie, et la typologie des réseaux de drainage en intégrant les angles de jonction des cours d'eau (Paget, 2008). Ils ont également posé les bases théoriques en hydrologie, avec notamment des rapports qui confirment la tendance naturelle à la concentration des écoulements et le comportement hydrologique potentiel (Cosandey, 1999).

De nombreux chercheurs, ont étudié des différentes méthodes, pour évaluer de manière quantitative, l'influence de la structuration interne du bassin versant sur sa dynamique potentielle. Les indices morphométriques, ont été calculés par des méthodes classiques, profitant du développement des SIG (Système d'Information Géographique), de l'augmentation des capacités des ordinateurs et de l'explosion du nombre de données numériques de terrain (MNT). Les approches se sont aujourd'hui multipliées. Parmi les plus connues, on peut citer les modèles physiographiques distribués ou spatialisés et semi-distribués, (Cudenec, 2000). Cette partie constitue un premier pas vers une analyse spatiale de l'organisation fonctionnelle d'un réseau hydrographique. Elle fait surtout le lien entre la géomorphologie et l'hydrologie.



A partir des années 1950, l'utilisation du système de classification hortonien se propage rapidement. La morphométrie est considérablement enrichie par les travaux des chercheurs américains tels que (Strahler, 1957) et (Leopold, 1957). Ces recherches ont fourni les bases à de nombreux concepts et à plusieurs lois basées sur la physique, les mathématiques et les statistiques. De nombreux travaux ont ensuite étudié les relations qui existent entre les différents descripteurs, en appliquant des modèles mathématiques et des méthodes statistiques (Ahmad, 2011) et (Faye, 2014).

#### III.4 Processus d'extraction du réseau hydrographique

De nombreuses méthodologies de traitement et d'analyse des MNT ont été appliquées depuis le début des années 70 et ont connus des évolutions importantes permettant d'affiner l'extraction de paramètres morphologiques ou de réseaux hydrographiques. Ensuite, de nouvelles structures de données altitudinales ont vu le jour. C'est par exemple le cas des MNT TIN (Triangulated Irregular Network) qui sont particulièrement utilisés en modélisation de structures 3D pour leur grande qualité de représentation.

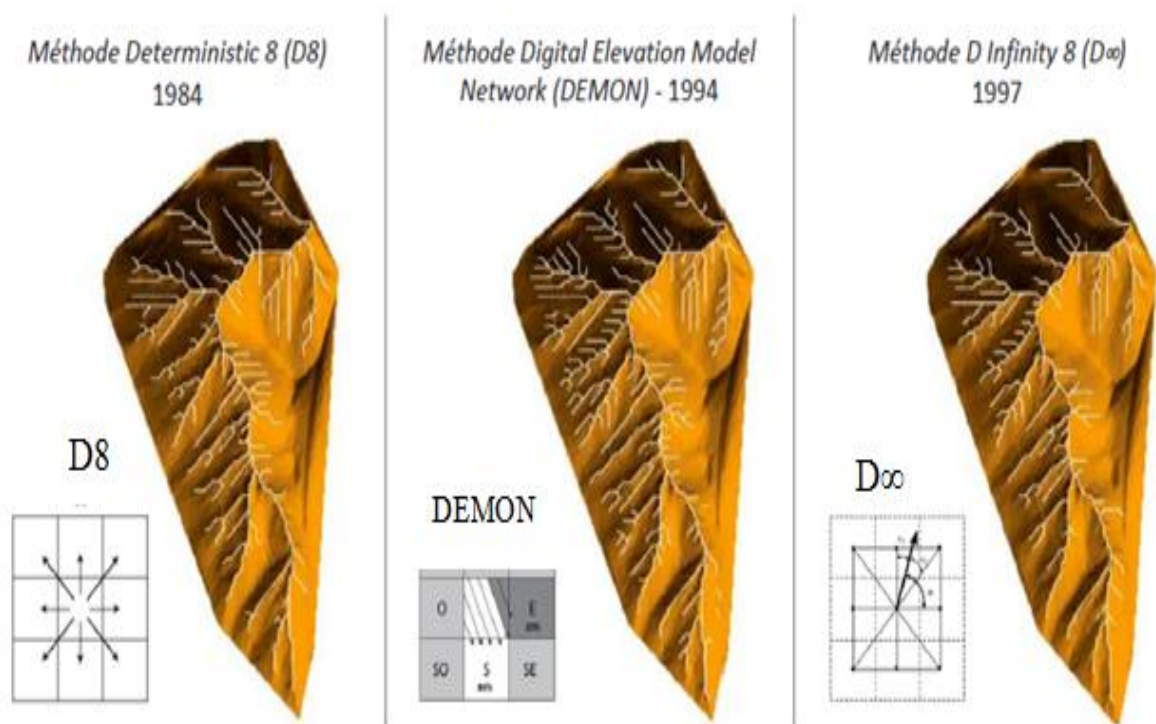
Les réseaux hydrographiques peuvent être délimités des MNT. Il existe plusieurs approches pour extraire le réseau hydrographique dit théorique à partir d'un MNT. Ces approches reposent sur : i) une analyse géomorphologique par caractérisation locale des variations altimétriques, ii) une analyse à inspiration hydrologique en se basant sur le suivi du ruissellement de l'eau. Plusieurs méthodes ont été développées basées sur la morphologie du terrain, les paramètres descripteurs de la géométrie du voisinage et l'étude des profils (Charleux, 2001) et iii) une analyse hydro géomorphologique «méthode hybride».

Un inconvénient majeur des méthodes de la première approche est la représentativité relative des maxima et minima locaux. Le réseau hydrographique extrait par ces méthodes est fragmenté et présente des discontinuités le rendant inexploitable (Hocine et al; 2008). Quant aux méthodes relatives à la deuxième approche, elles retiennent le principe d'un cheminement naturel des eaux entraînées par la gravité et guidées par la topographie. Elles s'appuient sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chaque cellule de résolution ou pixel à partir des valeurs altimétriques du MNT, sachant que l'eau emprunte le chemin défini par la ligne de plus grande pente. Un ensemble cohérent de talwegs principaux pourra en être déduit. L'approche d'extraction du réseau hydrographique développée est basée sur une analyse hydrologique qui utilise le MNT.

Trois étapes d'extraction du réseau hydrographique théorique sur la base de l'approche hydrologique, sont décrites succinctement ci-dessous :

### III.4.1 Calcul du sens d'écoulement

La première étape du processus est l'extraction des directions d'écoulement après avoir traité le MNT. La procédure est basée sur l'exploration du voisinage immédiat correspond aux 8-connexités (Jenson S.K et Resenfled E.G, 1988). L'Algorithme de Descente Altimétrique (ADA) tel que D8, (Mark, 1984), DEMONT, (Maréchal, 2011) , et  $D\infty$ , (Tarboton, 1997), (figure 24). L'algorithme permet de calculer les différences d'altitudes entre le pixel central et ses pixels voisins, et localiser le pixel (ou cellule de résolution) correspondant à la descente maximale.



**Figure 24:** Extraction du réseau hydrographique à partir d'algorithmes hydrologiques (D8, DEMON et  $D\infty$ ) (Maréchal, 2011).

L'algorithme DEMONT (Digital Elevation Model Networks) est une méthode multidirectionnelle a été développée pour rendre compte de la divergence de flux, problème essentiel des algorithmes unidirectionnels. DEMON définit plusieurs pixels cibles pour un pixel source. Le calcul de la répartition du flux entre les pixels cibles est présenté sur la figure 25. L'orientation du pixel source, au centre de la grille de la figure 25, est utilisée pour



définir le vecteur de direction de flux. L'angle formé par ce vecteur ( $292^\circ$ ) dans l'exemple de la **figure 25** permet de délimiter la partie du pixel source qui sera dirigée vers le pixel Est et celle vers le pixel Sud. Cette méthode ne permet pas, en effet, de distribuer les flux directement vers des pixels diagonaux (ici la cellule Sud-Est sur l'exemple). La cellule Sud-Est recevra par contre, à la prochaine itération, à la fois le flux de la cellule Est et de la cellule Sud en fonction de leurs directions d'écoulement. La partie triangulaire du pixel central, en gris foncé, sera donc dirigée vers le pixel Est tandis que la partie blanche du pixel source sera dirigée vers le pixel Sud. Les formules permettant de répartir le flux entre ces deux pixels sont les suivantes :

$$F_E = \frac{A\Delta}{A_t} \dots\dots\dots (8)$$

$$F_S = \frac{1 - F_E}{A_t} \dots\dots\dots (9)$$

Avec :

$f_E$  : fonction de répartition du flux pour le pixel Est

$A\Delta$  : Aire du triangle (gris foncé) dirigé vers le pixel Est

$A_t$  : aire totale du pixel

$f_S$  : fonction de répartition du flux pour le pixel Sud

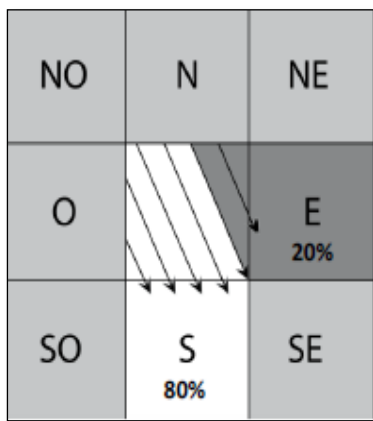
Dans cet exemple, 80% du flux est dirigé vers le pixel Sud et 20% vers le pixel Est.

Ensuite, les écoulements sont propagés en aval suivant les directions de flux du pixel source. Les écoulements sont représentés en 2D, formant ainsi une nappe d'écoulement, en anglais appelée « stream tube ». Dans cet algorithme, l'orientation, la contraction ou l'expansion de la nappe sont contrôlées par les vecteurs de direction de flux de chacun des pixels aval. L'extension de la nappe est ensuite contrainte par les limites du MNT ou la présence d'un puits. Les contours de nappe ne sont pas limités par les bords des pixels et peuvent s'étendre ou se contracter en fonction de la divergence ou de la convergence des flux, voir **figure 26**.

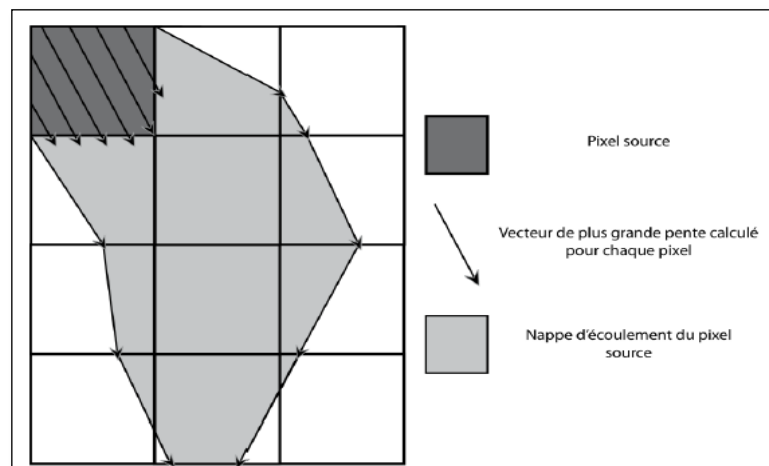
Les vecteurs de direction de flux de chaque pixel servent donc à orienter les contours de la nappe, délimitée par les lignes d'écoulement générées de chaque cote du pixel source. La répartition du flux au sein de la nappe est ensuite calculée pour chaque pixel de la même façon que présenté sur la **figure 25**. Cet algorithme est aujourd'hui implémenté dans de nombreux logiciels de SIG pour son efficacité à représenter les flux de surface, notamment pour les zones de divergence. Cependant, concernant les algorithmes multi-directionnels

(Tarboton, 1997) ; (Costa-Cabral et Burges, 1994) ont observé des problèmes de sur-dispersion des flux, notamment concernant des formes mathématiques telles des cônes inverses (Hengl et Evans, 2009). Si ces algorithmes semblent améliorer les qualités d'extraction au niveau des versants, ils créent des zones de divergences artificielles sur des bassins relativement contrastés (Tribe, 1992) ; (Wilson et al., 2008)

C'est pour cette raison que les algorithmes unidirectionnels sont encore largement utilisés en modélisation des flux de surface, notamment au-delà d'un certain seuil de surface drainée.



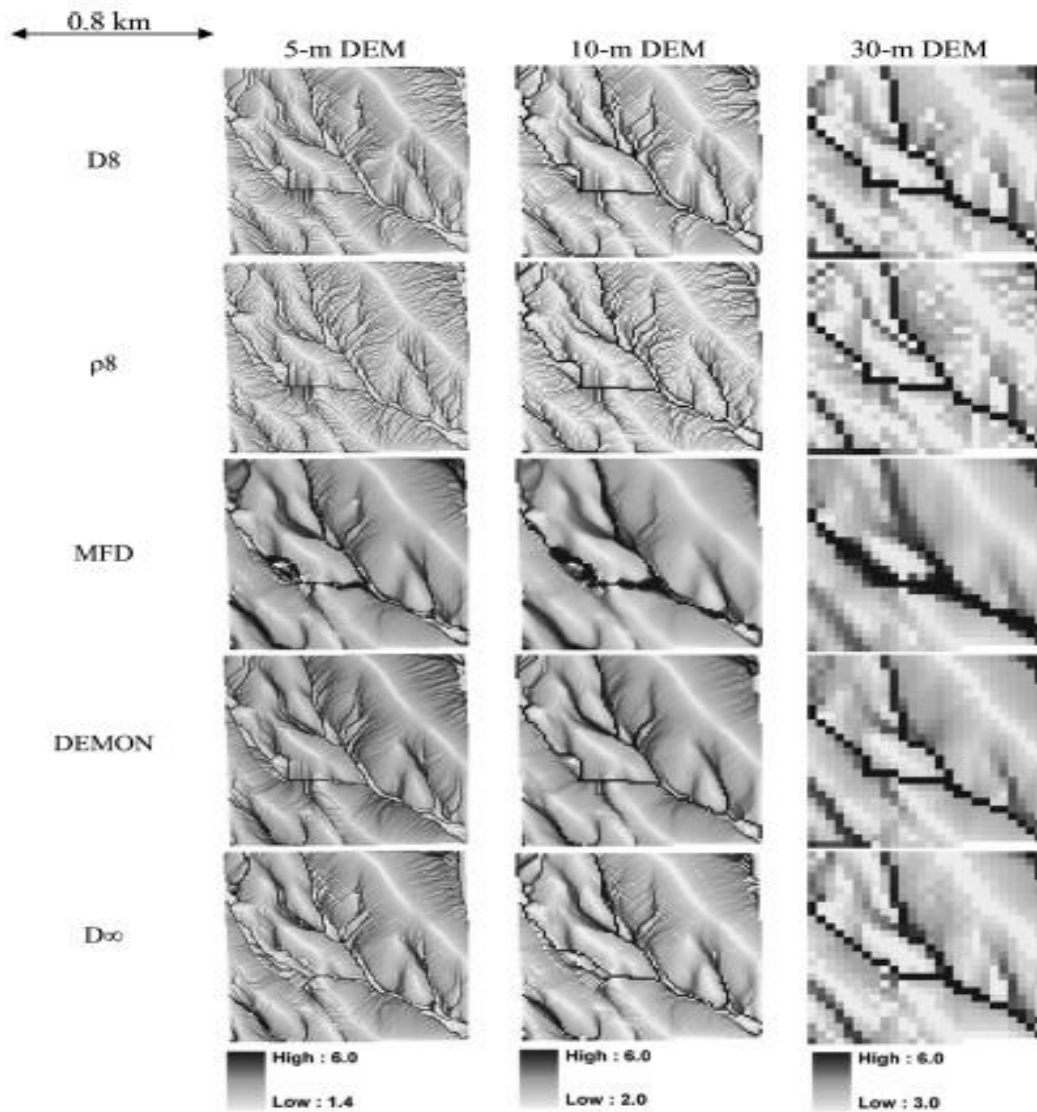
**Figure 25:** Dispersion des flux selon la méthode DEMON (Marechal, 2011).



**Figure 26:** Calcul de la nappe d'écoulement (DEMON) . (Marechal, 2011).

L'algorithme  $D_{\infty}$ , permet à la fois de rendre compte de la divergence des flux et de limiter la sur-dispersion générée par les algorithmes multi-directionnels

(Erskine et al., 2006) ont comparé cinq différents algorithmes (D8, DEMON,  $D_{\infty}$ ,  $\rho 8$ , MFD) en utilisant des MNT à trois différentes résolution (5-m, 10-m et 30-m) sur les bassins du Nord Est du Colorado, en estimant une zone contributive « A », qui représente la zone qui peut potentiellement produire un ruissellement, (figure 27).



**Figure 27:** Carte de  $\log(A)$  estimée par cinq différents algorithmes hydrologiques, avec MNT à des résolutions (5-,10-, et 30-m) (Erskine et al., 2006).

### III.4.2 Traitement des dépressions et des zones plates

Cette étape est basée sur la différenciation des surfaces convergentes (concaves) et divergentes (convexes) du MNT par le calcul d'un indice qui quantifie la convergence ou la courbure du relief en chaque point, indépendamment de toute notion de direction d'écoulement. C'est un traitement des dépressions et des zones plates pour pallier aux problèmes des discontinuités des chemins d'écoulement des eaux causées par ces dépressions et ces zones plates. Le MNT doit être traité en comblant les dépressions qui piègent l'eau et en forçant l'eau à s'écouler dans une même direction à l'intérieur des zones plates, Les algorithmes de traitement visent à concentrer les écoulements au centre de la partie plane afin d'empêcher la création de lac et la dispersion irréaliste des eaux, (**figure 28**).

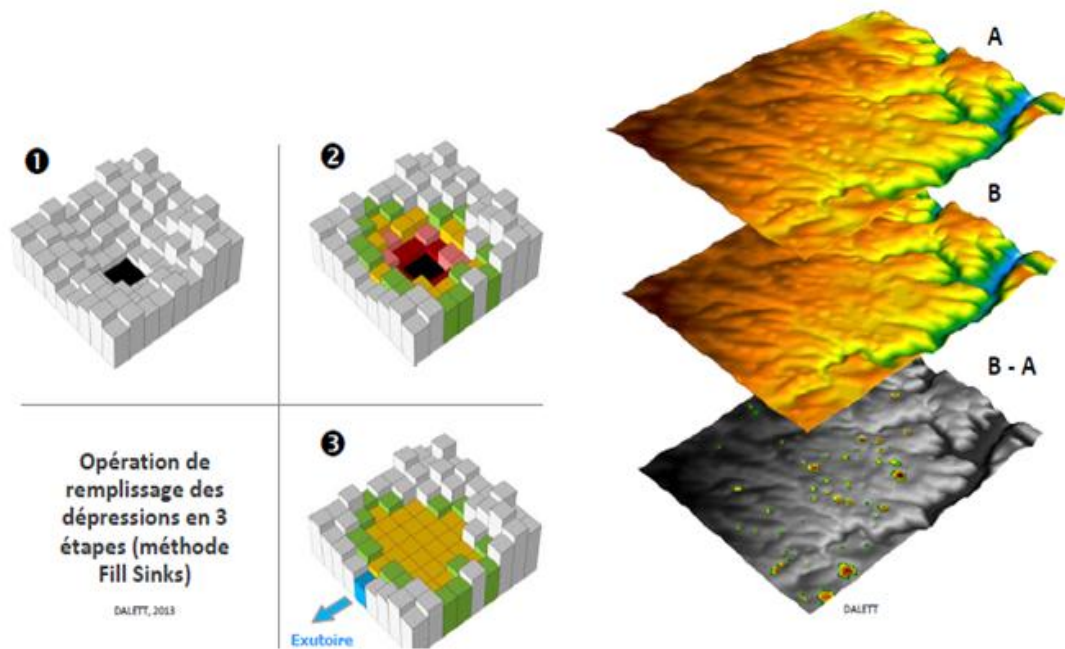


Figure 28: Traitement des dépressions à partir d'un MNT (Rucquoi, 2014)

### III.4.3 Extraction du réseau hydrographique

Le principe de l'extraction du réseau hydrographique est de détecter l'orientation du réseau hydrographique au niveau de chaque cellule en fonction des écoulements des différents chenaux situés en amont. L'algorithme permet de calculer le nombre de pixels total, en amont déversant à l'intérieur du pixel considéré (cellule traitée). La plus grande valeur est attribuée à l'exutoire principal. Les différents chenaux du réseau hydrographique sont tracés à partir des cellules drainées, (figure 29).

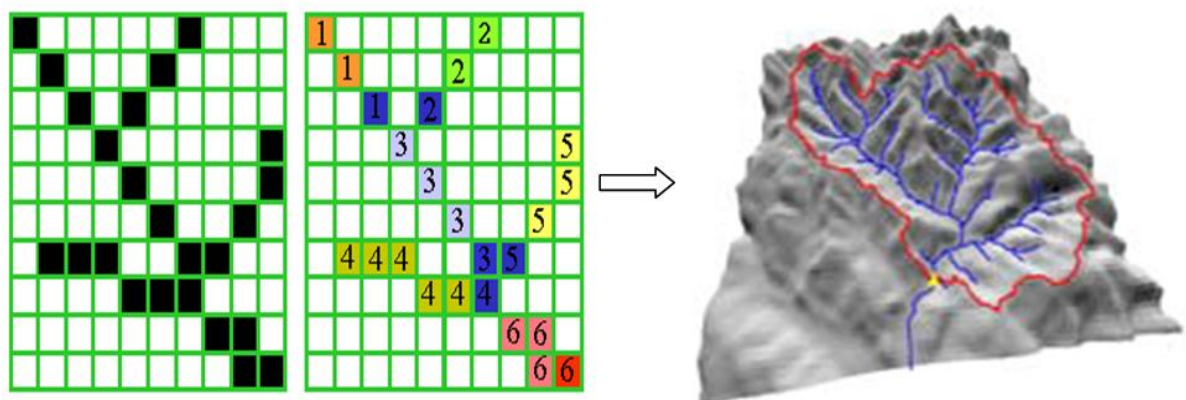


Figure 29: Extraction du réseau hydrographique (Charleux et al., 2000)

L'extraction automatique d'un réseau hydrographique à partir d'un MNT est un vaste sujet de recherche, qui a donné lieu à de nombreuses techniques différentes. Ces procédures sont automatiques et permettent de répondre à certains besoins d'applications hydrologiques, malgré leurs inconvénients et leurs limites d'application, il est important d'évaluer les résultats d'extraction relatifs à la méthode employée, pour juger son adéquation avec les besoins d'ordre hydrologique.

### **Conclusion**

Dans cet aperçu sur l'état de connaissances en matière de risque hydrologique, une présentation de nombreuses recherches a été établie et qui se sont focalisées sur la complexité des différents processus hydrologiques superficiels sub-superficiels et souterrains, dont les variations sont à la fois spatiales et temporelles au cours de l'épisode pluvieux.

La combinaison de ces processus à l'échelle du bassin est ainsi responsable des débits mesurés en chacun des points du réseau observé en période de crue. La configuration et les caractéristiques hydro-morphologiques des réseaux hydrographiques vont ensuite conditionner les dynamiques hydrologiques jusqu'à l'exutoire. Dans le même contexte des analyses des crues, plusieurs études ont été élaborées, qui portent sur la notion du risque hydrologique, dans le but d'évaluer le risque et mettre en évidence les zones menacées, pour prévoir des aménagements de protection. Ensuite la typologie des réseaux hydrographiques qui a fait l'objet de multitudes recherches vu l'importance qu'il porte sur le sujet des réponses hydrologiques.

**DEUXIEME PARTIE : HYDROMORPHOLOGIE ET**  
**CLIMATOLOGIE DE LA REGION D'ETUDE**

- **Chapitre IV : Caractéristiques générales des bassins versants.**
- **Chapitre V : Description hydro-géomorphologique et climatique des bassins versants.**

## IV. Caractéristiques générales des bassins versants

### Introduction

L'étude de la composante morphologique est nécessaire, car l'incidence de ce paramètre a souvent été minorée dans la région méditerranéenne, et pourtant, tous les exemples des études d'inondations mettent en évidence l'importance du système des pentes au sein des bassins et de l'organisation spatiale des réseaux de talwegs (Hauchard et al., 1999) ; (Delahaye, 2002).

Au préalable, ce chapitre se propose de rappeler les principaux éléments structurants les bassins, pour comparer les caractéristiques morphologiques des bassins versants, dans le but de quantifier leur comportement hydrologique potentiel (Llamas, 1993) ; (Lambert, 1996) ; (Cosandey, 2003).

Cette partie cible toutes les composantes qui servent à obtenir une base de données permettant d'évaluer l'influence de la structure du réseau hydrographique sur la réponse hydrologique, soit en termes de géomorphologie ou en morphométrie.

Cette étude représente un outil essentiel pour améliorer des décisions fondées sur des bases techniques et orienter le développement scientifique et économique.

### IV.1 Présentation de la région d'étude

L'Algérie remembre 17 grands bassins versants codés d'après l'ANRH de (01) jusqu'à (17) et 226 sous bassins. Les codes, les nombres des sous bassins et les noms des grands bassins sont indiqués sur le tableau 4.

La présente étude concerne les bassins versants situés au Nord-Est de l'Algérie, soit approximativement entre (5° et 9°E) de longitude et (35° et 37°N) de latitude. Cette région hydrographique est limitée naturellement par la mer méditerranée au Nord, au Sud par le bassin du Chot Melrhir codé (06), à l'Ouest par la région hydrographique de l'Algérois-Hodna-Soummam qui inclut les bassins de la Hodna codé (05), celui de la Soummam codé (15) et le bassin des Côtiers Algérois codé (02). Quant à l'Est, la région est limitée par la frontière Tunisienne, (**figure 30**).

**Tableau 4** : Noms, codes des bassins versants de l'Algérie et leurs nombres des sous bassins.

<b>Code BV</b>	<b>Nom BV</b>	<b>Nombre SBV</b>
BV 01	BASSIN DU CHELIFF	36
BV 02	BASSIN DES COTIERS ALGEROIS	20
BV 03	BASSIN DES COTIERS CONSTANTINOIS	18
BV 04	BASSIN COTIERS ORANAIS	06
BV 05	BASSIN DU CHOTT HODNA	24
BV 06	BASSIN DU CHOT MELRHIR	30
BV 07	BASSIN DES HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS	07
BV 08	BASSIN DU CHOTT ECH CHERGUI	18
BV 09	BASSIN DE L'ISSER	05
BV 10	BASSIN DU KEBIR RHUMEL	07
BV 11	BASSIN DE LA MACTA	16
BV 12	BASSIN DE LA MEDJERDA	05
BV13	BASSIN DU SAHARA	04
BV 14	BASSIN DE LA SEYBOUSE	06
BV 15	BASSIN DE LA SOUMMAM	10
BV 16	BASSIN DE LA TAFNA	08
BV 17	BASSIN DU ZAHREZ	06



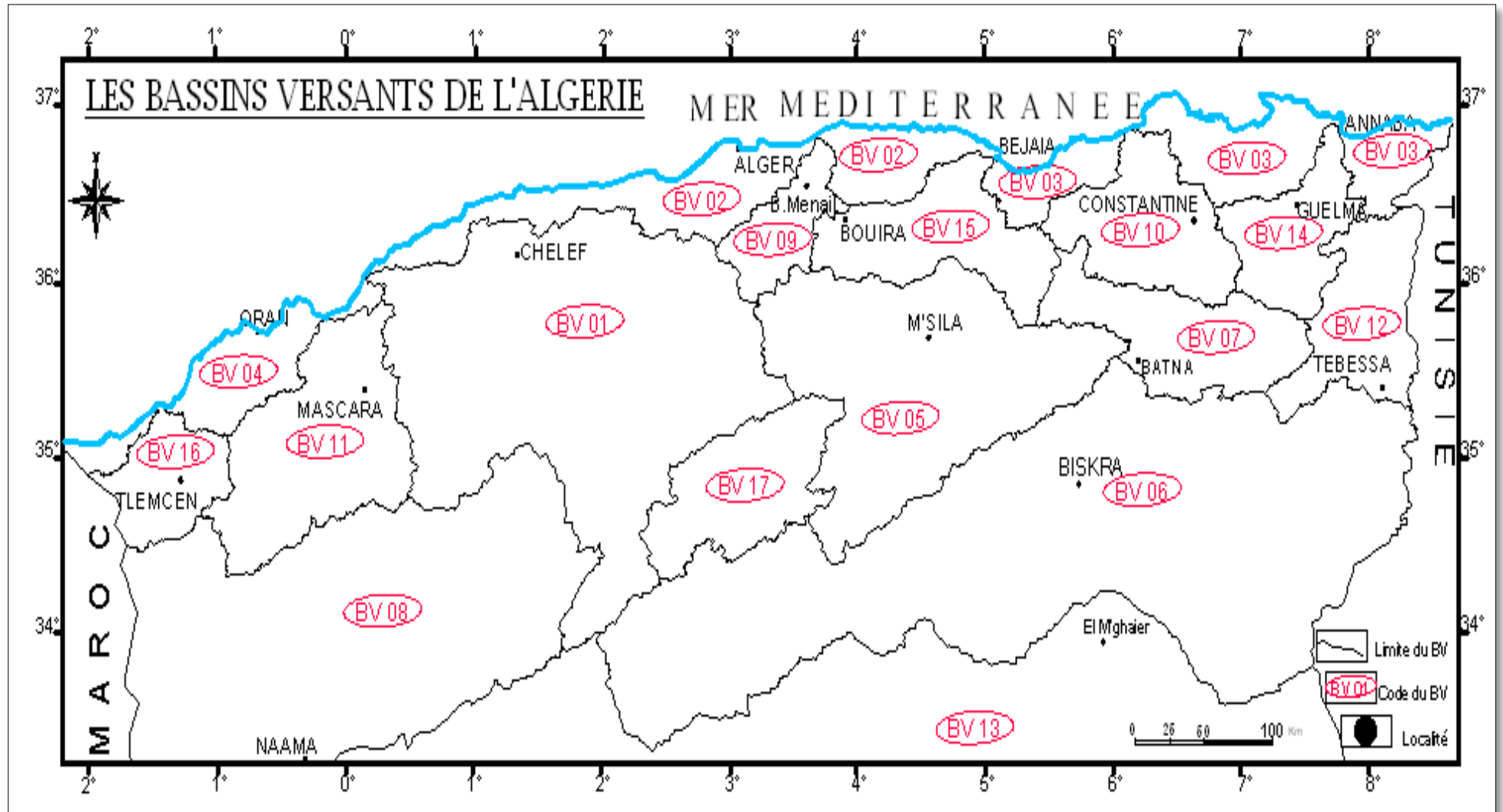
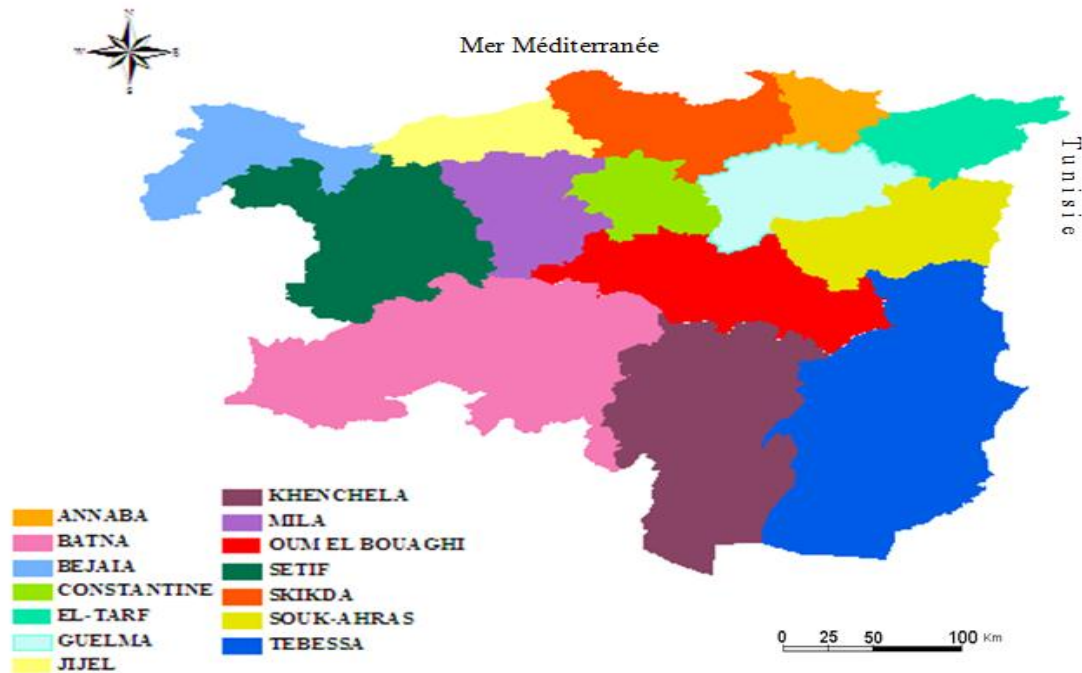


Figure 30: Limites des bassins versants de l'Algérie. Inspiré de la carte du réseau hydroclimatologique et de la surveillance de la qualité des eaux (ANRH, 2005)

Cette région couvre administrativement quatorze (14) wilayas « Annaba-Souk Ahras – Tebessa – Khenchela- Oum El Bouaghi – Guelma- Bejaia -Jijel - Skikda- –El Tarf- Setif – Mila – Constantine-Batna», (**figure 31**).



**Figure 31:** Présentation des wilayas relatives aux bassins d'étude.

Cet espace représente la région hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue (CSM). Ces régions hydrographiques sont conçues dans le cadre du projet PDARE (Plan Directeur d'Aménagement de Ressources en Eau) lancé par le Ministère des ressources en eau en Aout 1996. Celui-ci est conçu comme un outil d'aménagement et de planification à l'échelle des régions hydrographiques, gérées par les Agences de bassin Hydrographiques (ABH).

La région d'étude CSM englobe 43 sous bassins qui forment les cinq (05) grands bassins, Côtiers constantinois, codé (03), Hauts Plateaux, codé (07), Kebir-Rhumel, codé (10), Medjerda, codé (12) et la Seybouse, codé (14). La région CSM s'étend sur une superficie de 43796Km<sup>2</sup>, (**figure 32**).

Le choix de cet espace d'étude se justifie par, l'insuffisance des analyses détaillées au niveau de la région Méditerranéenne du Nord Est Algérien, notamment avec le changement climatique remarquable au niveau mondial, d'une part, et d'autre part, par la volonté de travailler dans un espace hétérogène, qui a une diversité de point de vue géomorphologique et

climatologique, et de participer aux efforts fournis à ce jour et améliorer les résultats en essayant de trouver les corrélations possibles, notamment celles qui expliquent leurs influence sur les débits des crues.



**Figure 32:** Carte de situation des bassins versants du Nord Est de l'Algérie projetée sur image satellitaire (Low resolution 15 m imagery, High resolution 60 cm imagery, High resolution 30 cm imagery). Conçu par l'auteur sur la base de données de (l'A.B.H Constantine, 2011)

#### IV.1.1 Bassin de la Medjerda

Le bassin versant de la Medjerda se situe au Sud-Est du Nord Algérien, d'une superficie de 7785 Km<sup>2</sup>, le bassin Medjerda-Mellegue est limité du côté Nord par le bassin des Côtiers Constantinois Est (03), au Sud par le bassin du Chott Melrhir (06), à l'Ouest par les bassins de la Seybousse (14) et des hauts plateaux Constantinois (07) et à l'Est par la frontière Tunisienne. Le bassin de la Medjerda couvre cinq wilayas « Souk Ahras- Tebessa-Khenchela-Oum El Bouaghi- Guelma ».

De point de vue pédologique, le territoire de ce bassin se décompose en trois zones :

- La zone du Nord limitée par les monts de Medjerda et Beni Salah, c'est une région montagneuse dont sa moitié a une forte pente environ 25%.
- La zone médiane qui représente les hautes plaines avec un relief pratiquement plat, (Plaines de Taoura, Merahna et M'daourouche).
- La zone du Sud qui englobe des plaines qui sont défavorables à l'activité agricole notamment les plaines d'El Aouinet, celles de Meskiana et de Ain Touila.

Le bassin de la Medjerda englobe cinq sous bassins versants, (**figure 33**) présentant un chevelu hydrographique moins développé et moins dense. Il comprend quatre grands oueds « Medjerda – Chabro- Meskiana- Mellegue ». C'est un bassin septentrional, à écoulement relativement fourni, de type exoréique. Oued Mellegue (**Photo 1**), prend sa source des massifs de Bentaleb et des hautes plaines de Sedrata. Oued Medjerda (**Photo 2**) c'est un cours d'eau dont la source est située en Algérie (les monts de Souk-Ahras), et le lit se jette sur les bassins Tunisiens. Il se caractérise par un écoulement permanent sur l'ensemble de son cours, ce qui lui donne le profil d'un fleuve



**Photo 1:** Oued Mellegue

(Source :<http://www.businessnews.com.tn/demarrage-des-travaux-du-barrage-superieur-doued-mellegue-en-2016,520,54079,3>)

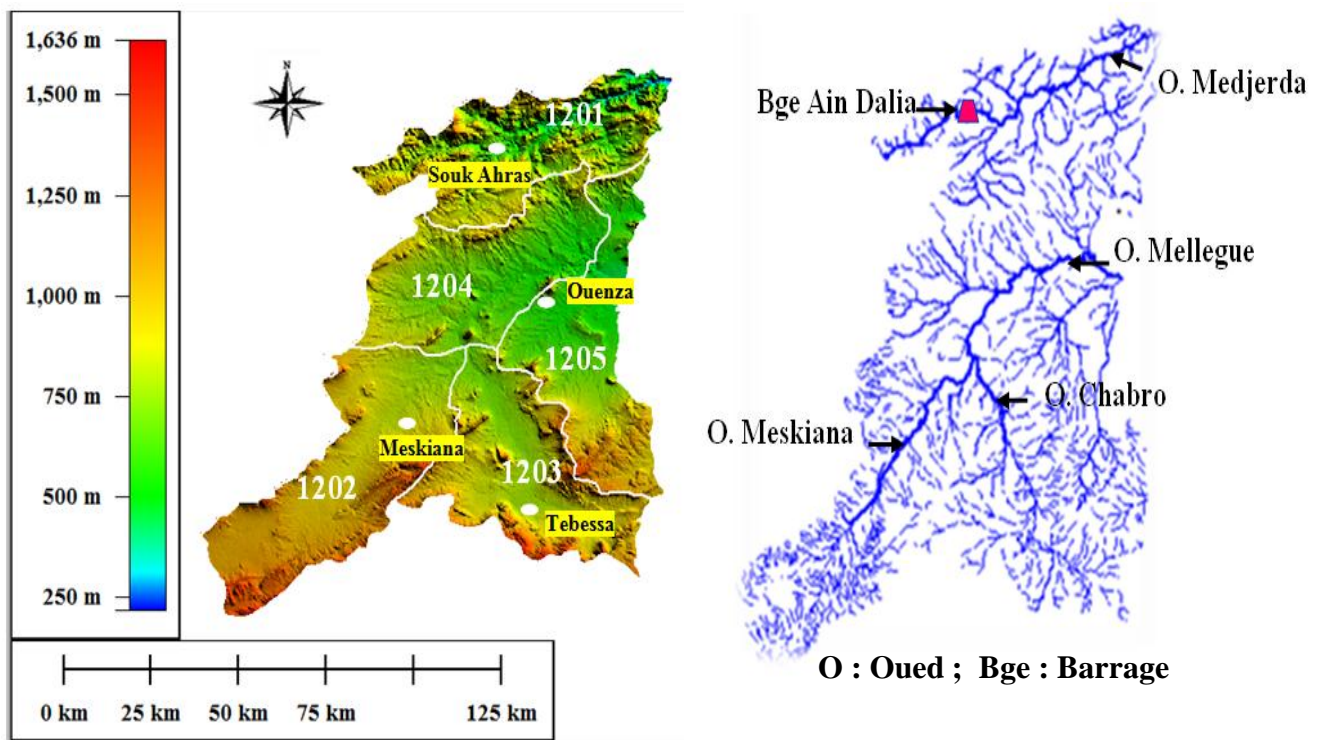


**Photo 2:** Oued Medjerda

(Source : <http://www.panoramio.com/photo/100468324>)



Ce bassin dispose d'un seul barrage « Ain Dalia», en exploitation qui est situé au niveau de l'oued Medjerda.



**Figure 33:** MNT et réseau hydrographique du bassin de la Medjerda

#### IV.1.2 Bassin des Côtiers Constantinois

Le bassin versant des Côtiers Constantinois est situé au Nord-Est de l'Algérie. Il se décompose de trois grands bassins ; les côtiers Constantinois Ouest, Centre et Est. Ce bassin s'étend sur une superficie de 11119 Km<sup>2</sup>, et limité au Nord par la mer méditerranée, au Sud par le bassin Kebir Rhumel (10), et celui de la Seybouse (14) et le bassin de la Medjerda (12), à l'Ouest par les bassins de la Soummam (15), et à l'Est par la frontière Tunisienne.

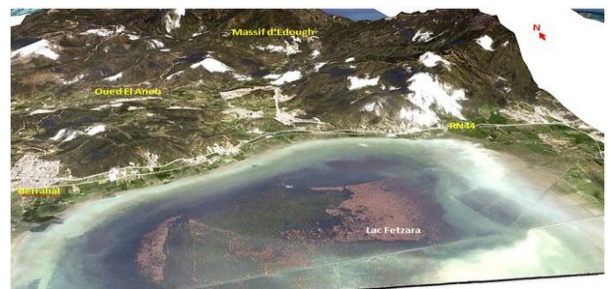
Le bassin des Côtiers Constantinois couvre dix wilayas « Bejaia -Jijel - Skikda-Annaba –El Tarf- Setif-Mila-Constantine-Guelma-Souk Ahras».

Le territoire de ce bassin comprend les plaines de Tichy et l'extension des Babors au niveau du bassin des Côtiers Constantinois Ouest, et les massifs de Cap Bougaroune et de Skikda-Jijel et de l'Edough, ainsi que les plaines du Collo et d'Azzaba, au palier des Côtiers Constantinois Centre. Sur le côté Est de ce bassin nous distinguons les plaines d'Annaba. d'OumTboul et celles d'El Tarf.

Le bassin des Côtiers Constantinois remembre dix-huit sous bassins versants dont cinq sont situés au niveau du Côtiers Constantinois Est, neuf appartiennent à celui du Centre et la partie Ouest assemble quatre sous bassins restants. En se reportant à la (**figure 34**), ces unités présentent un chevelu hydrographique très ramifié et très dense. Le bassin comprend six grands oueds « Djendjen - Guebli - Safsaf - Bounamoussa- Kebir- Mafragh (**Photo 3**) ». L'exutoire de ces oueds est la mer méditerranée. Les plans d'eau tels que lac Fetzara (**Photo 4**), Tonga (**Photo 5**), Oubeira (**Photo 6**) et celui de Mellah dont l'embouchure est illustrée dans la **photo 7**. Ces plans d'eau font partie du paysage de ce bassin. C'est un bassin septentrional, à écoulement relativement fourni, de type exoréique.



**Photo 3:** Oued Mafragh. (Source: <http://algiersprogress.skyrock.com/1647748908-oued-mafragh.html>)



**Photo 4 :** Vue 3D du lac Fetzara (Annaba) à partir de l'imagerie Alsat-2A



**Photo 5 :** Lac Tonga, Oum Tboul Écrit par Administration [jjel.info](http://jjel.info) février 2016



**Photo 6 :** Lac Oubeira «El Kala». (Source : Coupure de presse **Horizons** le 18-02-2011)



**Photo 7 :** Embouchure du Lac Mellah « El Kala» (Source : <http://www.panoramio.com/2011>)

Dans ce bassin neuf barrages sont en exploitation « Ighil Emda - Agrem - Erraguene – Guenitra - BeniZid - Zardezas - Zit Emba - Cheffia - Mexa ».

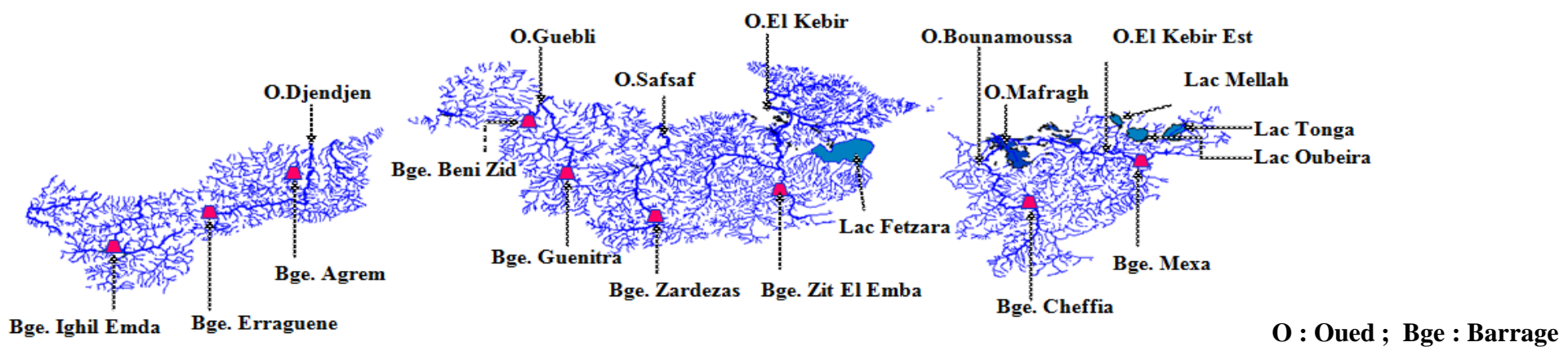
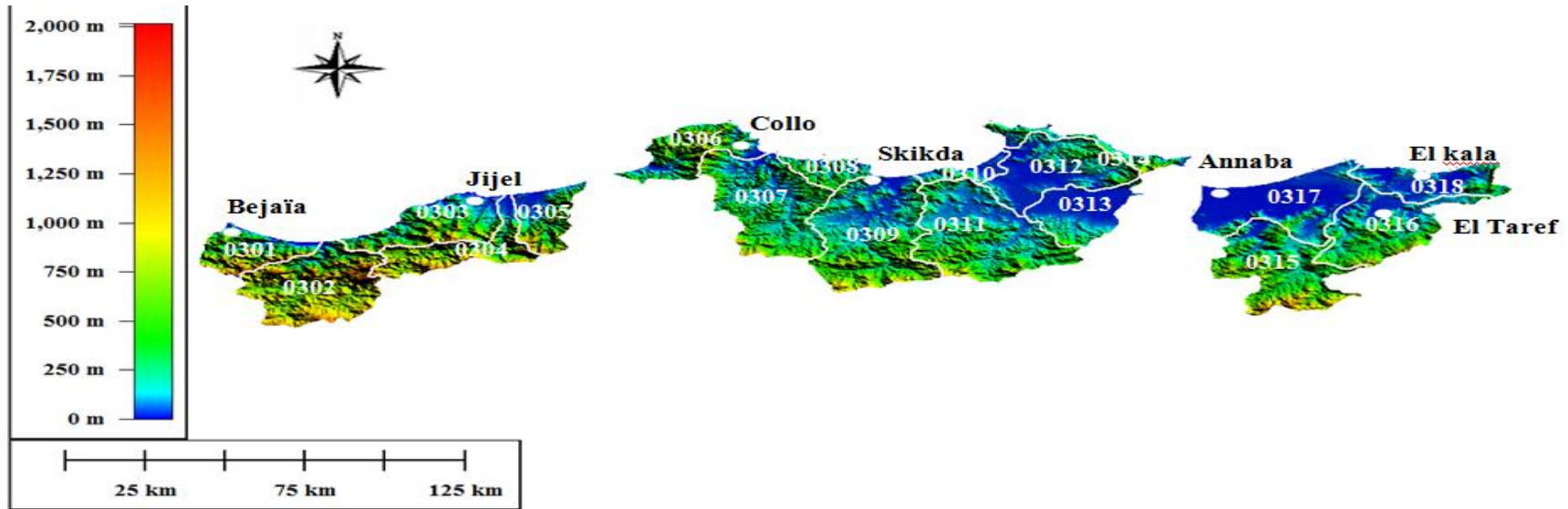


Figure 34: MNT et réseau hydrographique du bassin des Côtiers Constantinois



**IV.1.3 Bassin de la Seybouse**

Le bassin versant de la Seybouse est situé au Nord-Est de l’Algérie. Il s’étend sur une superficie de 6452Km<sup>2</sup>. Le bassin est limité au Nord par le bassin versant des Côtiers Constantinois (03) Centre et Est, au Sud par le bassin des hauts plateaux Constantinois (07), à l’Ouest par le bassin de Kebir-Rhumel (10), et à l’Est par le bassin de la Medjerda (12).

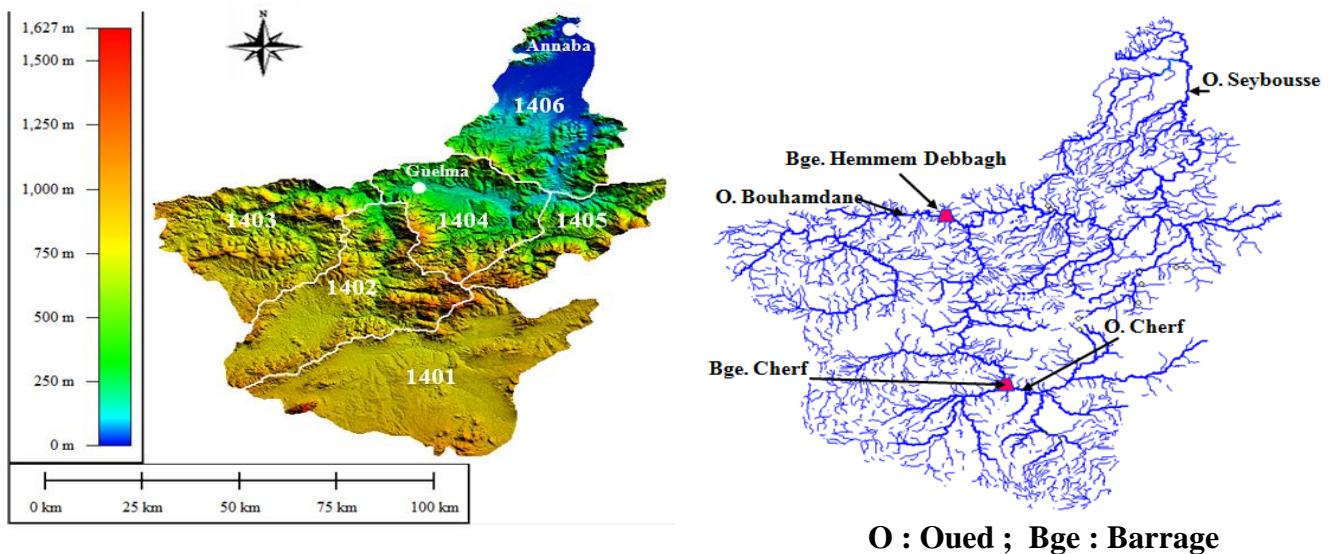
Le bassin de la Seybouse couvre sept wilayas « Oum El Bouaghi - Skikda-Annaba –El Tarf-Constantine-Guelma-Souk Ahras ».

Le bassin de la Seybouse remembre six sous bassins versants présentant un chevelu hydrographique très ramifié et dense, (**figure 35**), il comprend trois grands oueds « Cherf-Bouhamdane –Seybouse (**Photo 8**)». C’est un bassin septentrional, à écoulement relativement fourni, de type exoréique.



**Photo 8:** Oued Seybouse. (Source: <http://www.seybouse.info/N°101>)

Dans ce bassin deux barrages sont en exploitation« Hemmem. Debbagh – Cherf ».



**Figure 35:** MNT et réseau hydrographique du bassin de la Seybouse



#### IV.1.4 Bassin de Kebir Rhumel

Le bassin versant du Kebir-Rhumel s'étend sur une superficie de 8825Km<sup>2</sup>. Le bassin est limité au Nord par le bassin des Côtiers Constantinois (03) Centre et Ouest, et possède une façade maritime d'environ (07) Km, au Sud par le bassin des Hauts Plateaux Constantinois (07), à l'Ouest par le bassin de la Soummam (15), et à l'Est par le bassin de la Seybouse(14)

Le bassin du Kebir-Rhumel couvre six wilayas « Oum El Bouaghi - Skikda- Constantine- Mila-Sétif- Jijel ».

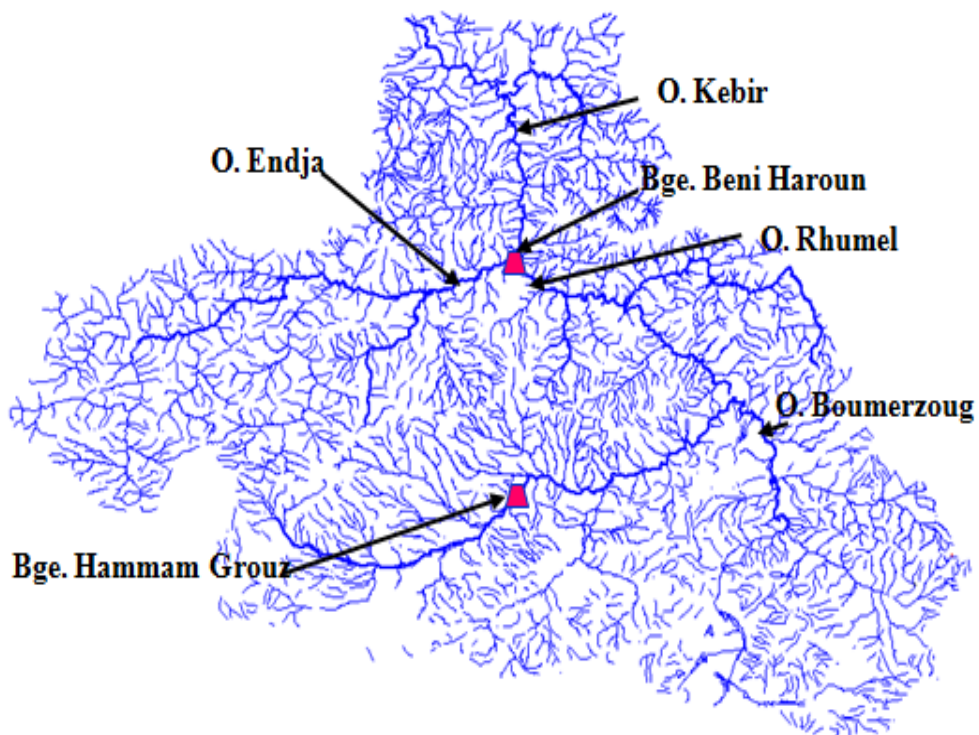
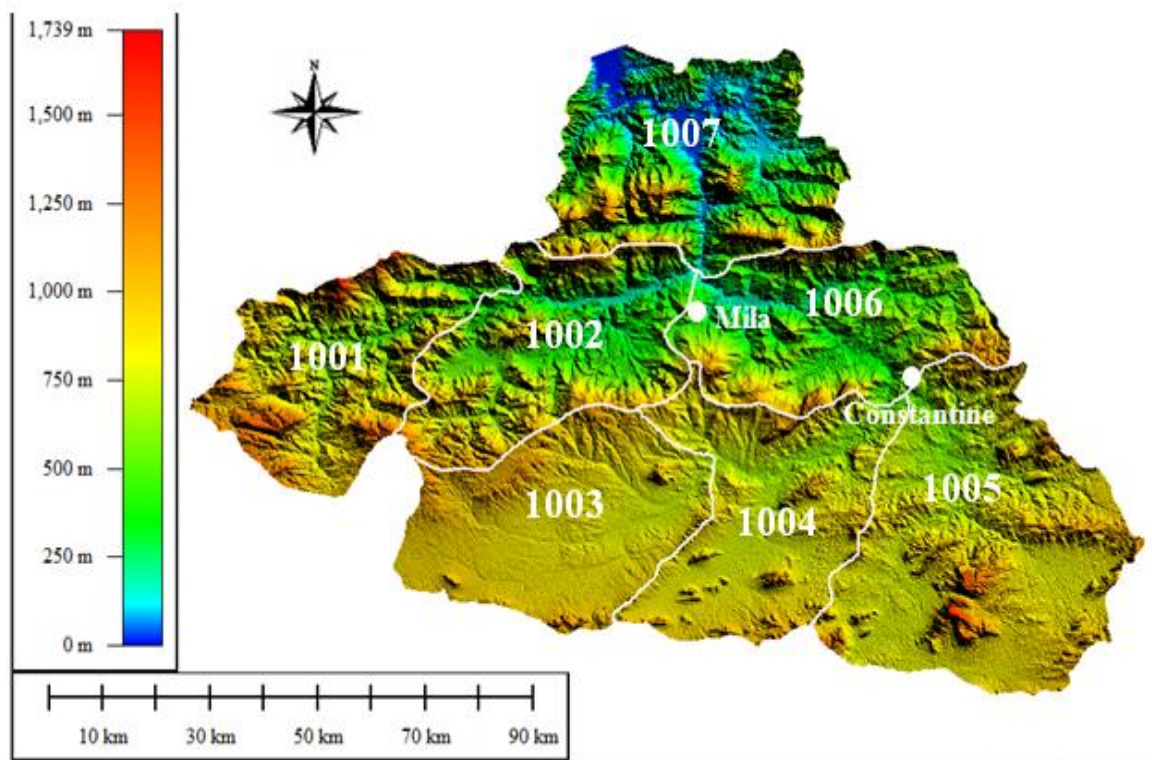
Le territoire de ce bassin comprend les plaines de Fadj M'zala, Ain M'lila et celles d'El Khroub au niveau du côté Sud du bassin, et les massifs « de Skikda-Jijel» au Nord du bassin.

Le bassin du Kebir-Rhumel remembre sept sous bassins versants présentant un chevelu hydrographique très ramifié et très dense totalisant plus de 8000 Km, (**figure 36**). Il comprend trois grands oueds « Boumerzoug - Rhumel (**Photo 9**) – Endja - Kebir». C'est un bassin septentrional, à écoulement relativement fourni, de type exoréique.



**Photo 9:** Oued Rhumel. (Source:<http://www.panoramio.com/photo/130109086>)

Au niveau de ce bassin deux barrages sont en exploitation « Beni Haroun et Hammam Grouz».



O : Oued ; Bge : Barrage

Figure 36: MNT et réseau hydrographique du bassin du Kebir-Rhumel

#### IV.1.5 Bassin des Hauts Plateaux Constantinois

Le bassin versant des Hauts Plateaux Constantinois s'étend sur une superficie de 9615 Km<sup>2</sup>, le bassin est limité au Nord par le bassin du Kébir Rhumel (10) et la Seybouse (14), au Sud par le bassin du Chott Melrhir (06), à l'Ouest par celui de la Soummam (15), et de Hodna (05) et à l'Est par le bassin de la Medjerda (12).

Le bassin des hauts plateaux constantinois couvre cinq wilayas « Oum El Bouaghi - Khenchela - Mila - Sétif - Batna ».

Le territoire de ce bassin comprend les plaines d'Ain M'lila au Nord du bassin et les plaines d'Ain Touta et Batna au Sud, aussi les hautes plaines Sétifiennes et les plaines de Bellezma à l'Ouest et les plaines de Remila à l'Est.

Le bassin des hauts plateaux constantinois remembre sept sous bassins versants (**figure 37**) présentant un chevelu hydrographique ramifié et moins dense, drainé par deux grands oueds « Chemora-Boulefreis». L'oued Chemora se perd après un trajet d'environ 30 km, dans les lacs salés des hautes plaines Constantinoises. Il s'agit de Sebket Djendli (**Photo 10**), Garâet Ank-Djemel, et Garâet Et-Tarf .C'est un bassin méridional, à écoulement plutôt modeste, de type endoréique.



**Photo 10** : Sebket Djendli (Source : [http://dz.geoview.info/sebkret\\_djendli,5114261p](http://dz.geoview.info/sebkret_djendli,5114261p))

Dans ce bassin deux barrages sont en exploitation « Koudiat Medouar et Fom El Gueiss.

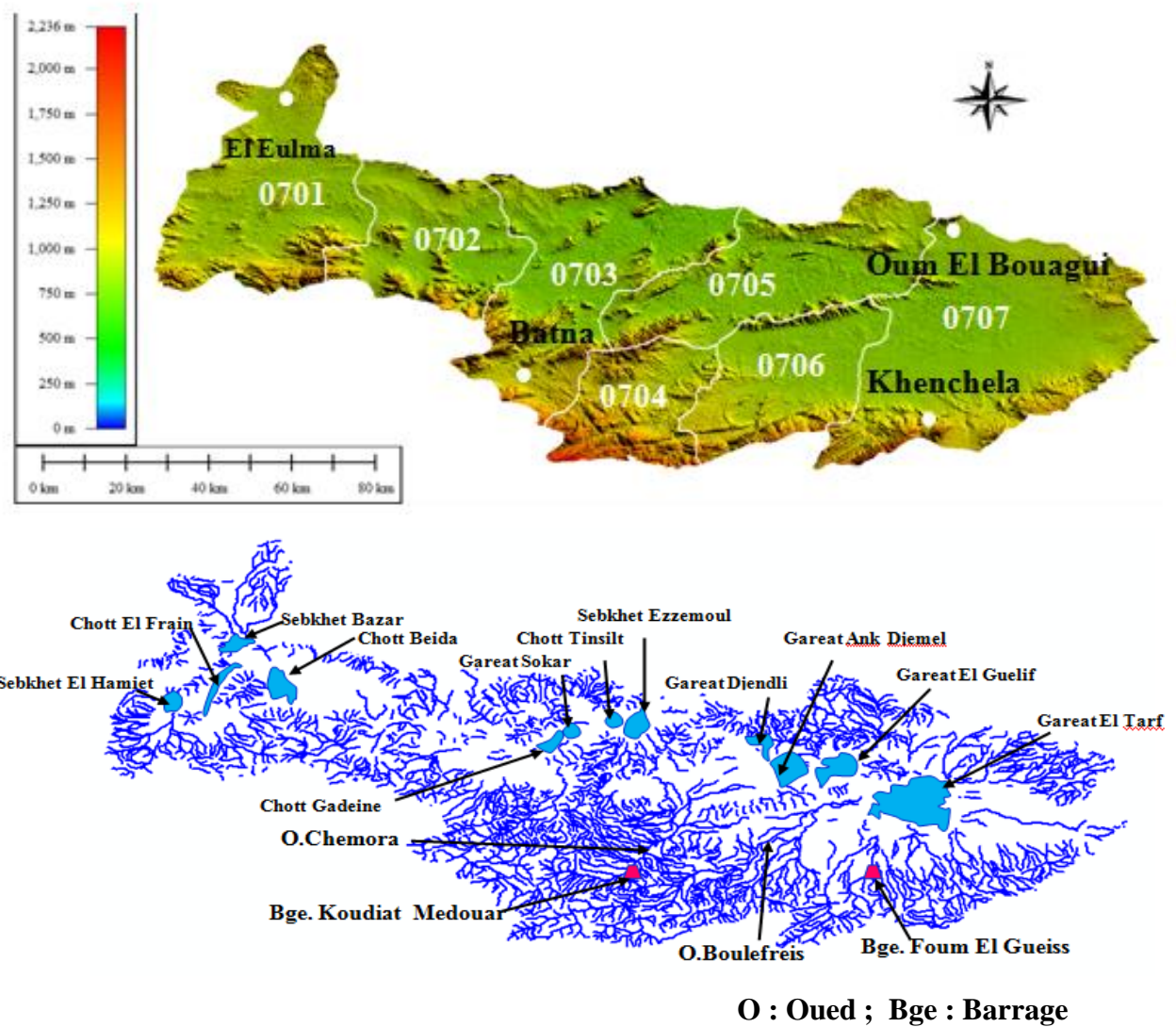


Figure 37: MNT et réseau hydrographique du bassin des Hauts Plateaux Constantinois

### Conclusion

La brève description de la région d'étude a permis d'avoir une vision globale sur l'étendue et l'importance de cette zone. En effet le comportement hydrologique des bassins versants, dépend de plusieurs facteurs, dont la géomorphologie est l'une des variables importantes. Son intégration dans l'hydro-système est nécessaire, pour comprendre le phénomène des crues dans les bassins. C'est dans ce contexte qu'une description géomorphologique détaillée de la région d'étude est nécessaire, qui est présentée au chapitre suivant.



## **V. Description hydro géomorphologique et climatique des bassins versants**

### **Introduction**

La description géomorphologique est effectuée partir d'un système d'information géographique (SIG), en utilisant le logiciel ArcGis10.0, et en se basant sur les données recueillies au niveau de la Direction Générale des Forêts (Alger). Cette base de données est fournie par le Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural (BNEDER), dans le cadre du deuxième Inventaire Forestier National (IFN 2010) de toutes les wilayas de l'Algérie, qui offre une base de données concernant plusieurs thématiques.

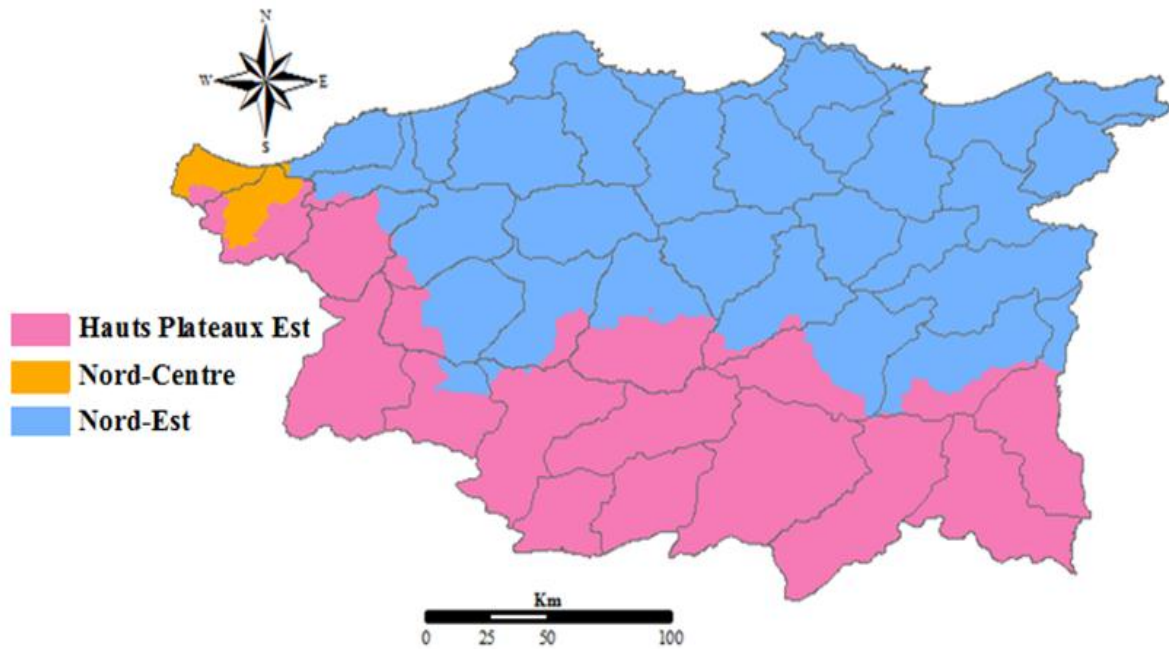
### **V.1 Contexte géomorphologique**

Dans le contexte géomorphologique, on s'est intéressé aux thèmes nécessaires à cette recherche à savoir l'altitude, les pentes, la lithologie, l'érosion, l'occupation du sol, relatifs aux bassins objet de cette étude. Cette base de données était la seule source trouvée lors de la collecte des données, qui possède un système d'information géographique, notamment celle des réseaux hydrographiques et des précipitations et qui a été élaborée avec la collaboration de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

Cette base de données a été utilisée pour la conception des cartes des différentes thématiques relatives aux 43 sous bassins versants du Nord Est de l'Algérie sujet de l'étude.

#### **V.1.1 Régions d'étude**

L'espace d'étude se limite à trois régions principales. La première région est celle du Nord - Est, qui représente le bassin des Côtiers Constantinois en quasi-totalité et une partie du bassin de la Seybouse, Medjerda et Kebir Rhumel. La deuxième région est celle du Nord centre, située à l'Ouest de cet espace d'étude qui contient deux sous bassins des côtiers constantinois codés (0301) et (0302). La troisième région est celle des hauts Plateaux Est, où on trouve le bassin des Hauts Plateaux Constantinois en totalité et une partie des bassins de la Medjerda, de la Seybouse et de Kebir Rhumel, (**figure 38**).



**Figure 38:** Carte des régions d'étude. (Conçue par l'auteur sur la base de données de BNEDER 2010)

### V.1.2 Topographie et relief

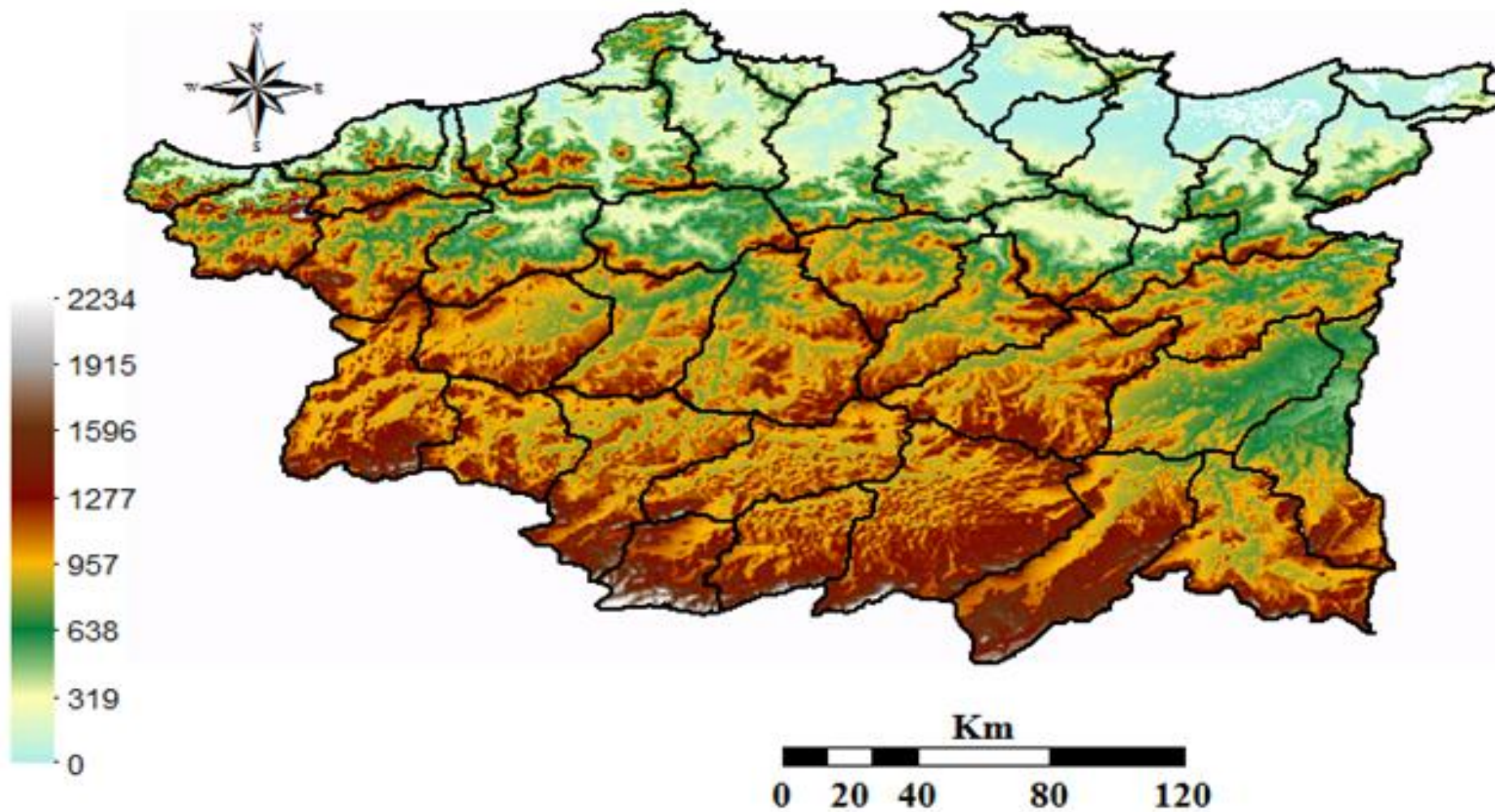
A la lumière de la carte altimétrique, établie et représentée à la **figure 39**, le relief de la région d'étude est divisé en quatre zones selon un axe Nord-Sud :

**Zone à faible altitude (0-400 m) :** Cette zone est représentée au Nord par la bande côtière qui constitue partiellement l'Atlas Tellien, commençant de l'Ouest vers l'Est par la vallée de la Soummam, les plaines et les collines de Jijel, les vallées des oueds Guebli et Safsaf, dépression de Azzaba, les plaines de Guerbes, et à l'Est celles de Annaba-Skikda, les plaines de Annaba et Tarf et les collines côtières d'El-Kala.

**Zone à moyenne altitude (400-800 m) :** Cette zone est représentée par les monts de Collo, Skikda-l'Eddough, les hautes plaines de Chelghoum-Laid, Sadrata-Taoura, Oum-El-Bouaghi, Ain-Beida, El-Madher-Chemora, Bir-El-Ater et que les collines d'Oued Zenati.

**Zone à altitude élevée (800-1200 m) :** Cette zone est représentée par les hautes plaines de Setif, celles de Khenchela et de Ain-Djasser.

**Zone à altitude très élevée (1200-2200 m) :** Cette zone couvre les massifs de Sétif (Ain-Abessa et Boutaleb), ceux des Aurès (El-Mahmel 2200 m) et les monts de Tébessa.



**Figure 39:** Carte altimétrique. (Conçue par l'auteur sur la base de données de BNEDER 2010)

### V.1.3 Pentés

Concernant les pentes, elles sont subdivisées en quatre classes :

**Classe 1 :**  $0\% \leq \text{Pente} \leq 5\%$ . Cette classe représente les zones à faible et moyenne altitude. Ces pentes caractérisent les vallées des oueds Guebli et Safsaf, les plaines de Guerbes, et celles d'Annaba-Skikda, les plaines d'Annaba et Tarf, à l'exception de la région Nord qui se caractérise par des pentes importantes.

**Classe 2 :**  $5\% \leq \text{Pente} \leq 15\%$ . Cette classe se caractérise par la bande qui se trouve entre le Nord et le Sud de la région d'étude, essentiellement, les hautes plaines et les collines déjà décrites.

**Classe 3 :**  $15\% \leq \text{Pente} \leq 35\%$ . Cette classe couvre les zones à altitude plus ou moins élevée où se trouvent les hautes plaines et les collines sus mentionnées.

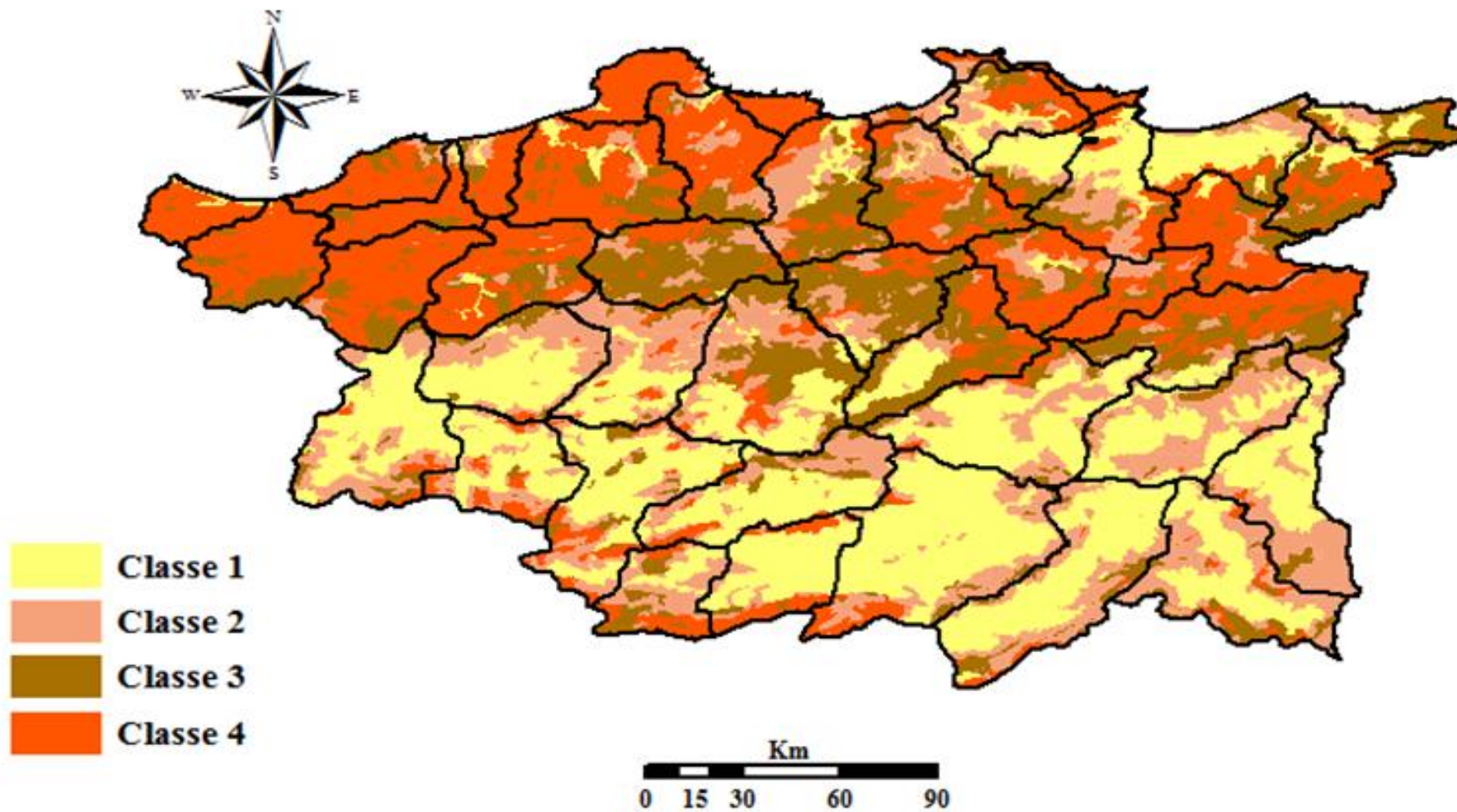
**Classe 4 :**  $\text{Pente} > 35\%$ . Cette classe concerne les zones montagneuses où les altitudes sont importantes au Sud (Bassin des Hauts-Plateaux constantinois) et au Nord (Bassin des Côtiers-Constantinois) où se trouvent les fortes déclivités. Ces zones sont caractérisées par un potentiel de ruissellement élevé, (**figure 40**).

.

### V.1.4 Aperçu lithologique

La région objet d'étude est disposée en chaînes parallèles de Gneiss et de Granite au niveau du centre de la bande littorale de l'atlas tellien (Jijel-Skikda-Annaba), et des marnes qui dominent le bassin des Côtiers-Constantinois Est et celui de Kebir-Rhumel (dans sa partie Sud). Cette formation se trouve aussi au bassin de la Medjerda. On y trouve aussi les alluvions au niveau du bassin des Hauts Plateaux Constantinois, et les hautes plaines de Khenchela et les monts de Mahouna et oued Cheham (Guelma). Les Grés s'aperçoivent au niveau du bassin des Côtiers-Constantinois Ouest et Est. Les flysch se dispersent au niveau de la bande côtière. L'argile se trouve au niveau du bassin de la Seybouse et celui des Hauts-Plateaux (les hautes plaines d'El-Madher-Chemora) et le Nord du bassin de la Medjerda, (**figure 41**).





**Figure 40:** Carte des pentes. (Conçue par l'auteur sur la base de données de BNEDER 2010).

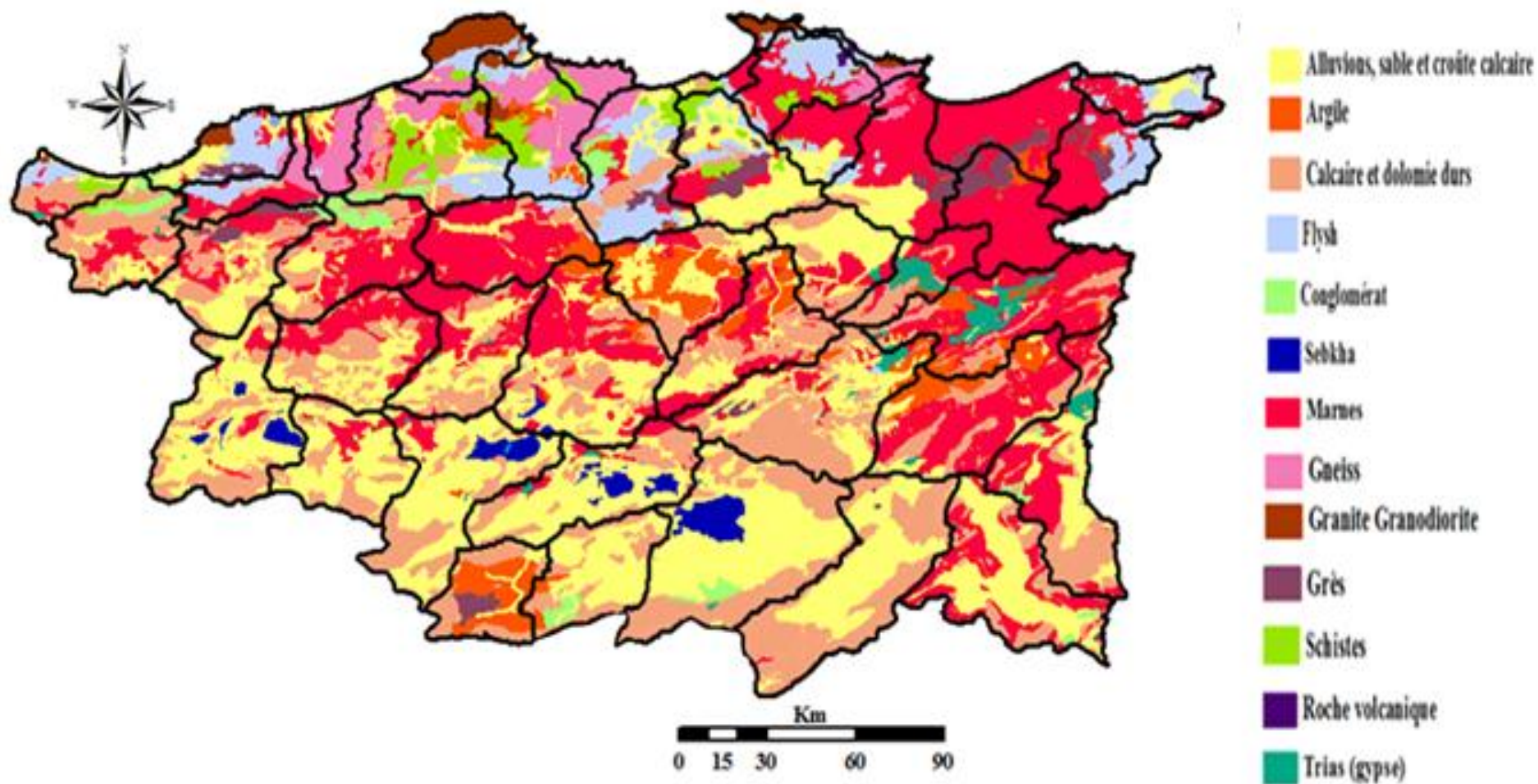


Figure 41: Carte lithologique (Conçue par l'auteur sur la base de données de BNEDER 2010).

### V.1.5 Occupation du sol

Le couvert végétal de la région d'étude offre une grande diversité spatiale qui est influencée par le modelé des terres et les écarts climatiques induits par la proximité du Sahara au Sud et de la mer méditerranée au Nord.

La couverture végétale est dominée par les zones agricoles comme l'indique la **figure 42**. Toutefois, une partie de la région est couverte par des parcours steppiques. Il s'agit de la partie Sud du bassin de la Medjerda. On distingue aussi, des maquis arborés au niveau de l'Atlas Tellien et le Sud des Hauts-Plateaux. Quant au reboisement, il se disperse sur toute la région d'étude. Ce reboisement se trouve suite à l'installation du barrage vert qui occupe la bordure septentrionale du Sahara et les quelques surfaces forestières (Chêne, liège) localisées dans la bande des monts côtiers de Bejaia, Jijel, Skikda, Annaba et El-Kala il se localise aussi entre le littoral et la ligne qui passe approximativement par Guelma et Souk-Ahras. Il est à noter aussi, les forêts de pins d'Alep qui se distinguent au niveau des monts des Aurès.

### V.1.6 Erosion

Généralement, l'érosion hydrique se manifeste pendant les crues avec l'absence des obstacles naturels ou des potentialités de la couverture végétale. L'érosion dépend directement des pentes, de la lithologie du terrain et de l'occupation du sol, ses classes sont déterminées généralement selon le **tableau 5** suivant.

**Tableau 5:** Détermination des degrés de stabilité à l'érosion (Insid, 2006)

<b>Lithologie</b> <b>Pente</b>	Très résistant	résistant	Assez résistant	Peu à très peu résistant
0% -3% Plaine	Sol stable			
3% -12,5% Bas du piémont	Sol stable			Sol moyennement stable
12,5% -25% Haut du piémont	Sol stable		Sol moyennement stable	Sol instable
≥ 25% Montagne	Sol moyennement stable		Sol instable	Sol très instable

Dans les bassins versants du Nord-Est Algérien, l'érosion pose des problèmes graves pour l'environnement, en particulier l'envasement des barrages. Elle traduit aussi le degré de stabilité des sols. A travers la carte présentée dans la **figure 43** ci-dessous, une classification de la stabilité du sol est établie comme suit :

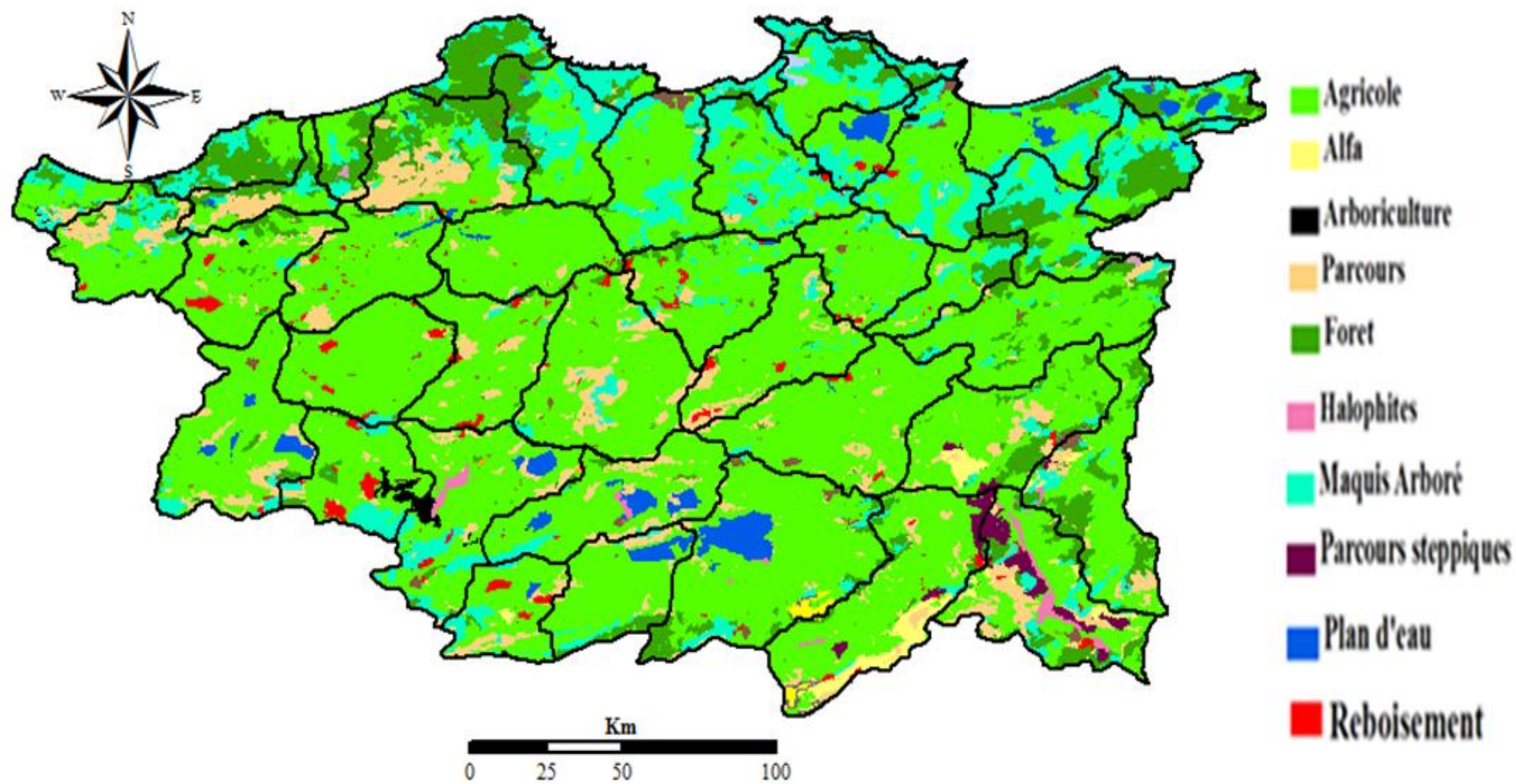
**Sol stable** : ce type de sol est indiqué par la superficie méridionale des bassins des Hauts Plateaux Constantinois (Khenchela et Ain djasser Oum-El-Bouaghi-Ain Beida, Plaines de Bir-Chouhada Ain-M'Lila, Ain-Fekroune) et celui de la Medjerda (hautes plaines de Chéria d'El-Meridj) ;

**Sol moyennement stable** : ce degré de stabilité caractérise les monts Ouest de Bejaia, les piémonts de Skikda (Sidi Driss), les hautes plaines de Sedrata –Taoura, et celles de El-Madher-Chemora ;

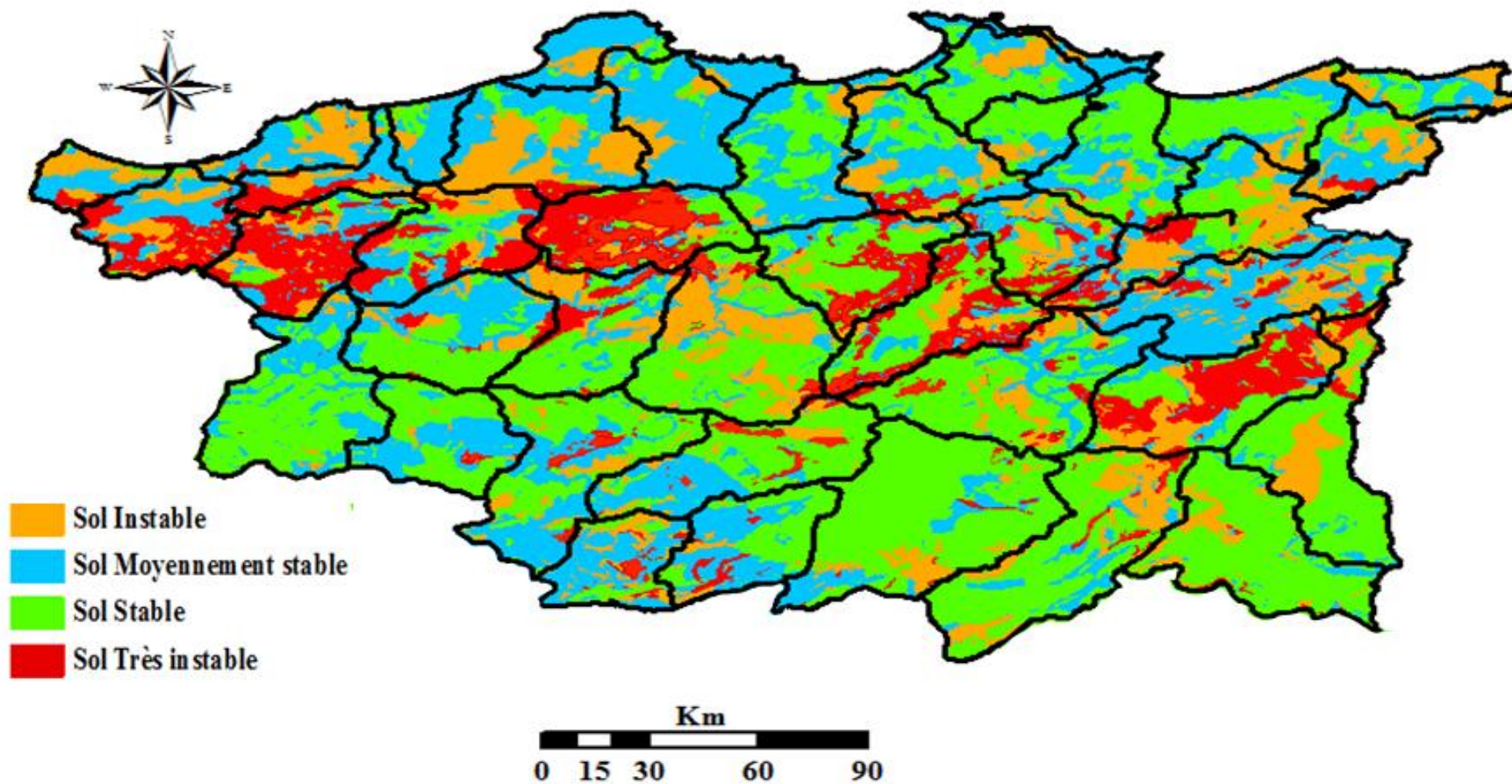
**Sol instable** : cette catégorie concerne les monts de la bande côtière, tels que les monts de Seddouk et ceux d'Ighil Ali (Bejaia) et les chaînes de Tamasguida-Zouagha (Mila), aussi les monts de Constantine et les massifs de l'Eddough et Chetaibi (Annaba) et ceux de Boucheggouf (Tarf) ;

**Sol très instable** : cette instabilité menace la chaîne tellienne qui sépare le littoral des plaines intérieures (bassin de Kebir-Rhumel, la Seybouse, la partie Nord de la Medjerda). Elle touche aussi les hautes plaines de N'gaous et les massifs des Aurès.





**Figure 42:** Carte d'occupation du sol. (Conçue par l'auteur sur la base de données de BNEDER 2010).



**Figure 43:** Carte d'érosion. (Conçue par l'auteur sur la base de données de BNEDER 2010).

## V.2 Contexte climatique

### V.2.1 Température

L'Algérie est caractérisée par un climat de type méditerranéen, extra tropical tempéré, indiqué par une longue période de sécheresse estivale (3 à 4 mois sur le littoral, 5 à 6 mois au niveau des hautes plaines et plus de 6 mois au niveau de l'atlas Saharien). Cette caractéristique est due essentiellement à l'influence de trois paramètres conjugués : la mer, le relief et l'altitude.

Des études réalisées par l'Office National de la Météorologie (ONM) sur l'évolution des températures ont révélé que celles-ci sont en hausse depuis 1990, (**figure 44**).

### V.2.2 Climat

Les facteurs climatiques dans leur ensemble permettent d'expliquer quantitativement l'intensité et la variabilité des composantes du régime hydrologique, dans le temps et dans l'espace, en interaction avec les conditions physico-géographiques de l'écoulement.

La climatologie de la région d'étude présente dans l'ensemble les mêmes caractéristiques que celles du climat méditerranéen, qui se distingue par un hiver froid et humide et un été chaud et sec. Mais des variations s'observent d'une région à l'autre, (**figure 45**). On distingue quatre étages bioclimatiques.

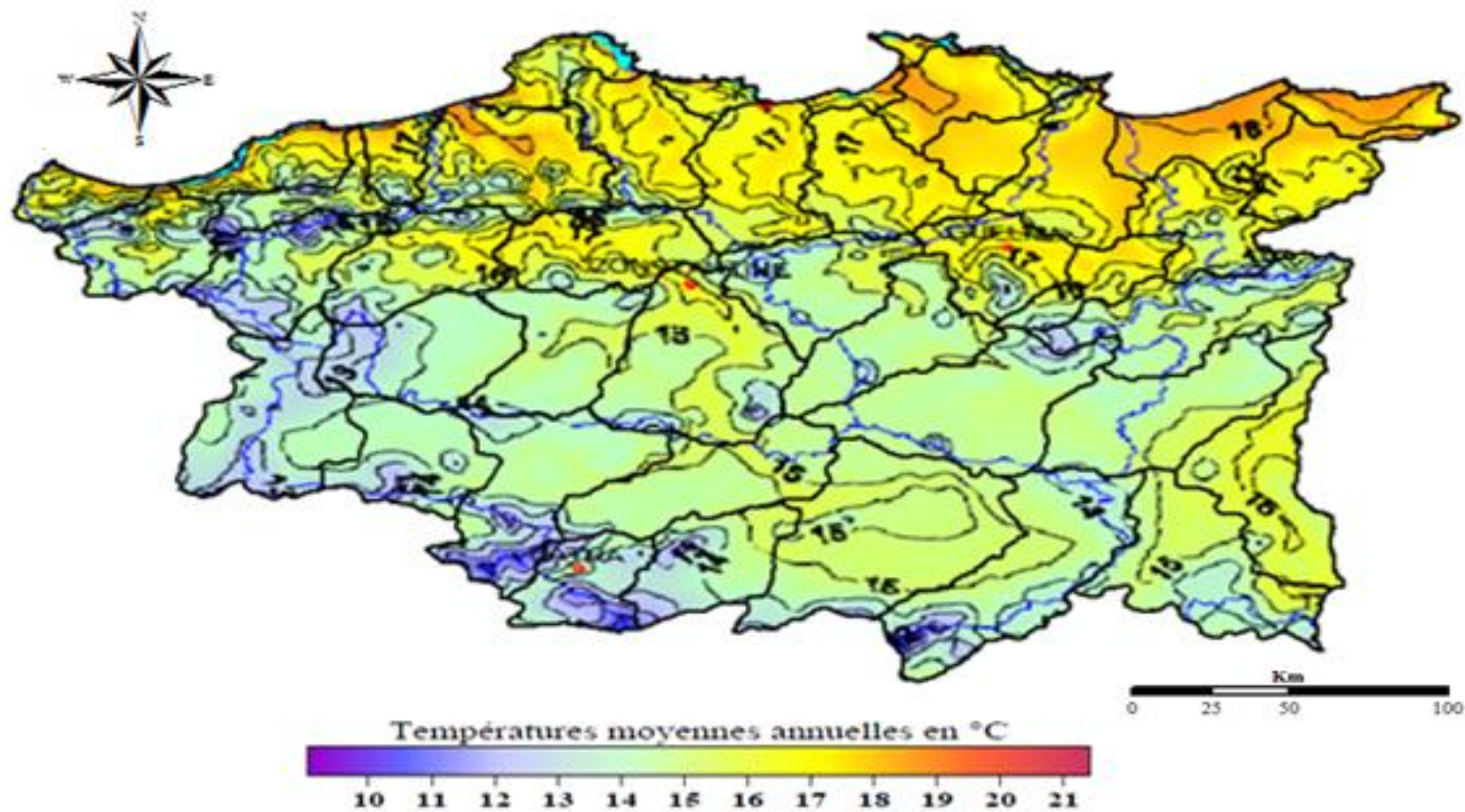
**Climat humide :** Il s'agit de la bande côtière relative au bassin des Côtiers Constantinois notamment l'Ouest (de Bejaia jusqu'à Skikda) et la wilaya de Tarf ;

**Climat Sub-humide :** Ce climat caractérise la chaîne intérieure de l'Atlas Tellien, et les plaines de Gerbez et Annaba, ainsi que les piémonts de Ain-Berda ;

**Climat Semi-aride :** Cet étage bioclimatique couvre les hauts-plateaux notamment les hautes plaines de Chelghoum Laid, Oum-El-Bouaghi, Ain Beida, El-Madher, Chemora et Bir-El-Ater ;

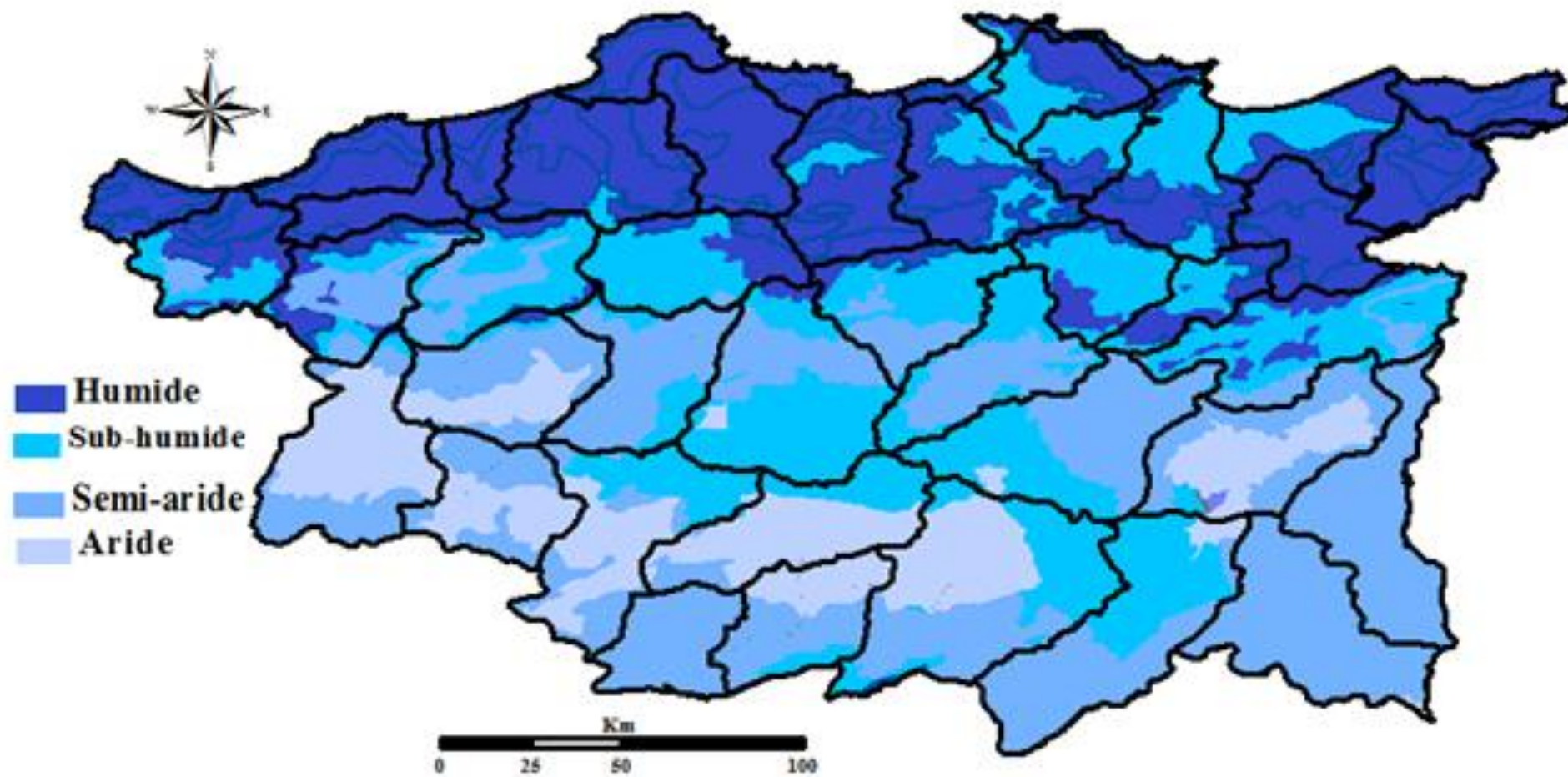
**Climat Aride :** Ce climat caractérise les Hauts Plateaux Constantinois (plaines de Batna, et les hautes plaines de Sétif et celles de Khenchela), une partie de la Medjerda (les hautes plaines de Sedrata –Taoura) et le Sud du sous bassin 1003 du Kebir-Rhumel.





**Figure 44:** Carte des températures moyennes annuelles. (Mebarki, 2005), traitée par l'auteur.





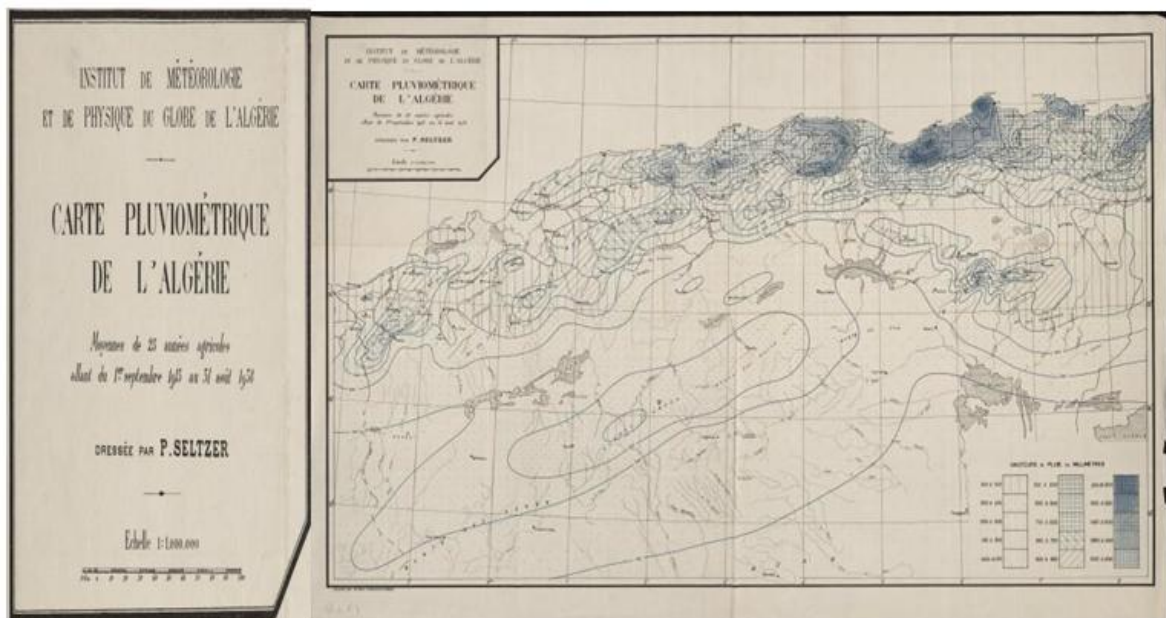
**Figure 45:** Carte climatologique. (Conçue par l'auteur sur la base de données de BNEDER 2010).

### V.2.3 Précipitation

La carte des précipitations présente un intérêt scientifique, dans les études des régimes pluviométriques. Elle se place en amont de toutes les études relatives au fonctionnement hydrologique. En effet, elle demeure le facteur le plus important dans la détermination des régimes hydrologiques des cours d'eau.

Plusieurs études ont été faites sur cette variable climatique. Selon (Mebarki, 2005), les travaux réalisés auparavant sont basés sur l'interpolation manuelle du contour des isohyètes, à partir des données mesurées aux stations, en s'appuyant sur un fond hypsométrique. Les documents de références « cartes pluviométriques » utilisées en Algérie sont :

- la carte pluviométrique dressée par (Seltzer P, 1946) a été établie à l'échelle du 1/1000 000, d'après les moyennes brutes de 25 années climatiques, du 1<sup>er</sup> septembre 1913 au 31 août 1938 au niveau de l'Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie, (figure 46).

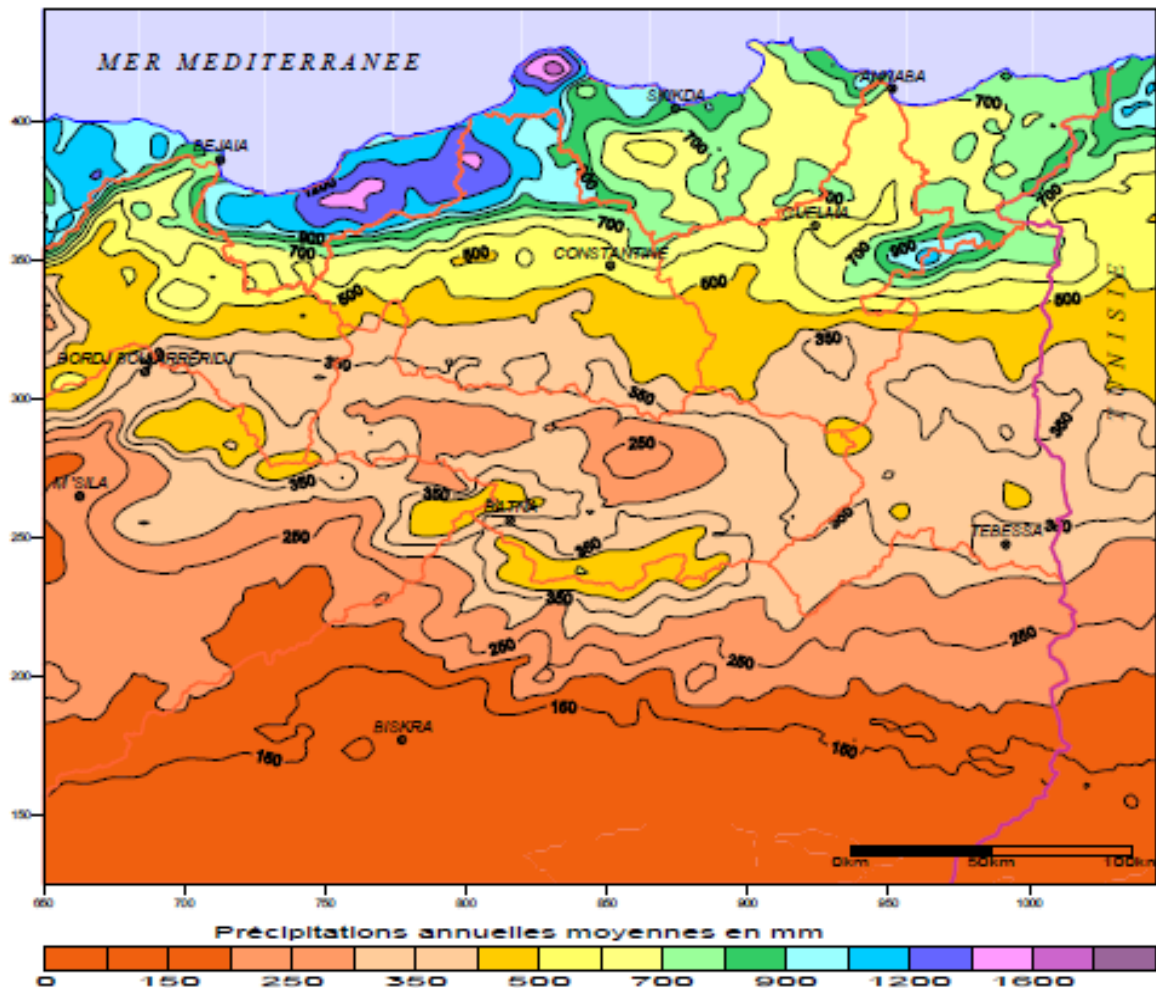


**Figure 46:** Carte pluviométrique de l'Algérie de (Seltzer, 1938)

- la carte pluviométrique dressée par Gaussen H. (1948) a été établie à l'échelle du 1/500 000, d'après la moyenne annuelle, ramenée à la période (1913-1947) avec la collaboration de M.F.Bagnouls ; publiée par le gouvernement général de l'Algérie, Inspection générale de l'agriculture d'Alger en 1948.

- La carte au 1/500 000 de (Chaumont M. et Paquin C, 1971) représente les précipitations annuelles moyennes ramenées à une période de 50 ans (1913-1963).
- la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000 (moyennes de 60 ans : du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989).

Cette carte, réalisée par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H. en 1993) suivant une méthodologie proposée par J-P. Laborde (Université de Nice-Sophia Antipolis), a constitué le premier jalon d'une cartographie basée sur l'utilisation d'outils modernes à l'effet de répondre aux besoins des projeteurs et différents utilisateurs avec les moyens actuels, (figure 47).



**Figure 47:** Carte des précipitations moyennes annuelles de l'Est Algérien. (Extrait ANRH, 1993).

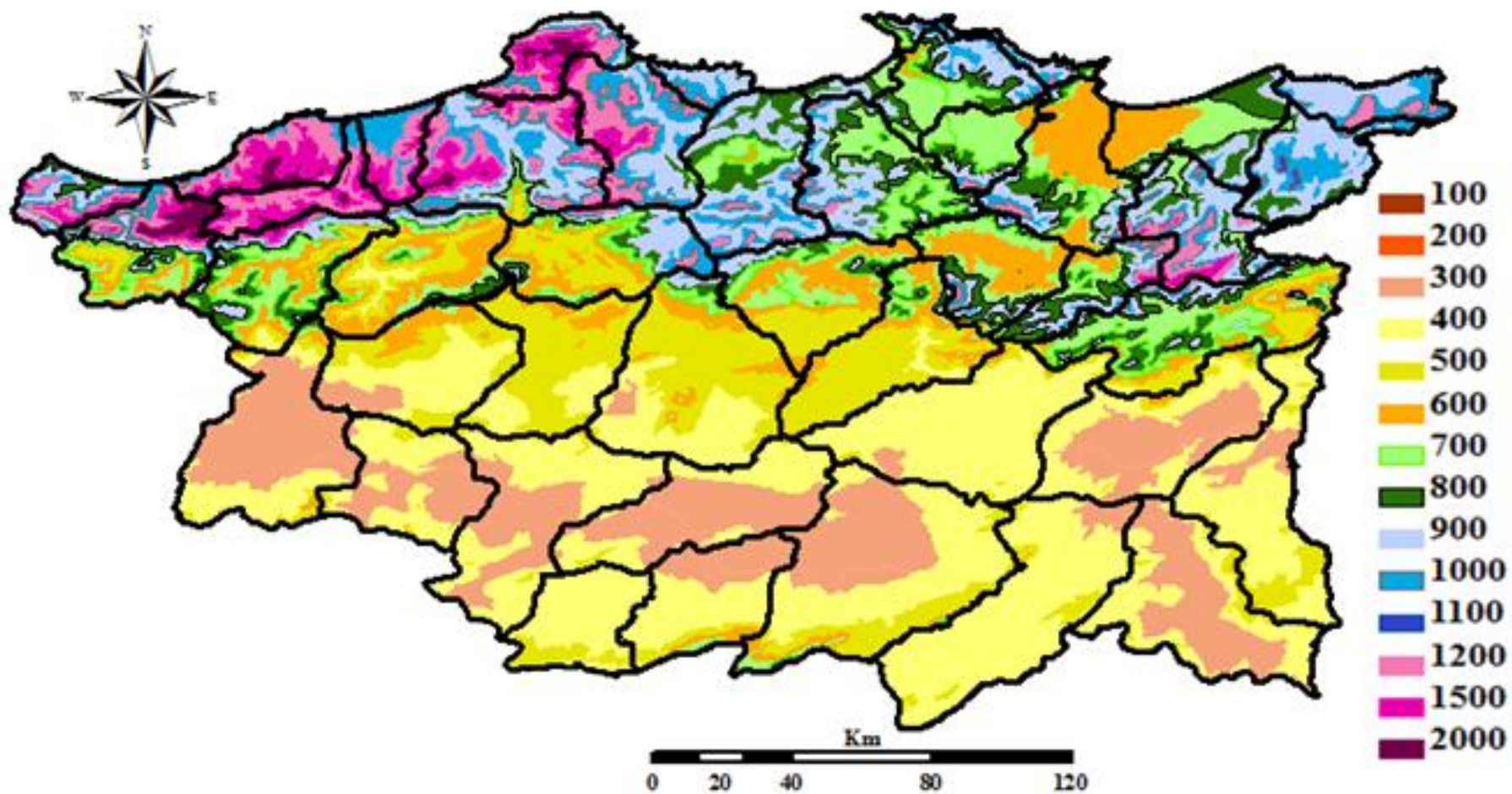
Cette carte des précipitations permet de passer d'une connaissance ponctuelle à une connaissance spatiale du phénomène. A l'aval, elle permet l'estimation correcte des lames

précipitées pour le calcul des bilans hydrologiques des bassins. Elle représente une base de données pluviométrique à l'échelle des bassins versants considérés, (**figure 48**).

Les précipitations du Nord-Est Algérien se caractérisent par une forte variabilité spatiotemporelle due à l'existence de plusieurs gradients spatiaux qui guident la répartition temporelle des événements :

- Un gradient longitudinal : la pluviosité augmente des bassins des Côtiers Constantinois Est «Annaba» (1000 mm/an) vers ceux de l'Ouest « Jilel » (1500 mm/an). Ce gradient est dû au phénomène des faibles précipitations attribuées aux perturbations pluvieuses du Nord de la Tunisie.
- Un gradient latitudinal : les précipitations moyennes annuelles varient de 300 mm au niveau des bassins des Hauts Plateaux Constantinois « Oum El Bouagui, Batna, Khenchela » et ceux de la Medjerda « Tebessa) à 1500 mm aux bassins Côtiers Constantinois Ouest « Jijel, Collo ». Cette diminution du littoral où le climat humide vers les régions arides est dûe à la grande distance traversée par les dépressions qui se situent entre les deux chaînes atlasiques. L'exception est faite pour les massifs des Aurès où on enregistre près de 900 mm.
- Un gradient altitudinal universel qui varie en fonction de l'éloignement de la mer.





**Figure 48:** Carte des précipitations. (Conçue par l'auteur sur la base de données de BNEDER 2010)

### V.3 Contexte hydrographique

#### V.3.1 Réseau hydrographique

L'agencement du réseau devient fondamental pour considérer le chemin et le temps de transit depuis les zones sources jusqu'à l'exutoire. Ils constituent un des principaux agents de structuration du relief. Sur le plan hydrologique, les réseaux hydrographiques drainent les écoulements de surface et de sub surface et accélèrent les transferts de volume d'eau au sein des bassins. Ils constituent à ce titre l'un des paramètres importants dans la génération des pics de crue. Ils sont l'une des composantes principales de la réponse hydrologique d'un bassin versant aux précipitations.

Les cours d'eau côtiers appartenant aux trois bassins versants septentrionaux codés (03-10-14), et le bassin de la Medjerda codé (12) sont de type exoréique. Ils ont un écoulement relativement fourni, à titre d'exemple : Oued Mafragh, Kebir-Rhumel, Seybouse, Medjerda. Ces oueds prennent naissance dans la chaîne des monts de l'Atlas Tellien et se jettent dans la mer méditerranéenne, et dans les bassins Tunisiens pour oued Medjerda. Le chevelu hydrographique est très ramifié et très dense au Centre, à l'Ouest et moins dense à l'Est. Au Sud de la région du Tell, où se situe le bassin des Hauts-Plateaux Constantinois codé (07) prédominé par les petits cours d'eau à écoulement temporaires et caractérisé par un réseau hydrographique ramifié et moins dense à écoulement temporaire et à régime endoréique, ce caractère est bien une conséquence de la sécheresse. Ils seraient alors alimentés par des venues profondes mal connues, mais restent cependant sous la dépendance d'apports sporadiques d'eau de crue plus ou moins abondant. Les principaux oueds de ce bassin sont Chemora et Boulfreiss, (**figure 49**).



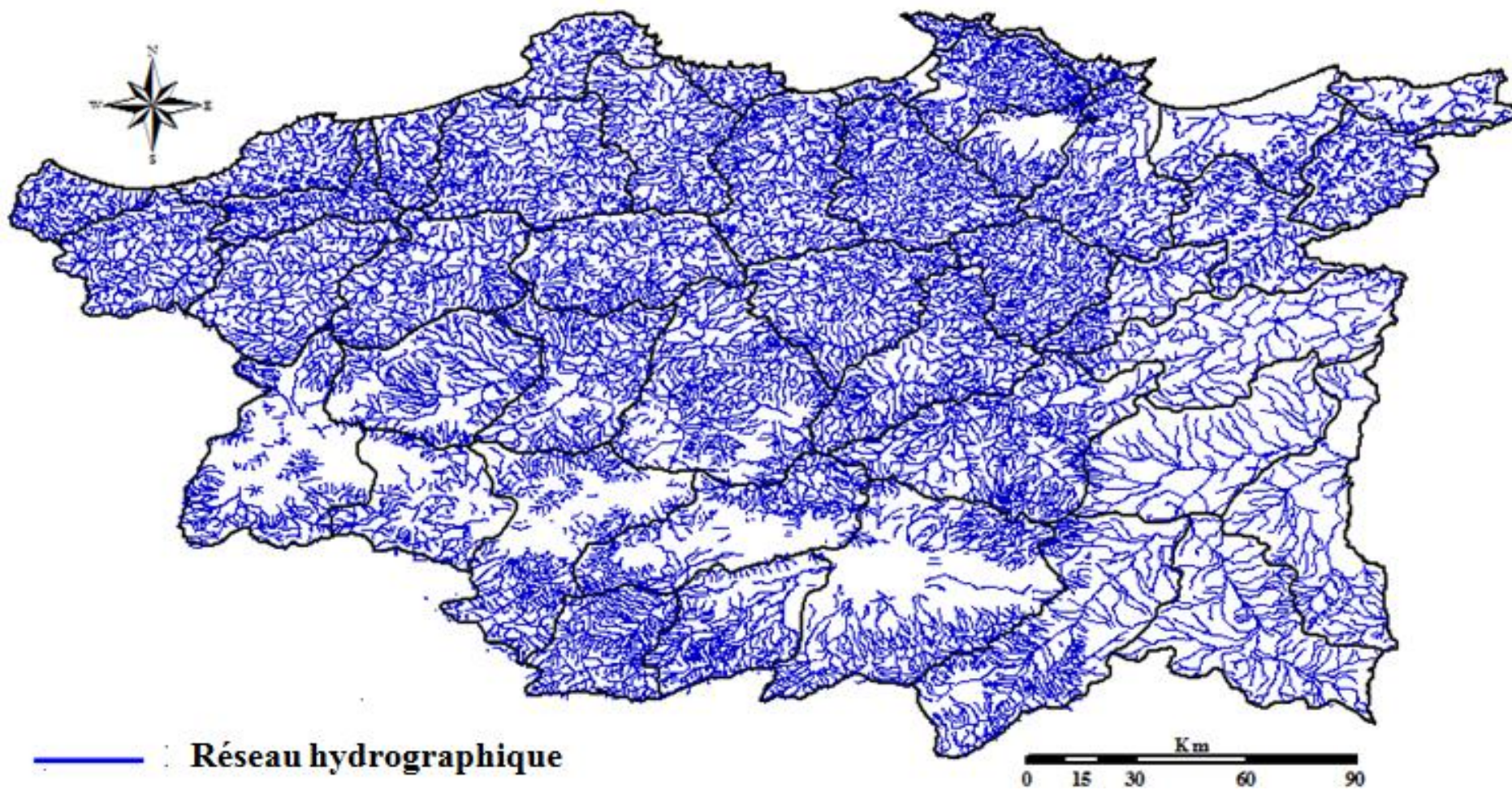
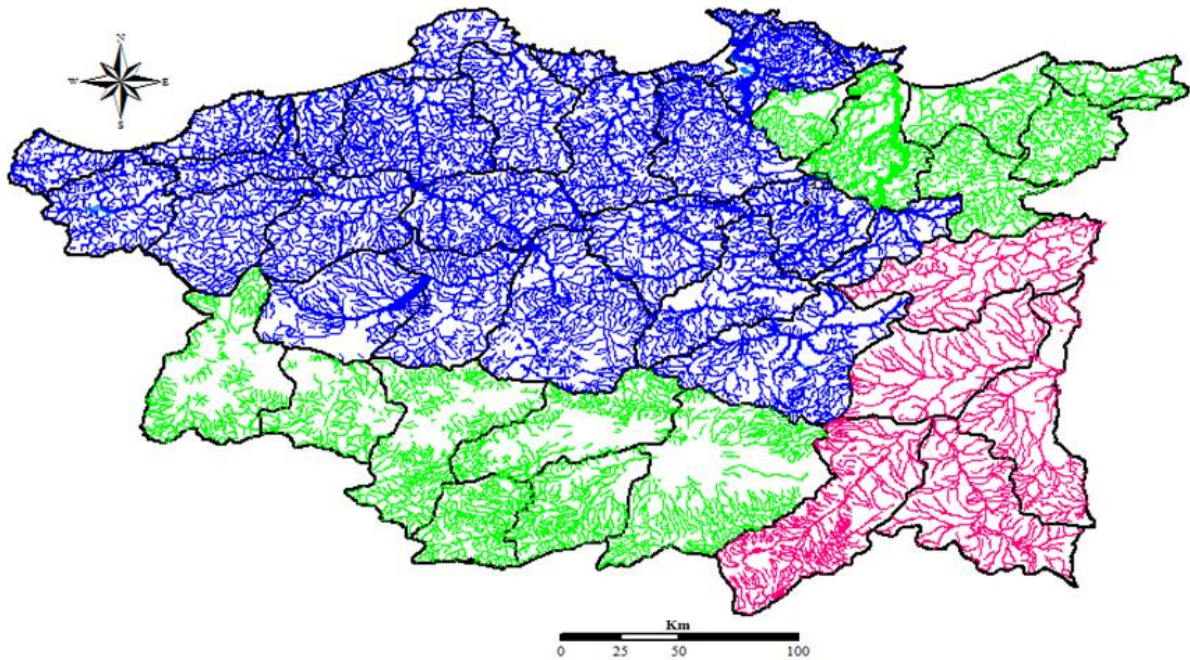


Figure 49: Réseau hydrographiques des bassins versants. (A.B.H Constantine, 2011)

## Conclusion

La représentation du réseau hydrographique des bassins versants du Nord-Est de l'Algérie nous a permis l'identification de trois zones différentes comme représentées sur la **figure 50**.



**Figure 50:** Représentation des trois zones du réseau hydrographique

Rouge : Zone I - Vert : Zone II - Bleue : Zone III

En tenant compte des contextes géomorphologiques et climatiques, la description et la représentation graphique des trois zones sont exposées ci-dessous :

1. La zone I (Bassin de la Medjerda) (12) qui est caractérisée par un réseau de drainage peu développé est constituée essentiellement des alluvions, calcaires, argiles et des marnes avec des altitudes moyennes à élevées, la majorité des pentes sont moyennes varient entre les classes 1 et 2 (0%-15%), une dénivelée moyenne (1400 m), un climat semi-aride et des précipitations annuelles qui ne dépassent pas les 400 mm à l'exception du premier bassin 1201 où les pluies annuelles peuvent atteindre les 800 mm), (**figure 51**).
2. La zone II constituée par le bassin Hauts Plateaux Constantinois), et l'Est du bassin des Côtiers Constantinois (0313 - 0315 – 0316 - 0317 - 0318) et le dernier bassin de la Seybouse (1406). Cette zone présente un réseau de drainage peu développé. Elle est caractérisée par l'existence des plans d'eau (lacs, chott, gareat,.) et constituée essentiellement des alluvions, calcaires, argiles et des marnes. Les pentes sont



moyennes varient entre les classes 1 et 2 (0%-15%). Au Sud de cette zone, des altitudes élevées (Altitude max=1636m), une dénivelée moyenne (1500 m), un climat entre aride et semi-aride et des précipitations annuelles varient entre (300-400 mm). Au Nord de cette zone, les altitudes et les pentes sont faibles, une dénivelée moyenne de (700 m), le climat est sub-humide à humide avec des pluies annuelles qui varient entre (600-1000 mm), (**figure 52**).

3. La zone III constituée par le bassin de Kebir Rhumel, l'Est et Centre du bassin des Côtiers Constantinois (0301-0302-0303-0304-0305-0306-0307-0308-0309-0310-0311-0312-0314) et les cinq bassins de la Seybouse. Cette zone présente un chevelu développé, et est constituée de multitudes types de sol des alluvions, calcaires, argiles, flysch, gneiss, granites, grés et des marnes. Les pentes sont très élevées, avec une dénivelée importante (2000 m). Un climat est sub-humide à humide, avec des précipitations annuelles qui dépassent les 1000 mm, (**figure 53**).

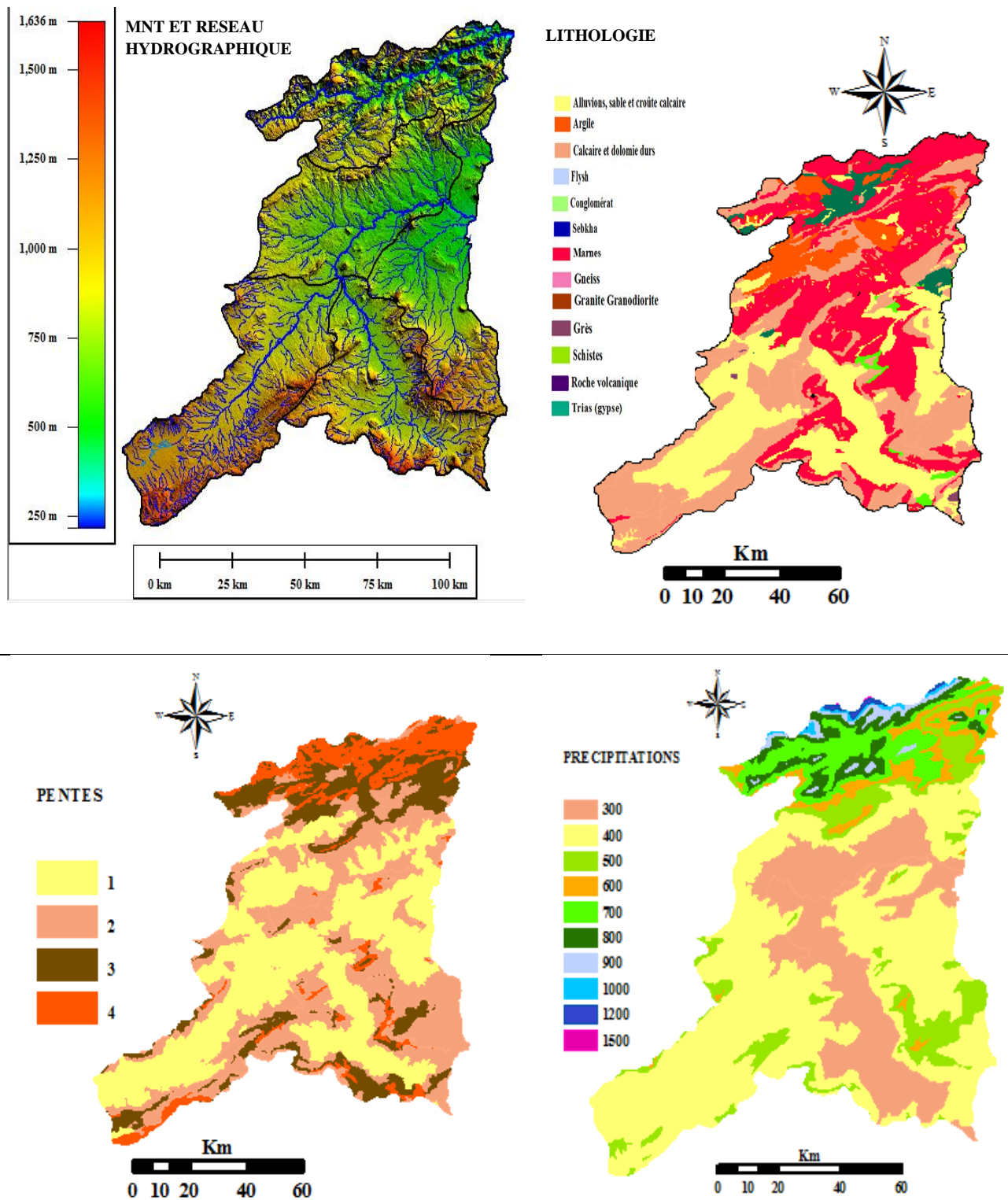
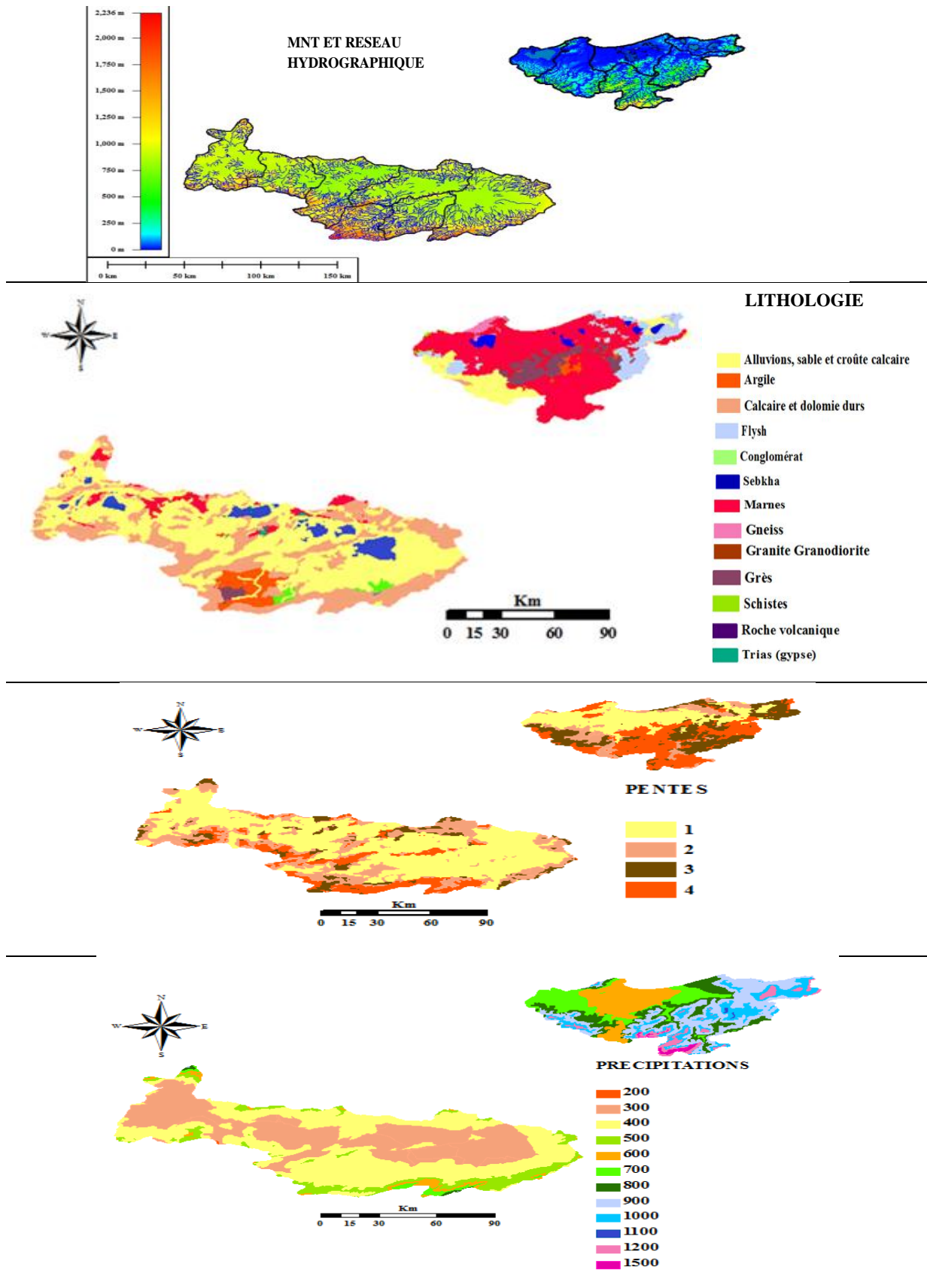


Figure 51: Zone I : Réseau hydrographique, altitudes, lithologie, pentes et précipitations



**Figure 52:** Zone II : Réseau hydrographique, altitudes, lithologie, pentes et précipitations

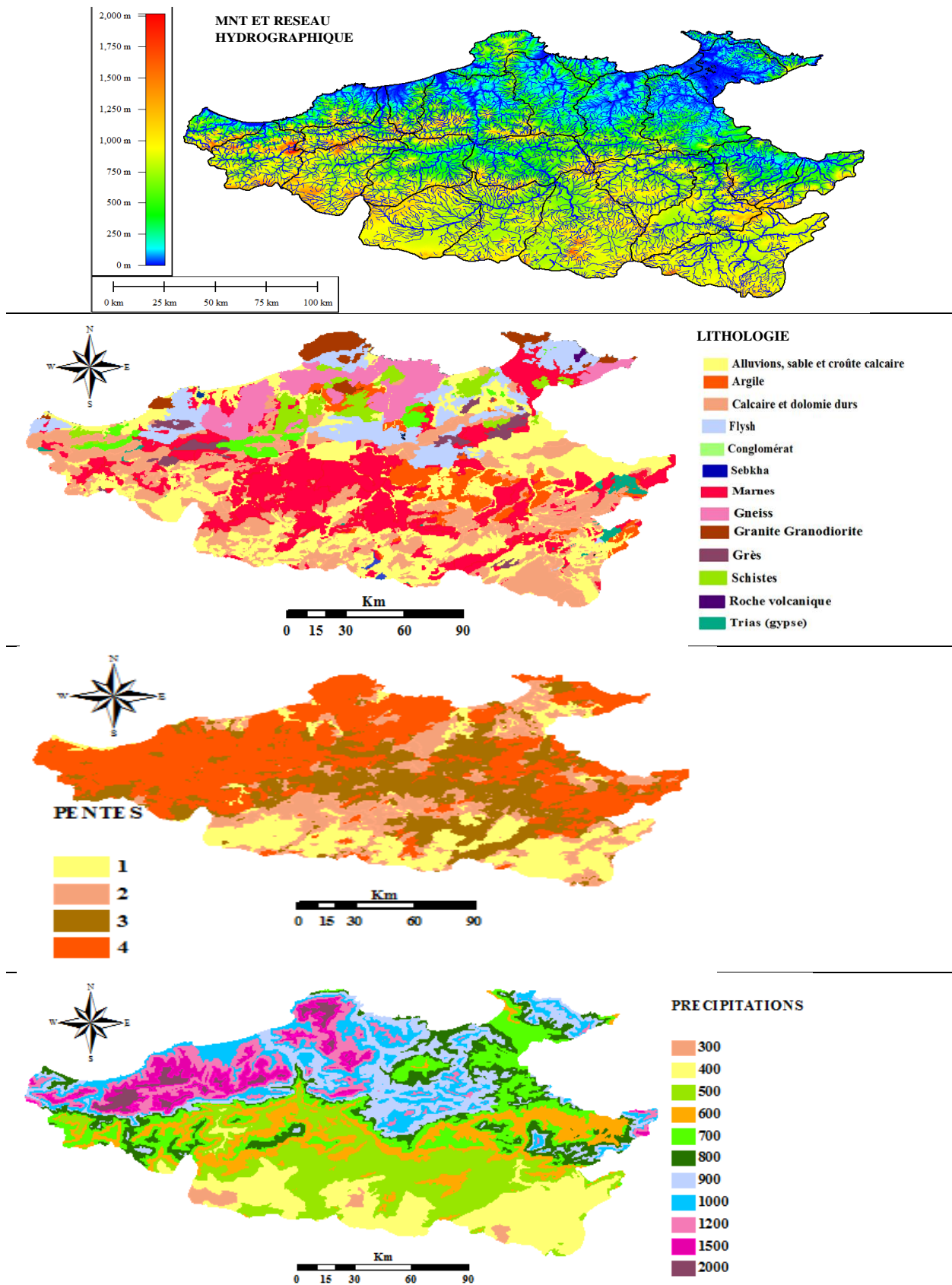


Figure 53: Zone III : Réseau hydrographique, altitudes, lithologie, pentes et précipitations

En synthétisant la description géomorphologique et climatique des bassins versants étudiés, l'influence des paramètres (pentes, lithologies, précipitations) est bien remarquée sur le développement des réseaux hydrographiques, et a pu permettre l'identification des trois zones. Donc derrière cette complémentarité entre la pluie et l'occupation du sol se cache le rôle joué par la variable géomorphologique qui a une influence à différentes échelles.

L'utilisation de la géomorphologie et la climatologie comme facteur discriminant semble pertinent à la vue de cette première typologie. Des indices morphométriques seront calculés sur les 43 bassins étudiés, non seulement pour affiner la caractérisation des portraits types, mais aussi pour confirmer cette distinction en menant une approche quantitative (détermination des descripteurs morphométriques) objet du chapitre VI, suivant.

**TROISIEME PARTIE :**

**INFLUENCE DE LA STRUCTURE DU RESEAU  
HYDROGRAPHIQUE SUR LA REPONSE HYDROLOGIQUE**

- **Chapitre VI : Détermination des descripteurs morphométriques.**
- **Chapitre VII : Etude des débits des crues**
- **Chapitre VIII : Application de la méthode Analyse en Composantes Principales**

## **VI. Détermination des descripteurs morphométriques**

### **Introduction**

Les descripteurs morphométriques sont des mesures créées en géomorphologie pour comparer les caractéristiques morphologiques des bassins versants. Afin d'étudier les particularités de la forme, réseau et du relief des cinq bassins, il est nécessaire de connaître les descripteurs morphométriques qui expliquent le cycle de transformation des pluies en écoulement et s'apprêtent à une analyse quantifiée.

Les descripteurs morphométriques des bassins versants influencent fortement sur leur réponse hydrologique, et notamment sur le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. En premier lieu, la taille du bassin (sa surface), sa forme, son élévation (ses altitudes), sa pente, type du sol, le couvert végétal. A ces facteurs s'ajoutent encore le type et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces indicateurs d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment aisément à partir des cartes adéquates ou en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques.

Les descripteurs morphométriques facilitent l'explication du comportement hydrologique des bassins. Ils aident à établir une classification des sous-bassins en fonction de leurs aptitudes vis à vis des processus hydrologiques.

L'information sur le relief est étudiée à travers un modèle numérique de terrain (M.N.T) ou Digital Elevation Model (D.E.M.), avec des cellules de grille d'environ 30 m sont acquises à partir du DEM global dérivée des données de Advanced Space borne et des émissions thermiques Reflection Radiometer (ASTER) satellite. Une résolution de 30 m est utilisée dans cette étude car c'est la taille des cellules de la grille la plus courante pour l'analyse de la surface de la terre et pour ce type de calcul.

Ces descripteurs ont été classés en trois types principaux :

- 1- Les descripteurs de forme.
- 2- Les descripteurs de réseau.
- 3- Les descripteurs de volume.

Toutefois il existe des descripteurs nommés croisés plus synthétiques, en croisant deux des trois types principaux. Par exemple l'indice de pente global rapporte la valeur de la distance séparant les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin qui indique le volume à la longueur équivalente indiquant la forme du bassin. Ces descripteurs sont classés en trois types



secondaires : descripteurs forme et volume - descripteurs volume et réseau - descripteurs forme et réseau

### VI.1 Descripteurs de forme

Les descripteurs de forme ont été conçus pour pouvoir comparer des bassins de taille différente. La forme du périmètre est importante à mesurer car elle traduit le degré de compacité ou d'étalement d'un bassin, ce qui a des conséquences sur le chemin théorique que devraient prendre les écoulements de surface. Pour une même pluie, les bassins allongés ont tendance à favoriser les faibles débits de pointe. En revanche, les bassins en forme d'éventail ont un temps de concentration plus court et des débits de pointe plus élevés (Lambert, 1996).

Les descripteurs de forme couramment utilisés en hydrologie sont donnés dans le **tableau 6** :

**Tableau 6:** Descripteurs de forme

Descripteur de forme	Symbole / unité	Formule	Référence
Surface du bassin	S (Km <sup>2</sup> )	Automatique «global mapper»	
Périmètre du bassin	P (Km)	Automatique «global mapper»	
Coefficient de compacité	K <sub>c</sub>	$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot S}} = 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{S}}$	(Gravellius ,1914)
Rectangle équivalent	L <sub>eq</sub> (Km) l <sub>eq</sub> (Km)	$L_{eq} = \frac{K_c \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right]$	(Gravellius ,1914)
Rapport de circularité	R <sub>cir</sub>	$R_{cir} = 4\pi \cdot \frac{S}{P^2}$	(Miller ,1953)
Facteur de forme	F <sub>f</sub>	$F_f = \frac{S}{L_{bv}^2}$	(Horton ,1932)
Rapport d'élongation	Re	$R_e = \frac{2 \cdot R}{L_b}$	(Schumm ,1956)
Rayon du cercle	R (Km)	$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$	
Indice de pente global	I <sub>pg</sub> (m/Km)	$I_{pg} = \frac{D_H}{L_{eq}}$	Puech
Indice de pente de Roche	I <sub>pr</sub> (m/Km) <sup>1/2</sup>	$I_{pr} = \frac{1}{(L_{eq})^{1/2}} \sum_{i=1}^n [b_i \cdot (a_i - a_{i-1})]^{1/2}$	Roche

D<sub>H</sub> : Distance séparant les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin versant

### VI.1.1 Coefficient de compacité « Kc »

Le coefficient de compacité (Strahler, 1964) est le rapport entre le périmètre du BV et le périmètre d'un cercle ayant la même superficie que ce BV :

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot S}} = 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots(10)$$

### VI.1.2 Facteur de forme « Ff »

Le facteur de forme (Horton, 1945) représente l'aire du BV par rapport à sa longueur :

$$F_f = \frac{S}{L_{bv}^2} \dots\dots\dots(11)$$

Il est utilisé pour prédire l'intensité de l'écoulement à l'exutoire d'un BV. Le facteur de forme montre une relation inverse avec la longueur du bief principal et possède une relation directe avec le débit de pointe à l'exutoire du BV (Gregory et Walling, 1973). Un facteur de forme élevé (> 0,5) indique un BV de forme plutôt circulaire, et un débit de pointe élevé d'une durée relativement courte (Singh, 1992) ; (Reddy et al., 2004).

### VI.1.3 Rapport d'élongation « Re »

Défini par Schumm (1956), le rapport d'élongation correspond au rapport entre le diamètre d'un cercle possédant la même aire que le BV et la longueur de ce dernier :

$$L_e = \frac{2 \cdot R}{L_{bv}} \dots\dots\dots(12)$$

Un faible rapport d'élongation (< 0,55) indique un BV de forme allongée alors qu'un rapport d'élongation > 0,70 indique un BV large possédant une forte capacité d'infiltration et un faible ruissellement (Reddy et al., 2004) et (Mesa, 2006).

### VI.1.4 Rapport de circularité « Rcir »

Toujours en se référant à un bassin circulaire (Miller, 1953) a défini un indice de circularité, c'est le rapport entre la superficie du bassin étudié et celle du cercle dont la circonférence est

égale au périmètre du bassin, soit:  $R_{cir} = 4\pi \cdot \frac{S}{P^2} \dots\dots\dots(13)$

Il ne s'agit en fait que d'un avatar du coefficient de Gravellius puisqu'en comparant les équations des deux descripteurs on établit aisément que  $K_c^2 = 1/2 \cdot R_{cir}$ .

Les résultats des descripteurs de forme obtenus sont illustrés dans le **tableau 7**

**Tableau 7:** Valeurs des descripteurs de forme des bassins versants

Code	S (Km <sup>2</sup> )	P (Km)	Kc	Leq (Km)	leq (Km)	Rcir -	Ff -	Re -	R (Km)	Ipg (m/Km)	Ipr (m/Km) <sup>1/2</sup>
1201	1506	233	1,68	101,69	14,81	0,174	0,248	0,562	21,90	5,310	28,45
1202	1880	235	1,52	98,39	19,11	0,214	0,254	0,569	24,47	3,659	28,37
1203	1568	230	1,63	99,19	15,81	0,186	0,311	0,630	22,35	7,259	30,86
1204	1506	193	1,39	76,92	19,58	0,254	0,356	0,674	21,90	6,240	27,70
1205	1415	252	1,88	113,54	12,46	0,140	0,566	0,849	21,23	6,342	28,07
0301	386	94	1,34	36,39	10,61	0,274	0,618	0,887	11,09	30,774	63,88
0302	915	147	1,36	57,62	15,88	0,266	0,706	0,948	17,07	18,743	50,65
0303	574	147	1,72	64,62	8,88	0,167	1,302	1,288	13,52	15,476	43,64
0304	488	152	1,93	68,92	7,08	0,133	0,195	0,499	12,47	16,251	45,21
0305	361	92	1,36	35,96	10,04	0,268	0,578	0,858	10,72	27,808	50,62
0306	485	142	1,81	63,34	7,66	0,151	0,776	0,994	12,43	11,840	38,61
0307	986	157	1,40	62,80	15,70	0,251	0,587	0,864	17,72	10,987	28,18
0308	201	87	1,72	38,24	5,26	0,167	1,189	1,231	8,00	14,120	39,71
0309	1167	170	1,39	67,78	17,22	0,254	0,528	0,820	19,28	12,097	37,75
0310	135	75	1,81	33,47	4,03	0,151	0,255	0,570	6,56	12,251	37,93
0311	1125	168	1,40	67,28	16,72	0,250	0,973	1,114	18,93	9,364	35,45
0312	723	134	1,40	53,48	13,52	0,253	0,452	0,759	15,17	7,853	33,20
0313	480	109	1,39	43,45	11,05	0,254	1,330	1,301	12,36	7,824	32,48
0314	226	181	3,37	87,93	2,57	0,043	0,102	0,361	8,48	7,506	30,21
0315	857	184	1,76	81,48	10,52	0,159	0,463	0,768	16,52	11,291	37,31
0316	734	163	1,68	71,19	10,31	0,173	0,635	0,899	15,29	9,552	35,32
0317	848	152	1,46	62,41	13,59	0,230	0,942	1,095	16,43	3,685	24,46
0318	432	125	1,68	54,59	7,91	0,174	0,593	0,869	11,73	6,595	28,06
1401	1740	221	1,48	91,48	19,02	0,224	1,271	1,272	23,54	2,842	22,92
1402	1173	190	1,55	80,41	14,59	0,204	0,326	0,644	19,33	6,964	33,11
1403	1108	167	1,40	66,95	16,55	0,249	0,426	0,737	18,78	8,962	35,38
1404	819	128	1,25	46,32	17,68	0,314	0,487	0,788	16,15	17,272	46,61
1405	556	131	1,56	55,48	10,02	0,203	0,579	0,859	13,31	17,665	45,22
1406	1060	176	1,51	73,60	14,40	0,215	0,573	0,854	18,37	7,065	29,33
1001	1068	157	1,35	60,99	17,51	0,272	0,341	0,659	18,44	19,840	42,85
1002	1103	158	1,33	60,88	18,12	0,277	0,339	0,658	18,74	13,797	43,43
1003	1242	151	1,20	51,28	24,22	0,342	0,396	0,710	19,89	17,551	31,06
1004	1151	182	1,50	75,82	15,18	0,218	0,320	0,638	19,15	5,539	28,63
1005	1836	188	1,23	66,31	27,69	0,326	0,654	0,912	24,18	7,540	33,71
1006	1091	145	1,23	51,19	21,31	0,326	0,374	0,690	18,64	14,848	43,79
1007	1340	170	1,30	64,09	20,91	0,291	0,838	1,033	20,66	16,226	43,10
0701	1558	212	1,50	88,37	17,63	0,218	0,736	0,969	22,28	5,658	24,78
0702	991	147	1,31	55,71	17,79	0,288	1,178	1,225	17,77	7,898	31,60
0703	1605	230	1,61	98,75	16,25	0,191	1,310	1,292	22,61	7,089	27,92
0704	757	135	1,37	53,30	14,20	0,261	0,374	0,690	15,53	15,761	44,89
0705	1369	194	1,47	79,86	17,14	0,228	0,647	0,908	20,88	4,258	24,86
0706	975	144	1,29	53,92	18,08	0,295	0,361	0,678	17,62	10,386	34,49
0707	2369	242	1,39	96,43	24,57	0,254	0,704	0,947	27,47	5,392	26,79

Les chiffres en vert et en rouge représentent les valeurs extrêmes (Min et Max) des descripteurs de forme.

Les sous bassins ayant les valeurs extrêmes des descripteurs de forme sont présentés sur la **figure 54**.

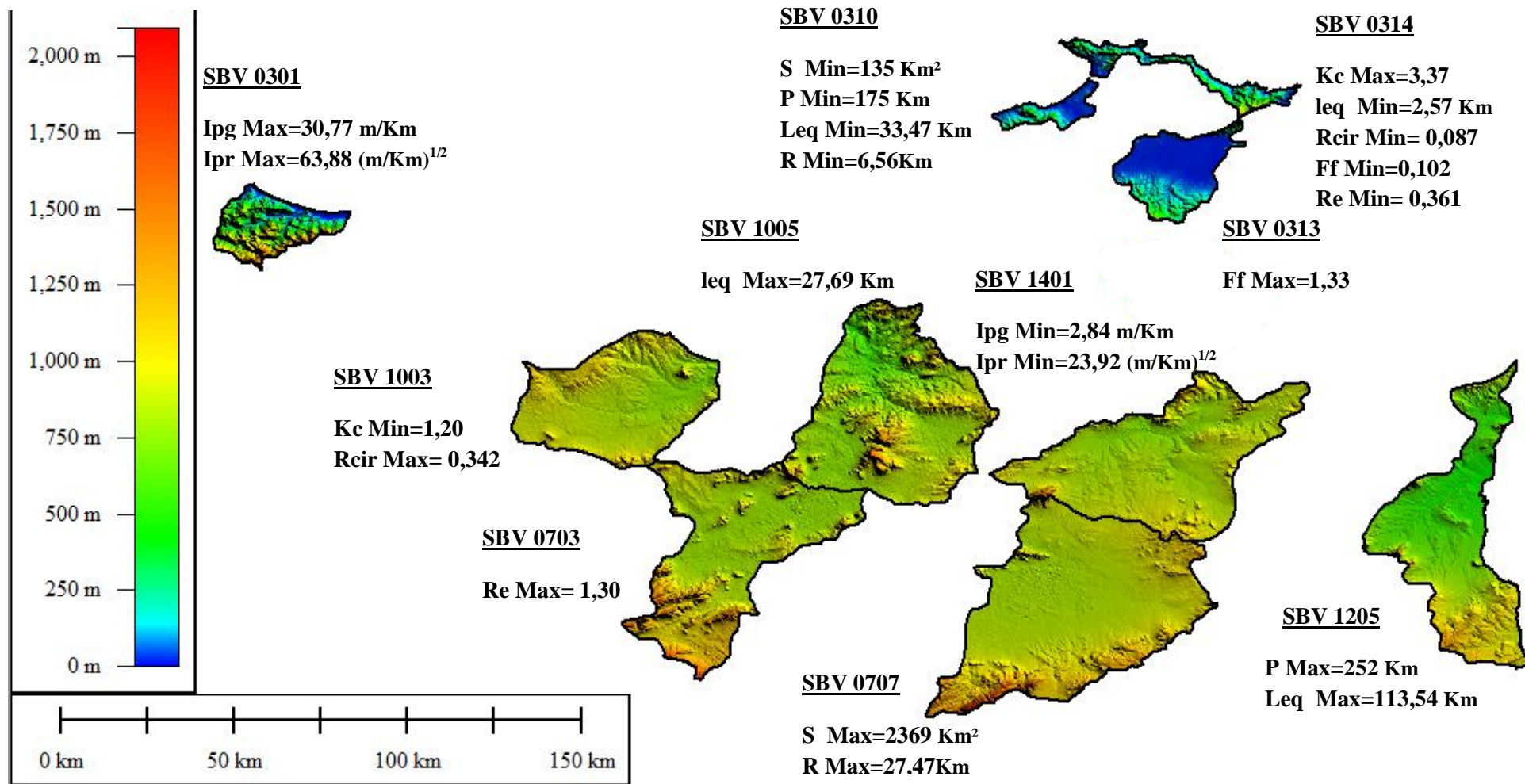


Figure 54: Sous bassins ayant les valeurs extrêmes des descripteurs de forme.

## VI.2 Descripteurs de réseau

Le réseau hydrographique se caractérise par son type, sa hiérarchie, sa densité, l'orientation des drains, leur longueur. Le chevelu a plusieurs dénominations suivant la manière dont il est organisé dans l'espace.

La mise en place d'un réseau hydrographique se fait sous le contrôle des contraintes structurales (Bravard et Petit, 2000). Pour des conditions lithologiques peu perméables, le réseau est souvent dendritique, le chevelu présente une forme arborescente et les différents cours d'eau divaguent dans n'importe quelle direction.

Les descripteurs de réseau indiquent le réseau hydrographique avec les affluents du bassin versant sont donnés dans le **tableau 8** :

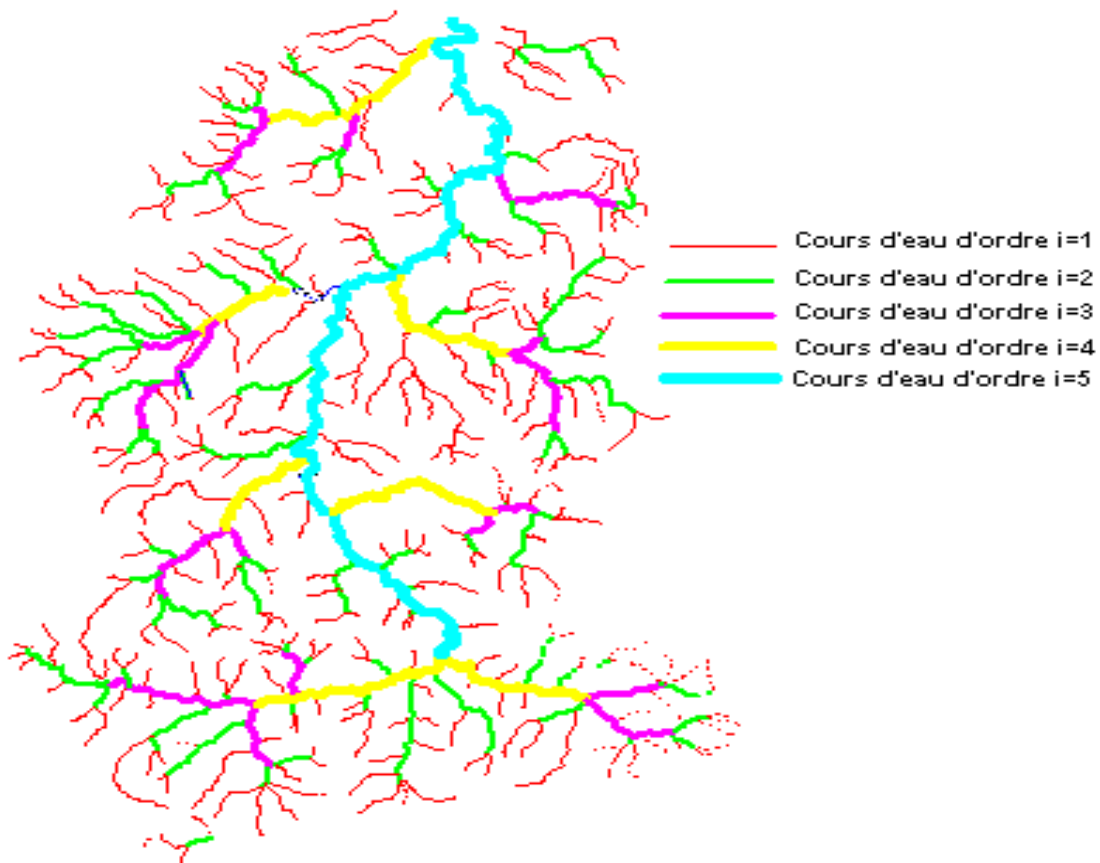
**Tableau 8:** Descripteurs de réseau

Descripteurs de réseau	Symbole / unité	Formule	Référence
Longueur du talweg principal	$L_t$ (Km)	Logiciel ArcGis10.0	
Ordre du cours d'eau	$i$	Classification	Strahler, (1957)
Rapport de confluence	$R_c$	$R_c = \frac{N_i}{N_{i+1}}$	Schumm, (1956)
Rapport des longueurs	$R_l$	$R_l = \frac{\bar{L}_{i+1}}{L_i}$	Horton, (1945)
Longueur de ruissellement	$L_r$ (Km)	$L_r = \frac{1}{2.D_d}$	Horton, (1945)
Coefficient de sinuosité	$C_s$	$C_s = \frac{Long_{alignée}}{Long_{réelle}}$	
Dimension fractale	$Df$	$Df = \left[ \max \frac{Ln(Rc)}{Ln(Rl)} \right]$	La barbera et Roth, 1994
Pente du cours d'eau	Ptce (%)	$Ptce = \Delta y / \Delta x$	Baulig, 1928
Coefficient de boisement	$C_b$	$C_b = \frac{S_{Boisée}}{S_{TotaleBV}}$	

### VI.2.1 Ordre du cours d'eau « i »

Un moyen de tenir compte de la structure du réseau hydrographique consiste à faire la classification des tronçons d'un cours d'eau de l'amont vers l'aval, selon la méthode de Strahler par exemple. Cette schématisation du réseau permet de définir les types de chemins que l'écoulement de surface peut emprunter pour transiter dans le bassin versant et sert de point de départ à la description géomorphologique des bassins versants (Rodriguez- Iturbe et Valdes, 1979). Selon la schématisation de (Strahler, 1957), les cours d'eau sans affluent reçoivent l'ordre 1 ; le confluent entre deux cours d'eau d'ordre  $i$  prend l'ordre  $i+1$ , alors que le confluent de deux cours d'eau d'ordres différents conserve l'ordre le plus élevé des deux, (figure 55). L'ordre d'un cours d'eau est attribué à sa surface drainante et l'ordre du bassin.

Pour débiter la classification de Strahler, il s'agit d'identifier les cours d'eau n'ayant pas d'affluents et leur attribuer l'ordre 1, puis de suivre les principes ci-dessus de la classification de Strahler.



**Figure 55:** Classification d'un réseau hydrographique (SBV0309) selon Strahler



**VI.2.2 Rapport de confluence et rapport des longueurs « Rc et RI »**

Sur la base de leurs théories sur l'ordonnement des cours d'eau (Horton et Strahler, 1957) ont proposé des lois concernant la relation entre des cours d'eau, d'une part, et le nombre et la longueur moyenne des cours d'eau d'autre part.

Soit ( $N_i$ ) le nombre de cours d'eau d'ordre  $i$  d'un bassin versant, ( $\bar{L}_i$ ) la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre  $i$ .

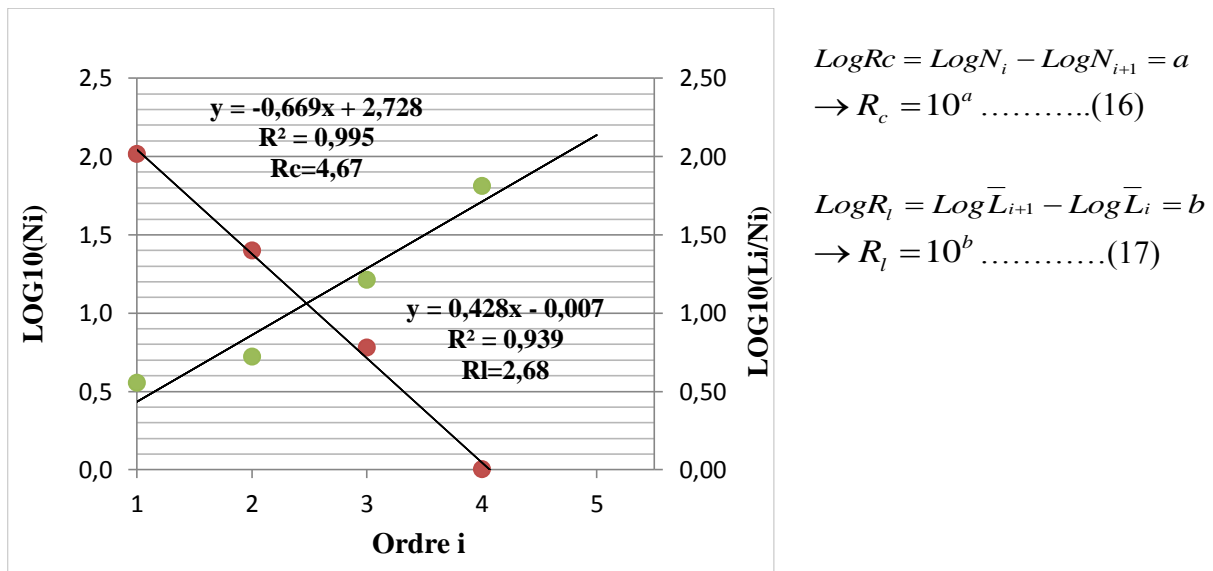
Horton a proposé deux relations qui s'observent en général indépendamment de l'ordre  $i$  :

Loi des nombres  $R_c = \frac{N_i}{N_{i+1}}$  .....(Schumm, 1956) .....(14)

Loi des longueurs :  $R_l = \frac{\bar{L}_{i+1}}{\bar{L}_i}$  .....(Horton, 1945).....(15)

Il arrive très souvent que les valeurs des rapports ( $R_c$ ) et ( $R_l$ ) ne soient pas constantes, sans doute du fait des incertitudes qui entourent la détermination des valeurs du nombre des cours d'eau et leurs longueurs tributaires.

Au vu de cette variabilité, les lois  $R_c$  et  $R_l$  sont dans ce cas déterminées par voie graphique en portant  $N_i$ ,  $L_i$  et  $i$  sur un graphique semi-logarithmique comme le montre la **figure 56**. La pente de la droite moyenne permet de déterminer la raison de la progression géométrique.



**Figure 56:** Représentation graphique de Rapport de confluence et des longueurs ( $R_c$  et  $R_l$ )

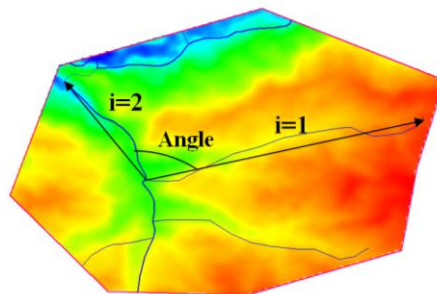
### VI.2.3 Longueur de ruissellement « Lr »

La longueur de ruissellement (Lr) est la longueur de l'eau sur le sol avant qu'il ne soit concentré dans des canaux de flux définis. La valeur généralement plus élevée de Lr est indicative d'un faible relief et la valeur faible de Lr est un indicateur d'un fort relief.

### VI.2.4 Dimension fractale « Df »

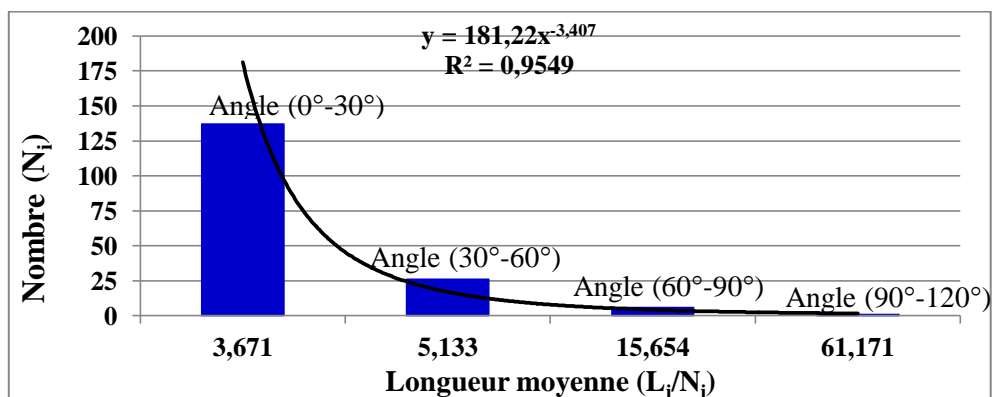
D'après (Velde et al., 1990), la dimension fractale (Df) est similaire l'exposant de la loi de puissance. Ce descripteur a pour but de fournir un système de classification pour les types de réseaux hydrographiques. Pour déterminer ce descripteur trois étapes sont à suivre :

- L'angle de jonction entre le cours d'eau primaire (ordre  $i=1$ ) et celui relatif à un ordre ( $i=2$ ) est la clé caractéristique qui peut déterminer le type de réseau, (**figure 57**), ces angles de jonction sont classés à des groupes de différentes fourchettes : ( $0^\circ - 30^\circ$ ), ( $30^\circ - 60^\circ$ ), ( $60^\circ - 90^\circ$ ), ( $60^\circ - 120^\circ$ ).



**Figure 57:** Angles de jonction entre les cours d'eau

- La répartition des longueurs des affluents secondaires dans chaque plage d'angles révèle que les histogrammes cumulatifs suivent une loi de puissance impliquant les systèmes fractals, (**figure 58**).



**Figure 58:** Histogramme du nombre des cours d'eau à la longueur moyenne du Sbv 1201 (pris comme exemple).

La dimension fractale est estimée par la distribution des longueurs pour les différents réseaux en utilisant l'équation suivante d'après (Taha BMJ, 2015)

$$N_i = \frac{C}{L_i^{Df}} \dots\dots\dots(18)$$

Où

Ni : Nombre d'affluents secondaires,

Li : Longueur d'affluents secondaires,

C : Constante proportionnelle,

Df: Dimension fractale. En prenant le logarithme des deux côtés de l'équation. On obtient

$$\log(N_i) = \log(C) - D \log(L_i) \dots\dots\dots(19)$$

$$D_f = \left[ \log(C) - \frac{\log(N_i)}{\log(L_i)} \right] \dots\dots\dots(20)$$

(Shimazaki et Shinomoto , 2007) ont proposé la méthode suivante pour estimer la constante proportionnelle C.

$$C_n(\Delta) = \frac{2 \cdot \bar{K} - \nu}{(n\Delta)^2} \dots\dots\dots(21)$$

$$\bar{K} \equiv \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_j \dots\dots\dots(22)$$

$$\nu \equiv \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (K_j - \bar{K})^2 \dots\dots\dots(23)$$

K<sub>j</sub>: Nombres des cours d'eau de la plage d'angle j, 1 ≤ j ≤ 4

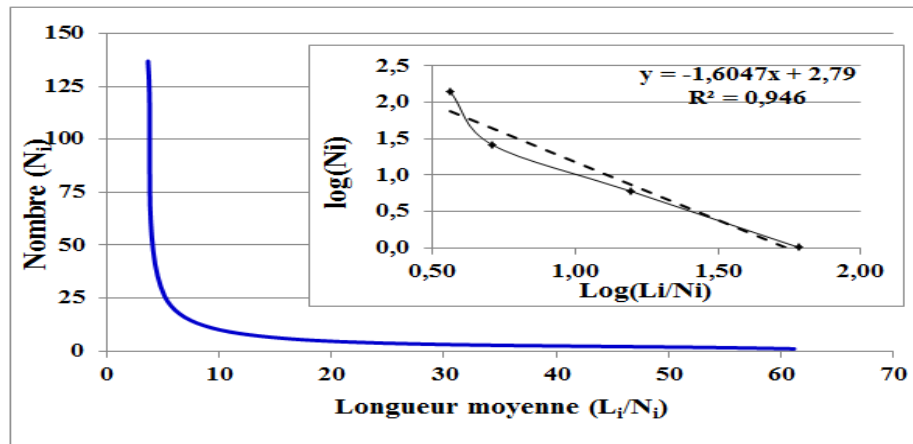
n= 4 dans l'exemple de la figure 58 (Nombre de plages d'angles)

$\bar{K}$  : Moyenne des nombres des cours d'eau de toutes les plages d'angle,

ν : Ecart type des nombres des cours d'eau de toutes les plages d'angle,

n(Δ) : Coordonnées du plus petit point des histogrammes Ni= f(Li/Ni).

La distribution des valeurs du nombre des cours d'eau à la longueur moyenne et leur fonction logarithmique est représentée sur la **figure 59** où le sous bassin 1201 a été pris comme exemple.



**Figure 59:** Distribution des valeurs du nombre des cours d'eau à la longueur moyenne et leur fonction logarithmique.

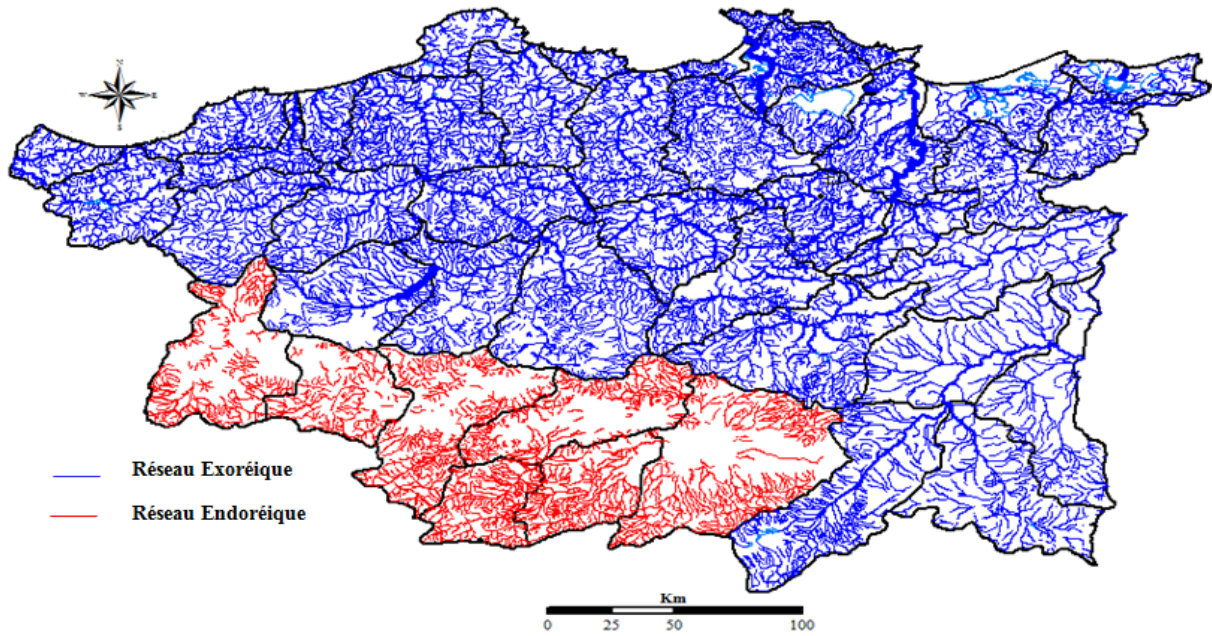
La complexité de la structuration des réseaux amène les chercheurs à se demander si les phénomènes sont distincts à travers les échelles. Plusieurs travaux ont été effectués pour déterminer la dimension fractale des cours d'eau, en s'appuyant sur les travaux de (B. Mandelbrot, 1985) et (P. La Barbera et R. Rosso ,1989), la dimension fractale des réseaux est déterminée en rapportant le logarithme népérien du rapport de confluence sur le rapport des longueurs. Cette méthode a été appliquée à cette étude.

$$Df = Max \frac{Ln(R_c)}{Ln(R_l)} \dots\dots\dots(24)$$

**VI.2.5 Classification des réseaux hydrographiques**

**VI.2.5.1 Classification selon l'endoréisme**

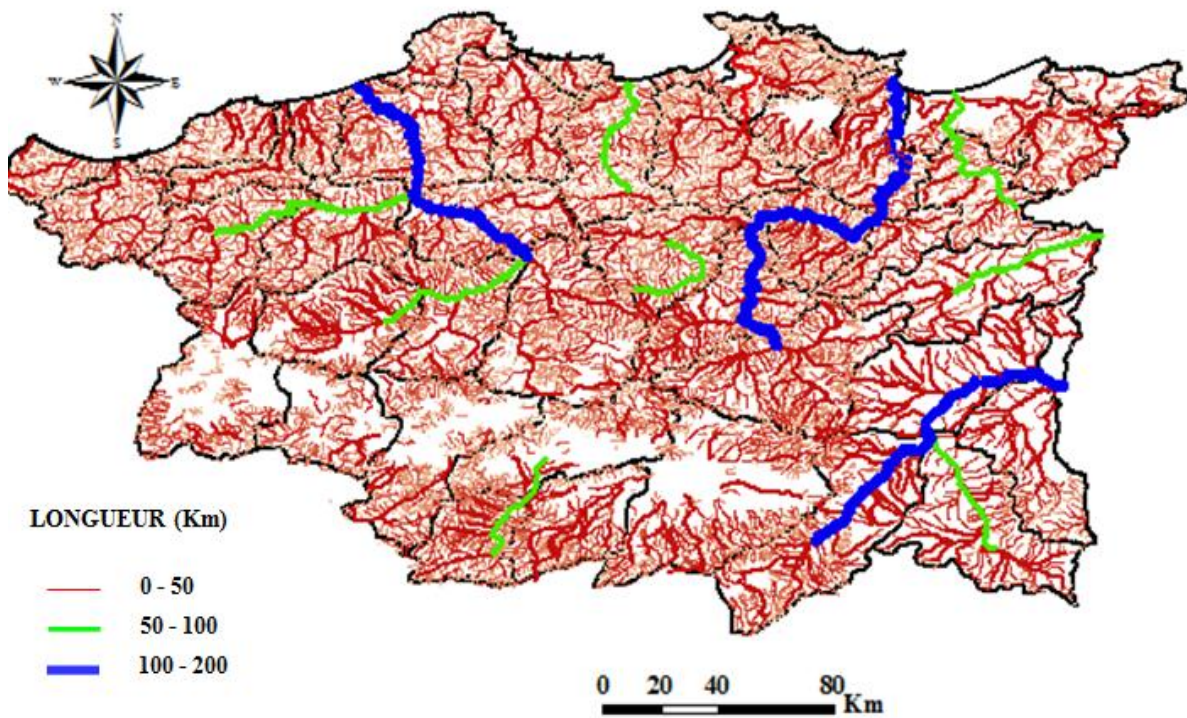
- Les réseaux hydrographiques de type endoréiques sont ceux qui décrivent un bassin versant clos retenant les eaux (un lac, une mare ou une accumulation souterraine) dans une dépression fermée, et ne peuvent quitter le bassin que par évaporation ou infiltration. Les réseaux endoréiques s'aperçoivent au niveau du bassin des Hauts Plateaux Constantinois (Codé 07).
- Les réseaux de types exoréiques sont ceux ayant des écoulements, qui sortent du bassin versant vers un océan ou une mer. Ce type des réseaux est observé au niveau des bassins des Côtiers Constantinois, Kebir Rhumel et de la Seybouse codés respectivement (03,10 et 14), où les écoulements se dirigent vers la mer méditerranée et au niveau du bassin de la Medjerda codé (12) où les cours d'eau du réseau hydrographique se jettent dans les bassins Tunisiens, (**figure 60**).



**Figure 60:** Classification des réseaux hydrographiques selon l'endoréisme.

**VI.2.5.2 Classification selon la longueur des cours d'eau**

D'après cette classification on peut déduire les plus longs cours d'eau qui sont : Kebir-Rhumel, Seybouse et Mellegue, (**figure 61**).

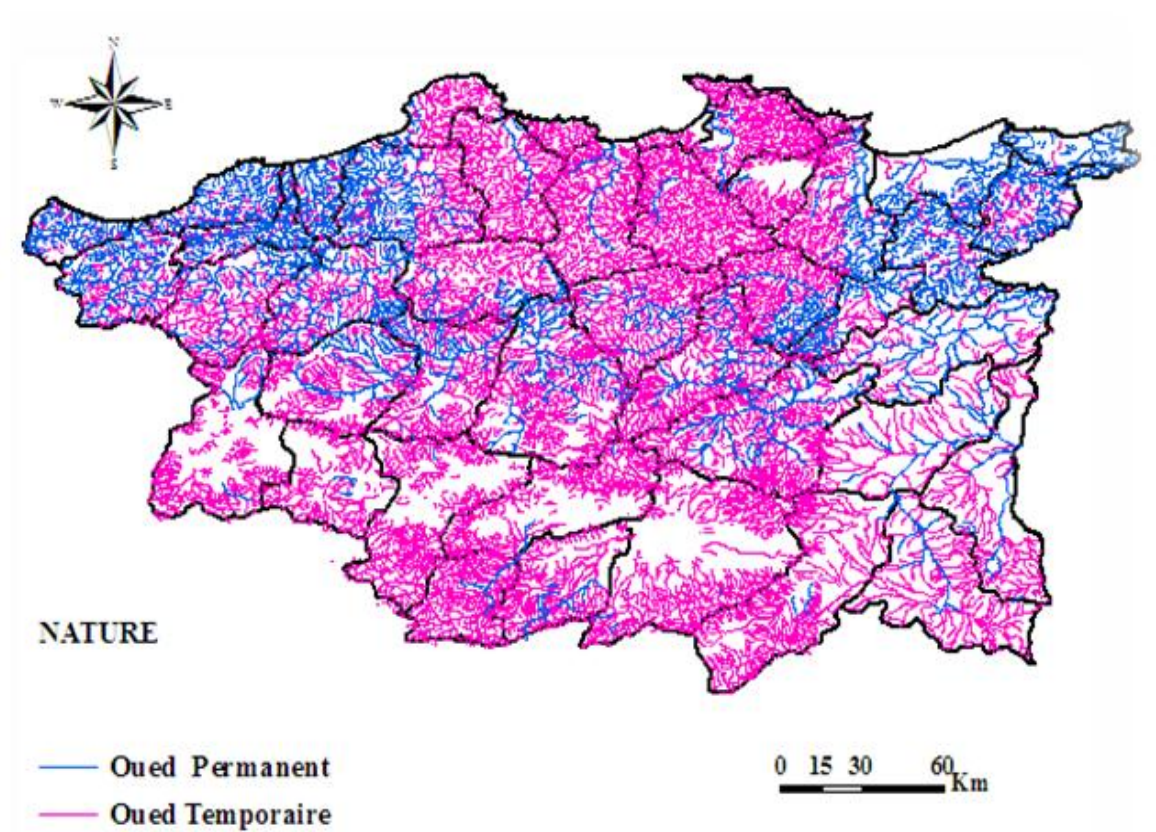


**Figure 61:** Classification des réseaux hydrographiques selon la longueur du cours d'eau.



### VI.2.5.3 Classification selon la nature des cours d'eau

La majorité des cours d'eau est de nature temporaire. Ceux qui sont permanents se situent au niveau du bassin (03) coté Est et celui de l'Ouest, (**figure 62**).



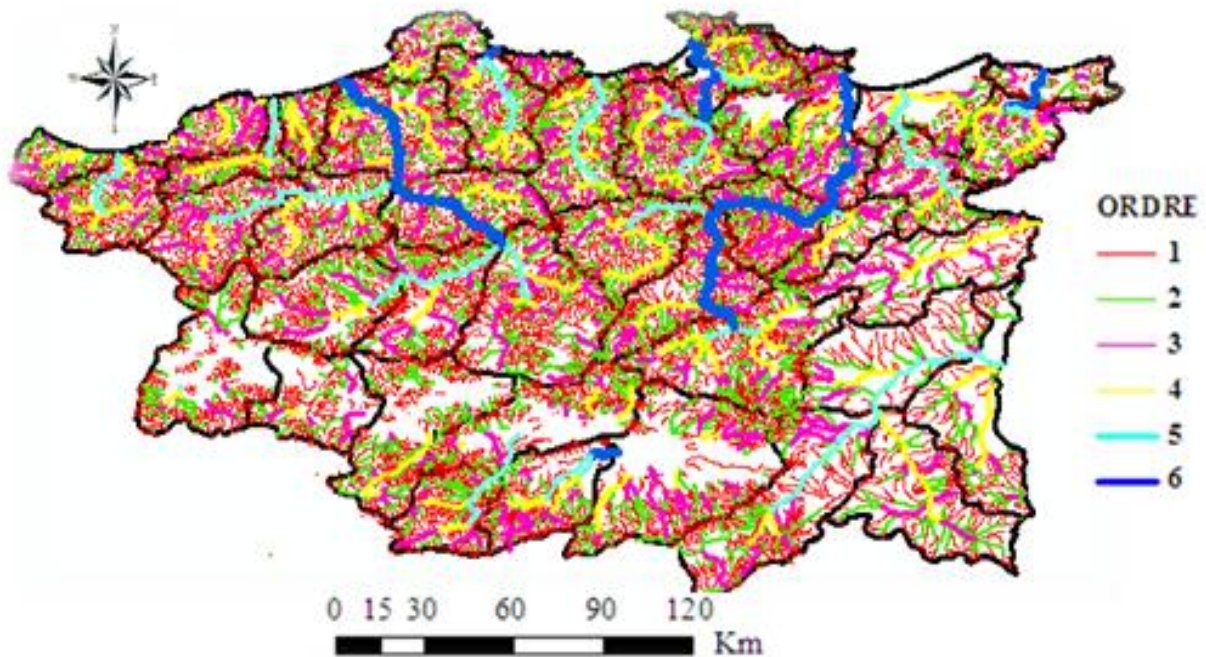
**Figure 62:** Classification des réseaux hydrographiques selon la nature du cours d'eau.

### VI.2.5.4 Classification selon l'ordre des cours d'eau

La classification des réseaux hydrographiques selon l'ordre des cours d'eau est déjà décrite dans le chapitre (**VI-2-1**), cette classification a permis la hiérarchisation des réseaux de drainage des bassins. Les ordres des cours d'eau les plus élevés sont :

- Ordre  $i = 6$ , Kebir Rhumel ; El Kebir ; Seybouse ; Mafragh et Boulfreiss.
- Ordre  $i = 5$ , Mellegue ; Djendjen ; Guebli ; Safsaf ; Bounamoussa ; Kebir Est ; Bouhamdane ; Maleh ; Endja ; Rhumel amont et aval ; Boumerzoug ; Chemora et Boulhilet, (**figure 63**).

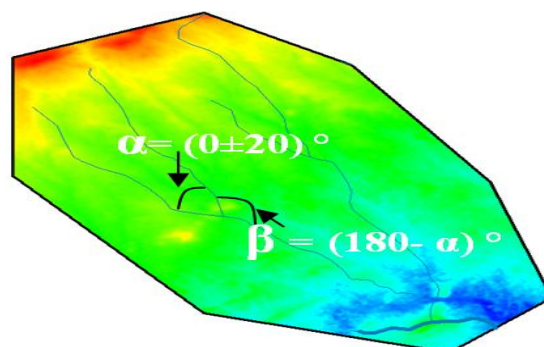




**Figure 63:** Classification des réseaux hydrographiques selon l'ordre du cours d'eau.

#### VI.2.5.5 Classification selon le type des réseaux hydrographiques

(B. Deffontaines, 1990) montre qu'il est possible d'établir des correspondances entre les angles observés et certains types de réseaux hydrographiques. Il propose de considérer les trois angles répartis autour de chaque nœud de confluence de degré 3, et de distinguer parmi eux le plus petit angle ( $\alpha$ ) et l'angle intermédiaire ( $\beta$ ), (figure 64). Sur cette base, l'observation croisée des angles  $\alpha$  et  $\beta$  permet d'établir une classification de réseaux hydrographiques présentant les mêmes caractéristiques angulaires : par exemple, les valeurs d'angles attendues pour les réseaux de types parallèle sont de  $0^\circ (\pm 20^\circ)$  pour l'angle minimum ( $\alpha$ ) et de  $180^\circ (\pm 20^\circ)$  pour l'angle intermédiaire ( $\beta$ ).

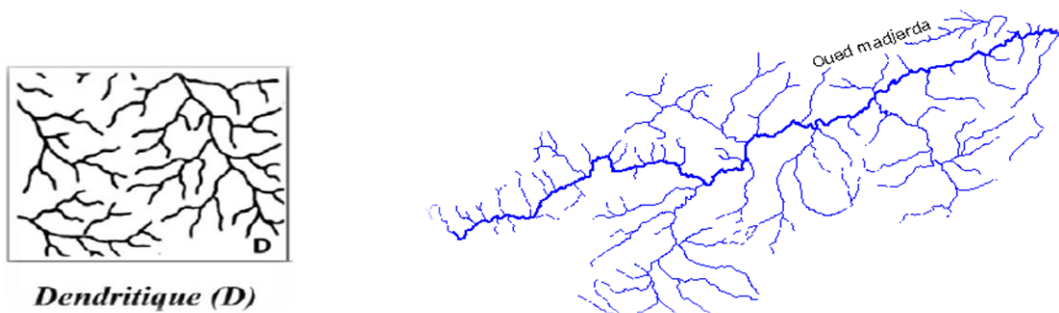


**Figure 64:** Caractéristiques angulaires des réseaux hydrographiques.

Les éléments du réseau hydrographique, dépendent de la structure, de la géologie et du relief. Le type, varié, qui en résulte à une grande influence sur la propagation et la composition de l'onde de crue. Une nomenclature des réseaux hydrographiques a été établie par (Deffontaines, 1990) où on distingue au niveau des bassins objet d'étude les principaux types à savoir : L'arborescent (Dendritique), Parallèle, Rectangulaire, et Multi-bassins.

- **Réseau hydrographique de type dendritique (D) :**

Les systèmes de drainage dendritiques, sont les plus courants, où on trouve beaucoup de flux contributifs (analogues aux branches d'un arbre), qui sont ensuite réunis dans les affluents du cours d'eau principal. Ils se développent là où le chenal du cours d'eau suit la pente du terrain. Les systèmes dendritiques forment des vallées en forme de V ; Par conséquent, les types de roche doit être imperméable et non poreux. Ce type se trouve au niveau des bassins où les pentes sont douces et peu de contraintes topographiques, (**figure 65**).



**Figure 65:** Réseau hydrographique dendritique (SBV1201)

- **Réseau hydrographique de type parallèle (P) :**

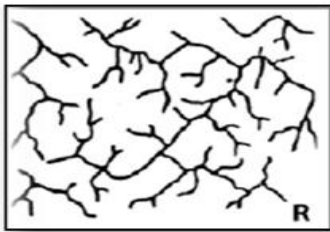
Un système de drainage parallèle est un modèle des cours d'eau provoqués par de fortes pentes. Les courants sont rapides avec très peu d'affluents, et tous les écoulements sont dans le même sens. Ce système se forme sur les surfaces uniformément inclinées, (**figure 66**).



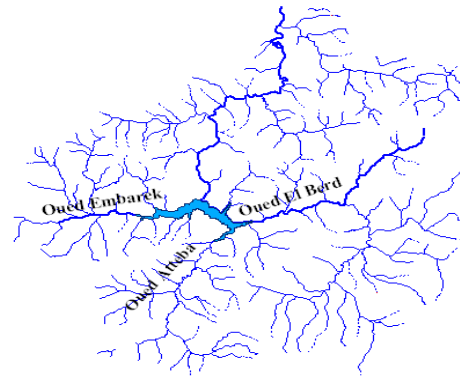
**Figure 66:** Réseau hydrographique parallèle

- Réseau hydrographique de type rectangulaire (R) :

Le drainage de type rectangulaire se développe sur des roches ayant une résistance sensiblement uniforme à l'érosion. C'est un système de flux dans lequel les cours d'eau sont principalement constitués de segments de ligne droite avec les coudes et les affluents à angle droit rejoignent de plus grands cours d'eau à angle droit. Ce type se voit en présence des falaises, (**figure 67**).



*Rectangulaire (R)*



**Figure 67:** Réseau hydrographique rectangulaire (SBV0302)

- Réseau hydrographique de type multi-bassin (M) :

Spécifique aux régions périglaciaires, le réseau thermo-karstique est caractérisé par un ensemble de petits plans d'eau, résultant de la fonte différentielle du pergélisol, et reliés par des segments de petits cours d'eau sinueux d'orientations diverses. Ce type se forme au niveau des réseaux endoréiques, (**figure 68**).

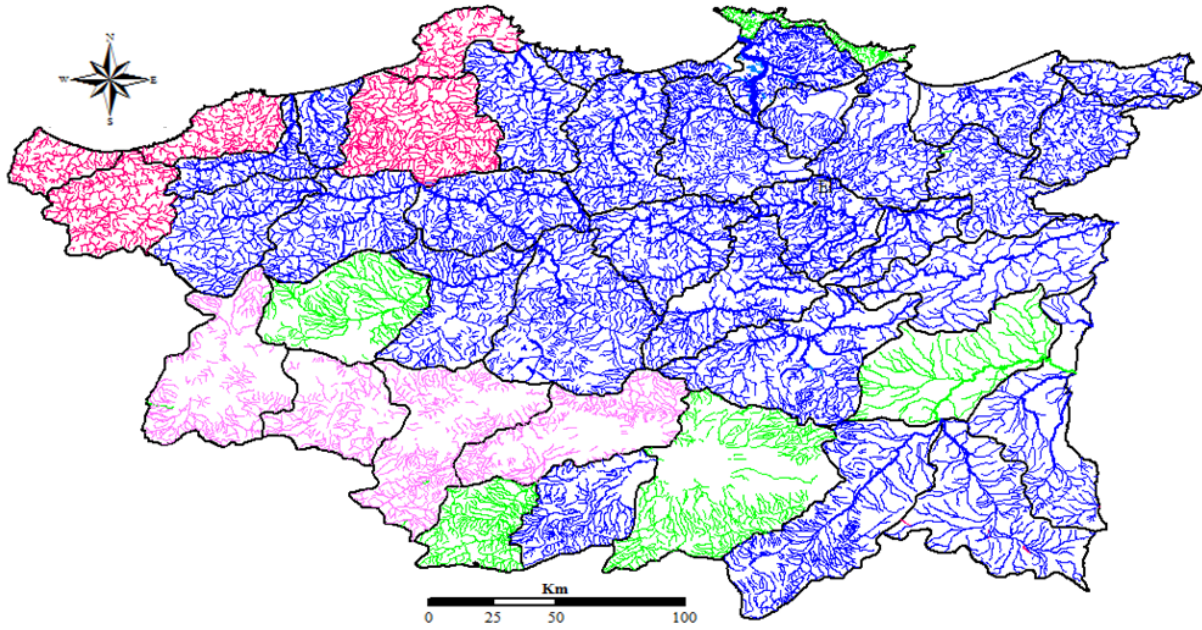


*Multi-bassins (M)*



**Figure 68:** Réseau hydrographique multi-bassins (SBV0701)

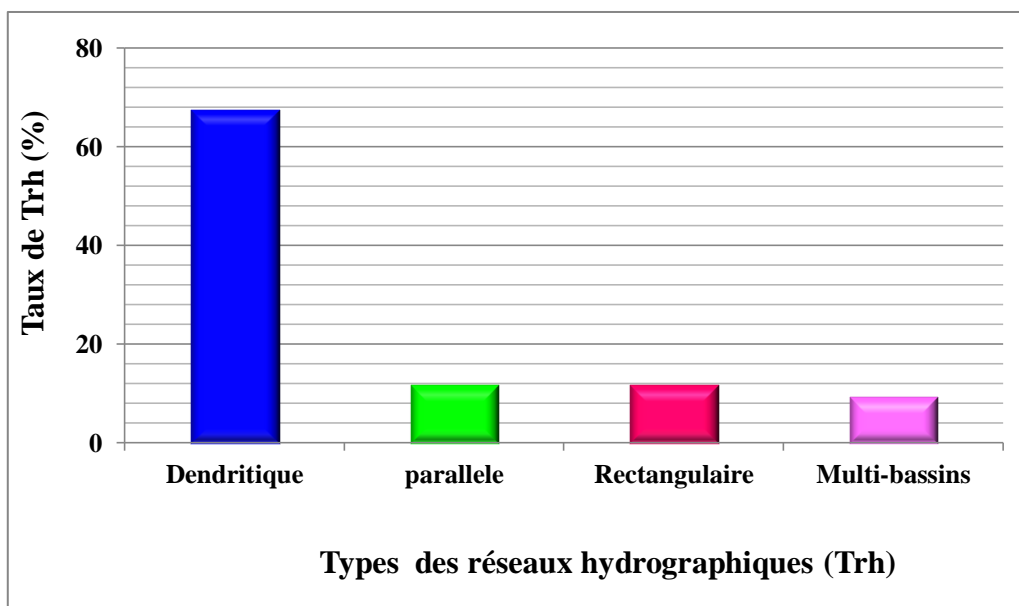
Quatre types de réseaux hydrographiques ont été identifiés sur les bassins étudiés, d'où on recense 29 de types dendritiques, 5 de type parallèle, 5 de type rectangulaire et 4 de type multi-bassins, (**figure 69**).



**Figure 69:** Classification du réseau hydrographique selon le type de drainage «B.Deffontaines. 1990 »

Réseau dendritique : Bleu ; Réseau parallèle : Vert ;  
 Réseau rectangulaire : Rouge ; Réseau Multi bassins : Rose.

Le taux des réseaux de type dendritiques est de 67%, celui des réseaux de type parallèle et rectangulaire est de 11%, quant au taux des réseaux de type multi-bassins est de 9%, comme le montre la **figure 70**.

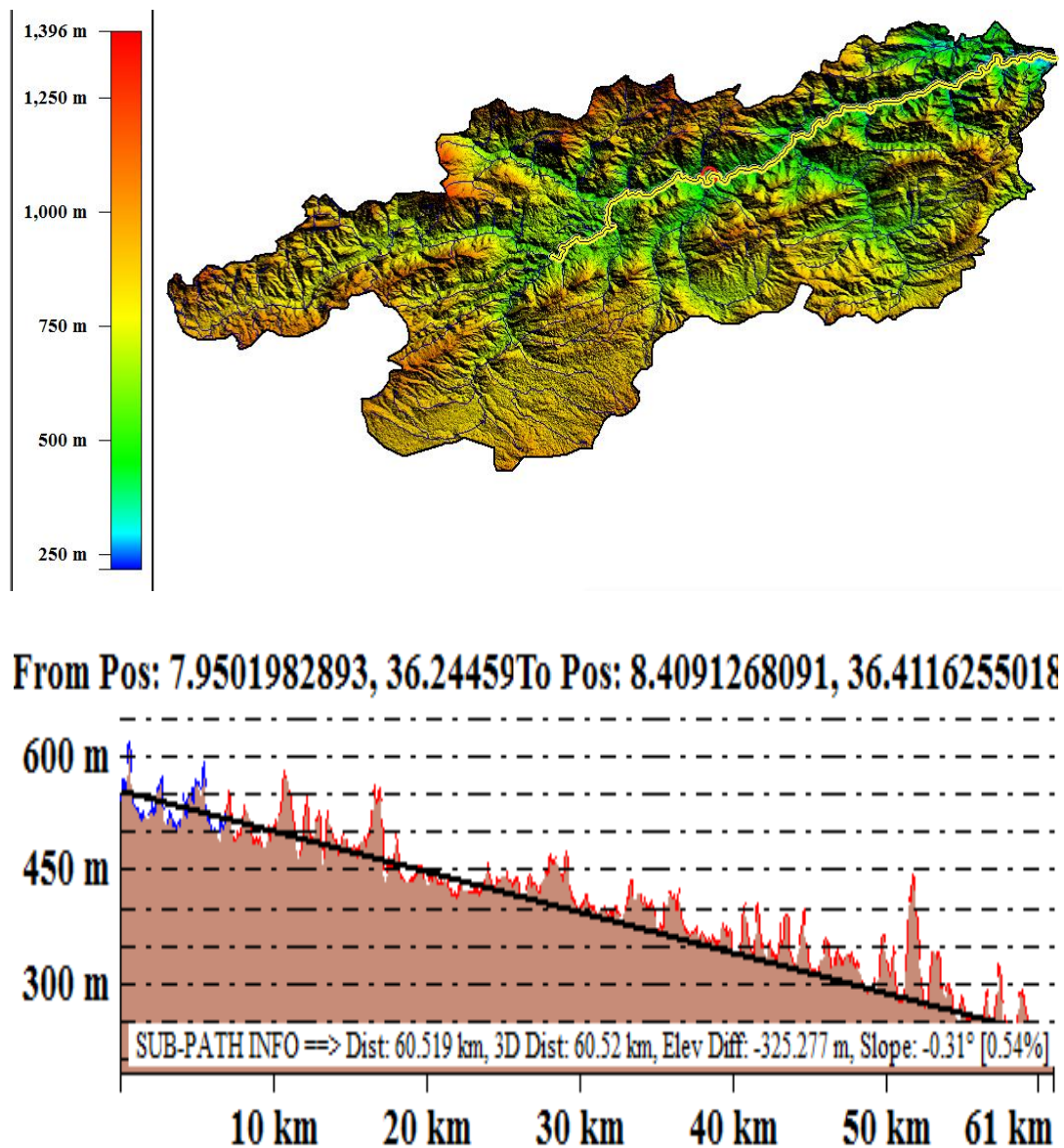


**Figure 70:** Taux des types des réseaux hydrographiques



### VI.2.6 Pente du cours d'eau principal « Ptce »

Le système des pentes des cours d'eau a une grande influence dans les écoulements des crues, il traduit l'importance du relief des bassins versants. Les simulations des écoulements surfaciques ont été effectuées sur 43 sous bassin bassins, en présentant les pentes de chaque cours d'eau principal de chaque sous bassin. La pente du cours d'eau est calculée à partir d'un MNT en utilisant le logiciel Global mapper 16.0, dont le sous bassin versant 1201 (Oued Medjerda) a été pris comme exemple, (**figure 71**).



**Figure 71:** Profil en long de l'oued Medjerda

Les résultats des descripteurs de réseau obtenus sont illustrés dans le **tableau 9**

**Tableau 9:** Valeurs des descripteurs de réseau des bassins versants

Code	$L_t$ (Km)	$\sum L_i$ (Km)	$\sum N_i$	$R_c$	$R_l$	$L_r$ (Km)	$i$	$C_s$	$D_f$	Type de réseau	$P_{tce}$ %	$C_b$	Nom du talweg principal
<b>1201</b>	61,17	791,48	170	4,67	<b>2,68</b>	0,26	4	0,75	<b>1,56</b>	Dendritique	0,53	0,17	Medjerda
<b>1202</b>	58,79	1481,49	354	4,15	2,10	0,39	5	0,80	1,92	Dendritique	0,46	0,10	Meskiana
<b>1203</b>	50,93	862,06	162	4,84	2,14	0,27	4	0,803	2,00	Dendritique	0,24	0,17	Chabro
<b>1204</b>	51,73	841,65	107	3,21	1,68	0,28	5	0,908	2,25	Parallèle	0,37	0,19	Mellegue Am
<b>1205</b>	13,87	698,97	141	3,24	1,90	<b>0,25</b>	5	0,783	1,83	Dendritique	0,74	0,29	Mellegue Av
<b>0301</b>	16,00	414,56	207	4,47	1,79	0,54	4	<b>0,448</b>	2,57	Rectangulaire	1,07	0,34	Djemaa
<b>0302</b>	34,00	898,23	319	3,90	1,97	0,49	5	0,582	2,01	Rectangulaire	1,50	0,14	Agrioun
<b>0303</b>	16,99	567,65	253	3,59	1,61	0,49	4	0,756	2,68	Rectangulaire	<b>2,99</b>	0,58	Kissir
<b>0304</b>	38,57	661,04	277	4,01	2,20	0,68	5	0,522	1,76	Dendritique	0,62	0,44	DjenDjen
<b>0305</b>	3,81	422,43	144	3,30	1,94	0,59	5	0,751	1,80	Dendritique	0,44	0,58	Nil
<b>0306</b>	14,02	396,59	165	4,86	1,78	0,41	4	0,784	2,74	Rectangulaire	0,40	<b>0,79</b>	Zhour
<b>0307</b>	4,73	962,04	379	3,14	1,38	0,49	<b>6</b>	0,860	1,57	Dendritique	0,33	0,29	Guebli
<b>0308</b>	12,23	203,86	98	3,51	2,04	0,51	<b>3</b>	0,693	1,76	Dendritique	1,83	0,27	Oudina
<b>0309</b>	58,67	1246,50	570	4,42	2,33	0,53	5	0,629	1,76	Dendritique	0,32	0,08	SafSaf
<b>0310</b>	6,68	<b>92,99</b>	<b>43</b>	5,92	2,40	0,34	<b>3</b>	0,505	2,03	Dendritique	2,55	0,42	Dessia
<b>0311</b>	25,90	1423,96	<b>694</b>	3,60	1,84	0,63	5	0,847	2,10	Dendritique	0,63	0,17	Emchekel
<b>0312</b>	46,43	999,89	539	3,44	2,04	<b>0,69</b>	<b>6</b>	0,655	1,73	Dendritique	0,06	0,42	Kebirmagroun
<b>0313</b>	10,75	460,86	215	5,13	2,60	0,48	4	0,899	1,71	Dendritique	0,71	0,11	El hout(Fetzara)
<b>0314</b>	2,79	265,98	213	4,45	1,52	0,59	4	0,825	3,58	Parallèle	1,46	0,27	Côtiers Herbillon
<b>0315</b>	45,80	833,12	306	3,76	2,25	0,49	5	0,616	1,63	Dendritique	0,48	0,47	Bouamoussa
<b>0316</b>	4,28	780,55	284	2,89	1,78	0,53	<b>6</b>	0,900	1,84	Dendritique	0,12	0,70	El kebir Est
<b>0317</b>	23,80	471,50	149	3,35	1,95	0,28	5	0,556	1,81	Dendritique	0,04	0,20	Mafragh
<b>0318</b>	13,76	226,56	76	3,88	2,20	0,26	<b>6</b>	0,866	1,72	Dendritique	0,59	0,66	El kebir Est
<b>1401</b>	5,68	<b>1677,85</b>	484	3,30	1,56	0,48	<b>6</b>	0,756	2,69	Dendritique	0,64	0,03	Cherf amont



Code	L <sub>t</sub> (Km)	∑L <sub>i</sub> (Km)	∑N <sub>i</sub>	R <sub>c</sub>	R <sub>l</sub>	L <sub>r</sub> (Km)	i	C <sub>s</sub>	D <sub>f</sub>	Type de réseau	P <sub>tce</sub> %	C <sub>b</sub>	Nom du talweg principal
1402	66,11	1249,46	390	3,48	2,03	0,53	6	0,571	1,76	Dendritique	0,78	0,02	Cherf aval
1403	38,72	1165,28	410	4,34	2,11	0,53	5	0,580	1,96	Dendritique	0,59	0,07	Bouhamdane
1404	54,66	985,06	387	3,26	1,83	0,60	6	0,611	1,96	Dendritique	0,41	0,07	Seybouse moy
1405	10,32	502,42	181	2,77	1,70	0,45	6	0,714	1,92	Dendritique	0,55	0,24	Maleh
1406	71,71	806,48	268	3,96	2,36	0,38	6	0,600	1,60	Dendritique	0,13	0,10	Seybse maritime
1001	46,50	973,10	291	4,06	2,02	0,46	5	0,664	1,99	Dendritique	0,52	0,14	Kebir
1002	33,00	1021,55	310	3,24	2,07	0,46	5	0,804	1,62	Dendritique	0,57	0,10	Endja
1003	17,07	939,82	230	3,82	1,50	0,38	5	0,879	3,31	Parallèle	0,32	0,06	Rhumel Amont
1004	53,74	1038,33	302	4,42	2,13	0,45	5	0,634	1,96	Dendritique	0,30	0,06	Rhumel Aval
1005	35,70	1633,81	520	3,61	1,85	0,44	5	0,560	2,09	Dendritique	0,43	0,03	Boumerzoug
1006	59,83	1092,81	393	5,26	2,40	0,50	6	0,669	1,90	Dendritique	0,66	0,03	R. Smendou
1007	56,87	1342,11	490	3,57	1,73	0,50	6	0,725	2,32	Rectangulaire	0,20	0,40	Kebir Rhumel
0701	2,58	927,77	279	3,97	1,19	0,30	5	0,921	7,93	Multi-bassins	0,26	0,03	Chott Beida
0702	4,04	579,82	184	5,33	1,66	0,29	4	0,864	3,30	Multi-bassins	0,15	0,12	Mardja Zana
0703	39,55	1140,69	416	6,82	1,80	0,36	4	0,641	3,27	Multi-bassins	0,68	0,03	El Maader
0704	35,39	845,73	249	3,72	1,86	0,56	5	0,580	2,12	Parallèle	0,54	0,05	Chemora
0705	15,68	1019,38	375	4,23	1,44	0,37	5	0,862	3,95	Multi-bassins	0,23	0,02	Boulhilet
0706	8,94	915,20	245	2,70	1,80	0,47	6	0,887	1,69	Dendritique	0,01	0,08	Boulefress
0707	24,14	1492,78	417	4,70	1,69	0,32	6	0,968	2,95	Parallèle	0,79	0,08	Gueiss

Les chiffres en vert et en rouge représentent les valeurs extrêmes (Min et Max) des descripteurs de réseau

Les sous bassins ayant les valeurs extrêmes des descripteurs de réseau sont présentés sur la **figure 72**.

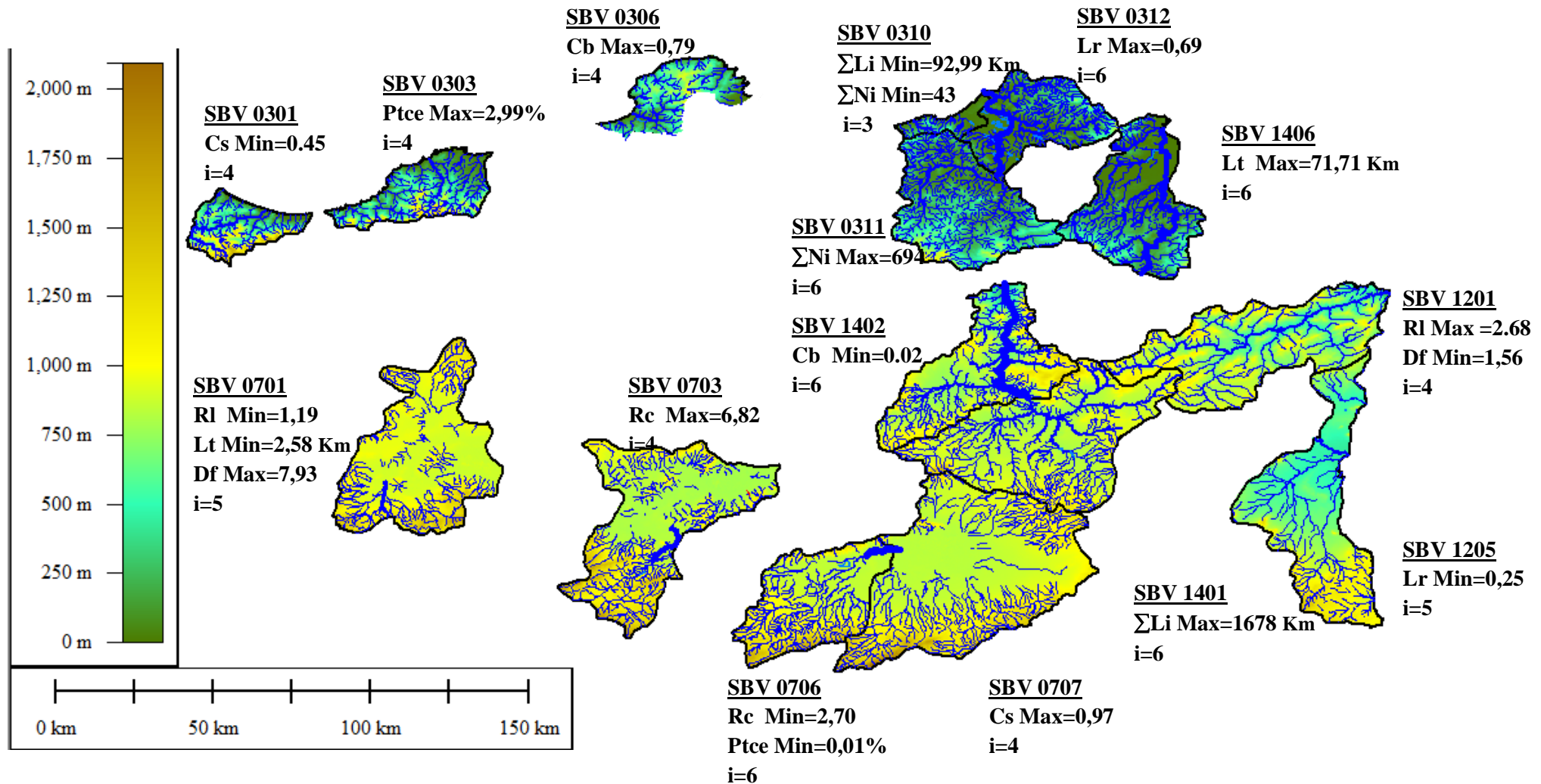


Figure 72: Sous bassins ayant les valeurs extrêmes des descripteurs de réseau.

### VI.3 Descripteurs de volume :

Les descripteurs de volume servent à décrire le relief d'un bassin versant et à analyser la répartition des altitudes (Delcaillau, 2004). Ils désignent la distribution du relief et du système de pente au niveau du bassin versant.

La courbe hypsométrique reste l'outil graphique par excellence (Baize, 1998) ; (Delcaillau, 2001) ; (Font, 2002). Elle exprime l'aire planimétrique des tranches d'altitude en fonction de la surface relative du bassin. Elle permet ainsi de révéler l'évolution structurale d'un bassin (De Humbolt, 1842) ; (Strahler, 1952b). Elle donne un bon résumé des distributions altimétriques et topographiques (Luo, 1998) ; (Grohmann, 2004).

Les noms, formules et références des **descripteurs de volume** couramment utilisés en hydrologie sont présentés dans le **tableau 10**.

**Tableau 10:** Descripteurs de volume

Descripteurs de volume	Symbole / unité	Formule	Référence
- Altitudes ayant 5% de la surface du bassin	$H_{5\%}$ (m)	De la courbe hypsométrique	De Humbolt 1842 ; Strahler 1957 ; Luo 1998 ; Grohmann, 2004.
- Attitudes ayant 50% de la surface du bassin	$H_{50\%}$ (m)		
- Altitudes ayant 95% de la surface du bassin	$H_{95\%}$ (m)		
Distance séparant les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin.	$D_H$ (m)	$D_H = H_{5\%} - H_{95\%}$	
Temps de concentration	$T_c$ (h)	$T_c = \frac{1,5.L_t + 4.\sqrt{S}}{0,8.\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$	Giandoti II
		$T_c = 76,3.\sqrt{\frac{S}{I_g}}$	Passini
		$T_c = 64,8 \frac{(Lp.S)^{1/3}}{(I_g)^{1/2}}$	Ventura
Densité de drainage	$D_d$ (Km <sup>-1</sup> )	$D_d = \frac{\sum L_i}{S}$	Horton (1932)
Fréquence des cours d'eau	$F_i$ (Km <sup>2</sup> )	$F_i = \frac{\sum N_i}{S}$	Horton (1932)
Longueur du bassin	$L_{bv}$ (Km)	$L_{bv}$ . Avec Logiciel ArcGis10.0	Horton (1945).
Coefficient de torrentialité	$C_T$	$C_T = D_d \cdot F_1$	

Descripteurs de volume	Symbole / unité	Formule	Référence
Dénivelée spécifique	$D_s$ (m)	$D_s = I_{pg} \cdot \sqrt{S}$	Biro, (1955)
Exonération (Relief) totale	H (Km)	$H = (H_{max} - H_{min}) \cdot 10^{-3}$	Baise
Rapport du relief	-	$R_{rf} = \frac{H}{P}$	Schumm, (1956)
Rapport de finesse	-	$R_{fn} = \frac{L_{bv}}{P}$	Melton, (1957)
Constante d'entretien du cours d'eau	-	$C_{ec} = \frac{1}{D_d}$	Horton, (1932)
Nombre de rugosité	-	$N_r = H \cdot D_d$	Melton, 1957 et Strahler, (1958)

### VI.3.1 Hypsométrie

Vu que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont fonction de l'altitude. Il est intéressant d'étudier l'hypsométrie du bassin versant par tranche d'altitude en construisant un hypsogramme ou histogramme de fréquence des altitudes, sur lequel la courbe hypsométrique est construite (tracée). Cette courbe fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Elle représente la répartition de la surface du bassin en fonction de son altitude.

La courbe hypsométrique reste le meilleur outil graphique qui exprime l'aire planimétrique des tranches d'altitude en fonction de la surface relative du bassin. Elle permet ainsi de révéler l'évolution structurale d'un bassin, et elle donne un bon résumé des distributions altimétriques et topographiques. L'allure des courbes hypsométriques permet de déterminer le degré de maturité ou d'évolution cyclique du relief. De forme concave, la courbe indique que le bassin est en état de maturité. Au contraire, les bassins versants sont immatures, jeunes, ou en cours de soulèvement si la courbe est convexe.

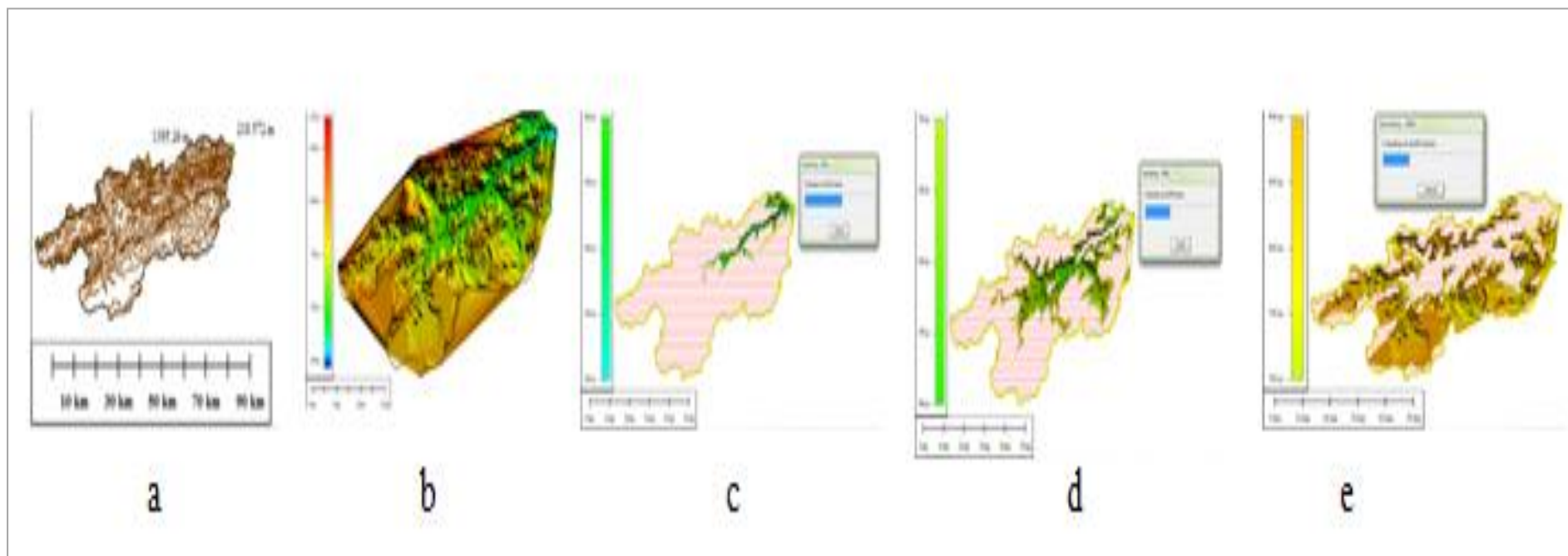
Les courbes hypsométriques ont été effectuées en utilisant le logiciel Global mapper 16.0. La **figure 73** présente les différentes étapes de calcul des tranches d'altitude (courbes de niveau) en fonction de la surface relative du bassin versant où le sous bassin 1201 de la Medjerda a été pris comme exemple. Les courbes hypsométriques des trois zones sont présentées aux **figures (74 ; 75 ; 76)**.

Le **tableau 11** présente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. L'hypsométrie de la zone I (bassin de la Medjerda) a été prise comme exemple.

**Tableau 11:** Répartition de la surface du bassin versant de la Medjerda en fonction de son altitude.

<b>Sous bassins versants de la Medjerda</b>									
<b>1201</b>		<b>1202</b>		<b>1203</b>		<b>1204</b>		<b>1205</b>	
<b>Altitude</b>	<b>Surface cumulée</b>	<b>Altitude</b>	<b>Surface cumulée</b>	<b>Altitude</b>	<b>Surface cumulée</b>	<b>Altitude</b>	<b>Surface cumulée</b>	<b>Altitude</b>	<b>Surface cumulée</b>
(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)
1395	0	1588	0,00	1632	0,00	1169	0	1474	0
1300	0,03	1400	1,72	1400	2,07	1000	1,25	1200	2,32
1100	1,50	1200	16,62	1200	13,81	800	29,19	1000	20,03
900	15,43	1000	56,20	1000	55,52	600	80,92	800	39,13
700	67,10	800,00	92,41	800	89,75	457	99,72	600	71,00
500	93,28	639	99,89	369	98,91			417	99,90
300	99,52								
219	99,95								





**Figure 73:** Etapes de calcul des surfaces entre les courbes de niveau. « logiciel Global mapper 16.0 ».

a : Tracé des courbes de niveau

b : Grille 1 d'élévation triangulaire

c,d,e :Surfaces entre les courbes des niveau (300-500 ;500-700 ;700-900)

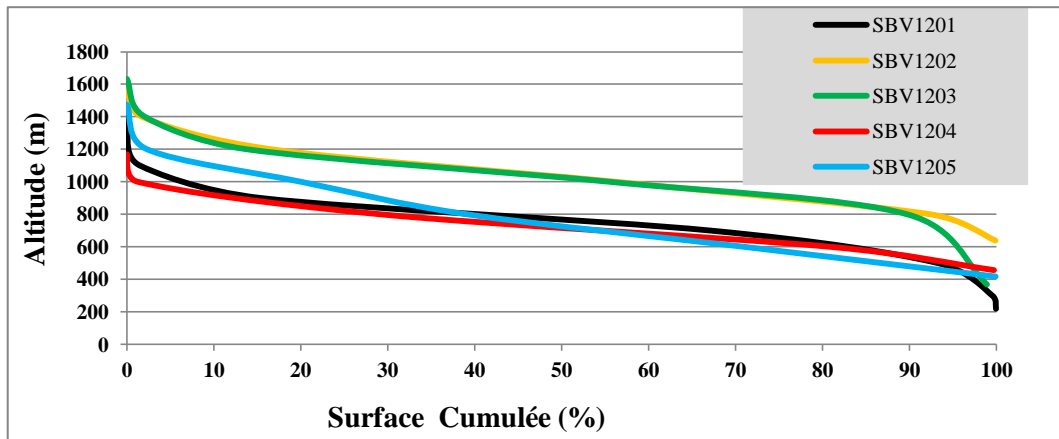


Figure 74: Courbe hypsométrique des bassins de la zone I

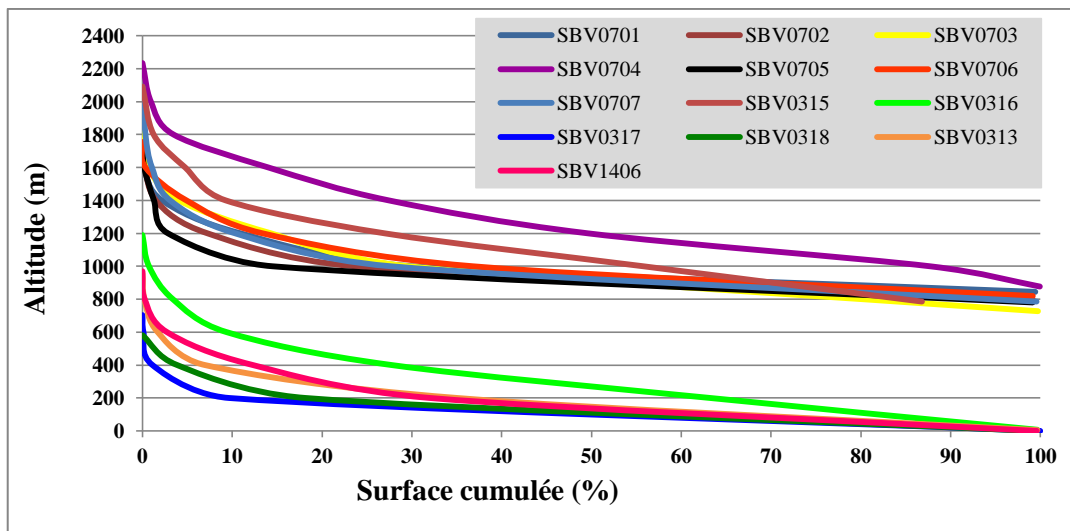


Figure 75: Courbe hypsométrique des bassins de la zone II

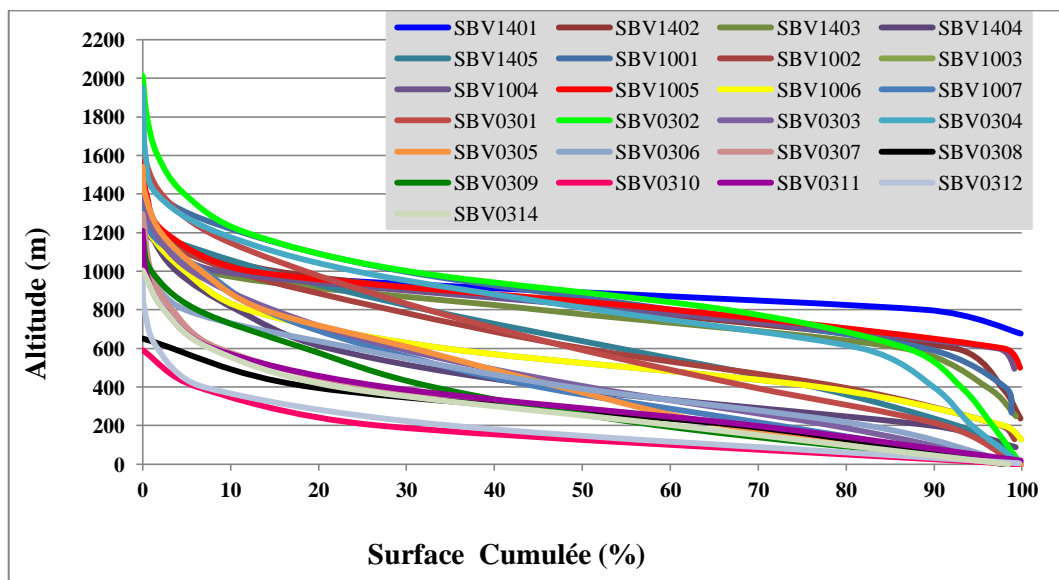


Figure 76: Courbe hypsométrique des bassins de la zone III

### **VI.3.2 Temps de concentration « Tc »**

Le temps de concentration des eaux sur un bassin versant se définit comme la durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier. Le temps de concentration Tc peut être estimé en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette (efficace) et la fin de ruissellement (fin de l'écoulement de surface) à partir d'un hydrogramme de crue, ou bien en utilisant les formules empiriques.

### **VI.3.3 Densité de drainage « Dd »**

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatiques et anthropiques. En pratique, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé. Elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Selon (Schumm, 1956) la valeur inverse de la densité de drainage,  $C=1/Dd$ , s'appelle « constante de stabilité du cours d'eau ». Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau). La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Ce descripteur permet également de tenir compte du degré de développement et d'incision d'un réseau hydrographique. La valeur de la densité de drainage est généralement faible lorsque le relief est faible, et elle est forte pour des reliefs plus élevés (Vogt et al., 2003).

### **VI.3.4 Fréquence des cours d'eau « Fi »**

La fréquence des cours d'eau dite aussi la « densité hydrographique » représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

### **VI.3.5 Longueur du bassin versant « Lbv »**

C'est la distance entre l'exutoire et le point le plus éloigné du bassin.

### **VI.3.6 Coefficient de torrentialité « Ct »**

Ce descripteur peut être plus indicatif et plus expressif que la densité de drainage. Plus il est élevé plus la torrentialité augmente traduisant ainsi une grande agressivité des averses.

**VI.3.7 Exonération (Relief) totale « H »**

C'est la distance verticale maximale entre le point le plus bas (exutoire) et le plus élevé dans le des bassins versants. Le relief total est un indicatif de l'énergie potentielle d'un bassin versant.

**VI.3.8 Dénivelée spécifique « Ds »**

La dénivelée spécifique est utilisée pour classer les reliefs des bassins versants en se basant sur la classification de l'ex O.R.S.T.O.M actuellement IRD. Elle se calcule en fonction de l'indice de pente globale et la superficie du bassin.

**VI.3.9 Constante d'entretien du cours d'eau « Cec »**

Elle représente l'aire requise pour maintenir un km linéaire de bief (Ritter et al., 1995) ; (Pakhmode et al., 2003) et (Kanth et Hassan, 2012) . Tout comme la densité de drainage, la constance de la maintenance du bief dépend du type de sol, de sa perméabilité, du climat, du relief et du couvert végétal (Schumm, 1956). Généralement, une constance d'entretien du cours d'eau élevée ( $> 0,40$ ) indique une perméabilité élevée du sol et vice-versa.

**VI.3.10 Rapport de relief « Rrf »**

Le rapport de relief (Schumm, 1956) correspond au rapport entre la différence d'élévation du BV et la longueur de ce dernier :

Le rapport de relief permet une comparaison du relief relatif de n'importe quel BV, peu importe l'échelle des valeurs d'élévation de ces derniers. (Schumm, 1956) montre que le rapport d'élongation et le rapport de relief sont inversement proportionnels : lorsque le rapport de relief est proche de 1, le BV possède une forme allongée.

**VI.3.11 Rapport de finesse « Rfn »**

Il représente le rapport entre la longueur du bassin versant et son périmètre. Il a une relation indirecte avec le cours d'eau.

**VI. Nombre de rugosité « Nr »**

Ce descripteur correspond au produit de l'exonération totale et la densité de drainage. Il représente le relief topographique du bassin versant, sa superficie et le réseau hydrographique qui le draine.

Les résultats des descripteurs de volume obtenus sont illustrés dans le **tableau 12**

**Tableau 12:** Valeurs des descripteurs de volume des sous bassins versants

Code	T <sub>c</sub> (h)	C <sub>t</sub>	R <sub>rf</sub>	D <sub>s</sub> (m)	H Km	D <sub>a</sub> Km <sup>-1</sup>	R <sub>fn</sub>	C <sub>ec</sub>	Fi	L <sub>bv</sub> (km)	H <sub>5%</sub>	H <sub>50%</sub> (m)	H <sub>95%</sub> (m)	D <sub>H</sub> (m)	H <sub>min</sub> (m)	H <sub>max</sub> (m)	H <sub>moy</sub> (m)	N <sub>r</sub>
1201	12,72	0,06	0,005	206,08	1,18	0,53	0,33	1,90	0,11	78	1020	760	480	540	218	1397	808	0,62
1202	15,00	0,15	0,004	158,64	0,95	0,79	0,37	1,27	0,19	86	1320	1000	960	360	639	1589	1114	0,75
1203	13,12	0,03	0,004	287,43	1,00	0,55	0,31	1,82	0,10	71	1320	1000	600	720	636	1637	1137	0,55
1204	15,39	0,02	0,004	242,16	0,72	0,56	0,34	1,79	0,07	65	960	720	480	480	456	1171	814	0,40
1205	8,65	0,03	0,005	238,55	1,23	0,49	0,20	2,02	0,10	50	1160	720	440	720	250	1476	863	0,61
0301	4,36	0,18	0,018	604,62	1,73	1,07	0,27	0,93	0,54	25	1240	600	120	1120	0	1734	867	1,86
0302	6,78	0,13	0,014	566,97	2,01	0,98	0,24	1,02	0,35	36	1400	860	320	1080	4	2014	1009	1,97
0303	5,48	0,19	0,010	370,77	1,53	0,99	0,14	1,01	0,44	21	1040	420	40	1000	0	1534	767	1,52
0304	5,84	0,25	0,013	358,99	1,96	1,35	0,33	0,74	0,57	50	1280	800	160	1120	0	1958	979	2,65
0305	3,68	0,20	0,017	528,34	1,54	1,17	0,27	0,85	0,40	25	1040	400	40	1000	0	1542	771	1,80
0306	5,95	0,11	0,007	260,75	1,05	0,82	0,18	1,22	0,34	25	800	400	50	750	0	1051	526	0,86
0307	6,51	0,13	0,008	345,01	1,30	0,98	0,26	1,02	0,38	41	720	280	30	690	0	1299	650	1,27
0308	5,19	0,18	0,008	200,18	0,65	1,01	0,15	0,99	0,49	13	560	280	20	540	0	653	327	0,66
0309	11,55	0,20	0,007	413,26	1,18	1,07	0,28	0,94	0,49	47	840	250	20	820	0	1183	592	1,26
0310	4,11	0,16	0,008	142,35	0,59	0,69	0,31	1,45	0,32	23	420	120	10	410	0	591	296	0,41
0311	8,85	0,27	0,007	314,08	1,19	1,27	0,20	0,79	0,62	34	680	300	50	630	18	1212	615	1,51
0312	10,15	0,37	0,007	211,16	0,95	1,38	0,30	0,72	0,75	40	440	150	20	420	4	957	481	1,32
0313	6,56	0,10	0,007	171,42	0,78	0,96	0,17	1,04	0,45	19	360	120	20	340	8	791	400	0,75
0314	3,59	0,53	0,006	112,84	1,01	1,18	0,26	0,85	0,94	47	680	250	20	660	0	1005	503	1,18
0315	8,78	0,16	0,008	330,53	1,40	0,97	0,23	1,03	0,36	43	1000	440	80	920	7	1408	708	1,36
0316	5,90	0,19	0,007	258,79	1,18	1,06	0,21	0,94	0,39	34	720	280	40	680	7	1190	599	1,26
0317	10,14	0,06	0,005	107,31	0,70	0,56	0,20	1,80	0,18	30	240	100	10	230	0	704	352	0,39
0318	7,60	0,08	0,005	137,08	0,58	0,52	0,22	1,91	0,18	27	370	120	10	360	0	582	291	0,31
1401	10,04	0,08	0,004	118,56	0,95	0,96	0,17	1,04	0,28	37	1020	890	760	260	675	1628	1152	0,92
1402	12,15	0,14	0,006	238,51	1,18	1,07	0,32	0,94	0,33	60	1120	820	560	560	236	1416	826	1,26
1403	10,42	0,15	0,006	298,31	1,05	1,05	0,31	0,95	0,37	51	1040	780	440	600	246	1298	772	1,11

Code	T <sub>c</sub> (h)	C <sub>t</sub>	R <sub>rf</sub>	D <sub>s</sub> (m)	H Km	D <sub>d</sub> Km <sup>-1</sup>	R <sub>fn</sub>	Cec	Fi	L <sub>bv</sub> (km)	H <sub>5%</sub>	H <sub>50%</sub> (m)	H <sub>95%</sub> (m)	D <sub>H</sub> (m)	H <sub>min</sub> (m)	H <sub>max</sub> (m)	H <sub>moy</sub> (m)	N <sub>r</sub>
1404	9,62	0,20	0,010	494,29	1,30	1,20	0,32	0,83	0,47	41	960	390	160	800	88	1392	740	1,57
1405	5,55	0,09	0,009	416,53	1,22	0,90	0,24	1,11	0,33	31	1140	640	160	980	83	1305	694	1,10
1406	13,48	0,15	0,006	230,04	0,97	0,76	0,24	1,31	0,25	43	530	140	10	520	0	972	486	0,74
1001	9,36	0,12	0,009	648,37	1,43	0,91	0,36	1,10	0,27	56	1320	860	110	1210	266	1698	982	1,30
1002	8,96	0,15	0,008	458,21	1,29	0,93	0,36	1,08	0,28	57	1080	600	240	840	128	1422	775	1,20
1003	11,89	0,06	0,004	618,52	0,61	0,76	0,37	1,32	0,19	56	1140	880	240	900	688	1301	995	0,46
1004	13,15	0,11	0,005	187,94	0,85	0,90	0,33	1,11	0,26	60	1040	820	620	420	493	1338	916	0,76
1005	11,30	0,13	0,007	323,08	1,24	0,89	0,28	1,12	0,28	53	1120	840	620	500	498	1737	1118	1,10
1006	11,16	0,20	0,009	490,43	1,23	1,00	0,37	1,00	0,36	54	1000	520	240	760	128	1362	745	1,24
1007	10,71	0,17	0,009	593,99	1,46	1,00	0,24	1,00	0,37	40	1080	360	40	1040	3	1467	735	1,47
0701	9,47	0,05	0,004	223,33	0,91	0,60	0,22	1,68	0,18	46	1320	940	820	500	840	1751	1296	0,54
0702	7,72	0,06	0,006	248,62	0,91	0,59	0,20	1,71	0,19	29	1240	920	800	440	778	1691	1235	0,53
0703	11,66	0,10	0,005	284,00	1,11	0,71	0,15	1,41	0,26	35	1400	900	700	700	726	1835	1281	0,79
0704	7,82	0,19	0,010	433,64	1,36	1,12	0,33	0,90	0,33	45	1760	1200	920	840	876	2235	1556	1,52
0705	9,80	0,09	0,005	157,53	0,96	0,74	0,24	1,34	0,27	46	1140	900	800	340	779	1736	1258	0,71
0706	7,98	0,10	0,007	324,32	0,94	0,94	0,36	1,07	0,25	52	1400	960	840	560	818	1757	1288	0,88
0707	11,50	0,06	0,005	262,46	1,31	0,63	0,24	1,59	0,18	58	1320	900	800	520	784	2094	1439	0,83

Les chiffres en vert et en rouge représentent les valeurs extrêmes (Min et Max) des descripteurs de volume.

Les sous bassins ayant les valeurs extrêmes des descripteurs de volume sont présentés sur la **figure 77**.



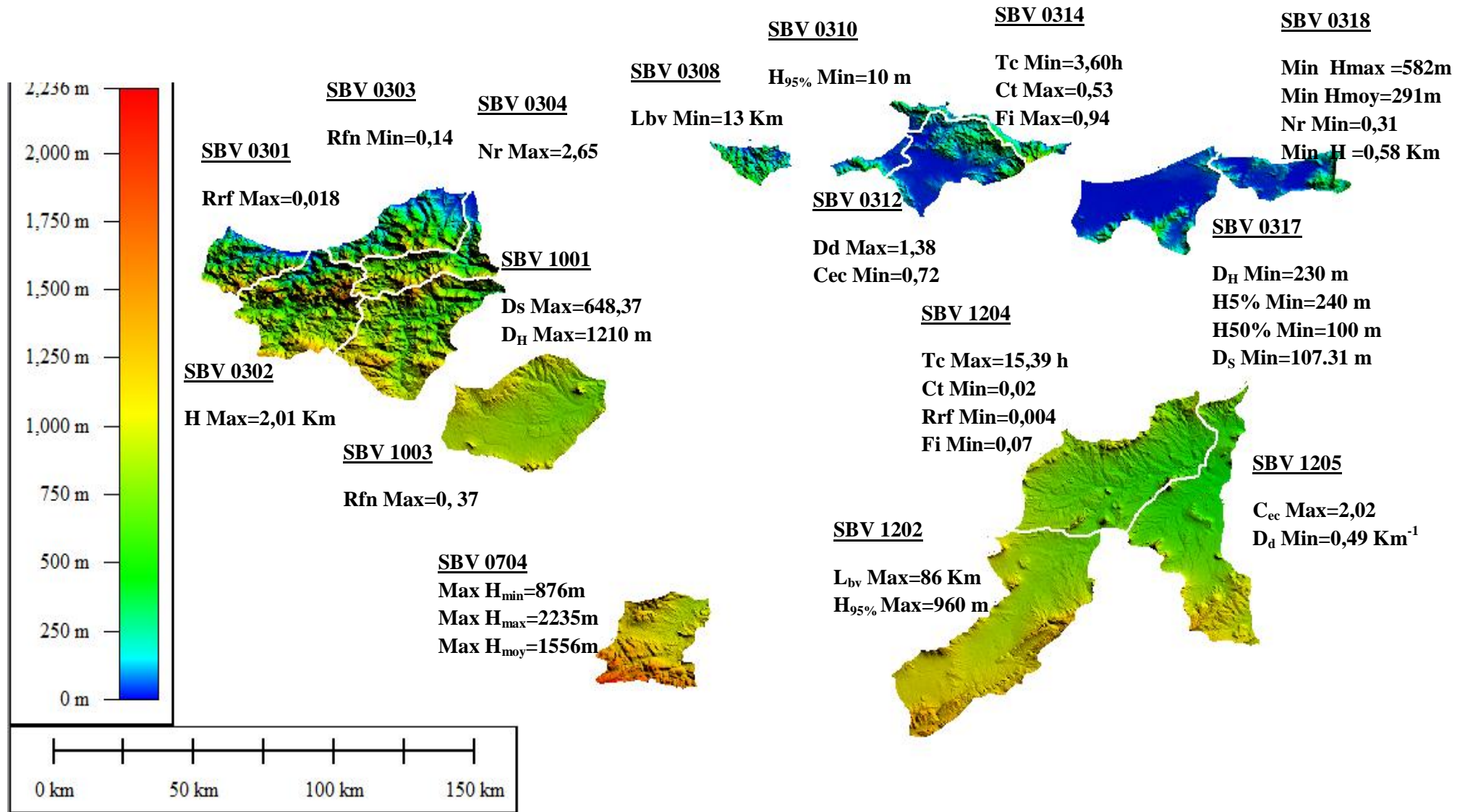


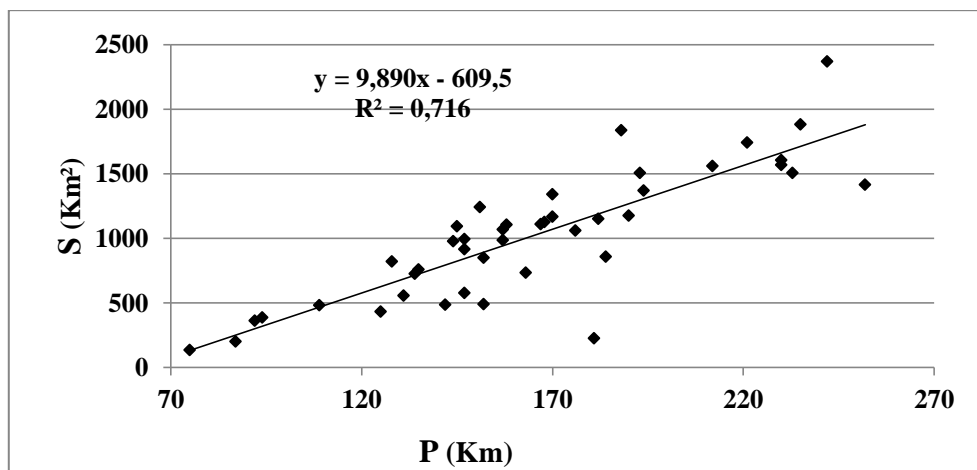
Figure 77: Sous bassins ayant les valeurs extrêmes des descripteurs de volume.

## Conclusion

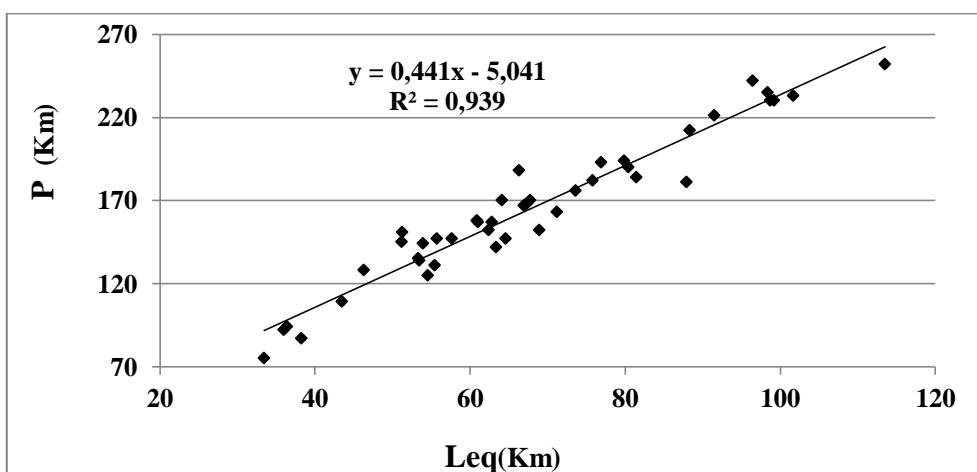
Pour une meilleure analyse des résultats obtenus, une modélisation graphique en nuage des points est représentée ci-dessous relative aux valeurs des descripteurs de forme, de réseau et de volume des bassins versants, dans le but de déterminer les dépendances entre des descripteurs de forme, de réseau et de volume.

- **Descripteurs de forme**

Pour cette première catégorie de descripteurs, on recense onze descripteurs de forme qui permettent de comparer la forme des bassins versants de tailles différentes. Les **figures 78 à 86** montrent les différentes relations empiriques obtenues.



**Figure 78:** Relation linéaire entre les superficies (S) des bassins versants et leurs périmètres (P).



**Figure 79:** Relation linéaire entre les périmètres (P) et les longueurs équivalentes (Leq).

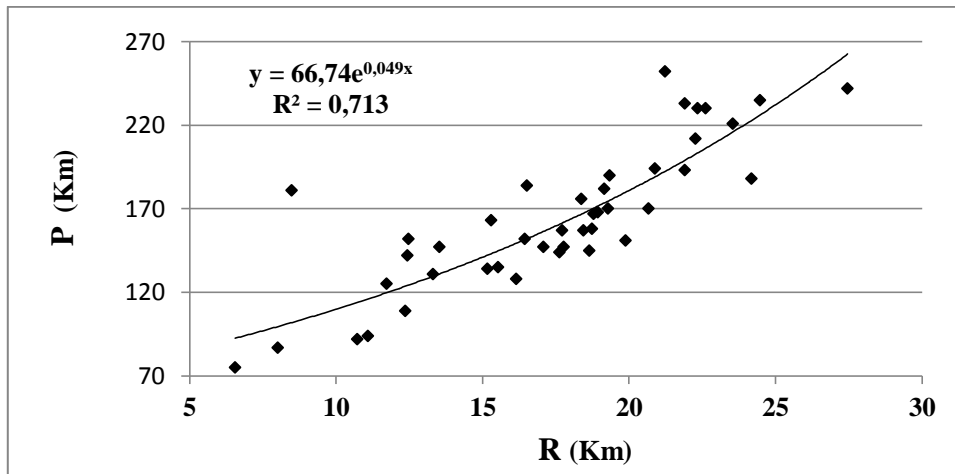


Figure 80: Relation exponentielle entre les périmètres (P) et les rayons des cercles (R).

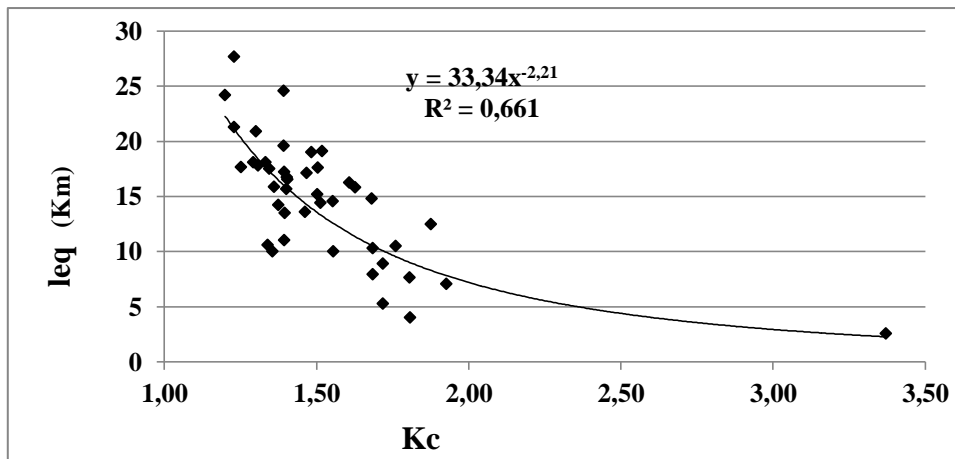


Figure 81: Relation de puissance entre les largeurs équivalentes (leq) et les coefficients de compacité (Kc).

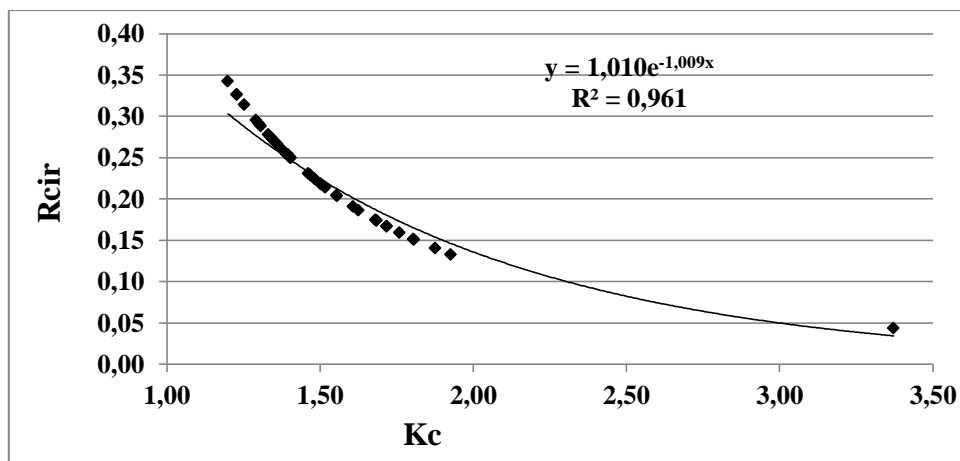
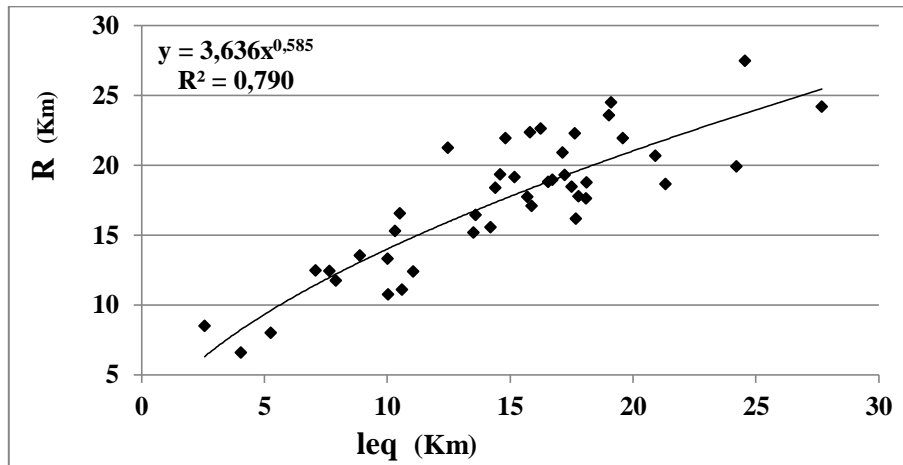
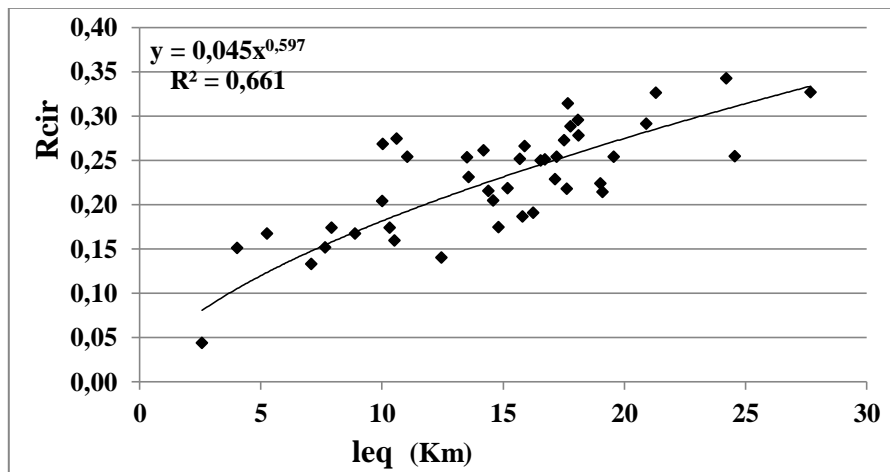


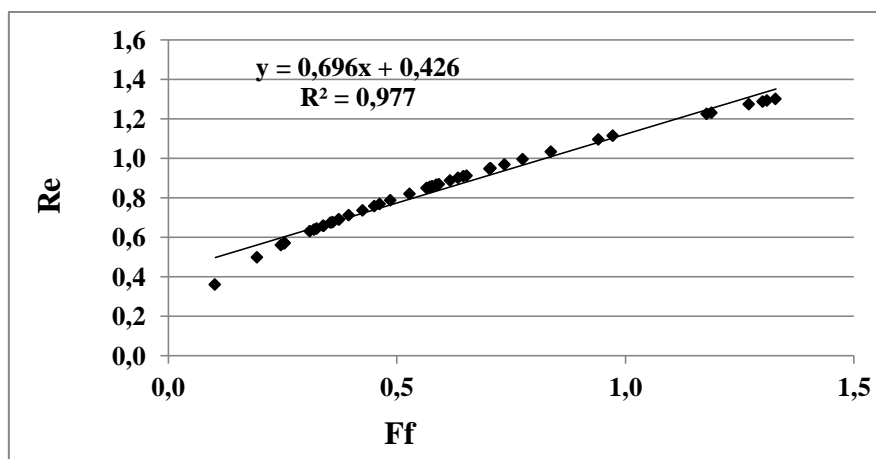
Figure 82: Relation exponentielle entre les rapports de circularité (Rcir) et les coefficients de compacité (Kc).



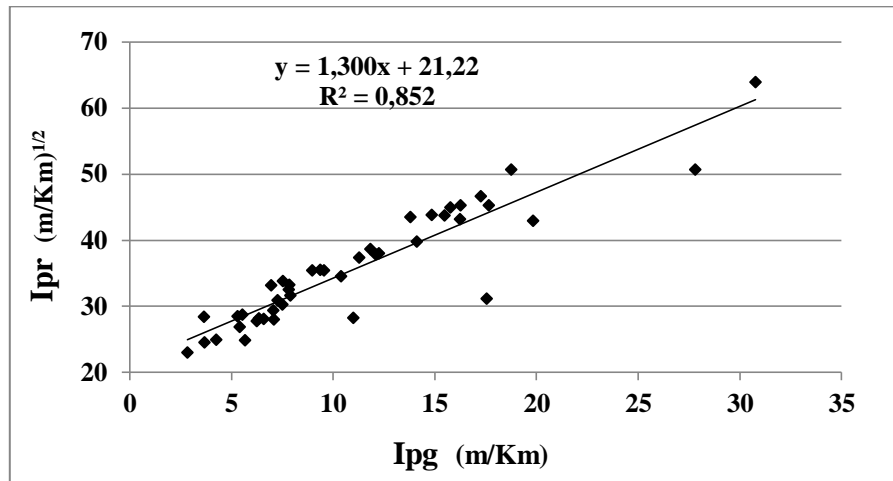
**Figure 83:** Relation de puissance entre les rayons des cercles (R) et les largeurs équivalentes (leq).



**Figure 84:** Relation de puissance entre les rapports de circularité (Rcir) et les largeurs équivalentes (leq).



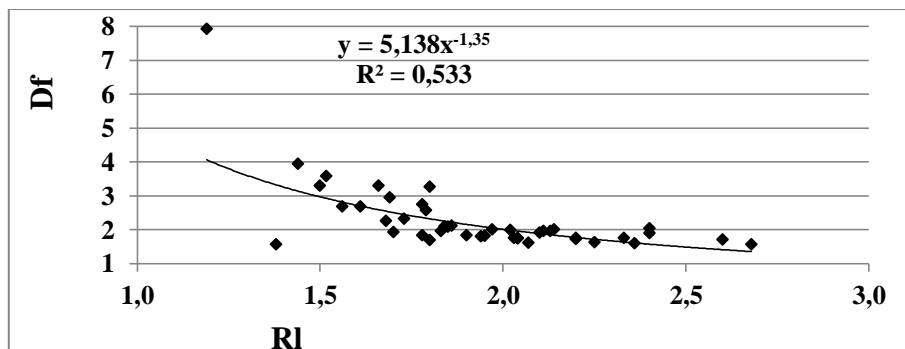
**Figure 85:** Relation linéaire entre les rapports d'élongation (Re) et les facteurs de forme (Ff).



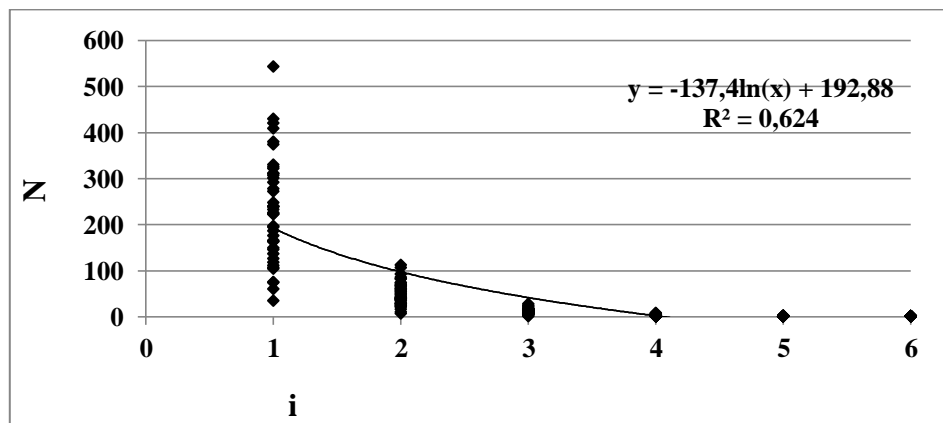
**Figure 86:** Relation linéaire entre les indices de pente de roche (Ipr) et les indices de pente globaux (Ipg).

- **Descripteurs de réseau**

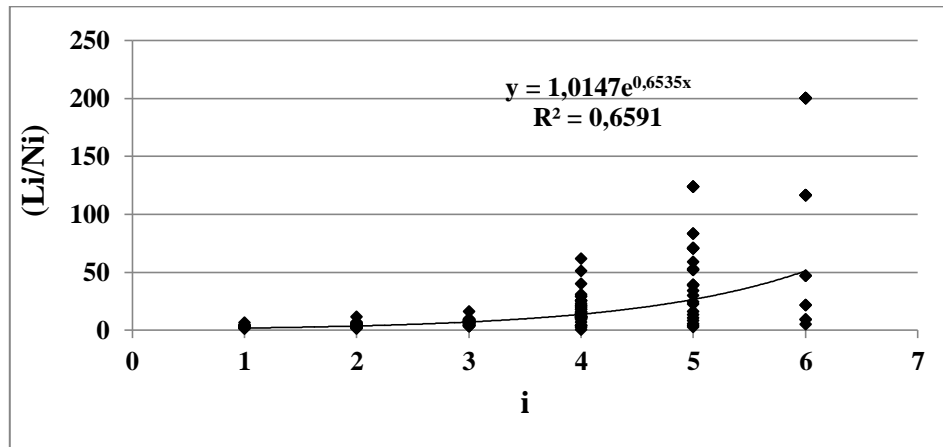
Les relations obtenues entre les descripteurs de réseau sont présentées aux **figures** de (87à 89).



**Figure 87:** Relation de puissance entre les dimensions fractales (Df) et les rapports des longueurs des cours d'eau (RI).



**Figure 88:** Relation logarithmique entre les nombres des cours d'eau (N) et leurs ordres (i).



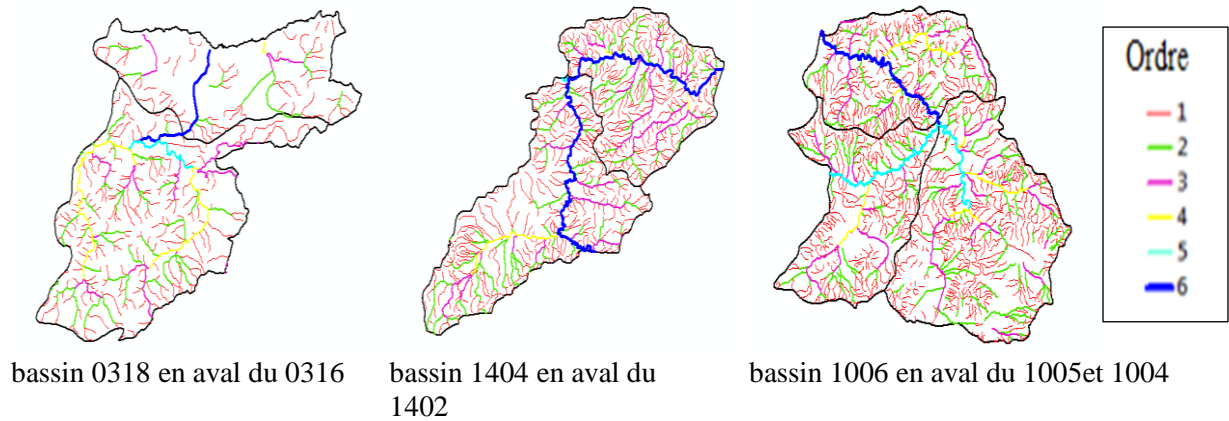
**Figure 89:** Relation exponentielle entre les longueurs moyennes des cours d'eau (Li/Ni) et leurs ordre (i).

Malgré que la classification des réseaux hydrographiques a été établie sur la base du type majoritaire sans tenir compte des sous réseaux qui sont différents du type étudié, une bonne relation a été trouvée entre le type de réseau hydrographique et la dimension fractale, une limitation des plages des valeurs des dimensions fractales a été établie : i) réseau dendritique ( $1,50 \leq D_f \leq 2,50$ ), ii) Réseau parallèle ( $2 \leq D_f \leq 3,50$ ), iii) réseau rectangulaire ( $2 \leq D_f \leq 3$ ), réseau multi-bassins ( $D_f \geq 3$ ]. Cela confirme que les réseaux de même type ont presque des valeurs similaires de la dimension fractale, ce qui permet de déduire que ce descripteur peut être intégré dans l'identification globale des types des réseaux hydrographiques.

D'après la position des bassins versants par rapport aux principaux éléments structurants, un type s'impose et caractérise les bassins à fortes pentes et ayant des profils en long marqués. Ces bassins (ordre max=4) se situent en aval des plus grands bassins (ordres >4). Leur confluence se caractérise par un saut d'ordre. Ce saut dans l'ordination explique un encaissement rapide et de fortes pentes. C'est le cas des bassins 0318-1404-1006 où l'ordre du cours d'eau passe selon la classification de Strahler de l'ordre 4 à l'ordre 6, (**figure 90**).

La différence d'altitude entre le fond du talweg et la ligne de partage des eaux permet de matérialiser le degré d'encaissement au sein des bassins.

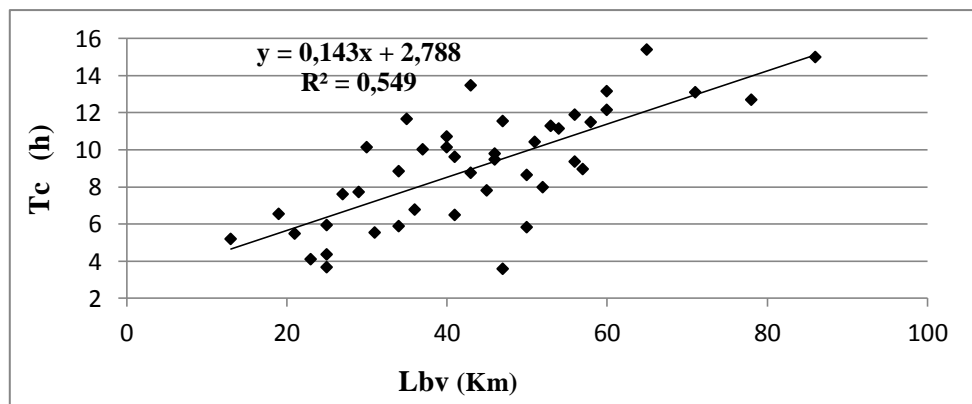




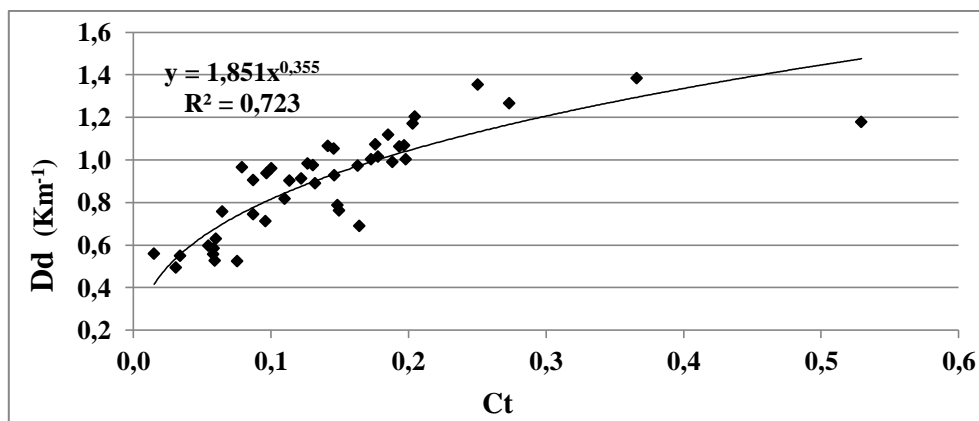
**Figure 90:** Les sous bassins caractérisés par le saut d'ordre.

• **Descripteurs de volume**

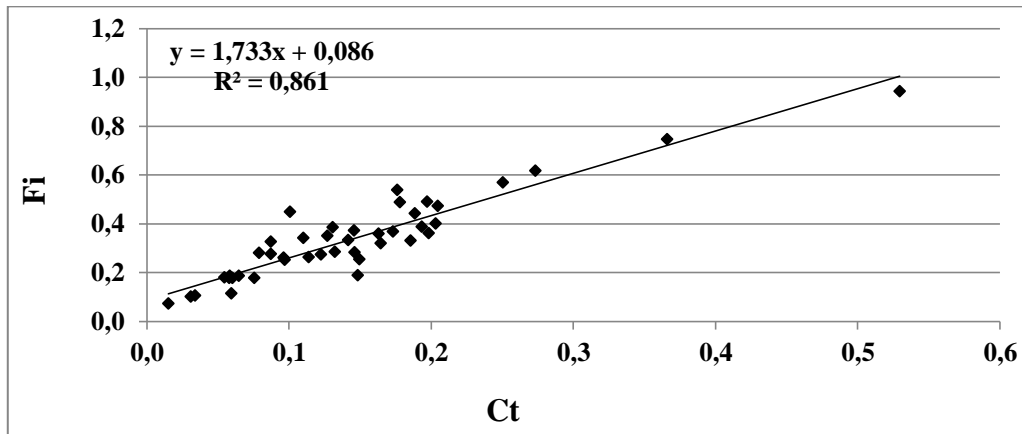
Les relations existantes entre les descripteurs de volumes sont présentées aux **figures** (de 91 à 97).



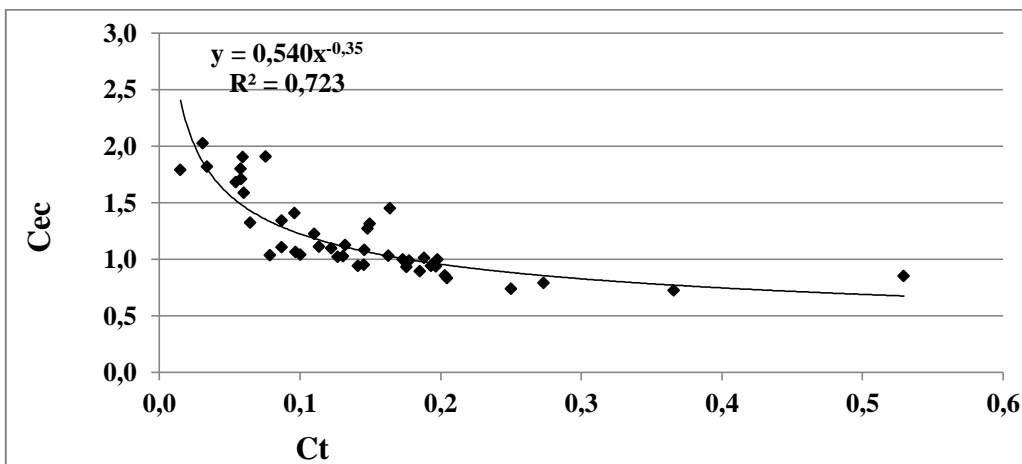
**Figure 91:** Relation linéaire entre les temps de concentration (Tc) et les Longueurs des bassins (Lbv).



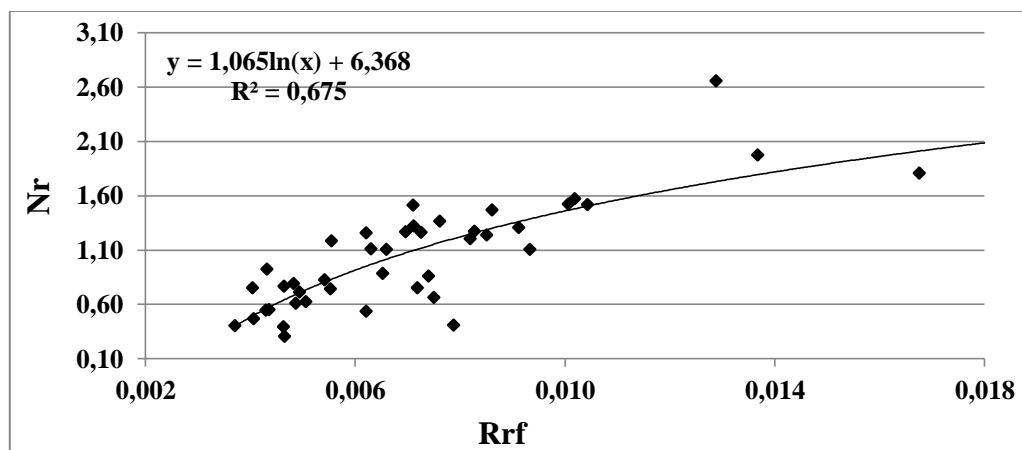
**Figure 92:** Relation de puissance entre les densités de drainage (Dd) et les coefficients de torrentialité (Ct)



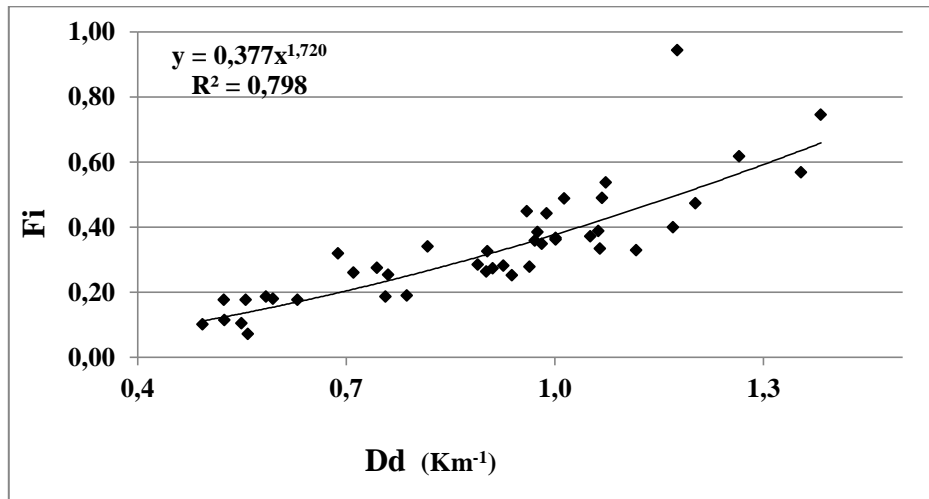
**Figure 93:** Relation linéaire entre les fréquences des cours d'eau (Fi) et les coefficients de torrentialité (Ct).



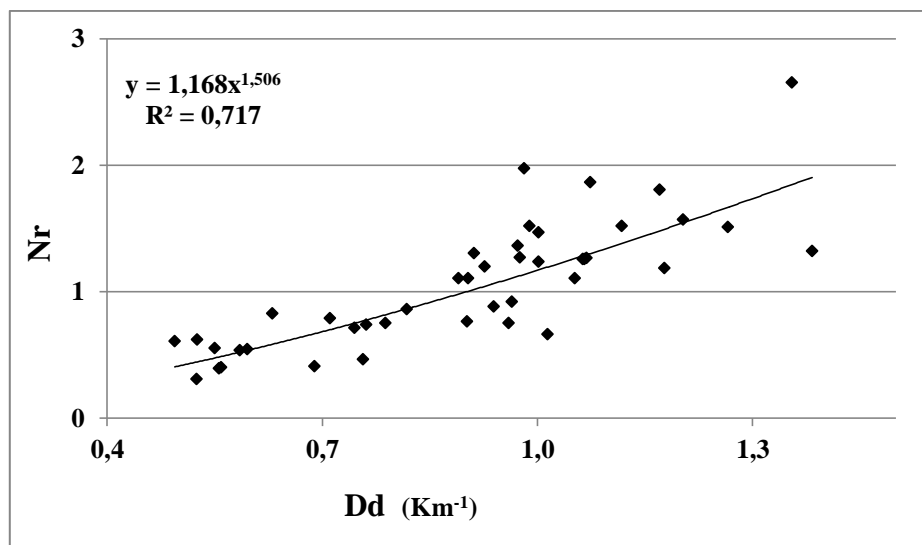
**Figure 94:** Relation de puissance entre les constantes d'entretien du cours d'eau (Cec) et les coefficients de torrentialité (Ct).



**Figure 95:** Relation logarithmique entre les nombres de rugosité (Nr) et les rapports de relief (Rrf).

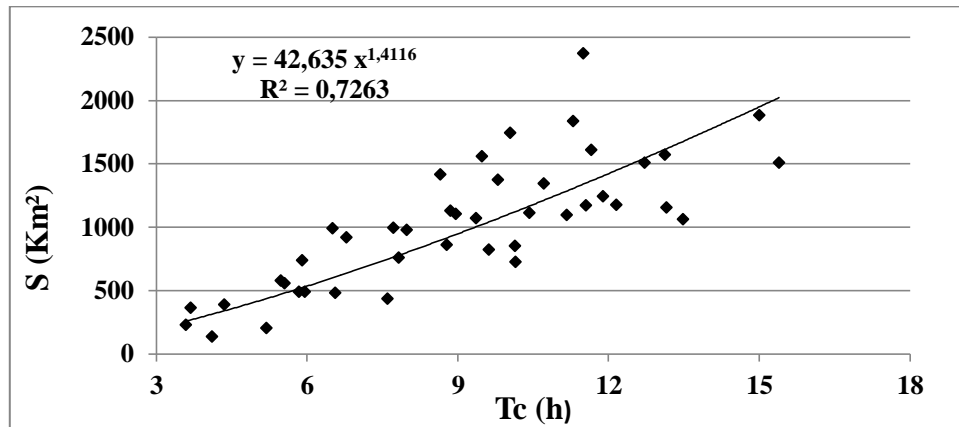


**Figure 96:** Relation de puissance entre les fréquences du cours d'eau (Fi) et les densités de drainage (Dd).

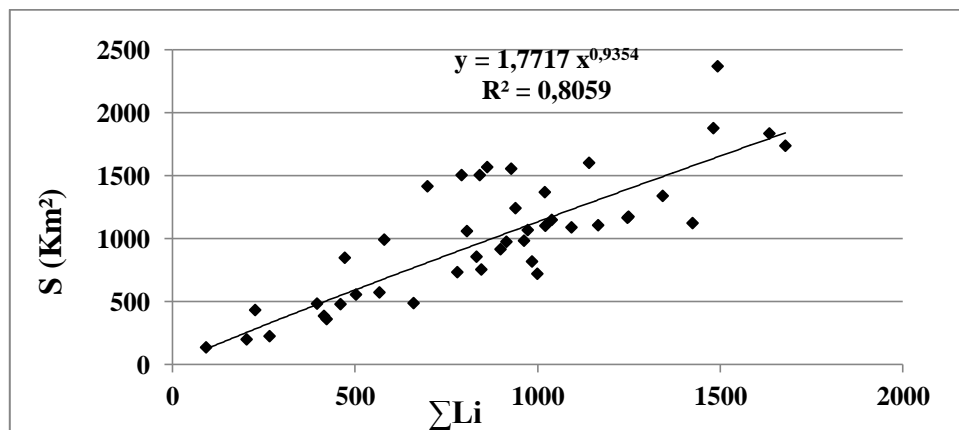


**Figure 97:** Relation de puissance entre les nombres de rugosité (Nr) et les densités de drainage (Dd).

Des relations importantes sont observées entre les descripteurs de forme, de réseau et de volume, un descripteur de forme dépend d'un descripteur de réseau ou de volume, citons comme exemple la surface (descripteurs de forme) a une relation avec la somme des longueurs des cours d'eau (descripteur de réseau) et avec le temps de concentration (descripteur de volume), comme le montrent les **figures 98 et 99**.



**Figure 98:** Relation de puissance entre les surfaces des bassins (S) et les temps de concentration (Tc).



**Figure 99:** Relation de puissance entre les surfaces des bassins (S) et les sommes des longueurs des cours d'eau ( $\Sigma Li$ ).

L'objectif général de ce chapitre était de pouvoir comparer les bassins versants de taille différente en utilisant des descripteurs simples, rapides et faciles à calculer, pour présenter une typologie des indices suivant les différents descripteurs morphométriques étudiés (forme, réseau, volume). Selon les 40 descripteurs recensés on a :

- 11 descripteurs de forme qui s'attachent à décrire la forme et l'allongement du périmètre ;
- 11 descripteurs de réseau pour décrire l'organisation des réseaux hydrographiques ;
- 18 descripteurs de volume pour caractériser la distribution du relief.

L'intérêt pratique de l'analyse morphométrique reste limité par l'affinage des résultats obtenus. Cette analyse a permis de relever des nuances entre les descripteurs morphométriques des sous-bassins choisis comme échantillon à l'échelle des bassins versants du Nord-Est de l'Algérie, où on doit intégrer l'influence de ces facteurs physiques ou descripteurs qui indiquent la forme, la structure du réseau hydrographique et le volume sur les débits des crues.

## VII. Débits des crues

### Introduction

Ce chapitre s'insère parmi les principaux volets de cette thèse. Il est donc important de présenter les débits de crue, qui ont pu être collectées dans le cadre de cette étude. Le but ici est i) d'améliorer la connaissance du comportement hydrologique des bassins en phase de crue, ii) déterminer les influences de la géomorphologie de ces bassins sur le risque inondation.

### VII.1 Processus de formation des crues

La formation d'une crue et ses caractéristiques proviennent de deux phénomènes successifs : La précipitation sous forme de pluie ou de neige, puis le transfert de ces précipitations de l'ensemble du bassin versant vers le cours d'eau. Les caractéristiques de l'épisode de pluie (ou fonte) dépendent du climat général et de la météorologie locale. Les conditions de transfert de l'eau précipitée dépendent de l'état de saturation du sol, de la morphologie et de la géologie du bassin versant.

#### \* Types des écoulements

Il existe une grande variété de fonctionnements hydrologiques et donc de processus de l'écoulement, (Dunne, 1983). Il est donc nécessaire de présenter les principaux traits. On distingue trois principales catégories de processus, (**figure 100**) :

- Ecoulement de surface qui est dû au dépassement de la capacité d'infiltration des sols par l'intensité de la pluie. La réponse du versant est fonction de la variabilité spatiale de l'infiltration ;
- Ecoulement hypodermique ou de sub-surface « écoulement rapide interne » qui se produit dans les zones non saturées.
- L'écoulement profond « écoulement de base » qui se produit dans les zones saturées. La réponse du versant est fonction de la variabilité spatiale de l'infiltration.

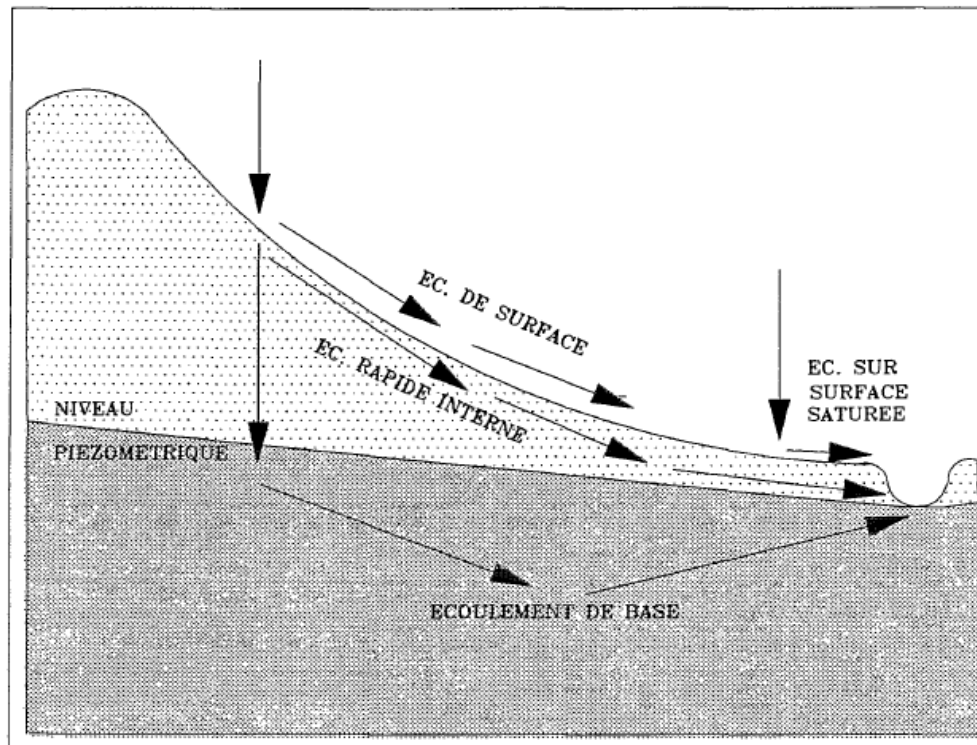


Figure 100: Types des écoulements, (Dunne, 1978).

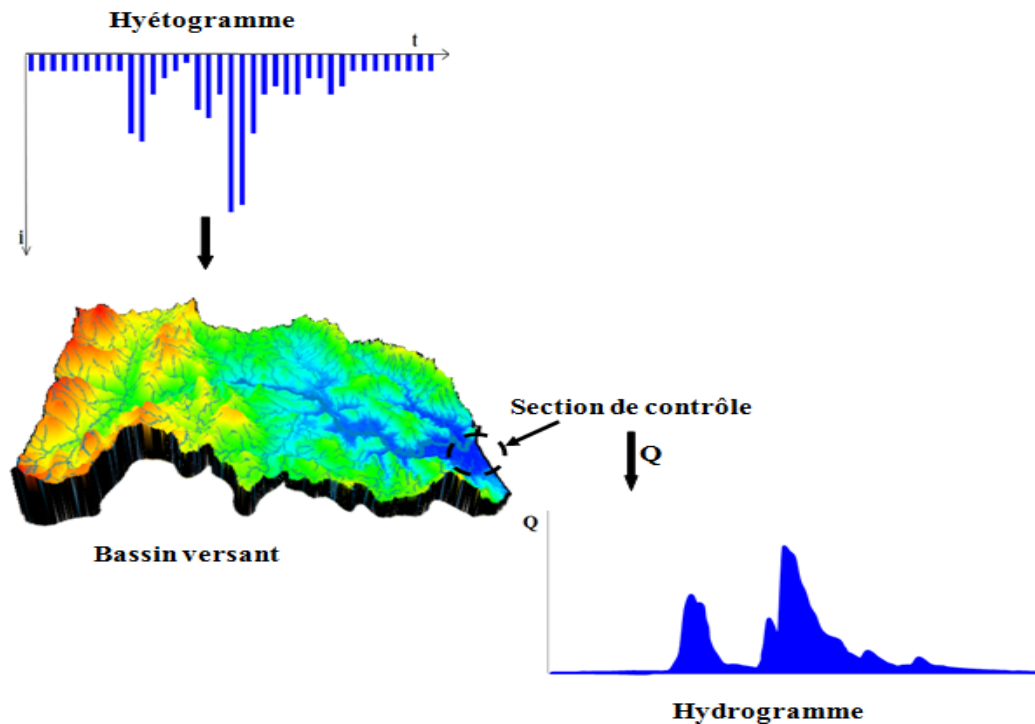
#### \* Réponse hydrologique

La manière dont réagit le bassin versant lorsqu'il est soumis à une sollicitation se nomme réponse hydrologique, (**figure** 101). Elle peut-être caractérisée spatialement totale ou partielle, temporellement rapide ou retardée.

La rapidité des réponses des bassins versants est généralement expliquée par la formation de ruissellement à la surface du sol dont le temps de transfert est court. La compréhension des phénomènes régissant le ruissellement est donc un élément clé pour l'amélioration des prévisions des crues. Ce chapitre met en lumière les effets des variations de l'intensité de la pluie et de la longueur du versant sur la production du ruissellement à la surface du sol (écoulement de surface).

Les facteurs météorologiques tels que la nature des précipitations (pluie, neige...), leur intensité et leur durée, la distribution temporelle et spatiale de la pluie et le trajet des orages vont aussi influencer fortement la réponse hydrologique du bassin.





**Figure 101:** Principe de la réponse hydrologique d'un bassin versant.

**\* Genèse des crues et facteurs d'influence de la réponse hydrologique**

La réponse hydrologique d'un bassin versant est influencée par une multitude de facteurs tels que ceux liés :

- aux conditions climatiques du milieu,
- à la pluviosité (répartition spatiale et temporelle, intensité et durée),
- à la morphologie du bassin versant (forme, dimension, altimétrie, orientation des versants),
- aux propriétés physiques du bassin (nature des sols, couverture végétale),
- à la structuration du réseau hydrographique (extension, dimension, propriétés hydrauliques),
- aux états antécédents d'humidité des sols.

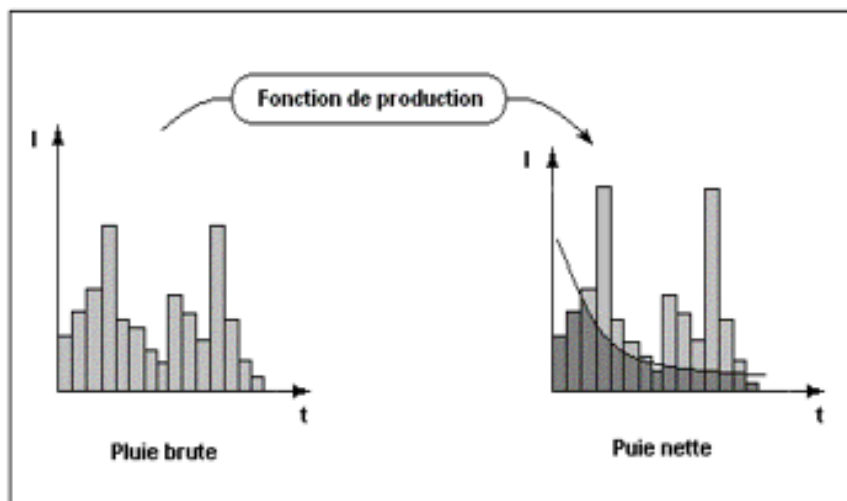
Les facteurs liés aux précipitations ainsi qu'aux conditions climatiques sont des facteurs externes au milieu, tandis que la morphologie, les propriétés physiques du versant, la structuration du réseau et les conditions antécédentes d'humidité sont des facteurs internes.

## VII.2 Transformation de la pluie en hydrogramme de crue

Les précipitations constituent l'unique entrée des principaux systèmes hydrologiques «bassins versants». L'eau précipitée dans un bassin va se répartir en eau interceptée, évaporée, infiltrée ou écoulee. Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant se manifeste par 2 types de fonctions :

- **Fonction de production**

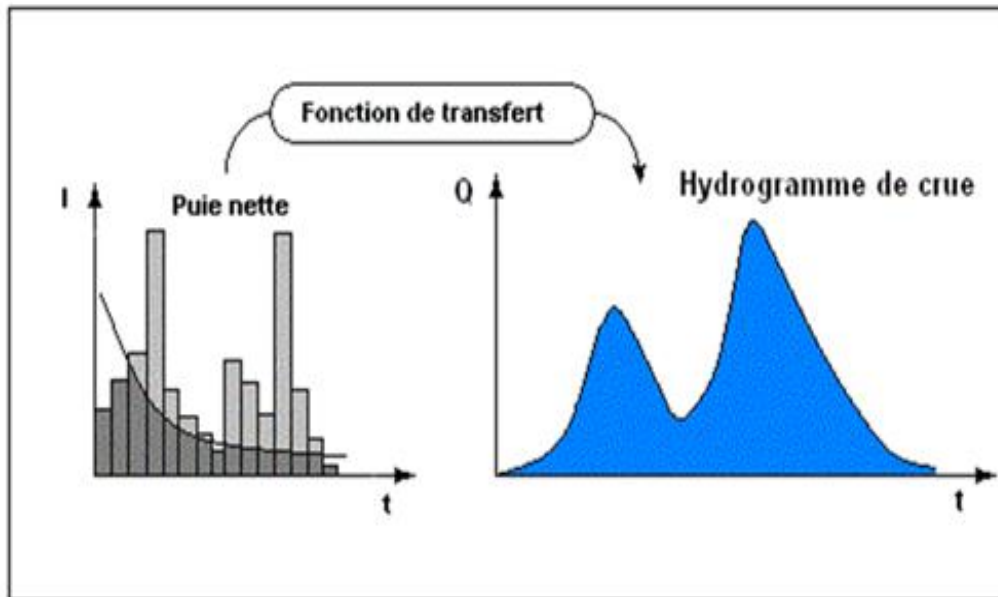
La fonction de production permet de déterminer la portion de la pluie brute (appelée pluie nette ou efficace) qui va participer à l'écoulement et contribuer au débit à l'exutoire, (**figure 102**). Elle cherche à représenter l'interaction entre le sol et la lame d'eau précipitée pour connaître quelle part de la pluie va être stockée dans le sol, quelle sera celle qui va ruisseler et dans quelles conditions.



**Figure 102:** Fonction de production

- **Fonction de transfert**

Une fois la pluie nette calculée, il faut établir une fonction de transfert pour déterminer la distribution dans le temps de ces volumes d'eau à l'exutoire, (**figure 103**). Plusieurs méthodes existent pour déterminer la fonction de transfert d'un bassin. Les plus complexes utilisent les équations de Barre Saint Venant avec les modèles d'onde diffusante ou d'onde cinématique. Les plus simples utilisent la distance de chaque point de la grille à l'exutoire et affectent une vitesse.



**Figure 103:** Fonction de transfert

### VII.3 Débits des crues de la région d'étude

La plupart des modèles hydrologiques, ont besoin d'une base de données des débits observés, que ce soit pour le calage de leurs paramètres, ou pour la validation des hypothèses, faites pour décrire le comportement hydrologique du bassin versant modélisé. Pour étudier l'influence de la structure du réseau hydrographique sur la réponse hydrologique, il est nécessaire donc d'avoir des données hydrométriques. Cependant, ces données ne sont pas toujours disponibles en quantité ou en qualité suffisante, pour permettre le calcul des variables à des échelles spatiales et temporelles appropriées, et à une précision acceptable pour des applications pratiques. C'est le cas des données de débits de crues recueillies au niveau de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) d'Alger. Cette base de données est insuffisante, en raison de l'insuffisance du réseau de stations hydrométriques sur l'étendue de la région d'étude.

Les codes et débit max des stations hydrométriques disponibles sont présentées dans la **figure 104**. Les caractéristiques de ces stations hydrométriques sont exposées dans le **tableau 13**.

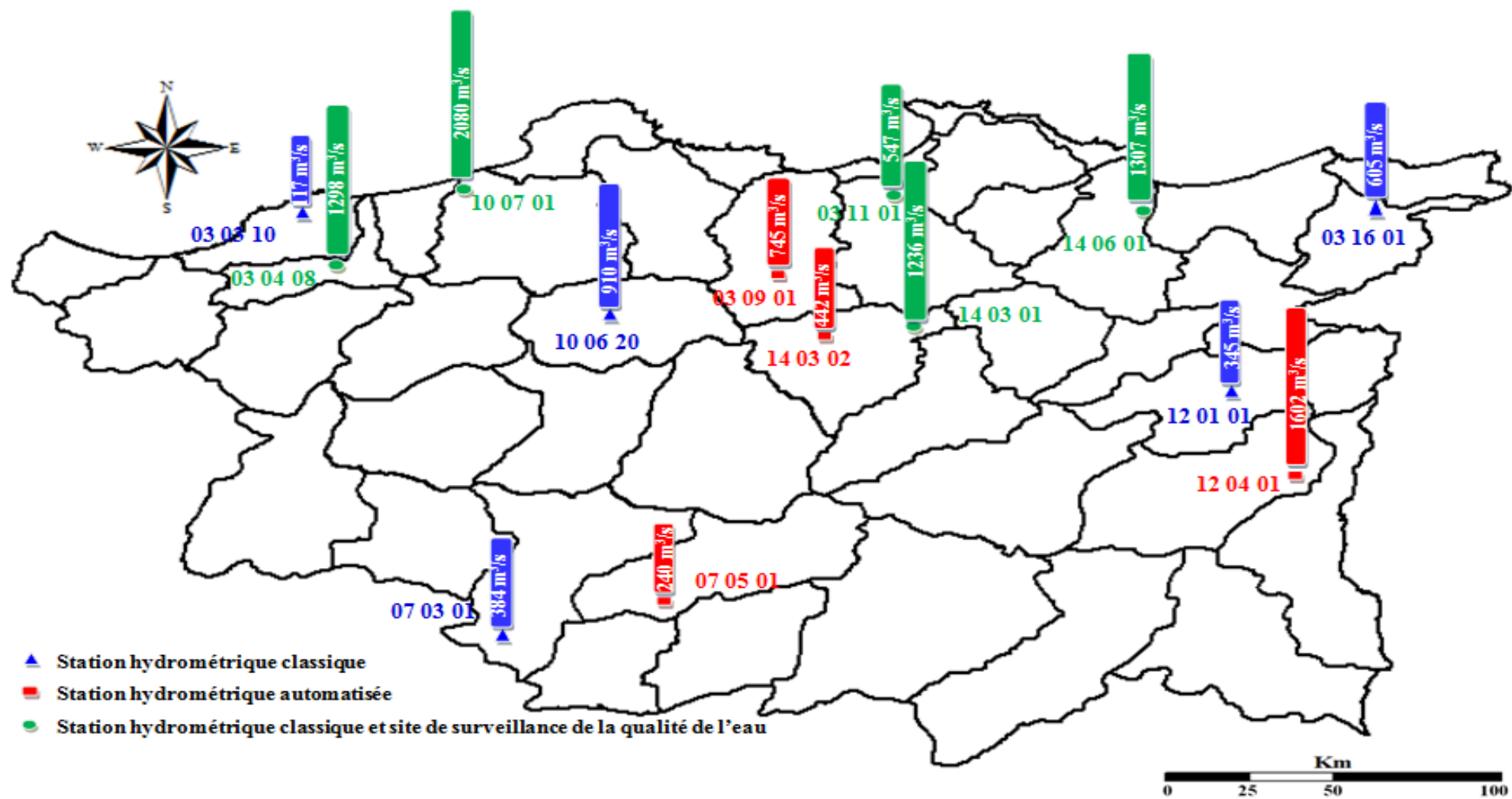


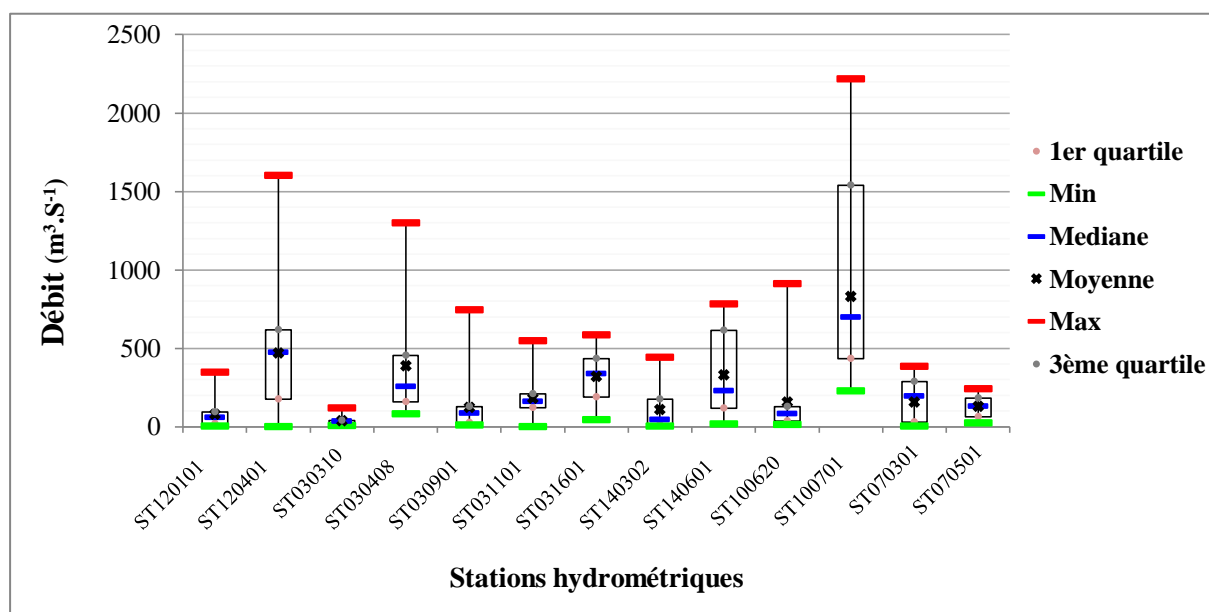
Figure 104: Codes et débit max des stations hydrométriques considérées

**Tableau 13:** Caractéristiques des stations hydrométriques de la région d'étude

Code	Nom	Cours d'eau	Période	$Q_{\min}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{\text{moy}}$ (m <sup>3</sup> /s)	Date et Heure du $Q_{\max}$
120101	Souk Ahras	Medjerda	52-85	2,52	345	78	27/03/1973 à 20h.00
120401	Ouenza	Mellegue	72-03	0,001	1602	468	
030310	El Mkaceb	El Kantara	72-01	0,001	117	2	01/01/1974 à 9h.00
030408	Oued Missa	Djendjen	72-93	0,05	1298	25	24/04/1976 à 2h.00
030901	Khemakhem	Safsaf	73-02	0	745	7	16/10/1997 à 23h.00
031101	Ain Cherchar	Emchekel	73-03	0,01	547	21	03/02/1984 à 19h.00
031601	Ain Assel	El kebir Est	46-02	42,51	585	319	18/11/1976 à 14h.00
140301	Medjez Amar II	Bouhamdane	68-86	0,028	1236	21	03/02/1984 à 17h.00
140302	Bordj Sabat	Bouhamdane	73-04	0,732	442	109	
140601	Mirebeck	Seybouse	68-91	0	1307	50	28/03/1973 à 2h.00
100620	El Kheneg	Rhumel Smendou	83-98	10,65	910	155	31/12/1984 à 10h.00
100701	El Ancer	Kebir Rhumel	72-03	227	2412	830	30/12/1984 à 19h.00
070301	Fesdis	El Madher	69-86	3,04	384	156	/09/1971
070501	Chemora	Boulhilet	69-99	0,001	239	5	27/05/1989 à 2h.25min

Source : ANRH Alger

La **figure 105** montre la distribution des débits observés en utilisant la boîte de Tukey ou Box plot.

**Figure 105:** Box plot des débits observés

- La station 100701 du sous bassin 1007 présente une distribution des caractéristiques empiriques largement différente. Les box plot de la plus part des stations hydrométriques sont allongés vers le haut (en raison des valeurs max des débits).

Une bonne connaissance des événements pluvieux est fondamentale pour améliorer la gestion du risque de crue. Pour anticiper l'aléa, il est nécessaire d'acquérir le maximum d'information en amont de l'événement, et savoir les moments de déclenchement des phénomènes.

Dans cette optique, un historique des pluies violentes de la région d'étude est présenté ci-dessous :

- Les pluies du 27 au 29 Mars 1973 ont été des pluies exceptionnelles (pluie journalière de 166,2 mm à Annaba).
- Les pluies du 03 Février 1984 ont été des pluies abondantes avec un maximum sur les monts de Constantine (120 mm en 03 jours) et les monts de la Medjerda (80 mm en 03 jours).
- Du 29 Décembre au 01 Janvier 1985 il a été enregistré plus de 250 mm en 04 jours seulement et 195 mm en une journée. Ces pluies ont été généralisées sur l'ensemble des bassins de l'Est Algérien et ont provoqué des inondations catastrophiques dans toutes les wilayas de l'Est de l'Algérie notamment Jijel, Constantine, Skikda, Guelma, Annaba et El Tarf.
- La ville de Batna a connu des pluies orageuses très violentes en date du 05 juillet 1987 (pluie journalière de 57 mm).

La présentation de ces quelques données des crues permet de dresser le **tableau 14**

**Tableau 14:** Résumé des caractéristiques des crues observées lors des inondations suscitées

Code	Nom	Cours d'eau	Hauteur maximale (m)	Débit Maximum (m <sup>3</sup> /s)
<b>Pluie du 27 au 29 Mars 1973</b>				
140301	Medjez Amar II	Bouhamdane	6,00	986
140501	Boucheougouf	Mellah	6,60	559,50
140602	Ain berda	Ressoul	3,54	137
140202	M.Rochefort	Cherf amont	4,29	345
140601	Mirebeck	Seybouse	15,00	2400
031601	Ain Assel	El kebir Est	10,30	376,44
120101	Souk Ahras	Medjerda	6,50	344
120401	Ouenza	Mellegue	3,36	466,50
120404	El Aouinet	Mellegue	3,50	385,20

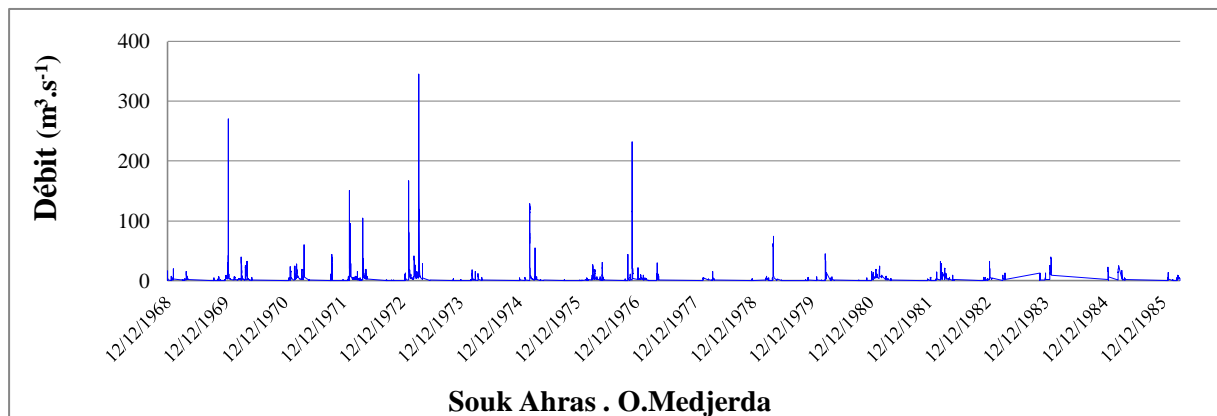


<b>Code</b>	<b>Nom</b>	<b>Cours d'eau</b>	<b>Hauteur maximale (m)</b>	<b>Débit Maximum (m<sup>3</sup>/s)</b>
120522	Morsott	Ksob	3,65	97,50
<b>Pluie du 03 Février 1984</b>				
140201	Medjez Amar I	Cherf aval	6,00	2000
140301	Medjez Amar II	Bouhamdane	6,80	1500
140501	Boucheougouf	Mellah	4,58	715
140202	Moulin.Rochefort	Cherf amont	-	632
140602	Ain berda	Ressoul	3,80	173
140601	Mirebeck	Seybouse	15,15	3100
<b>Pluie du 29 Décembre 1984</b>				
140201	Medjez Amar I	Cherf aval	6,20	-
140301	Medjez Amar II	Bouhamdane	6,10	1450
140501	Boucheougouf	Mellah	3,89	510
140602	Ain berda	Ressoul	3,05	80
140601	Mirebeck	Seybouse	14,90	2900
031601	Ain Assel	El kebir Est	10,10	508
031101	Ain Charchar	Kebir Ouest	11,30	316

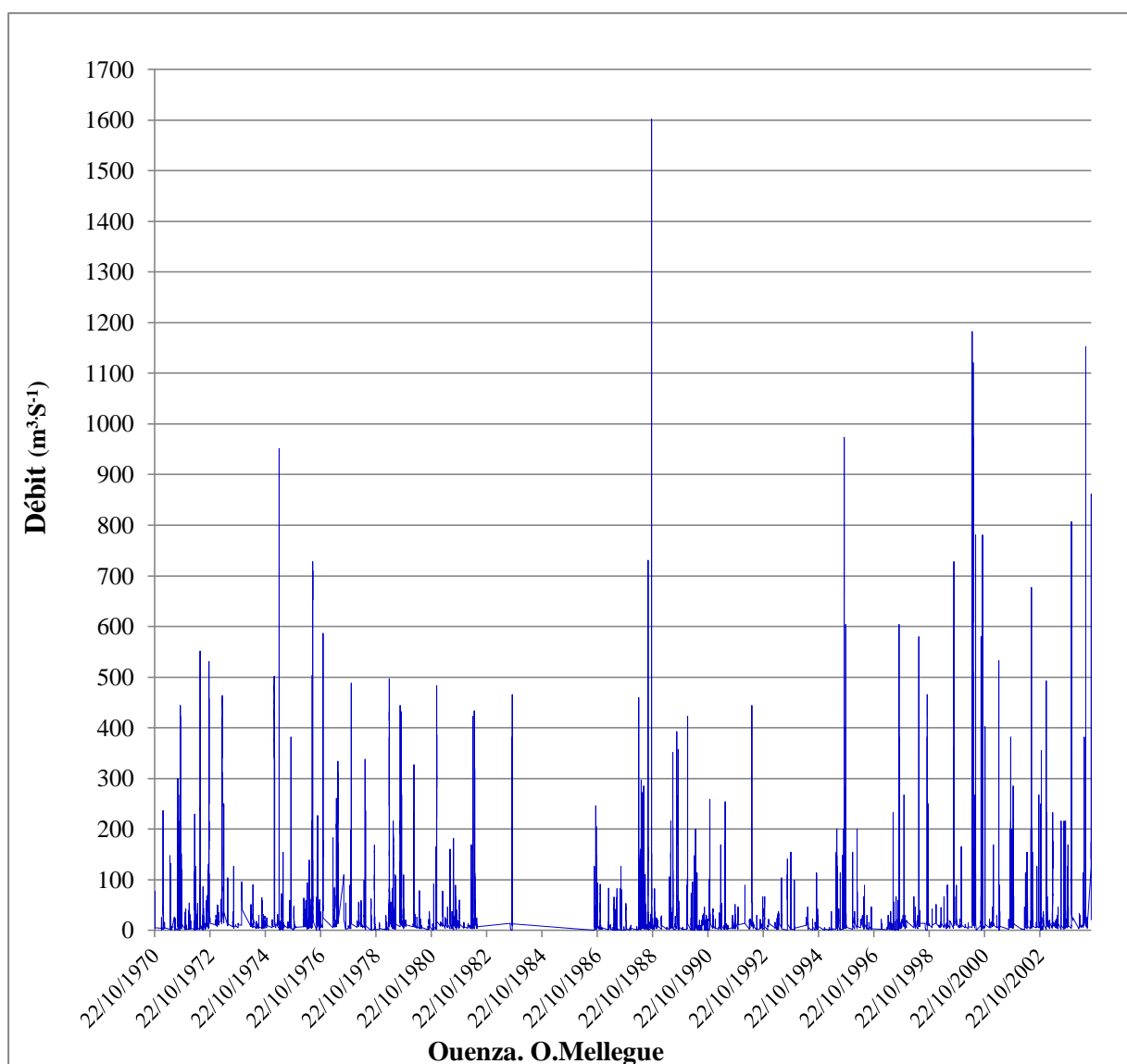
Source : (Lahlah, 2004).

Le tracé des séries de données sur plusieurs années, donne des informations sur les caractéristiques des cours d'eau à savoir le module, les quantiles et la saisonnalité des crues. Les graphiques ci-dessous (**figures** de 106 à 117) représentent sur différentes périodes, les débits enregistrés au niveau des stations hydrométriques des principaux cours d'eau.

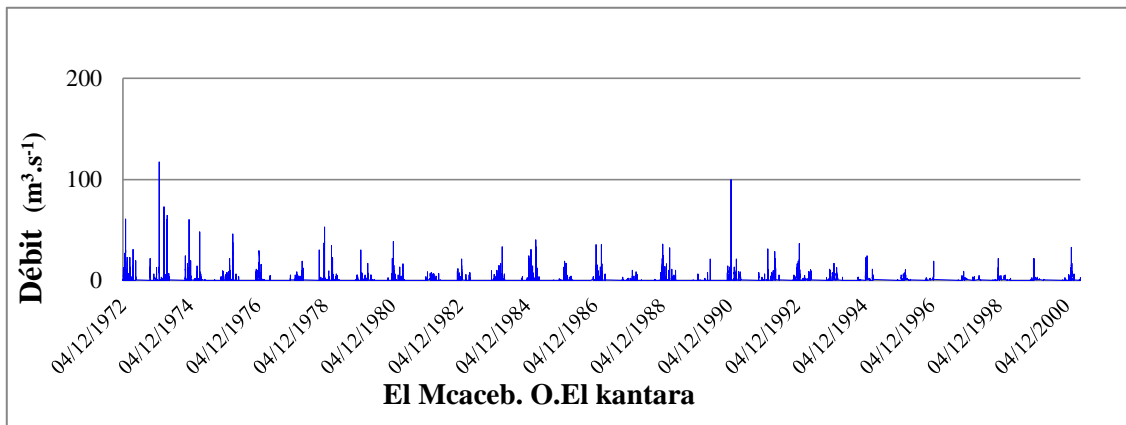
L'objectif de la présentation de ces chroniques, est d'en extraire les événements extrêmes de crues dans leur intégralité. Cette extraction, sera généralisée à tout le bassin.



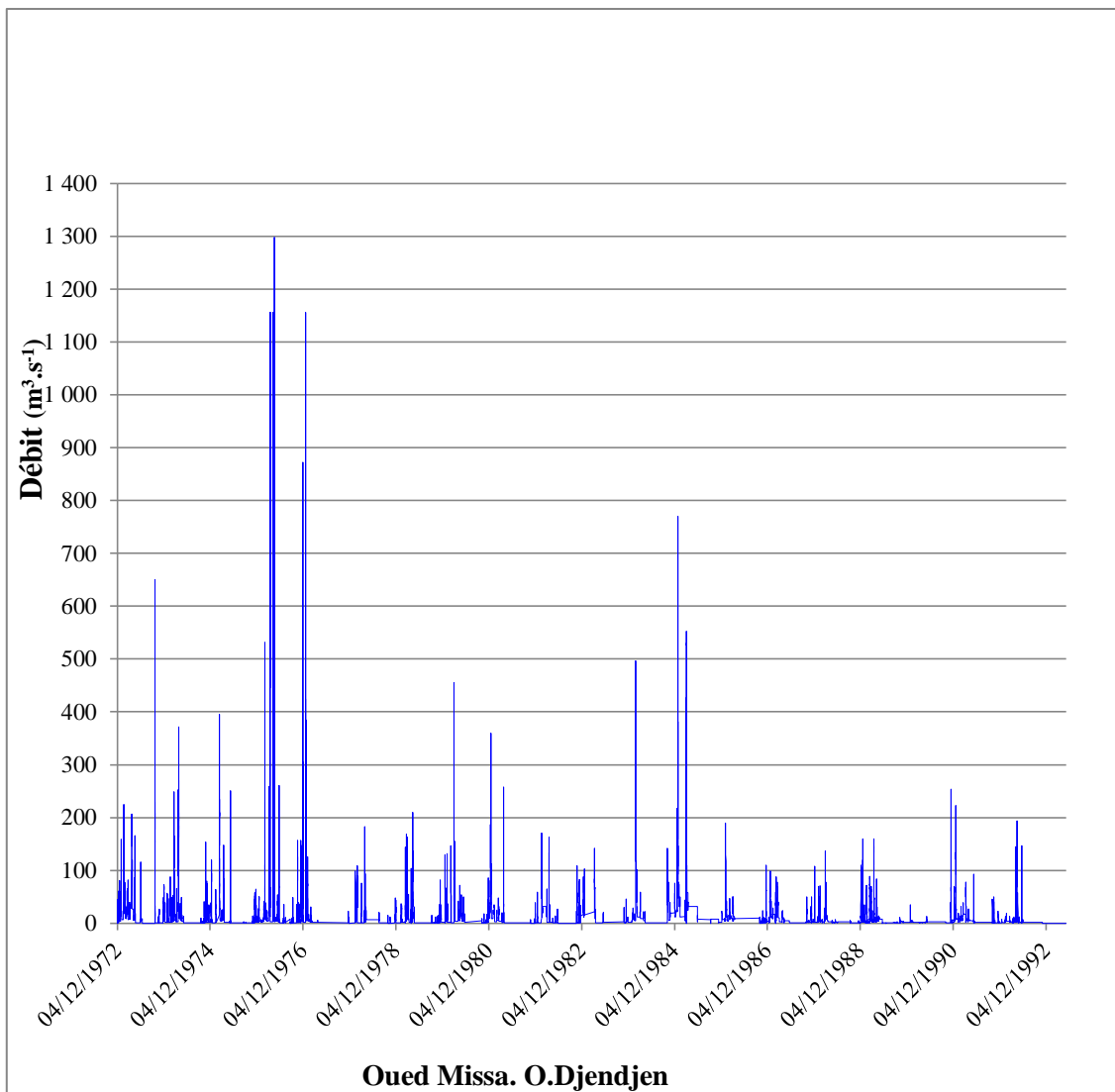
**Figure 106:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 1201.



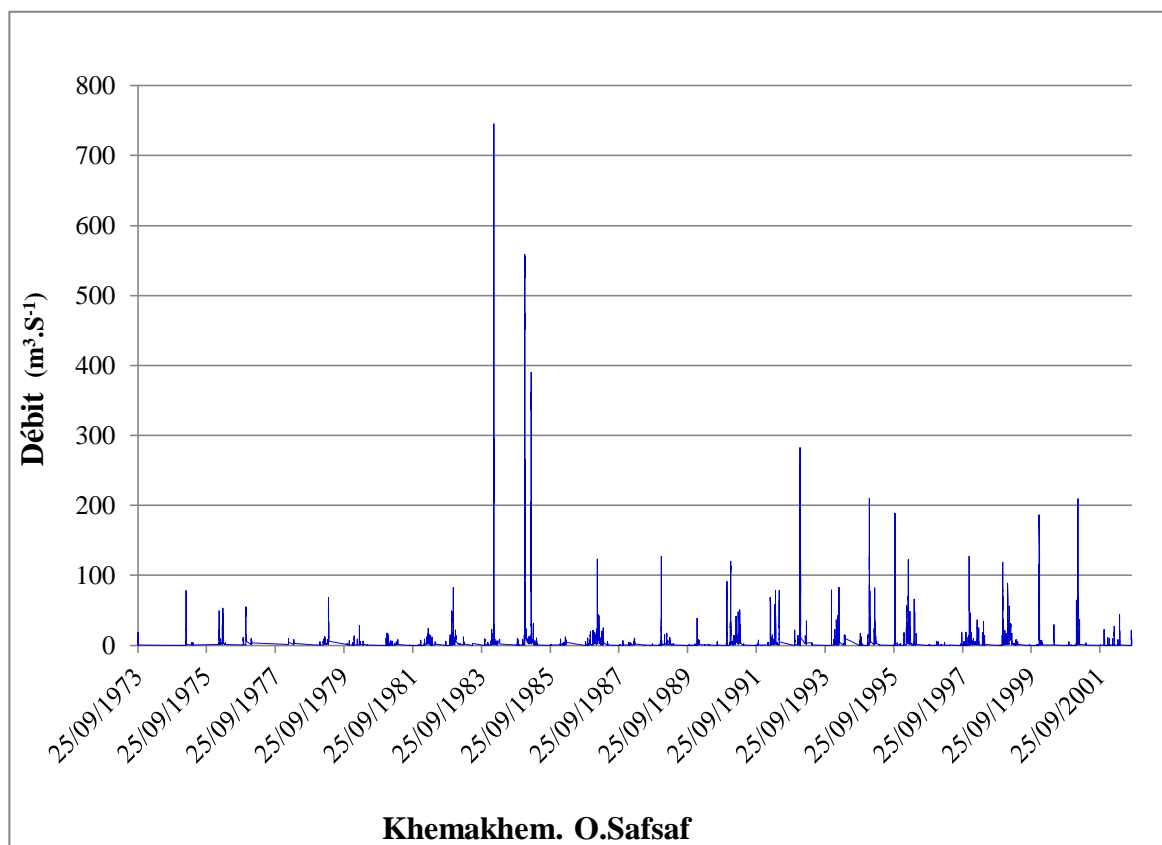
**Figure 107:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 1204



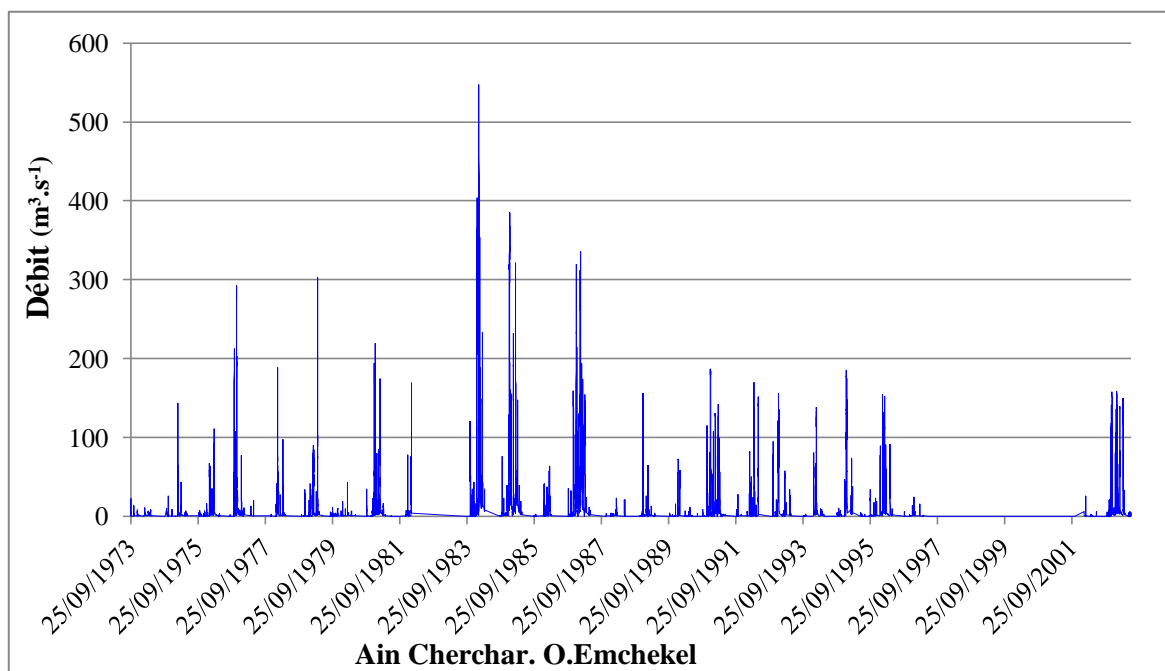
**Figure 108:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 0303.



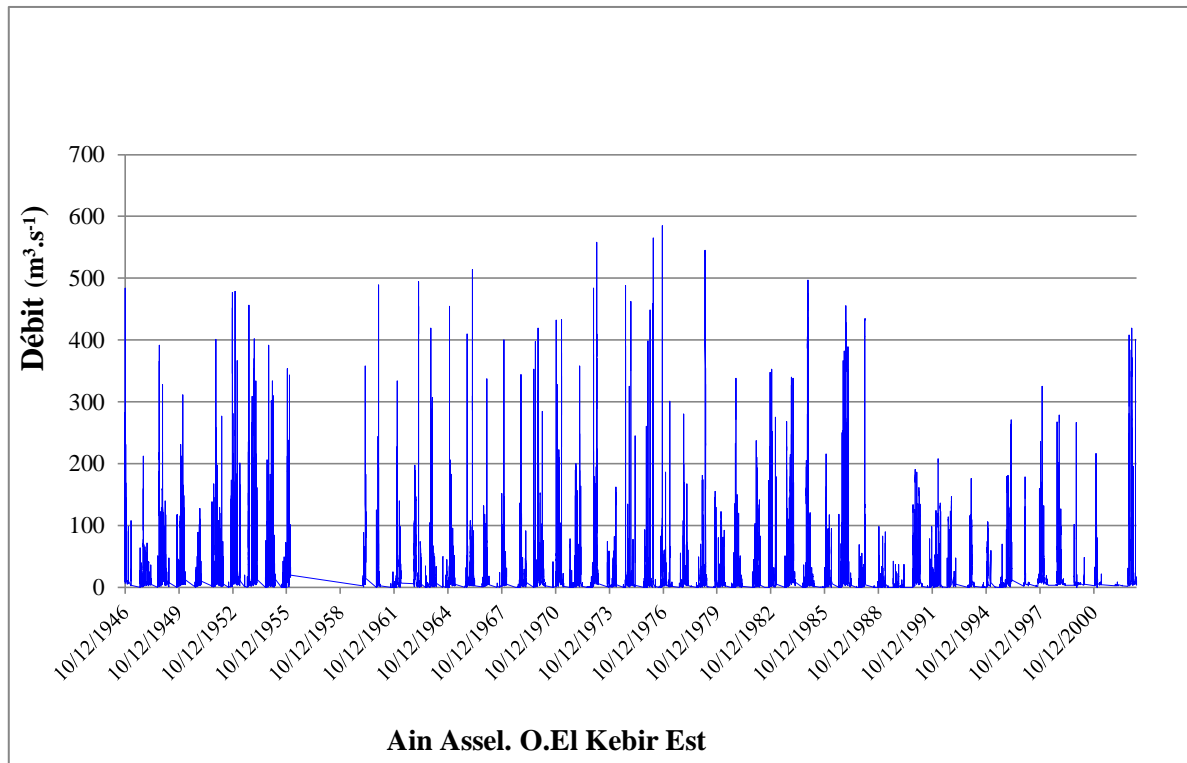
**Figure 109:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 0304



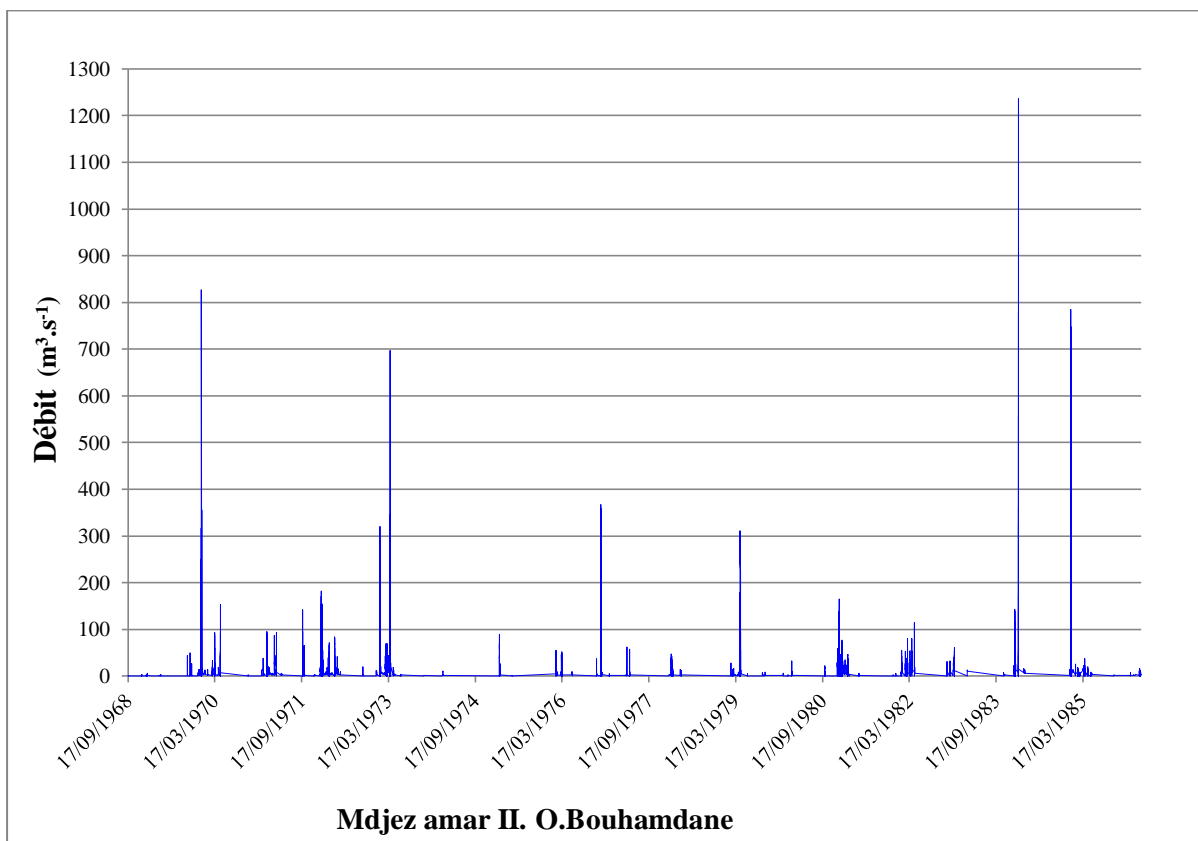
**Figure 110:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 0309



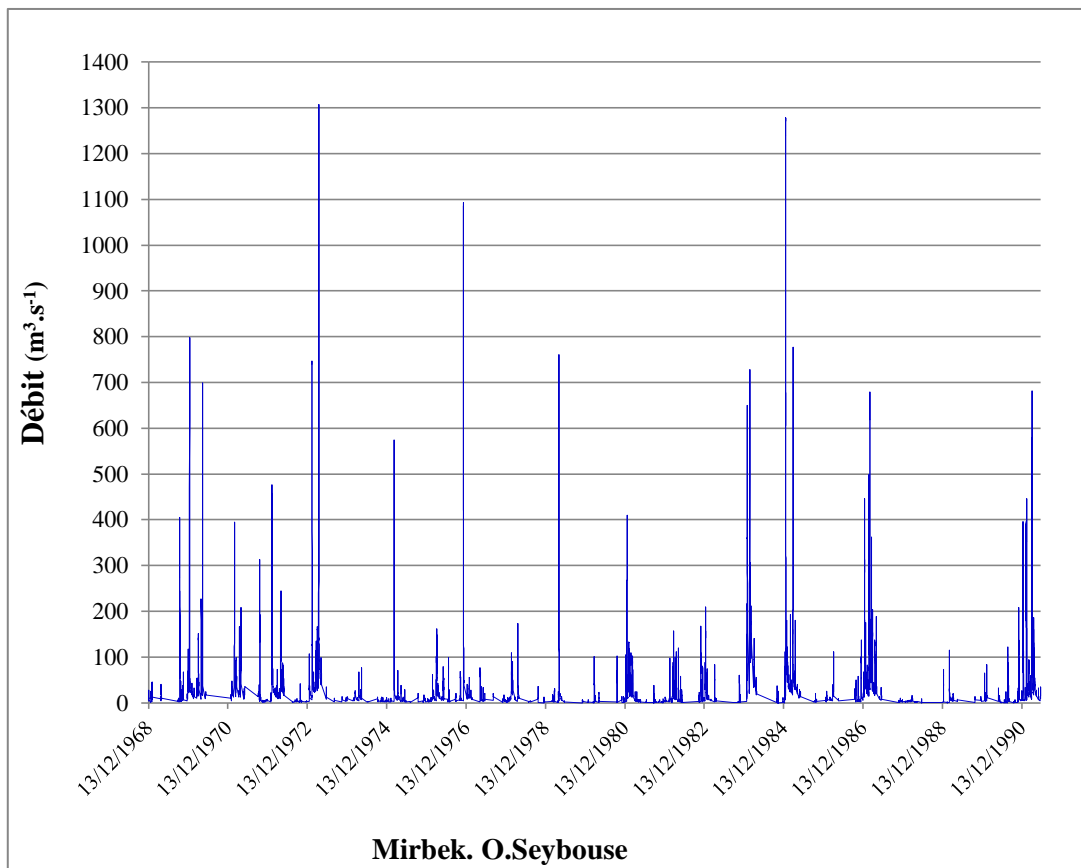
**Figure 111:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 0311.



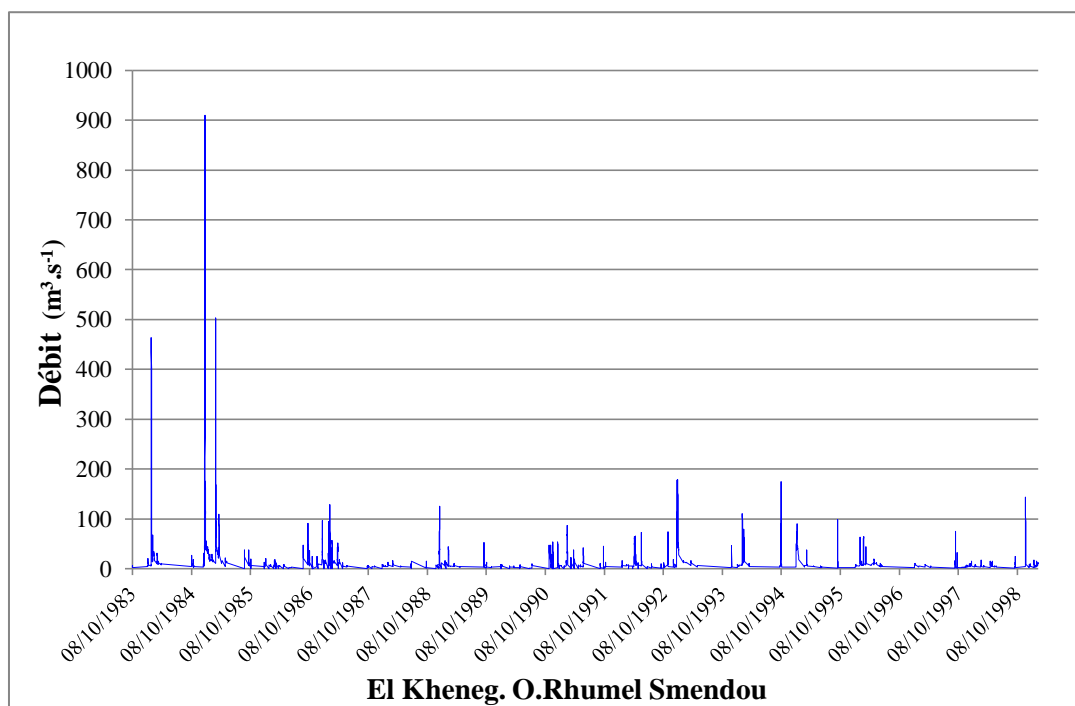
**Figure 112:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 0316



**Figure 113:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 1403

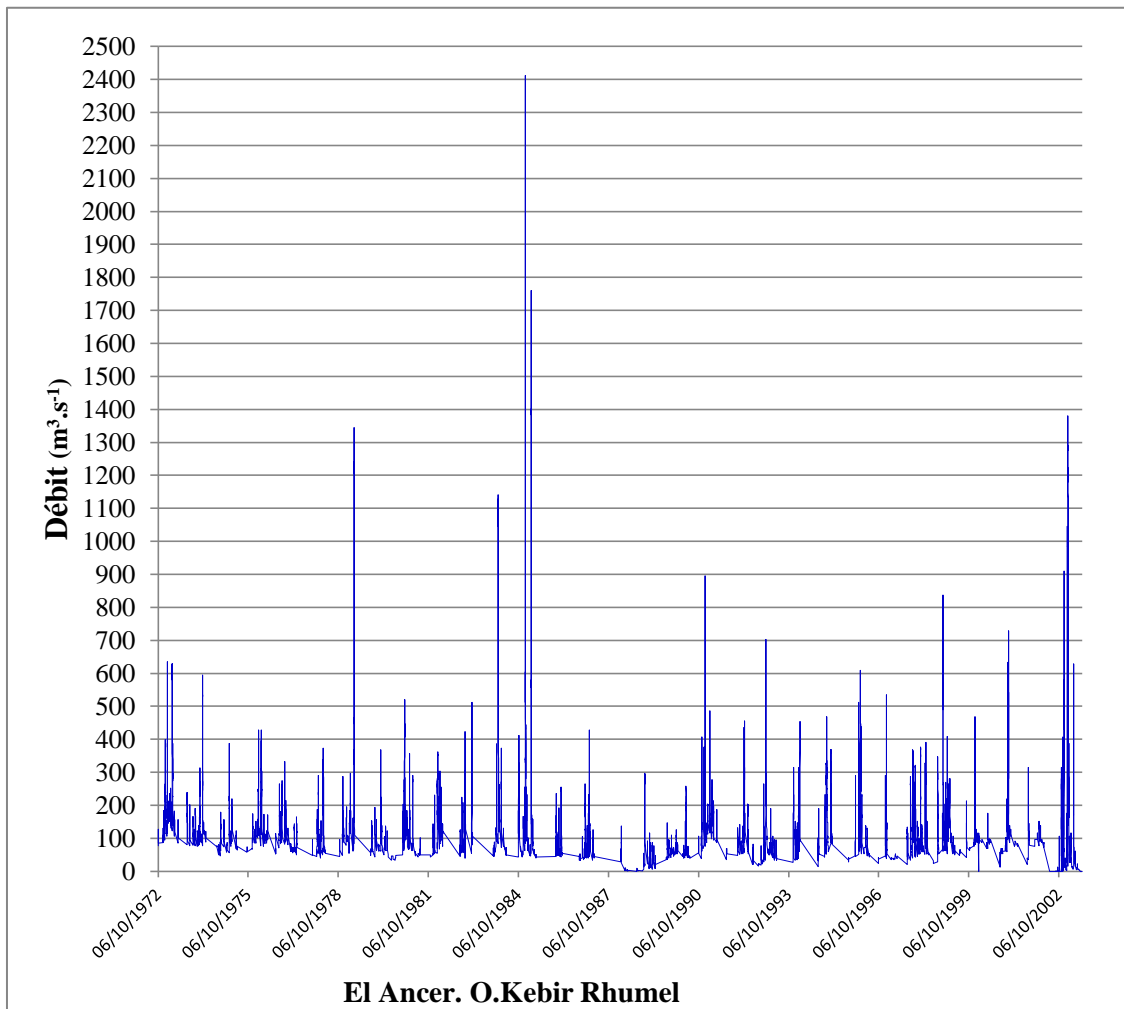


**Figure 114:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 1406.

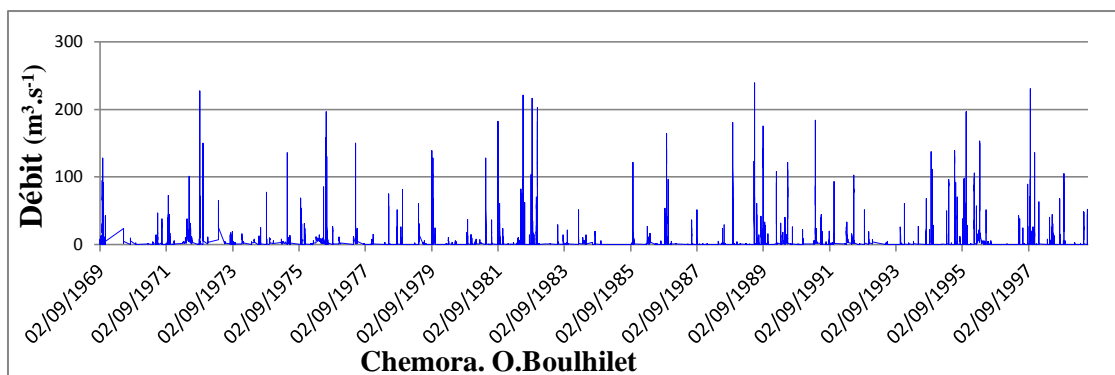


**Figure 115:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 1006





**Figure 116:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 1007.



**Figure 117:** Chroniques des débits des crues du sous bassin 0705

Les chroniques des débits des crues correspondants aux sous bassins concernés sont données dans la **figure 118**.

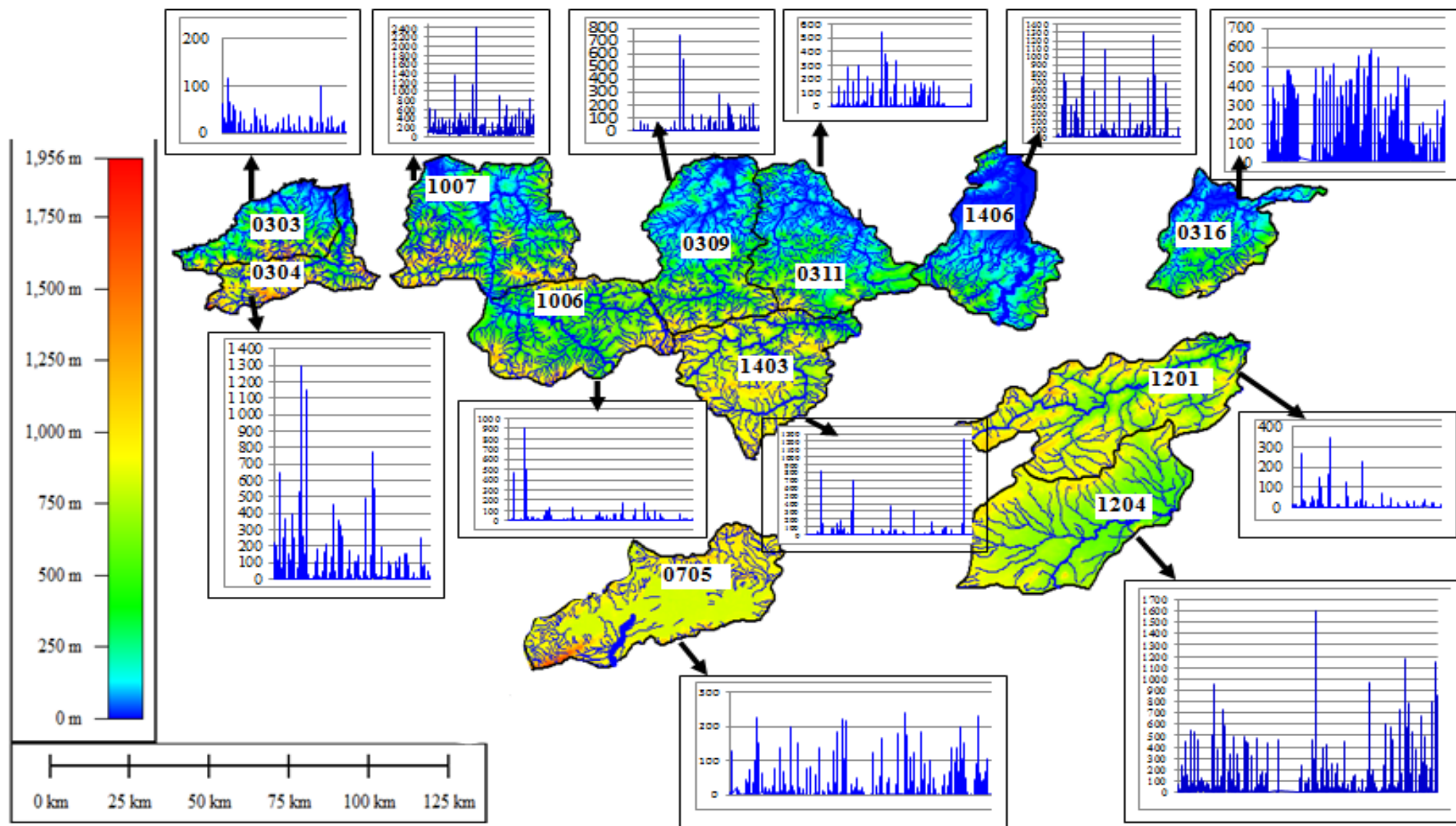


Figure 118: Chroniques des débits des crues des sous bassins concernés

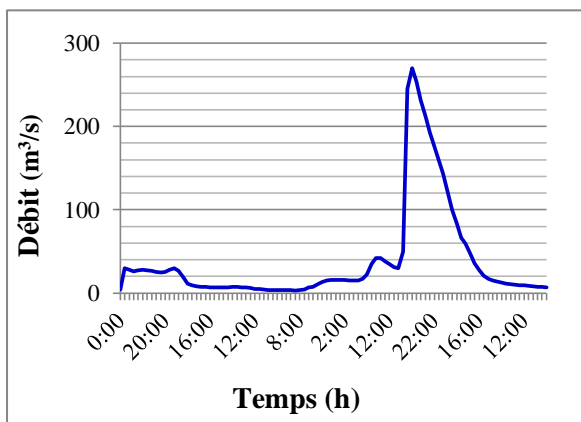
#### VII.4 Hydrogrammes des crues

L'analyse du comportement hydrologique du bassin versant s'effectue par le biais de l'étude de la réaction hydrologique du bassin face à une sollicitation, mesurée par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du système. La représentation graphique de l'évolution du débit ( $Q$ ) en fonction du temps ( $t$ ) constitue un hydrogramme de crue. On utilise des hydrogrammes des crues pour étudier cette variation à une section d'un cours d'eau (hydrogramme de ruissellement).

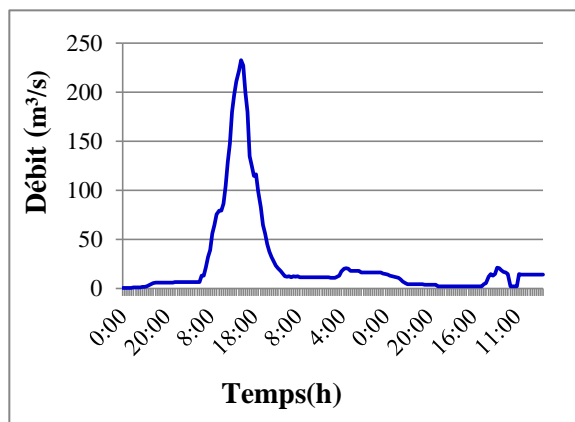
Vu l'indisponibilité des données des bassins versants, le niveau d'analyse le plus simple est celui de l'analyse descriptive des couples averse-crue. Le but recherché à travers les hydrogrammes de crues dans cette étude est i) de comprendre les scénarios hydrologiques qui serviront de référence pour l'estimation des risques d'une part, et d'autre part pour mettre en évidence plusieurs caractéristiques des crues, ii) de déterminer une typologie des crues pour chaque bassin étudié, iii) de voir quelles variables influencent le débit de pointe et le volume écoulé. Elle permet aussi de comprendre les différences entre les crues du même bassin versant.

Quelques événements hydrologiques observés au niveau des 12 stations hydrométriques des sous bassins versants sont présentés à travers les hydrogrammes des crues présentés aux **figures** (de 119 à 130).

##### Station 120101 « Souk Ahras »



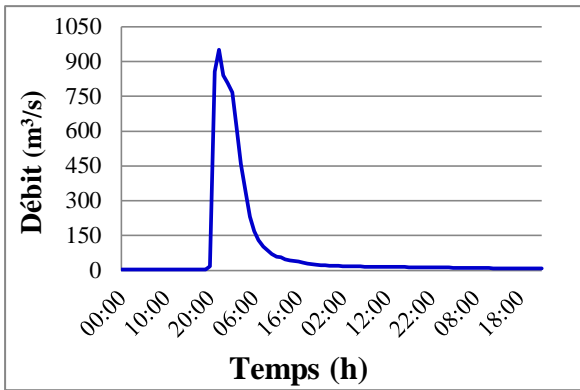
Crue du 20 au 26/12/1969



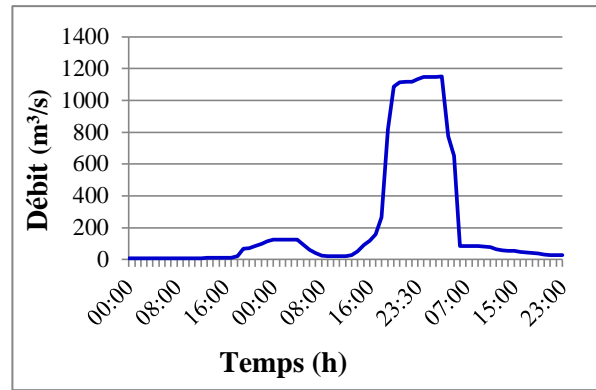
Crue du 17 au 23/11/1976

**Figure 119:** Hydrogramme des crues du sous bassin 1201

**Station 120401 « Ouenza »**



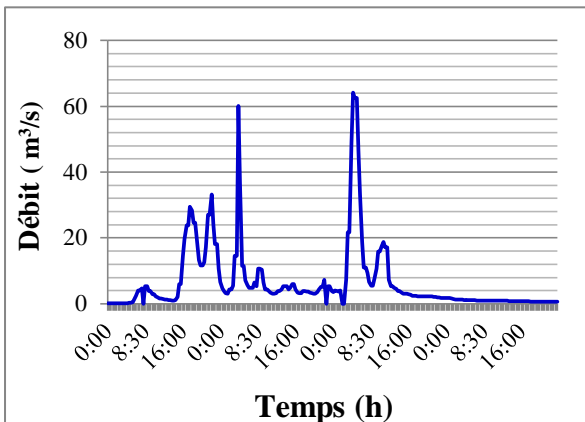
Crue du 22 au 25/04/1975



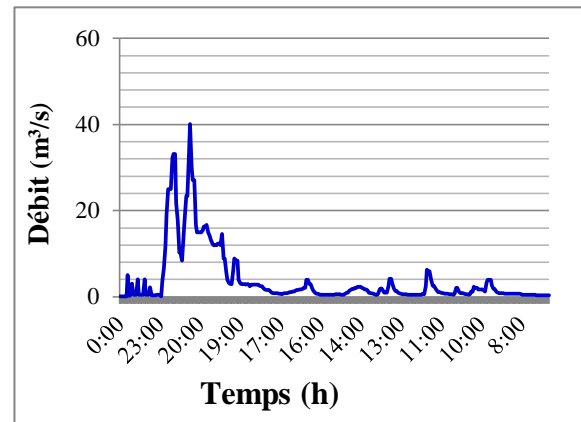
Crue du 15 au 17/06/2004

**Figure 120:** Hydrogramme des crues du sous bassin 1204

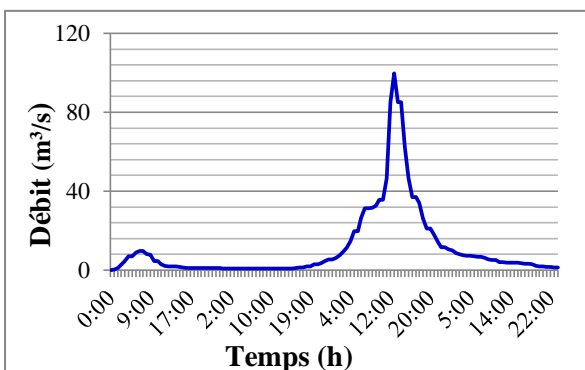
**Station 030310 « El Mkaceb »**



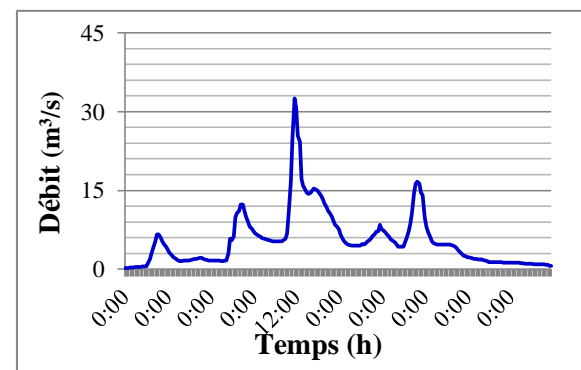
Crue du 29 au 31/03/1974 et du 01/04/1974



Crue du 06 au 15/03/1985



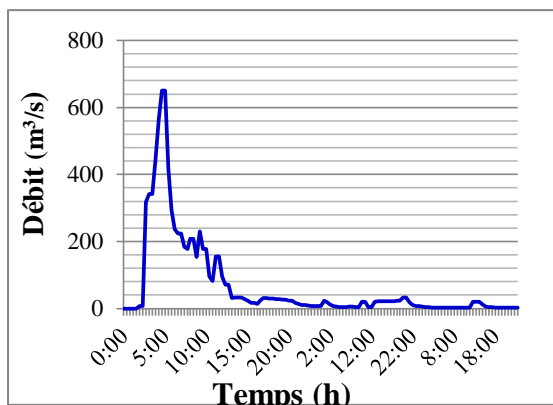
Crue du 22 au 25/12/1990



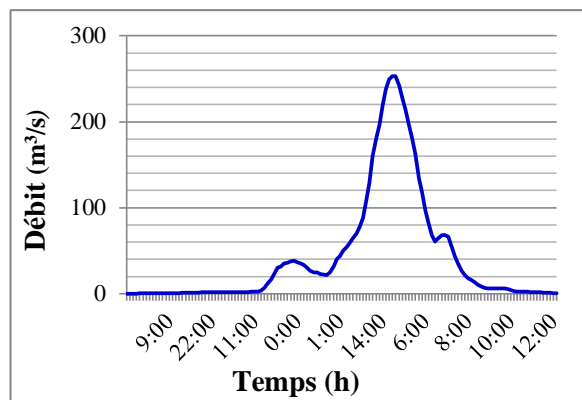
Crue du 27 au 31/01/2001 et du 01 au 04/02/2001

**Figure 121:** Hydrogramme des crues du sous bassin 0303.

**Station 030408 «Oued Missa»**



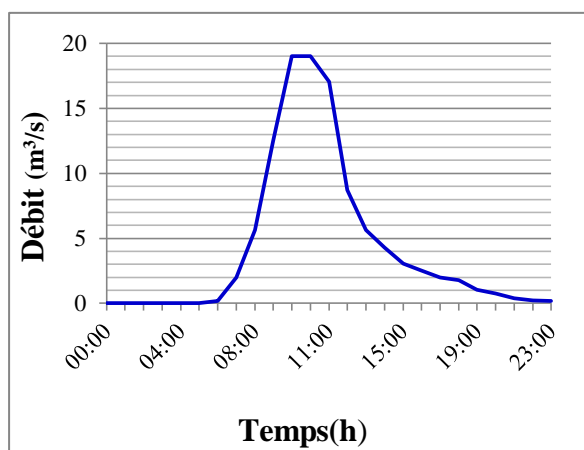
Crue du 25 au 27/09/1973 et du 01/04/1974



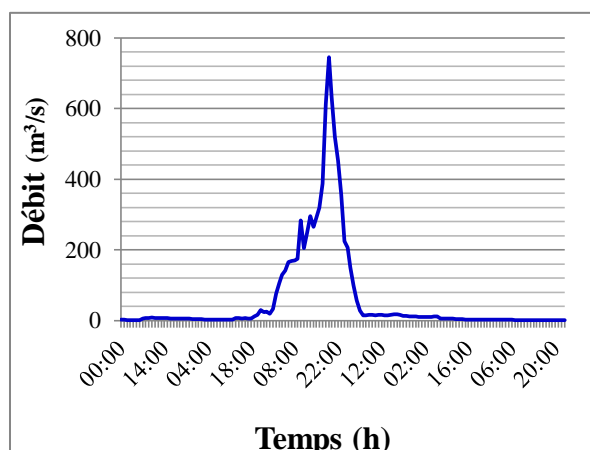
Crue du 21/03/1976

**Figure 122:** Hydrogramme des crues du sous bassin 0304.

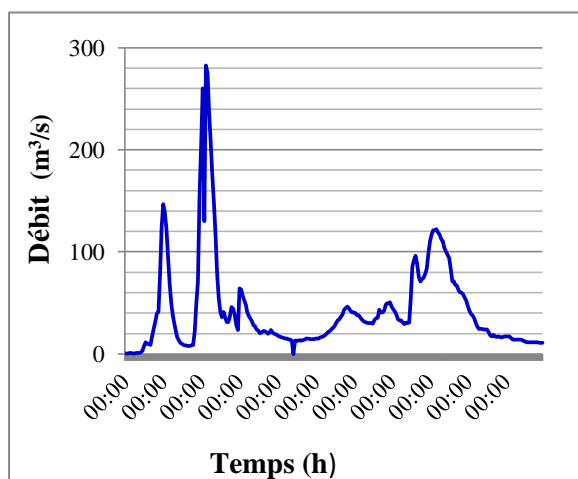
**Station 030901 «Khemakhem»**



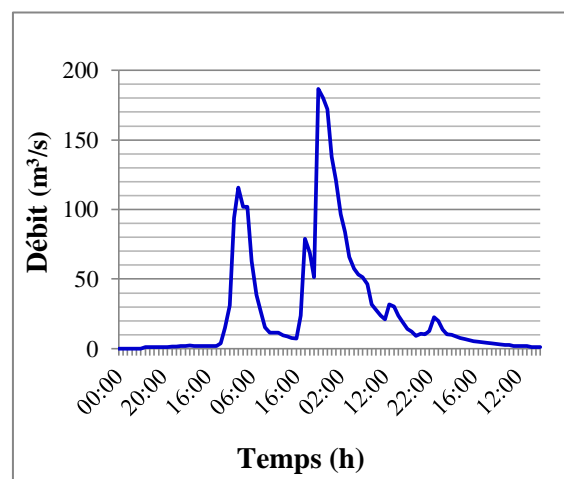
Crue du 25/09/1973



Crue du 01 au 06/03/1984



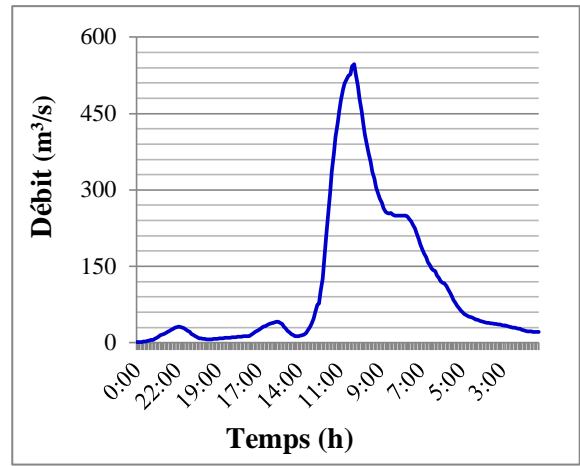
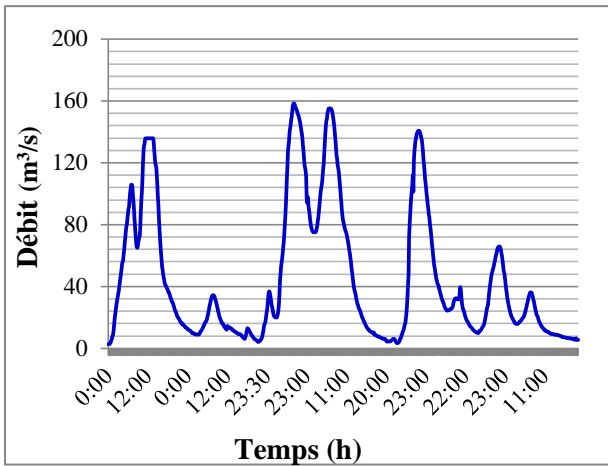
Crue du 29 au 31/12/1992 et du 01 au 08/01/1993



Crue du 17 au 22/12/1999

**Figure 123:** Hydrogramme des crues du sous bassin 0309

**Station 0311 01 «Ain Cherchar»**

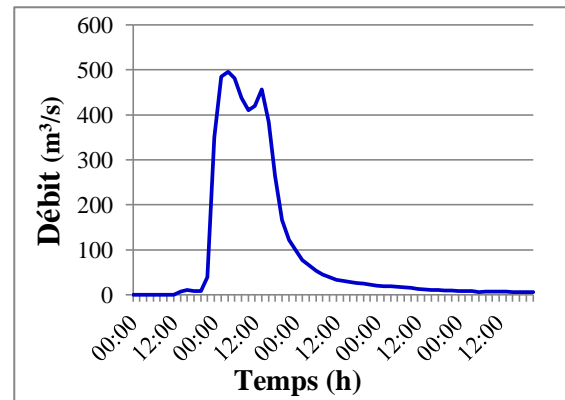
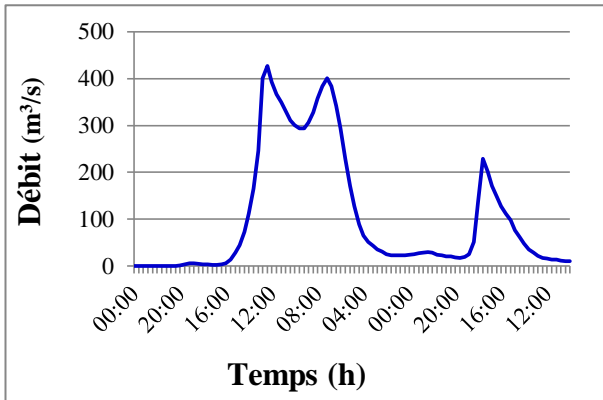


Crue du 17 au 31/01/2003 et du 01 au 09/02/2003

Crue du 30 au 31/01/1984 et du 01 au 7/02/1984

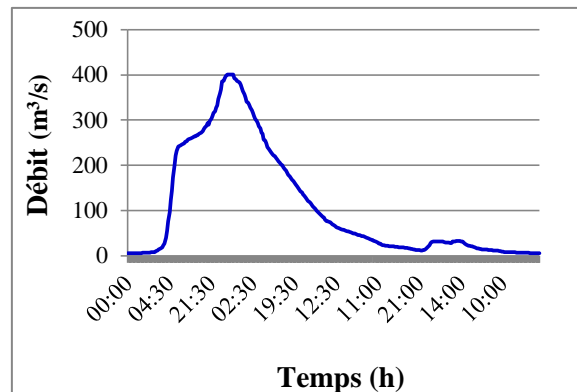
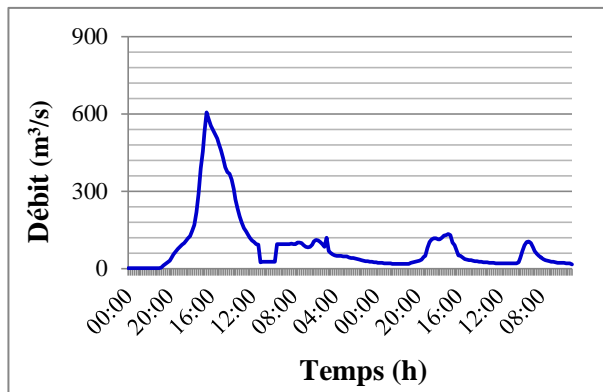
**Figure 124:** Hydrogramme des crues du sous bassin 0311.

**Station 031601 «Ain Assel»**



Crue du 04 au 11/12/1952

Crue du 19 au 23/04/1963



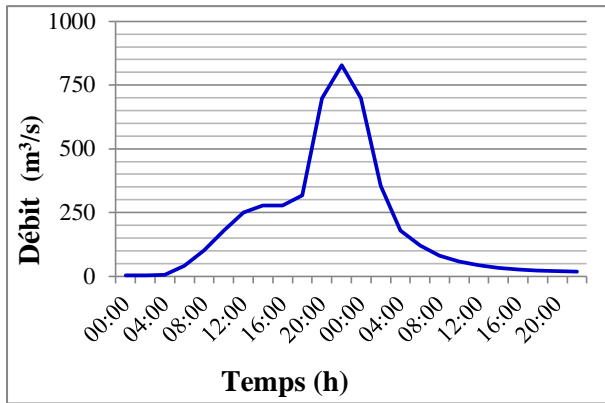
Crue du 17 au 25/11/1976

Crue du 02 au 15/04/2003

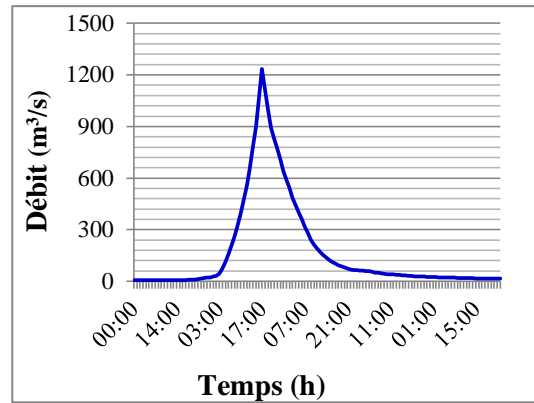
**Figure 125:** Hydrogramme des crues du sous bassin 0316.



**Station 140301 «Medjez Amar II»**



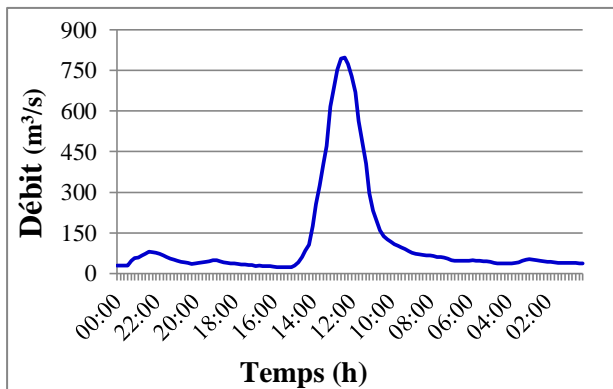
Crue du 24 au 25/12/1969



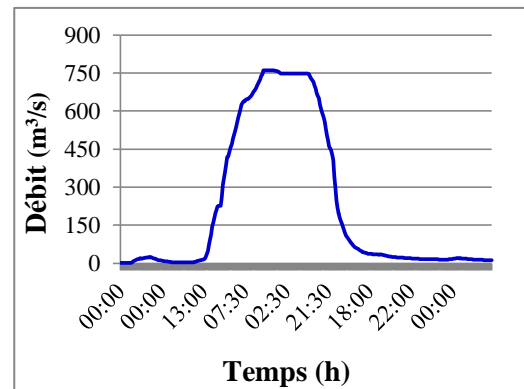
Crue du 02 au 06/02/1984

**Figure 126:** Hydrogramme des crues du sous bassin 1403.

**Station 140601 « Mirebeck »**



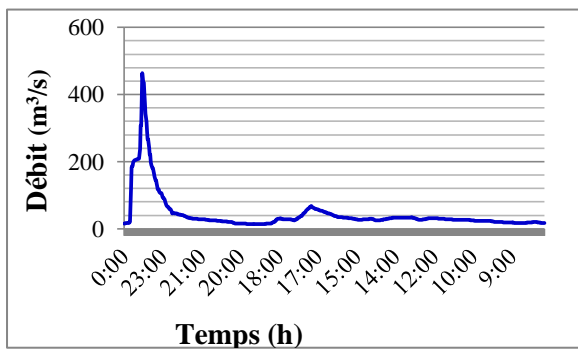
Crue du 20 au 30/12/1969



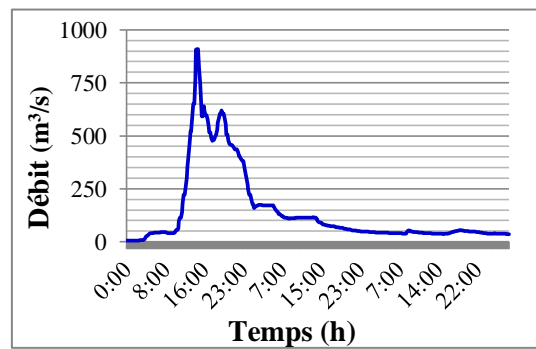
Crue du 12 au 27/04/1979

**Figure 127:** Hydrogramme des crues du sous bassin 1406.

**Station 100620 « El Kheneg »**



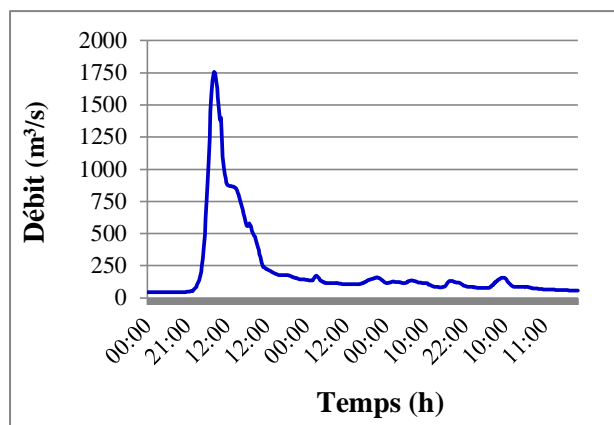
Crue du 03 au 23/02/1984



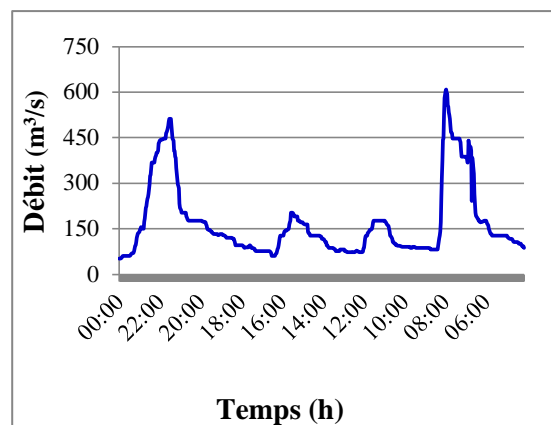
Crue du 28 au 31/12/1984 et du 01 au 09/01/1985

**Figure 128:** Hydrogramme des crues du sous bassin 1006.

**Station 100701 «El Ancer»**



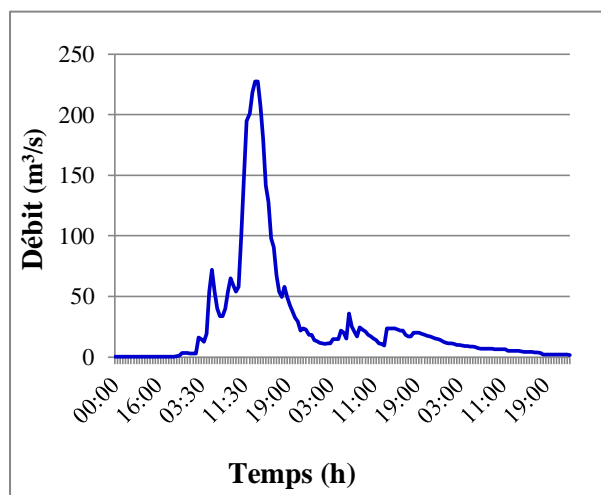
Crue du 06 au 31/03/1985 et du 01 au 02/04/1985



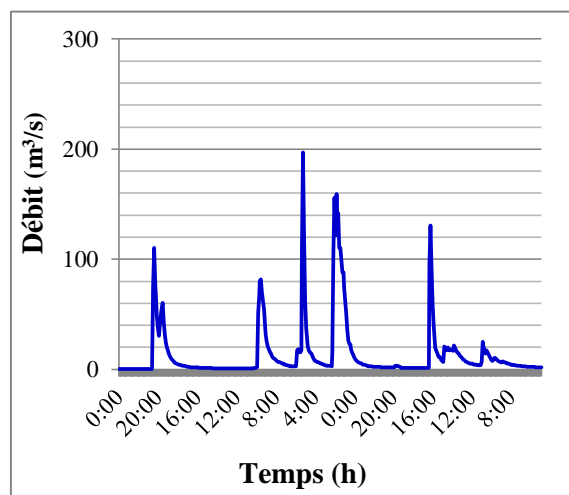
Crue du 05 au 29/02/1996 et du 01 au 04/03/1996

**Figure 129:** Hydrogramme des crues du sous bassin 1007.

**Station 070501 «Chemora»**



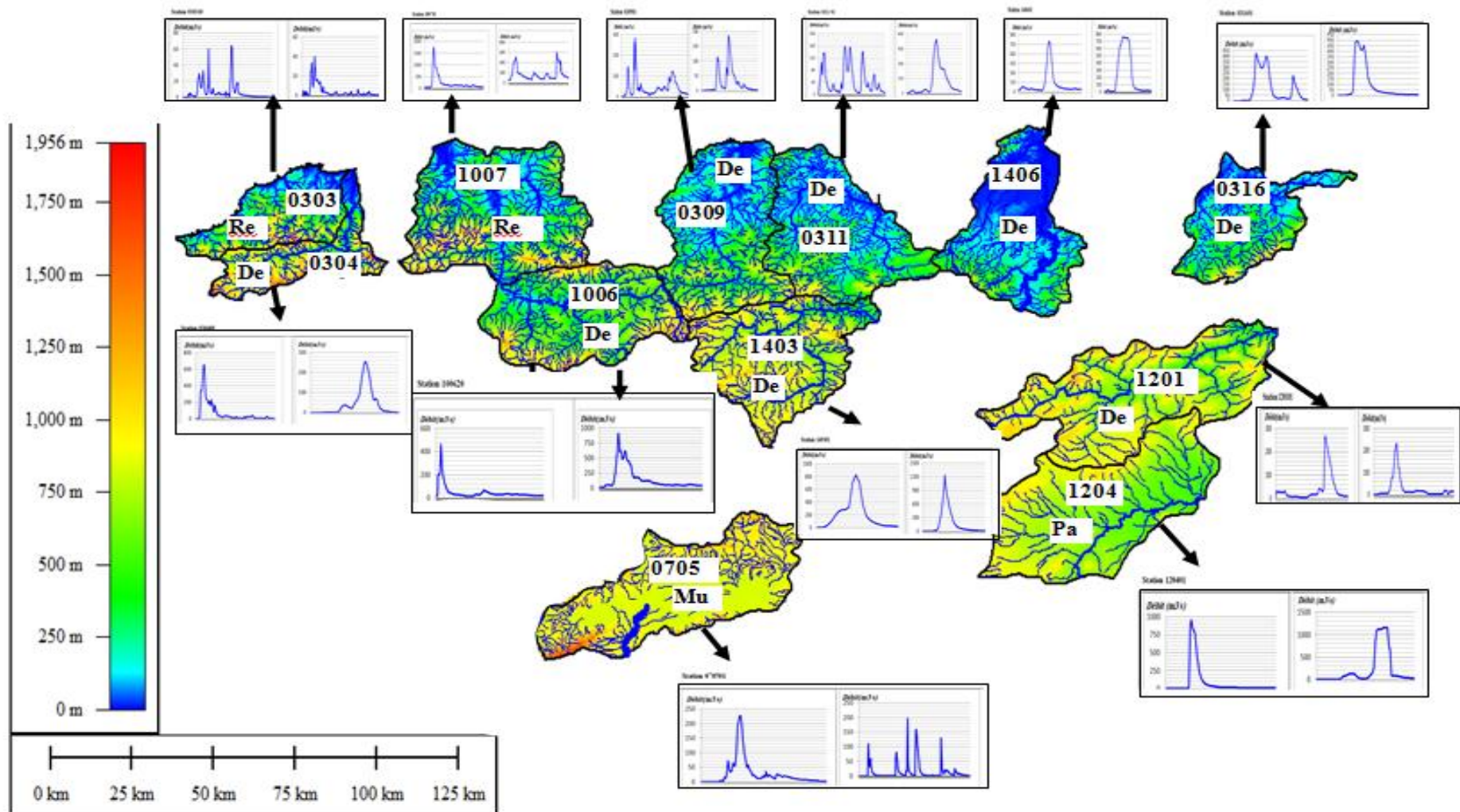
Crue du 03 au 06/09/1972



Crue du 25 au 30/06/1976 et du 01 au 03/07/1976

**Figure 130:** Hydrogramme des crues du sous bassin 0705.

Une typologie des crues en fonction des types des réseaux hydrographiques est présentée dans la **figure 131**.



**Figure 131:** Typologie des crues et structure des réseaux hydrographique.

De : Dendritique, Re : Rectangulaire, Pa : Parallèle, Mu : Multi-bassins.

L'étude des crues des cours d'eau de l'Algérie reste un domaine très intéressant mais jalonné de beaucoup de contraintes dont en particulier la manque de données. Seules quelques indications très ponctuelles sont données dans les annuaires hydrologiques Algériens. On observe une insuffisance en qualité et en quantité des données hydrométriques enregistrées au niveau des bassins. A cet effet notre issue est de s'orienter vers les méthodes classiques de prédétermination des débits des crues des bassins qui sont dépourvus des données hydrométriques. C'est dans ce contexte qu'une prédétermination des débits a été effectuée pour combler ces lacunes.

### VII.5 Prédétermination des débits des crues :

Plusieurs méthodes ont été conçues pour la prédétermination des débits des crues. Ces méthodes font appel à l'analyse des données disponibles ou à la simulation d'un phénomène de crue. Il s'agit de modéliser l'influence des paramètres à l'origine de la crue, ainsi que ceux qui modifient ses caractéristiques dans le temps et l'espace. Les éléments de prédétermination peuvent être de nature stochastique (variables aléatoires) ou déterministe (paramètres connus). Les éléments stochastiques sont soit des paramètres donnant des lois de probabilité, auxquelles obéissent les variables, soit des relations non-déterministes entre variables que l'on choisit souvent de présenter par un coefficient de corrélation. Les éléments déterministes sont les grandeurs ou les processus connus pour le modélisateur.

Ces méthodes diffèrent souvent à la fois par les hypothèses, les modèles mathématiques et les types de données employées. Les paramètres essentiels qui influent sur le débit des crues de fréquence donnée pour un bassin versant sont :

- La surface,
- La pluviométrie,
- La nature géologique et topographique du bassin.

Les méthodes utilisées pour la prédétermination des débits des crues peuvent être regroupées en trois catégories :

- **Méthodes approximatives** : Méthodes analogiques, méthodes régionales, méthodes empiriques, méthodes pseudo-empiriques.
- **Méthodes déterministes** : Approche événementielle simple, approches multi-événementielles, simulation continue, modèles synthétiques
- **Modèles statistiques** : Analyse fréquentielle, méthode de gradex, outils stochastiques

Les méthodes d'estimation des crues, suivantes ont été appliquées: Rationnelle, Sokolovsky et Maillet-Gautier pour ressortir celle qui répond au mieux aux conditions de la région d'étude, sachant que ces méthodes de calcul sont en fonction des conditions atmosphériques, morphométriques et des caractéristiques des bassins versants en question.

- **Méthode rationnelle**

La méthode rationnelle CIA (Coefficient-Intensité-Aréa) date de la fin du dernier siècle. Elle est proposée par (Kuichling, 1889). C'est la méthode la plus utilisée dans le domaine de l'hydrologie. Sa conception est fondée sur une loi physique simplifiée : la lame d'eau écoulée,  $L_e$  (mm), est proportionnelle au volume précipité,  $P$  (mm), sur l'ensemble du bassin. Le coefficient de proportionnalité  $C_r$  appelé coefficient d'écoulement (ruissellement), est constant. Elle suppose que le débit maximum est obtenu lorsque toute la superficie du bassin versant contribue au ruissellement à l'exutoire avec la plus grande intensité moyenne de précipitation. Sa formulation est comme suit :

$$Q_{\max} = C_r \cdot I \cdot S \quad \dots\dots\dots(25)$$

Avec :

$Q_{\max}$  : Débit maximal ( $m^3/s$ )

$C_r$  : Coefficient de ruissellement

$S$  : Surface du B.V en ( $Km^2$ )

$I$  : Intensité de la pluie (mm/h)

On divise l'équation donnant le débit maximal par (3,6) pour obtenir le débit en ( $m^3/s$ )

Pour déterminer l'intensité de pluie  $I = f(P_{j\max}, b, C_v)$ , qui est fonction de la pluie journalière maximale ( $P_{j\max}$ ), l'exposant climatique ( $b$ ), le coefficient de variabilité ( $C_v$ ).

Plusieurs références ont été utilisées pour le calcul de ces paramètres :

- Données de l'ANRH
- Hydrologie des bassins de l'Est Algérien ressources en eau, aménagement et environnement. (Mebarki, 2005).
- Analyse fréquentielle des pluies de l'Algérie. (INRH Constantine, 1985).

- **Méthode de Sokolovsky**

Cette méthode est aussi utilisée pour la prédétermination des crues de différentes fréquences qui peuvent se produire. Cette méthode permet de calculer les débits des crues en fonction du volume précipité, du coefficient de ruissellement, de la surface du bassin versant et du temps de concentration.

$$Q_{\max} = \frac{0,28.P_{tc}.C_r.S.a}{T_c} \dots\dots\dots(26)$$

Avec :

$Q_{\max}$ : Débit maximal (m<sup>3</sup>/s)

$P_{tc}$  : Pluie de courte durée en (mm), dont la durée est assimilable au temps de concentration

$C_r$  : Coefficient de ruissellement

$a$  : Coefficient de forme d'Hydrogramme des crues ( $a=1$ )

$S$  : Surface du B.V (Km<sup>2</sup>)

$T_c$  : Temps de concentration (heures)

- **Méthode de Maillet-Gautier**

Cette méthode consiste à estimer les débits fréquentiels en intégrant les paramètres topographiques, météorologiques, pluies moyennes annuelles, périodes de retour, surfaces du bassin versant et la longueur du talweg principal. L'expression analytique de cette formule est donnée comme suit :

$$Q_{\max \%} = \frac{2.\mu.\log(1 + \rho.\overline{P}_{an}).S.\sqrt{1 + 4.\log(T) - \log(S)}}{\sqrt{L_t}} \dots\dots\dots(27)$$

Avec :

$Q_{\max \%}$  : Débit max fréquentiel (m<sup>3</sup>/s) ;

$\overline{P}_{an}$  : Pluie moyenne annuelle (m)

$\mu$  : Coefficient topographique du bassin ;  $1 \leq \mu \leq 3$

$\rho$  : Coefficient météorologique du bassin ;  $20 \leq \rho \leq 25$

$T$  : Période de retour,  $T=10$ ans ;

$S$  : Surface du B.V (Km<sup>2</sup>)

$L_t$ : Longueur du talweg principal (Km)



### VII.5.1 Analyse des précipitations

Les données pluviométriques utilisées proviennent de la banque de données de l'ANRH Alger. Elles sont structurées suivant l'année hydrologique allant du 1<sup>er</sup> septembre au 31 août. La répartition spatiale de ces postes est très hétérogène. En effet, les bassins versants du Nord sont mieux équipés que ceux du Sud. Les statistiques descriptives des données pluviométriques disponibles sont présentées dans le **tableau 15**

Selon les données de l'ANRH Alger, les précipitations annuelles moyennes sur la période 1946-2003. Les pluies annuelles maximales dépassent les 1000 mm en trois stations d'observations 031101, 031601 et 140601.

**Tableau 15:** Statistiques descriptives des données pluviométriques

	Code	Période	Min	Max	Moy	E T	Cv
Stations pluviométriques	120101	68-86	4	665	107,43	66,749	0,62
	120401	70-04	0	738	53,73	54,22	1,01
	030310	72-01	2	390	25,16	26,69	1,06
	030408	72-93	0	468	55,8	44,78	0,8
	030901	73-02	0	576	90,88	54,17	0,6
	031101	73-03	0	2641	288,41	207,52	0,72
	031601	46-96	0	1201	188,38	147,8	0,78
	140301	68-86	5	768	99,75	80,58	0,81
	140601	68-76	8	1498	167,15	180,5	1,08
	100620	83-99	16	884	80,79	62,81	0,78
	100701	72-03	0	900	106,95	81,08	0,76
	070501	69-99	0	264	44,47	31,59	0,71

Moy : Moyenne, E T : Ecart type, Cv : Coefficient de variation.

Les statistiques descriptives des données de précipitations des stations considérées sur la période (1946-2003) sont présentées dans la **figure 132**.

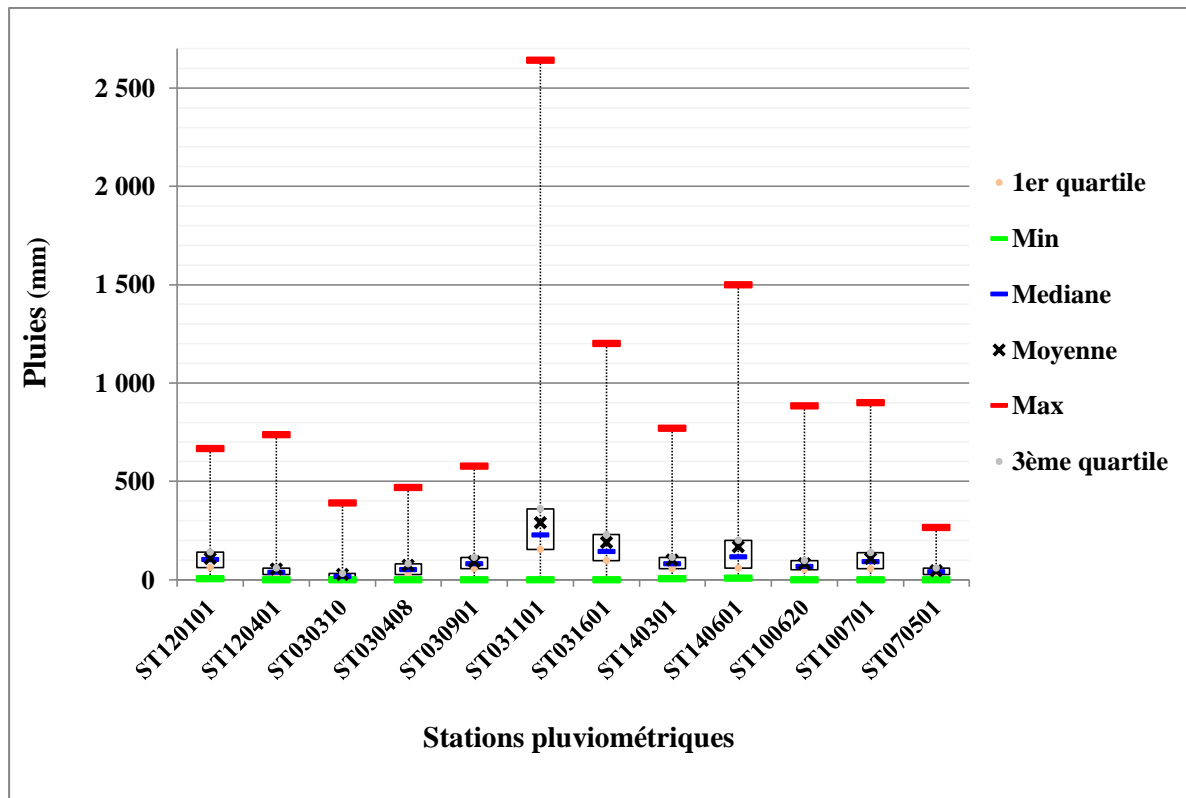


Figure 132: Box plot des précipitations

- La station 031101 du sous bassin 0311 présente une distribution des caractéristiques empiriques légèrement différente. Les box plot des stations pluviométriques sont allongés vers le haut (en raison des valeurs max des pluies).

Les caractéristiques des postes pluviométriques figurent dans le **tableau 16**

**Tableau 16:** Caractéristiques des postes pluviométriques (en gras, les valeurs estimées par la méthode des isohyètes).

<b>Code</b>	<b>Nom</b>	<b>X(Km)</b>	<b>Y(Km)</b>	<b>Z(m)</b>	<b>P(mm/an)</b>
120101	Souk Ahras	972.3	344.5	655	573
120201	Meskiana	949.7	271	839	308
120301	Tebessa	994.5	248	850	324
120401	Ouenza	989.6	312.75	500	299
120510	Ain zerga	1003.65	274.95	845	342
030102	Cap Aokas	728.2	373.2	14	940
030207	Souk Etnnine	736.75	369.3	40	977
030312	Chedia	779.4	386.5	94	979
030401	Erraguène	757.4	368.6	680	1207
030504	Taher	785.6	390.5	56	961
30602	Zitouna	834.5	416.3	548	1633
030712	Afflassène	841.2	410.1	35	716
030801	Skikda	688.30	368.84	127	912
030909	Ramdane Djamel	874.9	389.9	80	501
Aucun poste pluviométrique au niveau du sous bassin 0310					<b>573</b>
031102	Zit Emba	911.4	385.3	58	499
031201	Ain Cherchar	909.5	393.2	34	559
Aucune donnée sur le poste 031302					<b>720</b>
Aucune donnée sur le poste 031401					<b>620</b>
031502	Maiz Bachir	971.1	389.9	17	619
031601	Ain Assel	1005.55	400	32	797
Aucune donnée sur le poste 031718					<b>722</b>
Aucun poste pluviométrique au niveau du sous bassin 0318					<b>955</b>
140105	Aioun Settara	922.4	318.3	741	313
140205	Ain Makhoulouf	909.1	336.1	834	456
140301	Medjez A.II	912.8	360.2	785	539
140403	Heliopolis	925.1	366.8	280	584
140505	Boucheougouf	949.2	362.4	100	502
140614	El Hadjar CFPA	949.9	401	12	615
100110	Chebabta	764.8	341.9	660	381
100202	Beni.Guecha	795.95	348	550	491
100304	Chelghoum Laid	812.1	330.2	770	368
100402	Teleghma	829.05	319.25	750	296
100503	Ain.Fakroun	876.6	305.5	920	320
100603	Hamma.Bouzian	848.5	352.8	460	509
100708	O.Messaouda	802.2	384.2	585	1359
070103	El Eulma	768.8	320.2	960	351
070201	Ain.Djasser	798.85	289.1	865	226
070316	Batna Ferme	814.7	257.35	1040	344
070403	Reboa	848.2	250.2	1010	260
070502	Boulhilet	858.7	277.1	859	146
070605	Touffana	885.85	249.8	1040	265
070708	Fkirina	917.4	272.9	856	340

Plusieurs postes pluviométriques, dont en particulier ceux du bassin 03 présentent un sérieux problème de données. Aucun poste pluviométrique n'existe au niveau des sous bassins 0310 et 0318, et aucune donnée disponible aux postes situés aux sous bassins 0313, 0314, et 0317. Les pluies annuelles de ces sous bassins sont calculées par la méthode des isohyètes (isovaleurs) en se basant sur les données du bureau BNEDER, et en utilisant le logiciel Global mapper 16.0. Le sous bassin 0317 est pris comme exemple, (**figure** 133).

La formule donnant la pluie moyenne annuelle est :

$$\overline{P}_{an} = \sum_1^k \frac{P_i \cdot S_i}{S_t} \dots\dots\dots(28)$$

Avec :

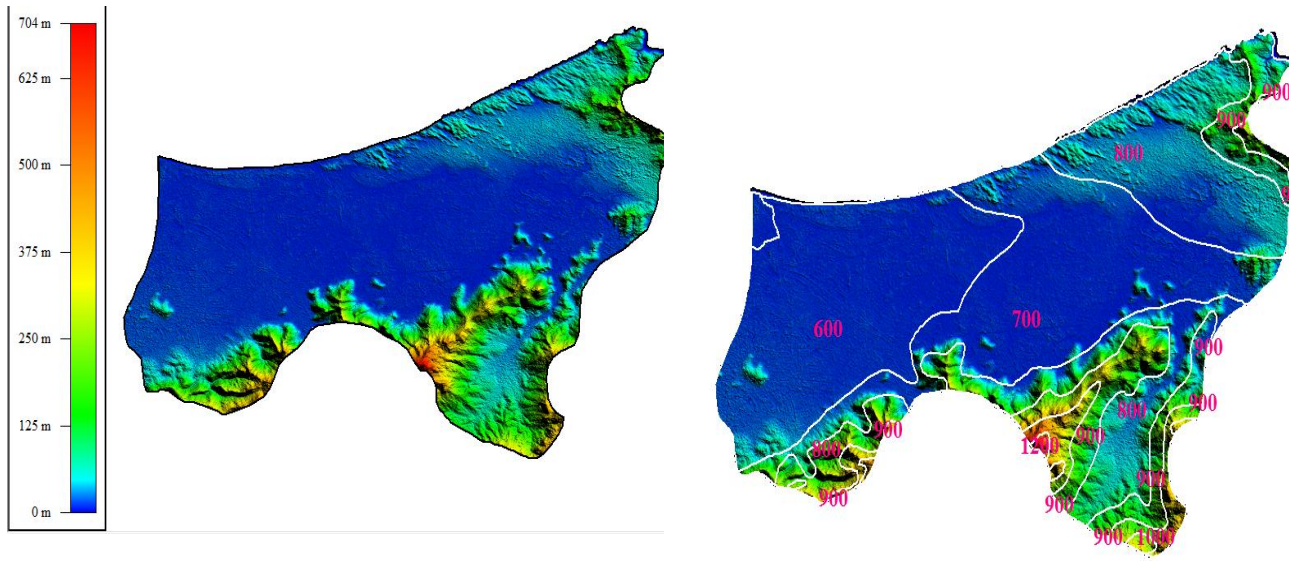
$\overline{P}_{an}$  : précipitation moyenne annuelle sur le bassin, (mm),

$S_t$ : surface totale du bassin, (Km<sup>2</sup>),

$S_i$  : surface entre deux isohyètes i et i+1, (Km<sup>2</sup>),

$k$  : nombre total d'isohyètes,

$P_i$  : moyenne des hauteurs h de précipitations entre deux isohyètes i et i+1,(mm).



**SBV0317**

<Feature Name>	<Feature Type>	<Enclosed Area>	<Length/Perimeter>	CODEBASSIN	CODE_SB
	Unknown Area Type	6.038 sq km	15.575 km		
900	Unknown Area Type	27.222 sq km	41.325 km		
800	Unknown Area Type	125.07 sq km	60.707 km		
	Unknown Area Type	847.98 sq km	152.46 km	03	03-17
700	Unknown Area Type	228.91 sq km	127.45 km		
800	Unknown Area Type	87.521 sq km	98.935 km		
900	Unknown Area Type	24.18 sq km	45.537 km		
900	Unknown Area Type	37.983 sq km	50.636 km		
1000	Unknown Area Type	12.143 sq km	25.671 km		
1200	Unknown Area Type	1.497 sq km	5.094 km		
	Unknown Area Type	2.13 sq km	5.641 km		
1000	Unknown Area Type	13.923 sq km	35.919 km		
600	Unknown Area Type	239.47 sq km	74.314 km		
	Unknown Area Type	5.41 sq km	10.455 km		
800	Unknown Area Type	24.807 sq km	38.602 km		
900	Unknown Area Type	4.127 sq km	15.871 km		

Pi	Si	Pi*Si
(mm)	(Km <sup>2</sup> )	
600	244,88	146928
700	228,91	160237
800	237,4	189920
900	93,51	84159
1000	26,06	26060
1200	3,63	4356
Somme ( $\sum P_i.S_i$ )		611660
Surface du Sbv 0317		847
$\overline{P_{an}}$ (mm)		<b>722</b>

**Figure 133:** Pluie annuelle par la méthode des isohyètes du sous bassin 0317

**VII.6 Analyse des débits de crues**

Les résultats des débits obtenus par différentes approches ainsi que ceux observés sont présentés dans le tableau 17

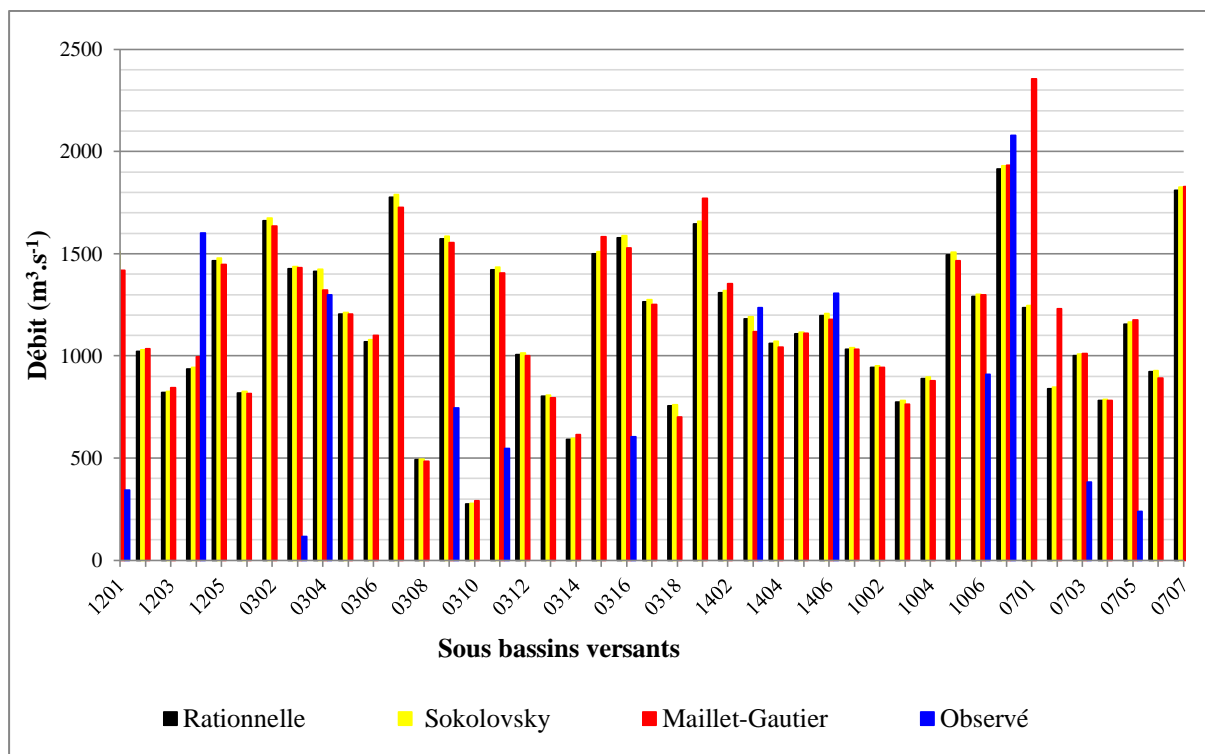
**Tableau 17:** Valeurs des débits des crues estimés et observés des stations considérées

Code	Station	Nom	Q <sub>Observé</sub>	Q <sub>Rationnelle</sub>	Q <sub>Sokolovsky</sub>	Q <sub>Maillet gautier</sub>
1201	12 01 01	Souk Ahras	345			
1202			-	839,19	845,90	850,34
1203			-	659,38	664,65	678,73
1204	12 04 01	Ouenza	1601,6			
1205	120522*	Morsott	97,5*			
0301			-	713,15	718,85	711,41
0302			-	1342,22	1352,96	1320,16
0303	03 03 10	El Mkaceb	117			
0304	03 04 08	Oued Missa	1298,13			
0305			-	1007,23	1015,29	1007,91
0306			-	930,31	937,79	957,01
0307			-	1429,18	1440,61	1389,25
0308			-	413,74	417,05	408,01
0309	03 09 01	Khemakhem	745,08			
0310			-	222,17	223,95	233,73
0311	03 11 01	Ain Cherchar	546,8			
0312			-	830,68	837,33	825,77
0313			-	666,17	671,50	659,56
0314			-	468,38	472,13	486,41
0315			-	1232,55	1242,41	1302,91
0316	03 16 01	Ain Assel	604,79			
0317			-	1051,88	1060,30	1040,86
0318			-	663,57	668,88	614,96
1401			-	1296,93	1307,30	1396,04
1402	140201*	Medjez Amar I	2000*			
1403	14 03 01	Medjez Amar II	1235,65			
1404			-	892,65	899,79	876,87
1405	140501*	Bouche gouf	715*			
1406	14 06 01	Mirebeck	1306,8			
1001			-	831,19	837,83	830,71
1002			-	750,19	756,19	749,23
1003			-	619,29	624,24	611,34
1004			-	713,32	719,03	703,99
1005			-	1204,67	1214,31	1181,31
1006	10 06 20	El Kheneg	910			
1007	10 07 01	El Ancer	2412			
0701			-	864,78	871,70	1647,00
0702			-	612,04	616,94	897,86
0703	07 03 01	Fesdis	384			
0704			-	612,10	617,00	611,56
0705	07 05 01	Chemora	239,5			
0706			-	734,90	740,78	710,44
0707			-	1419,35	1430,70	1434,40

\* Source des chiffres à astérisques (Lahlah, 2004).

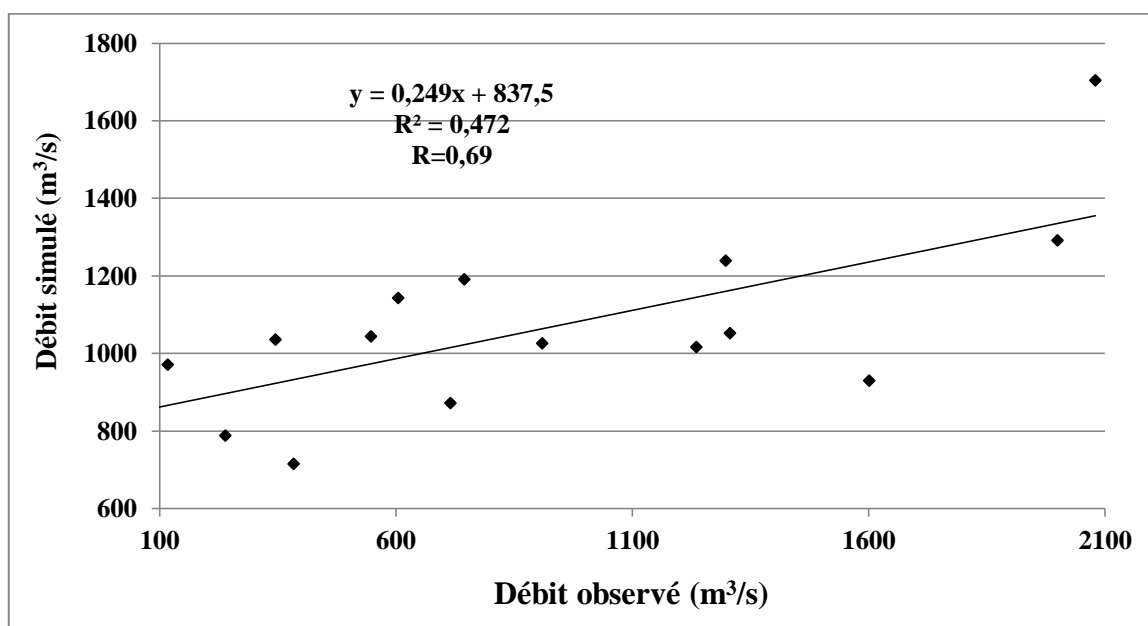
La confrontation des débits des crues estimés et observés est présentée dans la **figure 134**








**Figure 134:** Débits des crues estimés et observés des stations considérées.

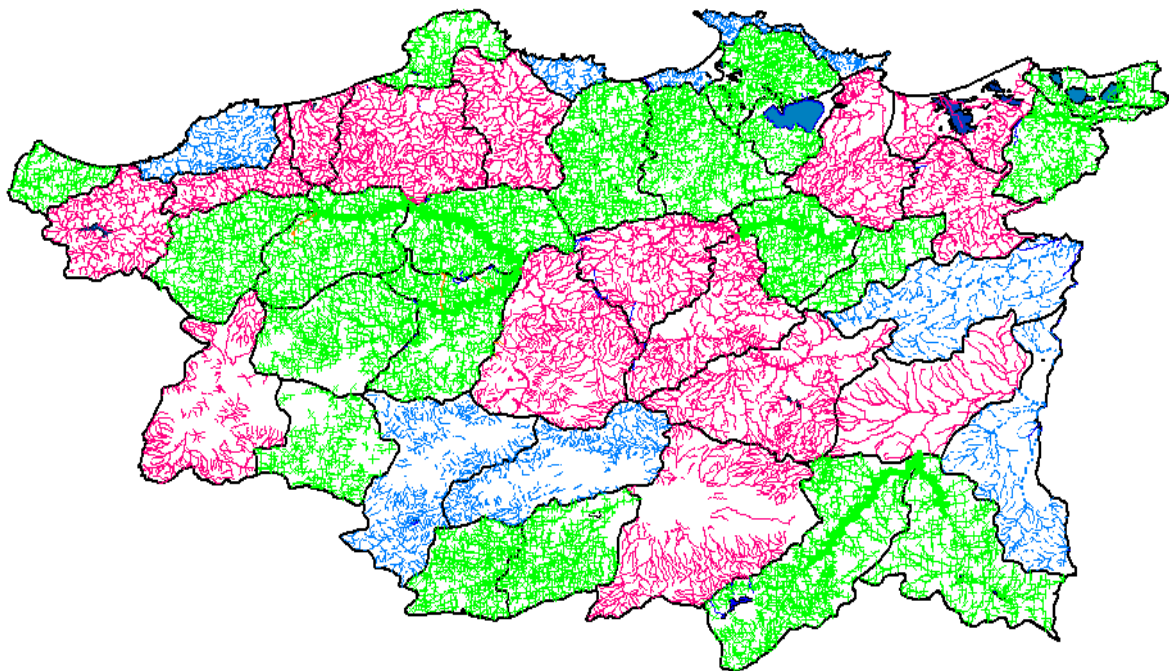
Les trois méthodes, Rationnelle, Maillet-Gautier et Sokolovski, donnent des résultats assez rapprochés. Un graphique des débits simulés (en prenant la moyenne des trois méthodes) et ceux observés est présenté dans la **figure 135**. On constate une moyenne dépendance linéaire (69%) des débits simulés avec les débits observés.



**Figure 135:** Débits simulés et observés.

Une classification des débits des crues observés et prédéterminés a été établie selon trois plages, (**figure 136**) :

1 <sup>ère</sup> plage: $100 \leq Q \text{ (m}^3/\text{s)} \leq 500$	
2 <sup>ème</sup> plage: $500 \leq Q \text{ (m}^3/\text{s)} \leq 1000$	
3 <sup>ème</sup> plage: $1000 \leq Q \text{ (m}^3/\text{s)} \leq 2420$	



**Figure 136:** Classification des bassins versants de la région d'étude selon les plages des débits des crues observés et simulés.

## Conclusion

Ce chapitre a permis d'effectuer un descriptif des grands traits communs des différentes chroniques des débits instantanés, en les caractérisant par rapport aux bassins versants étudiés. On note à ce propos que trois types principaux ont été identifiés:

- Le premier type contient les sous bassins (1204, 0302, 0304, 0305, 0307, 0315, 0317, 1401, 1402, 1403, 1406, 1005, 1007, 0701, 0707), qui ont connu des averses intenses et successives où sont enregistrés des débits instantanés max élevés (1602, 1298, 1236, 1307, 2412) m<sup>3</sup>/s respectivement, et qui ont été observés aux mois de Mars et Avril excepté le bassin 1007 où le débit max a été enregistré en décembre. Ces sous

bassins sont caractérisés par des formes peu allongées ( $1,30 < K_c < 1,50$ ) excepté le sous bassin 0304 qui a une forme allongée avec un coefficient de compacité  $K_c=1,93$ , des reliefs entre forts et très forts et des longueurs des cours d'eau importantes. Ce type se classe dans la 3<sup>ème</sup> plage des débits.

- Le second type concerne les sous bassins (0309, 0311, 0316, 1006) ayant des débits instantanés moyens (745, 547, 585, 910)  $m^3/s$  respectivement, enregistrés entre les mois d'Octobre et Décembre. Ce type se classe dans la 2<sup>ème</sup> plage des débits. Les types 1 et 2 appartiennent à la zone III.
- Le troisième type englobe les sous bassins (1201, 0303, 0705) identifiés par des faibles débits instantanés (345, 117, 239)  $m^3/s$ , qui ont été observés aux mois de Janvier, Mars et Mai. Les caractéristiques morphométriques de ces sous bassins sont faibles notamment les ordres des cours d'eau ( $i=4$ ). Ce type se classe dans la 1<sup>ère</sup> plage des débits.

D'après la représentation graphique des hydrogrammes de crues de quelques bassins, une typologie des crues a été effectuée selon plusieurs critères :

1. Selon les crues, quatre types des crues sont observés :

- Les crues à un seul pic faible. Ce type concerne les bassins intérieurs notamment celui de la Medjerda où le débit max ne dépasse pas 350  $m^3/s$ .
- Les crues à un seul pic élevé. C'est le cas du bassin de la Seybouse où le débit max dépasse 1200  $m^3/s$ .
- Les crues à plusieurs pics faibles. Ce type caractérise les bassins Côtiers Constantinois (0303, 0309, 0311, 0316). Le débit max varie entre 60  $m^3/s$  et 700  $m^3/s$ .
- Les crues à plusieurs pics élevés. Sont observées dans le bassin Kebir Rhumel (1006, 1007). Le débit max dépasse 1500  $m^3/s$ .

Une exception est faite pour le bassin Hauts Plateaux Constantinois « bassin intérieur avec des crues à plusieurs pics faibles ». Elle est due vraisemblablement à la fonte de la neige.

2. Selon le type de réseau hydrographique, deux types de crues sont identifiés :

- Les crues à un seul pic se distinguent au niveau des réseaux hydrographiques de type dendritique et parallèle.
- Les crues à plusieurs pics s'aperçoivent au niveau des réseaux hydrographiques de type rectangulaire et multi-bassins, (**figure 131**).

3. Selon la classification par zone, trois types de crues sont découverts :

- Zone I : Les crues à un seul pic faible où le débit max ne dépasse pas  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Zone II : Les crues à plusieurs pics faibles le débit max varie entre  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Zone III : Les crues à plusieurs pics élevés, le débit max dépasse  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A ce stade de l'analyse, nous disposons de nombreuses informations concernant les valeurs des débits et les typologies des crues. Elles restent générales et indicatives. Les interprétations qui découlent de cette analyse des crues ne sont pas envisageables sur la détermination de l'influence des caractéristiques morphométriques des bassins sur les débits des crues, du fait de la diversité de ces sous-bassins versants et l'hétérogénéité spatiale généralement constatée. Pour expliquer et déterminer quantitativement l'influence des couples descripteurs-crue, la méthode analyse en composantes principales (ACP) a été choisie pour préciser ces dépendances.

## VIII. Application de la méthode ACP

### Introduction

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse statistique, appliquée dans plusieurs domaines dont l'hydrologie fait partie. Le centre d'intérêt dans cette partie de la thèse est porté sur l'analyse des corrélations entre les caractéristiques ou descripteurs morphométriques des bassins et les débits des crues.

Pour évaluer la façon dont les bassins versants réagissent par rapport à l'écoulement de surface et leur contribution à l'hydrologie des bassins, les descripteurs de forme, de réseau et de volume sont les facteurs principaux qui traduisent le mieux le comportement hydrologique.

Pour synthétiser et interpréter les résultats obtenus, la méthode ACP a été appliquée, afin de déterminer les affinités entre les descripteurs morphométriques des sous bassins versants étudiés, et d'en déduire le degré de dépendance et d'influence de ces descripteurs sur les débits max. L'ACP a fait l'objet de plusieurs études ([A.E.Scheidegger, 1968](#)); ([Pulido et al., 2001](#)) et ([Chirala et al., 2012](#)).

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes multifactorielles. C'est une méthode statistique d'analyse de données et de réduction du nombre de variables permettant la représentation géométrique des observations et des variables. Elle cherche à synthétiser l'information contenue dans un tableau croisant des données d'individus et des variables quantitatives ([Bouroche et Saporta, 1980](#)). Produire un résumé d'information au sens de l'ACP c'est établir une similarité entre les individus, chercher des groupes d'individus homogènes, mettre en évidence une typologie d'individus. Quant aux variables c'est mettre en évidence des bilans de liaisons entre elles, moyennant des variables synthétiques et mettre en évidence une typologie de variables. L'ACP cherche d'une façon générale à établir des liaisons entre ces deux typologies.

Avec l'ACP, on obtient un nuage de points qu'il est impossible à visualiser. Donc pour faciliter la visualisation, on projette le nuage dans un espace à deux dimensions, déterminé à partir des axes principaux ou factoriels du nuage. Cette projection permet de minimiser l'erreur de la représentation de nuage. Le premier axe factoriel (F1) de cette représentation est tel qu'il détermine le maximum d'inertie du nuage et donc de la variance. Le deuxième axe

(F2) perpendiculaire au premier exprime le maximum de variance restante. Le troisième axe, toujours perpendiculaire aux deux autres, est défini par le maximum d'inertie restante et de même pour les facteurs restants.

Cette méthode est caractérisée aussi par :

- Une simplicité mathématique « matrice de (n) individus, (n) variables » ;
- Une puissance, car elle peut offrir, en quelques opérations seulement, un résumé et une vue complète des relations existantes entre les variables et les individus ;
- Une flexibilité « souplesse d'application » qui se traduit par la diversité de ses mises en œuvre, qui touchent tous les domaines.

La méthode ACP a été appliquée aux 43 individus (sous- bassins versants du Nord Est Algérien) et 41 variables (descripteurs de forme, de réseau et de volume et le débit des crues.)

La méthode ACP a été effectuée en utilisant le logiciel « XLSTAT » 2015 et vérifiée par le logiciel « Rcmdr » version 3.3.2. Ces logiciels ont permis de visualiser un ensemble de résultats tels que :

- La statistique sommaire des variables étudiées (minimum, maximum, moyenne, écart-type et coefficient de variation),
- La matrice des corrélations des variables,
- Le tableau des valeurs propres de la matrice de corrélation,
- Le pourcentage d'explication de chaque valeur propre,
- Le plan de projection des variables, et des individus.

Par conséquent l'objectif principal de ce chapitre est l'interprétation des différents résultats.

Les statistiques descriptives des variables à travers les individus sont présentées dans les tableaux 18 ; 19 et 20.



**Tableau 18:** Statistiques descriptives des descripteurs de forme

<b>Descripteurs</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>Coefficient de variation</b>
<b>S</b>	135	2369	1021,14	501,58	0,49
<b>P</b>	75	252	164,88	42,93	0,26
<b>K<sub>c</sub></b>	1,20	3,37	1,53	0,34	0,22
<b>L<sub>eq</sub></b>	33,47	113,54	67,72	19,55	0,29
<b>l<sub>eq</sub></b>	2,57	27,69	14,72	5,44	0,37
<b>R<sub>cir</sub></b>	0,04	0,34	0,23	0,06	0,27
<b>F<sub>f</sub></b>	0,10	1,33	0,61	0,33	0,54
<b>R<sub>e</sub></b>	0,36	1,30	0,85	0,23	0,27
<b>R</b>	6,56	27,47	17,42	4,73	0,27
<b>I<sub>pg</sub></b>	2,84	30,77	11,06	6,17	0,56
<b>I<sub>pr</sub></b>	22,92	63,88	35,59	8,70	0,24

**Tableau 19:** Statistiques descriptives des descripteurs de réseau

<b>Descripteurs</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>Coefficient de variation</b>
<b>L<sub>t</sub></b>	2,582	71,71	30,21	21,19	0,70
<b>∑L<sub>i</sub></b>	92,99	1677,85	868,68	388,72	0,45
<b>∑N<sub>i</sub></b>	43,00	694,00	295,02	143,79	0,49
<b>R<sub>c</sub></b>	2,70	6,82	4,01	0,85	0,21
<b>R<sub>l</sub></b>	1,19	2,68	1,86	0,32	0,17
<b>L<sub>r</sub></b>	0,25	0,69	0,45	0,12	0,26
<b>i</b>	3,00	6,00	4,95	0,84	0,17
<b>C<sub>s</sub></b>	0,45	0,97	0,73	0,13	0,18
<b>D<sub>f</sub></b>	1,56	7,93	2,49	1,05	0,42
<b>P<sub>tce</sub></b>	0,01	2,99	0,63	0,61	0,96
<b>C<sub>b</sub></b>	0,02	0,79	0,22	0,21	0,92

**Tableau 20:** Statistiques descriptives des descripteurs de volume

<b>Descripteurs</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>Coefficient de variation</b>
<b>T<sub>c</sub></b>	3,59	15,39	9,06	3,07	0,34
<b>C<sub>t</sub></b>	0,02	0,53	0,14	0,09	0,64
<b>R<sub>rf</sub></b>	0,004	0,018	0,007	0,003	0,440
<b>D<sub>s</sub></b>	107,31	648,37	316,70	150,51	0,48
<b>H</b>	0,58	2,01	1,13	0,33	0,29
<b>D<sub>d</sub></b>	0,49	1,38	0,90	0,23	0,26
<b>R<sub>fn</sub></b>	0,14	0,37	0,26	0,07	0,26
<b>C<sub>ec</sub></b>	0,72	2,02	1,20	0,36	0,30
<b>F<sub>i</sub></b>	0,07	0,94	0,34	0,17	0,51
<b>L<sub>bv</sub></b>	13,00	86,00	43,72	15,89	0,36
<b>H<sub>5%</sub></b>	240,00	1760,00	994,88	337,15	0,34
<b>H<sub>50%</sub></b>	100,00	1200,00	596,05	313,24	0,53
<b>H<sub>95%</sub></b>	10,00	960,00	323,26	321,10	0,99
<b>D<sub>H</sub></b>	230,00	1210,00	671,63	256,79	0,38
<b>H<sub>min</sub></b>	0,00	876,00	264,65	318,85	1,20
<b>H<sub>max</sub></b>	582,00	2235,00	1397,98	397,30	0,28
<b>H<sub>moy</sub></b>	291,00	1555,50	831,31	319,71	0,38
<b>N<sub>r</sub></b>	0,31	2,65	1,05	0,50	0,47

Selon les trois tableaux précédents, on note que le coefficient de variation varie dans un intervalle important (0,17 à 1,20), ce qui confirme que les variables sont hétérogènes et n'ont pas le même ordre de grandeur notamment les descripteurs de volume.

La méthode ACP a été appliquée selon trois échelles spatiales.

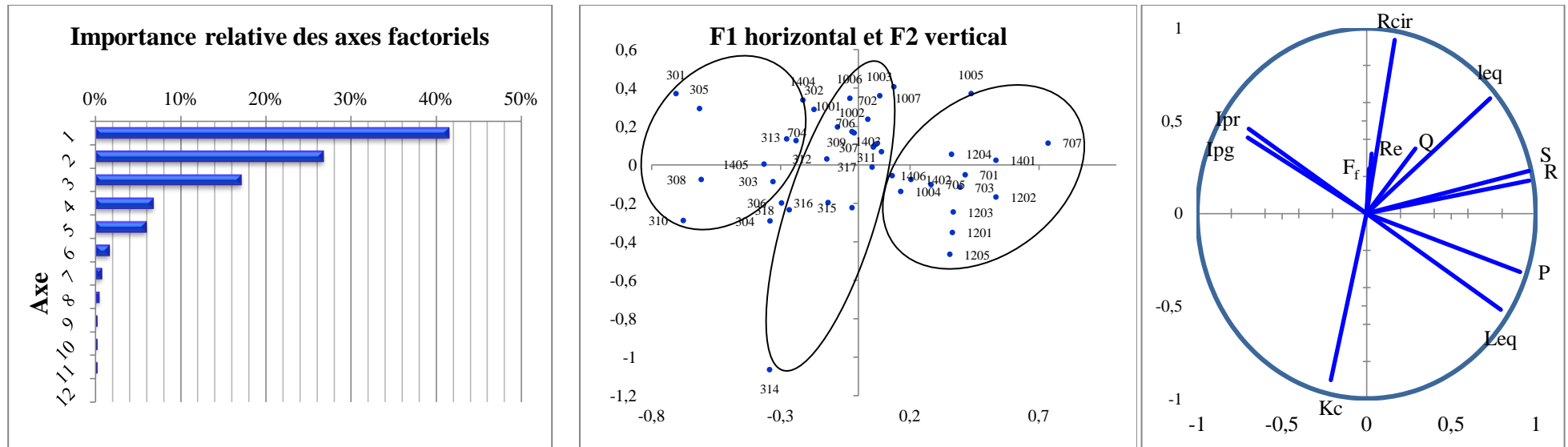
- la méthode ACP à l'échelle (1) des 43 sous bassins versants
- la méthode ACP à l'échelle (2) des 3 zones, décrite en conclusion chapitre V
- méthode ACP à l'échelle (3) des 5 bassins versants.

**VIII.1 La méthode ACP à l'échelle (1) des 43 sous bassins versants****Descripteurs de forme****Tableau 21:** Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (1)»

Variables	Q	S	P	Kc	Leq	leq	Rcir	Ff	Re	R	Ipg	Ipr
<b>Q</b>	1,00											
<b>S</b>	0,30	1,00										
<b>P</b>	0,14	<b>0,85</b>	1,00									
<b>Kc</b>	-0,27	-0,35	0,12	1,00								
<b>Leq</b>	0,05	<b>0,70</b>	<b>0,97</b>	0,32	1,00							
<b>leq</b>	0,38	<b>0,83</b>	0,46	-0,66	0,23	1,00						
<b>Rcir</b>	0,30	0,31	-0,17	<b>-0,87</b>	-0,40	<b>0,77</b>	1,00					
<b>Ff</b>	-0,08	0,01	-0,08	-0,20	-0,09	0,004	0,07	1,00				
<b>Re</b>	-0,04	0,03	-0,09	-0,29	-0,12	0,06	0,15	<b>0,99</b>	1,00			
<b>R</b>	0,32	<b>0,99</b>	<b>0,84</b>	-0,41	0,68	<b>0,85</b>	0,37	0,00	0,04	1,00		
<b>Ipg</b>	-0,01	-0,51	-0,64	-0,19	-0,65	-0,19	0,29	-0,09	-0,06	-0,49	1,00	
<b>Ipr</b>	0,00	-0,52	-0,63	-0,16	-0,62	-0,23	0,22	-0,10	-0,07	-0,49	<b>0,92</b>	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de forme et 43 sous bassins sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 137**



Courbe des valeurs propres

Projection des individus sur les deux axes (Axes F1 et F2 : 67,93%), F1 (41,31%) et F2 (26,61%)

Projection des variables sur deux axes (F1 et F2 :67,93%)

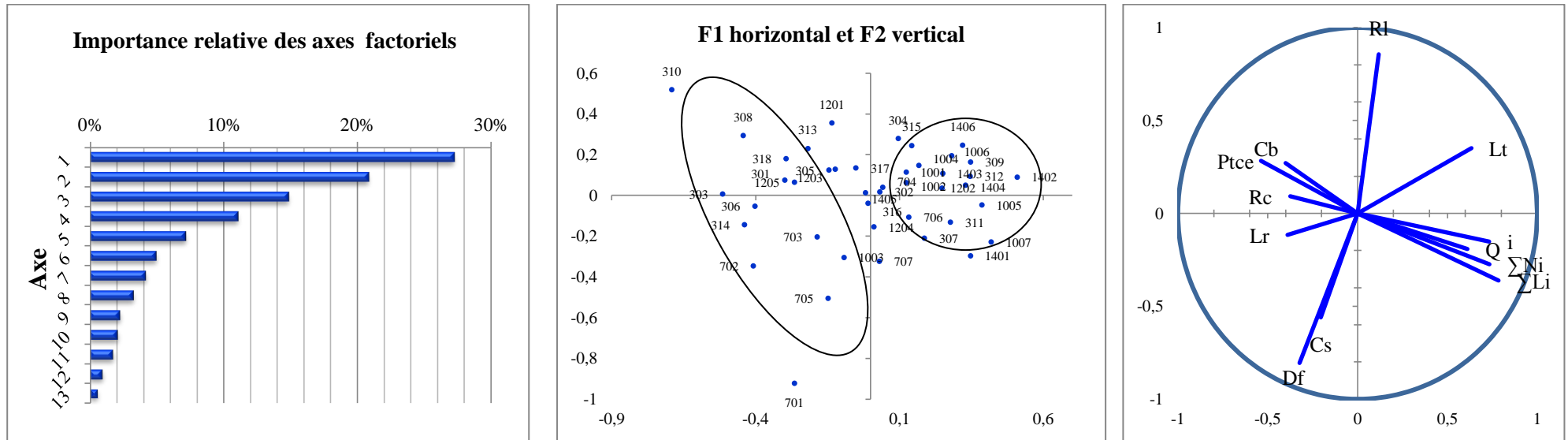
**Figure 137:** Représentation des descripteurs de forme et 43 sous bassins sur les deux plans factoriels.

**Descripteurs de réseau****Tableau 22:** Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (1)»

Variables	Q	Lt	$\Sigma Li$	$\Sigma Ni$	Rc	Rl	Lr	i	Cs	D <sub>f</sub>	Ptce	Cb
<b>Q</b>	1,00											
<b>Lt</b>	0,35	1,00										
$\Sigma Li$	0,43	0,46	1,00									
$\Sigma Ni$	0,31	0,35	<b>0,83</b>	1,00								
<b>Rc</b>	-0,26	0,11	-0,10	-0,06	1,00							
<b>Rl</b>	-0,11	0,51	-0,14	-0,12	0,31	1,00						
<b>Lr</b>	-0,18	-0,05	-0,18	-0,49	0,20	0,03	1,00					
<b>i</b>	0,46	0,24	0,41	0,40	-0,60	-0,13	-0,22	1,00				
<b>Cs</b>	-0,11	-0,40	0,06	-0,08	-0,13	-0,40	0,33	0,03	1,00			
<b>D<sub>f</sub></b>	-0,01	-0,35	0,04	0,01	0,21	-0,63	0,20	-0,18	0,34	1,00		
<b>Ptce</b>	-0,35	-0,24	-0,38	-0,25	0,21	0,06	-0,13	-0,56	-0,22	-0,01	1,00	
<b>Cb</b>	-0,11	-0,33	-0,56	-0,35	-0,14	0,03	-0,04	-0,08	0,03	-0,19	0,23	1,00

Le chiffre en gras représente la valeur de la corrélation significative

La représentation des descripteurs de réseau et 43 sous bassins sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 138**



Courbe des valeurs propres

Projection des individus sur les deux axes (Axes F1 et F2 : 47,85%), F1 (27,12%) et F2 (20,73%)

Projection des variables sur les deux axes (F1 et F2 :47,85%)

**Figure 138:** Représentation des descripteurs de réseau et 43 sous bassins sur les deux plans factoriels

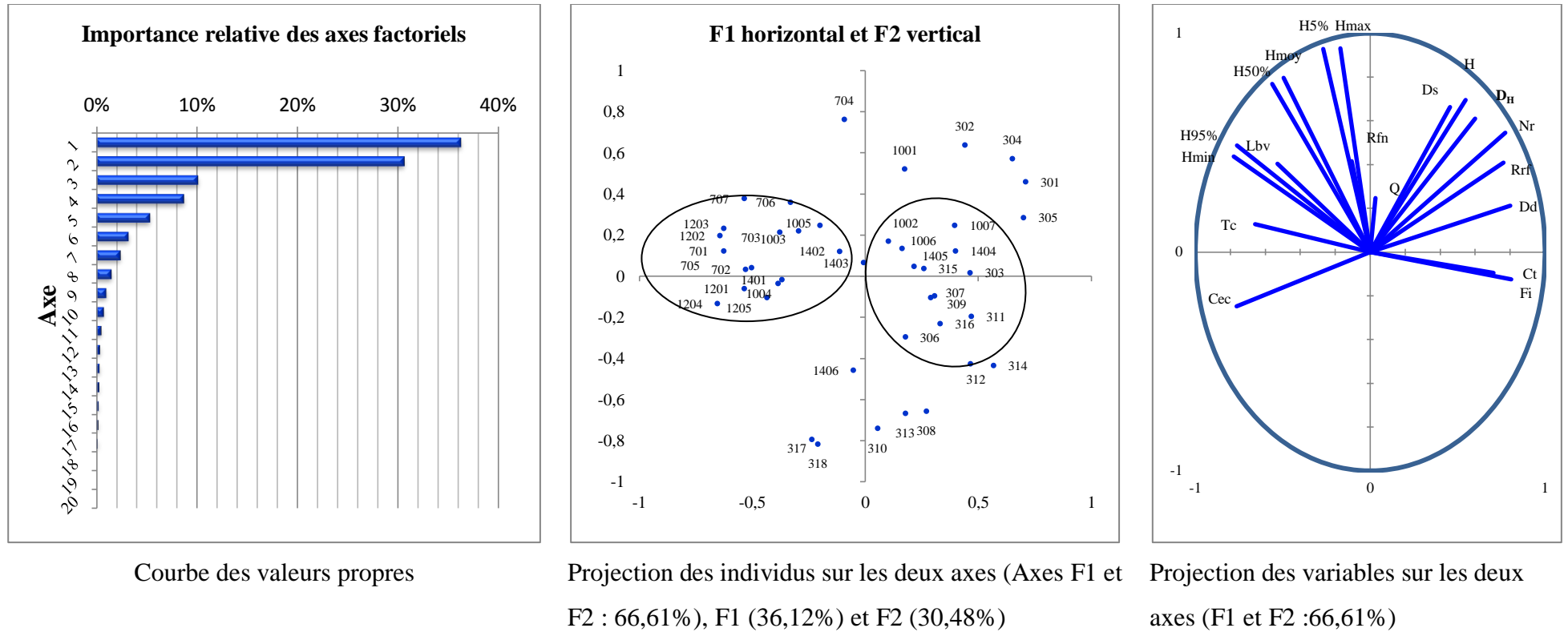


## Descripteurs de volume

Tableau 23: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (1)»

Variables	Q	T <sub>c</sub>	C <sub>t</sub>	R <sub>rf</sub>	D <sub>s</sub>	H	D <sub>d</sub>	R <sub>fn</sub>	C <sub>ec</sub>	F <sub>i</sub>	L <sub>bv</sub>	H <sub>5%</sub>	H <sub>50%</sub>	H <sub>95%</sub>	D <sub>H</sub>	H <sub>min</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>moy</sub>	N <sub>r</sub>	
Q	1,00																			
T <sub>c</sub>	0,31	1,00																		
C <sub>t</sub>	-0,09	-0,39	1,00																	
R <sub>rf</sub>	0,05	-0,61	0,32	1,00																
D <sub>s</sub>	0,17	-0,12	0,05	0,65	1,00															
H	0,24	-0,27	0,24	<b>0,75</b>	0,63	1,00														
D <sub>d</sub>	0,14	-0,37	<b>0,77</b>	0,56	0,34	0,47	1,00													
R <sub>fn</sub>	0,14	0,37	0,07	0,04	0,34	0,07	0,12	1,00												
C <sub>ec</sub>	-0,17	0,35	<b>-0,70</b>	-0,55	-0,39	-0,45	<b>-0,96</b>	-0,12	1,00											
F <sub>i</sub>	-0,08	-0,52	<b>0,93</b>	0,43	0,09	0,27	<b>0,84</b>	-0,11	<b>-0,78</b>	1,00										
L <sub>bv</sub>	0,20	<b>0,74</b>	-0,17	-0,41	-0,01	0,01	-0,22	<b>0,71</b>	0,23	-0,37	1,00									
H <sub>5%</sub>	0,10	0,19	-0,25	0,18	0,46	0,49	-0,03	0,32	-0,01	-0,30	0,45	1,00								
H <sub>50%</sub>	0,08	0,37	-0,41	-0,12	0,17	0,19	-0,22	0,34	0,18	-0,47	0,57	<b>0,91</b>	1,00							
H <sub>95%</sub>	0,05	0,47	-0,43	-0,37	-0,21	-0,10	-0,36	0,20	0,31	-0,51	0,53	<b>0,70</b>	<b>0,87</b>	1,00						
D <sub>H</sub>	0,07	-0,34	0,21	<b>0,71</b>	<b>0,86</b>	<b>0,77</b>	0,40	0,17	-0,41	0,25	-0,07	0,44	0,10	-0,34	1,00					
H <sub>min</sub>	-0,03	0,45	-0,46	-0,45	-0,13	-0,26	-0,41	0,18	0,35	-0,53	0,45	0,64	<b>0,82</b>	<b>0,92</b>	-0,31	1,00				
H <sub>max</sub>	0,18	0,14	-0,17	0,26	0,42	0,63	0,07	0,20	-0,09	-0,19	0,36	<b>0,93</b>	<b>0,82</b>	0,66	0,40	0,59	1,00			
H <sub>moy</sub>	0,09	0,31	-0,34	-0,06	0,19	0,26	-0,16	0,22	0,12	-0,38	0,45	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,87</b>	0,10	<b>0,86</b>	<b>0,92</b>	1,00		
N <sub>r</sub>	0,24	-0,38	0,54	<b>0,80</b>	0,58	<b>0,88</b>	<b>0,81</b>	0,13	<b>-0,76</b>	0,60	-0,13	0,28	-0,01	-0,27	<b>0,71</b>	-0,39	0,42	0,07	1,00	

La représentation des descripteurs de volume et 43 sous bassins sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 139**



Courbe des valeurs propres

Projection des individus sur les deux axes (Axes F1 et F2 : 66,61%), F1 (36,12%) et F2 (30,48%)

Projection des variables sur les deux axes (F1 et F2 :66,61%)

**Figure 139:** Représentation des descripteurs de volume et 43 sous bassins sur les deux plans factoriels

## VIII.2 Interprétation des résultats de l'échelle (1) des 43 sous bassins versants

L'examen des tableaux n°21, 22 et 23 relatifs aux matrices de corrélation des variables permet d'une part la confirmation des résultats obtenus dans le chapitre VI, et de conclure que le débit est faiblement corrélé avec les descripteurs de forme de réseau et de volume. D'autre part on remarque des corrélations linéaires positives et négatives, ce qui signifie que les variables varient dans deux sens opposés, certaines étant faibles (0.30 et 0.46), et d'autres très faibles (0.009, 0.01).

Le pourcentage d'inertie des descripteurs de forme, de réseau et de volume est expliqué par le premier et le second axe F1 et F2. Le résumé des variables par 2 dimensions (F1 et F2) a donné une récupération de 68% d'informations contenues dans le tableau des données des descripteurs de forme, 48% dans le tableau des données des descripteurs de réseau et 67% dans le tableau des données des descripteurs de volume. Ces résumés synthétisent moyennement les variables.

Les projections des individus et des variables sur les deux plans factoriels F1 et F2 mettent en évidence trois groupes pour les descripteurs de forme et deux groupes pour les descripteurs de réseau et de volume :

### Descripteur de forme

- Le premier groupe formé par les sous bassins de la Medjerda, des Hauts Plateaux Constantinois (0701, 0703, 0705, 0707), de la Seybouse (1401, 1402, 1406) et du Kebir Rhumel (1004,1005) caractérisés par des valeurs importantes des variables S, P,  $L_{eq}$ ,  $l_{eq}$ , R,  $R_{cir}$  traduisant l'échelle de grandeur et la circularité des sous bassins.
- Le second groupe est représenté par les sous bassin de la Seybouse (1404,1405), des Côtiers Constantinois (0301, 0302, 0303, 0304, 0305, 0306, 0308, 0310,0314, 0318), et le quatrième sous bassin des Hauts Plateaux Constantinois ayant des valeurs importantes des variables  $I_{pg}$  et  $I_{pr}$  à l'exception des individus 0314 et 0318 qui possèdent des valeurs relativement faibles.
- Le troisième groupe est constitué par les sous bassins de Kebir Rhumel (1001, 1002, 1003, 1006, 1007) des Côtiers Constantinois (0307, 0309, 0311, 0315), de la Seybouse (1403) et des Hauts Plateaux Constantinois (0706),

correspondent aux importantes valeurs de  $R_{cir}$ ,  $l_{eq}$ ,  $I_{pg}$ ,  $I_{pr}$  quant à la forte valeur du coefficient de compacité, correspond au sous bassin 0314 ( $K_c=3,37$ ).

### Descripteurs de réseau :

- Le premier groupe, selon le premier facteur qui exprime 27% de la variance est formé par les sous bassins de la Seybouse (1401, 1402, 1403, 1404, 1406) des Côtiers Constantinois (0309, 0311, 0312), de Kebir Rhumel (1005, 1006, 1007), qui sont caractérisés par des valeurs importantes des variables  $L_t$ ,  $i$ ,  $\sum L_i$ ,  $\sum N_i$ . Ces variables interprètent en général un réseau très ramifié et très dense et ils sont faiblement corrélés avec le débit.
- Le second groupe, est représenté par le cinquième sous bassin de la Medjerda, ceux des Côtiers Constantinois (0301, 0303, 0305, 0306, 0308, 0310, 0313, 0314, 0318), et des Hauts Plateaux Constantinois (0701,0702, 0703,0705) ayant des valeurs moyennes des variables  $P_{tcc}$ ,  $C_b$ ,  $R_c$  et  $L_r$ . Ils sont faiblement corrélés avec le débit.
- Le facteur F2 exprime 21% de la variance. Il oppose d'une part le  $R_1$  (corrélation positive =0.86) ayant la valeur (2.68) relative au sous bassin 1201 et d'autre part le descripteur Df (corrélation négative =-0.81) avec la valeur élevée de (7.93) relative au sous bassin 0701.

### Descripteurs de volume

- Le premier groupe, selon le premier facteur exprime 36% de la variance, concerne les sous bassins de la Seybouse (1404, 1405), les Côtiers Constantinois (0303 , 0306, 0307, 0311, 0312, 0314, 0316) et les sous bassins du Kebir Rhumel (1002, 1006, 1007) caractérisés par des valeurs importantes des variables  $D_s$ ,  $H$ ,  $D_H$ ,  $N_r$ ,  $R_{rf}$ ,  $D_d$ ,  $F_i$ ,  $C_t$  qui expliquent que ces sous bassins sont bien drainés et ont un relief fort. Ils sont faiblement corrélés avec le débit.
- Le second groupe, est représenté par les sous bassins de Medjerda, des Hauts Plateaux Constantinois et de la Seybouse (1401, 1402, 1403) ayant des valeurs importantes des variables  $T_c$ ,  $L_{bv}$ ,  $C_{ce}$  et altitudes, qui traduisent l'importance du relief, l'éloignement des exutoires par rapport aux lignes des partages des eaux et la perméabilité des sols. La corrélation de ces variables avec le débit est faible.

- Le facteur F2 exprime 30% de la variance, il traduit l'altitude Hmax avec une (corrélation positive =0.93) ayant la valeur de (2235m) relative au sous bassin 0704. Les individus qui sont détachés des groupes tels que 0317, 0318, 0310 possèdent des altitudes minimales.

### VIII.3 La méthode ACP à l'échelle (2) des 3 zones

#### VIII.3.1 Zone I :

La zone I composée par les 5 sous bassins de la Medjerda : (1201 ; 1202 ; 1203 ; 1204 ; 1205).

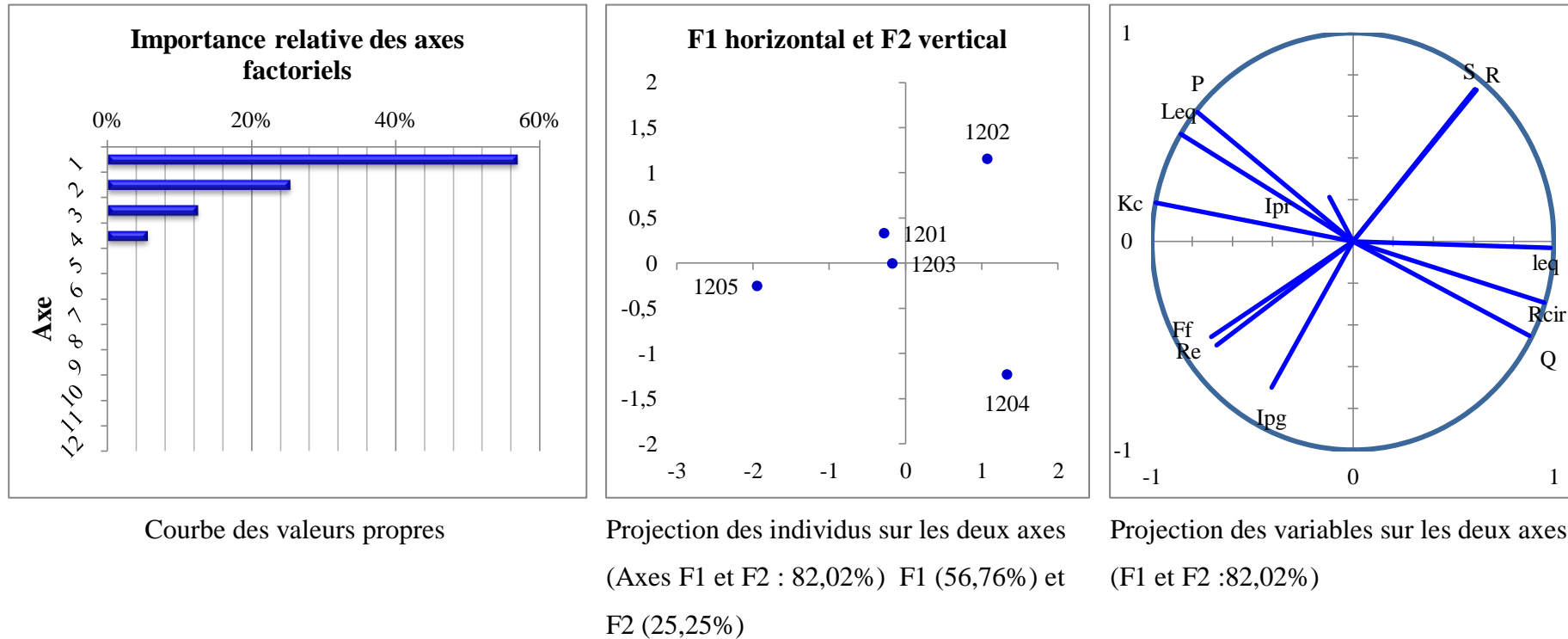
#### Descripteurs de forme

**Tableau 24:** Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (2) ; zone I »

Variables	Q	S	P	K <sub>c</sub>	L <sub>eq</sub>	l <sub>eq</sub>	R <sub>cir</sub>	F <sub>f</sub>	R <sub>e</sub>	R	I <sub>pg</sub>	I <sub>pr</sub>
Q	1,00											
S	0,25	1,00										
P	<b>-0,94</b>	0,02	1,00									
K <sub>c</sub>	<b>-0,95</b>	-0,47	<b>0,87</b>	1,00								
L <sub>eq</sub>	<b>-0,97</b>	-0,12	<b>0,99</b>	<b>0,93</b>	1,00							
l <sub>eq</sub>	<b>0,90</b>	0,63	<b>-0,76</b>	<b>-0,97</b>	<b>-0,84</b>	1,00						
R <sub>cir</sub>	<b>0,98</b>	0,39	<b>-0,91</b>	<b>-0,99</b>	<b>-0,96</b>	<b>0,96</b>	1,00					
F <sub>f</sub>	-0,34	-0,61	0,33	0,60	0,40	-0,58	-0,49	1,00				
R <sub>e</sub>	-0,29	-0,62	0,28	0,57	0,36	-0,55	-0,45	<b>0,98</b>	1,00			
R	0,26	<b>0,99</b>	0,01	-0,48	-0,13	0,64	0,40	-0,62	-0,63	1,00		
I <sub>pg</sub>	-0,04	<b>-0,76</b>	-0,14	0,24	-0,02	-0,41	-0,20	0,45	0,48	<b>-0,76</b>	1,00	
I <sub>pr</sub>	-0,19	0,08	0,19	0,11	0,19	-0,17	-0,21	-0,26	-0,25	0,09	0,47	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de forme et des sous bassins de la zone I sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 140**



**Figure 140:** Représentation des descripteurs de forme et des sous bassins de la zone I sur les deux plans factoriels

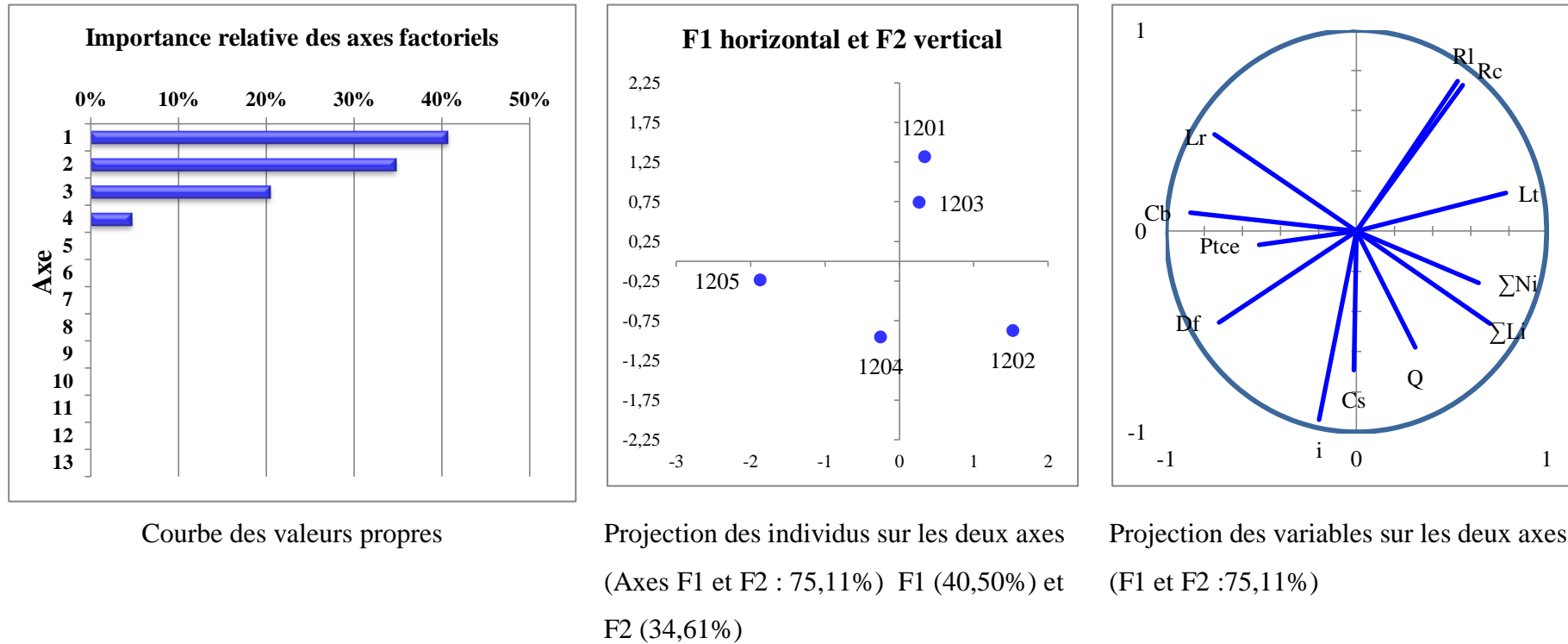


**Descripteurs de réseau****Tableau 25:** Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (2) ; zone I »

Variables	Q	Lt	$\Sigma Li$	$\Sigma Ni$	Rc	Rl	Lr	i	Cs	Df	Ptce	Cb
Q	1,00											
Lt	<b>0,81</b>	1,00										
$\Sigma Li$	0,27	0,48	1,00									
$\Sigma Ni$	-0,06	0,37	<b>0,94</b>	1,00								
Rc	-0,28	0,61	0,18	0,30	1,00							
Rl	-0,21	<b>0,75</b>	0,17	0,28	<b>0,86</b>	1,00						
Lr	-0,43	-0,58	<b>-0,98</b>	<b>-0,87</b>	-0,19	-0,18	1,00					
i	0,32	-0,42	0,32	0,20	<b>-0,87</b>	<b>-0,78</b>	-0,29	1,00				
Cs	<b>0,92</b>	0,10	0,04	-0,29	-0,56	-0,54	-0,18	0,50	1,00			
Df	-0,16	<b>-0,94</b>	-0,36	-0,36	<b>-0,75</b>	<b>-0,93</b>	0,42	0,60	0,22	1,00		
Ptce	<b>-0,82</b>	-0,67	-0,22	-0,02	-0,49	-0,28	0,37	0,41	-0,43	0,48	1,00	
Cb	<b>-0,73</b>	<b>-0,89</b>	<b>-0,82</b>	<b>-0,72</b>	-0,54	-0,56	<b>0,88</b>	0,15	-0,08	<b>0,78</b>	0,61	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de réseau et des sous bassins de la zone I sur les deux plans factoriels est montrée sur la **figure 141**



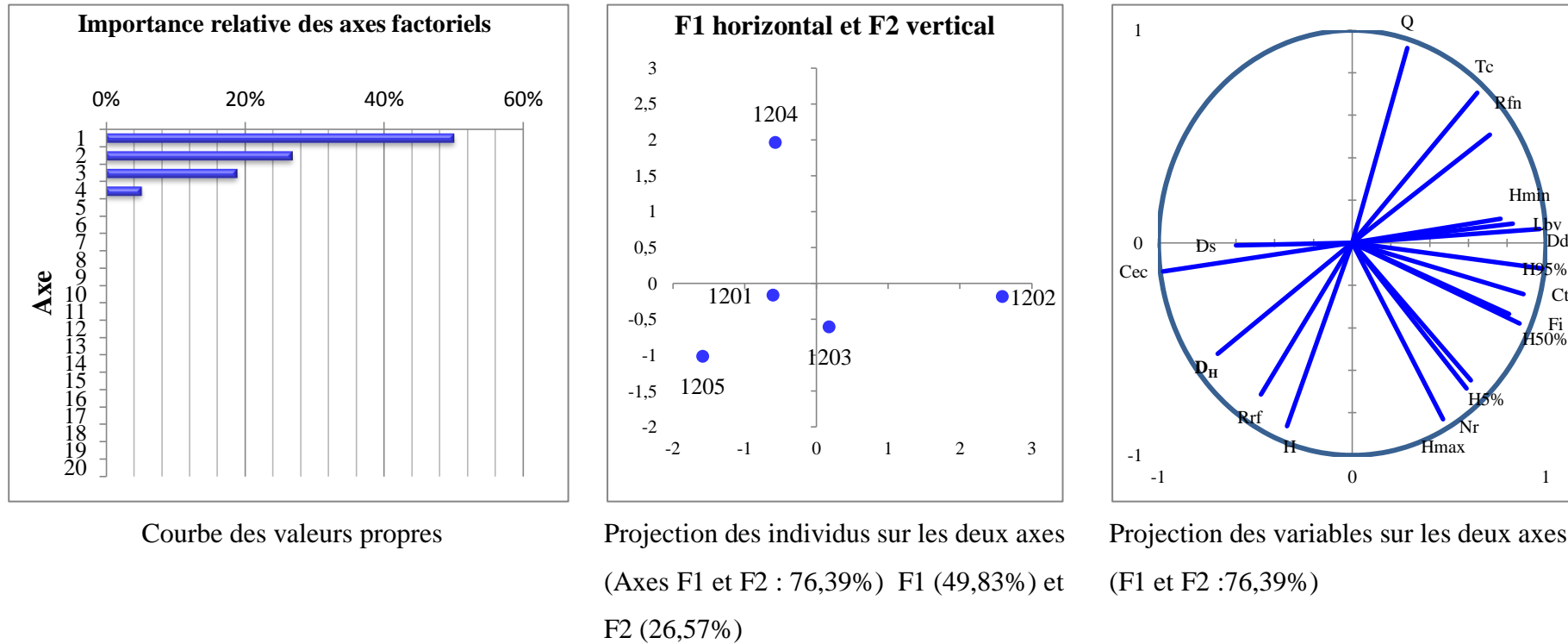
**Figure 141:** Représentation des descripteurs de réseau et des sous bassins de la zone I sur les deux plans factoriels

## Descripteurs de volume

Tableau 26: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (2) ; zone I »

Variables	Q	T <sub>c</sub>	C <sub>t</sub>	R <sub>rf</sub>	D <sub>s</sub>	H	D <sub>d</sub>	R <sub>fn</sub>	C <sub>ec</sub>	F <sub>i</sub>	L <sub>bv</sub>	H <sub>5%</sub>	H <sub>50%</sub>	H <sub>95%</sub>	D <sub>H</sub>	H <sub>min</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>moy</sub>	N <sub>r</sub>	
Q	1,00																			
T <sub>c</sub>	<b>0,84</b>	1,00																		
C <sub>t</sub>	-0,07	0,34	1,00																	
R <sub>rf</sub>	<b>-0,92</b>	<b>-0,76</b>	-0,11	1,00																
D <sub>s</sub>	0,02	-0,27	<b>-0,85</b>	0,02	1,00															
H	<b>-0,99</b>	<b>-0,83</b>	0,04	<b>0,96</b>	-0,05	1,00														
D <sub>d</sub>	0,31	0,60	<b>0,91</b>	-0,51	<b>-0,72</b>	-0,35	1,00													
R <sub>fn</sub>	<b>0,61</b>	<b>0,94</b>	0,50	-0,51	-0,43	-0,59	0,64	1,00												
C <sub>ec</sub>	-0,39	-0,68	<b>-0,88</b>	0,57	0,68	0,43	<b>-0,99</b>	<b>-0,70</b>	1,00											
F <sub>i</sub>	-0,18	0,23	<b>0,99</b>	-0,04	<b>-0,78</b>	0,14	<b>0,87</b>	0,40	<b>-0,83</b>	1,00										
L <sub>bv</sub>	0,22	<b>0,72</b>	<b>0,75</b>	-0,21	-0,58	-0,22	<b>0,73</b>	<b>0,90</b>	<b>-0,76</b>	<b>0,70</b>	1,00									
H <sub>5%</sub>	-0,29	-0,06	0,54	-0,05	-0,04	0,18	0,52	0,00	-0,49	0,65	0,29	1,00								
H <sub>50%</sub>	0,03	0,38	0,60	-0,27	-0,10	-0,13	0,66	0,44	-0,68	0,67	0,63	<b>0,88</b>	1,00							
H <sub>95%</sub>	0,17	0,51	<b>0,92</b>	-0,41	-0,63	-0,23	<b>0,97</b>	0,57	<b>-0,97</b>	<b>0,92</b>	<b>0,73</b>	0,69	<b>0,80</b>	1,00						
D <sub>H</sub>	-0,54	<b>-0,75</b>	-0,69	0,51	<b>0,82</b>	0,51	<b>-0,78</b>	<b>-0,78</b>	<b>0,80</b>	-0,56	<b>-0,70</b>	0,12	-0,16	-0,64	1,00					
H <sub>min</sub>	0,50	0,62	0,40	<b>-0,72</b>	0,02	-0,59	0,67	0,51	<b>-0,72</b>	0,42	0,48	0,68	<b>0,86</b>	<b>0,73</b>	-0,28	1,00				
H <sub>max</sub>	-0,55	-0,24	0,49	0,27	-0,03	0,46	0,34	-0,09	-0,31	0,62	0,28	<b>0,94</b>	<b>0,80</b>	0,54	0,26	0,45	1,00			
H <sub>moy</sub>	0,00	0,25	0,52	-0,29	0,00	-0,10	0,61	0,27	-0,61	0,61	0,46	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>	<b>0,75</b>	-0,03	<b>0,87</b>	<b>0,84</b>	1,00		
N <sub>r</sub>	-0,57	-0,16	<b>0,86</b>	0,37	-0,69	0,54	0,60	0,08	-0,53	<b>0,91</b>	0,49	0,63	0,51	0,68	-0,26	0,11	<b>0,72</b>	0,47	1,00	

La représentation des descripteurs de volume et des sous bassins de la zone I sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 142**



**Figure 142:** Représentation des descripteurs de volume et des sous bassins de la zone I sur les deux plans factoriels

**VIII.3.2 Zone II :**

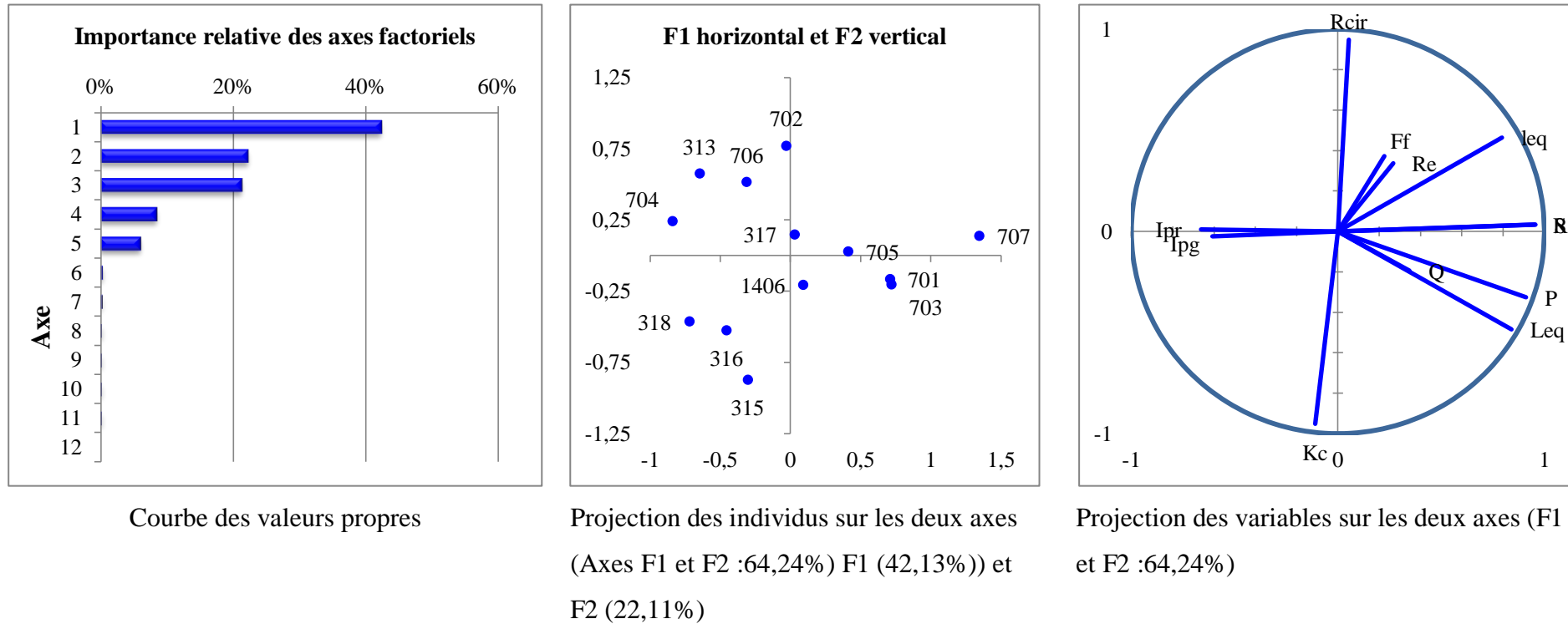
La zone II composée par 13 Sous bassins : (0701 ; 0702 ; 0703 ; 0704 ; 0705 ; 0706 ; 0707 ; 0313 ; 0315 ; 0316 ; 0317 ; 0318 ; 1406).

**Descripteurs de forme****Tableau 27:** Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (2) ; zone II»

Variable	Q	S	P	Kc	Leq	leq	Rcir	Ff	Re	R	Ipg	Ipr
<b>Q</b>	1,00											
<b>S</b>	0,33	1,00										
<b>P</b>	0,31	<b>0,91</b>	1,00									
<b>Kc</b>	0,04	-0,19	0,19	1,00								
<b>Leq</b>	0,29	<b>0,82</b>	<b>0,98</b>	0,37	1,00							
<b>leq</b>	0,26	<b>0,87</b>	0,63	-0,62	0,47	1,00						
<b>Rcir</b>	-0,04	0,14	-0,23	<b>-0,99</b>	-0,41	0,60	1,00					
<b>Ff</b>	-0,22	0,07	0,03	-0,14	0,02	0,05	0,10	1,00				
<b>Re</b>	-0,19	0,10	0,07	-0,11	0,06	0,05	0,06	<b>0,99</b>	1,00			
<b>R</b>	0,31	<b>0,99</b>	<b>0,92</b>	-0,20	<b>0,83</b>	<b>0,88</b>	0,15	0,05	0,08	1,00		
<b>Ipg</b>	-0,12	-0,39	-0,36	-0,02	-0,35	-0,26	0,09	-0,42	-0,49	-0,37	1,00	
<b>Ipr</b>	-0,14	-0,45	-0,44	-0,03	-0,43	-0,30	0,10	-0,38	-0,45	-0,44	<b>0,98</b>	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de forme et sous bassins de la zone II sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 143**



**Figure 143:** Représentation des descripteurs de forme et sous bassins de la zone II sur les deux plans factoriels

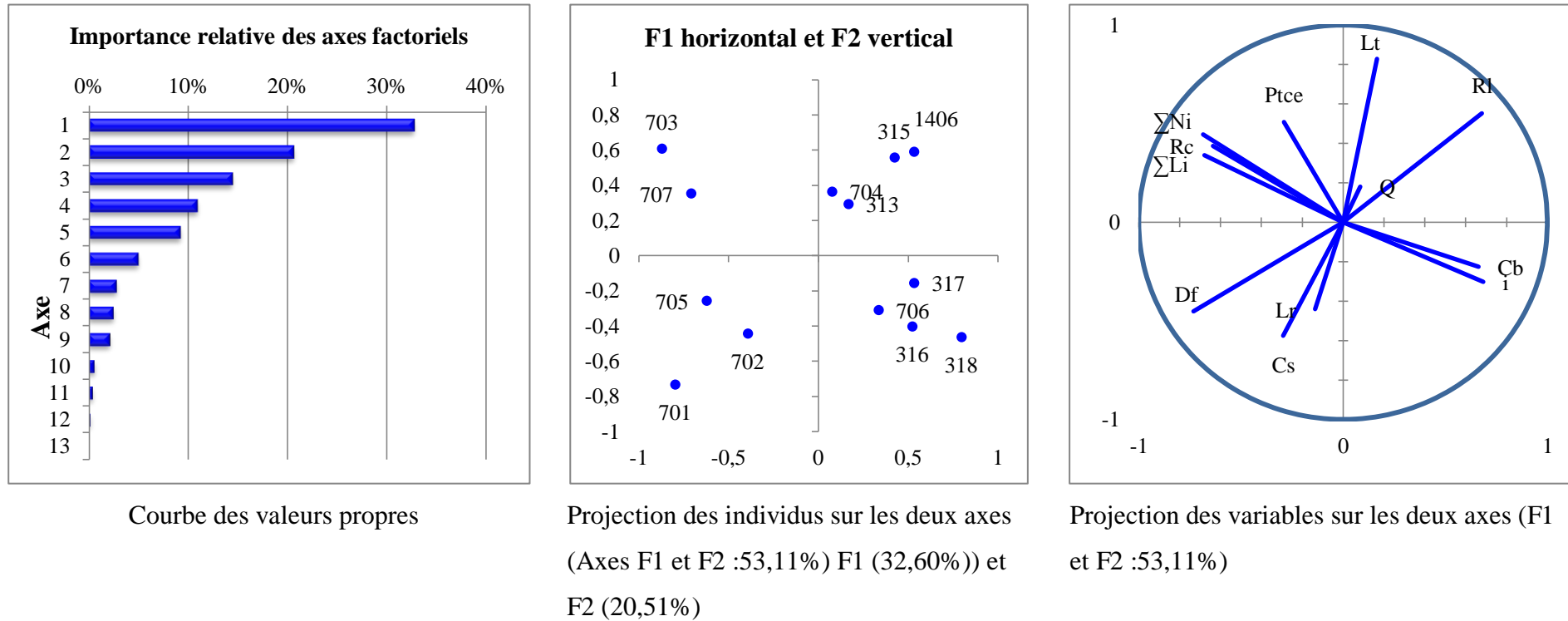


**Descripteurs de réseau****Tableau 28:** Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (2) ; zone II»

Variables	Q	Lt	$\Sigma Li$	$\Sigma Ni$	Rc	Rl	Lr	i	Cs	D <sub>f</sub>	Ptce	Cb
Q	1,00											
Lt	0,35	1,00										
$\Sigma Li$	0,20	0,23	1,00									
$\Sigma Ni$	0,02	0,27	<b>0,93</b>	1,00								
Rc	-0,22	0,14	0,22	0,37	1,00							
Rl	0,09	0,45	-0,49	-0,37	0,02	1,00						
Lr	0,20	-0,21	-0,26	-0,38	0,19	-0,25	1,00					
i	0,01	0,09	-0,30	-0,37	<b>-0,79</b>	0,10	-0,12	1,00				
Cs	-0,08	<b>-0,74</b>	0,13	0,06	-0,02	-0,34	0,14	-0,08	1,00			
D <sub>f</sub>	0,12	-0,35	0,32	0,28	0,21	<b>-0,77</b>	0,33	-0,26	0,35	1,00		
Ptce	-0,01	0,16	0,22	0,29	0,58	0,28	-0,02	-0,55	0,09	-0,04	1,00	
Cb	-0,02	-0,14	-0,47	-0,41	-0,41	0,31	0,04	0,51	0,07	-0,41	-0,04	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de réseau et sous bassins de la zone II sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 144**



**Figure 144:** Représentation des descripteurs de réseau et sous bassins de la zone II sur les deux plans factoriels

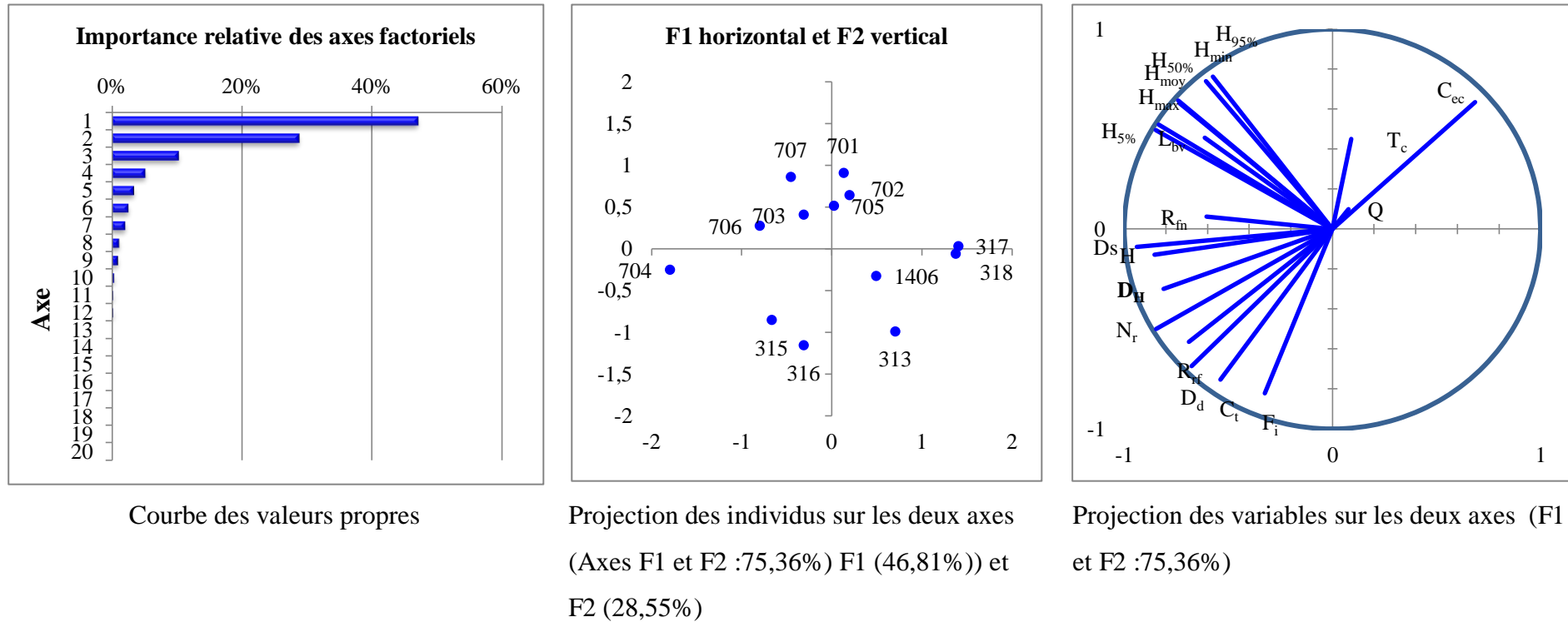
## Descripteurs de volume

Tableau 29: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (2) ; zone II »

Variables	Q	T <sub>c</sub>	C <sub>t</sub>	R <sub>rf</sub>	D <sub>s</sub>	H	D <sub>d</sub>	R <sub>fn</sub>	C <sub>ec</sub>	F <sub>i</sub>	L <sub>bv</sub>	H <sub>5%</sub>	H <sub>50%</sub>	H <sub>95%</sub>	D <sub>H</sub>	H <sub>min</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>moy</sub>	N <sub>r</sub>	
Q	1,00																			
T <sub>c</sub>	0,42	1,00																		
C <sub>t</sub>	-0,11	-0,22	1,00																	
R <sub>rf</sub>	-0,12	-0,49	<b>0,75</b>	1,00																
D <sub>s</sub>	0,04	-0,08	0,59	<b>0,74</b>	1,00															
H	0,20	0,11	0,59	0,58	<b>0,81</b>	1,00														
D <sub>d</sub>	-0,23	-0,43	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>	0,65	0,57	1,00													
R <sub>fn</sub>	0,06	-0,10	0,31	0,48	0,59	0,30	0,44	1,00												
C <sub>ec</sub>	0,21	0,32	<b>-0,82</b>	<b>-0,80</b>	-0,64	-0,60	<b>-0,98</b>	-0,42	1,00											
F <sub>i</sub>	-0,30	-0,47	<b>0,71</b>	0,67	0,29	0,34	<b>0,86</b>	0,00	<b>-0,86</b>	1,00										
L <sub>bv</sub>	0,37	0,44	0,06	0,03	0,49	0,58	0,10	0,63	-0,16	-0,27	1,00									
H <sub>5%</sub>	-0,11	0,07	0,07	0,32	<b>0,77</b>	0,63	0,23	0,47	-0,26	-0,10	0,65	1,00								
H <sub>50%</sub>	-0,18	0,06	-0,11	0,20	0,62	0,47	0,09	0,44	-0,12	-0,21	0,61	<b>0,97</b>	1,00							
H <sub>95%</sub>	-0,18	0,11	-0,27	0,06	0,47	0,32	-0,04	0,41	0,01	-0,32	0,59	<b>0,91</b>	<b>0,98</b>	1,00						
D <sub>H</sub>	0,09	-0,05	0,72	0,64	<b>0,88</b>	<b>0,86</b>	0,64	0,32	-0,63	0,40	0,37	0,56	0,36	0,17	1,00					
H <sub>min</sub>	-0,19	0,13	-0,30	0,01	0,44	0,29	-0,08	0,37	0,04	-0,34	0,57	<b>0,90</b>	<b>0,97</b>	1,00	0,14	1,00				
H <sub>max</sub>	-0,05	0,15	0,04	0,28	<b>0,71</b>	0,68	0,21	0,42	-0,25	-0,11	<b>0,70</b>	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,91</b>	0,51	<b>0,90</b>	1,00			
H <sub>moy</sub>	-0,11	0,14	-0,11	0,17	0,61	0,52	0,08	0,41	-0,13	-0,21	0,66	<b>0,97</b>	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	0,36	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	1,00		
N <sub>r</sub>	-0,03	-0,23	<b>0,85</b>	<b>0,85</b>	<b>0,82</b>	<b>0,86</b>	<b>0,89</b>	0,44	<b>-0,87</b>	0,66	0,34	0,46	0,29	0,11	<b>0,86</b>	0,07	0,46	0,30	1,00	

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de volume et sous bassins de la zone II sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 145**



**Figure 145:** Représentation des descripteurs de volume et sous bassins de la zone II sur les deux plans factoriels

**VIII.3.3 Zone III :**

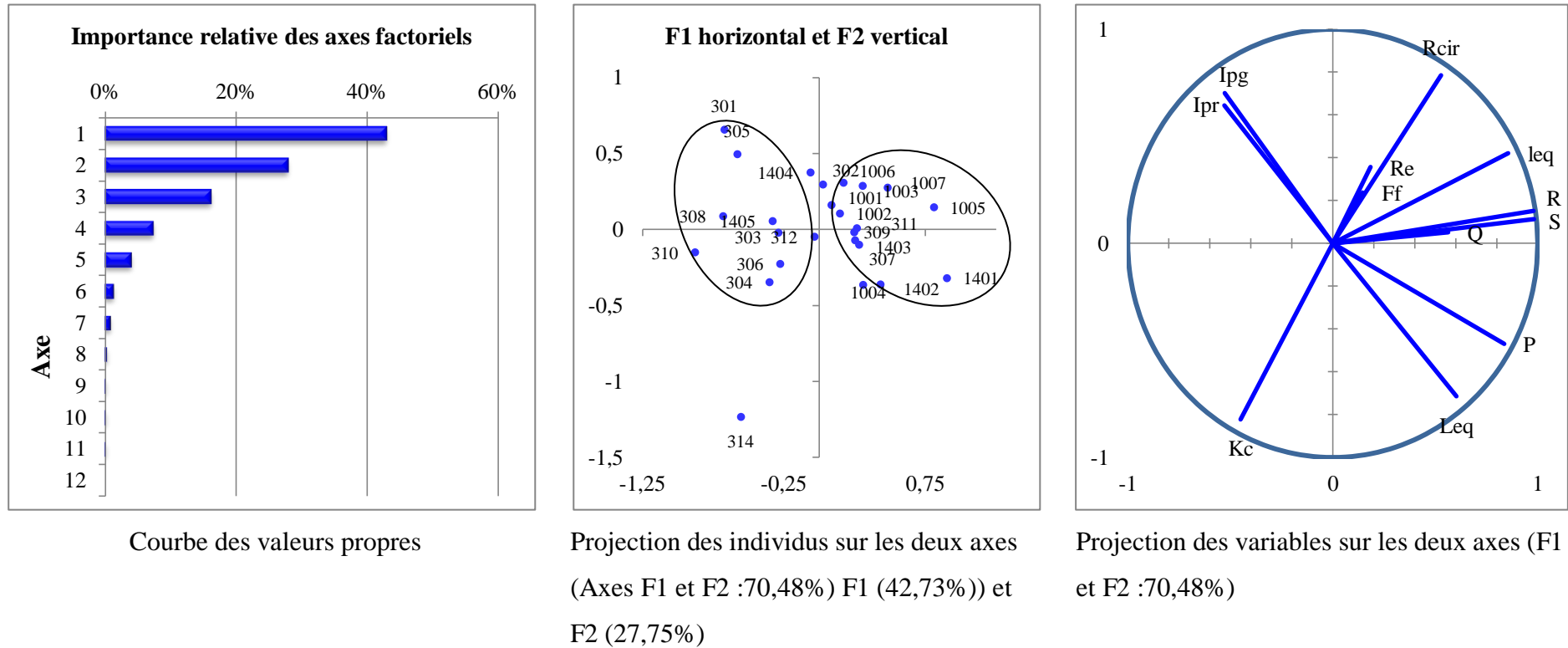
La zone III constituée par 25 sous bassins : (1001 ; 1002 ; 1003 ; 1004 ; 1005 ; 1006 ; 1007 ; 0301 ; 0302 ; 0303 ; 0304 ; 0305 ; 0306 ; 0307 ; 0308 ; 0309 ; 0310 ; 0311 ; 0312 ; 0314 ; 1401 ; 1402 ; 1403 ; 1404 ; 1405).

**Descripteurs de forme****Tableau 30:** Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (2) ; zone III»

Variables	Q	S	P	K <sub>c</sub>	L <sub>eq</sub>	l <sub>eq</sub>	R <sub>cir</sub>	F <sub>f</sub>	R <sub>e</sub>	R	I <sub>pg</sub>	I <sub>pr</sub>
Q	1,00											
S	0,55	1,00										
P	0,46	<b>0,77</b>	1,00									
K <sub>c</sub>	-0,27	-0,52	0,06	1,00								
L <sub>eq</sub>	0,35	0,51	<b>0,93</b>	0,36	1,00							
l <sub>eq</sub>	0,41	<b>0,91</b>	0,51	<b>-0,70</b>	0,17	1,00						
R <sub>cir</sub>	0,27	0,62	0,05	<b>-0,88</b>	-0,30	<b>0,86</b>	1,00					
F <sub>f</sub>	-0,06	0,14	0,03	-0,22	0,02	0,04	0,03	1,00				
R <sub>e</sub>	0,00	0,18	0,00	-0,35	-0,06	0,13	0,16	<b>0,99</b>	1,00			
R	0,52	<b>0,99</b>	<b>0,77</b>	-0,56	0,50	<b>0,92</b>	0,65	0,11	0,17	1,00		
I <sub>pg</sub>	-0,12	-0,43	-0,66	-0,25	<b>-0,70</b>	-0,14	0,27	-0,03	0,03	-0,38	1,00	
I <sub>pr</sub>	-0,09	-0,44	-0,62	-0,21	-0,63	-0,20	0,18	-0,01	0,05	-0,38	<b>0,89</b>	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de forme et sous bassins de la zone III sur les deux plans factoriels est montée à la **figure 146**



**Figure 146:** Représentation des descripteurs de forme et sous bassins de la zone III sur les deux plans factoriels

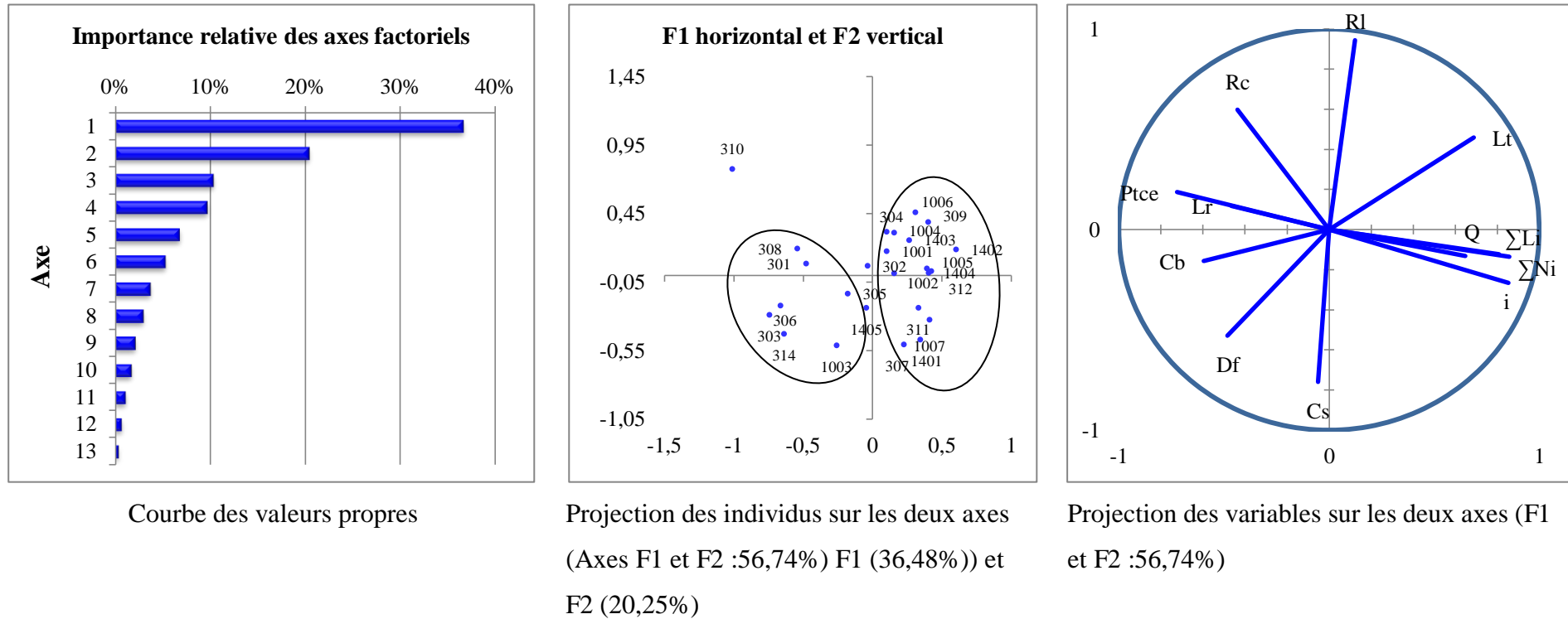
**Descripteurs de réseau****Tableau 31:** Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (2) ; zone III»

Variables	Q	Lt	$\Sigma Li$	$\Sigma Ni$	Rc	Rl	Lr	i	Cs	D	Ptce	Cb
<b>Q</b>	1,00											
<b>Lt</b>	0,42	1,00										
<b><math>\Sigma Li</math></b>	<b>0,54</b>	0,54	1,00									
<b><math>\Sigma Ni</math></b>	0,39	0,53	<b>0,88</b>	1,00								
<b>Rc</b>	-0,29	0,06	-0,31	-0,27	1,00							
<b>Rl</b>	-0,08	0,53	-0,03	0,00	0,53	1,00						
<b>Lr</b>	-0,24	-0,28	-0,20	-0,46	0,42	0,01	1,00					
<b>i</b>	<b>0,64</b>	0,48	0,69	0,61	-0,50	-0,15	-0,36	1,00				
<b>Cs</b>	-0,14	-0,39	0,06	0,08	-0,37	-0,60	0,04	0,14	1,00			
<b>D</b>	-0,25	-0,41	-0,18	-0,20	0,21	-0,58	0,23	-0,29	0,34	1,00		
<b>Ptce</b>	<b>-0,51</b>	-0,39	-0,55	-0,49	0,30	0,04	0,25	-0,69	-0,16	0,22	1,00	
<b>Cb</b>	-0,18	-0,44	-0,63	-0,44	0,13	-0,14	0,02	-0,41	0,11	0,15	0,28	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives



La représentation des descripteurs de réseau et sous bassins de la zone III sur les deux plans factoriels est montée à la **figure 147**



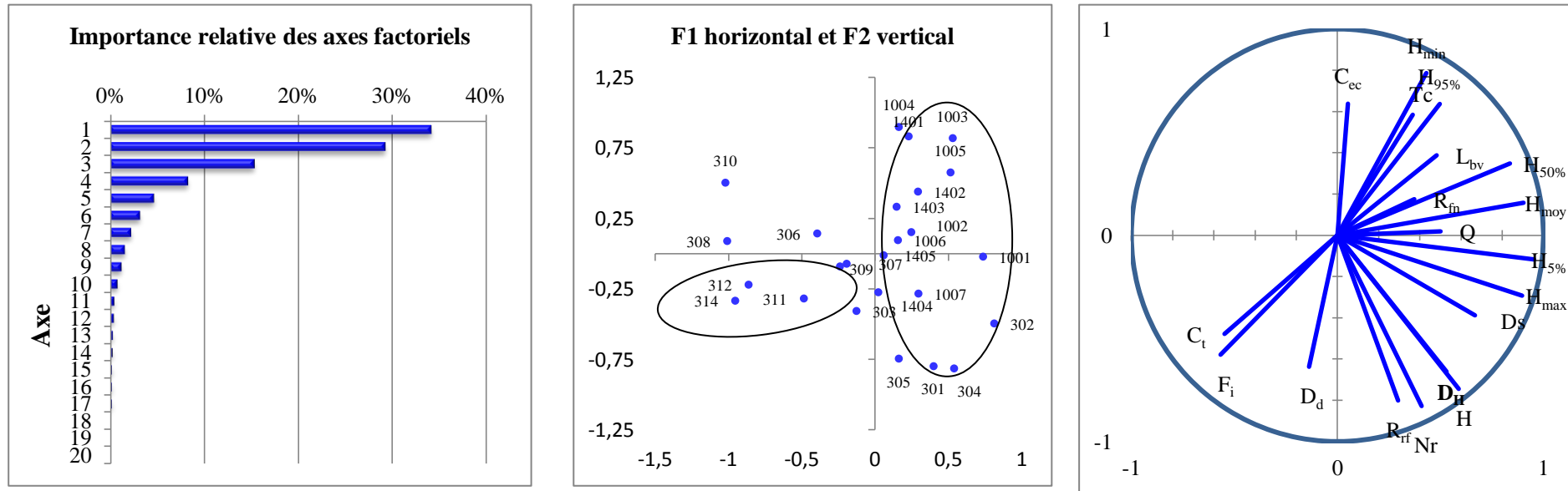
**Figure 147:** Représentation des descripteurs de réseau et sous bassins de la zone III sur les deux plans factoriels

## Descripteurs de volume

Tableau 32: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (2) ; zone III»

Variables	Q	T <sub>c</sub>	C <sub>t</sub>	R <sub>rf</sub>	D <sub>s</sub>	H	D <sub>d</sub>	R <sub>fn</sub>	C <sub>ec</sub>	F <sub>i</sub>	L <sub>bv</sub>	H <sub>5%</sub>	H <sub>50%</sub>	H <sub>95%</sub>	D <sub>H</sub>	H <sub>min</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>moy</sub>	N <sub>r</sub>	
Q	1,00																			
T <sub>c</sub>	0,38	1,00																		
C <sub>t</sub>	-0,23	-0,30	1,00																	
R <sub>rf</sub>	0,01	-0,57	0,03	1,00																
D <sub>s</sub>	0,16	0,08	-0,31	0,54	1,00															
H	0,35	-0,24	0,03	<b>0,76</b>	0,55	1,00														
D <sub>d</sub>	0,14	-0,07	0,68	0,29	-0,07	0,39	1,00													
R <sub>fn</sub>	0,11	0,43	-0,02	-0,04	0,34	0,00	-0,03	1,00												
C <sub>ec</sub>	-0,21	0,03	-0,61	-0,30	0,01	-0,45	<b>-0,97</b>	0,08	1,00											
F <sub>i</sub>	-0,24	-0,39	<b>0,94</b>	0,13	-0,31	0,09	<b>0,75</b>	-0,20	<b>-0,70</b>	1,00										
L <sub>bv</sub>	0,37	<b>0,73</b>	-0,04	-0,42	0,12	-0,01	0,01	<b>0,76</b>	-0,03	-0,20	1,00									
H <sub>5%</sub>	0,39	0,20	-0,46	0,38	0,64	0,65	-0,11	0,27	0,00	-0,45	0,38	1,00								
H <sub>50%</sub>	0,36	0,41	-0,55	-0,04	0,26	0,24	-0,24	0,30	0,17	-0,56	0,53	<b>0,83</b>	1,00							
H <sub>95%</sub>	0,40	0,57	-0,43	-0,35	-0,23	-0,09	-0,21	0,16	0,15	-0,48	0,50	0,43	<b>0,77</b>	1,00						
D <sub>H</sub>	0,05	-0,29	-0,09	0,68	<b>0,84</b>	<b>0,73</b>	0,08	0,13	-0,12	-0,04	-0,05	0,63	0,17	-0,43	1,00					
H <sub>min</sub>	0,13	0,62	-0,47	-0,53	-0,06	-0,39	-0,41	0,26	0,38	-0,55	0,52	0,32	<b>0,70</b>	<b>0,79</b>	-0,36	1,00				
H <sub>max</sub>	0,46	0,14	-0,27	0,47	0,55	<b>0,81</b>	0,15	0,16	-0,24	-0,25	0,31	<b>0,89</b>	<b>0,70</b>	0,40	0,55	0,22	1,00			
H <sub>moy</sub>	0,42	0,41	-0,44	0,10	0,39	0,44	-0,08	0,25	0,00	-0,46	0,50	<b>0,84</b>	<b>0,88</b>	0,69	0,25	0,66	<b>0,88</b>	1,00		
N <sub>r</sub>	0,31	-0,24	0,27	<b>0,72</b>	0,40	<b>0,92</b>	0,69	0,03	<b>-0,70</b>	0,35	-0,01	0,47	0,11	-0,17	0,61	-0,45	0,69	0,31	1,00	

La représentation des descripteurs de volume et sous bassins de la zone III sur les deux plans factoriels est montée à la **figure 148**



Courbe des valeurs propres

Projection des individus sur les deux axes (Axes F1 et F2 :63,12% F1 (34,01%) et F2 (29,11%))

Projection des variables sur les deux axes (F1 et F2 :56,74%)

**Figure 148:** Représentation des descripteurs de volume et sous bassins de la zone III sur les deux plans factoriels

### VIII.4 Interprétation des résultats de l'échelle (2) des 3 zones

#### VIII.4.1 Zone I

L'examen des tableaux n°24, 25 et 26 relatifs aux matrices de corrélation des variables permet de conclure que le débit est fortement corrélé avec les descripteurs de forme  $P$ ,  $K_c$ ,  $L_{eq}$ ,  $l_{eq}$ ,  $R_{cir}$ , de réseau  $L_t$ ,  $C_s$ ,  $P_{tce}$ ,  $C_b$  et de volume  $T_c$ ,  $H$ ,  $R_{rf}$ ,  $R_{fn}$ . D'autre part on remarque des corrélations linéaires positives et négatives, ce qui signifie que les variables varient dans deux sens opposés, certaines étant très fortes (0.98 et -0.97), et d'autres très faibles (-0.04, -0.19). Les corrélations significatives sont présentées aux **figures** (de 149 à 157)

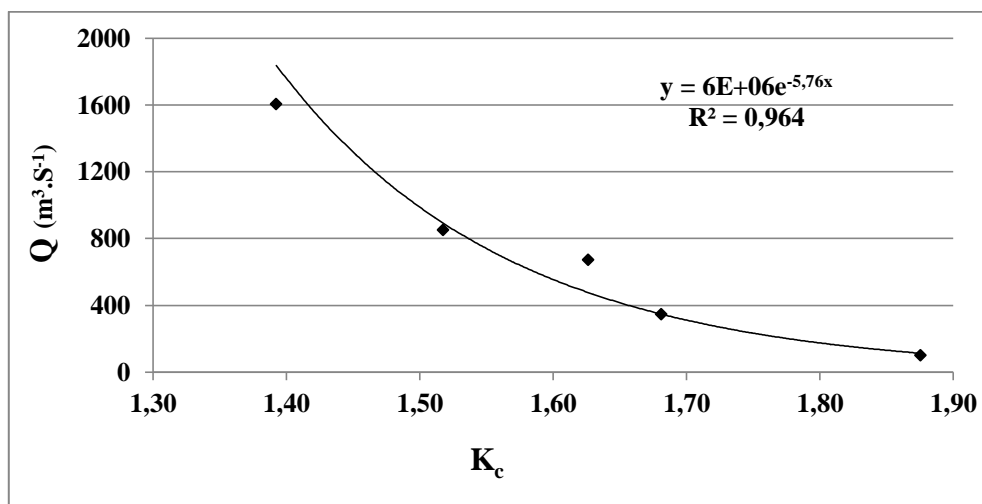


Figure 149: Relation exponentielle entre le débit ( $Q$ ) et le coefficient de compacité ( $K_c$ ).

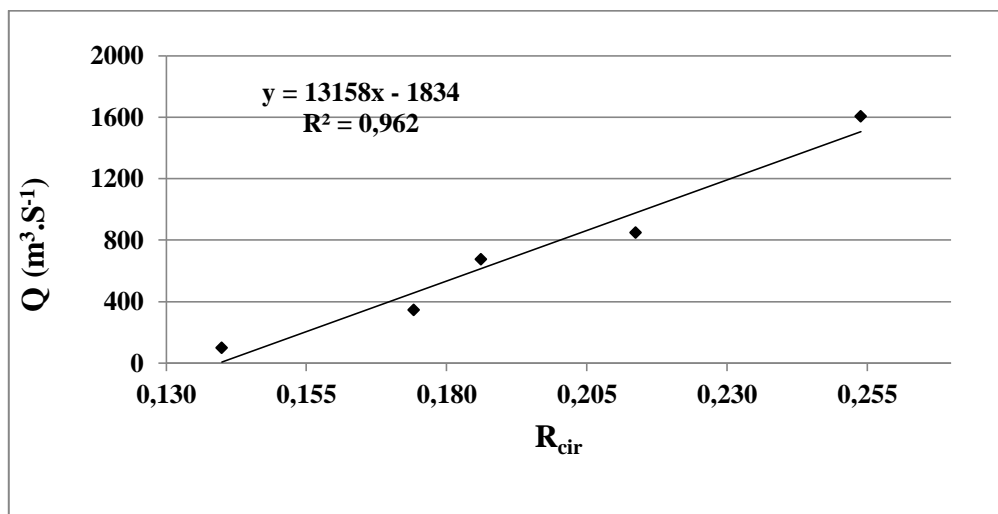


Figure 150: Relation linéaire entre le débit ( $Q$ ) et le rapport de circularité ( $R_{cir}$ ).

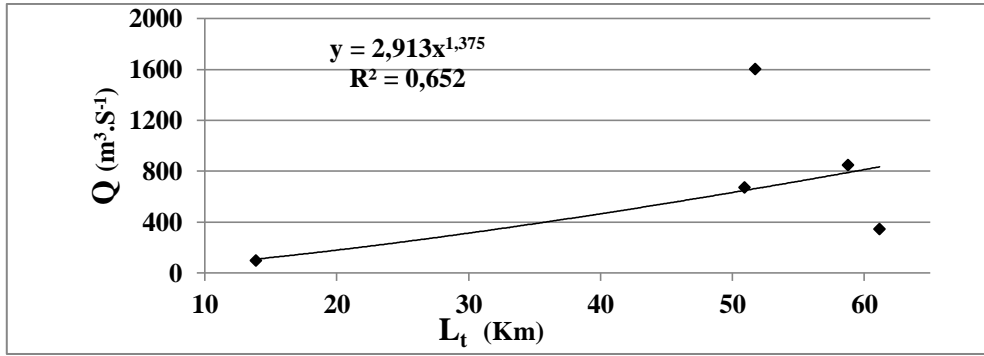


Figure 151: Relation de puissance entre le débit (Q) et la longueur du talweg principal (Lt).

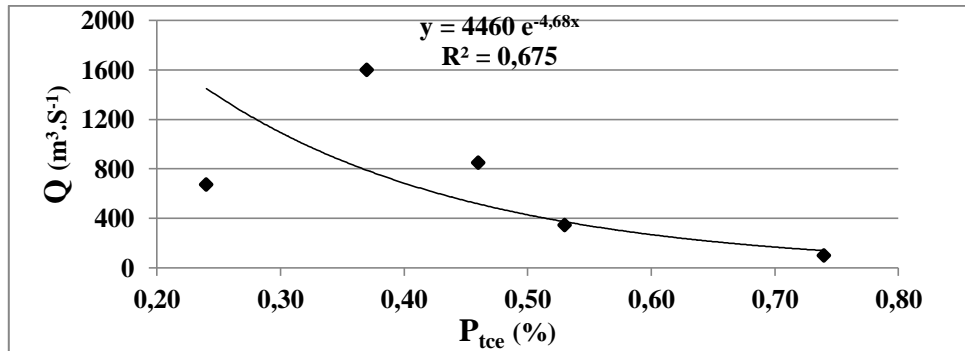


Figure 152: Relation exponentielle entre le débit (Q) et la pente du cours d'eau (Ptce).

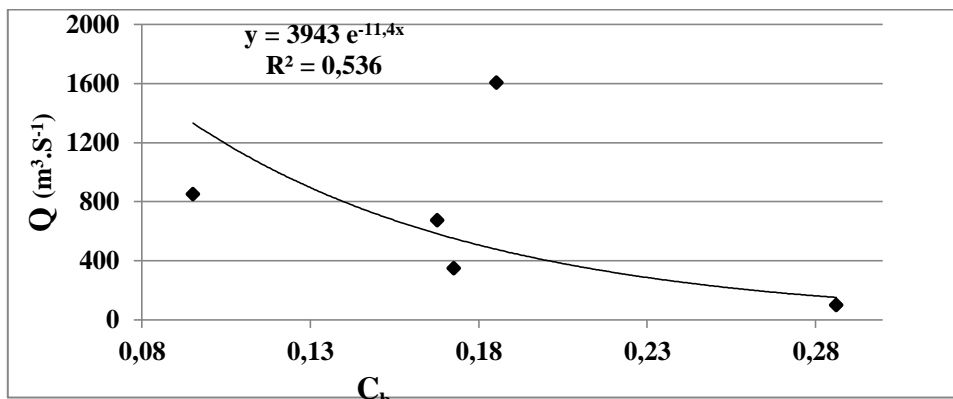


Figure 153: Relation exponentielle entre le débit (Q) et le coefficient de boisement (Cb).

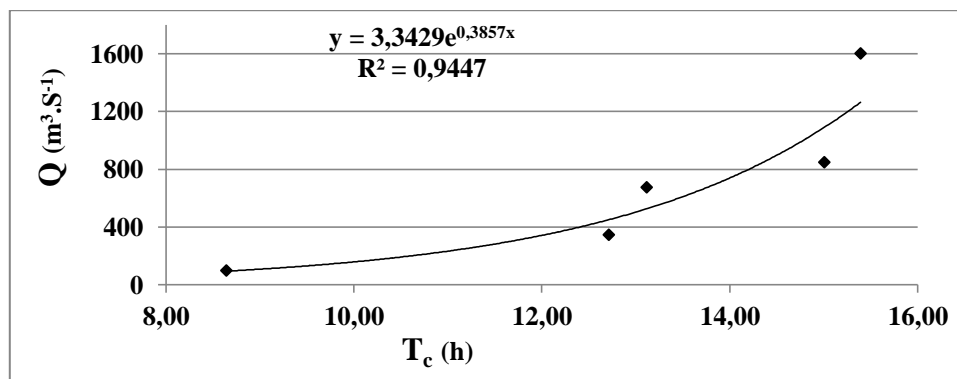
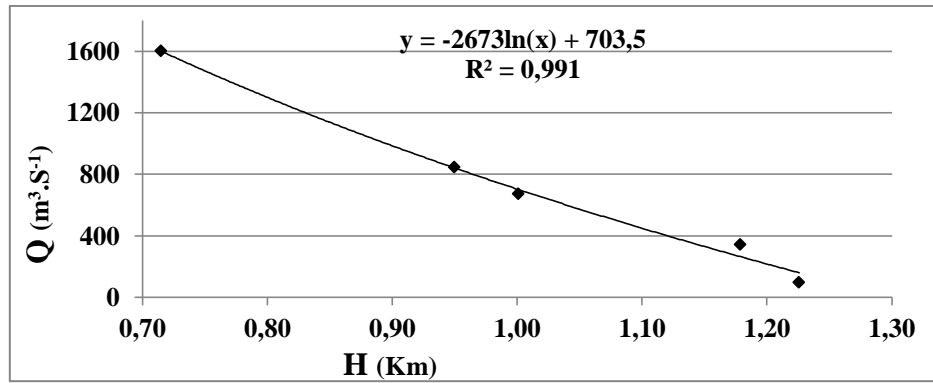
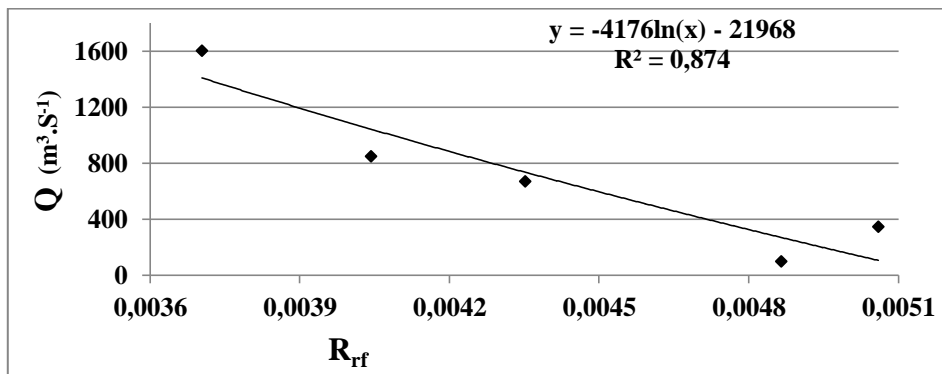


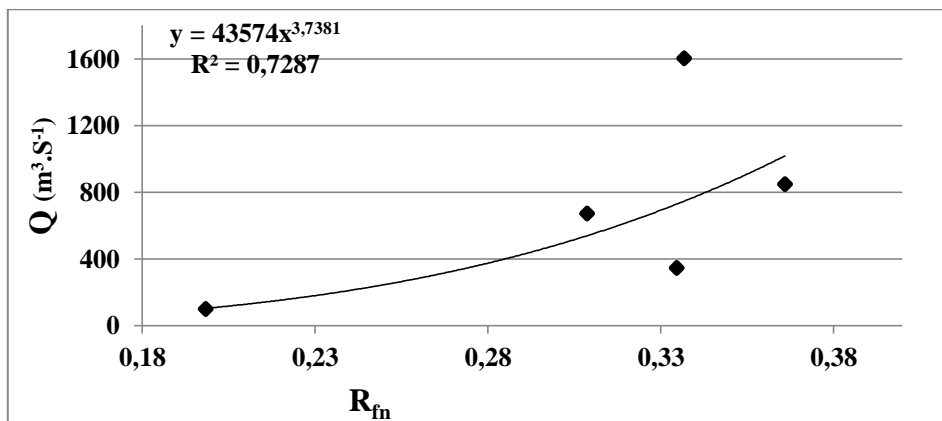
Figure 154: Relation exponentielle entre le débit (Q) et le temps de concentration (Tc).



**Figure 155:** Relation logarithmique entre le débit (Q) et l'exonération totale (H).



**Figure 156:** Relation logarithmique entre le débit (Q) et le rapport de relief (R<sub>rf</sub>).



**Figure 157:** Relation de puissance entre le débit (Q) et le rapport de finesse (R<sub>fn</sub>).

Le pourcentage d'inertie des descripteurs de forme, de réseau et de volume est expliqué par le premier et le second axe F1 et F2. Le résumé des variables par 2 dimensions (F1 et F2) a donné une récupération de 82% d'informations contenues dans le tableau des données des descripteurs de forme, 75%, dans le tableau des données des descripteurs de réseau et 76% dans le tableau des données des descripteurs de volume. Ces résumés synthétisent parfaitement les variables, pourtant le nombre des individus est limité.

Les projections des individus et des variables sur les deux plans factoriels F1 et F2, relatent les résultats suivants:

#### **Descripteur de forme :**

- Le premier facteur exprime 57% de la variance présente d'une part les sous bassins 1202 et 1204 caractérisés par des valeurs importantes des variables S, leq, R, R<sub>cir</sub> traduisant l'échelle de grandeur et la forme des bassins. Ces deux sous bassins sont bien corrélés positivement avec le facteur F1 et d'autre part celui codé 1205 est corrélé négativement. Le facteur F1 est bien corrélé avec leq=0.98, R<sub>cir</sub>=0.95, R=0.61, S=0.60 et Q=0.87 et négativement avec P= -0.77, Kc=-0.98, Leq=-0.85, Ff=-0.70, Re=-0.67.
- Le facteur F2 exprime 25% de la variance. Il oppose d'une part la surface du bassin (corrélation positive =0.73) ayant la valeur de (1880 Km<sup>2</sup>) relative au sous bassin 1202, et d'autre part I<sub>pg</sub> (corrélation négative = -0.70) avec la valeur élevée de (7.26 m/Km) est relative au sous bassin 1203.

#### **Descripteurs de réseau :**

- Le premier facteur exprime 40% de la variance présente les sous bassins 1201, 1202 et 1203 caractérisés par des valeurs importantes des variables Lt, Rc, Rl,  $\sum Li$ ,  $\sum Ni$  dans l'ensemble des individus. Ils traduisent l'importance du réseau hydrographique en termes du développement des cours d'eau. Le sous bassin 1202 est bien corrélé positivement avec le facteur F1 et le sous bassin codé 1205 est corrélé négativement. Le facteur F1 est bien corrélé positivement avec Lt =0.79, Rc= 0.53, Rl= 0.56,  $\sum Li$ = 0.70,  $\sum Ni$ = 0.64 et négativement avec P<sub>ice</sub>= -0.51, C<sub>b</sub>=-0.87, D<sub>f</sub>= -0.72 et L<sub>r</sub>= -0.74.
- Le facteur F2 exprime 35% de la variance. Il oppose d'une part le rapport de confluence Rc et le rapport des longueurs (corrélation positive =0.75 et 0.73) ayant la valeur de (4.84 et 2.68) relative au sous bassin 1203 et 1201, et d'autre part le coefficient de sinuosité et l'ordre des cours d'eau (corrélation négative = -0.69 et -0.94).

#### **Descripteurs de volume :**

- Le premier facteur exprime 50% de la variance identifie d'une part le sous bassin 1202, caractérisé par des valeurs importantes des descripteurs altitudes, Nr, Lbv, D<sub>d</sub>, Fi, Ct et Rfn ayant un relief fort et un drainage important. Ils sont faiblement corrélés avec le débit. D'autre part le facteur F1 identifie aussi le sous bassin 1205 qui possède



une valeur importante de  $C_{ec} = 2.02$  qui explique la forte perméabilité du sol. Elle est faiblement corrélée avec le débit.

- Le facteur F2 exprime 26% de la variance est très bien corrélé au débit et au temps de concentration (corrélation positive  $= 0.92$  et  $0.70$ ) ayant les valeurs de ( $1601,60 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $15.39 \text{ h}$ ) correspondant au sous bassin 1204.

#### VIII.4.2 Zone II

L'examen des tableaux n°27, 28 et 29 relatifs aux matrices de corrélation des variables permet de conclure que le débit est faiblement corrélé avec les descripteurs de forme de réseau et de volume. D'autre part on remarque des corrélations linéaires positives et négatives, ce qui signifie que les variables varient dans deux sens opposés, certaines faibles et d'autres très faibles.

Le pourcentage d'inertie des descripteurs de forme, de réseau et de volume est expliqué par le premier et le second axe F1 et F2. Le résumé des variables par 2 dimensions (F1 et F2) a donné une récupération de 64% d'informations contenues dans le tableau des données des descripteurs de forme, 53% dans le tableau des données des descripteurs de réseau et 75% dans le tableau des données des descripteurs de volume. Ces résumés synthétisent fortement les variables.

#### Descripteurs de forme :

- Le premier facteur exprime 42% de la variance caractérise d'une part les sous bassins 0701, 0703 et 0707 marqués par des valeurs importantes des variables P,  $Leq$ , R. D'autre part, les sous bassins 0704, 0313, 0318 sont corrélés négativement avec F1 et correspondent aux valeurs élevées d' $I_{pg}$  et  $I_{pr}$ .
- Le facteur F2 exprime 22% de la variance. Il oppose d'une part le rapport de circularité du sous bassin 0702 (corrélation positive  $= 0,94$ ) ayant la valeur de ( $0,288$ ) et d'autre part  $K_c$  (corrélation négative  $= -0,95$ ) avec la valeur relativement élevée de ( $1.76$ ) pour le sous bassin 0315.

#### Descripteurs de réseau :

- Le premier facteur exprime 33% de la variance identifie d'une part les sous bassins 0315, 0316, 0317, 0318 et 1406 caractérisés par des valeurs élevées des variables  $C_b$ ,  $i$ ,  $R_l$  traduisant l'importance du réseau hydrographique en termes du développement des cours d'eau et d'occupation du sol, et d'autre part les sous bassins 0701, 0703,

0705, 0707 correspondants aux valeurs importantes des variables  $\sum Li$ ,  $\sum Ni$ ,  $D_f$ ,  $R_c$  expliquant la forte confluence des réseaux hydrographiques.

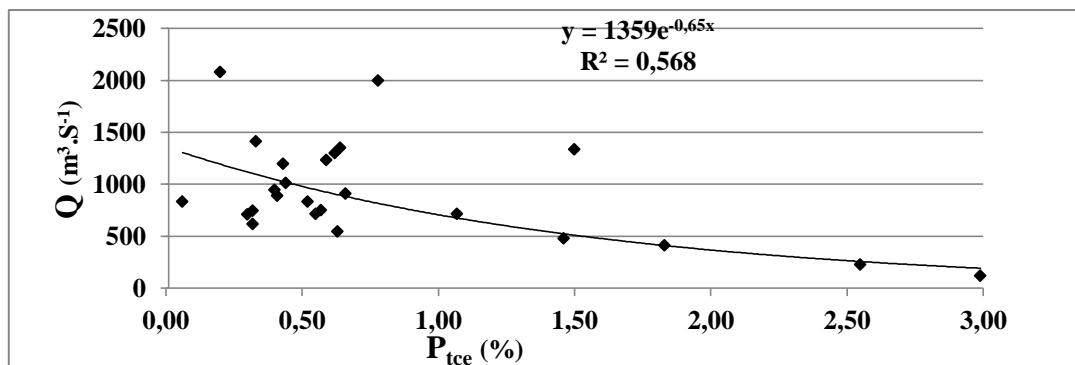
- Le facteur F2 exprime 20% de la variance, il oppose d'une part Lt (corrélation positive = 0.82) ayant la valeur max (71,71 Km) est relative au sous bassin 1406, et d'autre part le Cs d'une valeur de 0,92 et une (corrélation négative = -0.57) correspond au bassin 0701.

#### Descripteurs de volume :

- Le premier facteur exprime 47% de la variance présente d'une part le sous bassin 0317 et 0318, caractérisés par des valeurs importantes de  $C_{ec}$  (1,80 et 1,91) interprétant la forte perméabilité du sol et d'autre part le sous bassin 0704 qui possède des valeurs importantes de  $D_s$ , des altitudes,  $N_r$  et  $R_{rf}$  élevées traduisant l'importance du relief. Ce facteur est faiblement corrélé avec le débit.
- Le facteur F2 exprime 28% de la variance, il oppose d'une part  $H_{05\%}$  du sous bassin 0701 (corrélation positive = 0,77) ayant la valeur de (820 m) et d'autre part  $F_i$  (corrélation négative = -0.82) avec la valeur relativement élevée de (0,39) pour le sous bassin 0316.

#### VIII.4.3 Zone III

L'examen des tableaux n° 30, 31 et 32 relatifs aux matrices de corrélation des variables permet de conclure que le débit est fortement corrélé avec les descripteurs de forme P,  $K_c$ ,  $L_{eq}$ ,  $l_{eq}$ ,  $R_{cir}$ , de réseau Lt,  $C_s$ ,  $P_{tce}$ ,  $C_b$  et de volume Tc, H,  $R_{rf}$ ,  $R_{fn}$  d'autre part on remarque des corrélations linéaires positives et négatives, ce qui signifie que les variables varient dans deux sens opposés, certaines étant moyennes (0.64), et d'autres très faibles (0.09). La seule corrélation significative est présentée dans la **figure 158**



**Figure 158:** Relation exponentielle entre le débit ( $Q$ ) et la pente du cours d'eau ( $P_{tce}$ ).

Le pourcentage d'inertie des descripteurs de forme, de réseau et de volume est expliqué par le premier axe F1 et le second axe F2. Le résumé des variables par 2 dimensions (F1 et F2) a donné une récupération de 70% d'informations contenues dans le tableau des données des descripteurs de forme, 57%, dans le tableau des données des descripteurs de réseau et 63% dans le tableau des données des descripteurs de volume. Ces résumés synthétisent bien les variables.

Les projections des individus et des variables sur les deux plans factoriels F1 et F2 mettent en évidence deux groupes pour tous les trois catégories de descripteurs :

### **Descripteurs de forme**

- Le premier groupe formé par les sous bassins de Kebir Rhumel, des Côtiers Constantinois (0302, 0307, 0309, 0311), de la Seybouse (1401, 1402, 1403) caractérisés par des valeurs importantes des variables S, P,  $L_{eq}$ ,  $l_{eq}$ , R,  $R_{cir}$ . Ces individus sont corrélé positivement avec le facteur F1 qui exprime 42% de la variance, il est fortement corrélé avec S et R (0.98 et 0.97) et moyennement corrélé avec le débit (0.56)
- Le second groupe est représenté par les sous bassin de la Seybouse (1404,1405), des Côtiers Constantinois (0301, 0303, 0304, 0305, 0306, 0308, 0310, 0312, 0314), qui sont un peu dispersés, indiqués par des valeurs élevées des variables  $I_{pg}$ ,  $I_{pr}$ ,  $K_c$ .
- facteur F2 exprimant 28% de la variance. Il oppose d'une part  $R_{cir}$ ,  $I_{pg}$  et  $I_{pr}$  avec une (corrélations positives = 0.79 ; 0.70 et 0.65) ayant les valeurs de (0,314 ; 30,77m/Km et 63,88 (m/Km)<sup>1/2</sup>) correspondants aux sous bassins 1004 et 0301, et d'autre part les variables  $K_c$  et  $L_{eq}$  avec une (corrélations négatives = -0,82 et -0,72) relatives aux individus (0314 et 1402) avec des valeurs de (3,37 et 80,41 Km).

### **Descripteurs de réseau :**

- Le premier groupe formé par les sous bassins du Kebir Rhumel (1001, 1002, 1004, 1005, 1006, 1007), des Côtiers Constantinois (0302, 0304, 0309, 0311, 0312), de la Seybouse (1401, 1402, 1403, 1404) caractérisés par des valeurs importantes des variables  $L_t$ ,  $\sum L_i$ ,  $\sum N_i$ ,  $i$ . Ces individus sont corrélés positivement avec le facteur F1 qui exprime (37% de la variance), il est fortement corrélé avec  $\sum L_i$  et  $i$  (0.86 et 0.85) et moyennement corrélé avec le débit (0.65).
- Le second groupe est représenté par les sous bassin des Côtiers Constantinois (0301, 0302, 0303, 0305, 0306, 0308, 0314), le cinquième sous bassin de la Seybouse et le

troisième sous bassin du Kebir Rhumel indiqués par des valeurs élevées des variables ( $R_c, P_{tce}, C_b, D_f$ ).

- Le facteur F2 exprime 20% de la variance. Il oppose d'une part  $R_l$  avec une (corrélation positive =0.94) ayant la valeur de (2,40) relative au sous bassin (0310) et d'autre part la variable  $C_s$  avec une (corrélation négative = -0.76) qui correspond à l'individu (1003) avec une valeur de (0,88).

#### **Descripteurs de volume :**

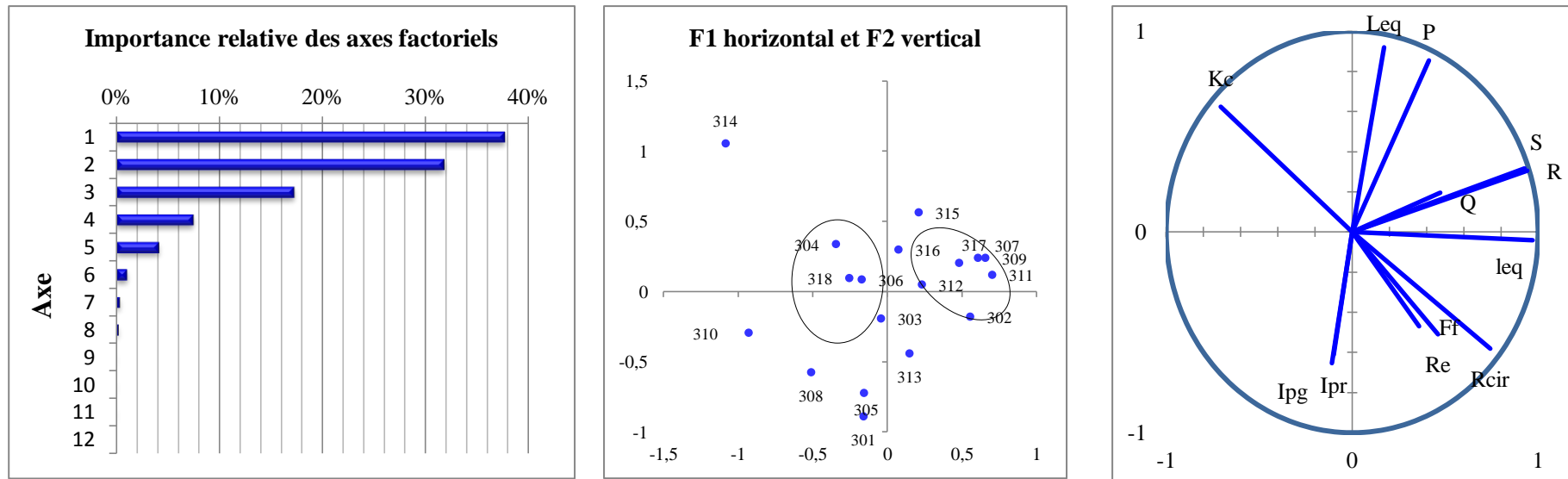
- Le premier groupe formé par les sous bassins du Kebir Rhumel, des Côtiers Constantinois (0301, 0302, 0305, 0307), de la Seybouse (1401, 1402, 1403, 1404, 1405) caractérisés par des valeurs importantes des variables des altitudes,  $T_c, D_s, D_H, R_{rf}, N_r$  qui traduisent un relief fort et un drainage important. Ces individus sont corrélés positivement avec le facteur F1 qui exprime 34% de la variance, il est fortement lié aux variables ( $H_{50\%}, H_{moy}, H_{5\%}, H_{max}$ ) avec des corrélations respectivement (0.84 ; 0.90 ; 0.95 ; 0.90) et moyennement corrélé avec le débit (0.50).
- Le second groupe est représenté par les sous bassin des Côtiers Constantinois (0309, 0311, 0312, 0314) indiqués par des valeurs élevées des variables  $C_t, F_i, D_d$ .
- Le facteur F2 exprime 29% de la variance. Il oppose d'une part  $H_{min}$  et  $C_{cc}$  avec une (corrélation positive =0.78 et 0.64) ayant les valeurs de (688 m et 1,11) relative au sous bassin (1003 et 1004) et d'autre part les variables ( $D_d$  et  $D_H$ ) avec des (corrélations négatives de (-0.64 et -0.74) correspondants aux individus (0305 et 0304) avec des valeurs de (1,17  $Km^{-1}$  et 1120 m).

**VIII.5 La méthode ACP à l'échelle (3) des cinq bassins versants****VIII.5.1 Bassin versant de la Medjerda codé 12****VIII.5.2 Bassin versant des Côtiers Constantinois codé 03****Descripteurs de forme****Tableau 33:** Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (3) ; BV 03»

Variables	Q	S	P	Kc	Leq	leq	Rcir	Ff	Re	R	Ipg	Ipr
Q	1,00											
S	0,51	1,00										
P	0,33	0,67	1,00									
Kc	-0,26	-0,46	0,30	1,00								
Leq	0,22	0,46	<b>0,97</b>	0,52	1,00							
leq	0,47	<b>0,91</b>	0,35	<b>-0,70</b>	0,10	1,00						
Rcir	0,30	0,51	-0,24	<b>-0,89</b>	-0,47	<b>0,81</b>	1,00					
Ff	-0,29	0,12	-0,19	-0,45	-0,27	0,24	0,36	1,00				
Re	-0,20	0,21	-0,20	-0,57	-0,30	0,34	0,47	<b>0,98</b>	1,00			
R	0,51	<b>0,99</b>	0,68	-0,48	0,47	<b>0,91</b>	0,52	0,15	0,24	1,00		
Ipg	0,11	-0,25	-0,45	-0,26	-0,48	-0,02	0,33	-0,07	-0,03	-0,23	1,00	
Ipr	0,04	-0,21	-0,39	-0,24	-0,40	-0,03	0,27	-0,03	0,00	-0,19	<b>0,95</b>	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 03 sur les deux plans factoriels est montée à la figure 159



Courbe des valeurs propres

Projection des individus sur les deux axes  
(Axes F1 et F2 : 69,50%) F1 (37,68%) et  
F2 (31,82%)

Projection des variables sur les deux axes  
(F1 et F2 :69,50%)

**Figure 159:** Représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 03 sur les deux plans factoriels

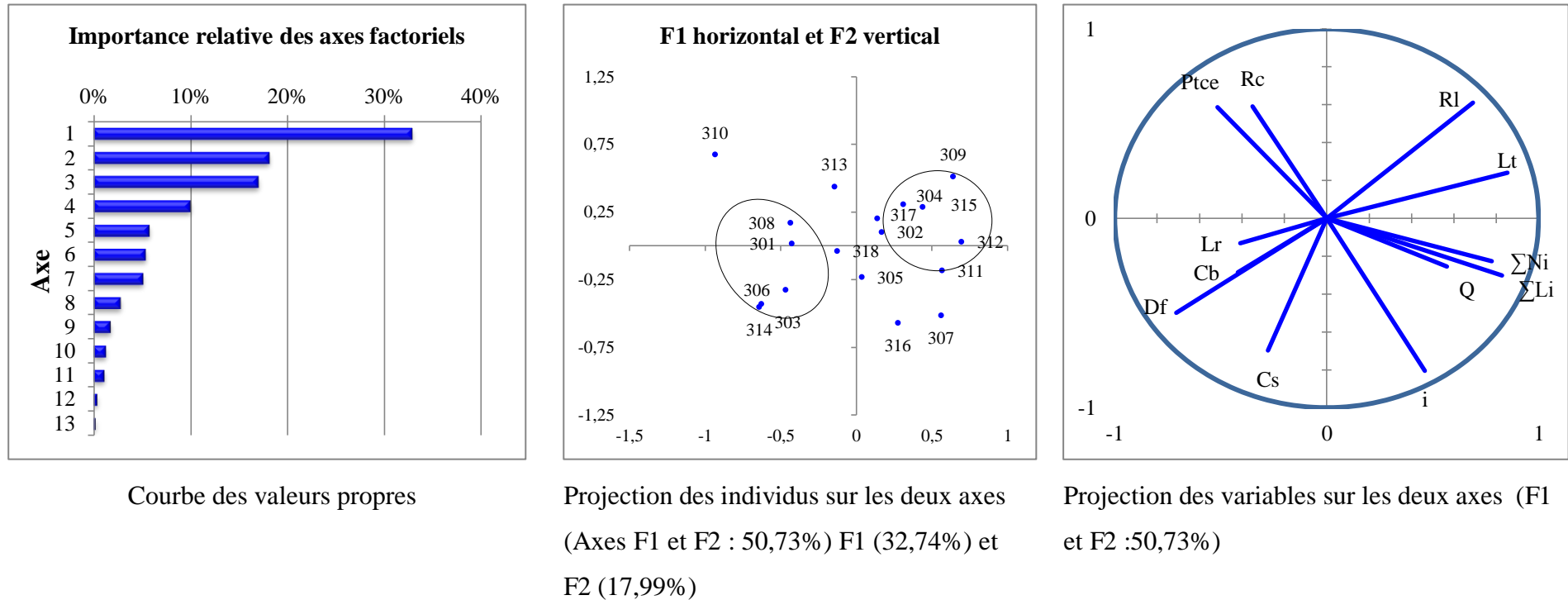
**Descripteurs de réseau****Tableau 34:** Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (3) ; BV 03»

Variables	Q	Lt	$\Sigma Li$	$\Sigma Ni$	Rc	Rl	Lr	i	Cs	Df	Ptce	Cb
<b>Q</b>	1,00											
<b>Lt</b>	0,34	1,00										
<b><math>\Sigma Li</math></b>	0,34	0,62	1,00									
<b><math>\Sigma Ni</math></b>	0,17	0,60	<b>0,96</b>	1,00								
<b>Rc</b>	-0,31	-0,06	-0,40	-0,29	1,00							
<b>Rl</b>	0,30	<b>0,79</b>	0,26	0,25	0,14	1,00						
<b>Lr</b>	-0,07	-0,18	-0,45	-0,52	0,12	-0,21	1,00					
<b>i</b>	0,57	0,28	0,56	0,46	-0,64	-0,15	0,07	1,00				
<b>Cs</b>	-0,18	-0,46	0,10	0,12	-0,26	-0,61	-0,02	0,29	1,00			
<b>Df</b>	-0,31	<b>-0,71</b>	-0,30	-0,27	0,14	<b>-0,92</b>	0,18	0,06	0,54	1,00		
<b>Ptce</b>	<b>-0,79</b>	-0,28	-0,42	-0,35	0,37	-0,14	-0,03	-0,71	-0,19	0,15	1,00	
<b>Cb</b>	-0,10	-0,31	-0,35	-0,40	-0,13	-0,36	0,17	0,15	0,21	0,32	-0,02	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives



La représentation des descripteurs de réseau et du bassin versant 03 sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 160**



**Figure 160:** Représentation des descripteurs de réseau et du bassin versant 03 sur les deux plans factoriels

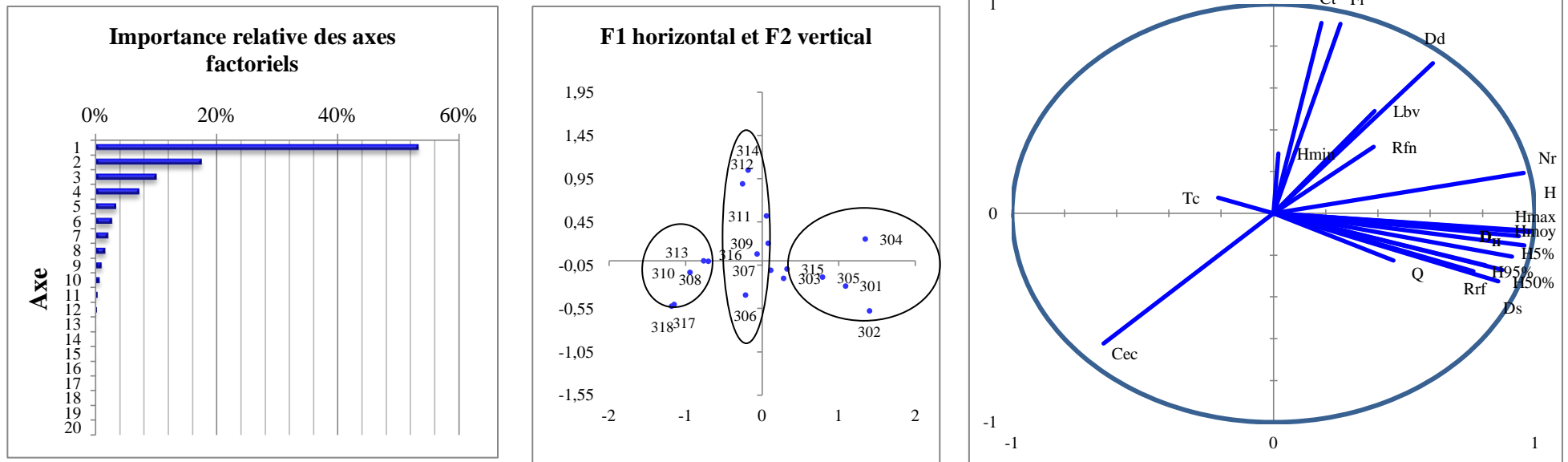
## Descripteurs de volume

Tableau 35: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (3) ; BV 03»

Variables	Q	T <sub>c</sub>	C <sub>t</sub>	R <sub>rf</sub>	D <sub>s</sub>	H	D <sub>d</sub>	R <sub>fn</sub>	C <sub>ec</sub>	F <sub>i</sub>	L <sub>bv</sub>	H <sub>5%</sub>	H <sub>50%</sub>	H <sub>95%</sub>	D <sub>H</sub>	H <sub>min</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>moy</sub>	N <sub>r</sub>	
Q	1,00																			
T <sub>c</sub>	0,26	1,00																		
C <sub>t</sub>	-0,23	-0,17	1,00																	
R <sub>rf</sub>	0,23	-0,47	-0,04	1,00																
D <sub>s</sub>	0,36	-0,13	-0,11	<b>0,87</b>	1,00															
H	0,48	-0,16	0,09	<b>0,77</b>	<b>0,86</b>	1,00														
D <sub>d</sub>	0,10	-0,05	0,69	0,37	0,38	0,52	1,00													
R <sub>fn</sub>	0,36	-0,01	0,36	0,32	0,24	0,31	0,36	1,00												
C <sub>ec</sub>	-0,08	0,14	-0,61	-0,42	-0,47	-0,56	<b>-0,96</b>	-0,25	1,00											
F <sub>i</sub>	-0,21	-0,14	<b>0,94</b>	0,05	0,00	0,16	<b>0,79</b>	0,28	<b>-0,74</b>	1,00										
L <sub>bv</sub>	0,51	0,37	0,48	-0,10	0,10	0,39	0,44	0,63	-0,35	0,40	1,00									
H <sub>5%</sub>	0,37	-0,27	0,08	<b>0,79</b>	<b>0,87</b>	<b>0,95</b>	0,45	0,25	-0,52	0,13	0,28	1,00								
H <sub>50%</sub>	0,46	-0,25	0,01	<b>0,73</b>	<b>0,76</b>	<b>0,91</b>	0,38	0,23	-0,43	0,08	0,26	<b>0,94</b>	1,00							
H <sub>95%</sub>	0,50	-0,10	-0,09	0,58	0,65	<b>0,78</b>	0,22	0,22	-0,25	-0,03	0,24	<b>0,77</b>	<b>0,90</b>	1,00						
D <sub>H</sub>	0,31	-0,30	0,12	<b>0,78</b>	<b>0,86</b>	<b>0,93</b>	0,47	0,24	-0,56	0,16	0,27	<b>0,99</b>	<b>0,88</b>	0,65	1,00					
H <sub>min</sub>	-0,04	0,31	0,10	-0,18	-0,02	0,02	0,31	-0,21	-0,30	0,17	0,07	-0,08	-0,06	0,07	-0,12	1,00				
H <sub>max</sub>	0,48	-0,16	0,09	<b>0,77</b>	<b>0,86</b>	<b>0,99</b>	0,52	0,31	-0,56	0,16	0,39	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,78</b>	<b>0,93</b>	0,03	1,00			
H <sub>moy</sub>	0,48	-0,16	0,09	<b>0,77</b>	<b>0,86</b>	<b>0,99</b>	0,53	0,30	-0,57	0,16	0,39	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,78</b>	<b>0,93</b>	0,04	<b>0,99</b>	1,00		
N <sub>r</sub>	0,41	-0,15	0,32	<b>0,73</b>	<b>0,76</b>	<b>0,94</b>	<b>0,75</b>	0,43	<b>-0,73</b>	0,39	0,47	<b>0,87</b>	<b>0,84</b>	0,66	<b>0,86</b>	0,10	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	1,00	

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 03 sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 161**



Courbe des valeurs propres

Projection des individus sur les deux axes (Axes F1 et F2 : 70,64%)  
F1 (53,19%) et F2 (17,45%)

Projection des variables sur les deux axes (F1 et F2 : 70,64%)

**Figure 161:** Représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 03 sur les deux plans factoriels

### VIII.5.3 Bassin versant de la Seybouse codé 14

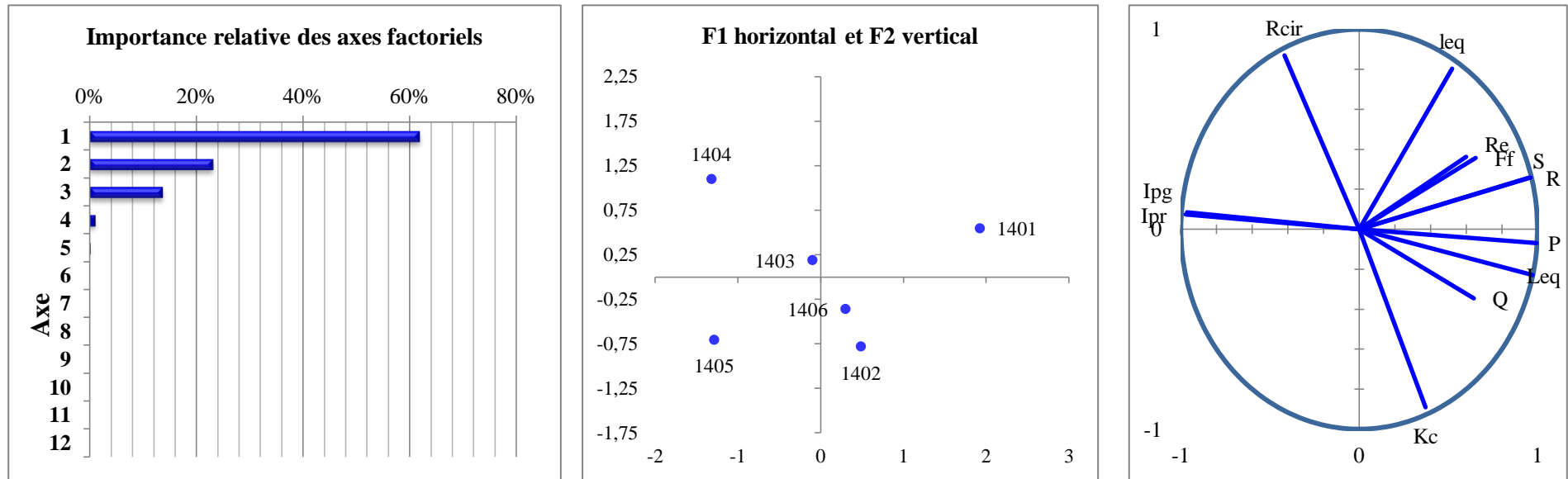
#### Descripteurs de forme

**Tableau 36:** Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (3) ; BV 14»

Variables	Q	S	P	K <sub>c</sub>	L <sub>eq</sub>	l <sub>eq</sub>	R <sub>cir</sub>	F <sub>f</sub>	R <sub>e</sub>	R	I <sub>pg</sub>	I <sub>pr</sub>
<b>Q</b>	1,00											
<b>S</b>	0,58	1,00										
<b>P</b>	<b>0,71</b>	<b>0,94</b>	1,00									
<b>K<sub>c</sub></b>	0,39	0,11	0,41	1,00								
<b>L<sub>eq</sub></b>	<b>0,72</b>	<b>0,88</b>	<b>0,99</b>	0,56	1,00							
<b>l<sub>eq</sub></b>	0,25	<b>0,73</b>	0,48	-0,60	0,33	1,00						
<b>R<sub>cir</sub></b>	-0,40	-0,16	-0,46	-1,00	-0,60	0,55	1,00					
<b>F<sub>f</sub></b>	-0,11	0,68	0,58	0,10	0,54	0,44	-0,13	1,00				
<b>R<sub>e</sub></b>	-0,19	0,62	0,52	0,09	0,48	0,40	-0,12	<b>0,99</b>	1,00			
<b>R</b>	0,62	<b>0,99</b>	<b>0,94</b>	0,08	<b>0,87</b>	<b>0,75</b>	-0,14	0,61	0,55	1,00		
<b>I<sub>pg</sub></b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,91</b>	<b>-0,97</b>	-0,38	<b>-0,96</b>	-0,48	0,43	-0,46	-0,41	<b>-0,93</b>	1,00	
<b>I<sub>pr</sub></b>	-0,62	<b>-0,90</b>	<b>-0,96</b>	-0,42	<b>-0,96</b>	-0,44	0,47	-0,59	-0,55	<b>-0,90</b>	<b>0,98</b>	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 14 sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 162**



Courbe des valeurs propres

Projection des individus sur les deux axes (Axes F1 et F2 : 85,00%) F1 (61,87%) et F2 (23,13%)

Projection des variables sur les deux axes (F1 et F2 85,00%)

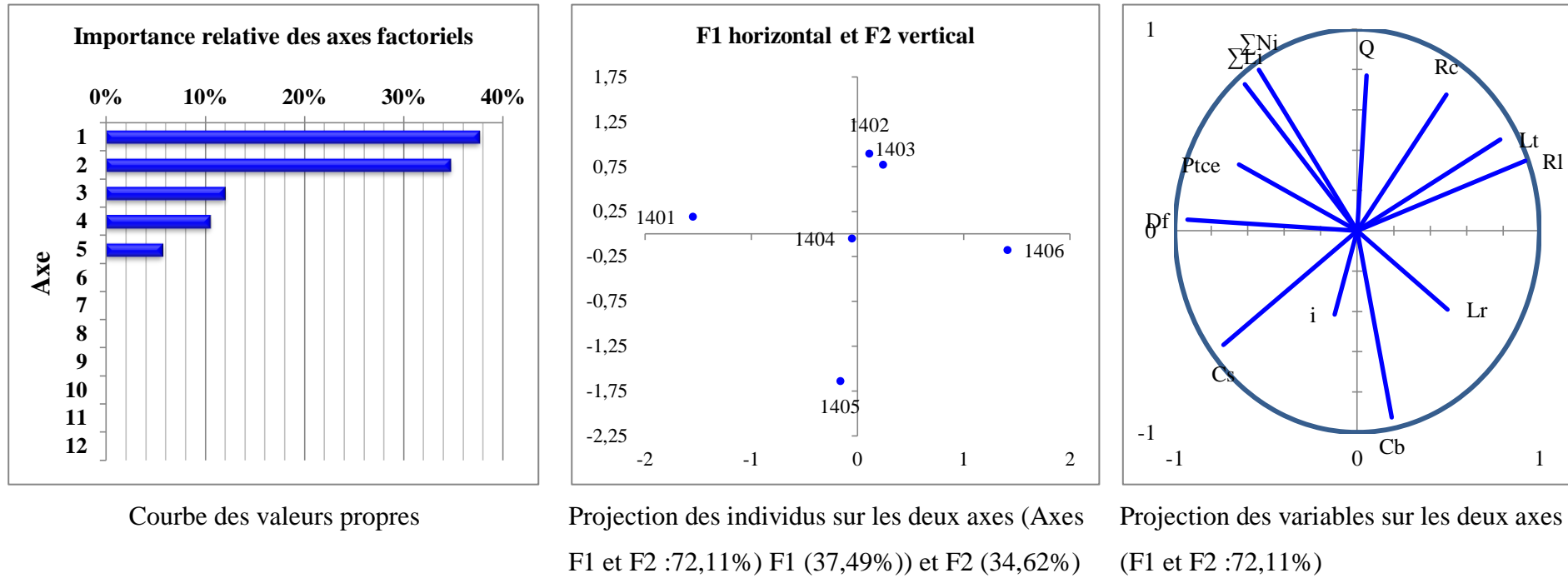
**Figure 162:** Représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 14 sur les deux plans factoriels

**Descripteurs de réseau****Tableau 37:** Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (3) ; BV 14»

Variables	Q	Lt	$\Sigma Li$	$\Sigma Ni$	Rc	Rl	Lr	i	Cs	Df	Ptce	Cb
<b>Q</b>	1,00											
<b>Lt</b>	0,45	1,00										
<b><math>\Sigma Li</math></b>	<b>0,70</b>	-0,16	1,00									
<b><math>\Sigma Ni</math></b>	0,47	-0,05	<b>0,95</b>	1,00								
<b>Rc</b>	0,37	0,48	0,24	0,33	1,00							
<b>Rl</b>	0,34	<b>0,83</b>	-0,28	-0,22	<b>0,75</b>	1,00						
<b>Lr</b>	-0,06	0,11	-0,38	-0,56	0,15	0,44	1,00					
<b>i</b>	0,02	0,04	-0,12	-0,25	<b>-0,72</b>	-0,30	0,24	1,00				
<b>Cs</b>	-0,41	<b>-0,88</b>	0,15	-0,03	-0,64	<b>-0,81</b>	0,14	0,37	1,00			
<b>Df</b>	-0,09	<b>-0,77</b>	<b>0,70</b>	0,61	-0,26	<b>-0,79</b>	-0,29	0,02	<b>0,76</b>	1,00		
<b>Ptce</b>	0,42	-0,39	0,49	0,44	-0,24	-0,52	-0,66	-0,16	0,15	0,42	1,00	
<b>Cb</b>	<b>-0,86</b>	-0,38	<b>-0,85</b>	<b>-0,89</b>	-0,45	-0,14	0,38	0,11	0,35	-0,25	-0,28	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de réseau et du bassin versant 14 sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 163**



**Figure 163:** Représentation des descripteurs de réseau et du bassin versant 14 sur les deux plans factoriels



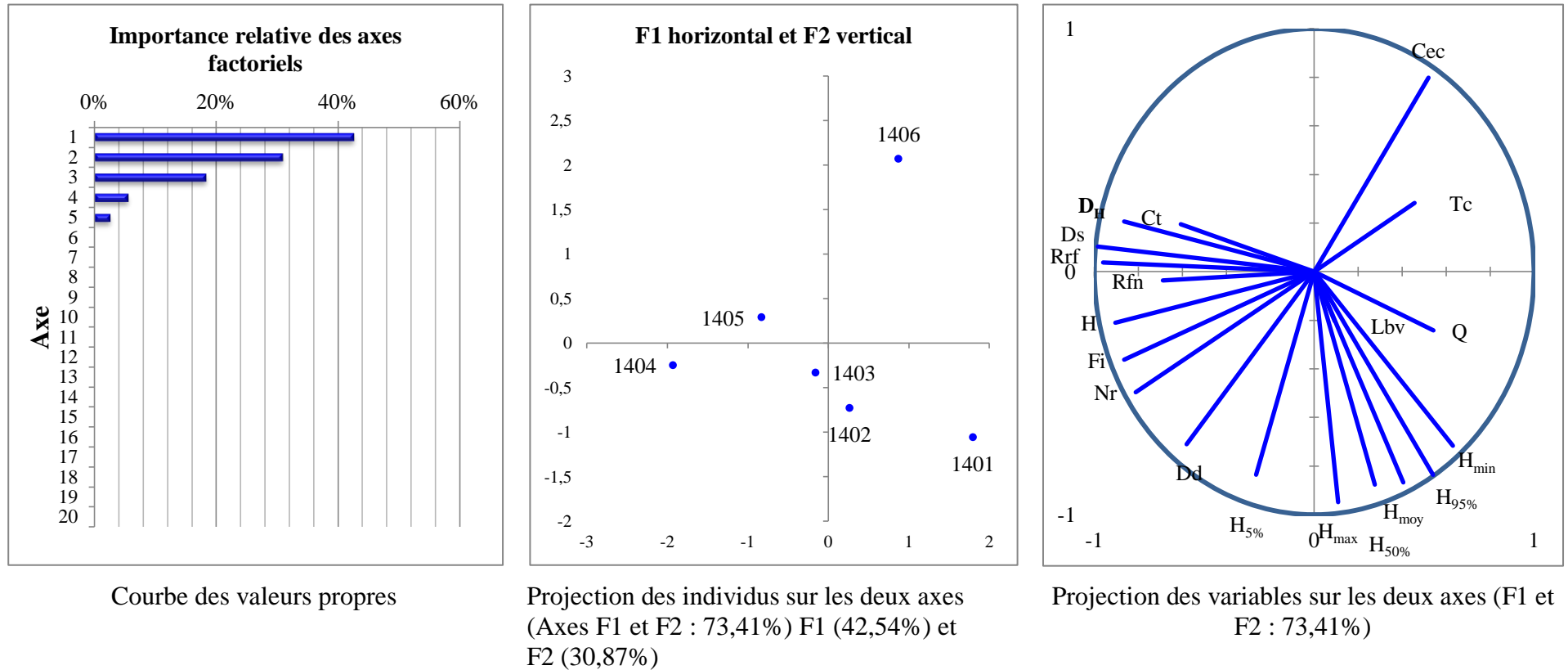
## Descripteurs de volume

Tableau 38: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (3) ; BV 14»

Variables	Q	T <sub>c</sub>	C <sub>t</sub>	R <sub>rf</sub>	D <sub>s</sub>	H	D <sub>d</sub>	R <sub>fn</sub>	C <sub>ec</sub>	F <sub>i</sub>	L <sub>bv</sub>	H <sub>5%</sub>	H <sub>50%</sub>	H <sub>95%</sub>	D <sub>H</sub>	H <sub>min</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>moy</sub>	N <sub>r</sub>
Q	1,00																		
T <sub>c</sub>	<b>0,80</b>	1,00																	
C <sub>t</sub>	0,00	0,41	1,00																
R <sub>rf</sub>	<b>-0,74</b>	-0,61	0,43	1,00															
D <sub>s</sub>	<b>-0,73</b>	-0,53	0,53	<b>0,98</b>	1,00														
H	-0,32	-0,49	0,45	<b>0,91</b>	<b>0,87</b>	1,00													
D <sub>d</sub>	0,03	-0,15	0,52	0,45	0,46	0,64	1,00												
R <sub>fn</sub>	0,16	0,19	<b>0,80</b>	0,49	0,57	0,63	0,61	1,00											
C <sub>ec</sub>	-0,05	0,22	-0,39	-0,40	-0,39	-0,60	<b>-0,99</b>	-0,55	1,00										
F <sub>i</sub>	-0,33	-0,28	0,69	<b>0,75</b>	<b>0,79</b>	<b>0,79</b>	<b>0,89</b>	<b>0,70</b>	<b>-0,83</b>	1,00									
L <sub>bv</sub>	<b>0,83</b>	0,66	0,41	-0,31	-0,25	-0,01	0,32	0,65	-0,32	0,10	1,00								
H <sub>5%</sub>	0,01	-0,63	-0,31	0,28	0,20	0,48	0,58	0,14	-0,68	0,37	0,07	1,00							
H <sub>50%</sub>	0,34	-0,29	-0,54	-0,29	-0,36	-0,07	0,35	-0,15	-0,49	-0,02	0,22	<b>0,83</b>	1,00						
H <sub>95%</sub>	0,55	0,06	-0,45	-0,58	-0,63	-0,32	0,30	-0,28	-0,40	-0,15	0,31	0,55	<b>0,89</b>	1,00					
D <sub>H</sub>	<b>-0,73</b>	-0,65	0,24	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	<b>0,81</b>	0,18	0,45	-0,15	0,52	-0,29	0,27	-0,27	-0,65	1,00				
H <sub>min</sub>	0,31	-0,01	-0,56	-0,60	-0,67	-0,48	0,14	-0,57	-0,23	-0,25	-0,03	0,37	<b>0,75</b>	<b>0,92</b>	<b>-0,72</b>	1,00			
H <sub>max</sub>	0,14	-0,34	-0,33	-0,07	-0,17	0,13	0,58	-0,22	-0,66	0,24	-0,04	<b>0,74</b>	<b>0,80</b>	<b>0,82</b>	-0,28	<b>0,81</b>	1,00		
H <sub>moy</sub>	0,24	-0,17	-0,47	-0,37	-0,46	-0,20	0,36	-0,43	-0,46	-0,02	-0,03	0,57	<b>0,81</b>	<b>0,92</b>	-0,54	<b>0,96</b>	<b>0,95</b>	1,00	
N <sub>r</sub>	-0,15	-0,30	0,59	<b>0,74</b>	<b>0,72</b>	<b>0,88</b>	<b>0,92</b>	0,69	<b>-0,88</b>	<b>0,94</b>	0,19	0,53	0,12	-0,02	0,50	-0,18	0,38	0,09	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 14 sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 164**



**Figure 164:** Représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 14 sur les deux plans factoriels

VIII.5.4 Bassin versant de Kebir Rhumel codé 10

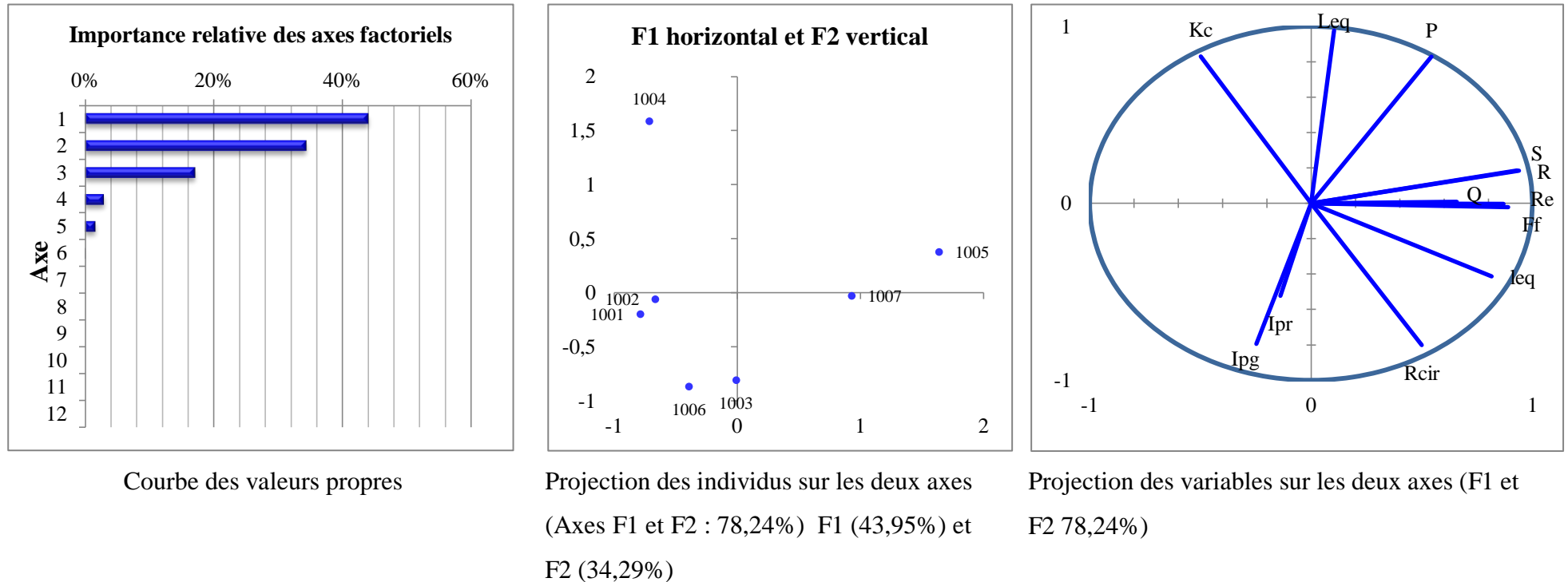
## Descripteurs de forme

Tableau 39: Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (3) ; BV 10»

Variables	Q	S	P	Kc	Leq	leq	Rcir	Ff	Re	R	Ipg	Ipr
Q	1,00											
S	0,40	1,00										
P	0,31	0,69	1,00									
Kc	-0,14	-0,38	0,41	1,00								
Leq	0,18	0,25	<b>0,87</b>	<b>0,80</b>	1,00							
leq	0,23	<b>0,79</b>	0,12	<b>-0,85</b>	-0,38	1,00						
Rcir	0,09	0,39	-0,39	<b>-0,99</b>	<b>-0,79</b>	<b>0,87</b>	1,00					
Ff	<b>0,94</b>	0,66	0,44	-0,32	0,15	0,51	0,29	1,00				
Re	<b>0,92</b>	0,69	0,43	-0,35	0,13	0,55	0,32	<b>0,99</b>	1,00			
R	0,41	1,00	0,69	-0,38	0,25	<b>0,79</b>	0,39	0,68	<b>0,70</b>	1,00		
Ipg	0,08	-0,46	<b>-0,78</b>	-0,43	<b>-0,72</b>	-0,02	0,37	-0,03	-0,03	-0,45	1,00	
Ipr	0,36	-0,34	-0,51	-0,22	-0,39	-0,16	0,13	0,14	0,13	-0,35	0,60	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 10 sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 165**



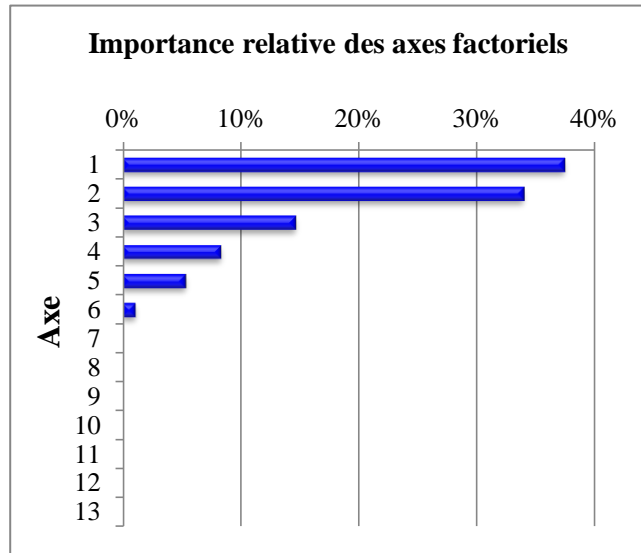
**Figure 165:** Représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 10 sur les deux plans factoriels

**Descripteurs de réseau****Tableau 40:** Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (3) ; BV 10»

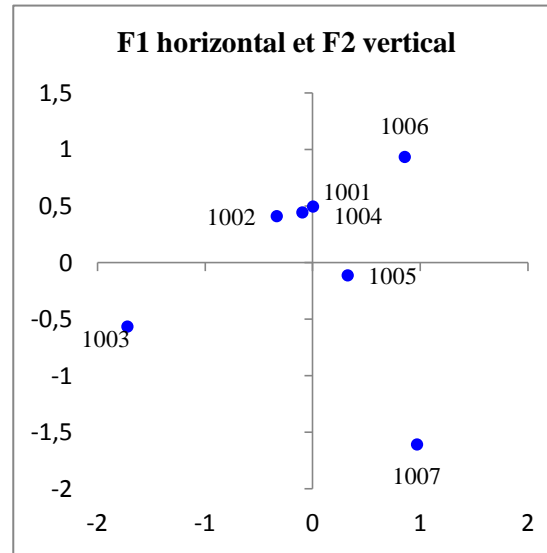
Variables	Q	Lt	$\Sigma Li$	$\Sigma Ni$	Rc	Rl	Lr	i	Cs	Df	Ptce	Cb
<b>Q</b>	1,00											
<b>Lt</b>	0,44	1,00										
<b><math>\Sigma Li</math></b>	<b>0,63</b>	0,13	1,00									
<b><math>\Sigma Ni</math></b>	<b>0,79</b>	0,42	<b>0,93</b>	1,00								
<b>Rc</b>	-0,26	0,56	-0,26	-0,10	1,00							
<b>Rl</b>	-0,25	0,66	-0,16	0,04	0,65	1,00						
<b>Lr</b>	-0,53	<b>-0,87</b>	-0,29	-0,58	-0,25	-0,67	1,00					
<b>i</b>	0,65	0,67	0,19	0,50	0,43	0,25	-0,63	1,00				
<b>Cs</b>	-0,21	-0,57	-0,61	-0,60	-0,31	-0,47	0,51	-0,05	1,00			
<b>Df</b>	-0,02	-0,57	-0,13	-0,28	-0,12	<b>-0,81</b>	<b>0,79</b>	-0,07	0,54	1,00		
<b>Ptce</b>	-0,48	0,07	-0,22	-0,13	0,38	<b>0,70</b>	-0,27	0,01	-0,12	-0,54	1,00	
<b>Cb</b>	<b>0,85</b>	0,35	0,18	0,36	-0,37	-0,33	-0,41	0,52	0,15	0,05	-0,54	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

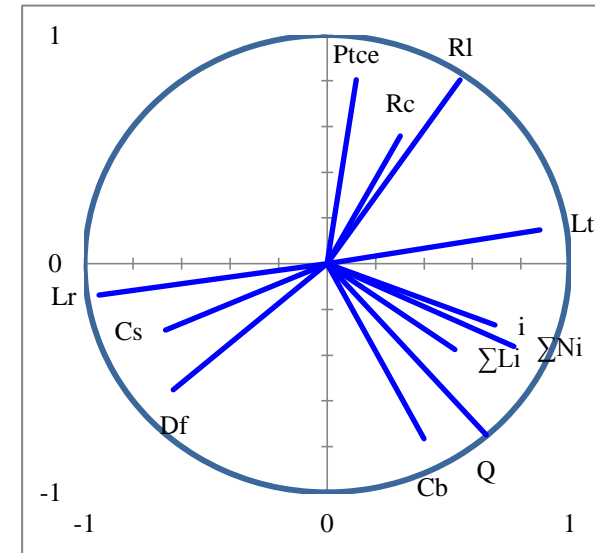
La représentation des descripteurs de réseau du bassin versant 10 sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 166**



Courbe des valeurs propres



Projection des individus sur les deux axes (Axes F1 et F2 :71,17%) F1 (37,33%) et F2 (33,84%)



Projection des variables sur les deux axes (F1 et F2 :71,17%)

**Figure 166:** Représentation des descripteurs de réseau du bassin versant 10 sur les deux plans factoriels

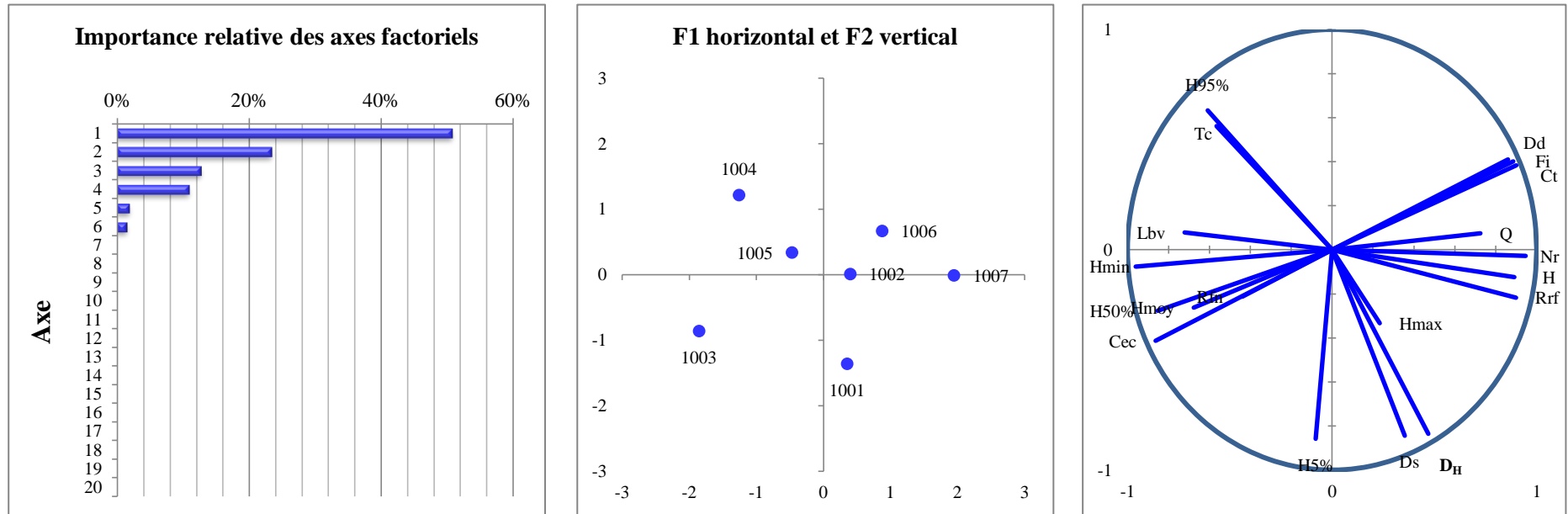
## Descripteurs de volume

Tableau 41: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (3) ; BV 10»

Variables	Q	T <sub>c</sub>	C <sub>t</sub>	R <sub>rf</sub>	D <sub>s</sub>	H	D <sub>d</sub>	R <sub>fn</sub>	C <sub>ec</sub>	F <sub>i</sub>	L <sub>bv</sub>	H <sub>5%</sub>	H <sub>50%</sub>	H <sub>95%</sub>	D <sub>H</sub>	H <sub>min</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>moy</sub>	N <sub>r</sub>	
Q	1,00																			
T <sub>c</sub>	-0,10	1,00																		
C <sub>t</sub>	0,52	-0,30	1,00																	
R <sub>rf</sub>	0,43	<b>-0,79</b>	<b>0,76</b>	1,00																
D <sub>s</sub>	0,20	-0,56	-0,01	0,43	1,00															
H	0,59	<b>-0,71</b>	<b>0,73</b>	<b>0,95</b>	0,26	1,00														
D <sub>d</sub>	0,57	-0,29	<b>0,96</b>	<b>0,77</b>	-0,05	<b>0,78</b>	1,00													
R <sub>fn</sub>	<b>-0,90</b>	-0,11	-0,27	-0,15	0,13	-0,41	-0,37	1,00												
C <sub>ec</sub>	-0,54	0,30	<b>-0,94</b>	<b>-0,77</b>	0,11	<b>-0,80</b>	<b>-0,99</b>	0,37	1,00											
F <sub>i</sub>	<b>0,68</b>	-0,23	<b>0,97</b>	<b>0,74</b>	0,02	<b>0,75</b>	<b>0,97</b>	-0,46	<b>-0,95</b>	1,00										
L <sub>bv</sub>	<b>-0,97</b>	0,16	-0,47	-0,43	-0,41	-0,52	-0,49	<b>0,79</b>	0,44	-0,63	1,00									
H <sub>5%</sub>	-0,13	-0,46	-0,44	0,21	0,52	0,22	-0,34	0,11	0,31	-0,38	0,10	1,00								
H <sub>50%</sub>	<b>-0,69</b>	0,27	<b>-0,82</b>	-0,59	-0,21	-0,55	<b>-0,79</b>	0,41	<b>0,74</b>	<b>-0,84</b>	<b>0,72</b>	0,51	1,00							
H <sub>95%</sub>	-0,34	0,62	-0,26	-0,60	<b>-0,91</b>	-0,43	-0,26	-0,04	0,21	-0,29	0,51	-0,31	0,52	1,00						
D <sub>H</sub>	0,23	-0,68	0,05	0,57	<b>0,94</b>	0,43	0,09	0,07	-0,06	0,10	-0,38	0,63	-0,24	<b>-0,94</b>	1,00					
H <sub>min</sub>	-0,56	0,60	<b>-0,86</b>	<b>-0,88</b>	-0,28	<b>-0,83</b>	<b>-0,90</b>	0,27	<b>0,88</b>	<b>-0,86</b>	0,55	0,17	<b>0,87</b>	0,60	-0,43	1,00				
H <sub>max</sub>	0,26	-0,43	0,08	0,44	0,06	0,61	0,12	-0,35	-0,18	0,13	-0,15	0,63	0,25	0,08	0,16	-0,07	1,00			
H <sub>moy</sub>	-0,32	0,25	-0,68	-0,48	-0,20	-0,34	-0,69	0,02	0,64	-0,65	0,38	0,52	<b>0,88</b>	0,56	-0,27	<b>0,81</b>	0,53	1,00		
N <sub>r</sub>	<b>0,64</b>	-0,64	<b>0,82</b>	<b>0,95</b>	0,24	<b>0,99</b>	<b>0,86</b>	-0,43	-0,87	<b>0,85</b>	-0,58	0,09	-0,66	-0,45	0,40	<b>-0,90</b>	0,50	-0,47	1,00	



La représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 10 sur les deux plans factoriels est montrée à la figure 167



Courbe des valeurs propres

Projection des individus sur les deux axes (Axes F1 et F2 :73,69%) F1 (50,49%) et F2 (23,20%)

Projection des variables sur les deux axes (F1 et F2 :73,69%)

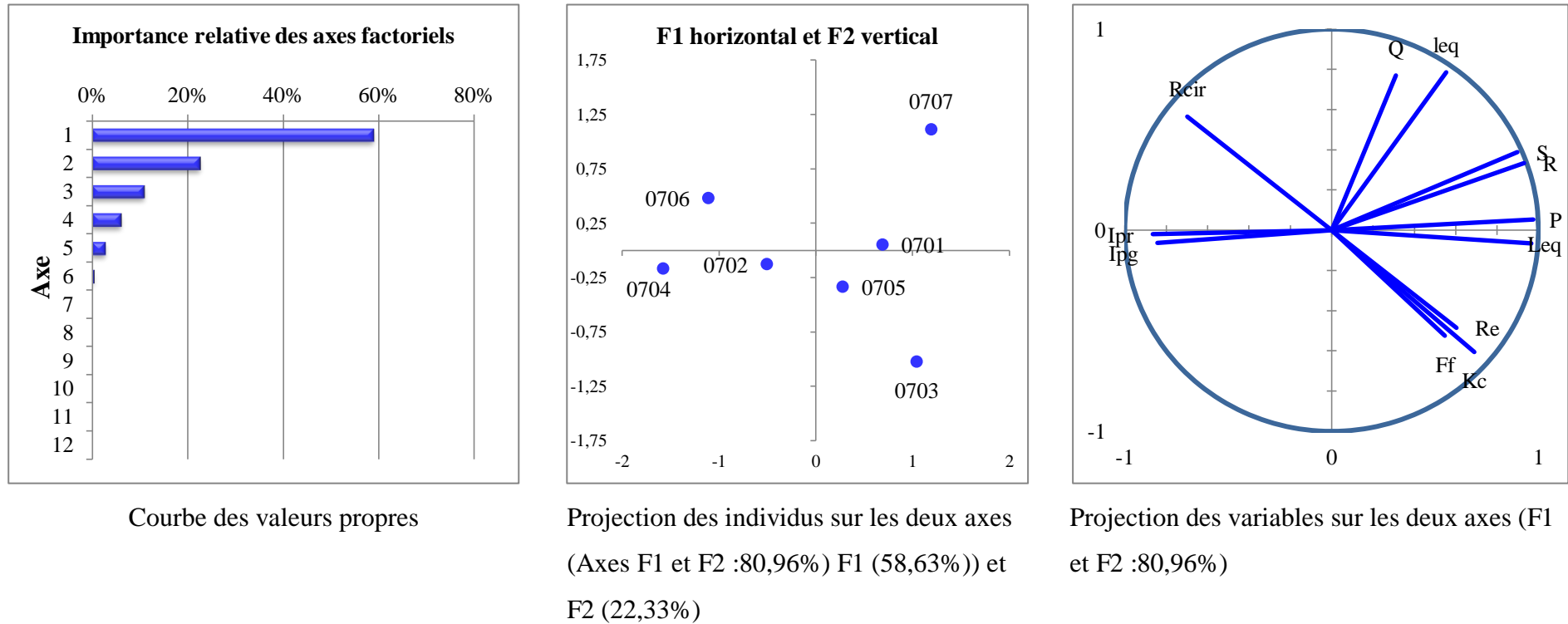
**Figure 167:** Représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 10 sur les deux plans factoriels.

**VIII.5.5 Bassin versant des Hauts Plateaux Constantinois codé 07****Descripteurs de forme****Tableau 42:** Matrice de corrélation des descripteurs de forme « échelle (3) ; BV 07»

Variables	Q	S	P	Kc	Leq	leq	Rcir	Ff	Re	R	Ipg	Ipr
<b>Q</b>	1,00											
<b>S</b>	0,55	1,00										
<b>P</b>	0,34	<b>0,93</b>	1,00									
<b>Kc</b>	-0,21	0,42	<b>0,71</b>	1,00								
<b>Leq</b>	0,25	<b>0,88</b>	<b>0,99</b>	<b>0,80</b>	1,00							
<b>leq</b>	<b>0,70</b>	<b>0,81</b>	0,56	-0,18	0,45	1,00						
<b>Rcir</b>	0,17	-0,44	<b>-0,73</b>	-1,00	<b>-0,81</b>	0,16	1,00					
<b>Ff</b>	-0,13	0,26	0,41	0,48	0,44	0,02	-0,43	1,00				
<b>Re</b>	-0,09	0,32	0,46	0,50	0,49	0,07	-0,46	<b>0,99</b>	1,00			
<b>R</b>	0,52	1,00	<b>0,95</b>	0,47	<b>0,91</b>	<b>0,78</b>	-0,49	0,30	0,36	1,00		
<b>Ipg</b>	-0,18	<b>-0,70</b>	<b>-0,74</b>	-0,42	<b>-0,71</b>	-0,54	0,43	-0,45	-0,52	<b>-0,75</b>	1,00	
<b>Ipr</b>	-0,20	-0,69	<b>-0,77</b>	-0,50	<b>-0,75</b>	-0,49	0,51	-0,45	-0,52	<b>-0,75</b>	<b>0,99</b>	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 07 sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 168**



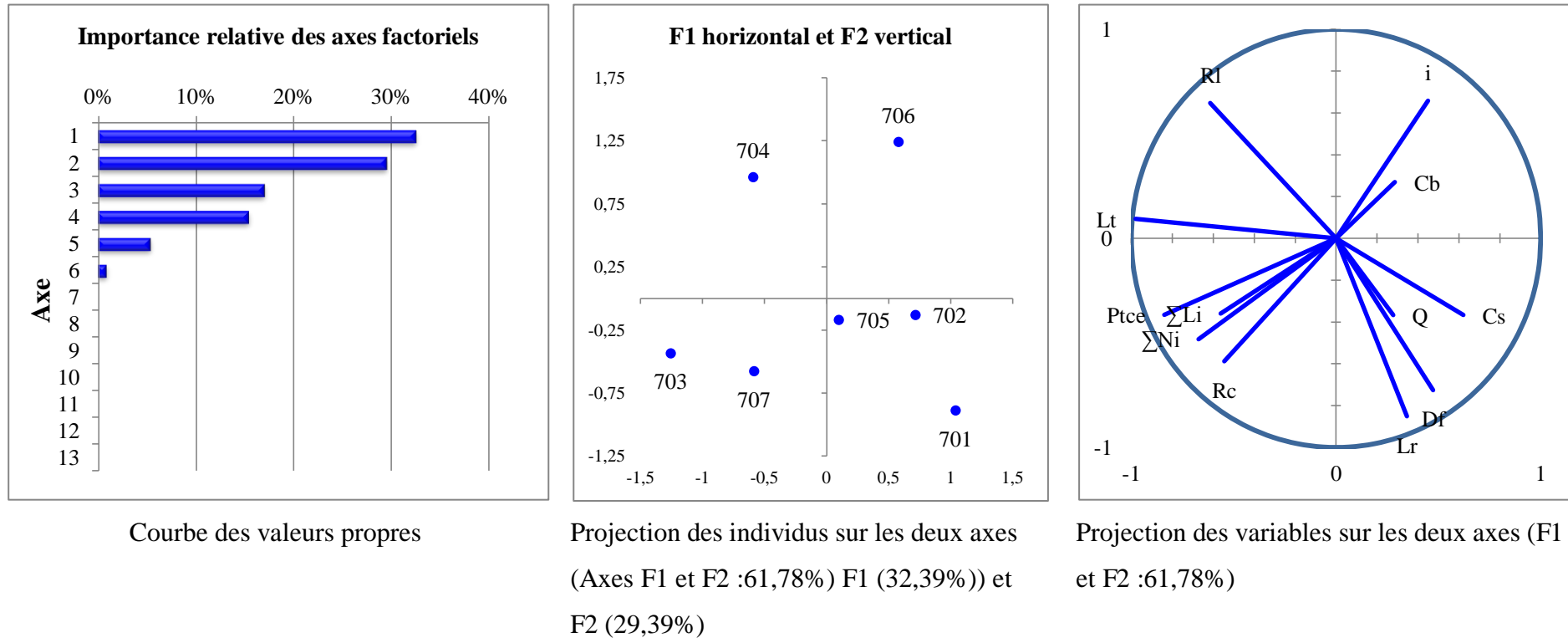
**Figure 168:** Représentation des descripteurs de forme et du bassin versant 07 sur les deux plans factoriels.

**Descripteurs de réseau****Tableau 43:** Matrice de corrélation des descripteurs de réseau « échelle (3) ; BV 07 »

Variables	Q	Lt	$\Sigma Li$	$\Sigma Ni$	Rc	Rl	Lr	i	Cs	Df	Ptce	Cb
<b>Q</b>	1,00											
<b>Lt</b>	-0,27	1,00										
<b><math>\Sigma Li</math></b>	0,35	0,50	1,00									
<b><math>\Sigma Ni</math></b>	-0,02	0,58	<b>0,89</b>	1,00								
<b>Rc</b>	-0,20	0,44	0,17	0,45	1,00							
<b>Rl</b>	-0,29	0,62	0,05	-0,02	0,12	1,00						
<b>Lr</b>	0,50	-0,46	0,04	0,06	0,45	-0,59	1,00					
<b>i</b>	-0,15	-0,35	-0,25	-0,36	<b>-0,87</b>	-0,07	-0,62	1,00				
<b>Cs</b>	0,59	<b>-0,72</b>	0,22	0,01	-0,30	-0,55	0,59	0,07	1,00			
<b>Df</b>	0,36	-0,46	-0,05	0,03	0,06	<b>-0,93</b>	0,63	-0,07	0,35	1,00		
<b>Ptce</b>	0,22	<b>0,82</b>	<b>0,72</b>	<b>0,70</b>	0,54	0,30	0,04	-0,64	-0,33	-0,11	1,00	
<b>Cb</b>	0,31	-0,33	-0,33	-0,57	-0,07	0,39	0,23	-0,18	0,29	-0,43	-0,24	1,00

Les chiffres en gras représentent les valeurs des corrélations significatives

La représentation des descripteurs de réseau et du bassin versant 07 sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 169**



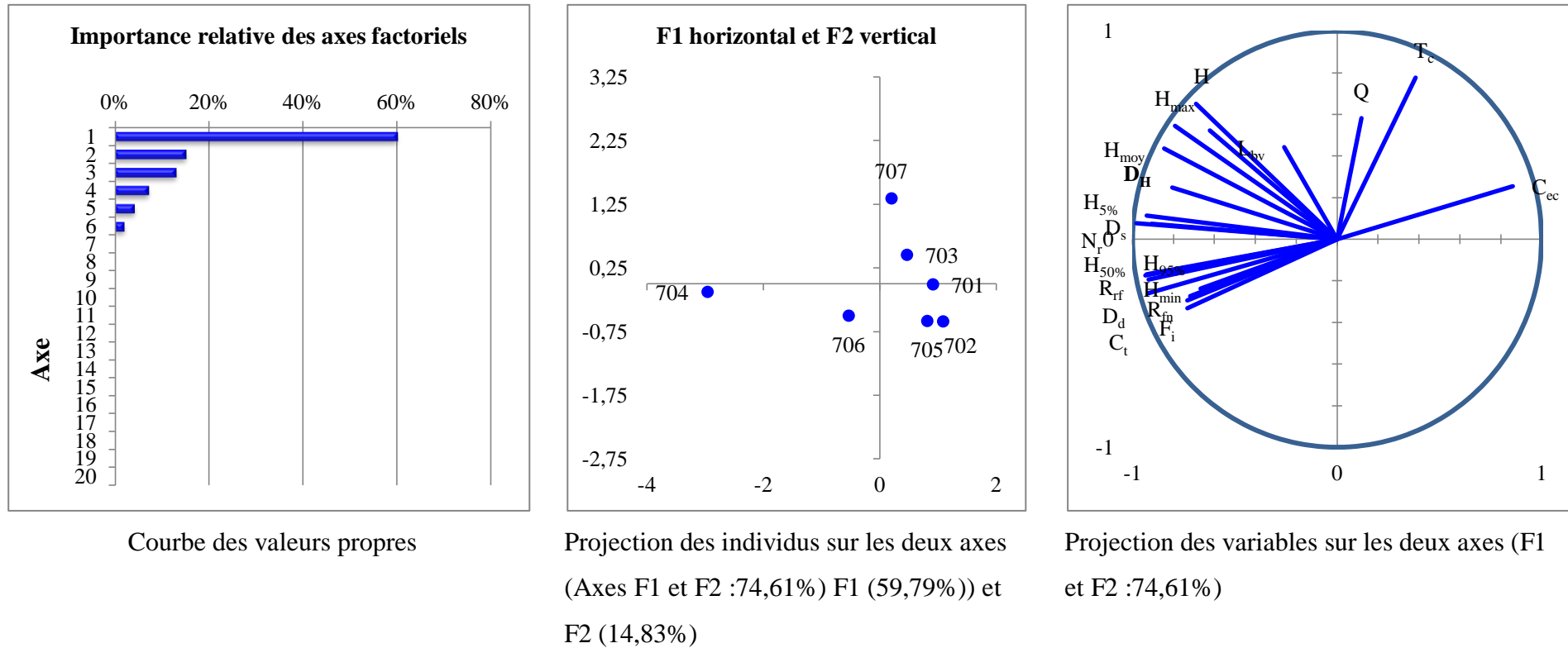
**Figure 169:** Représentation des descripteurs de réseau et du bassin versant 07 sur les deux plans factoriels

## Descripteurs de volume

Tableau 44: Matrice de corrélation des descripteurs de volume « échelle (3) ; BV 07»

Variables	Q	T <sub>c</sub>	C <sub>t</sub>	R <sub>rf</sub>	D <sub>s</sub>	H	D <sub>d</sub>	R <sub>fn</sub>	C <sub>ec</sub>	F <sub>i</sub>	L <sub>bv</sub>	H <sub>5%</sub>	H <sub>50%</sub>	H <sub>95%</sub>	D <sub>H</sub>	H <sub>min</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>moy</sub>	N <sub>r</sub>
Q	1,00																		
T <sub>c</sub>	0,15	1,00																	
C <sub>t</sub>	-0,45	-0,35	1,00																
R <sub>rf</sub>	-0,17	-0,61	<b>0,87</b>	1,00															
D <sub>s</sub>	-0,01	-0,38	<b>0,80</b>	<b>0,87</b>	1,00														
H	0,18	0,27	0,58	0,57	0,62	1,00													
D <sub>d</sub>	-0,39	-0,46	<b>0,93</b>	<b>0,84</b>	<b>0,79</b>	0,44	1,00												
R <sub>fn</sub>	0,02	-0,60	0,56	0,67	0,59	0,21	<b>0,80</b>	1,00											
C <sub>ec</sub>	0,47	0,37	<b>-0,89</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,71</b>	-0,40	<b>-0,98</b>	<b>-0,77</b>	1,00										
F <sub>i</sub>	<b>-0,77</b>	-0,25	<b>0,91</b>	0,65	0,54	0,36	<b>0,87</b>	0,46	<b>-0,90</b>	1,00									
L <sub>bv</sub>	0,48	0,22	0,03	0,02	0,07	0,36	0,23	0,55	-0,26	-0,03	1,00								
H <sub>5%</sub>	-0,01	-0,29	<b>0,86</b>	<b>0,84</b>	<b>0,96</b>	0,68	<b>0,79</b>	0,52	<b>-0,71</b>	0,60	0,09	1,00							
H <sub>50%</sub>	-0,11	-0,55	<b>0,90</b>	<b>0,93</b>	<b>0,84</b>	0,55	<b>0,83</b>	0,62	<b>-0,73</b>	0,67	0,06	<b>0,90</b>	1,00						
H <sub>95%</sub>	0,16	<b>-0,72</b>	0,58	<b>0,78</b>	0,56	0,30	0,66	<b>0,82</b>	-0,56	0,36	0,35	0,58	<b>0,81</b>	1,00					
D <sub>H</sub>	-0,08	-0,06	<b>0,78</b>	0,68	<b>0,91</b>	0,68	0,67	0,29	-0,61	0,57	-0,03	<b>0,95</b>	<b>0,74</b>	0,29	1,00				
H <sub>min</sub>	0,28	-0,64	0,51	0,64	0,53	0,22	0,58	<b>0,73</b>	-0,47	0,27	0,36	0,60	<b>0,79</b>	<b>0,94</b>	0,34	1,00			
H <sub>max</sub>	0,23	0,10	0,66	0,68	<b>0,70</b>	<b>0,97</b>	0,55	0,37	-0,48	0,39	0,42	<b>0,76</b>	0,69	0,49	<b>0,70</b>	0,44	1,00		
H <sub>moy</sub>	0,26	-0,04	0,69	<b>0,74</b>	<b>0,73</b>	<b>0,91</b>	0,61	0,48	-0,52	0,41	0,45	<b>0,81</b>	<b>0,78</b>	0,64	<b>0,70</b>	0,60	<b>0,98</b>	1,00	
N <sub>r</sub>	-0,20	-0,25	<b>0,95</b>	<b>0,89</b>	<b>0,86</b>	<b>0,77</b>	<b>0,91</b>	0,63	<b>-0,86</b>	<b>0,79</b>	0,26	<b>0,90</b>	<b>0,89</b>	0,64	<b>0,80</b>	0,55	<b>0,84</b>	<b>0,86</b>	1,00

La représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 07 sur les deux plans factoriels est montrée à la **figure 170**



**Figure 170:** Représentation des descripteurs de volume et du bassin versant 07 sur les deux plans factoriels

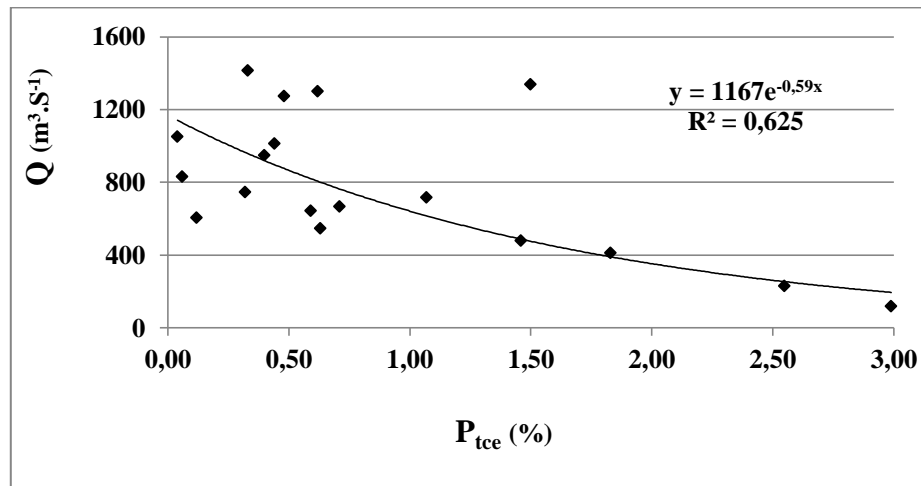


## VIII.6 Interprétation des résultats de l'échelle (3) des 5 bassins versants

### VIII.6.1 Bassin versant 03

L'examen des tableaux n°33, 34 et 35 relatifs aux matrices de corrélation des variables permet de conclure que le débit est faiblement corrélé avec les descripteurs de forme de réseau et de volume à l'exception de la variable (Ptce). D'autre part on remarque des corrélations linéaires positives et négatives, ce qui signifie que les variables varient dans deux sens opposés, certaines étant faibles (0.30 et 0.46), et d'autres très faibles (0.009, 0.01).

La corrélation significative est présentée à travers la **figure 171**



**Figure 171:** Relation exponentielle entre le débit (Q) et la pente du cours d'eau principal (Ptce).

Le pourcentage d'inertie des descripteurs de forme, de réseau et de volume est expliqué par le premier et le second axe F1 et F2. Le résumé des variables par 2 dimensions (F1 et F2) a donné une récupération de 70% d'informations contenues dans le tableau des données des descripteurs de forme, 51%, dans le tableau des données des descripteurs de réseau et 70% dans le tableau des données des descripteurs de volume. Ces résumés synthétisent moyennement les variables.

Les projections des individus et des variables sur les deux plans factoriels F1 et F2, présentent une distribution dispersée des sous bassins d'où une difficulté se pose pour former les groupes, néanmoins deux groupes se sont distingués pour les trois catégories de descripteurs.

**Descripteurs de forme :**

- Le premier groupe formé par les sous bassins (0302, 0307, 0309, 0311, 0317) caractérisés par des valeurs importantes des variables  $S$ ,  $l_{eq}$ ,  $R$ ,  $R_{cir}$ .
- Le second groupe est représenté par les sous bassins (0303, 0304, 0306, 0318) indiqués par des valeurs élevées de  $K_c$  avec un max de 3,37 correspond au sous bassin 0314. Le sous bassin 0310 qui est écarté du groupe possède les valeurs minimales de ( $S=135 \text{ Km}^2$ ,  $P=75 \text{ Km}$  et  $R=6.56 \text{ Km}$ ).
- Le facteur F1 exprime 38% de la variance est faiblement corrélé avec le débit (0,47), il est bien corrélé positivement avec  $S$ ,  $l_{eq}$ ,  $R$ ,  $R_{cir}$ , et négativement avec  $K_c$ .
- Le facteur F2 exprimant 32% de la variance. Il oppose d'une part les variables  $L_{eq}$  et  $P$ , avec des corrélations positives (0.92 et 0.85) ayant la valeur de (81,48 Km) correspondants aux sous bassins (0315 et 0317), et d'autre part les variables  $I_{pg}$  et  $I_{pr}$  avec des corrélations négatives de (-0.61) correspondants à l'individu (0301) possédant des valeurs (30.77m/Km et  $63.88 \text{ (m/Km)}^{1/2}$ ).

**Descripteurs de réseau :**

- Le premier groupe formé par les sous bassins (0302, 0304, 0309, 0311, 0312, 0315, 0317) caractérisés par des valeurs importantes des variables  $L_t$ ,  $i$ ,  $R_i$ ,  $\sum L_i$ ,  $\sum N_i$  indiquant des réseaux de drainage développés qui portent des ordres élevés.
- Le second groupe est représenté par les sous bassins (0301, 0303, 0308) qui ont des valeurs élevées des variable  $R_c$ ,  $P_{ice}$ ,  $L_r$ ,  $D_f$ .
- Le premier facteur exprimant 33% de la variance, il est moyennement corrélé avec le débit (0,57) et fortement corrélé avec  $L_t$  et  $\sum L_i$  (0.85 et 0.82).
- Le facteur F2 exprime 17% de la variance, il oppose d'une part la variable  $R_i$  avec une corrélation positive de (0.61) ayant la valeur de (2,33) qui correspond au sous bassin (0309), et d'autre part la variable  $i$  avec une corrélation négative de (-0.80) qui correspond à l'individu (0316) avec la valeur de (6).

**Descripteurs de volume :**

- Le premier groupe formé par les sous bassins (0301, 0302, 0303, 0304, 0305, 0315) caractérisés par des valeurs élevées des altitudes,  $N_r$ ,  $R_{rf}$ ,  $D_s$  qui indiquent un relief fort. Ils sont faiblement corrélés avec le débit.
- Le second groupe est représenté par les sous bassins (0308, 0310, 0313, 0317) marqués par des valeurs minimales des variables du temps de concentration, c'est un facteur qui accélère l'écoulement.

- Le facteur F1 exprimant 53% de la variance est faiblement corrélé avec le débit (0.45), il est très bien corrélé positivement avec  $H_{5\%}$ ,  $H_{50\%}$ ,  $H_{95\%}$ ,  $D_H$ ,  $H_{\max}$ ,  $H_{\text{moy}}$ ,  $N_r$ ,  $R_{rf}$ ,  $D_s$ ,  $H$ ,  $D_d$  et négativement avec  $C_{ec}$ . Tandis que le facteur F2 exprimant 18% de la variance. Il est très bien corrélé positivement avec  $C_t$ ,  $D_d$ ,  $F_i$ , et négativement avec  $C_{ec}$ .

### VIII.6.2 Bassin versant 14

L'examen des tableaux n°36, 37 et 38 relatifs aux matrices de corrélation des variables permet de conclure que le débit est fortement corrélé avec les descripteurs de forme  $P$ ,  $L_{eq}$ ,  $I_{pg}$ , de réseau  $\sum Li$ ,  $C_b$  et de volume  $T_c$ ,  $R_{rf}$ ,  $L_{bv}$ ,  $D_s$ ,  $D_H$ . On remarque des corrélations linéaires positives et négatives. Les corrélations significatives sont présentées dans les figures de (172 à 182).

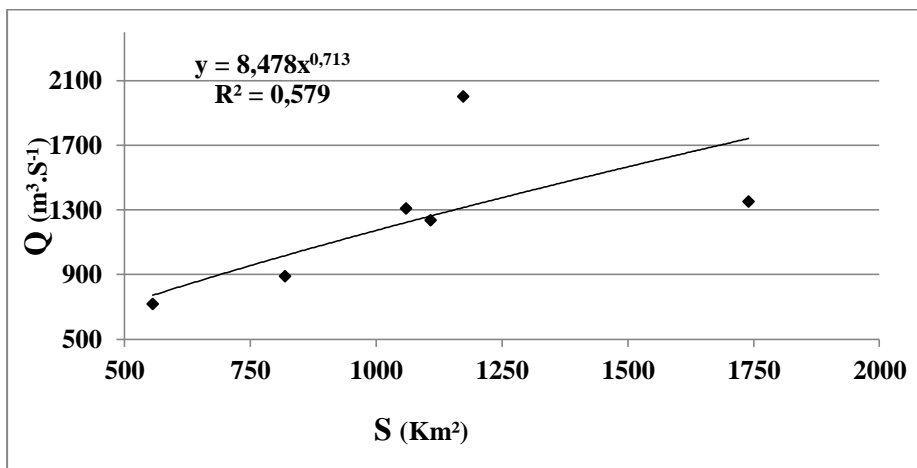


Figure 172: Relation de puissance entre le débit (Q) et la surface (S).

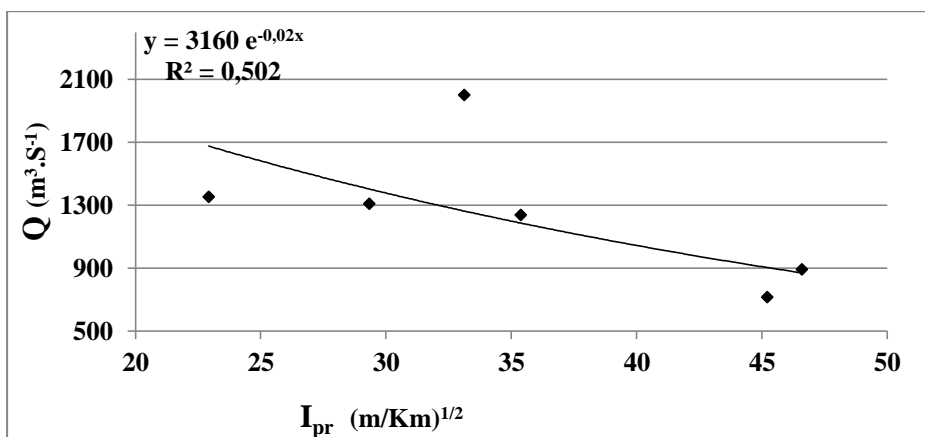


Figure 173: Relation exponentielle entre le débit (Q) et l'indice de pente de Roche (I<sub>pr</sub>).

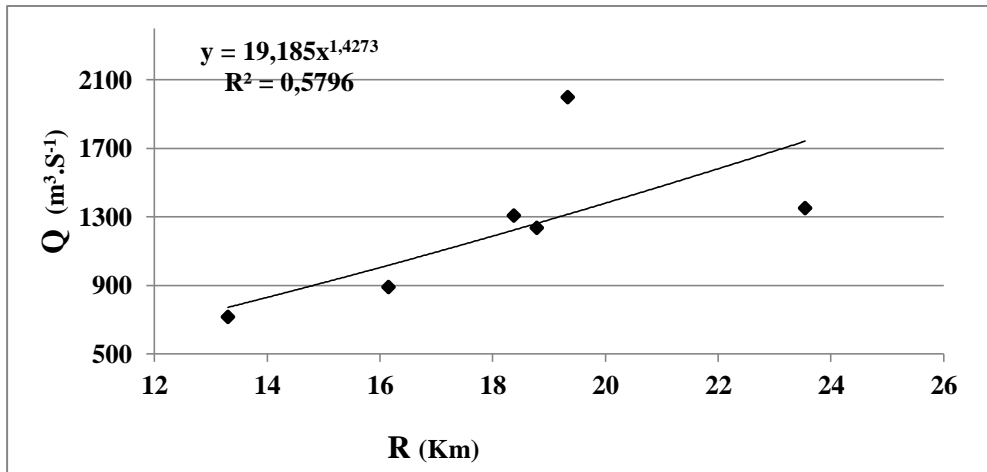


Figure 174: Relation de puissance entre le débit (Q) et le rayon (R).

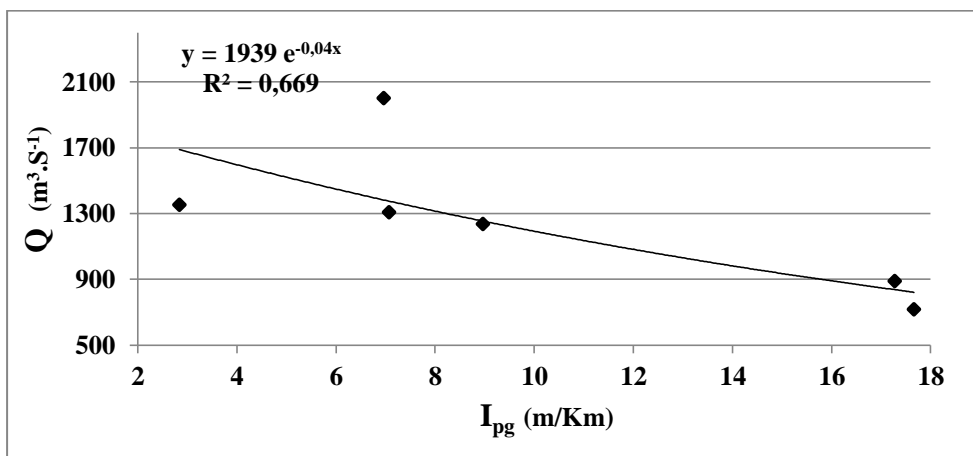


Figure 175: Relation exponentielle entre le débit (Q) et l'indice de pente globale (Ipg).

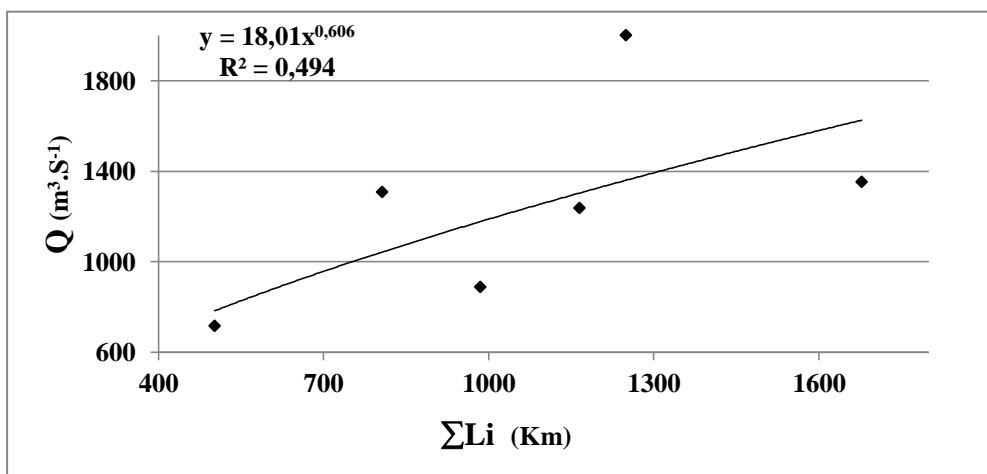


Figure 176: Relation de puissance entre le débit (Q) et la somme des longueurs des cours d'eau (ΣLi).

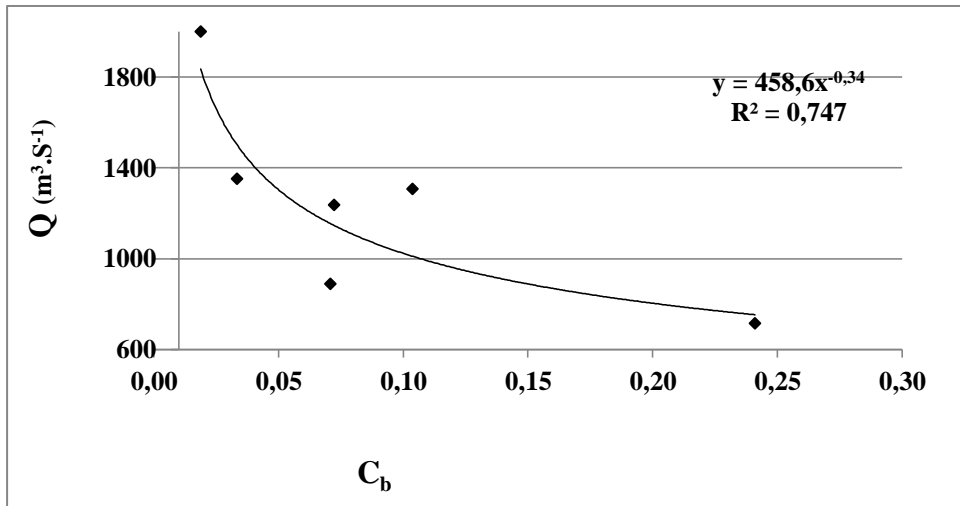


Figure 177: Relation de puissance entre le débit (Q) et le coefficient de boisement (Cb).

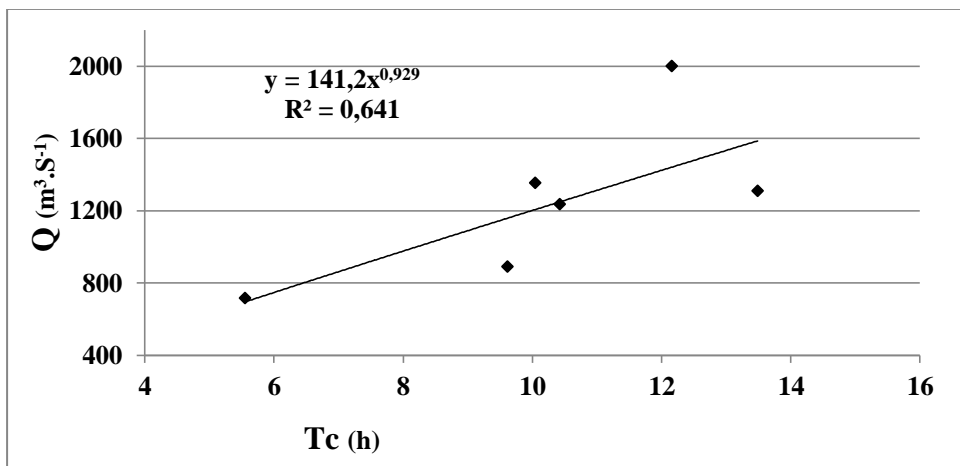


Figure 178: Relation de puissance entre le débit (Q) et le temps de concentration (Tc).

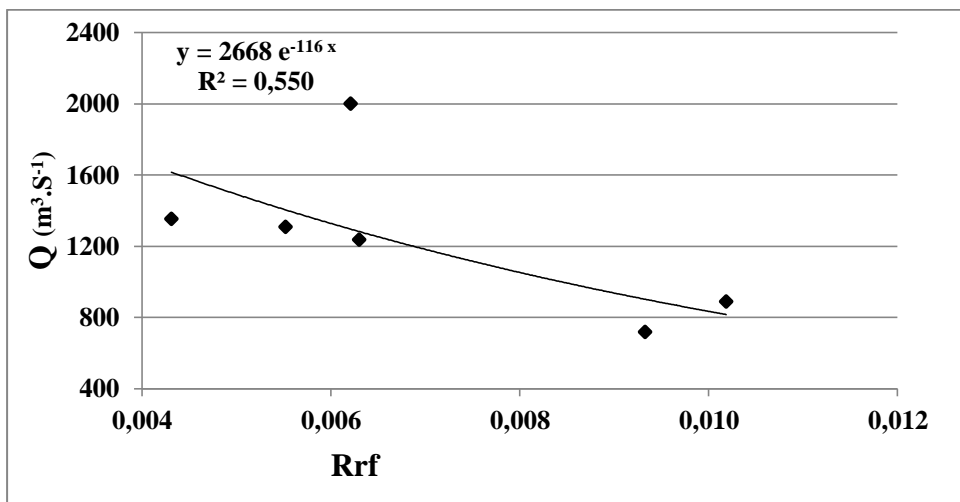
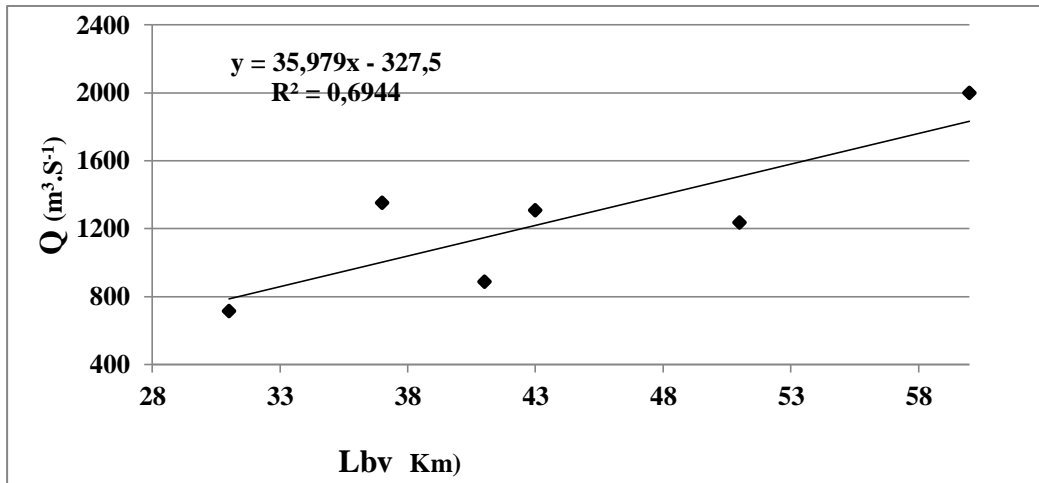
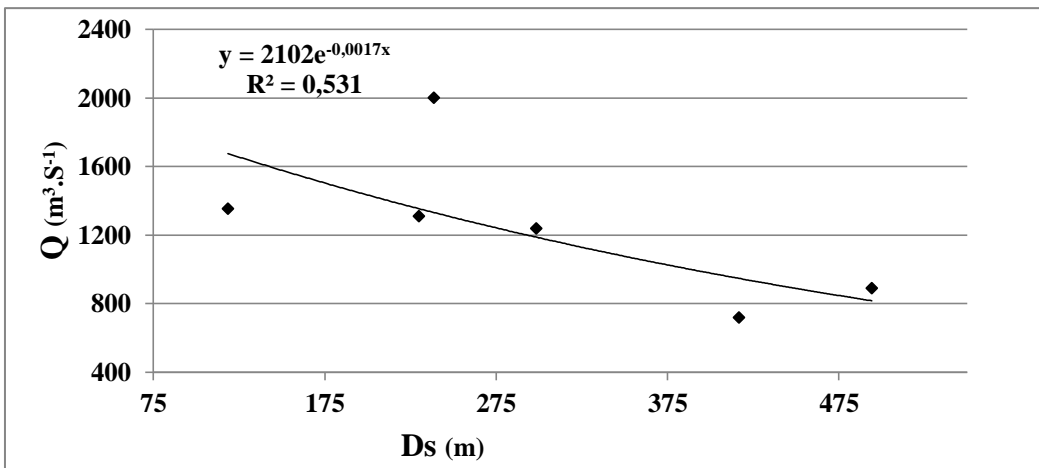


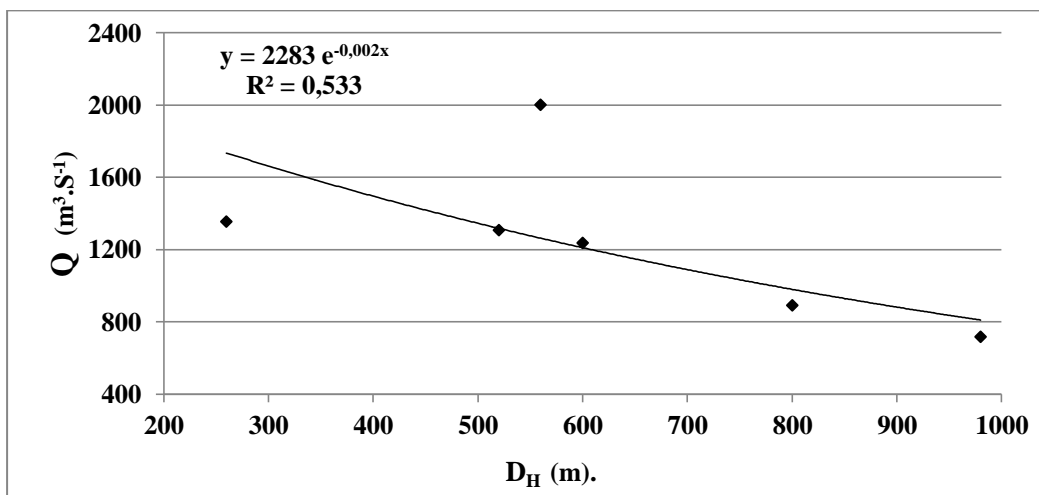
Figure 179: Relation exponentielle entre le débit (Q) et le rapport de relief (Rrf).



**Figure 180:** Relation linéaire entre le débit (Q) et la longueur du bassin versant (Lbv).



**Figure 181:** Relation exponentielle entre le débit (Q) et la dénivelée spécifique (Ds).



**Figure 182:** Relation exponentielle entre le débit (Q) et la distance séparant les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin (DH).

Le pourcentage d'inertie des descripteurs de forme, de réseau et de volume est expliqué par le premier et le second axe F1 et F2. Le résumé des variables par 2 dimensions (F1 et F2) a donné une récupération de 85% d'informations contenues dans le tableau des données des descripteurs de forme, 72%, dans le tableau des données des descripteurs de réseau et 73% dans le tableau des données des descripteurs de volume. Ces résumés synthétisent parfaitement les variables.

#### **Descripteurs de forme :**

- Le premier facteur exprime 62% de la variance présente d'une part les sous bassins (1401 et 1402) caractérisés par des valeurs importantes des variables S, P,  $L_{eq}$ ,  $l_{eq}$ , R,  $K_c$ . Le sous bassin 1401 est bien corrélé positivement avec le facteur F1, et d'autre part les sous bassins 1404 et 1405 qui correspondent aux valeurs élevées des descripteurs  $I_{pg}$ ,  $I_{pr}$  et  $R_{cir}$  expliquant l'importance de la forme des bassins et leurs pentes. Ces individus sont très bien corrélés avec le facteur F1. Ce dernier est très bien corrélé positivement avec ( $L_{eq}=0.97$  ;  $R=0.95$  ;  $S=0.96$ ) et moyennement corrélé avec le débit, ( $Q=0.64$ ).
- Le facteur F2 exprime 23% de la variance. Il oppose d'une part  $l_{eq}$  et  $R_{cir}$  des bassins (1401 et 1404) avec une (corrélation positive =0.80 et 0.87) et d'autre part le  $K_c$  avec une corrélation négative (-0.89) et une valeur élevée de (1.55) qui correspond au sous bassin 1402.

#### **Descripteurs de réseau :**

- Le premier facteur exprime 37% de la variance présente d'une part le sous bassin 1406 caractérisé par des valeurs importantes des variables  $L_t$ ,  $R_c$ ,  $R_l$ ,  $C_b$  et d'autre part le facteur F1 présente le sous bassin 1401 qui correspond aux valeurs élevées des  $D_f$ ,  $\sum Li$ ,  $\sum Ni$  et  $C_s$  qui expliquent l'importance du réseau hydrographique en présence des facteurs ralentisseurs comme le  $C_b$  et  $C_s$ .
- Le facteur F2 exprime 35% de la variance. Il oppose d'une part les sous bassins 1402 et 1403 caractérisés par les variables Q,  $\sum Li$ ,  $\sum Ni$  avec des corrélations positives (0.77 ; 0.73 ; 0.80) et d'autre part le sous bassin 1405 caractérisé par le  $C_b$ , (corrélation négative =-0,93).

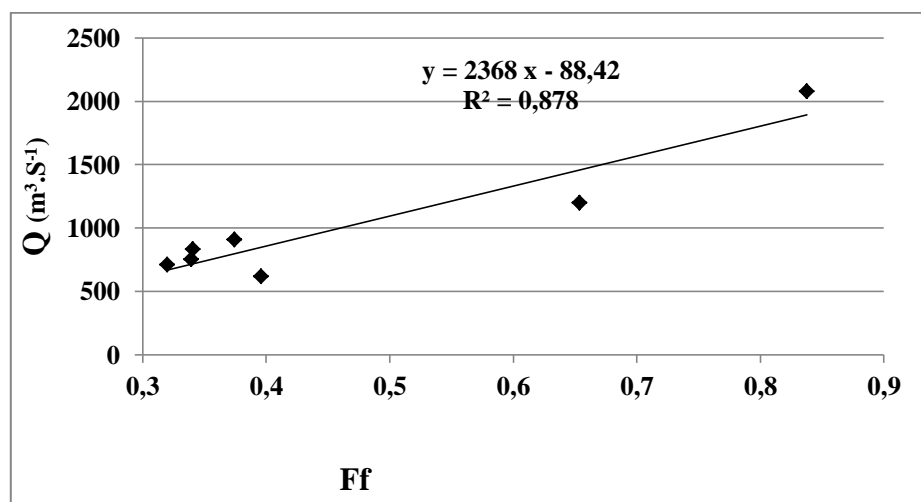


**Descripteurs de volume :**

- Le premier facteur exprime 42% de la variance présente d'une part le sous bassin 1406, caractérisé par des valeurs importantes des variables  $T_c$ ,  $C_{cc}$  et des valeurs minimales des altitudes  $H_{max}$  et  $H_{min}$  traduisant une décélération d'écoulement pour arriver à l'exutoire avec une forte perméabilité du sol, d'autre part le sous bassin 1401 indiqué par des valeurs élevées des  $H_{min}$ ,  $H_{max}$ ,  $H_{50\%}$ ,  $H_{95\%}$  expliquant l'importance du relief. Le facteur F1 est très bien corrélé négativement avec  $R_{rf}$ ,  $D_s$ ,  $H$ ,  $F_i$ ,  $D_H$ ,  $N_r$  et moyennement corrélé positivement avec  $H_{min}$ .
- Le facteur F2 exprime 31% de la variance. Il est bien corrélé positivement avec la  $C_{cc}$  correspondant au sous bassin 1406 et bien corrélé négativement aux variables  $D_d$ ,  $N_r$  correspondantes au sous bassin 1404 et aux descripteurs  $H_{5\%}$ ,  $H_{50\%}$ ,  $H_{95\%}$ ,  $H_{min}$ ,  $H_{max}$  qui sont relatives au sous bassin 1401.

**VIII.6.3 Bassin versant 10**

L'examen des tableaux n°39, 40 et 41 relatifs aux matrices de corrélation des variables permet de conclure que le débit est fortement corrélé avec les descripteurs de forme  $F_f$  et  $R_e$ , de réseau  $\sum Li$ ,  $\sum Ni$ ,  $C_b$  et de volume  $R_{fin}$ ,  $L_{bv}$ . Les corrélations significatives sont présentées dans les **figures** de (183 à 187).



**Figure 183:** Relation linéaire entre le débit (Q) et le facteur de forme (Ff).

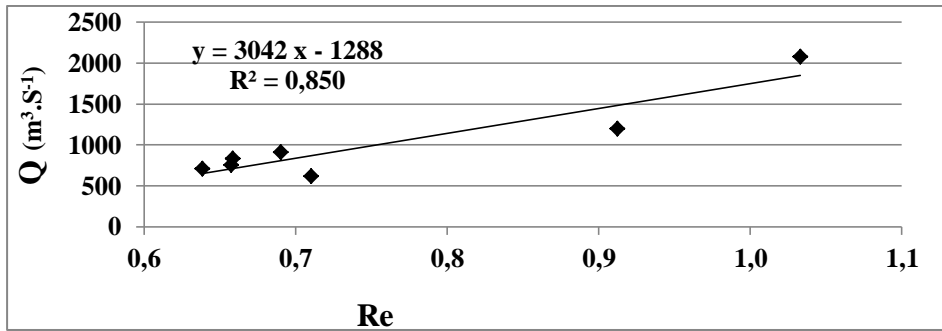


Figure 184: Relation linéaire entre le débit (Q) et rapport d'élongation (Re).

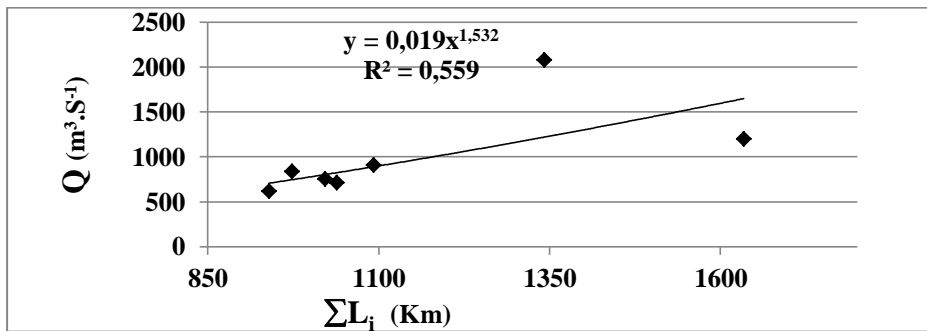


Figure 185: Relation de puissance entre le débit (Q) et la somme des longueurs des cours d'eau ( $\sum L_i$ ).

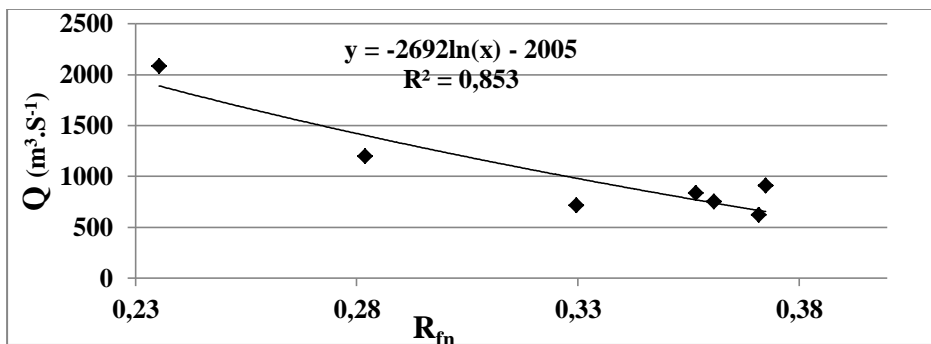


Figure 186: Relation logarithmique entre le débit (Q) le rapport de finesse ( $R_{fn}$ ).

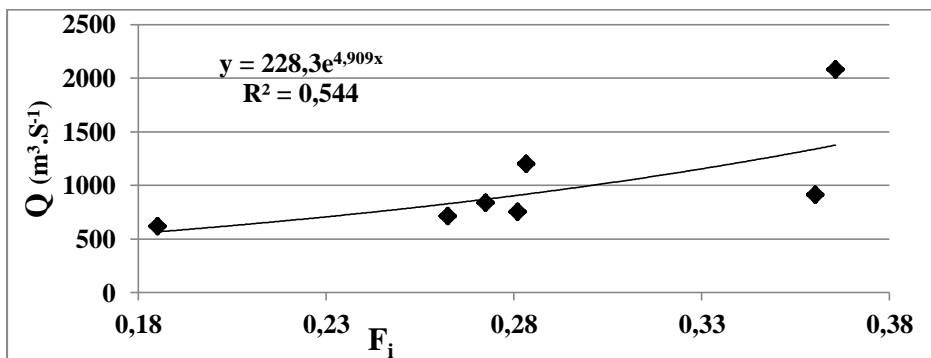


Figure 187: Relation exponentielle du débit (Q) avec la fréquence du cours d'eau ( $F_i$ ).

Le pourcentage d'inertie des descripteurs de forme, de réseau et de volume est expliqué par le premier et le second axe F1 et F2. Le résumé des variables par 2 dimensions (F1 et F2) a donné une récupération de 78% d'informations contenues dans le tableau des données des descripteurs de forme, 71%, dans le tableau des données des descripteurs de réseau et 74% dans le tableau des données des descripteurs de volume. Ces résumés synthétisent parfaitement les variables.

#### **Descripteurs de forme :**

- Le premier facteur exprime 44% de la variance présente d'une part les sous bassins (1005 et 1007) caractérisés par des valeurs importantes des variables S, P,  $I_{eq}$ , R,  $F_f$ ,  $R_e$  et sont très bien corrélés positivement avec le facteur F1 qui est négativement corrélé avec les sous bassins (1001, 1002) montrés par les variables  $I_{pg}$ ,  $I_{pr}$  expliquant la forte pente des bassins.
- Le facteur F2 exprime 34% de la variance. Il indique d'une part les variables P,  $K_c$  et  $Leq$  avec des corrélations positives (0.83 ; 0.83 ; 0.97) ayant les valeurs de (182 Km ; 1,50 ; 75,82 Km) correspondantes au sous bassin 1004 et d'autre part la variable  $I_{pg}$  avec une corrélation négative (-0.79) avec la valeur élevée de (17,55m/Km) est relative au sous bassin 1003.

#### **Descripteurs de réseau :**

- Le premier facteur exprime 37% de la variance. Il identifie d'une part les sous bassins (1006 et 1007), marqués par des valeurs importantes des variables  $L_t$ ,  $R_c$ ,  $R_l$ ,  $i$ ,  $P_{tce}$ , et d'autre part le sous bassin 1003 indiqué par les variables  $C_s$ ,  $L_r$ ,  $D_f$ .
- Le facteur F2 exprime 34% de la variance. Il oppose d'une part les variables  $R_l$  et  $P_{tce}$  avec des corrélations positives (0.80) correspondantes au sous bassin 1006 ayant les valeurs de (2,40 et 0,66%), et d'autre part le  $C_b$  avec une corrélation négative (-0,77) qui est relative au sous bassin 1007.

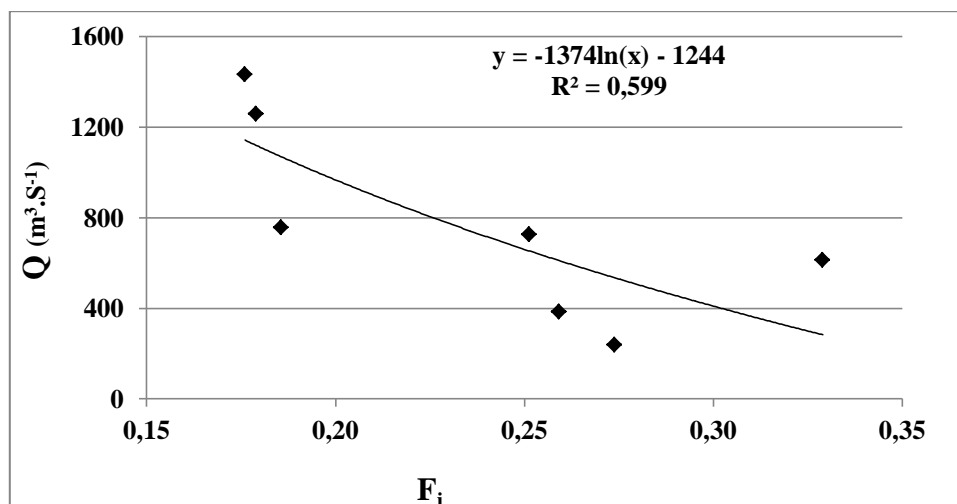
#### **Descripteurs de volume :**

- Le premier facteur exprime 50% de la variance présente d'une part les sous bassins (1001, 1002, 1006, 1007) caractérisés par des valeurs importantes des  $D_d$ ,  $F_i$ ,  $C_t$ ,  $N_r$ , H,  $R_{rf}$ ,  $D_s$ ,  $D_H$  expliquant un relief fort et un drainage important des sous bassins, et d'autre part les sous bassins (1003 et 1005) indiqués par des valeurs élevées des  $T_c$ ,  $C_{ec}$ ,  $H_{moy}$ ,  $H_{50\%}$ ,  $H_{95\%}$  expliquant l'importance du relief et la forte perméabilité du sol des bassins. Le facteur F1 est bien corrélé avec le débit (0.72).

- Le facteur F2 exprime 23% de la variance. Il oppose d'une part la variable  $H_{95\%}$  avec une corrélation positive (0.63) ayant la valeur de (620 m) correspondante au sous bassin (1004) et d'autre part la variable  $H_{5\%}$  avec une corrélation négative de (-0.86) qui correspond au sous bassin (1001).

#### VIII.6.4 Bassin versant 07

L'examen des tableaux n°42, 43 et 44 relatifs aux matrices de corrélation des variables permet de conclure que le débit est fortement corrélé avec les descripteurs de forme  $l_{eq}$ , de volume  $F_i$  et aucune corrélation avec les descripteurs de réseau. Les corrélations significatives sont présentées dans la **figure 188**.



**Figure 188:** Relation logarithmique entre le débit ( $Q$ ) et la fréquence du cours d'eau ( $F_i$ ).

Le pourcentage d'inertie des descripteurs de forme, de réseau et de volume est expliqué par le premier et le second axe F1 et F2. Le résumé des variables par 2 dimensions (F1 et F2) a donné une récupération de 81% d'informations contenues dans le tableau des données des descripteurs de forme, 62%, dans le tableau des données des descripteurs de réseau et 75% dans le tableau des données des descripteurs de volume. Ces résumés synthétisent parfaitement les variables.

#### **Descripteurs de forme :**

- Le premier facteur exprime 59% de la variance présente d'une part les sous bassins (0701, 0703, 0705, 0707) caractérisés par des valeurs importantes des variables  $S$ ,  $P$ ,  $l_{eq}$ ,  $R$ ,  $L_{eq}$ ,  $K_c$  et d'autre part les sous bassins (0702, 0704, 0706) correspondants aux valeurs élevées des variables  $R_{cir}$ ,  $I_{pg}$ ,  $I_{pr}$  expliquant la forte pente des bassins.

- Le facteur F2 exprimant 22% de la variance. Il oppose d'une part le  $R_{cir}$  avec une corrélation positive (0.56) ayant la valeur de (0,30) qui est relative au sous bassin 0706, et d'autre part le  $I_{pg}$  avec une corrélation négative (-0.60) ayant la valeur de (7,09 m/Km) correspondante au sous bassin 0703.

#### **Descripteurs de réseau :**

- Le premier facteur exprime 32% de la variance. Il indique d'une part les sous bassins (0701, 0702, 0705, 0706) caractérisés par des valeurs importantes des variables  $C_s$ ,  $L_r$ ,  $D_f$  et  $i$ , et d'autre part les sous bassins (0703, 0704, 0707) indiqués par des valeurs relativement élevées des variables  $R_l$ ,  $L_t$ ,  $P_{tce}$ ,  $R_c$ ,  $\sum N_i$  expliquant que le réseau hydrographique est bien développé, particulièrement les sous bassins (0704 et 0707) ayant des fortes pentes des cours d'eau qui sont de l'ordre de (0,80%) qui favorisent l'écoulement.
- Le facteur F2 exprime 29% de la variance. Il oppose d'une part le  $R_l$  avec une corrélation de (0.64) correspondante au sous bassin 0704 ayant la valeur de (1,86), et d'autre part la ( $L_r$ ) avec une corrélation de (-0.85) est relative au sous bassin 0701 ayant la valeur (2,82 Km<sup>2</sup>).

#### **Descripteurs de volume :**

- Le premier facteur exprime 60% de la variance présente d'une part les sous bassins (0701, 0702, 0703, 0705, 0707) caractérisés par des valeurs importantes des variables  $T_c$ ,  $C_{cc}$  qui expliquent une forte perméabilité du sol ce qui favorise l'écoulement souterrain et une lenteur d'écoulement de surface pour arriver à l'exutoire, et d'autre part les sous bassins (0706 et 0704) indiqués par des valeurs élevées des altitudes,  $D_s$ ,  $N_r$ ,  $D_d$ ,  $C_t$  interprétant l'importance du relief des sous bassins. Le facteur F1 est bien corrélé avec le débit (0.72).
- Le facteur F2 exprime 15% de la variance présente la variable  $H$  avec une corrélation de (0.65) ayant la valeur de (1,31 Km) correspondante au sous bassin (0707).

### Conclusion

La méthode ACP a synthétisé l'information contenue dans les tableaux croisant des variables quantitatives (descripteurs de forme de réseau et de volume) et des sous bassins versants (individus). Elle a produit un résumé d'information par l'établissement d'une similarité entre les sous bassins versants, la recherche de groupes de sous bassins versants homogène, la mise en évidence d'une typologie de sous bassins versants et de descripteurs, et aussi la mise en évidence de bilans de liaisons entre descripteurs, moyennant des paramètres ou variables synthétiques.

La réponse hydrologique d'un bassin versant dépend de l'influence des facteurs de l'écoulement : du climat et surtout des régimes pluviométriques (répartition spatiale et temporelle, intensité et durée) ; des facteurs stables liés à la forme du bassin et de ses divers paysages (géologie, sols, végétation, relief). Ces différents facteurs combinés confirment la subdivision du bassin en régions. La forme et le relief sont sans doute les facteurs qui traduisent le mieux les influences sur les écoulements qui varient d'une région à l'autre.

Les résultats obtenus en appliquant la méthode ACP aux trois échelles spatiales étudiées sont présentés dans le **tableau 45**.

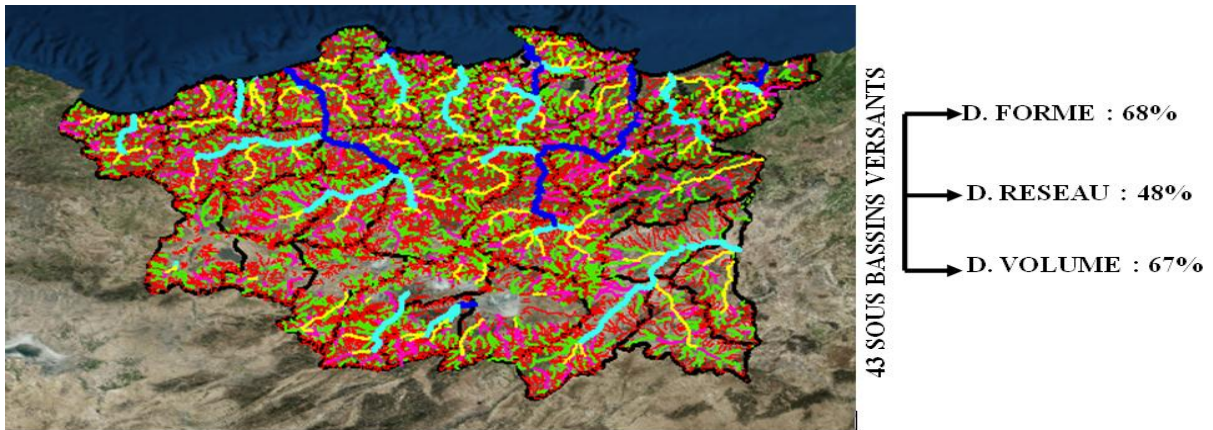
**Tableau 45:** Résultats des corrélations en % entre les débits max et les descripteurs.

<b>Echelle</b>		<b>Descripteurs de forme</b>	<b>Descripteurs de réseau</b>	<b>Descripteurs de volume</b>
<b>Echelle 1</b>	<b>43 SBV</b>	<b>68</b>	<b>48</b>	<b>67</b>
	<b>ZONE I</b>	<b>82</b>	<b>75</b>	<b>76</b>
<b>Echelle 2</b>	<b>ZONE II</b>	<b>64</b>	<b>53</b>	<b>75</b>
	<b>ZONE III</b>	<b>70</b>	<b>57</b>	<b>63</b>
	<b>BV12</b>	<b>82</b>	<b>75</b>	<b>76</b>
	<b>BV03</b>	<b>70</b>	<b>51</b>	<b>70</b>
<b>Echelle 3</b>	<b>BV14</b>	<b>85</b>	<b>72</b>	<b>73</b>
	<b>BV10</b>	<b>78</b>	<b>71</b>	<b>74</b>
	<b>BV07</b>	<b>81</b>	<b>62</b>	<b>75</b>



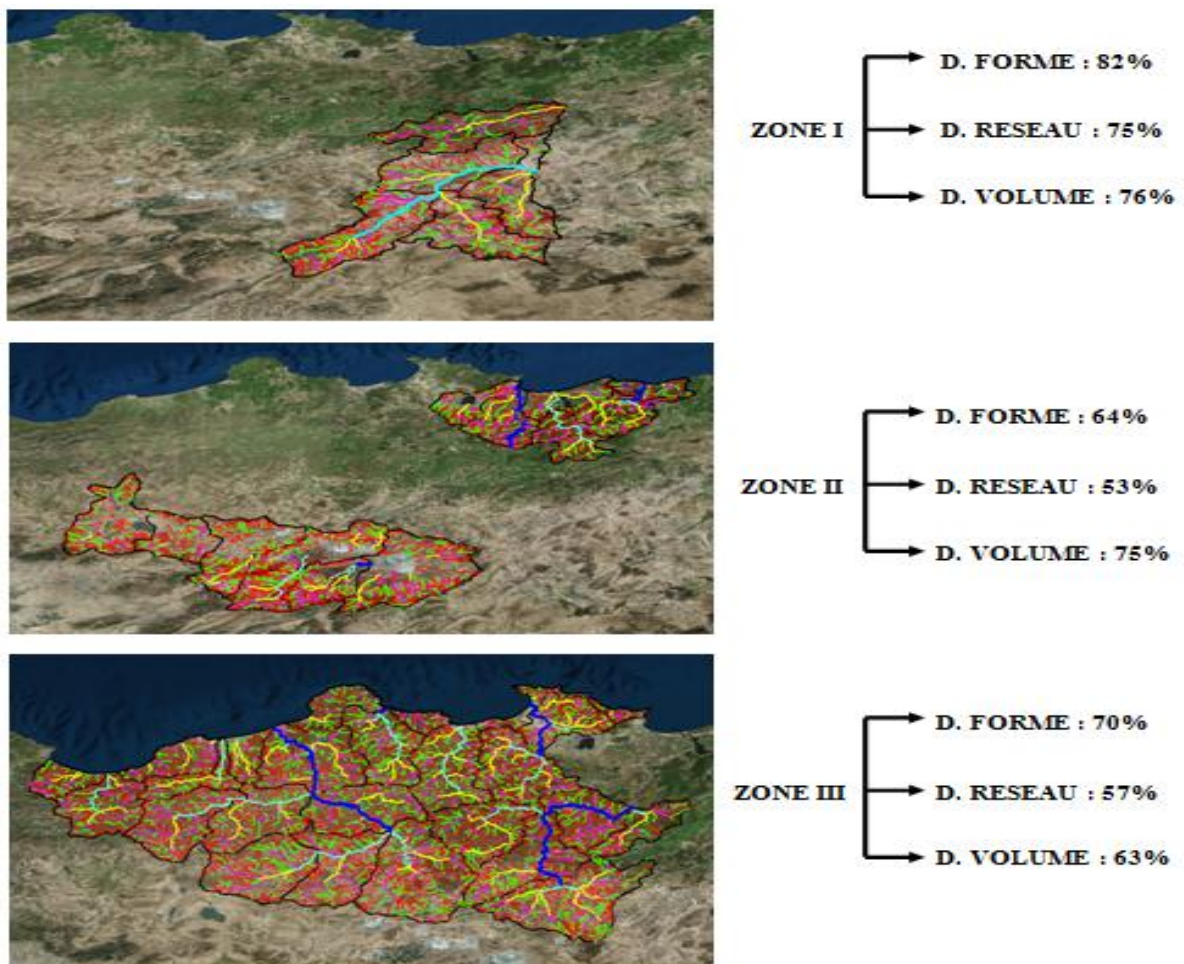
Nous avons par ailleurs projeté sur images satellitaires (**figures 189 ; 190 ; 191**) les mêmes résultats obtenus en appliquant la méthode ACP aux trois échelles spatiales.

- **Echelle (1) des 43 sous bassins versants**



**Figure 189:** Résultats de la méthode ACP de l'échelle (1).

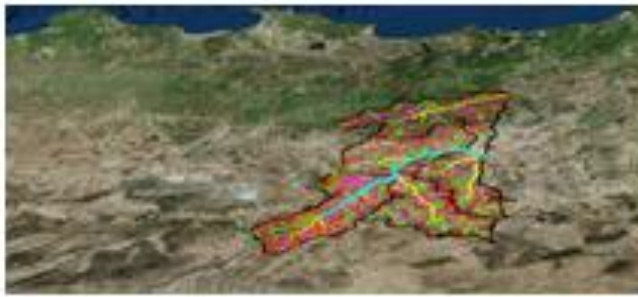
- **Echelle (2) des 3 zones**



**Figure 190:** Résultats de la méthode ACP de l'échelle (2).



• Echelle (3) des 5 bassins versants



BV12

- D. FORME : 82%
- D. RESEAU : 78%
- D. VOLUME : 76%



BV03

- D. FORME : 70%
- D. RESEAU : 51%
- D. VOLUME : 70%



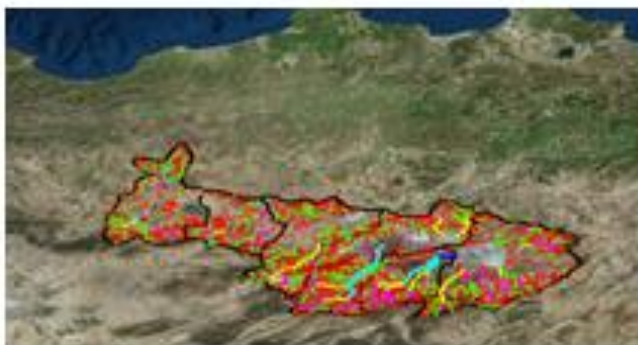
BV14

- D. FORME : 85%
- D. RESEAU : 72%
- D. VOLUME : 73%



BV10

- D. FORME : 78%
- D. RESEAU : 71%
- D. VOLUME : 74%



BV07

- D. FORME : 81%
- D. RESEAU : 62%
- D. VOLUME : 75%

Figure 191: Résultats de la méthode ACP de l'échelle (3).

- On constate que la variabilité de l'échelle spatiale est importante pour l'influence des descripteurs (forme, réseau et volume) sur la réponse hydrologique. Elle est inversement proportionnelle avec l'influence des descripteurs sur le débit des crues.
- Plus l'échelle spatiale est importante plus l'influence des descripteurs sur l'écoulement est faible. Cela est dû à l'intervention des différents facteurs comme la dissemblance de la lithologie des bassins versants, la diversité de l'occupation du sol, du climat et la qualité des données hydrométriques.
- Ainsi, les cours d'eau Medjerda, Seybouse et Kebir Rhumel mobilisent des volumes d'eau abondants toute l'année, alors que certains affluents peuvent tarir complètement plusieurs mois surtout pendant les années à faible pluviométrie.
- Les résultats de l'ACP pour les bassins étudiés montrent que le débit max est en bonne corrélation avec les descripteurs de forme (73%) et de volume (71%), et une moyenne corrélation avec les descripteurs de réseau (59%).

## **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

A l'issue de cette étude, l'analyse géomorphologique, la classification des réseaux de drainage selon plusieurs critères, le calcul des descripteurs morphométriques (de forme de réseau et de volume), et la prédétermination des débits des crues, ont permis d'avoir des résultats quantitatifs, et qualitatifs sur la réponse hydrologique des bassins versants du Nord-Est de l'Algérie.

L'objectif principal de ce travail était de parvenir à proposer une approche méthodologique pour déterminer l'influence des descripteurs morphométriques (de forme, de réseau et de volume) sur la réponse hydrologiques des bassins versants étudiés, et indiquer les descripteurs résumant le mieux l'information portée sur les bassins en crue, le bilan de liaison entre les descripteurs, la classification des sous bassins selon les variables considérées.

D'après les valeurs débimétriques et la description hydro-géomorphologique des bassins étudiés, on constate les grands traits déterminants des portraits types des bassins de la région d'étude. A l'échelle régionale et en fonction des bassins versants touchés par d'importantes crues, trois types sont clairement identifiés :

- Le premier type concerne les sous bassins versants ayant des débits importants ( $1000 \leq Q \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \leq 2500$ ). Il s'agit des bassins côtiers Ouest et Est, les bassins de la Seybouse, les deux sous bassins extrêmes des Hauts Plateaux Constantinois et le quatrième sous bassin de la Medjerda, où se développent en général des réseaux hydrographiques de type rectangulaire, dendritique au Nord et le type parallèle concerne les bassins 07 et 12, ayant des ordres des cours d'eau élevés ( $i=5$  et  $i=6$ ) et des longueurs importantes ( $100 \leq L_T \text{ (Km)} \leq 200$ ) telles celles des oued Kebir Rhumel et Seybouse. Concernant les altitudes, elles sont faibles au niveau des bassins littoraux et fortes aux bassins intérieurs. Les pentes sont fortes (classe 4) à l'Ouest des bassins côtiers et faibles à l'Est. Quant aux bassins intérieurs la pente est moyenne. Du point de vue lithologique, ce type est caractérisé par des marnes à l'Est du bassin (03) et des gneiss, flysch, et des schistes à l'Ouest, contrairement aux bassins intérieurs 14 et 07 qui sont indiqués par des calcaires et des alluvions. Le climat de ce type est humide sur le littoral et subhumide à semi-aride sur les bassins intérieurs. Les précipitations annuelles dépassent les 1500 mm à l'Ouest des bassins côtiers. Elles varient entre 600-

1000 mm à l'Est, et elles ne dépassent pas les 500 mm sur les bassins intérieurs 14, 07 et 12.

- Le second type concerne les sous bassins versants ayant des débits moyens ( $500 \leq Q$  ( $m^3.s^{-1}$ )  $\leq 1000$ ). Il s'agit du centre et des deux sous bassins extrêmes (Est Ouest) du bassin 03, les premiers sous bassins de Kebir Rhumel et les sous bassins situés au Sud de la région d'étude 0704, 0706, 1202, 1203, où se développent en général des réseaux hydrographiques de type dendritique, ayant des ordres des cours d'eau ( $i=5$ ) et des longueurs moyennes ( $50 \leq L_T$  (Km)  $\leq 100$ ) telles que les longueurs d'oued Endja, Safsaf, Bounamoussa et Mellegue amont. Concernant les altitudes, elles sont faibles au niveau des bassins littoraux et très forts aux bassins intérieurs. Les pentes sont moyennes classes 2 et 3 au centre du bassin 03, au bassin 10, et faibles dans les sous bassins du Sud. Du point de vue lithologique ce type est caractérisé par des marnes, des gneiss, flysh et des argiles au centre du bassin 03 et sur le bassin 10, contrairement aux bassins intérieurs 07, 12 qui sont indiqués par des calcaires et des alluvions. Le climat de ce type est humide sur le littoral et subhumide à semi-aride sur les bassins intérieurs. Les précipitations annuelles varient de (700-1000) mm au centre du bassin 03. Elles varient entre (300-600) mm sur les bassins intérieurs 07, 12.
- Le troisième type concerne les sous bassins versants ayant des débits relativement faibles ( $95 \leq Q$  ( $m^3.s^{-1}$ )  $\leq 500$ ). Il s'agit des quatre sous bassins littoraux 0303, 0308, 0310 et 0314, deux sous bassins de la Medjerda 1201 et 1205, et deux autres des Hauts Plateaux Constantinois 0703 et 0705 où se développent en général des réseaux hydrographiques de type dendritique et multi-bassins, ayant des ordres des cours d'eau moyen ( $i=4$ ) et des longueurs qui ne dépassent pas les 70 Km telles que les longueurs d'oued oudina 0308, El menchia 0303, El madher 0705 et Medjerda 1201. Concernant les altitudes, elles sont moyennes au niveau des bassins littoraux 03 et fortes sur les bassins intérieurs 07 et 12. Les pentes sont fortes classe 4 pour les sous bassins côtiers et faibles, classes 1-2 sur les sous bassins intérieurs 07 et 12. Du point de vue lithologique ce type est caractérisé par un ensemble de formation (marnes, gneiss et flysh) dans les sous bassins littoraux, et des marnes et trias (gypse) au niveau des sous bassins de la Medjerda, contrairement aux sous bassins 0703 et 0705 qui sont indiqués par des calcaires et des alluvions. Le climat de ce type est humide sur le littoral, subhumide et semi-aride sur les bassins de la Medjerda et semi-aride et aride pour les sous bassins 0703 et 0705. Les précipitations annuelles varient entre 1000 et 1500 mm

au littoral. Elles ne dépassent pas les 800 mm sur le bassin 12 et 400 mm au niveau du bassin 07.

Cette description spatiale des trois types des bassins versants a permis d'analyser globalement les dépendances entre l'hydro géomorphologie et les débits des crues. Pour mettre en évidence les affinités et comprendre l'influence de la morphométrie des sous bassins versants du Nord Est Algérien et la réponse hydrologique, la méthode multidimensionnelle de l'analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée. C'est une approche synthétique et quantitative. Elle a donc permis de déduire les descripteurs qui caractérisent au mieux les sous bassins et de les rattacher à des groupes distincts. Les résultats de l'ACP ont permis le tracé des limites entre les différents ensembles physiques en regroupant les sous bassins versants appartenant à la même unité géomorphologique.

L'examen des descripteurs morphométriques de ces bassins versants a montré que ce sont les descripteurs de forme qui influencent sur les débits des crues avec une corrélation de 68%. L'altitude impacte aussi considérablement la lame d'eau précipitée et celle écoulee dans les différents sous bassins. D'autres facteurs favorisent davantage le ruissellement sur les bassins du Nord Est Algérien. Il s'agit des pentes qui sont relativement élevées. Donc le contraste du relief observé entraîne un contraste hydrologique des bassins versants, et les résultats obtenus sont confirmés par la corrélation des descripteurs de volume sur le débit des crues et qui est de 67%. Quant aux descripteurs qui décrivent l'organisation, la hiérarchisation ou la structuration du réseau sont moyennement corrélés (48%) avec les débits des crues.

Pour affiner les résultats des corrélations issus de l'application de l'ACP sur les 43 bassins étudiés un changement d'échelle spatiale a été effectué en choisissant deux autres échelles spatiales différentes. Les résultats des trois échelles sont présentés ci-dessous :

**Echelle (1) :** 43 sous bassins, la corrélation des descripteurs sur les débits est 61%,

- corrélation des descripteurs de forme avec le débit est 68%
- corrélation des descripteurs de réseau avec le débit est 48%
- corrélation des descripteurs de volume avec le débit est 67%.

**Echelle (2)** : 3 zones, la corrélation des descripteurs sur les débits est 68% ,

- corrélation des descripteurs de forme avec le débit est 72%
- corrélation des descripteurs de réseau avec le débit est 62%
- corrélation des descripteurs de volume avec le débit est 71%.

**Echelle (3)** : 5 bassins, la corrélation des descripteurs sur les débits est 73% ,

- corrélation des descripteurs de forme avec le débit est 79%
- corrélation des descripteurs de réseau avec le débit est 66%
- corrélation des descripteurs de volume avec le débit est 74%.

Selon les résultats trouvés, une remarque importante doit être mise en exergue est : la corrélation des descripteurs de forme est la plus forte, suivie de celle des descripteurs de volume et en troisième rang celle des descripteurs de réseau. Si un réseau est bien structuré et hiérarchisé, la réponse hydrologique peut être amoindrie par des pentes faibles, ou par une forme plus allongée du bassin.

L'importance de l'échelle spatiale se confirme à travers ces résultats. Elle joue un rôle déterminant pour quantifier l'influence des descripteurs sur la réponse hydrologique. L'échelle spatiale est inversement proportionnelle avec la corrélation des descripteurs sur l'écoulement des bassins versants, car les théories disponibles ont été élaborées pour des échelles fines, et pour des milieux idéaux continus et homogènes en termes de lithologie, occupation du sol, climat. Or le terrain naturel est très hétérogène notamment aux grandes échelles. L'intervention du facteur anthropique est importante aussi en termes de l'impact sur les écoulements. Elle se présente dans la mise en place des ouvrages hydrauliques tels que les digues, les barrages, les seuils et les recalibrages des oueds. Un autre facteur qui peut être influent et actif sur les écoulements, ce sont les zones humides telles que celles situées aux bassins 03et 07 qui peuvent aider à interpréter les valeurs élevées des débits enregistrées sur ces bassins. Ces zones sont plus ou moins permanentes au fil des saisons. Lors des crues, elles se comportent comme des zones contributives à l'écoulement.

Pour synthétiser, l'étude de l'influence des descripteurs sur la réponse hydrologique des bassins versants est très complexe, car plusieurs facteurs influent sur les débits des crues des bassins notamment les descripteurs de forme de volume et de réseau, la qualité des valeurs hydrométriques et la diversité des caractéristiques générales des bassins particulièrement aux



grandes échelles. Néanmoins les résultats de cette approche soulignent un double intérêt dont le premier est de détecter le rôle des emboîtements d'échelles et le jeu des interactions spatiales sur la dynamique du ruissellement en tout point de l'espace. Le second intérêt est de quantifier le rôle des composantes en lien avec la réponse hydrologique des bassins étudiés.

Enfin, les résultats présentés dans cette thèse constituent sans aucun doute une contribution louable et les améliorations et compléments futures répondront au mieux aux préoccupations d'ordre scientifique, économique et environnemental.

### **Perspectives**

Cette étude sur l'influence des descripteurs morphométriques sur la réponse hydrologique ouvre plusieurs perspectives :

- Parmi les pistes de recherches, l'intégration de nouveaux indicateurs pour préciser et systématiser l'identification automatique des réseaux hydrographiques en termes de parallélisme, l'orthogonalité, l'orientation, la symétrie/dissymétrie).
- La deuxième piste est la prise en compte de l'influence des caractéristiques géomorphologiques des bassins sur la réponse hydrologique d'une façon pertinente et d'appliquer d'autres méthodes statistiques qui traitent les données qualitatives.
- La troisième piste concerne l'aspect géomatique. Cette démarche est porteuse à double-titre, car elle permet d'établir une passerelle entre les techniciens de l'information géographique et les hydrologues. Les résultats de cette recherche pourraient, à ce titre, conduire à l'implémentation d'outils spécifiques pour l'analyse des réseaux hydrographiques au sein des SIG.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Références bibliographiques**

- A.E.Scheidegger.**, 1968. Horton's Law of Stream Numbers. Water Resources Research. Vol 4, n°3, pp. 655-658.
- Abdeddaim.H.**, 2008. Contribution à la mise en œuvre d'une méthode d'analyse du risque d'inondation et de prévision des solutions d'aménagement. Thèse de Magistère, Université Batna, 111p.
- Agence des Bassins Hydrographiques "Constantine-Seybouse-Mellegue".**, 2011. Délimitation des bassins versants et réseaux hydrographiques, Fichier format vecteur.
- Agence des Bassins Hydrographiques "Constantine-Seybouse-Mellegue".**, 2004. Cahiers de l'agence, actualisation des données arrêtée au 31-12-2002.
- Achite et Meddi.**, 2005. Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride . Cas du bassin versant de l'oued Mina ( nord-ouest algérien ). Spatial and temporal variability of streamflow and solid yields in semiarid areas . Case of the oued Mina basin. Revue des sciences de l'eau.Vol 18, pp. 37–56.
- Acquet. J.J. et Jacquet. J.**, 1964. Les méthodes statistiques dans les calculs de prédétermination des crues. Revue de statistique appliquée. Tome 12, n°1, pp. 49–61.
- Ahmad. B.**, 2011. Caractères du réseau hydrographique à partir d'images satellite : implication pour la gestion des ressources en eaux. Revue scientifique et Technique LJEE N°19, pp. 16–28.
- Ambroise. B.**, 1991. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré Processus et Modèle” Séminaire du Conseil Scientifique Sciences du Sol de l'INRA, Dijon, 28p.
- Ambroise. B.**, 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modeles. Editions \*H\*GXA\*, Bucares, 206p.
- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.**, Données pluviométriques et hydrométriques, Fichier format Excel.
- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.**, Carte du réseau hydroclimatologique et de la surveillance de la qualité des eaux, 2005. Et Extrait de la carte des pluies annuelles, 1993.
- Argialas. D.P., Lyon. J.G. et Mintzer. O.W.**, 1988. Quantitative description and classification of drainage patterns. Phot. Eng. Rem. Sensing, 54, (4), pp. 505-509.
- Baize. S.**, 1998. Tectonique, eustatisme et climat dans un système géomorphologique côtier. Le Nord-ouest de la France au Pleistocène : exemple du Cotentin (Normandie). Thèse de Doctorat, Université de Caen, 333 p.
- Baker. V.R.**, 1986. Fluvial landforms. in : Geomorphology from space, A global overview of regional landforms. Short, N.M. and Blair R.W, NASA Ed., pp. 255-259.

- Bravard. J et Petit. F.**, 2000. Les cours d'eau ; Dynamique du système fluvial. Editions Armand Colin, Collection U, Paris, 222 p.
- Benameur. S., Benkhaled. A., Meraghni. D., Chebana. F et Necir. A.**, 2017. Complete flood frequency analysis in Abiod watershed, Biskra (Algeria) Nat Hazards, 86, pp 519-534.
- Benkhaled. A., Higgins. H., Chebana. F et Necir. A.**, (2013). Hydrol Process. Frequency analysis of annual maximum suspended sediment concentrations in Abiod wadi, Biskra (Algeria). Hydrological Processes. 28 (12), pp. 3841–3854.
- Beloulou.**, 2008. Vulnérabilité aux inondations en milieu urbain. Cas de la ville de Annaba (Nord-Est Algérien).Thèse de doctorat, Université Annaba, 342p.
- Bernardara. P.,Cereve., Cemagref.**, 2005. Seance6MLV05.
- Betson. R.P.**, 1964. What is watershed runoff ? Journal of Geophysical Ressources, 69, pp. 1541-1552.
- Beven. K.J.**, 1989. Changing ideas in hydrology –The case of physically based models journal of Hydrology, 105, pp. 157-172.
- Blavoux. B.**, 1978. Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium : possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse de Doctorat d'Etat en-Sciences Naturelles, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6. 333 p.
- Brigode. P. et Bernardara. P.**, 2015. Méthodes probabilistes et déterministes d'estimation des débits extrêmes : comparaison de résultats sur deux bassins versants ... des débits extrêmes : comparaison de résultats. , La Houille Blanche, n°3, pp. 72-78.
- Brouquisse. J.**, 2004. Thème 3 Données hydrologiques, pp. 1–39.
- Campbell. MR.**, 1986. Drainage modifications and their interpretation. Journal. Geol., Chicago. n°4, pp. 567-581, and 657-678.
- Cappus. P.**, 1960. Bassin expérimental d'Arence - Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. La Houille Blanche, A, pp. 493-520.
- CATNAT Ubyrisk Consultants**, 2015. catastrophes naturelles dans le monde, 19p.
- Charleux demargne. J.**, 2001. Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l' Hydrologie Application à la Caractérisation du Régime de Crues des Bassins Versants. Thèse de doctorat. Université de Marne-la-vallée, 350p.
- Charleux J. et Payraudeau. S.**, 2000. Méthode de diagnostic de la qualité d'extraction du réseau hydrographique à partir d'un Modèle Numérique de Terrain Objectif. Hydrologie des régions méditerranéennes 11-13 octobre, Montpellier, France, Laboratoire Structureset Systèmes Spatiaux Cemagref- ENGREF, poster,1p.

- Chirala. U., Kinthada. N.R. et Gurram. M.K.**, 2012. Correlation of geomorphometric parameters for the hydrological characterization of meghadrigedda watershed, visakhapatnam, India – a gis approach. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*. Vol 4, n°7, pp. 3169-3183.
- Chorley R. J., Malm. E. G. et Pogorzelski. II. A.**, 1957. A new standard for estimating drainage basin shape. *Am. J Sei.* 255, February 1957, pp. 138-141.
- Cosandey. C.**, 1999. Conséquence de la foret sur le bilan d'écoulement annuel, pp. 63–73.
- Cosandey. C., Lavabre. J., Martin. C et Mathys. N.**, 2003. Conséquences de la forêt méditerranéenne sur les écoulements de crue – Synthèse des recherches menées en France. *Houille Blanche*, n°3-02, pp. 38-42.
- Costa-Cabral. M C et Burges S.J.**, 1994. Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*. Vol 30, n°6, pp. 1681-1692.
- Cudennec. C.**, 2000. Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 37, pp. 63-73.
- Danniel. ST.**, 2002. Mécanismes hydrologiques à l'échelle des bassins versants. Institut Mécanique de Grenoble. pp 215-228.
- Deffontaines. B.**, 1990. Développement d'une méthodologie d'analyse morphostructurale et morphonéotectonique. Thèse de doctorat, Université Paris V. 264p.
- Delahaye. D.**, 2003. Du ruissellement érosif à la crue turbide en domaine de grande culture : analyse spatiale d'un phénomène complexe ( From concentrated runoff to flash flood in silty loamy plateaux : spatial analysis of a complex phenomena ), 3, pp. 287–301.
- Delcaillau. B.**, Reliefs et tectonique récente, Ed. Vuibert, Paris, 2004, 259 p.
- Direction Générale de la Protection Civile.**, 2015. Détachement de Renfort aux Premières Interventions, 27p.
- Direction Générale des Forêts.**, 2010. Inventaire Forestier National. Fichier format vecteur.
- Dosseur. H.**, 1964. Contribution à la définition de caractéristiques d'état du bassin expérimental d'Alrance (Aveyron) pour la prévision hydrologique. Thèse Doct. 3e cycle, Univ. Montpellier-EDF, Montpellier, 178p.
- Douvinet. J., Delahaye. D et Langlois. P.**, 2007. De la morphométrie à un champ de mesure de l'efficacité structurelle du bassin versant. *Sageo*, pp.1-15.
- Dubreuil. P.**, 1966. Les caracteres physiques et morphologiques des bassins versants. Leur détermination avec une précision acceptable. Office de la recherche scientifique et technique. Paris.31p.
- Dunne. T et Black R.D.**, 1970. Partial Area Contributions to Storm Runoff in a Small New England Watershed. *Water Resources Research*. Vol 6, pp. 1296-1311.

- Dunne. T.**, 1978. Field studies of hillslope flow processes, in M.J. Kirkby Ed., Hillslope Hydrology, Wiley Intersciences Publ, pp. 227-293.
- Dunne. T.**, 1983. Relation of field studies and modeling in the prediction storm runoff. , 65, pp. 25–48.
- Erskine et Robert. H.**, 2006. Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. Water resources research, vol. 42, pp .1–9.
- Fairbridge. R.W.**, 1968. The Encyclopedia of Geomorphology, Encyclopedia of Earth Sciences Séries, Vol. III, pp. 284-291 et 731-737.
- Fabrice. R.**, 1999. Interet des banques de données urbaines pour l’hydrologie Détermination des fonctions de transfert de bassins versants urbains.Thèse de doctorat. Institut National Potytechnique de Grenoble. 219p.
- Faye. C.**, 2014. Méthode d’analyse statistique de données morphométriques : Corrélation de paramètres morphométriques et influence sur l’écoulement des sous-bassins du fleuve Sénégal.Revue Cinq Continents , 4(10), pp. 80–108.
- Gagnon. P.**, 1993. Concepts fondamentaux de la gestion du temps dans les SIG. – Mémoire de maîtrise, Centre de Recherche en Géomatique, Faculté de Foresterie et de géomatique, Université de Laval, Sainte-Foy, Québec. 160 p.
- Gilard. O et Gendreau. N.**, 1998. Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d’inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants. Revue des Sciences de l’Eau, n°3, pp 429-444.
- Gregory. K.J et Walling D.E.**, 1973. Drainage Basin form and process – A geomorphological approach. Edward Arnold Ltd, London, 458 pp.
- Guillot et Duband.**, 1967. La méthode de Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies, pp. 560-569.
- Hengl T., Evans I.S et Pike R.J.**, 2009. Geomorphometry: A brief guide. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. 765p.
- Hewlett. J.D.**, 1961. Watershed management, in Annual Report 1961, USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville (NC USA), pp. 61-66.
- Hewlett. J.D et Hibbert. A.R.**, 1963. Moist and energy conditions within et sloping soil mass during drainage, Journal of Geophysical Ressources, 68(4), pp. 1081-1087.
- Hewlett. J.D et Hibbert. A.R.**, 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In W.E. Sopper, H.W. Lull Ed., Forest Hydrology, Pergamon Oxford (UK), pp. 275-290.
- Hauchard. E.**, 2001. De la dynamique non linéaire à la dynamique du relief en géomorphologie Application aux bassins versants de la marge Nord-occidentale du Bassin de Paris, Thèse de Doctorat, MTG, Université de Rouen, 3 Volumes, 730 p.

- Hebal. A et Remini. B.**, 2011 Choix du modèle fréquentiel le plus adéquat à l'estimation des valeurs extrêmes de crues (cas du nord de L'Algérie). *Can J Civ Eng* 38(8), pp. 881–892.
- Hocine. F et Belhadj A.M.**, 2008. Simulation du comportement des écoulements d'eau en utilisant le réseau hydrologique d'un bassin versant : cas de l'oued benimessous , Algérie. *Revue Télédétection*, vol. 8, n° 1, pp. 179-191.
- Horton. R.E.**, 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 14, pp. 446-460.
- Horton. R.E.**, 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society*. 56(March), pp. 275–370.
- Howard. A.D.**, 1997. Badland morphology and evolution : interpretation using a simulation model. 22, pp.211–227.
- Hursh. C.R et Brater. E.F.**, 1941. Separating storm hydrographs for small drainage areas into surface and subsurface flow. *Trans. Amer.Geophys. Union*, 22, pp. 863-870.
- Ichoku. C. et Chorowicz. J.**, 1994. A numerical approach to the analysis and classification of channel networks patterns. *Water Resources Research*. Vol.30, 2, pp. 161-174.
- Institut National des Ressources Hydrauliques de Constantine.**, (1985). Analyse fréquentielle des pluies de l'Algérie. Synthèse régionale. 43p.
- Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage**, 2006. Note sur la carte de sensibilité à l'érosion ( Nord de l'Algérie ). 27p.
- Joerin. C.**, 2005. Etude des processus hydrologiques par l'application du traçage environnemental, pp. 1–19.
- Jenson et Resenfeld E.G.**, 1988. Extracting topographic structure from Digital Elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote for Sensing*, 54(11), pp. 1593-1600.
- Jung. K., Marpu. P.R. et Ouarda. T.B.M.J.**, 2015. Improved classification of drainage networks using junction angles and secondary tributary lengths. *Geomorphology*, 239, pp. 41–47. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.004>.
- Jung. K. et TBMJ. O.**, 2015. Analysis and Classification of Channel Network Types for Intermittent Streams in the United Arab Emirates and Oman. , 5(5).
- Kanth. T.A. et Hassan. Z.**, 2012. Morphometric analysis and prioritization of watersheds for soil and water resource management in wular catchment using geo-spatial tools. 2(1), pp. 30–41.
- Kichul. J ., Prashanth. M., Ouarda TBMJ et Ghedira. H.**, 2015. Discrimination of Five Network Types Based on The Lengths Distribution of Tributary Junction Angles.



- Kuichling. E.** (1889). The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, n° 20, pp. 37-40.
- La Barbera. P. et Rosso. R.**, 1989. On the fractal dimension of stream network. *Water Resources Research*, 25(4), pp. 735-741.
- Lagacé. R.**, 2012. Visu Hydro. Logiciel d'analyse hydrologique développé dans le cadre du projet de Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydroagricoles dans un contexte de changements climatiques. Mesure 26 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 (PACC) du gouvernement du Québec en collaboration avec Ressources naturelles Canada (ICAR).
- Lahlah. S.**, 2004. Les inondations en Algérie. Actes des Journées Techniques/ Risques Naturels : Inondation, Prévision, Protection /Batna 15/16/décembre, pp. 43–57.
- Lambert. R.**, 1996. Géographie du cycle de l'eau, Editions Presses Universitaires du Mirail (PUM), Toulouse, 439 p.
- Llamas. J.**, 1993. Hydrologie Générale : Principes et Applications. 2ème édition." Edition Gaetan Morin, 339p.
- Leopold.**, 1957. River Channel\_patterns: Braided, Meandering and straight. Geological Survey Professionnel Paper, pp. 39-85.
- Legout. C.**, 2005 Hydrologie de la pluie au débit. Université de Grenoble. 24p.
- Luo W.**,1998. Quantifying groundwater-sapping landforms with a hypsometric technique, *Journal of Geophysical Research E: Planets*. Vol 105, n°1, pp. 1685–1694.
- Mandelbrot. B.**, (1983). *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, San Fransisco, 460 p.
- Maréchal. D.**, 2011. Utilisation de données satellitales à très haute résolution pour l'étude de l'origine géomorphologique des chemins de l'eau sur des bassins versants méditerranéens soumis aux crues éclair.Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines Saint-Etienne.364p.
- Mebarki A.**, 2005. Hydrologie des bassins de l'est Algérien : ressources en eau, aménagement et environnement.Thèse ce doctorat. Université Mentouri de Constantine, 360p.
- Mejía. A.I. et Niemann. J.D.**, 2008. Identification and characterization of dendritic, parallel, pinnate, rectangular, and trellis networks based on deviations from planform self-similarity. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(2), pp.1–21.
- Mesa. L.M.**, 2006. Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucuman, Argentina): *Environmental Geology*, V, 50, pp. 1235-1242.

- Miller. V. C.**, 1953. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Tech. Report n°3, Dept of Geology, Columbia University, New York, USA.
- Miller. V.C et Miller. C.F.**, 1961. Photogeology. Mc Craw-Hill Book Company. Inc., pp. 80-167.
- Morisawa. M.**, 1958. Measurement of drainage-basin outline form, *Journal of Geology*, vol. 66, pp. 587–591.
- Muller.**, 2007. Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II. 247p.
- Musy. A.**, 1998. Hydrologie appliquée, Editions \*H\*GXA\*, Bucares.368p.
- Musy, A. Hygy, C.**, 2005. Hydrologie est une science de la nature, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 314 p., 250 fig. et tabl., 16 x 24 cm, 54,00 2 0 AC (env. 86,50 CAD). ISBN 2-88074-546-2.
- Paget. A.**, 2008. Apport de la caractérisation du relief pour des applications risque. Synthèse du travail effectué depuis novembre 2006 au laboratoire COGIT/IGN concernant la caractérisation du relief sur les MNT. 189p.
- Pakhmode. V., Kulkarni. H et Deolankar. S.B.**, 2003, Hydrological-drainage analysis in watershed-program planning. a case from the Deccan basalt, India. *Hydrogeology Journal*. V, 11, pp. 595–604.
- Parvis. M.**, 1950. Drainage Pattern significance in airphoto identification of soils and bedrocks. *Photogramm. Eng.* 16, pp. 375-409.
- Pearce. A.J.**, 1990. Precessus de simulation de débit: l'expérience Australienne. *Water resources research USA*. Vol, n°12, pp. 3037-3047.
- Prud'homme. R.**, 1972. Analyse morphostructurale appliquée à l'Aquitaine occidentale et au Golfe de Gascogne; Définition d'une Méthodologie cartographique interprétative. Thèse d'Etat, Bordeaux 1, France, 405p.
- Pulido-Boche. A., Jiménez-Espinosa. R et Francisco Sánchez-Martos.**, 2001. Mapping groundwater quality variables using PCA and geostatistics : A case study of Bajo Andarax , Southeastern Spain. *Journal-des Sciences Hydrologiques*, pp. 227-242.
- Reddy. G.P.O., Maji. A.K et Gajbhiye. K.S.**, 2004. Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India - a remote sensing and GIS approach. *Applied Earth Observation and Geoinformation*. V. 6, pp.1–16.
- Ritter.**, 1995. Drainage basin Chapter 5, pp.137-158.
- Robinson. M. E. et Tawn. J. A.**, 2000. Extremal analysis of processes sampled at different frequencies. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Statistical Methodology*, 62,,pp. 117–135. Part 1.

- Roche. M.**, 1963. Hydrologie de surface. Gauthier - Villars Editeur - Paris. 431p.
- Rodriguez., Iturbe. I. et Valdes J. B.**, 1979. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*. Vol. 15, n° 6, pp. 1409-1420.
- Roux. C.**, 1996. Analyse des précipitations en hydrologie urbaine. Exemple de la Seine-Saint-Denis. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 291p.
- Rucquoi. S** “Cerema.” 2014. Méthode d'extraction d'indices géomorphologiques pour l'analyse du cheminement des eaux superficielles. pp.1–31.
- Saporta. G et Bouroche. JM.**, 1980. L'analyse des données. Pour la science, pp. 36-44.
- Scanvic. J.Y.**, 1983. Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. *Manuels et Méthodes. B.R.G.M. n°7. 158p.*
- Schumm. S.A.**, 1956. The role of creep and rainwash on the retreat of badland slopes. *American journal of science*. Vol 254, pp. 693-706.
- Shimazaki. H et Shinomoto. S.**, 2007. A method for selecting the bin size of a time histogram. *Neural Comput.* n°19, pp. 1503-1527.
- Shreve. R.L.**, 1966. Statistical Law of Stream Numbers. *Journal of Geology*. Vol, 74, pp.17–37.
- Singh. S et Dubey. A.**, 1994. Geo-environmental Planning of Watersheds in India. Vol, 28, Chugh, Allahabad, India.
- Sklash. M.G et Farvolden. R.N.**, 1979. The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 43, pp. 45-65.
- Strahler. A.N.**, 1957. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions. American Geophysical Union December*. Vol 38, n°6, pp. 913-920.
- Strahler. A.N.**, 1964. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks, In: VT Chow (ed), *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw Hill Book Company, New York, pp. 4–11.
- Tarboton. G.**, 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water resources research*. Vol 33, n°2, pp. 309–319.
- Tribe. A.**, 1992. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*. Vol 139, pp. 263-293.
- Velde. B., Dubois. J., Badri. A et Touchard. G.**, 1990. Fractal analysis of fractures in rocks. the Cantor's dust method, *Tectonophysics*, 179, pp. 345-352.
- Vogt. S., Forster. F et Hegg. C.**, 2002. Clark WSL – A method for the estimation of flood hydrographs in small torrential catchments. *Proceedings of the International Conference on Flood Estimation*, 6-8 Mars, Berne, Switzerland, pp. 739-747.

- Weishar. L.L., Teal. J.M et Hinkle. R.**, 2005, Stream order analysis in marsh restoration on Delaware Bay. *Ecological Engineering*. Vol 25, n°3, pp. 252-259.
- Whipkey. R.Z.**, 1965. Subsurface storm flow from forested slopes. *Hydr. Sciences.Bulletin*. Vol 10, n°2, pp. 74-85.
- Wilson. J.P., Aggett. G., Deng. Y et Lam. C.S.**, 2008. Water in the Landscape: A Review of Contemporary Flow Routing Algorithms. *Advances in Digital Terrain Analysis.Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, pp. 213-236.
- Zernitz. E. R.**, 1932. Drainage patterns and their significance, *Journal of Geology*. Vol 40, pp. 498–521.
- Zhang. L. et Guilbert. E.**, 2012. A study of variables characterizing drainage patterns in river networks. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B2, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, pp. 29-34.