



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Faculté de génie de la construction
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie civil

Option : **Construction Hydraulique et Aménagement**

Thème

Contribution à l'évaluation des intensités pluviométriques et au calcul du débit sur le bassin versant du Sébaou

Soutenue publiquement le **16 octobre 2016**, devant le jury composé de :

Mr **Mouhamed DJEMMAI**

Président

Mlle **Souhila BEN KACI**

Examineur

Mr **Abd Ellah AMOUR**

Examineur

Thème proposé et dirigé par :

Mr Hocine HAMMOUM

Présenté par :

Lila BEN SI SAID

&

Malik BOUZELHA

Promotion : 2015-2016

Nous remercions notre promoteur monsieur **HAMMOUM Hocine**, pour avoir proposé et dirigé cette thèse, et pour sa rigueur dans le travail.

Un grand merci à madame **HAMMOUM née Karima BOUZELHA**, pour ces précieux conseils qui nous ont guidés dans l'élaboration de ce mémoire de fin d'études.

Merci à monsieur **DJEMAI Mouhamed**, Mlle **BEN KACI Souhila** et monsieur **AMOUR Abd Ellah** qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail.

Que monsieur **BOUZIDA Réda** conseillé à AGC et ingénieur d'état trouve ici nos remerciements pour nous avoir confié toutes les données de précipitation du bassin versant du Sébaou.

Toute notre gratitude s'adresse à tous le personnel de :

- ✓ African Geosystem Company (AGC)
- ✓ ANRH de Tizi Ouzou
- ✓ DREW de Tizi Ouzou

Enfin, nous remercions tous les enseignants qui nous ont suivis tout le long de notre cursus de Master, et un grand merci à tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail.



Dédicaces

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À :

Mes très chers parents

Mes chères sœurs et leurs époux

Mes chers frères et leurs épouses

Ma belle-famille, en particulier mon mari

Toute la promotion : 2015-2016



LILA
LILA

Dédicaces

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À :

Mes très chers parents

Mes chers frères et leurs épouses et ma très chère sœur

Mes chers cousins et leurs parents

Tous mes amis (es) sans exception

Tous mes camarades de la promotion CHA : 2015-2016



MALIK
MALIK

INTRODUCTION GENERALE	10
CHAPITRE 1 GENERALITE SUR L'HYDROLOGIE	
1.1 INTRODUCTION	12
1.2 QUELQUES GENERALITES SUR L'HYDROLOGIE.....	13
1.2.1 CYCLE HYDROLOGIQUE	13
1.2.2 PRECIPITATIONS	15
1.2.2.1 Type de précipitations.....	15
1.2.2.2 Appareilles de mesures des précipitations	17
1.2.2.3 Station pluviométrique.....	19
1.2.2.4 Averses et intensités.....	19
1.2.2.5 Fréquences	19
1.2.3 BASSIN VERSANT.....	20
1.2.3.1 Caractéristiques générales d'un bassin versant.....	21
1.3 CONCLUSION.....	23
CAPITRE 2 ELABORATION DES CARTES D'INTENSITES PLUVIOMETRIQUES FREQUENTIELLE	
2.1 INTRODUCTION	24
2.2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	24
2.2 CALCUL DES INTENSITES PLUVIOMETRIQUES FREQUENTIELLES.....	26
2.2.1 Calcul des précipitations moyennes annuelles et maximales journalières.....	26
2.2.2 Précipitations maximales journalières fréquentielles.....	28
2.2.3 Palcul des intensités pluviométriques fréquentielles	29
2.3 ELABORATION DES CARTES	30
2.3.1 Construction de la base de données	30
2.3.2 Création des stations pluviométriques sur mapinfo	32
2.3.3 Représentation des intensités pluviométriques fréquentielles	34
2.3.4. Analyse et discussion des cartes	44
2.4 CONCLUSION.....	45

CHAPITRE 3 PRESENTATION DES METHODES DE CALCUL DE L'INTENSITE PLUVIOMETRIQUE MOYENNE

3.1 INTRODUCTION	46
3.2 METHODES CLASSIQUES	46
3.2.1 Méthode de la moyenne arithmétique.....	46
3.2.2 Méthode des polygones de Thiessen.....	46
3.2.3 Méthode des isohyètes (isovaleurs).....	47
3.2.4 Méthode des deux axes	48
3.3 METHODE DES ELEMENTS FINIS.....	50
3.3.1 Approximation nodale	50
3.3.2 Quadrature de Gauss.....	52
3.3.3 Approximation nodale par sous domaines.....	53
3.3.3.1 Discrétisation en choisissant l'élément de référence	53
3.4 CONCLUSION.....	59

CHAPITRE 4 CALCUL DES INTENSITES PLUVIOMETRIQUES MOYENNES ET DE LA QUANTITE DE PLUIE

4.1 INTRODUCTION	60
4.2 DETERMINATION DE L'INTENSITE PLUVIOMETRIQUE MOYENNE (SANS ALTITUDE)	60
4.2.1 Discrétisation du bassin versant du sébaou.....	60
4.2.2 Architecture informatique du programme de calcul	63
4.2.3 Résultats du calcul de l'intensité moyennes	67
4.3 DETERMINATION DE L'INTENSITE PLUVIOMETRIQUE MOYENNE EN CONSIDERANT L'EFFET D'ALTITUDE.....	68
4.3.1 Relations d'interpolation.....	68
4.3.2 Aménagements apportés au programme fortran élaboré	71
4.3.3 Résultat de différentes intensités moyennes	71
4.4 CALCUL DES QUANTITES DE PLUIE.....	71
4.5 CONCLUSION.....	72

CONCLUSION GENERALE	73
References bibliographiques	74
Annexe 1 Programme développé sur Fortran.....	75
Annexe 1.a Fichiers de données de la méthode arithmétique.....	82
Annexe 1.b Fichier de donnée de la table de connectivité.....	85
Annexe 1.c Fichier de donnée des isohyètes	87
Annexe 1.d Fichier de donnée de la méthode des deux axes.....	88
Annexe 1.e Fichier de données de la méthode de Thiessen.....	91
Annexe 2 Carte pluviométrique de l'Algérie du nord.....	94

Figure 1.1 : Cycle de l'eau	14
Figure 1.2 : Précipitations par convection.....	16
Figure 1.3 : Précipitations orographiques.....	16
Figure 1.4 : Précipitation frontale.....	17
Figure 1.5 : Pluviomètre.....	18
Figure 1.6 : Pluviographe.....	18
Figure 1.7 : Représentation d'un bassin versant.....	20
Figure 1.8 : Représentation d'un bassin versant topographique et hydrogéologique.....	21
Figure 1.9 : Différentes formes de bassin versant.....	22
Figure 1.10 : Classification d'un réseau hydrographique.....	22
Figure 2.1 : Les sous bassins du bassin versant du Sébaou.....	25
Figure 2.2 : Limites géographique de la zone d'étude.....	25
Figure 2.3 : Répartition des stations pluviométriques à l'intérieur et autour du bassin versant du Sébaou.....	26
Figure 2.4 : Représentation des délimitations du bassin versant du Sébaou.....	32
Figure 2.5 : Extrait de la base de données.....	33
Figure 2.6 : Représentation des stations pluviométriques sur le bassin du Sébaou.....	33
Figure 2.7 : Bassin versant Sébaou et les stations pluviométriques.....	34
Figure 2.8 : Interpolation de l'intensité.....	35
Figure 2.9 : Résultat de l'interpolation.....	35
Figure 2.10 : Représentation de la méthode.....	36
Figure 2.11 : Résultat des courbes d'intensité.....	36
Figure 2.12 : Reclassification des résultats d'interpolation.....	37
Figure 2.13 : Résultat de la reclassification.....	37
Figure 3.1 : Représentation des polygones de Thiessen.....	47
Figure 3.2 : Représentation des isohyètes.....	48
Figure 3.3 : Méthode des deux axes.....	49
Figure 3.4 : Représentation d'un bassin versant avec des stations pluviométriques.....	53
Figure 3.5 : Forme d'éléments a une dimension.....	53
Figure 3.6 : Forme d'éléments a deux dimensions.....	54
Figure 3.7 : Forme d'éléments à une dimension.....	54
Figure 3.8 : Maillage quadrilatéral.....	55
Figure 3.9 : Transformation géométrique.....	55
Figure 4.1 : Représentation des polygones de Thiessen.....	61
Figure 4.2 : Tracé des isohyètes d'intensité pluviométrique.....	62
Figure 4.3 : Tracé des deux axes EF et CD.....	62
Figure 4.4 : Discrétisation quadrilatérale du bassin versant du Sébaou.....	63

Figure 4.5 : Relation entre l'intensité pluviométrique et l'altitude dans le Bas Sébaou.....	69
Figure 4.6 : Relation entre l'intensité pluviométrique et l'altitude dans le Moyen Sébaou.....	70
Figure 4.7 : Relation entre l'intensité pluviométrique et l'altitude dans le Haut Sébaou	70

TABLEAU 2.1 : PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES (ANNEES 1995 A 2011) [AGC].....	27
TABLEAU 2.2 : PRESENTATION DES PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES ET MAXIMALES JOURNALIERES.....	28
TABLEAU 2.3 : VALEURS DE LA VARIABLE DE GAUSS (U).....	29
TABLEAU 2.4 : VALEURS DE $P_{JMAX\%}$	29
TABLEAU 2.5 : INTENSITES PLUVIOMETRIQUES FREQUENTIELLES	30
TABLEAU 2.6 : RECAPITULATIF DES RESULTATS DE CALCUL.....	31
TABLEAU 3.1 : LES DIFFERENTES BASES POLYNOMIALES A UNE ET DEUX DIMENSIONS TIRE A PARTIR DU TRIANGLE DE PASCAL	56
TABLEAU 4.1 : DIFFERENTES UNITES UTILISEES	66
TABLEAU 4.2 : VALEURS DES INTENSITES MOYENNES CALCULEES.....	68
TABLEAU 4.3 : VALEURS DES INTENSITES MOYENNES CALCULEES.....	71
TABLEAU 4.4 : RESULTATS DE CALCUL DE LA QUANTITE DE PLUIE	72

Résumé

Le bassin versant du Sébaou appartient à la région Algérois Soummam Hodna, il fait parti de l'ensemble des sous bassins du côtier Algérois, il représente le bassin versant du cours d'eau Oued Sébaou. Le bassin versant du Sébaou à une superficie totale avoisinant les 2500 Km², il se situe entre les coordonnées 4086.00 Km Nord, 4034.00 Km sud, 645.00 Km Est et 566.00 Km Ouest, sellant le système de projection géographique Universel Transverse Mercator WGS 84 Zone 31 Nord (UTM WGS 84 Zone 31 N), avec un relief hétérogène de différentes orientations. Il a donc une intensité pluviométrique fréquentielle qui varie le long du bassin versant, de cette idée nous nous sommes inspirer pour construire des cartes d'intensités pluviométriques de différentes fréquences, comme premier pas.

Puis pour dimensionner les ouvrages nous avons besoin de connaitre le débit, à cet effet, nous avons programmé un algorithme permettant de calculer le débit qui tombe sur une région donnée d'une autre part.

Mots clé : Intensité fréquentielle, précipitation, débit, bassin versant

Abstract

Sebaou the watershed belongs to the region of Algiers Soummam Hodna, it belongs to all under the Algiers coastal basins, it represents the watershed of the river Oued Sebaou. The watershed Sebaou with a total area of around 2,500 km², it is between 4086.00 Km North coordinates 4034.00 Km south, 645.00 Km East and 566.00 Km West, saddling the geographical projection system Universal Transverse Mercator WGS 84 Zone 31 North (UTM WGS 84 Area 31 N), with a heterogeneous relief of different orientations. It therefore has a frequency rainfall intensity that varies along the basin versant, this idea we inspire to build rainfall intensities cards of different frequencies, as a first step.

Then to size the books we need to know the flow, to this end, we have programmed an algorithm to calculate the flow rate that falls on a region of the other.

Keywords: frequency intensity, precipitation, flow, catchment

A_i : Superficie entre deux courbes de niveau.

h_i : Elévation moyenne entre les deux courbes.

A : Superficie du bassin versant.

σ : Ecart type.

P_0 ; Pluie moyenne annuelle.

$P_{j\max\%}$: pluie journalière maximale de fréquence donnée [mm].

$P_{j\max}$: Moyenne des précipitations maximales journalières [mm].

C_v : Coefficient de variation.

U : Variable de Gauss pour une période donnée.

$I(f\%)$: Intensité de précipitation pour une fréquence $f\%$ (l/s/ha).

t : Durée de l'averse.

b : Exposant climatique, pris égal à 0,42 pour la wilaya de TIZI.OUZOU.

S_i : Superficie du polygone de la station i .

H_i : Hauteur enregistrée sur la station i .

S_i : Superficie comprise entre l'isohyète i et $i+1$.

h_i : Hauteur de précipitation de l'isohyète.

V_i : Variables nodales.

N_i : Fonction d'interpolation nodales.

Introduction générale

Dans le calcul déterministe d'ingénierie, l'ingénieur fait appel au calcul hydrologique pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, tels que les réseaux d'assainissement, les déversoirs d'orage, les bassins d'orage, les stations d'épuration...etc. Leur dimensionnement se fait suivant une période de retour de crue donnée. Un réseau d'assainissement se calcule suivant une fréquence de précipitation décennale (10 ans). Une retenue collinaire est dimensionnée pour une fréquence vingtennale (20 ans) ou cinquantiennale (50 ans), en fonction de son site d'implantation, tenant compte du risque sur les vies humaines et les pertes de biens. Les ouvrages de lutte contre les inondations (bassins ou déversoirs d'orage) sont dimensionnés en fonction d'une période de retour cinquantiennale (50 ans), quant aux barrages, ils sont dimensionnés suivant une fréquence de retour de crue centennale (100 ans) voir millénaire (1000 ans), en fonction de leurs importances et leurs emplacements.

Sachant que ces ouvrages sont destinés à contenir, à retenir ou à acheminer une quantité d'eau, leur dimensionnement fait donc appel au calcul du débit (Q). Le dénominateur commun entre le débit et la fréquence est l'intensité de pluie notée (I), qui diffère d'une région à une autre et d'un bassin versant à un autre, tenant compte de plusieurs paramètres, comme la météorologie de la région, le relief ainsi que son orientation et l'étendue de la superficie du bassin. Ce qui nous amène à des intensités différentes au sein même d'un bassin ou d'un sous bassin versant.

La Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Tizi Ouzou (DREWTO), pour simplifier le calcul, préconise de prendre la valeur de 150 l/s/ha comme valeur moyenne de l'intensité pluviométrique de fréquence décennale pour la wilaya de Tizi Ouzou, pour le dimensionnement des certains ouvrages communs. Le Sébaou, étant un bassin versant d'une superficie très étendue (2500 Km² [ANRH]) et d'un relief très hétérogène (collines, vallées et montagnes), entraîne une large variation des intensités pluviométriques fréquentielles par rapport à la valeur préconisée par la DREW. Ceci amène l'ingénieur concepteur à se poser la question suivante : *Avec quelle valeur de l'intensité pluviométrique fréquentielle doit-on dimensionner notre ouvrage ?*

Le dimensionnement d'un ouvrage hydraulique implanté dans une région où l'intensité pluviométrique décennale est inférieure à celle que préconise la DREW ($I < 150$ l/s/ha) entraînerait un surdimensionnement, et par voie de conséquence un surcoût du projet. A l'inverse si l'intensité pluviométrique est supérieure à celle préconisée ($I > 150$ l/s/ha) ceci

entraînerait un sous-dimensionnement et donc un risque sur les biens, voir même sur les vies humaines.

A cet effet, il serait souhaitable de connaître l'intensité pluviométrique fréquentielle à n'importe quel point à travers tous le bassin du Sébaou qui est objet de notre étude, pour pouvoir dimensionner les ouvrages avec la valeur la plus juste et la plus réaliste possible.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude, que nous pouvons qualifier aujourd'hui de recherche appliquée, qui consiste à établir des cartes d'intensités pluviométriques dans le bassin versant du Sébaou. Ces cartes permettent de connaître l'intensité pluviométrique à n'importe quel point de cet espace, pour constituer un bel outil d'aide à la décision.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres, répartis comme suit :

Le chapitre premier, est consacré à la présentation de quelques définitions et généralités sur l'hydrologie ayant trait aux précipitations pluviométriques dans un bassin versant.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons une note de calcul permettant de quantifier l'intensité pluviométrique fréquentielle. Nous présentons le cheminement à suivre pour l'élaboration des cartes de différentes intensités pluviométriques fréquentielles, permettant de connaître à n'importe quel point du bassin versant du Sébaou l'intensité pluviométrique fréquentielle désirée (Décennale, vingtennale, vingtcinquennale, cinquennale, centennale).

Nous nous intéressons, dans le troisième chapitre, à la présentation des différentes méthodes de calcul de l'intensité pluviométrique fréquentielle moyenne, et de la quantité de pluie totale tombée sur une région donnée, à savoir les méthodes classiques (la méthode de Thiessen, la méthode des isohyètes ainsi que la méthode des deux axes) et la méthode des éléments finis.

Et pour finir, nous consacrons le quatrième chapitre à l'organisation informatique des méthodes développés au chapitre trois. Ainsi un programme informatique suivant les normes Fortran 95 est mis au point pour évaluer l'intensité pluviométrique moyenne et la quantité de pluie tombée sur le bassin versant du Sébaou.

1.1 Introduction

L'hydrologie joue un rôle capital dans le domaine de l'ingénierie et des sciences environnementales. Elle concerne les mécanismes des eaux dans les systèmes naturels (bassin versant) ou anthropisés (zones industrielles ou urbanisées). Elle permet de mieux comprendre et simuler le comportement dynamique des eaux dans les zones où elles se répondent.

En Algérie et plus précisément sur le bassin versant du Sébaou, qui est notre région d'étude, plusieurs études et travaux hydrologiques ont été réalisés. Dans ce qui suit et dans le cadre de notre étude, nous présentons quelques travaux effectués.

SELTZER (1946), dans une étude traitant sur le climat en Algérie « **Le Climat de l'Algérie** » et en se basant sur des données climatiques recueillies entre 1913 et 1938 a dressé une carte pluviométrique où il a défini trois lois régissant la répartition des pluies en Algérie, comme suit :

- la hauteur de pluie augmente avec l'altitude. Elle est plus élevée sur les versants exposés aux vents humides que sur les autres,
- elle augmente de l'Ouest vers l'Est,
- elle diminue à mesure qu'on s'éloigne du littoral méditerranéen vers le Sud.

AISSANI et LABORDE (1992) ont dressé une **carte pluviométrique de l'Algérie du nord**, dans le cadre du **projet PNUD : étude des ressources en eau d'Algérie (ALG 88/021)**. Sur cette carte on peut lire que les paramètres statistiques des précipitations ont été estimés sur 465 postes pluviométriques pour une période de 60 ans (1922 - 1960 et 1969 - 1989). Cette carte permet d'estimer les moyennes annuelles à n'importe quel endroit situé sur la zone d'étude qui est le nord de l'Algérie.

En 1998, **KHEROUF et SI SALEM**, dans le cadre de leur projet de fin d'études intitulé « **Le calcul numérique de la pluviométrie de la wilaya de TIZI-OUZOU par la méthode des éléments finis** » ont procédé au calcul de la quantité de précipitation tombée dans la région de Tizi Ouzou, plus précisément dans le bassin versant du Sébaou, en utilisant une approximation par élément fini. Les résultats obtenus ont été confrontés à ceux obtenus avec les méthodes dites classiques : la moyenne arithmétique, la méthode des deux axes, la méthode des isohyètes et la méthode de Thiessen. L'étude est basée sur les données de 36 stations pluviométriques de l'année 1994, collectées auprès de la direction de l'hydraulique de la wilaya de Tizi Ouzou (DHWTO).

YAKOUB (2006), dans le cadre de sa thèse de doctorat intitulée « **L'eau dans le bassin versant du Sébaou et la wilaya de Tizi Ouzou : Evaluation, contraintes et recommandations** » s'est intéressé à la collecte d'un maximum de données relatives aux problèmes de l'eau dans le bassin versant du Sébaou et la wilaya de Tizi-Ouzou. Son objectif est d'apporter de nouvelles informations portant particulièrement sur l'hydrologie, les facteurs hydrologique, l'environnement de la région et de poser des bilan hydrique de la nappe alluviale élaborés par différentes méthodes. Pour mener son étude, il s'est basé sur deux ensembles géographiques distincts. Le premier, défini à partir des critères naturels, concerne le bassin versant du Sébaou et le deuxième est établi à partir d'un découpage géomorphologique de la wilaya. Dans son étude, il a proposé des relations entre la pluviométrie et l'altitude ; à savoir ;

- pour le lot des stations Nord : $P(\text{mm})=0.768H(\text{m})+758$,
- pour le lot des stations Sud : $P(\text{mm})=0.576H(\text{m})+522$.

En s'inspirant de tous ces travaux, nous proposons, dans le cadre de notre étude, l'élaboration des cartes d'intensités pluviométriques à l'échelle du bassin versant du Sébaou et le calcul de la quantité de pluie totale tombée sur la région.

Vu la complexité et l'étendue de ce domaine, nous nous intéresserons dans ce chapitre, aux généralités liées a notre étude. Donc pour ce faire nous présenterons quelques définitions et notions de base sur l'eau, les précipitations, la fréquence, l'intensité et le bassin versant.

1.2 Quelques généralités sur l'hydrologie

L'eau étant la principale source de vie, elle est sujette à un intérêt particulier de la part de l'homme, qui prolifère et se développe autour d'elle. Sa disponibilité sous ses différents états ; solide (neige, glace.), liquide et gazeux (brouillard, vapeur, etc.), l'inégalité de sa distribution sur la planète et la maîtrise ou non de cet élément, joue un rôle capital sur la seine géopolitique mondial.

L'hydrologie est une science qui s'intéresse à l'étude des échanges entre l'atmosphère, la surface terrestre et son sous-sol, un ensemble qui est appelé Hydrosphère. L'ensemble de ces échanges dans l'hydrosphère forme le cycle hydrologique.

1.2.1 Cycle hydrologique

Le cycle hydrologique est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre. Il est représenté de façon schématique par la figure (1.1). Les principales phases de ce cycle sont [LABORD] :

- l'évaporation d'eau des océans, du sol et des plantes ;
- la formation de nuages dans l'atmosphère et leur transport par le vent ;
- la condensation de l'eau et les précipitations sous toutes formes (pluie, neige, grêle, etc.) ;
- le ruissellement de surface, l'infiltration, la percolation, l'écoulement souterrain et le retour en surface (sources, puits, etc.) ;
- l'évaporation et la répétition du cycle.

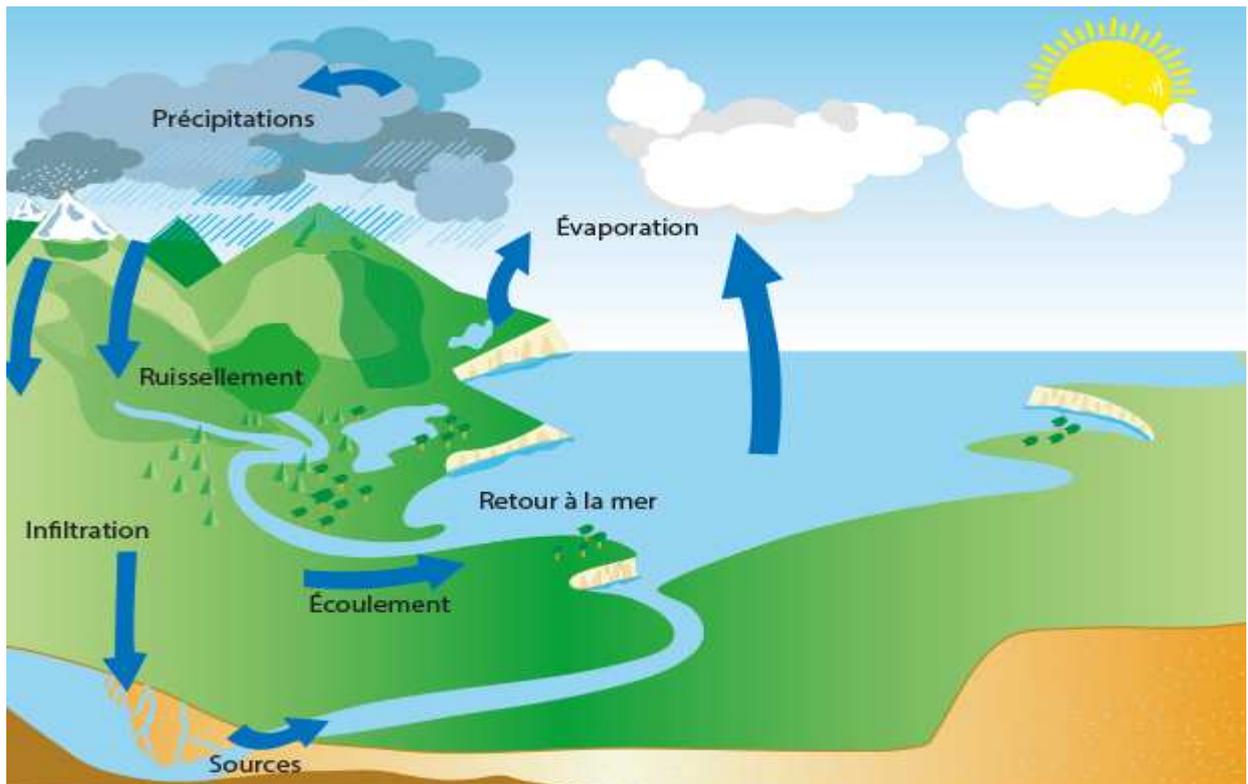


Figure1.1 : Cycle de l'eau.

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau évaporée à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère. L'élévation d'une masse d'air humide permet le refroidissement général nécessaire pour l'amener à saturation et provoquer la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes constituant les nuages, en présence de noyaux de condensation. Puis la vapeur d'eau, transportée et temporairement emmagasinée dans les nuages, est restituée par le biais des précipitations aux océans et aux continents. Une partie de la pluie qui tombe peut être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère. La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol. Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe

souterraine. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur, le soleil, organe vital du cycle hydrologique. Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi concomitants. Le cycle hydrologique n'a donc ni commencement ni fin.

1.2.2 Précipitations

Les précipitations sont toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (pluie) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

La vapeur d'eau de l'atmosphère se transforme en liquide lorsqu'elle atteint le point de rosée par refroidissement ou augmentation de pression. Pour produire la condensation, il faut également la présence de certains noyaux microscopiques, autour desquels se forment des gouttes d'eau condensées. La source de ces noyaux peut être océanique (chlorides, en particulier Na Cl produit par l'évaporation de la mer), continentale (poussière, fumée et autres particules entraînées par des courants d'air ascendants) ou cosmiques (poussières météoriques). Le déclenchement des précipitations est favorisé par la coalescence des gouttes d'eau. L'accroissement du poids leur confère une force de gravité suffisante pour vaincre les courants ascendants et la turbulence de l'air, et atteindre le sol. Enfin, le parcours des gouttes d'eau ou des flocons de neige doit être assez court pour éviter l'évaporation totale de la masse.

1.2.2.1 Type de précipitations

- **Précipitations de convection :** Elles résultent d'une ascension rapide des masses d'air dans l'atmosphère (figure 1.2). Elles sont associées aux cumulus et cumulonimbus, à développement vertical important. Les précipitations résultantes de ce processus sont en général orageuses, de courte durée (moins d'une heure), de forte intensité et de faible extension spatiale.

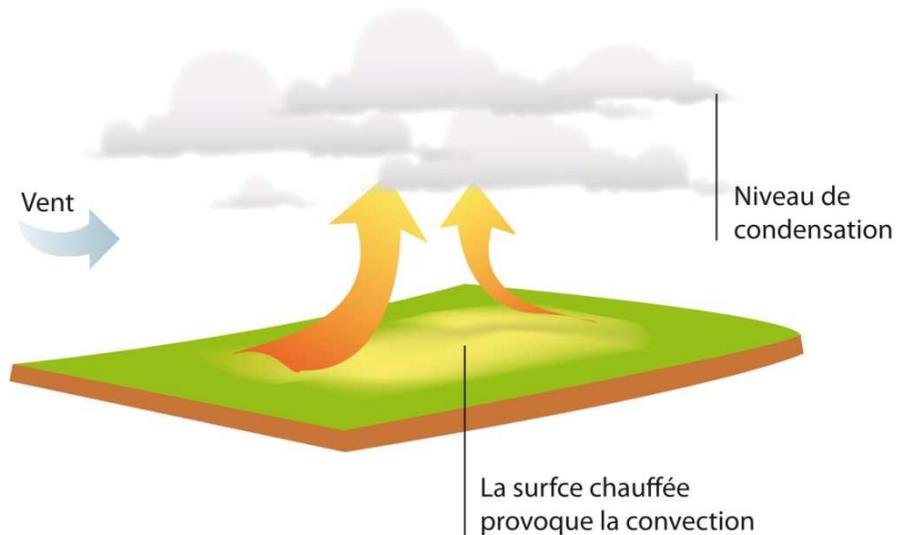


Figure 1.2 : Précipitations par convection

- **Précipitations orographiques (de relief) :** Comme son nom l'indique (du grec oros, montagne), ce type de précipitations résulte de la rencontre entre une masse d'air chaude et humide et une barrière topographique particulière (figure 2.2). Par conséquent, ce type de précipitations n'est pas « spatialement mobile » et se produit souvent au niveau des massifs montagneux. Les caractéristiques des précipitations orographiques dépendent de l'altitude, de la pente et de son orientation, mais aussi de la distance séparant l'origine de la masse d'air chaud du lieu de soulèvement. En général, elles présentent une intensité assez régulière.

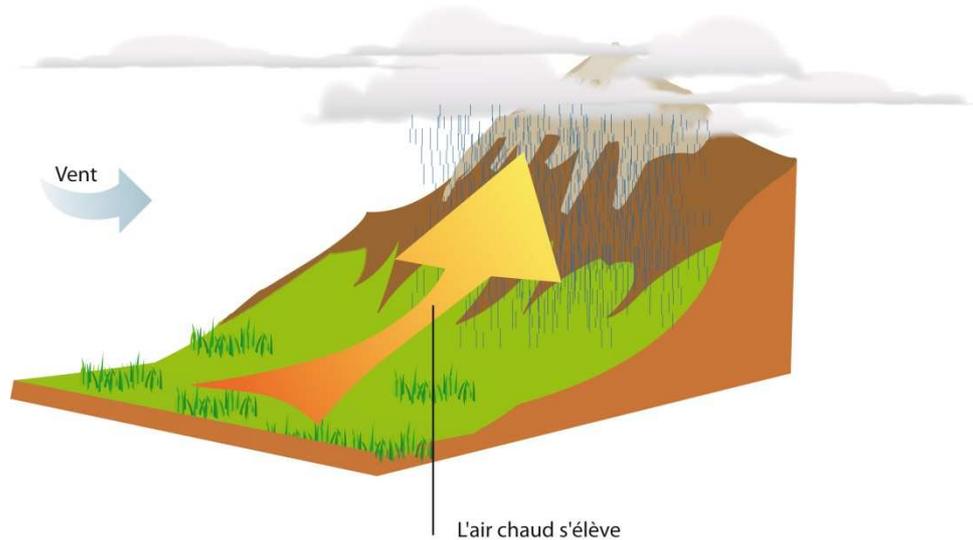


Figure 1.3 : Précipitations orographiques

- **Précipitations frontales :** Ou de type cyclonique. Elles sont associées aux surfaces de contact entre deux masses d'air de température, de gradient thermique vertical, d'humidité et de vitesse de déplacement différentes, que l'on nomme « fronts » (figure 1.4). Les fronts froids (une masse d'air froide pénètre dans une région chaude) créent des

précipitations brèves, peu étendues et intenses. Du fait d'une faible pente du front, les fronts chauds (une masse d'air chaude pénètre dans une région occupée par une masse d'air plus froide) génèrent des précipitations longues, étendues, mais peu intenses.

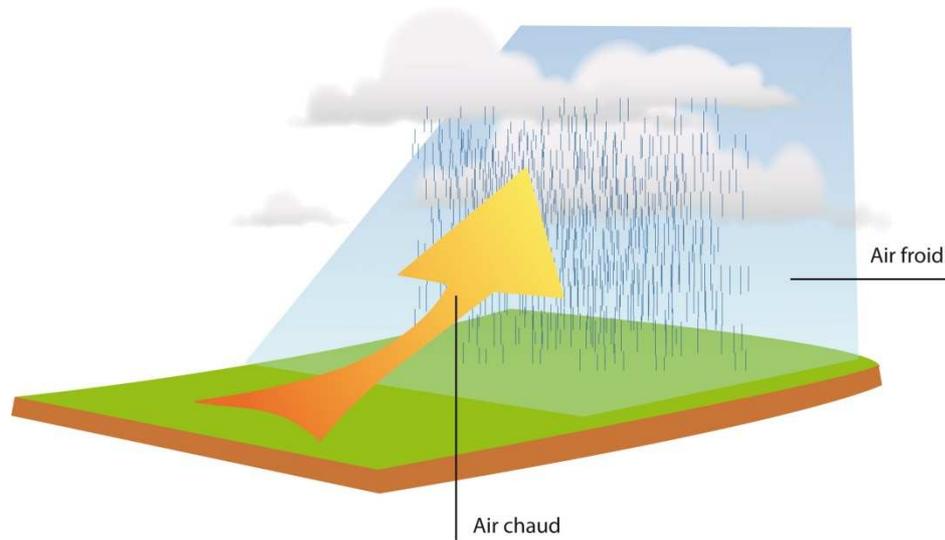


Figure1.4 : Précipitation frontale

1.2.2.2 Appareilles de mesures des précipitations [LLAMAS]

Pour mesurer les hauteurs de précipitations ou la lames de précipitations au niveau d'un point donné, on utilise un appareil dont le principe consiste tout simplement à canaliser les précipitations pour en mesurer le volume ou la masse d'eau (manuellement ou automatiquement).

L'unité utilisée est le mm (millimètre) ou L/m² (litres par mètre carré). Le "mm" correspond en volume, à une hauteur d'eau de 1 mm sur une surface plane de 1 m² (soit 1L). La plupart des pluviomètres ont une résolution de lecture ou d'enregistrement comprise entre 0.1 et 1mm.

Les appareils les plus simples et les plus utilisés sont le pluviomètre et le pluviographe.

- **Le pluviomètre** : Est un instrument de base de la mesure des précipitations liquides ou solides. Il indique la quantité d'eau totale précipitée et recueillie à l'intérieur d'une surface calibrée dans un intervalle de temps séparant deux relevés (figure1.5).



Figure 1.5 : Pluviomètre

- **Le pluviographe** : Est un instrument captant la précipitation de la même manière que le pluviomètre mais avec un dispositif permettant de connaître, outre la hauteur d'eau totale, leur répartition dans le temps, autrement dit les intensités (figure 1.6).



Figure 1.6 : Pluviographe

L'emplacement de ces appareils nécessite une certaine logique, car ils doivent pouvoir capter la pluie sans que la mesure soit gênée par des obstacles (mur, abri, etc.). Il faut veiller à ce que la pluie inclinée en cas de vent soit correctement mesurée, donc éviter le long d'un mur ou arbre pour ce dernier cas. Il faut aussi penser à l'accessibilité pour le recueil des

informations, le contrôle, l'entretien (feuilles, brindilles pouvant obstruer l'orifice) et les réparations.

Le site d'emplacement de ces unités de mesure est appelé station pluviométrique.

1.2.2.3 Station pluviométrique

Une station pluviométrique est le site où est installé un ou plusieurs appareils, permettant de mesurer les quantités de précipitations de façon ponctuelle.

Un ensemble de stations pluviométriques forme un réseau d'observation qui permettra d'élargir l'information sur une région donnée, et donc de pouvoir, estimer l'intensité des précipitations, avoir un aperçu sur l'évolution ou du climat, calculer la quantité de pluie tombé dans cette région...etc.

1.2.2.4 Averses et intensités

On désigne en général par "averse" un ensemble de pluies associées à une même perturbation météorologique bien définie. La durée d'une averse peut varier de quelques minutes à une centaine d'heures et intéresser une superficie allant de quelques kilomètres carrés (orages), à quelques milliers (pluies cycloniques). On définit finalement une averse comme un épisode pluvieux continu, pouvant avoir plusieurs pointes d'intensité.

L'intensité d'une averse est le rapport entre la hauteur des précipitations et la durée de l'averse.

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1.1)$$

avec :

i : intensité de l'averse [mm/h, mm/min] ;

Δh : hauteur des précipitations de l'averse [mm] ;

Δt : durée de l'averse [h ou min].

1.2.2.5 Fréquences

On considère une averse de durée t et d'intensité i . Si au cours d'une période de N années on a enregistré n fois cette averse, on dira que la fréquence de cette averse est :

$$F = \frac{n}{N} \quad (1.2)$$

On dira que l'averse est de fréquence un an (annuelle), deux ans (bisannuelle), cinq ans, dix ans (décennale, etc.) si cette averse survient en moyenne une fois tous les ans, tous les deux ans, cinq ans, dix ans...etc.

On appelle période de retour T ou intervalle de récurrence θ d'une averse, l'inverse de sa fréquence.

$$T = \theta = \frac{1}{F} = \frac{N}{n} \quad (1.3)$$

1.2.3 Bassin versant [MUSY]

Un bassin versant est une portion de territoire dont l'ensemble des eaux convergent vers un même point de sortie appelé exutoire : cours d'eau, lac, mer ou océan. Chaque bassin versant se subdivise en un certain nombre de bassins élémentaires appelés « sous-bassin versant » correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal

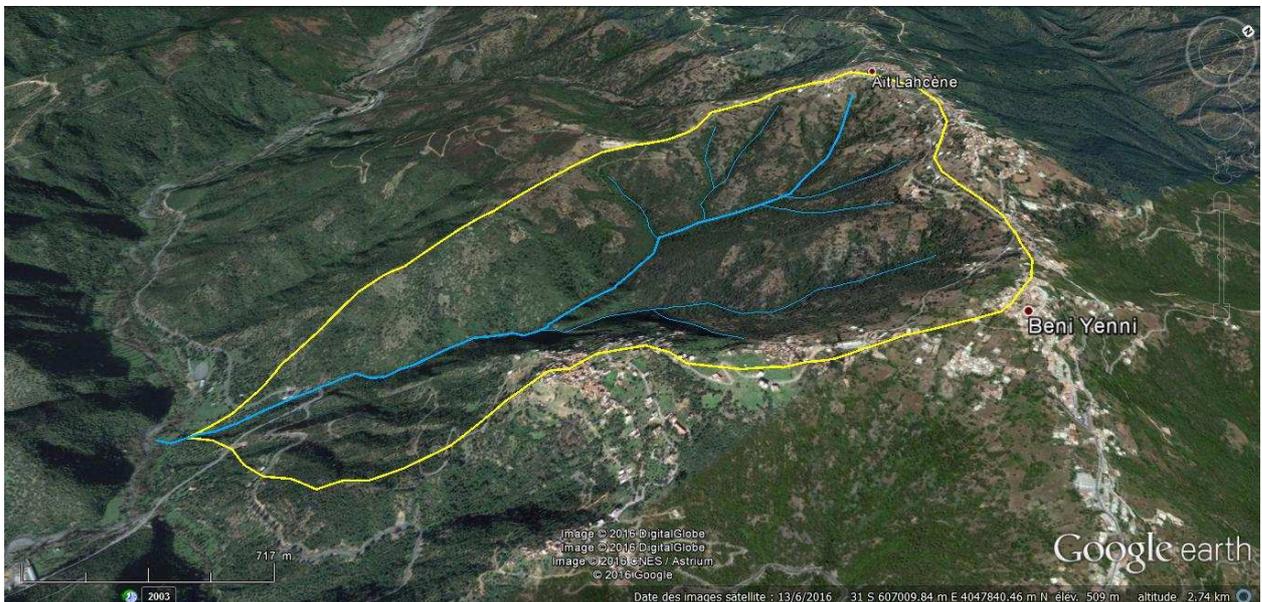


Figure 1.7 : Représentation d'un bassin versant

On distingue, comme le montre la figure 1.8, le bassin versant physique ou topographique (définissable à partir des altitudes seules) et le bassin versant réel qui tient compte d'autres paramètres comme la nature du sol, qui induit des écoulements souterrains, ou les aménagements anthropiques.

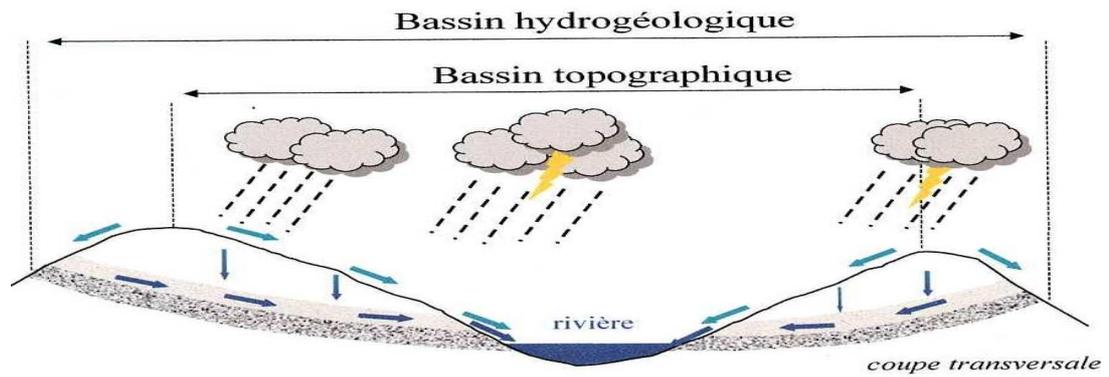


Figure 1.8 : Représentation d'un bassin versant topographique et hydrogéologique

1.2.3.1 Caractéristiques générales d'un bassin versant

Les caractéristiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique et notamment sur le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Le temps de concentration, qui se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin à son exutoire, est influencé par diverses caractéristiques du bassin versant. Celles-ci concernent prioritairement la surface, la forme du bassin versant, son élévation et sa pente auxquelles viennent s'ajouter le réseau hydrographique.

- **Surface** : Est l'aire de la portion du plan délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin
- **La forme** : Elle est la représentation graphique de la projection du bassin sur le plan horizontal. Elle se définit par plusieurs indices ou coefficients, comme
 - Le coefficient de compacité de GRAVELIUS (K_c), qui est le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence d'un cercle de même surface que le bassin. Si A est la surface du bassin en Km^2 et P son périmètre en km , le coefficient K_c est égal à :

$$K_c = \frac{p}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{p}{\sqrt{A}} \quad (1.4)$$

Ce coefficient nous renseigne sur la forme géométrique du bassin. K_c est égal à 1 lorsque le bassin est circulaire, il est égal à 1.128 lorsque le bassin est carré et il tend vers 3 pour des bassins très allongés.

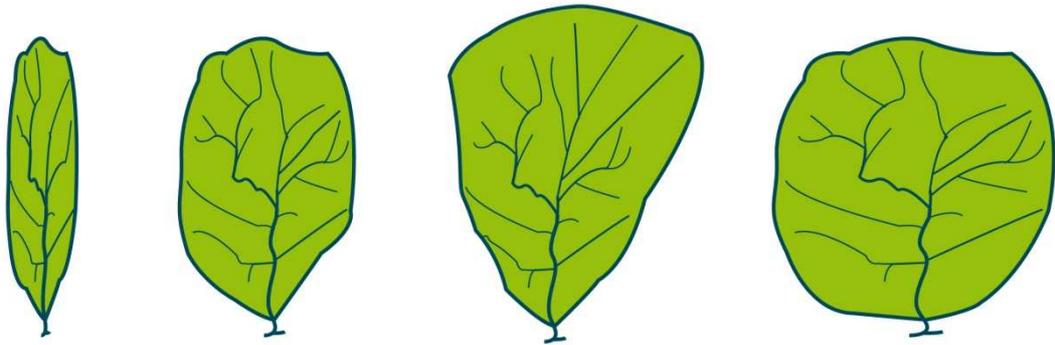


Figure 1.9 : Différentes formes de bassin versant

– Le coefficient d'élanement de SCHUMM (R_e), qui est le rapport entre le diamètre (D) d'un cercle de même superficie (A) que le bassin et la longueur maximal (L_m) du bassin.

$$R_e = \frac{D}{L_m} = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L_m} \quad (1.5)$$

Il nous renseigne sur le relief du bassin. Il varie entre 1 pour des bassins plats et 0.6 pour les bassins dont le relief est accentué.

Il y'a aussi d'autres coefficients qui sont utilisés comme le facteur de forme défini par Horton, le rayon de circularité...etc.

- **Réseau hydrographique** : Le réseau hydrographique, aussi appelé chevelu hydrographique, est un ensemble hiérarchisé et structuré de chenaux qui assurent le drainage superficiel, permanent ou temporaire, d'un bassin versant ou d'une région donnée. [LABORD]

Il est composé d'un collecteur principal, cours d'eau principal, au quel viennent se rejoindre une série de tributaires dont les ramifications s'étendent vers les parties les plus hautes du bassin versant. La classification de ce réseau peut se faire de plusieurs méthodes, mais les plus utilisées sont celles de Strahler, de Horton et de Gravelius.

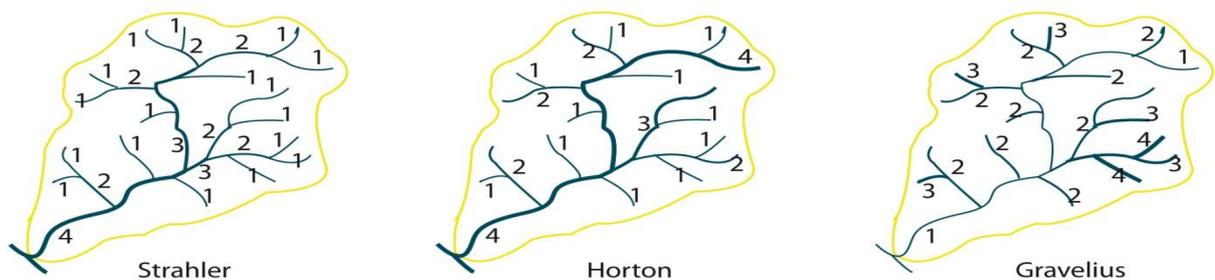


Figure 1.10 : Classification d'un réseau hydrographique

1.3 Conclusion

A travers ce chapitre nous avons rappelé quelques notions d'hydrologie que nous avons jugée utiles pour la réalisation de notre travail. Et comme nous l'avons précisé dans l'introduction générale, pour tout projet de calcul et dimensionnement d'un ouvrage hydraulique, une étude hydrologique s'impose. Cette étude fait appel au calcul de l'intensité pluviométrique du bassin versant concernant la région d'étude. C'est ainsi que nous consacrons le deuxième chapitre au calcul et à l'élaboration des cartes des intensités pluviométriques fréquentielles.

2.1 Introduction

Dans tout projet de calcul d'un ouvrage hydraulique, l'intensité pluviométrique fréquentielle s'impose. Habituellement cette intensité est donnée par la Direction des Ressources en Eau (DREW).

A travers ce chapitre, en se basant sur les observations de plusieurs stations pluviométriques recueillis auprès d'AGC (African Geosystem Company) du bassin versant du Sébaou, nous procédons à l'élaboration des cartes d'intensités pluviométriques fréquentielles (décennale, vingtennale, vingtcinquennale, cinquennale et centennale).

Pour ce faire, les données seront traitées avec Excel pour le calcul des intensités pluviométriques fréquentielles au niveau de chaque station. Chaque station sera ensuite située sur la carte du bassin versant du Sébaou qui avait été réalisé sur MapInfo et enfin le tout sera transféré sur ArcGis pour être analysé, interpolé et construire les cartes d'intensités pluviométriques fréquentielles du bassin versant du Sébaou.

2.2 Présentation de la Zone d'étude

Le bassin versant du Sébaou appartient à la région Algérois Soummam Hodna. Il fait parti de l'ensemble des sous bassins du côtier Algérois. Il représente le bassin versant du cours d'eau Oued Sébaou et est composé de six sous bassins principaux alimentant les affluents du Oued Sébaou à savoir : Oued Sébaou amant, Oued Sébaou Rabta (le haut Sébaou), Oued Aissi, Oued Sébaou Sebt (le moyen Sébaou), Oued Bougdoura et le Oued Sébaou maritime (le bas Sébaou) figure 2.1.

Le bassin versant du Sébaou à une superficie totale avoisinant les 2500 Km², il se situe entre les coordonnées 4086.00 Km Nord, 4034.00 Km Sud, 645.00 Km Est et 566.00 Km Ouest, sellant le système de projection géographique Universel Transverse Mercator WGS 84 Zone 31 Nord (UTM WGS 84 Zone 31 N). À une centaine de kilomètres à l'Est d'Alger, il est délimité au Nord par la chaîne côtière méditerranéenne, au Sud par la chaîne du Djurdjura (wilaya de Bouira), à l'Est par les massifs forestiers d'Akfadou et de Béni Ghobri (wilaya de Bejaia) et à l'Ouest par le massif de Sidi Ali Bounab et Djebel Bouberak (wilaya de Boumerdes). La figure 2.2 représente la situation géographique du bassin versant du Sébaou.

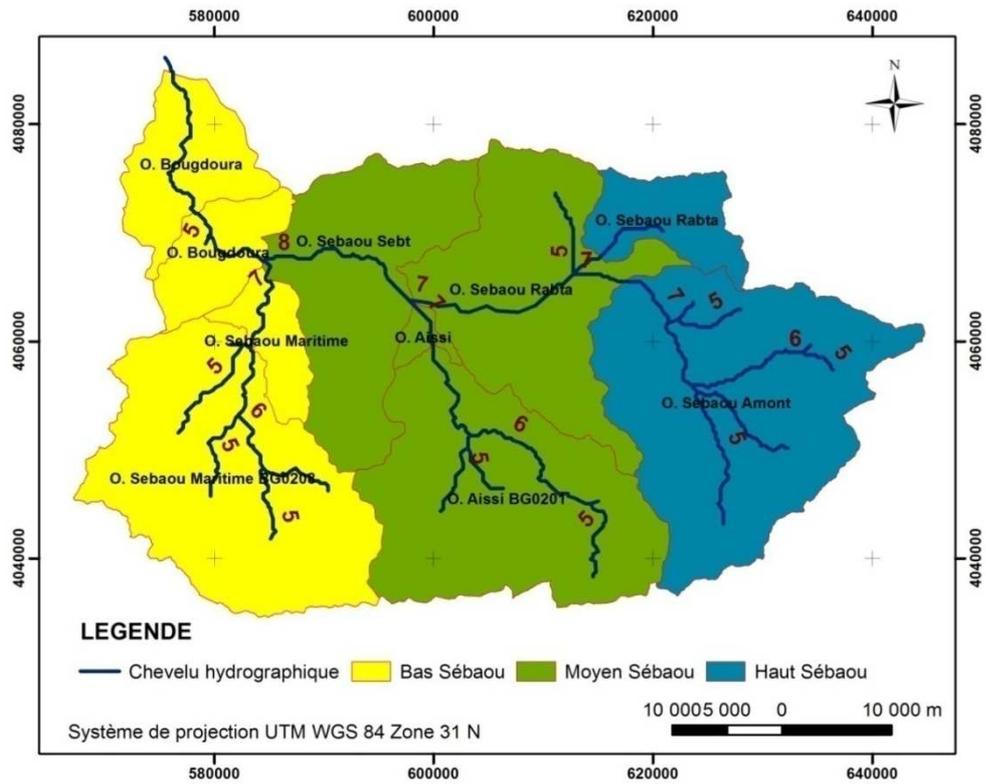


Figure 2.1 Les sous bassins du bassin versant du Sébaou

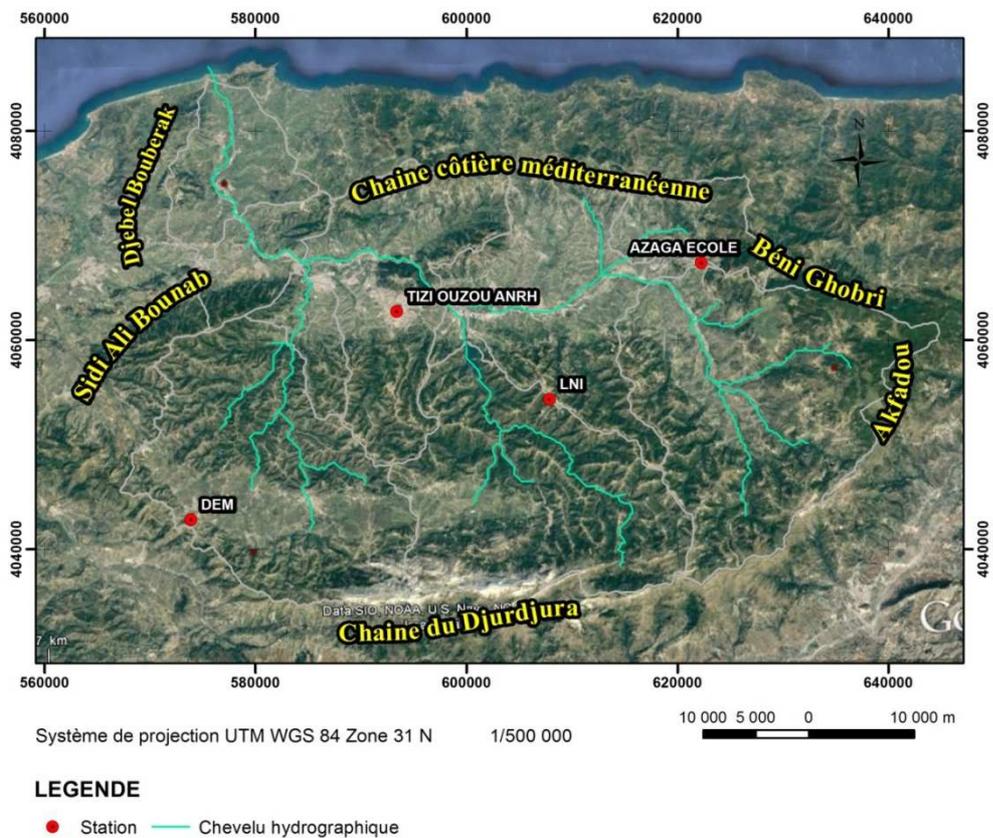


Figure 2.2 Limites géographique de la zone d'étude

2.2 Calcul des intensités pluviométriques fréquentielles

L'étude hydrologique du bassin versant du Sébaou consiste dans notre cas au calcul des intensités pluviométriques de chaque fréquence, au niveau de chaque station. Nous nous sommes inspirés d'une note de calcul élaborée par Hammoum (2003), dans le cadre d'une étude de l'assainissement du chef lieu de Ouacif, et que nous adapterons dans notre cas à chacune de nos stations pluviométriques se situant dans le bassin versant et ces alentours figure 2.3.

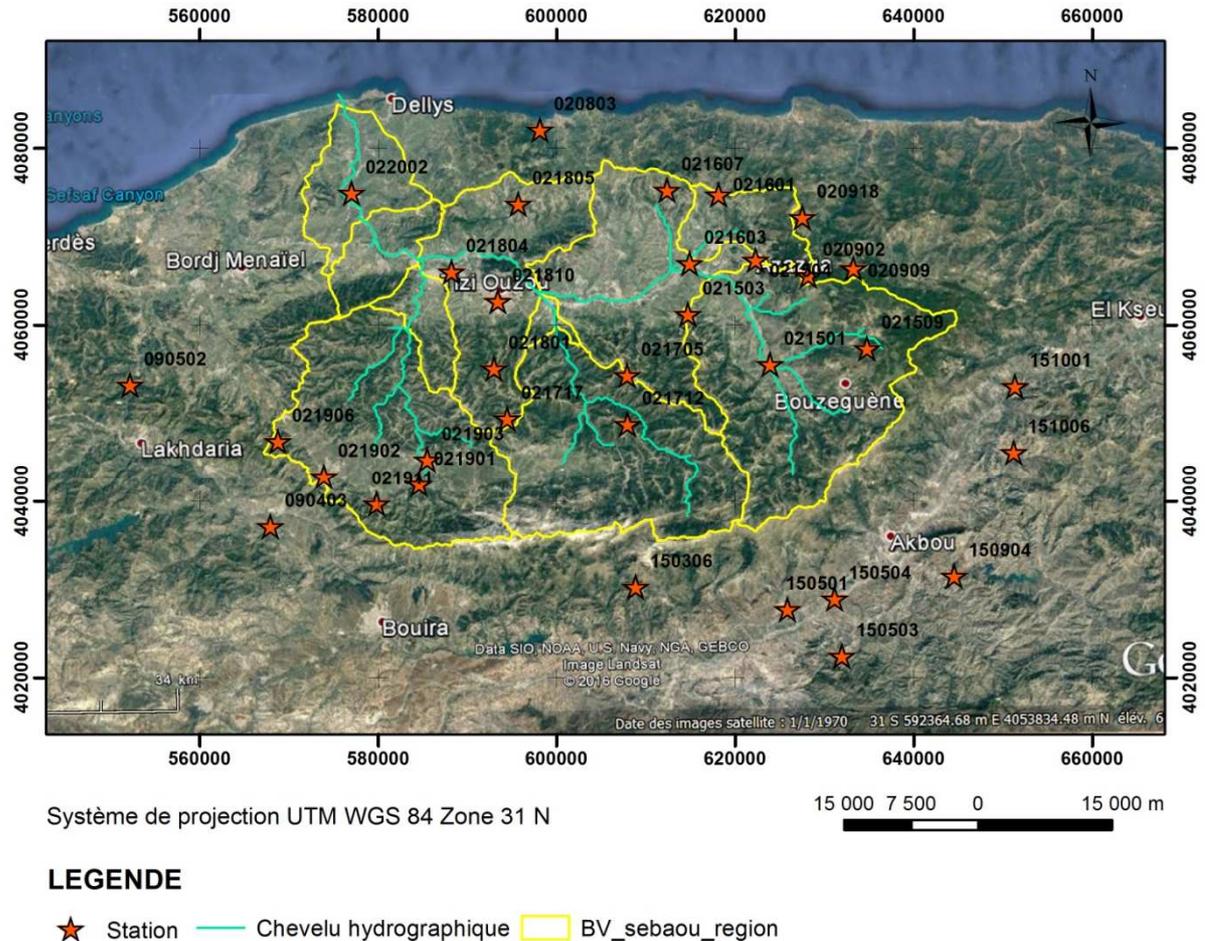


Figure 2.3 Répartition des stations pluviométriques à l'intérieur et autour du bassin versant du Sébaou

Pour illustrer la méthode de calcul nous considérons la station de l'ANRH de Tizi Ouzou.

2.2.1 Calcul des précipitations moyennes annuelles et maximales journalières

Les précipitations moyennes annuelles sont calculées sur la base des observations moyennes mensuelles (tableau 2.1), faites au niveau de la station de Tizi Ouzou (code ANRH 021810)

Tableau 2.1 : Précipitations moyennes mensuelles (Années 1995 à 2011) [AGC]

Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
1995	7,4	24,3	27,2	81,2	148,2	215,3	67,2	159,1	54,4	19,7	7,6	11,2
1996	36,3	99,9	73,2	83,9	49,6	17,2	23,8	71,2	24,6	4,4	0,6	15,3
1997	41,8	93	213,1	143,8	57,4	160,1	67,3	101,3	231,1	0,7	0	3,6
1998	26,3	84,1	125,7	99,1	113,8	99,8	75,7	17,7	44,1	0,6	0	2,6
1999	29,9	15	152,9	217,2	21,1	5,8	7,1	36,5	64,3	6,3	0	0,3
2000	6,4	51,9	82,7	75,3	227	77,3	2,6	38,7	44,1	0	0	0,9
2001	38,3	7	60,4	69,8	86,2	34,2	47,3	54,3	37,7	1,5	1,7	23,4
2002	24,8	39,1	200,9	276,7	316,2	105,4	49,3	162,5	34,8	2,8	3,7	1,3
2003	33,1	66,8	91,3	171,6	126,6	49,9	53,1	90,4	135,1	1,6	2,2	10,9
2004	20,4	37,1	118	213,2	138,7	123,4	27,3	13,8	2,3	0	1,4	0,7
2005	19,6	53,6	76,2	99,5	140,1	199,4	35,5	13,8	80,6	3,9	1	9,4
2006	36,4	11,7	7,8	161,8	10,5	61	258,6	204,5	17,2	10	9,4	4,2
2007	60	241,7	227,2	111,9	8,7	15,2	97,1	36,9	104,9	13,8	14,2	0
2008	38,6	64,1	192,9	126,1	250,4	40,1	86,3	126,8	74	0	3,1	8,4
2009	153,1	48,1	123,2	148,7	101,6	58,8	112,7	99,6	75,4	25,8	0,6	16,2
2010	23	143,9	162,8	85	99,1	162,5	71,2	98,5	129,6	36,7	3,9	0,4
2011	3,8	44,9	147,5	123,3	81,3	311,7	96	168,2	40,8	1	0,9	9,5

La relation qui permet de calculer les précipitations moyennes annuelles est donnée par l'équation 2.1

$$P_0 = \frac{\sum p_i}{n} \quad (2.1)$$

L'écart type est obtenu à partir de la relation (2.2) :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_0)^2}{(n-1)}} \quad (2.2)$$

Le coefficient de variation est donné par

$$C_v = \frac{\sigma}{P_0} \quad (2.3)$$

avec :

P_0 : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

P_i : précipitations moyenne mensuelles ;

C_v : coefficient de variation ;

n : nombre de valeurs observées.

Les précipitations maximales journalières sont nécessaires pour l'estimation des crues. Dans les cas où elles ne sont pas données, elles seront calculées en utilisant la relation de

M.BODY établie pour la wilaya de Tizi Ouzou, en fonction de la pluie moyenne annuelle P_0 .
[Hammoum 2003]

$$P_{jmax} = 0.62P_0 + 13.20 \quad (2.4)$$

Les résultats de ces calculs sont illustrés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Présentation des précipitations moyennes annuelles et maximales journalières

Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	annuel (mm)	P_0 (mm)	P_{jmax} (mm)
1995	7,4	24,3	27,2	81,2	148,2	215,3	67,2	159,1	54,4	19,7	7,6	11,2	822,80	68,57	73,1
1996	36,3	99,9	73,2	83,9	49,6	17,2	23,8	71,2	24,6	4,4	0,6	15,3	500,00	41,67	46
1997	41,8	93	213,1	143,8	57,4	160,1	67,3	101,3	231,1	0,7	0	3,6	1113,20	92,77	79,2
1998	26,3	84,1	125,7	99,1	113,8	99,8	75,7	17,7	44,1	0,6	0	2,6	689,50	57,46	28,8
1999	29,9	15	152,9	217,2	21,1	5,8	7,1	36,5	64,3	6,3	0	0,3	556,40	46,37	80,1
2000	6,4	51,9	82,7	75,3	227	77,3	2,6	38,7	44,1	0	0	0,9	606,90	50,58	58
2001	38,3	7	60,4	69,8	86,2	34,2	47,3	54,3	37,7	1,5	1,7	23,4	461,80	38,48	28,6
2002	24,8	39,1	200,9	276,7	316,2	105,4	49,3	162,5	34,8	2,8	3,7	1,3	1217,50	101,46	92,3
2003	33,1	66,8	91,3	171,6	126,6	49,9	53,1	90,4	135,1	1,6	2,2	10,9	832,60	69,38	65,6
2004	20,4	37,1	118	213,2	138,7	123,4	27,3	13,8	2,3	0	1,4	0,7	696,30	58,03	52,6
2005	19,6	53,6	76,2	99,5	140,1	199,4	35,5	13,8	80,6	3,9	1	9,4	732,60	61,05	59,4
2006	36,4	11,7	7,8	161,8	10,5	61	258,6	204,5	17,2	10	9,4	4,2	793,10	66,09	77,1
2007	60	241,7	227,2	111,9	8,7	15,2	97,1	36,9	104,9	13,8	14,2	0	931,60	77,63	129
2008	38,6	64,1	192,9	126,1	250,4	40,1	86,3	126,8	74	0	3,1	8,4	1010,80	84,23	63,3
2009	153,1	48,1	123,2	148,7	101,6	58,8	112,7	99,6	75,4	25,8	0,6	16,2	963,80	80,32	76,2
2010	23	143,9	162,8	85	99,1	162,5	71,2	98,5	129,6	36,7	3,9	0,4	1016,60	84,72	55,3
2011	3,8	44,9	147,5	123,3	81,3	311,7	96	168,2	40,8	1	0,9	9,5	1028,90	85,74	63,7
Moyenne	35,25	66,25	122,53	134,59	116,26	102,18	69,30	87,87	70,29	7,58	2,96	6,96	822,02	68,50	66,37
Ecart-type	33,54	57,33	64,57	58,30	84,70	84,07	58,09	60,00	55,51	10,62	3,95	6,87	221,10	18,43	23,59
Cv	0,95	0,87	0,53	0,43	0,73	0,82	0,84	0,68	0,79	1,40	1,34	0,99	0,27	0,27	0,36

2.2.2 Précipitations maximales journalières fréquentielles

Pour la détermination des précipitations maximales journalières fréquentielles, nous utilisons deux lois à savoir :

- **Loi de Galton**

$$P_{jmax\%} = \frac{P_{jmax}}{\sqrt{Cv^2+1}} \cdot e^{U\sqrt{\ln(Cv^2+1)}} \quad (2.5)$$

où :

$P_{jmax\%}$: précipitation journalière maximale de fréquence donnée [mm] ;

P_{jmax} : moyenne des précipitations maximales journalières [mm] ;

- Cv : coefficient de variation ;
 U : variable de Gauss pour une période donnée.

- **Loi de Gauss (loi normale)**

$$P_{jmax\%} = P_0 + \sigma \cdot U \quad (2.6)$$

Les valeurs de la variable de Gauss (U) pour les différentes périodes de retours sont résumées dans le tableau 2.3 qui suit : (données par African Geosystem Company)

Tableau 2.3 : Valeurs de la variable de Gauss (U)

Période de Retour (1 fois tous les ...ans)	2	4	5	10	20	25	50	100
Variable de Gauss (U)	0	0.675	0.842	1.282	1.644	1.751	2.054	2.33

Les résultats de précipitations maximales journalières fréquentielles sont illustrés dans le (tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Valeurs de $P_{jmax\%}$

Périodes T	Po (mm)	écart type	Cv	U	$P_{jmax\%}$ (mm)		La valeur retenue max $P_{jmax\%}$ (mm)
					Galton	Gauss	
10 ans	68,50	23,59	0,355472542	1,282	97,31824426	98,74808645	98,74808645
20 ans	68,50	23,59	0,355472542	1,644	110,2619699	107,2887241	110,2619699
25 ans	68,50	23,59	0,355472542	1,751	114,4077632	109,8131667	114,4077632
50 ans	68,50	23,59	0,355472542	2,054	127,0129913	116,961822	127,0129913
100 ans	68,50	23,59	0,355472542	2,33	139,6998385	123,4734684	139,6998385

Remarque :

Les précipitations maximales journalières fréquentielles $P_{jmax\%}$ adoptées pour le calcul des intensités pluviométriques fréquentielles représentent les valeurs maximales entre celles données par Galton et Gauss.

2.2.3 Calcul des intensités pluviométriques fréquentielles

Après avoir évalué les précipitations maximales journalières fréquentielles, les intensités pluviométriques fréquentielles sont données par la formule de MONTANA, comme suit :

$$I(f\%) = \frac{P_{jmax\%}}{24} \cdot \left(\frac{t}{24}\right)^{b-1} \cdot \frac{10000}{3600} \quad (2.7)$$

avec :

$I(f\%)$ Intensités pluviométriques fréquentielles $f\%$ (l/s/ha)

t : Durée de l'averse, prise égale à 0,33 heures (20mn) pour note région [ANRH]

b : Exposant climatique, pris égal à 0,42 pour la wilaya de Tizi Ouzou [ANRH]

Les valeurs d'intensités pluviométriques fréquentielles sont données dans le (tableau 2.5).

Tableau 2.5 : Intensités pluviométriques fréquentielles

Périodes T	t (H)	b	max $P_{jmax}\%$ (mm)	I % (l/s/ha)
10 ans	0,33	0,42	98,74808645	137,340739
20 ans	0,33	0,42	110,2619699	153,354470
25 ans	0,33	0,42	114,4077632	159,120519
50 ans	0,33	0,42	127,0129913	176,652113
100 ans	0,33	0,42	139,6998385	194,297224

Remarque :

Notons que les intensités pluviométriques fréquentielles des différentes stations pluviométriques sont obtenues par procédé analogue.

2.3 Elaboration des cartes

2.3.1 Construction de la base de données

La base de données que nous allons utiliser, pour l'élaboration des cartes est construite à partir des résultats de calcul des intensités pluviométriques fréquentielles des différentes stations, auxquelles nous rajoutant le code ANRH de la station, le nom de la station, les coordonnées X et Y, l'altitude Z de la station et les intensités des différentes périodes (dix, vingt, vingt-cinq, cinquante et centennale) (tableau 2.6).

Tableau 2.6 : Récapitulatif des résultats de calcul

Id	Code De La Station	Nom De La Station	Coord X (m)	Coord Y (m)	Altitude Z(m)	I (10ans) (l/s/ha)	I (20ans) (l/s/ha)	I (25ans) (l/s/ha)	I (50ans) (l/s/ha)	I (100ans) (l/s/ha)
1	021601	Aghribs (Adrar)	618134,45	4074760,69	680,00	193,46	216,20	224,41	249,40	274,57
2	021509	Ait Aicha	634789,94	4057360,20	1000,00	156,58	163,81	165,94	171,99	177,50
3	021717	Ait Djemaa	594427,99	4049423,28	840,00	122,94	128,64	130,33	135,10	139,45
4	021504	Azaga Ecole	622264,77	4067397,73	430,00	142,81	149,92	152,02	157,98	163,40
5	022002	Baghlia Village	576993,95	4074988,53	30,00	128,98	142,63	146,93	159,83	172,57
6	021712	Beni Yenni	607958,84	4048784,07	760,00	153,61	174,02	180,55	200,42	220,42
7	021607	Berber (Ex S. El Had	612384,98	4075326,87	490,00	164,59	175,65	178,91	188,17	196,60
8	021903	Boghni	585492,75	4044748,42	250,00	113,70	124,16	128,36	141,04	153,68
9	021801	Bouassem M.F.	592974,11	4055078,52	600,00	141,53	152,82	156,54	172,77	189,01
10	021804	Dbk	588204,87	4066043,86	90,00	136,68	155,85	162,01	180,82	199,84
11	021902	Dem	573885,28	4042832,19	530,00	108,98	117,29	119,75	129,19	140,94
12	021503	Djemaa Saharidj	614695,96	4061267,63	370,00	143,19	160,36	167,31	188,64	210,44
13	020803	El Azaieb Mizrana	598101,89	4082117,85	150,00	191,57	230,24	243,10	283,54	326,20
14	021603	Freha	614912,13	4067018,21	140,00	128,18	138,62	141,70	156,62	171,96
15	021805	Larbaa Makouda	595677,88	4073723,64	520,00	144,53	162,56	168,30	185,71	203,12
16	021705	Lni	607874,77	4054335,56	980,00	140,67	149,99	152,75	162,74	174,57
17	021906	Nezlioua	568746,34	4046847,95	590,00	112,56	118,47	120,21	125,15	129,65
18	020909	Tagma Pepiniere	633264,71	4066416,87	950,00	208,50	226,17	232,26	258,74	285,48
19	020918	Tala Gassi	627542,13	4072192,98	560,00	199,91	214,75	219,13	234,06	254,69
20	021501	Tigzirt N Boubhir	623882,02	4055590,34	220,00	150,87	162,74	167,60	184,40	201,17
21	021911	Tizi Letnine	579827,07	4039714,19	500,00	109,32	123,13	127,53	140,89	154,26
22	021901	Tizi Medene	584584,39	4041950,57	500,00	121,92	131,25	134,01	144,09	157,34
23	021810	Tizi Ouzou Anrh	593396,13	4062728,54	67,00	137,34	153,35	159,12	176,65	194,30
24	020902	Yakourene	628211,24	4065630,69	820,00	197,68	224,37	233,84	262,89	292,47
25	090403	Djebahia	567908,32	4037148,57	320,00	96,21	103,43	105,57	112,61	122,77
26	090502	Lakhdaria Gorges	552157,88	4053247,23	50,00	132,78	154,02	160,92	182,20	204,03
27	150306	Beni Hammad	608836,31	4030263,48	960,00	91,76	102,09	105,36	115,20	124,96
28	150501	Tazmalt	625837,64	4027750,95	324,00	57,65	63,31	65,09	70,39	75,60
29	150503	Ighil Ali	631974,07	4022448,50	700,00	81,33	96,29	101,21	116,58	132,60
30	150504	Tizi Nslib	631128,20	4028908,21	1050,00	81,96	88,87	92,22	102,43	112,71
31	150904	Sidi Yahia	644541,16	4031495,20	255,00	65,82	72,43	74,51	80,74	86,86
32	151001	Sidi Aich	651361,30	4053097,38	196,00	74,02	78,03	79,21	82,56	85,95
33	151006	Seddouk	651194,78	4045603,72	370,00	89,41	102,56	106,82	119,87	133,15

2.3.2 Création des stations pluviométriques sur MapInfo

La création des stations pluviométriques est faite sous le logiciel MapInfo. Ce système d'information géographique (SIG) permet la réalisation de cartes en forma numérique. Grâce a son système de couche, il nous offre la possibilité de représenter des informations géo-localisés : image raster, polygones, points...etc. auxquels est attribué une base de données. [Hammoum et Bouzida].

Pour la création des stations pluviométriques sur MapInfo, nous allons importer la carte des délimitations du bassin et sous bassins versants du Sébaou, confié par AGC (African Geosystem Company), (figure 2.4).

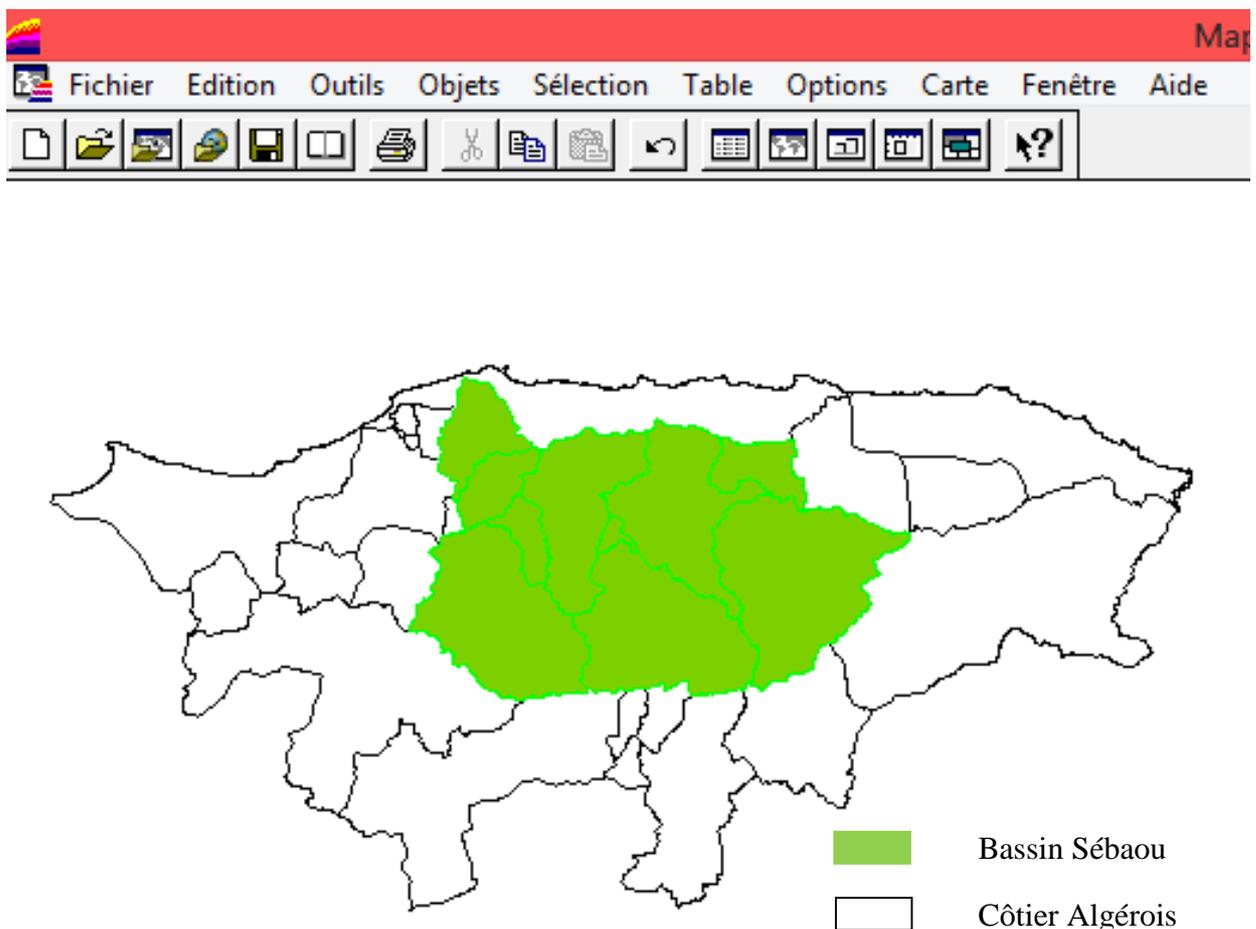


Figure 2.4 Représentation des délimitations du bassin versant du Sébaou

Le récapitulatif que nous avons fait sur Excel, va nous servir comme base de donnée pour créer les stations pluviométriques sur MapInfo. Un extrait de cette base de donnée est apercevable dans la figure 2.5 qui suit.

ID	code_de_la_static	Nom_de_la_station	COORD_X_m	COORD_Y_m	ALTITUDE_Z_m	I_decennale_I_s_I	I_vingtenale_I_s_hc	I_v
1	021601	AGHRIBS (Adrar)	618 134,45	4 074 760,69	680	193,46	216,196	
2	021509	AIT AICHA	634 789,94	4 057 360,2	1 000	156,582	163,807	
3	021717	AIT DJEMAA	594 427,99	4 049 423,28	840	122,943	128,644	
4	021504	AZAGA ECOLE	622 264,77	4 067 397,73	430	142,81	149,923	
5	022002	BAGHLIA VILLAGE	576 993,95	4 074 988,53	30	128,981	142,625	
6	021712	BENI YENNI	607 958,84	4 048 784,07	760	153,608	174,017	
7	021607	BERBER (ex S. EL HA	612 384,98	4 075 326,87	490	164,59	175,646	
8	021903	BOGHNI	585 492,75	4 044 748,42	250	113,702	124,16	
9	021801	BOUASSEM M.F.	592 974,11	4 055 078,52	600	141,526	152,823	
10	021804	DBK	588 204,87	4 066 043,86	90	136,681	155,846	
11	021902	DEM	573 885,28	4 042 832,19	530	108,98	117,293	
12	021503	DJEMAA SAHARIDJ	614 695,96	4 061 267,63	370	143,185	160,362	
13	020803	EL AZAIEB MIZRANA	598 101,89	4 082 117,85	150	191,574	230,24	
14	021603	FREHA	614 912,13	4 067 018,21	140	128,18	138,619	
15	021805	LARBAA MAKOUDA	595 677,88	4 073 723,64	520	144,529	162,557	
16	021705	LNI	607 874,77	4 054 335,56	980	140,668	149,992	
17	021906	NEZLIOUA	568 746,34	4 046 847,95	590	112,563	118,466	
18	021908	TAGMA PEPINIERE	633 264 71	4 066 416 87	650	208 604	226 168	

Figure 2.5 Extrait de la base de données

A l'aide de l'outil table « créer points » nous pouvons placer toutes les stations pluviométriques en fonction de leurs coordonnées, tout en gardant la même projection « UTM WGS 84 Zone 31 Nord ».

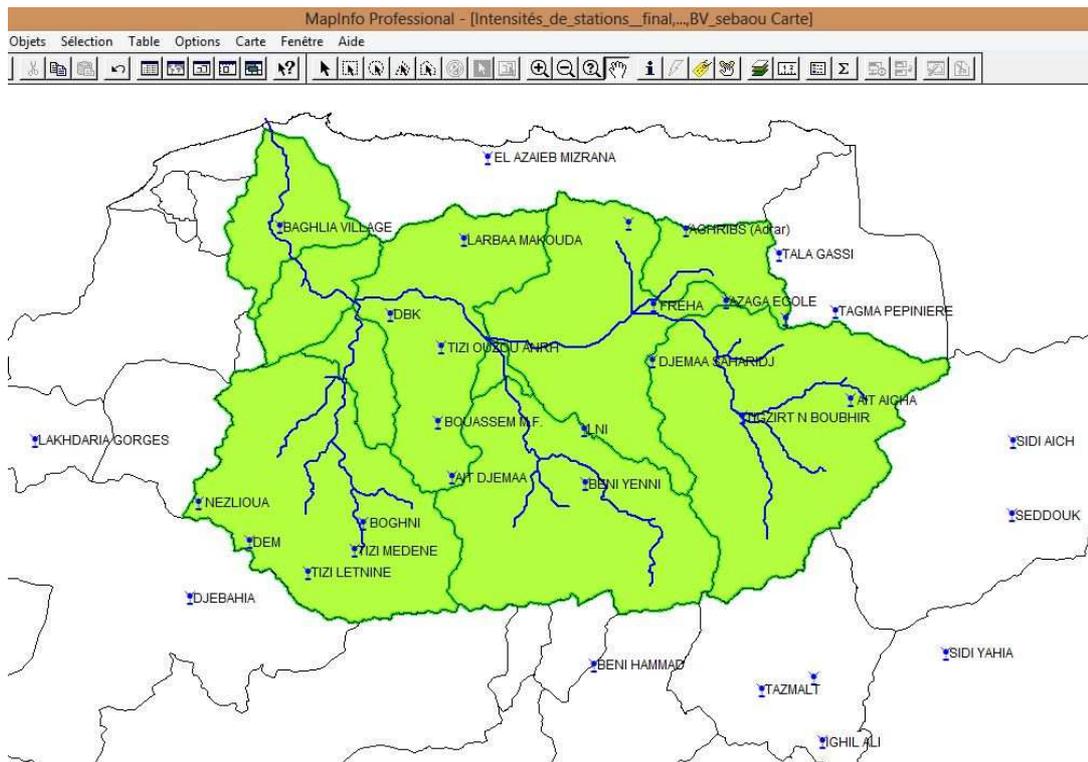


Figure 2.6 Représentation des stations pluviométriques sur le bassin du Sébaou

Remarque :

Nous utiliserons l'outil « Traducteur Universel » pour traduire le format MapInfo TAB à un format ISRI Shape pour que les couches créées puissent être lu avec ArcGis.

2.3.3 Représentation des intensités pluviométriques fréquentielles

Pour l'élaboration des cartes d'intensités pluviométriques nous avons choisi le logiciel ArcGis. Comme MapInfo, Ce logiciel est un SIG qui permet la création de cartes numériques interactives. En plus des outils de base qui sont en commun avec MapInfo, il possède toute une panoplie d'autres outils qui nous offrent plus d'interactivité avec d'autres logiciels comme Google Earth et Global Mapper que nous utilisons pour l'extraction d'altitudes. En plus de ces avantages techniques, il offre un rendu esthétique bien agréable.

Après avoir spécifié le système de coordonnées, on importe la délimitation du bassin versant et l'ensemble des stations pluviométriques (que nous avons réalisé sur MapInfo (figure 2.6)) sur ArcGis, la figure 2.7 illustre le fichier importé.

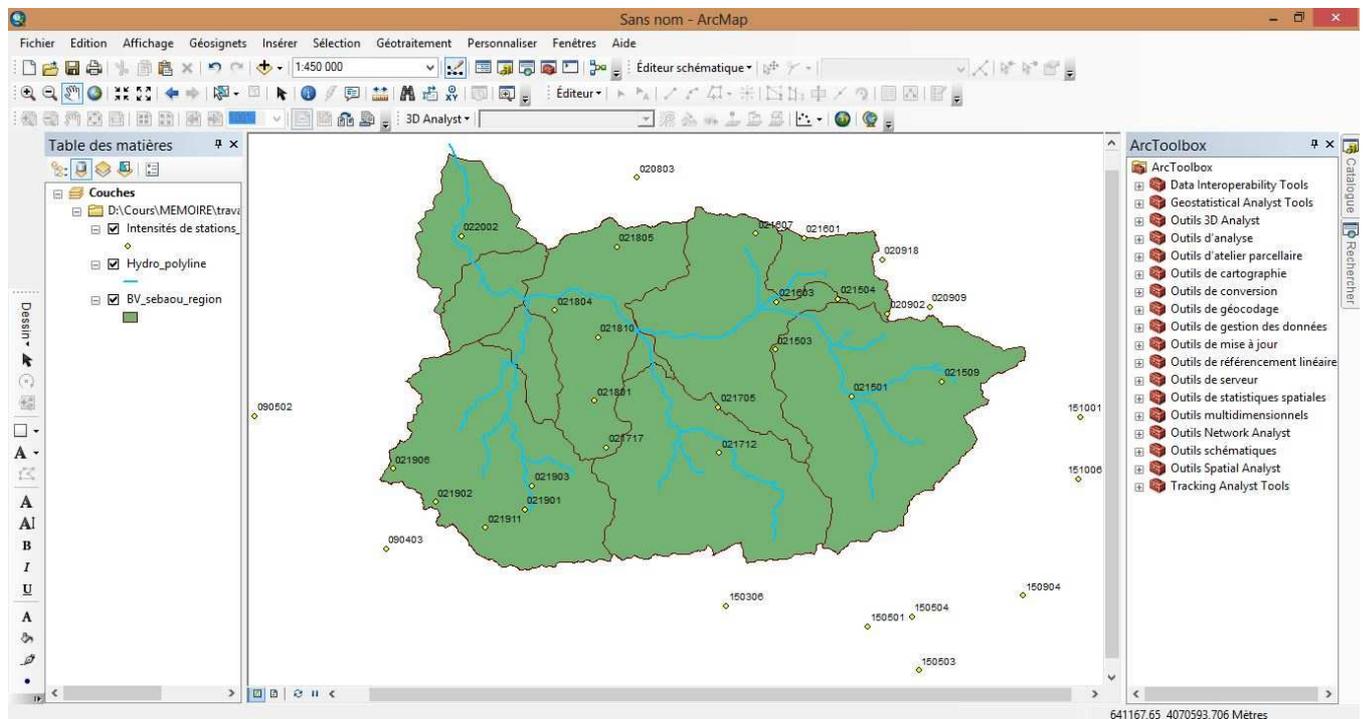


Figure 2.7 Bassin versant Sébaou et les stations pluviométriques

Il faut ensuite interpoler linéairement les valeurs d'intensités correspondant à chaque fréquence avec l'outil « Spline » (figure 2.8).

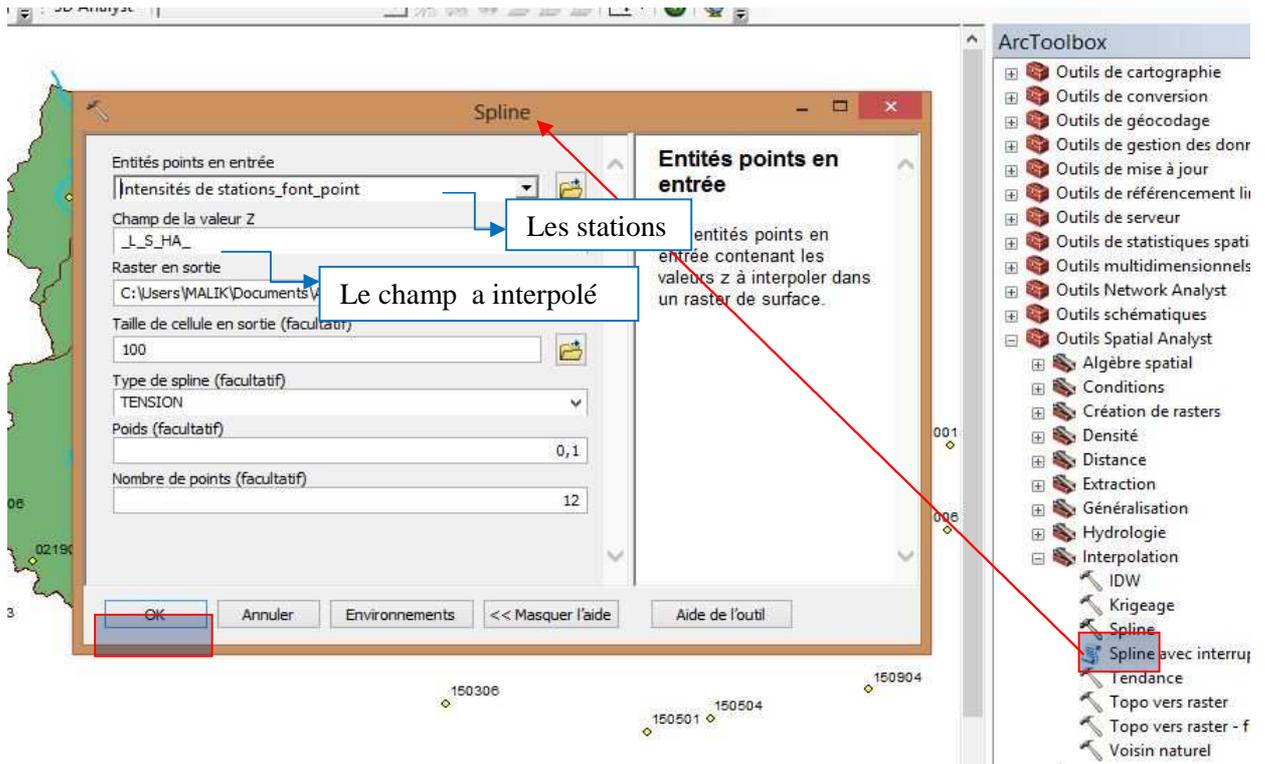


Figure 2.8 Capture écran de l'interpolation de l'intensité

Le résultat d'interpolation est illustré dans la figure (2.9) qui suit.

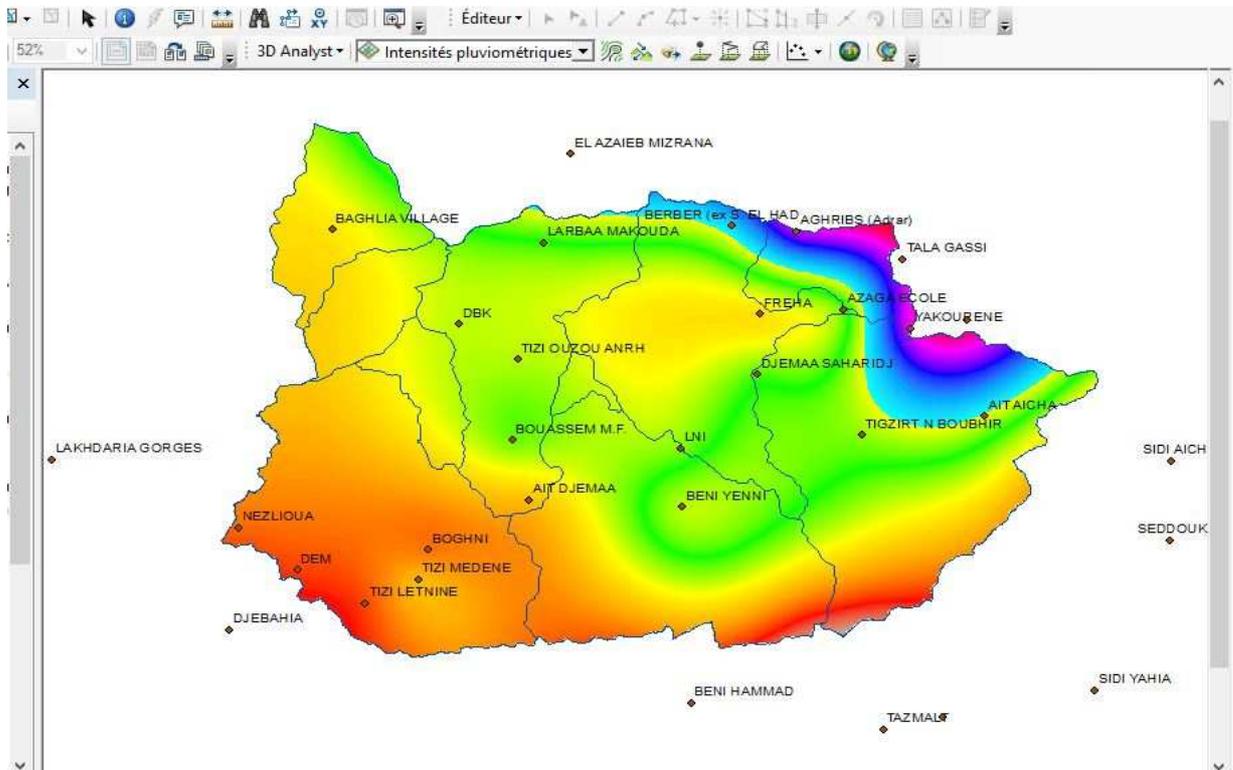


Figure 2.9 Capture écran du résultat de l'interpolation

En utilisant l'outil « Créer des isolignes avec barrière » nous allons réaliser les courbes d'égale intensité avec un intervalle de 10 (l/s/ha), (figure 2.10).

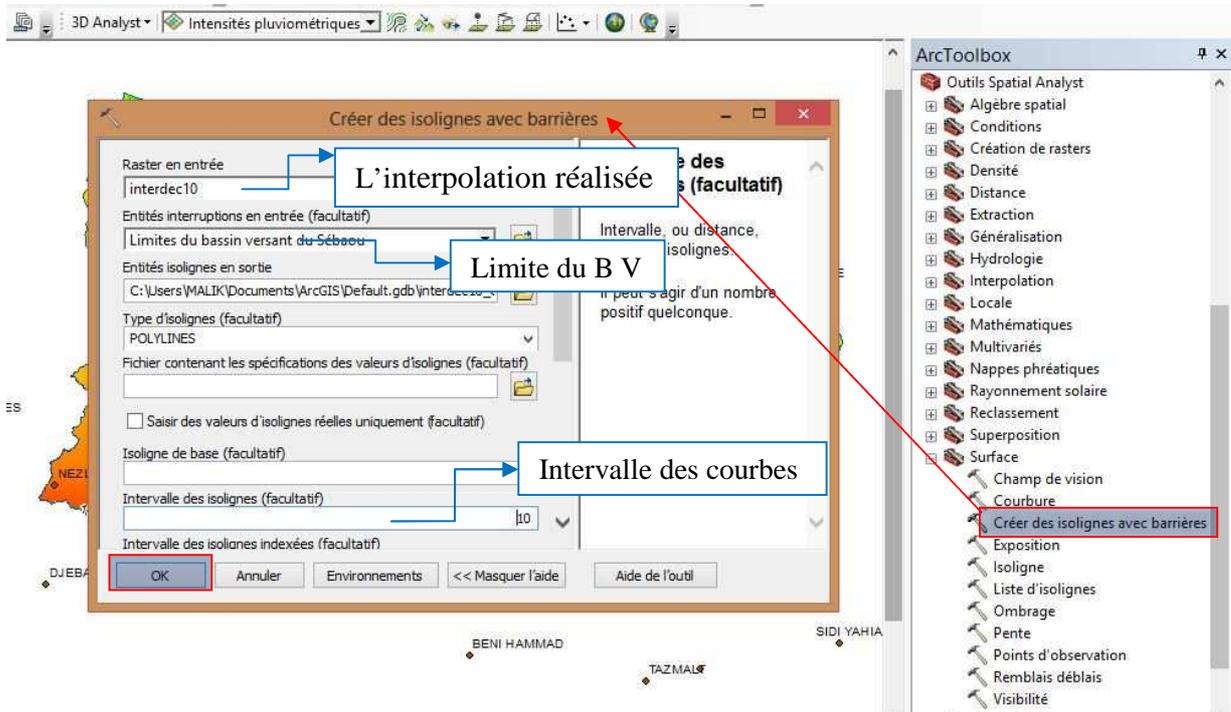


Figure 2.10 Capture écran de la représentation de la méthode

Le résultat de la méthode est illustré dans la (figure 2.11)

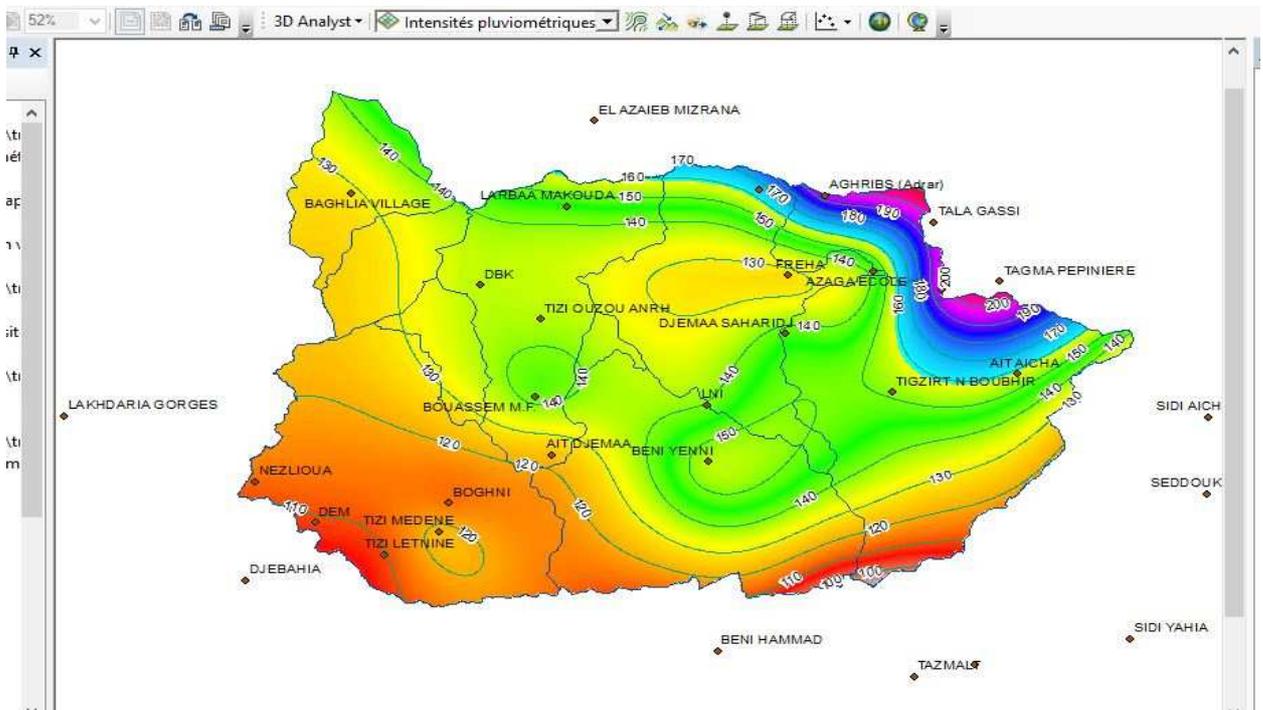


Figure 2.11 Capture écran du résultat des courbes d'intensité

Et pour finir nous effectuons un reclassement en utilisant l'outil « Reclassement » pour faire correspondre chaque intervalle de valeur a une couleur bien définie qui va la représenté (figure 2.12). Le résultat de la reclassefication est donné par la figure 2.13.

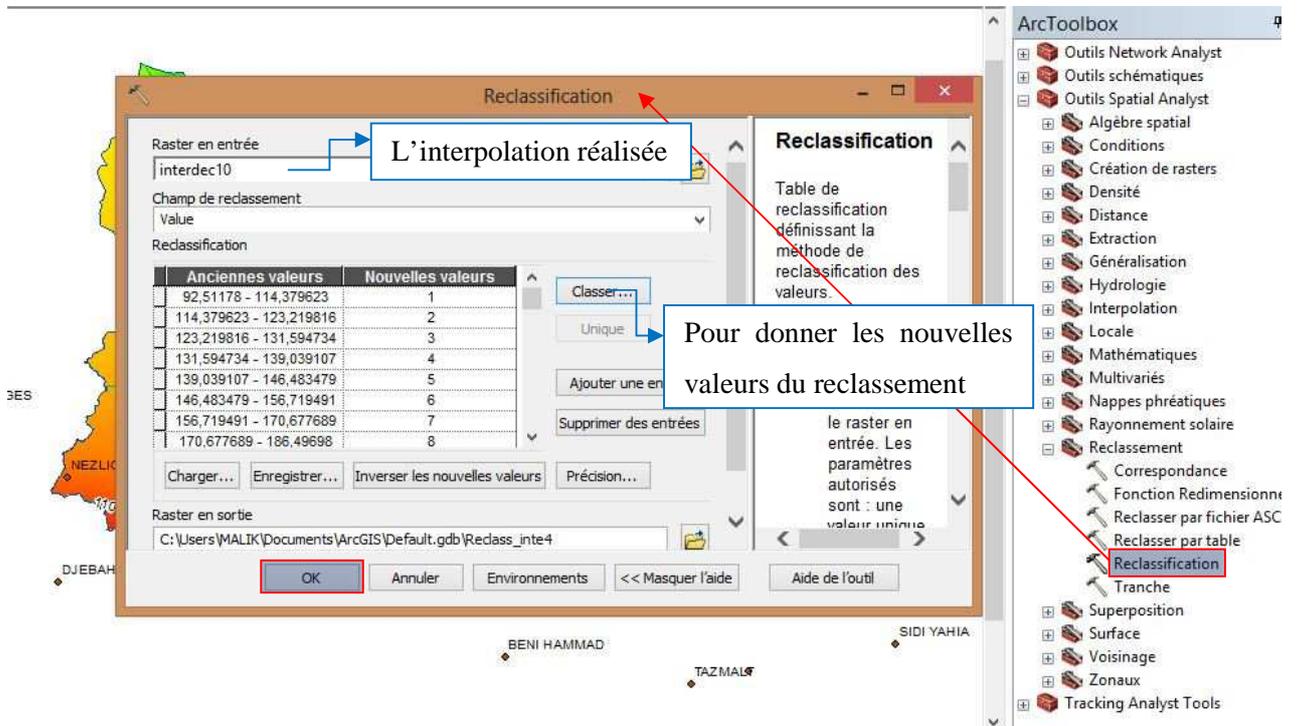


Figure 2.12 Capture écran de la reclassefication des résultats d'interpolation

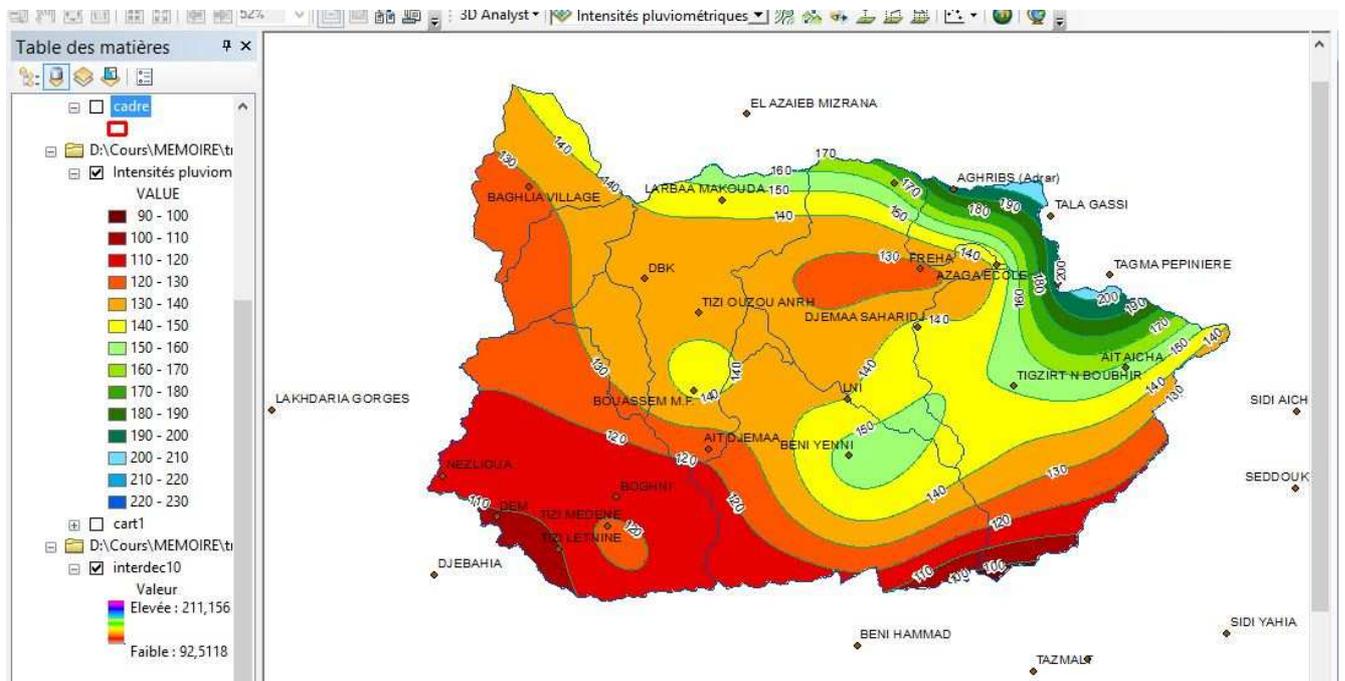


Figure 2.13 Capture écran du résultat de la reclassefication

Notons que par procédé analogue, nous avons élaborés les différentes cartes d'intensités pluviométriques fréquentielles, qui sont représentées par les figures (2.14, 15, 16, 17 et 2.18).

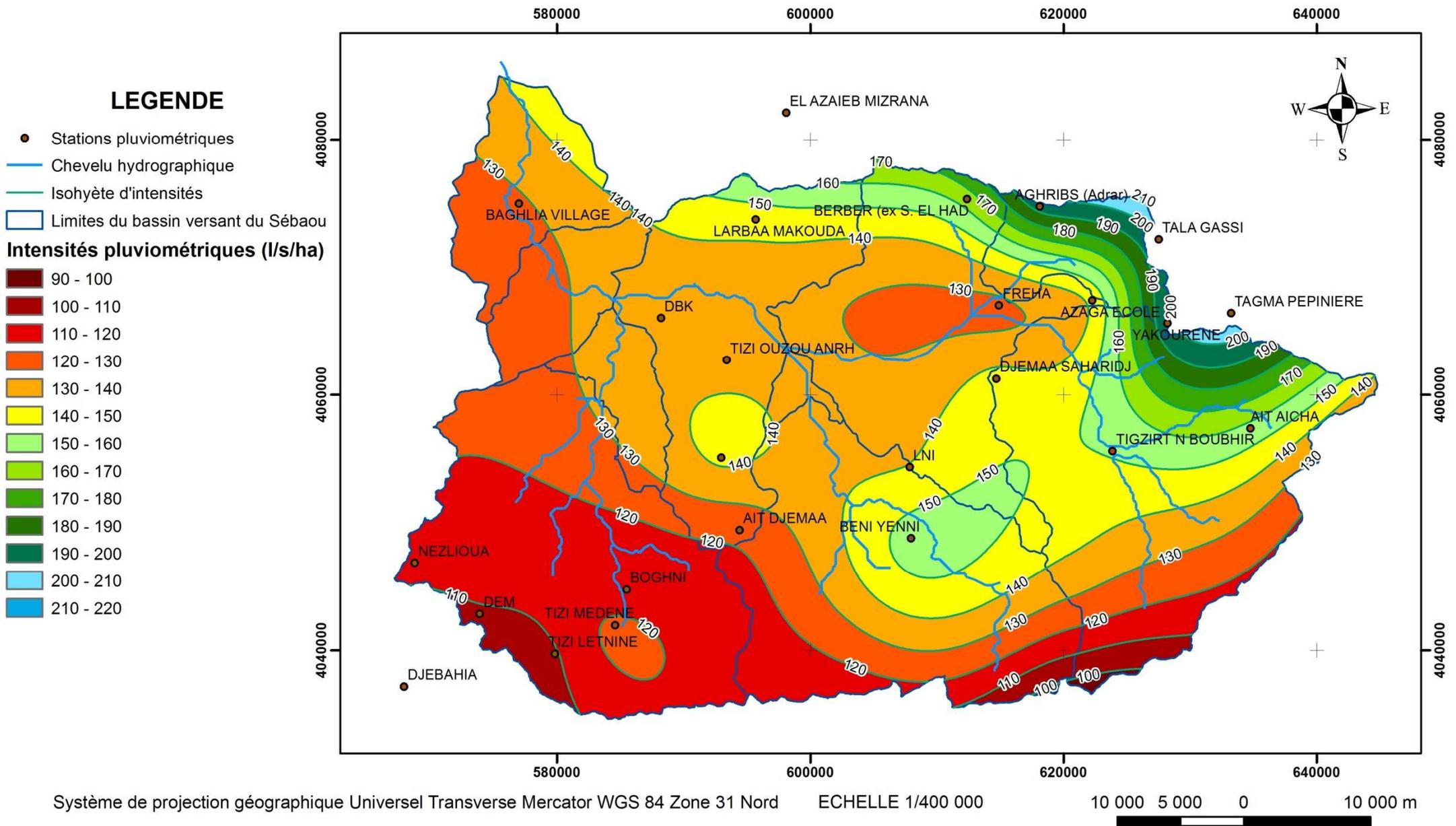


Figure 2.14 : Carte des intensités pluviométriques de fréquence décennale du bassin versant du Sébaou

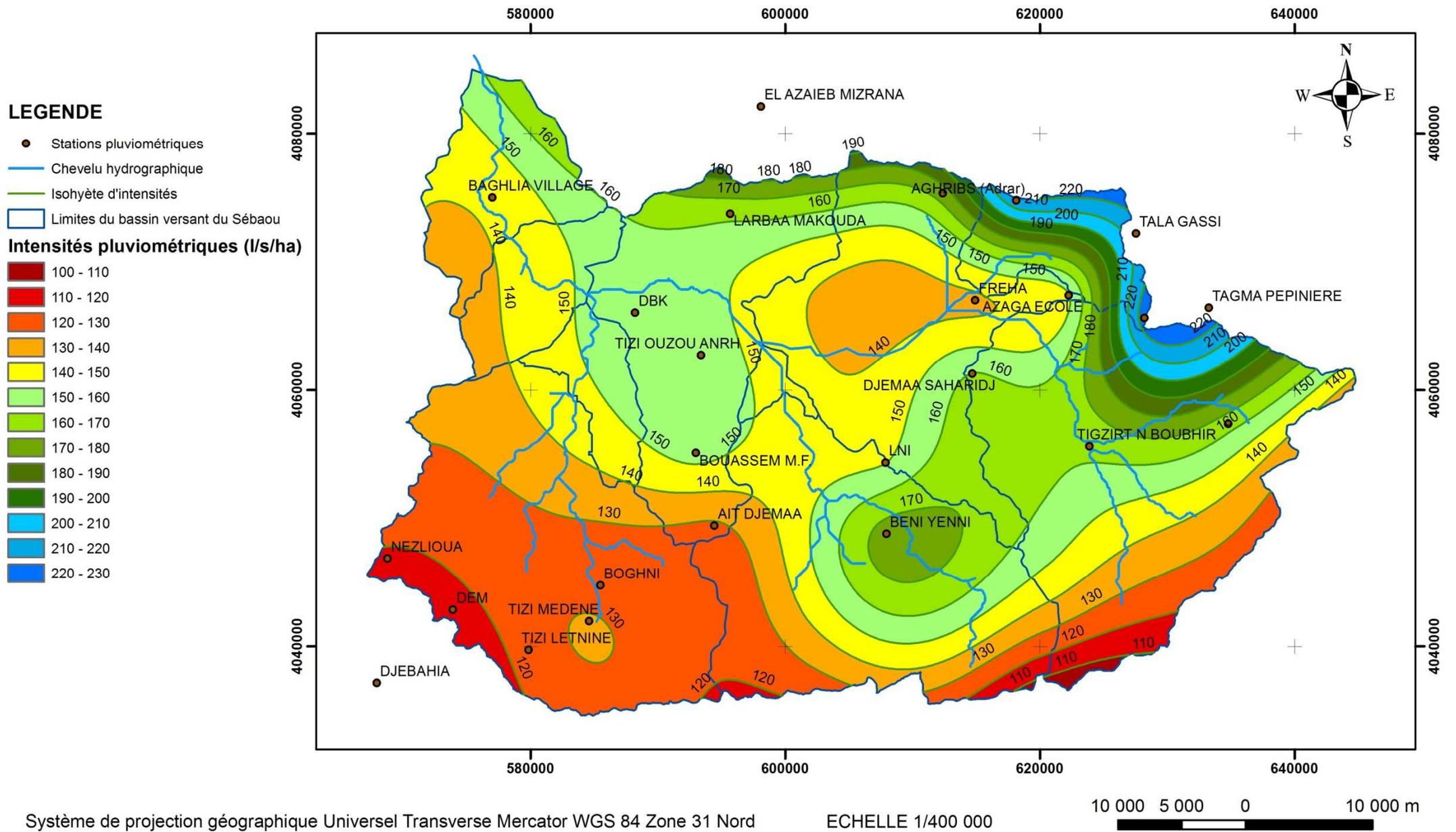


Figure 2.15 : Carte des intensités pluviométriques de fréquence vingtennale du bassin versant du Sébaou

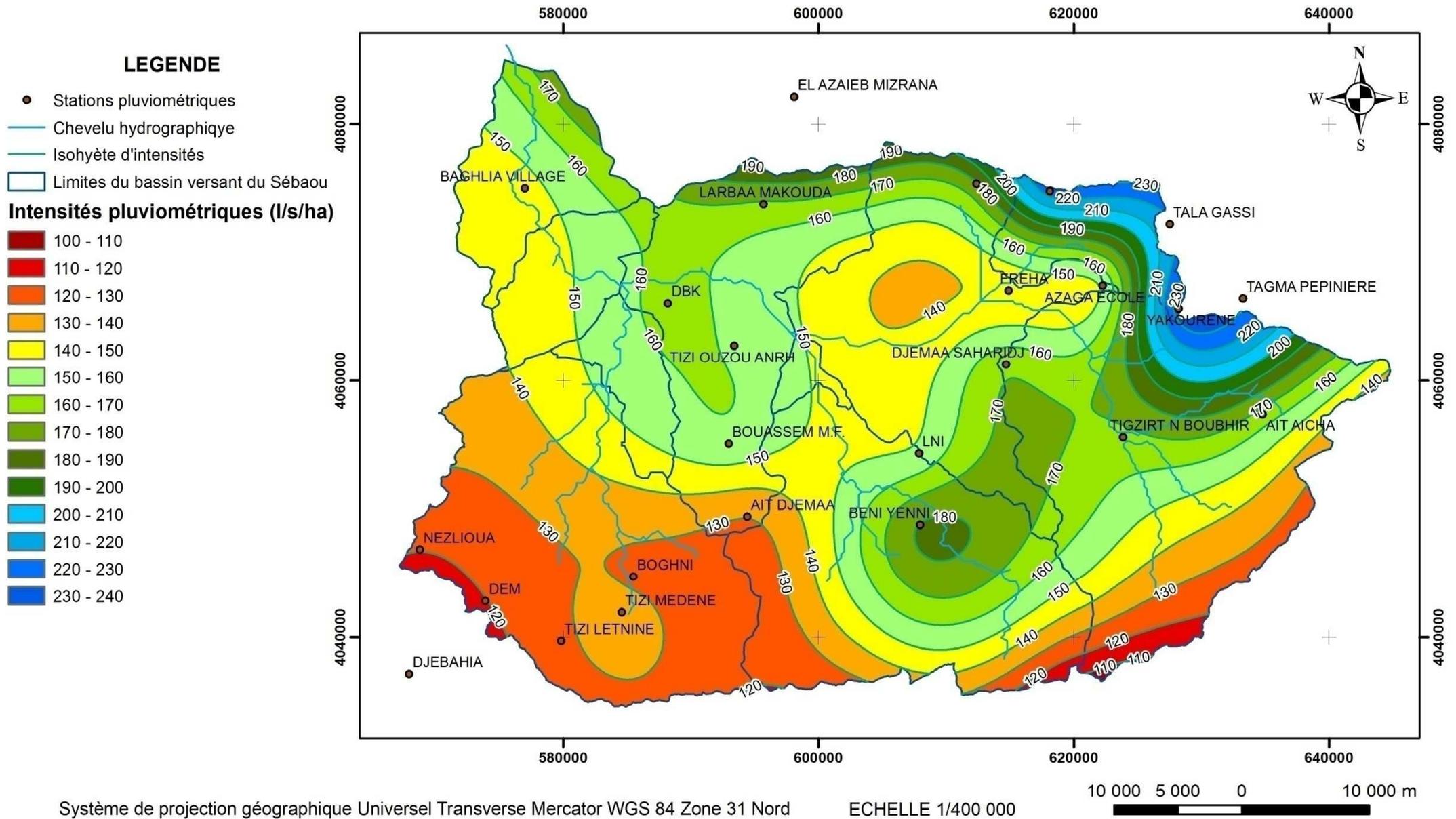


Figure 2.16 Carte des intensités pluviométriques de fréquence vingt-cinquennale du bassin versant du Sébaou

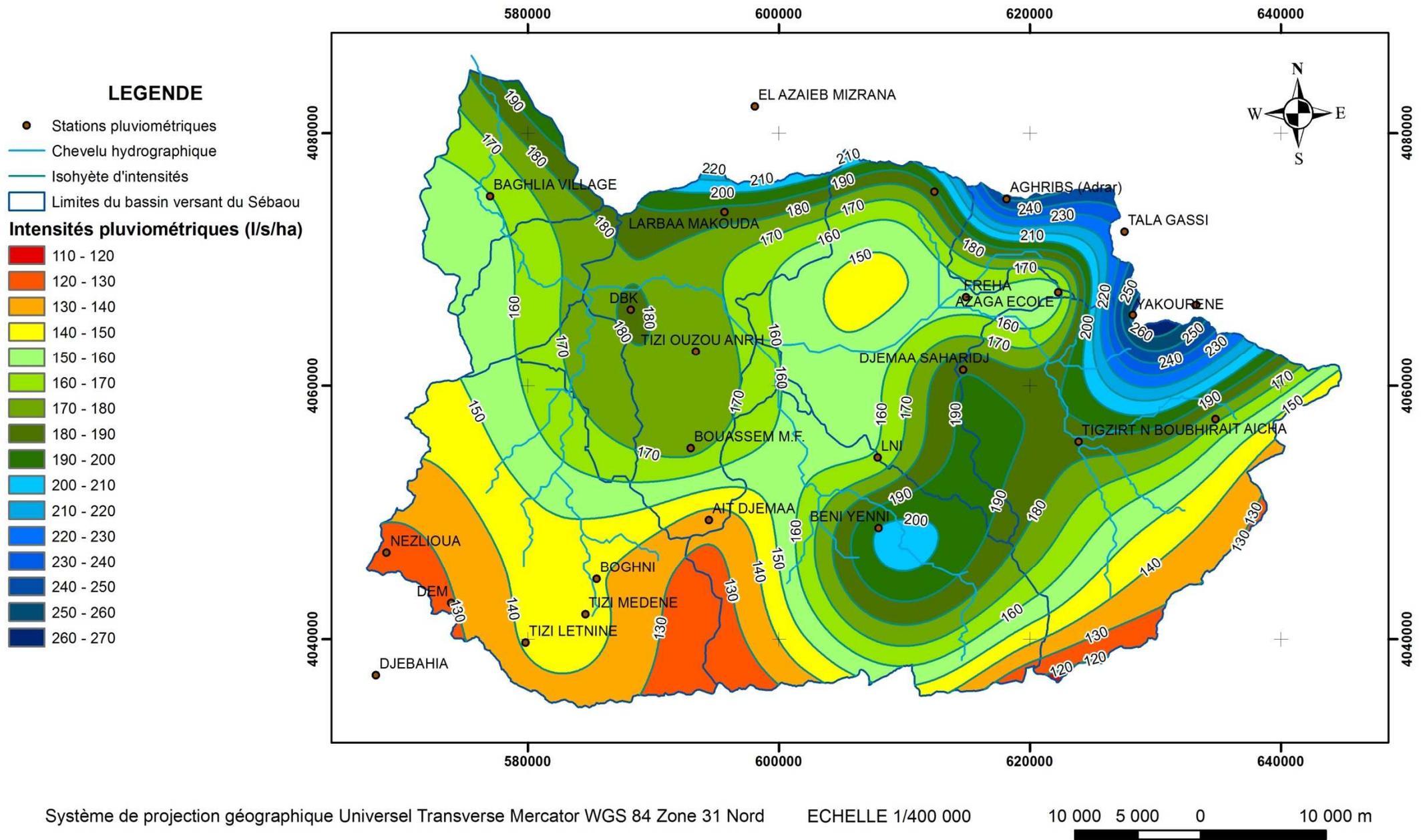


Figure 2.17 Carte des intensités pluviométriques de fréquence cinquantennale du bassin versant du Sébaou

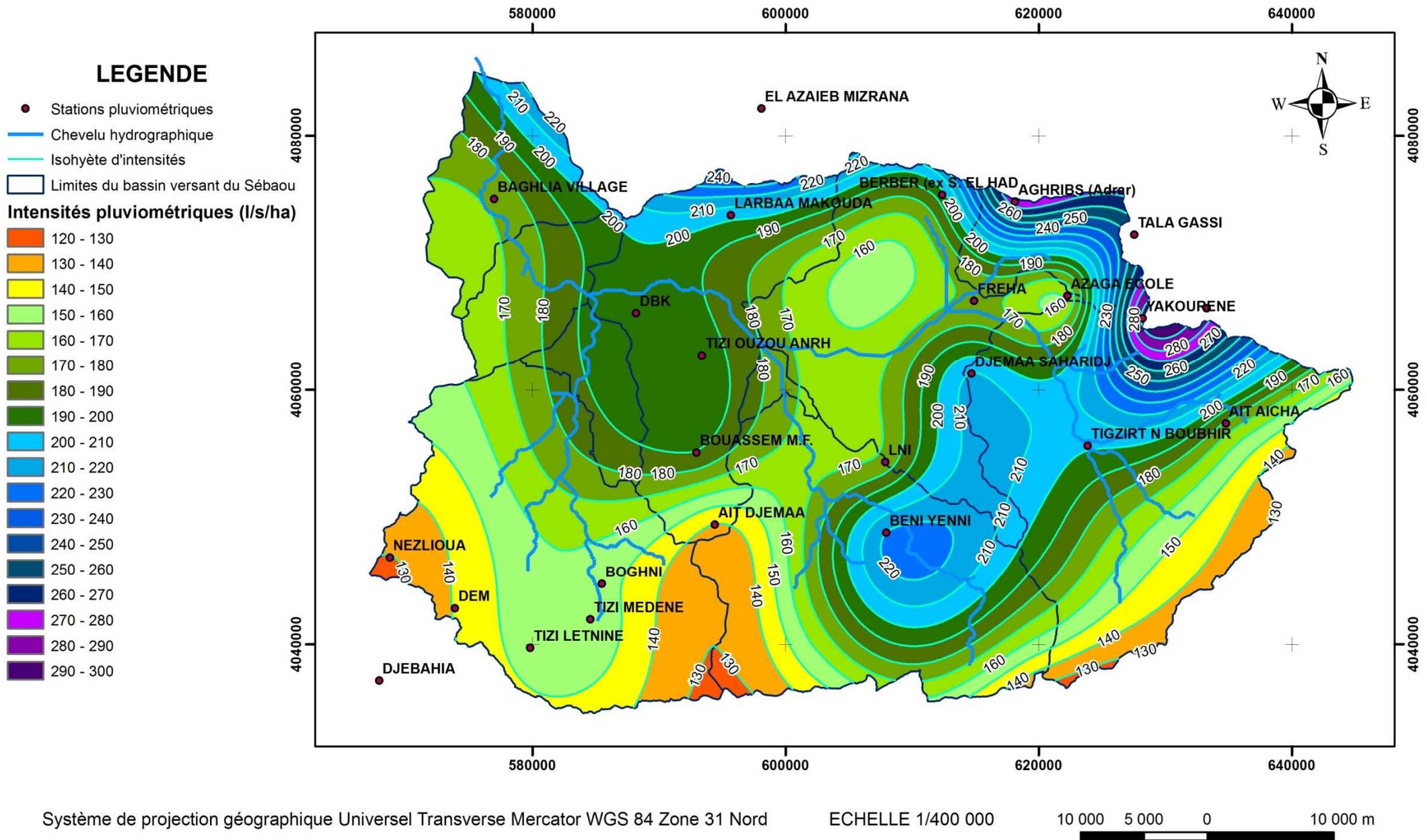


figure 2.18 Carte des intensités pluviométriques de fréquence centennale du bassin versant du Sébaou

2.3.4. Analyse et discussion des cartes

Nous constatons à travers l'ensemble des cartes d'intensité pluviométrique fréquentielle, que quelque soit la fréquence, l'intensité pluviométrique obéit à une évolution croissante allant du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est. Ceci confirme bien les lois régissant la répartition des pluies en Algérie définies par Seltzer en 1946.

La figure 2.14 représentant la carte des intensités pluviométrique de fréquence décennale, montre que au niveau de la vallée du Sébaou, les valeurs de l'intensité pluviométrique varient de 130 à 150 l/s/ha, du Bas Sébaou (Baghlia) jusqu'au Haut Sébaou (Azazga) passant par le Moyen Sébaou (Tizi Ouzou). Les valeurs minimales (100 à 110 l/s/ha) sont observées au niveau du massif du Djurdjura. Quand aux valeurs maximales de l'intensité pluviométrique, elles sont observées au niveau de la chaîne côtière méditerranéenne et atteignent la valeur de 200 l/s/ha au environ des hauteurs d'Aghrib.

Les figures 2.15 et 2.16 représentant respectivement la carte des intensités pluviométrique de fréquence vingtennale et vingt-cinquennale montrent la même évolution. Au niveau de la vallée du Sébaou, les valeurs de l'intensité pluviométrique varient de 140 à 170 l/s/ha, du Bas Sébaou (Baghlia) jusqu'au Haut Sébaou (Azazga) passant par le Moyen Sébaou (Tizi Ouzou). Les valeurs minimales (110 à 120 l/s/ha) sont observées au niveau du massif du Djurdjura et les valeurs maximales de l'intensité pluviométrique, sont observées au niveau de la chaîne côtière méditerranéenne et atteignent les valeurs de 220 à 230 l/s/ha pour les hauteurs d'Aghrib.

La figure 2.17 représentant la carte des intensités pluviométrique de fréquence cinquennale, montre que les valeurs moyennes de l'intensité pluviométrique (150 à 170 l/s/ha) sont observées dans la vallée du Sébaou, allant du Bas jusqu'au Haut Sébaou. Les valeurs minimales sont de 120 à 130 l/s/ha et sont observées au niveau du massif du Djurdjura. Les valeurs maximales de l'intensité pluviométrique sont observées au niveau de la chaîne côtière méditerranéenne et atteignent la valeur de 240 l/s/ha au environ des hauteurs d'Aghrib.

La figure 2.18 représentant la carte des intensités pluviométrique de fréquence centennale, montre que au niveau de la vallée du Sébaou, les valeurs de l'intensité pluviométrique varient de 160 à 220 l/s/ha, du Bas Sébaou (Baghlia) jusqu'au Haut Sébaou (Azazga) passant par le Moyen Sébaou (Tizi Ouzou). Les valeurs minimales avoisinant les 130 l/s/ha, sont observées au niveau du massif du Djurdjura. Quand aux valeurs maximales de

l'intensité pluviométrique, elles sont observées au niveau de la chaîne côtière méditerranéenne et atteignent la valeur de 260 l/s/ha au niveau des hauteurs d'Aghrib.

D'après cette analyse, nous remarquons une nette différence entre les valeurs de l'intensité pluviométrique décennale et cinquantennale et entre les valeurs de la cinquantennale et la centennale. Par contre les valeurs de l'intensité pluviométrique vingtennale et vingt-cinquennale sont très proches. Nous constatons alors, qu'il est inutile d'affiner le travail en proposant les cartes d'intensité pluviométrique intermédiaire entre les fréquences décennale, cinquantennale et centennale.

Et donc, nous suggérons d'utiliser :

- la carte d'intensité pluviométrique décennale pour le dimensionnement des réseaux d'assainissement,
- la carte d'intensité pluviométrique cinquantennale pour le dimensionnement des déversoirs et les bassins d'orage et les retenues collinaires,
- la carte d'intensité pluviométrique centennale voir millénaire pour le dimensionnement des barrages.

2.4. Conclusion

L'élaboration de ces cartes, soulagera l'ingénieur du dilemme auquel il était confronté. A présent l'ingénieur disposera de cartes d'intensités pluviométriques fréquentielles dans le bassin versant du Sébaou de Tizi Ouzou, qui vont lui permettre d'avoir l'intensité pluviométrique fréquentielle en n'importe quel point et pour n'importe quel fréquence, et ainsi pouvoir calculer le débit qui lui permettra de dimensionner son ouvrage.

3.1 Introduction

Parmi les méthodes proposées pour le calcul de l'intensité pluviométrique, à partir d'un ensemble de mesures ponctuelles de précipitation, obtenues à partir de plusieurs stations pluviométriques sur le bassin et ses proximités. Nous distinguons les méthodes classiques (La méthode de la moyenne arithmétique, la méthode des polygones de Thiessen, la méthode des isohyètes et la méthode des deux axes) et la méthode numérique, à savoir la méthode des éléments finis.

C'est ainsi que nous consacrons ce troisième chapitre à la présentation de ces méthodes en vue de les appliquer au bassin versant du Sébaou faisant l'objet de notre étude.

3.2 Méthodes classiques [MUSY]

3.2.1 Méthode de la moyenne arithmétique

C'est la méthode la plus simple, qui consiste à calculer la moyenne des valeurs d'intensités pluviométriques, calculés à partir des précipitations pluviométriques enregistrées au niveau des stations. L'équation de l'intensité pluviométrique moyenne est donnée par la relation suivante :

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad (3.1)$$

avec :

n = nombre de stations ;

I_i = Intensité de précipitation de la station i .

Cette méthode s'applique idéalement, si les stations sont bien réparties et si le relief du bassin est homogène. Toute fois, elle est souvent peu recommander, car peu représentative du fait qu'elle ne prend pas en considération la distance et la superficie entre les stations.

3.2.2 Méthode des polygones de Thiessen

Cette méthode permet d'estimer la moyenne des valeurs pondérée. Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence (figure 3.1). L'intensité moyenne pondérée I_{moy} pour le bassin, se calcule alors en effectuant la somme des intensités de chaque station, multipliées par leurs facteurs de pondération (aire S_i), le tout divisé par la surface totale A du bassin.

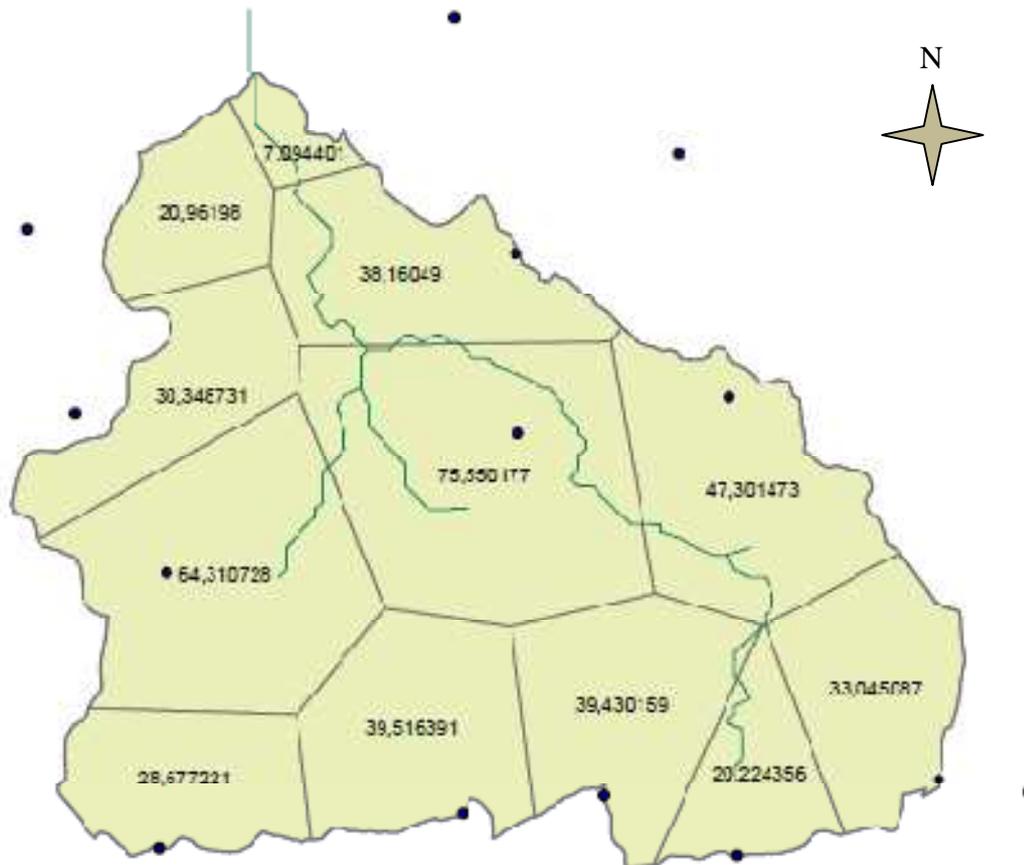


Figure 3.1 : Représentation des polygones de Thiessen

L'intensité moyenne sur le bassin s'écrit :

$$I = \frac{1}{A} \sum S_i I_i \quad (3.2)$$

Où :

A : aire totale du sous bassin ;

S_i : superficie du polygone de la station i ;

I_i : intensité au niveau de la station i .

La méthode des polygones de Thiessen est la plus couramment utilisée, vu son application qui est aisée et qu'elle donne en général de bons résultats. Elle convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène (pluviomètres distribués irrégulièrement).

3.2.3 Méthode des isohyètes (isovaleurs)

Grâce aux valeurs d'intensités pluviométriques calculées à partir des enregistrements des stations pluviométriques, nous pouvons tracer le réseau d'isohyètes.

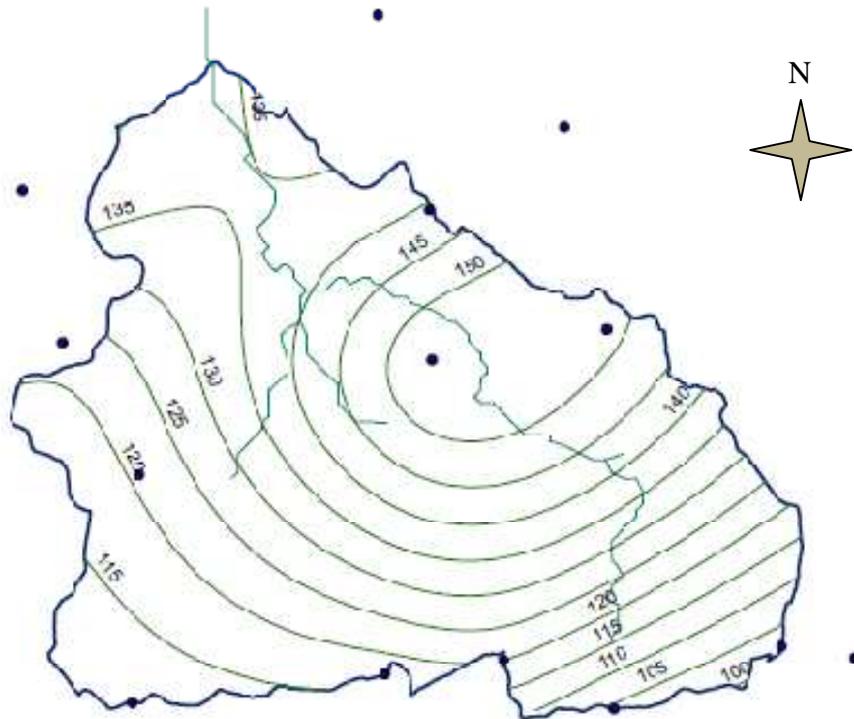


Figure 3.2 : Représentation des isohyètes

Lorsque les courbes d'isohyètes sont tracées, l'intensité moyenne peut être calculée de la manière suivante :

$$I = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^K S_i I_i \quad (3.3)$$

Où :

S_i : superficie comprise entre l'isohyète i et $i+1$

et

$$I_i = (I_i + I_{i+1})/2$$

I_i, I_{i+1} : valeur de l'intensité pluviométrique de l'isohyète i et $i+1$

3.2.4 Méthode des deux axes

Pour le calcul de l'intensité pluviométrique moyenne avec cette méthode, on trace une ligne droite AB, allant du point le plus bas du bassin (exutoire) jusqu'au point le plus éloigné suivant le cours d'eau principal et ça prolongation virtuelle (AB). Par la suite on tracela

médiatrice de ce segment qui est l'axe mineur (CD). Finalement le segment de cet axe a l'intérieur du bassin et l'axe majeur EF.

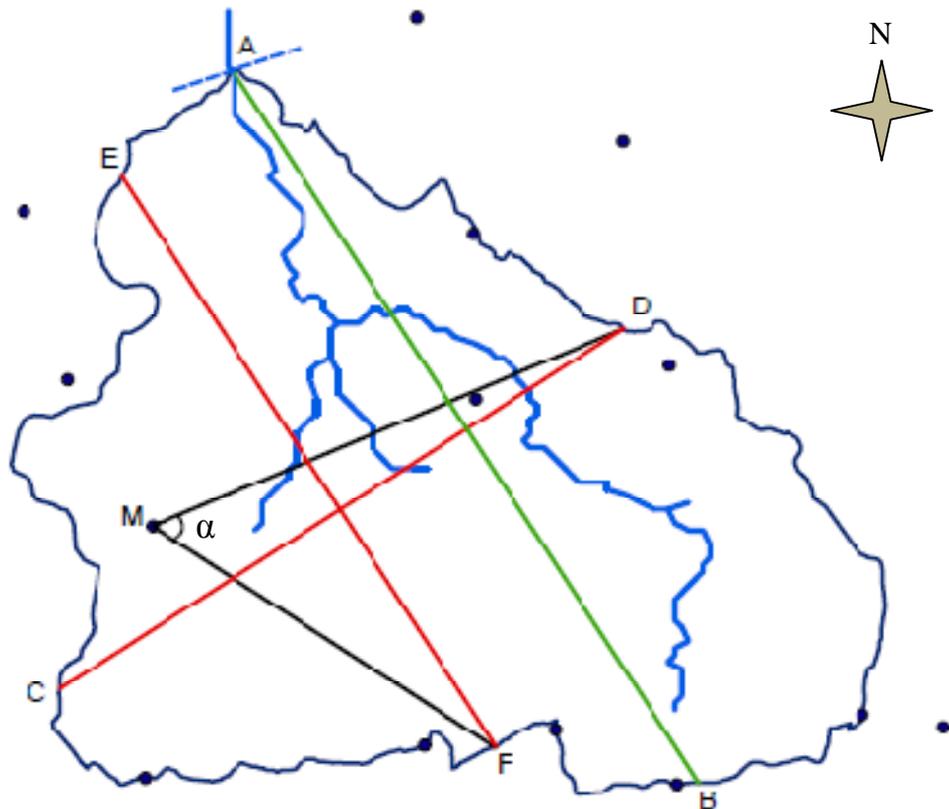


Figure 3.3 Méthode des deux axes

Soit M une station pluviométrique. Son coefficient de pondération proportionnel à l'angle α_i formé par le point M et les extrêmes les plus éloignées des axes.

Le facteur de pondération d'une station est donné par la relation :

$$\omega_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{K=1}^n \alpha_K} \quad (3.4)$$

Avec :

n= nombre total de stations

Les intensités moyennes sur le bassin versant seront

$$I = \sum_{k=1}^n \omega_k I_k \quad (3.5)$$

I_k : intensité sur la station k

Et on calculant α_i par la formule suivante

$$\alpha_i = \cos^{-1} \left| \frac{l_1^2 + l_2^2 - \alpha^2}{2l_1l_2} \right| \quad (3.6)$$

tel que :

$$l_1 = ME \quad l_2 = MC \quad \alpha = EC$$

Cette méthode s'avère plus facile d'accès que les méthodes des isohyètes et de Thiessen et elle peut utiliser des stations très éloignées du bassin.

3.3 Méthode des éléments finis [KHENNANE]

La complexité du comportement et de la forme des phénomènes physique en pratique, constitue la raison majeure du recours à l'approximation par éléments finis. La pluviométrie, étant un phénomène physique très complexe, peut être approximé par éléments finis. Et donc la quantité de pluie totale tombée sur une région donnée peut être calculée en évaluant l'intégrale d'intensité par rapport à la surface ;

$$Q = \int_A I(x, y) dA \quad (3.7)$$

Pour cela nous commençons par décrire l'approximation nodale, pour introduire ensuite la notion d'approximation nodale par sous domaine dite approximation par éléments finis à fin de calculer la quantité de pluie totale tombée sur la région:

3.3.1 Approximation nodale

La méthode des éléments finis est basée sur la construction d'une fonction d'approximation notée $I(x)$, approchée de la fonction réelle dite exacte et noté $I_{ex}(x)$.

Pour construire la fonction « approchée » nous devons :

- choisir un ensemble fini de fonctions dépendant de n paramètres $a_i : I(x, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$,
- déterminer les paramètres a_1, a_2, \dots, a_n en faisant coïncider $I_{ex}(x)$ et $I(x)$ en n points.

Les fonctions $I(x, a_1, a_2, \dots, a_n)$ sont souvent choisies de manière à être faciles à évaluer sur ordinateur. Ainsi l'approximation construite peut fournir :

- une expression approchée en tout point x d'une fonction difficile à évaluer ou connue seulement en certains points,
- une solution approchée d'une équation différentielle ou aux dérivées partielles.

On peut approximer une fonction inconnue V par une fonction approchée I construite sur la base des fonctions polynomiales.

$$I(x)=a_1+a_2 x+a_3 x^2+\dots+a_n x^{n-1} \tag{3.8}$$

Que nous pouvons écrire sous la forme

$$I(x)=\langle 1, x, x^2, \dots, x^{n-1} \rangle \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \tag{3.9}$$

Les coefficients a_i , sont les paramètres généralisés de l'approximation et ils n'ont en général pas de sens physique. Cependant, nous pouvons leur donner un. Pour cela, faisons en sorte que la fonction approchée I coïncide avec la fonction exacte V aux points X_i appelés nœuds.

$$\begin{aligned} I(x) &= a_1 + a_2 x_1 + a_3 x_1^2 + \dots + a_n x_1^{n-1} = V(x_1) = V_1 \\ I(x) &= a_1 + a_2 x_2 + a_3 x_2^2 + \dots + a_n x_2^{n-1} = V(x_2) = V_2 \\ I(x) &= a_1 + a_2 x_3 + a_3 x_3^2 + \dots + a_n x_3^{n-1} = V(x_3) = V_n \end{aligned} \tag{3.10}$$

Que nous pouvons présenter sous la forme matricielle suivante ;

$$\begin{bmatrix} 1 & X_1 & X_1^2 & \dots & X_1^{n-1} \\ 1 & X_2 & X_2^2 & \dots & X_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_n & X_n^2 & \dots & X_n^{n-1} \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} \tag{3.11}$$

Ou d'une manière plus compacte :

$$[A]\{a\} = \{V\} \tag{3.12}$$

Si la matrice $[A]$ n'est pas singulière, nous pouvons écrire :

$$\{a\} = [A]^{-1}\{V\} \tag{3.13}$$

En remplaçant $\{a\}$ dans l'équation (3.13) nous obtenons :

$$I(x)=\langle 1, x, x^2, \dots, x^{n-1} \rangle [A]^{-1}\{V\} \tag{3.14}$$

Que nous pouvons écrire ;

$$I(x) = \langle N_1(x), N_2(x), \dots, N_n(x) \rangle \{V\} \quad (3.15)$$

Ou tout simplement :

$$I(x) = \langle N \rangle \{V\} \quad (3.16)$$

avec :

$$\langle N \rangle = \langle 1, x, x^2, \dots, x^{n-1} \rangle [A]^{-1} \quad (3.17)$$

tel que :

V : variables nodales

N : fonction d'interpolation nodale qui s'écrit

Il découle de (3.16) :

$$N_j(X_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases} \quad (3.18)$$

Ce type d'approximation est appelé approximation nodale, constitué dans la base des variables nodales.

3.3.2 Quadrature de Gauss

Dans le domaine mathématique de l'analyse numérique, on remplace le calcul de l'intégrale par une somme pondérée prise en un certain nombre de points du domaine d'intégration pour un polynôme de degré $2n - 1$ avec n points pris sur le domaine d'intégration. Si ce dernier est (a, b) , l'intégrale sera de la forme.

$$F(x) = \int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{2} \int_{-1}^1 f\left(\frac{b-a}{2}x + \frac{a+b}{2}\right) dx \quad (3.19)$$

Où $\varpi(a, b)$ est une fonction de pondération, qui peut assurer l'intégrabilité de f . Les ϖ_i sont appelés les coefficients de quadrature (ou poids). Les points x_i (ou nœuds) sont réels,

Le domaine d'intégration $[a, b]$ doit être changé (au moyen d'un changement de variable) en $[-1, 1]$ avant d'appliquer les méthodes de quadrature de Gauss.

L'approximation de la valeur de l'intégrale devient :

$$F(x) = \int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_i \omega_j f\left(\frac{b-a}{2}x_i + \frac{a+b}{2}\right) \quad (3.20)$$

3.3.3 Approximation nodale par sous domaines

La construction d'une fonction approchée $I(x)$ est difficile lorsque le nombre de nœuds est important et donc les paramètres de cette fonction deviennent importants. La méthode d'approximation nodale par sous-domaines simplifie la construction de $I(x)$.

3.3.3.1 Discrétisation en choisissant l'élément de référence

Pour évaluer la quantité d'eau moyenne totale tombée sur le bassin représenté ci après, à partir des mesures obtenues par des pluviomètres placés en certains points du bassin (nœuds) et les coordonnées des nœuds sont connues ainsi les hauteurs de précipitations.

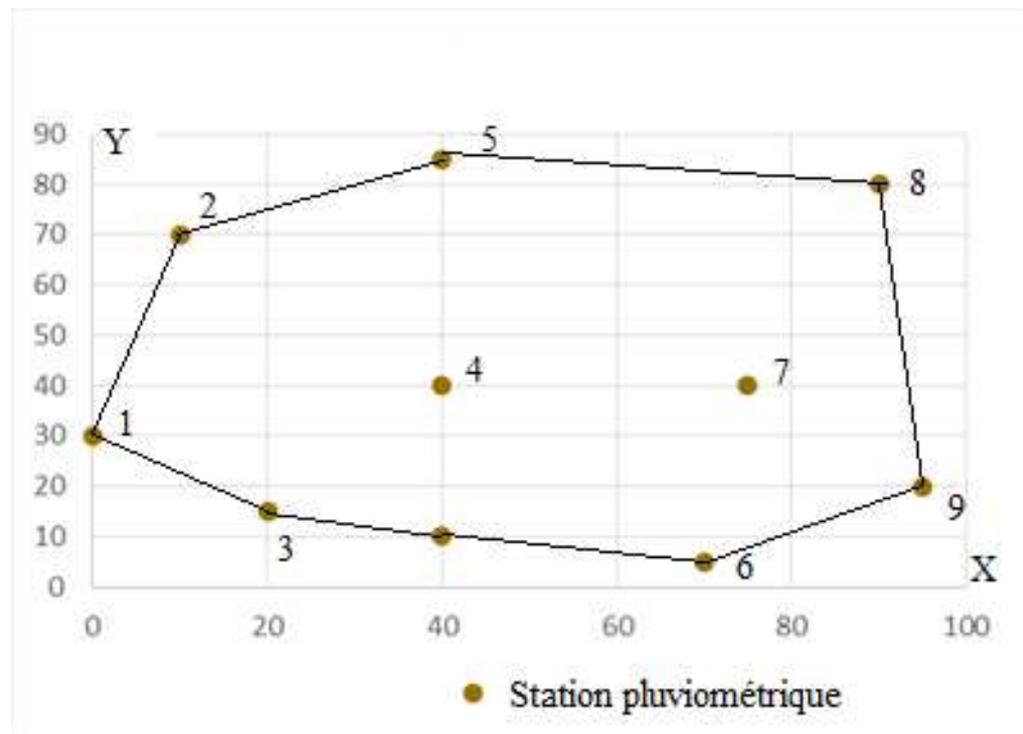


Figure 3.4: Représentation d'un bassin versant avec des stations pluviométriques

- **Choisir l'élément de référence** ; Les différentes formes d'éléments classiques qui existent sont :

A une dimension :

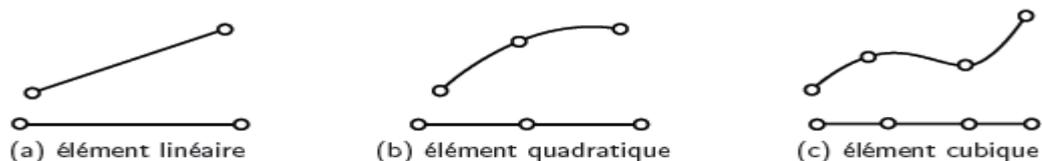


Figure 3.5 : Forme d'éléments à une dimension

A deux dimensions :

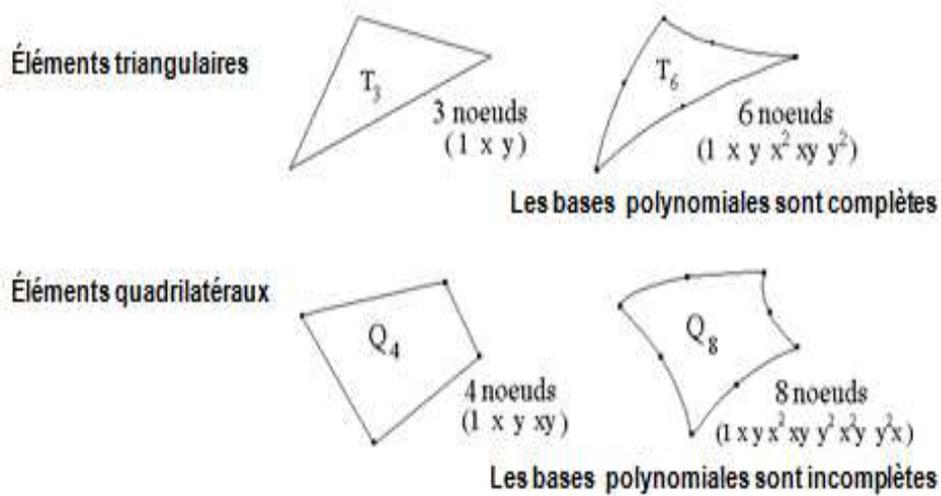


Figure 3.6: Forme d'éléments a deux dimensions

A trois dimensions :

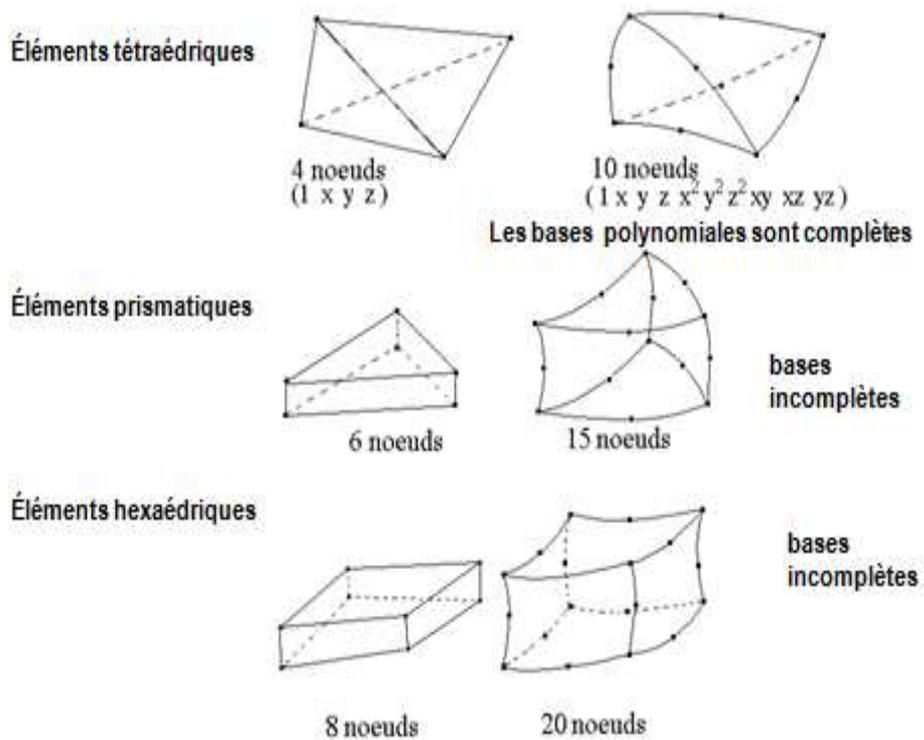


Figure 3.7 : Forme d'éléments à une dimension

Pour les problèmes bidimensionnels, on utilise des éléments triangulaires ou des éléments quadrilatéraux. Dans notre cas, nous utilisons des d'éléments quadrilatéraux linéaires.

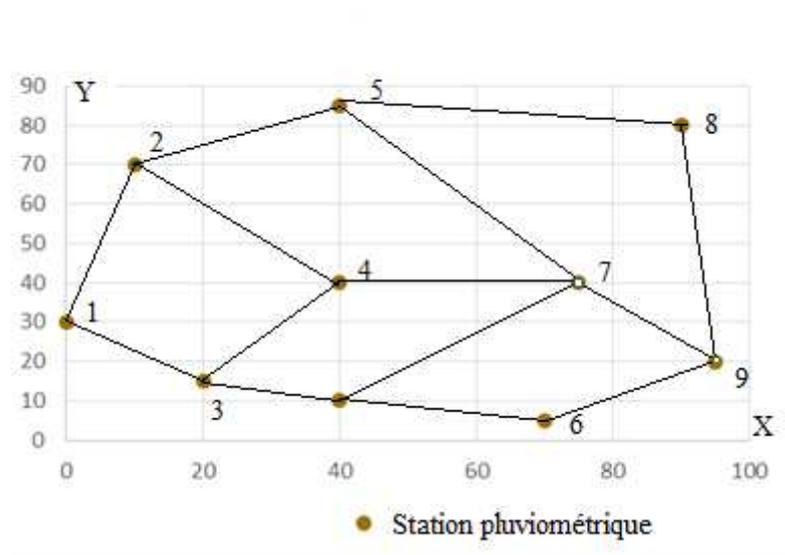


Figure 3.8: Maillage quadrilatéral

3.3.3.2 Transformation géométrique

A l'aide d'une transformation géométrique appropriée (τ^e), un élément de référence de forme simple peut se transformer en un ou plusieurs éléments réels de forme plus complexe. Cette transformation τ^e , représentée sur la figure (3.9). Les coordonnées (x, y) d'un point de l'élément réel sont définies en fonction des coordonnées nodales de l'élément ainsi que des coordonnées (ξ, η) du point correspondant de l'élément de référence.

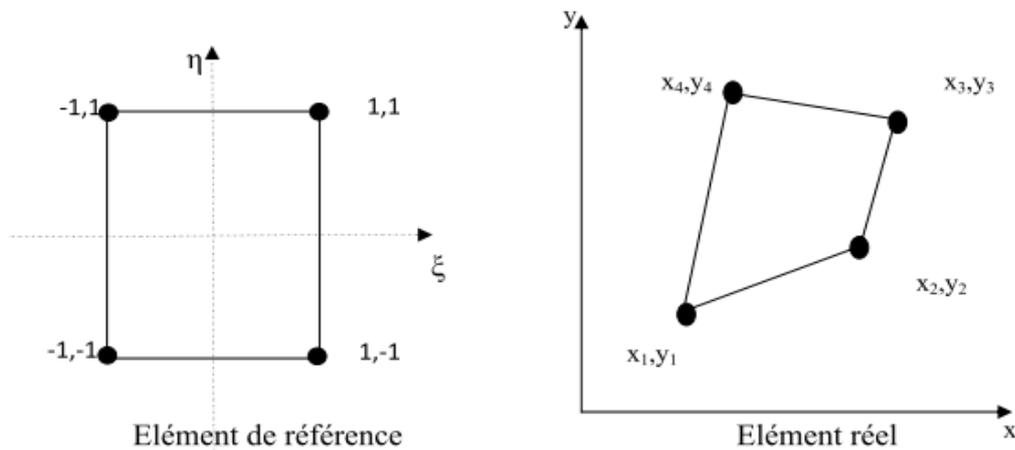


Figure 3.9: Transformation géométrique

Pour la transformation géométrique des coordonnées des éléments, nous utilisons les mêmes fonctions nodales $N_i(\xi, \eta)$, car l'élément est isoparamétrique.

Dans le tableau 3.1 qui suit, nous allons présenter quelques bases polynomiales.

Tableau3.1. Les différentes bases polynomiales à une et deux dimensions tiré à partir du triangle de PASCAL

Dimension	Nature de la base	Base polynomiale
1	Linéaire	$\langle 1, \xi \rangle$
1	Quadratique	$\langle 1, \xi, \xi^2 \rangle$
2	Linéaire	$\langle 1, \xi, \eta \rangle$
2	Bilinéaire	$\langle 1, \xi, \eta, \xi\eta \rangle$

3.3.3.3 Choix de la base polynomiale

Notre élément de référence a une forme carrée donc la base polynomiale qui lui convient est ;

$$P(\xi, \eta) = \langle 1, \xi, \eta, \xi\eta \rangle \quad (3.21)$$

3.3.3.4 Relation entre variables généralisés et variables nodales

Evaluation de $[P_n]$ dans le sens trigonométrique

$$[P_n] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

- Inversion de P_n

On voit bien que P_n est orthogonale, puisque les produits scalaires de ces vecteurs colonnes sont nuls. En plus chaque vecteur colonne est de norme égale à quatre, donc l'inverse de cette matrice P_n est donné comme suite.

$$[P_n]^{-1} = \frac{1}{4} [P_n]^T = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Les fonctions nodales pour les éléments quadrilatéraux linéaires sont données dans l'équation (3.24):

$$\begin{aligned}
 N_1(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1 - \xi - \eta + \xi\eta) \\
 N_2(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1 + \xi - \eta - \xi\eta) \\
 N_3(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1 + \xi + \eta + \xi\eta) \\
 N_4(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1 - \xi + \eta - \xi\eta)
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

Et puisque l'élément est isoparamétrique alors : $\langle \tau^e \rangle = \langle N \rangle$ et donc :

$$X(\xi, \eta) = \langle N_1(\xi, \eta), N_2(\xi, \eta), N_3(\xi, \eta), N_4(\xi, \eta) \rangle \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix}
 \tag{3.25}$$

$$Y(\xi, \eta) = \langle N_1(\xi, \eta), N_2(\xi, \eta), N_3(\xi, \eta), N_4(\xi, \eta) \rangle \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{pmatrix}$$

Le Jacobien de transformation est donné par :

$$[J(\xi, \eta)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \xi} & \frac{\partial Y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial X}{\partial \eta} & \frac{\partial Y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_1^4 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} X_i & \sum_1^4 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} Y_i \\ \sum_1^4 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} X_i & \sum_1^4 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \\ X_4 & Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}
 \tag{3.26}$$

$$dA = dX \cdot dY
 \tag{3.27}$$

avec :

$$dX = \frac{\partial X}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial X}{\partial \eta} d\eta = \frac{\partial}{\partial \xi} \sum_{i=1}^4 (N_i X_i) d\xi + \frac{\partial}{\partial \eta} \sum_{i=1}^4 (N_i X_i) d\eta
 \tag{3.28}$$

$$dY = \frac{\partial Y}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial Y}{\partial \eta} d\eta = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\sum_{i=1}^4 N_i Y_i \right) d\xi + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\sum_{i=1}^4 N_i Y_i \right) d\eta$$

$$[J] = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -(1-\eta) & (1-\eta) & (1+\eta) & -(1+\eta) \\ -(1-\xi) & -(1+\xi) & (1+\xi) & (1-\xi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \\ X_4 & Y_4 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Ou sous la forme plus compacte :

$$[J] = [\Delta] * [XY] \quad (3.30)$$

Nous obtenons une quantité pour chaque élément donner par :

$$Q_e = \sum_i^{r_1=n} \sum_j^{r_2=n} W_i W_j < N1(\xi, \eta) N2(\xi, \eta) N3(\xi, \eta) N4(\xi, \eta) > \begin{Bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{Bmatrix} Det[J(\xi, \eta)] \quad (3.31)$$

$W_i W_j$: représentes les poids d'intégration de la méthode de Gauss

La quantité d'eau totale (Q_{tot}) tombée sur le bassin est :

$$Q_{tot} = \sum_e Q1 + Q2 + Q3 + Q4 \quad (3.32)$$

Le calcul de l'aire de chaque élément est fait comme suite :

$$A_e = \int dA = \int \int dXdY = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 detj(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (3.33)$$

D'où :

$$A_e = \sum_i^{r=3} \sum_j^{r=3} W_i W_j detj(\xi_i, \xi_j) \quad (3.34)$$

L'aire totale est donnée par :

$$A = \sum A_e \quad (3.35)$$

Cette méthode, vu qu'elle est très élaborée, nécessite une programmation sur ordinateur.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu répertorier les méthodes classiques les plus utilisées pour le calcul de précipitation moyenne d'un bassin versant, et la différence entre chacune, figure uniquement dans la technique d'interpolation. Toutefois, il faut souligner que ces méthodes sont asymptotique et donnent donc des résultats semblables lorsque le nombre de stations croît jusqu'à une valeur optimale.

Quant à la méthode des éléments finis, elle nécessite impérativement la disposition des moyens de calcul sur ordinateur.

Pour calculer la quantité de pluie on multiplie chaque intensité s'élément par ça surface, et ceci est faisable seulement par la méthode des éléments finis, que nous allons introduire par la suite ces méthodes classiques.

4.1 Introduction

A travers ce chapitre, nous évaluons la quantité de pluie qui tombe sur le bassin versant du Sébaou avant ruissellement. Pour ce faire, plusieurs méthodes sont disponibles (la méthode arithmétique, la méthode des isohyètes, la méthode de Thiessen et la méthode des éléments finis), lesquelles ont été exposées au troisième chapitre. Pour arriver à cet objectif, nous utilisons la carte de l'intensité pluviométrique fréquentielle décennale élaborée au deuxième chapitre. Ainsi, le logiciel ArcGis est mis à profit pour extraire des informations nécessaires à la construction des fichiers de données. Un programme de calcul en langage Fortran est écrit pour évaluer la quantité de pluie en intégrant les différentes méthodes. A cet effet, deux variantes ont été élaborées. L'une tenant compte uniquement des variables planimétrique (x,y) et l'autre en tenant compte d'une troisième variable qui est l'altitude (z).

4.2 Détermination de l'intensité pluviométrique moyenne (sans altitude)

L'intensité pluviométrique moyenne est évaluée par les différentes méthodes suscitées. Le logiciel ArcGis est utilisé pour déterminer les différentes intensités pluviométriques au niveau de chaque station pluviométrique et pour effectuer les discrétisations du bassin versant. A cet effet, nous avons utilisé le résultat de l'interpolation des intensités pluviométriques fréquentielles (chapitre 2) des stations données, pour créer des stations fictives (nœuds) sur les bordures limitant le bassin versant et d'autres stations à l'intérieure.

Notons que pour notre application nous avons utilisés uniquement la fréquence décennale pour calculer l'intensité moyenne et la quantité de pluie, la même démarche peut être suivie pour les autres fréquences.

4.2.1 Discrétisation du bassin versant du Sébaou

- **Méthode des polygones de Thiessen**

Cette méthode permet de calculer la moyenne pondérée de l'intensité pluviométrique, dont le facteur de pondération est la superficie du polygone dit de Thiessen revenant à chaque station. Ces polygones sont construits en utilisant l'outil « Créer des polygones de Thiessen » disponible sur ArcGis. Ceci nous permet d'extraire l'intensité pluviométrique au niveau de chaque point ainsi que la superficie du polygone auquel il appartient. Le résultat de la discrétisation est représenté dans la figure 4.1.

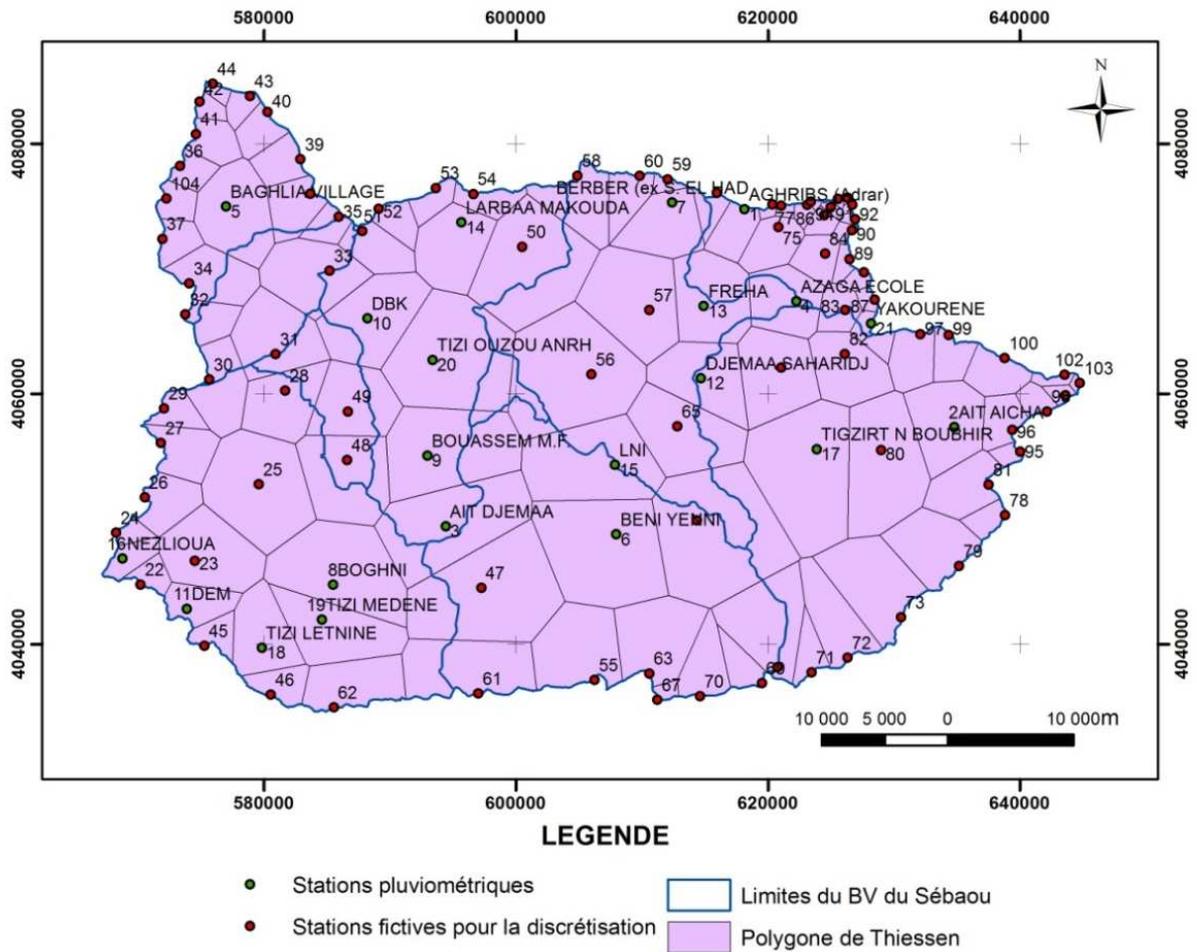


Figure 4.1 : Représentation des polygones de Thiessen.

- **Méthode des isohyètes**

Afin d’extraire les surfaces entre les isohyètes ainsi que les intensités pluviométriques, un tracé d’isolignes est effectué avec l’outil « Créer des isolignes avec barrière ». la figure (4.2), représente le tracé d’isohyètes des intensités pluviométriques décennale dans le bassin versant du Sébaou.

- **Méthode des deux axes**

Pour la réalisation du tracé des deux axes, nous avons suivi le cours d’eau principale du chevelu hydrographique et relié ces deux extrémités pour avoir une droite, qui nous a permis de tracer une autre droite parallèle et une médiatrice à cette dernière. Ces axes ont permis d’extraire les différentes coordonnées des points afin de calculer le facteur de pondération. Le tracer est donné dans la figure 4.3.

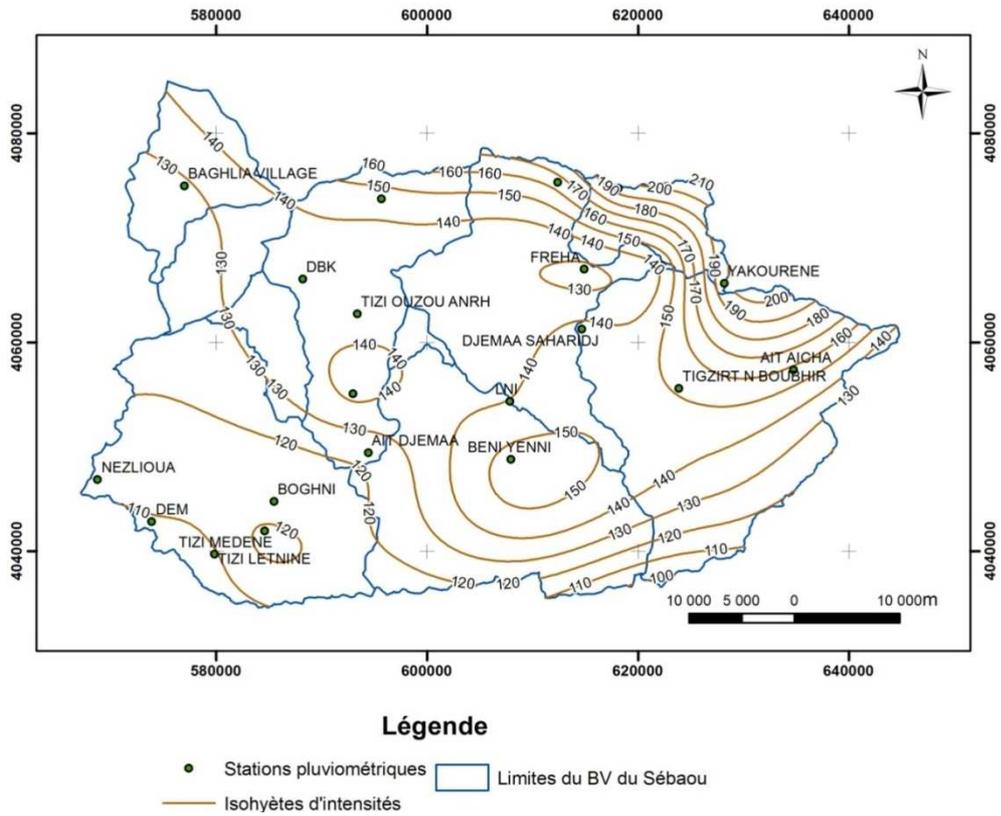


Figure 4.2: Tracé des isohyètes d'intensité pluviométrique.

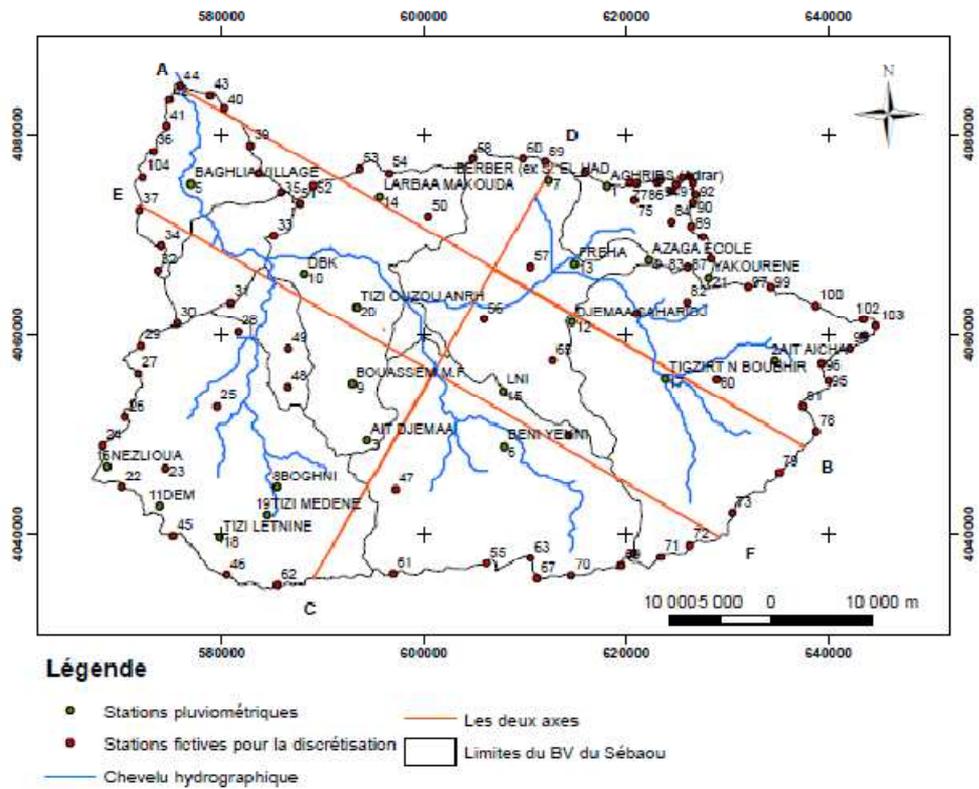


Figure 4.3: Tracé des deux axes EF et CD.

• **Méthode des éléments finis**

En reliant les différents nœuds, nous traçons des éléments quadrilatéraux. Cette discrétisation permet d’extraire le numéro identifiant de chaque nœud ainsi que ces coordonnées. La figure 4.4, représente un aperçu de la discrétisation du bassin versant du Sébaou en élément quadrilatère.

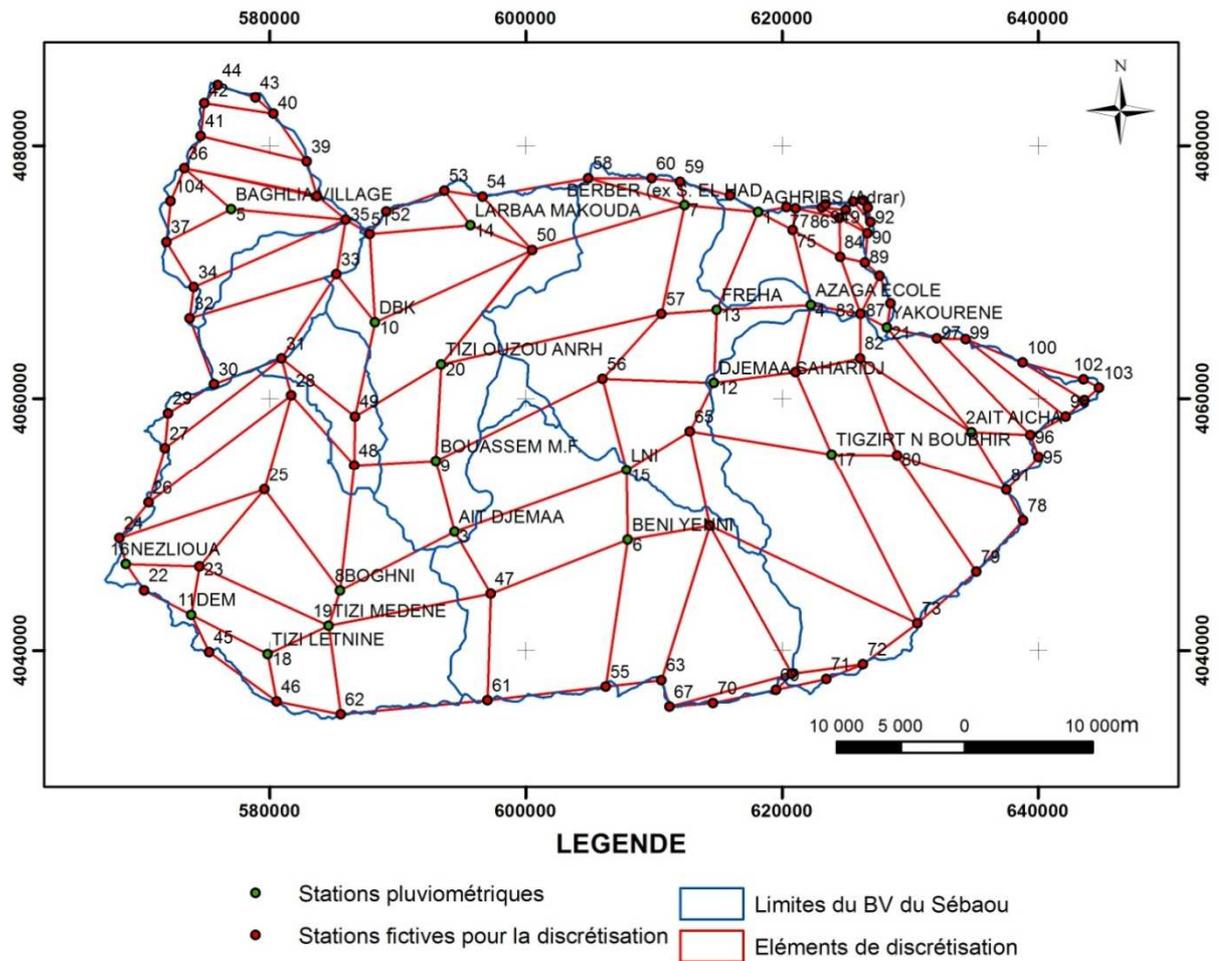


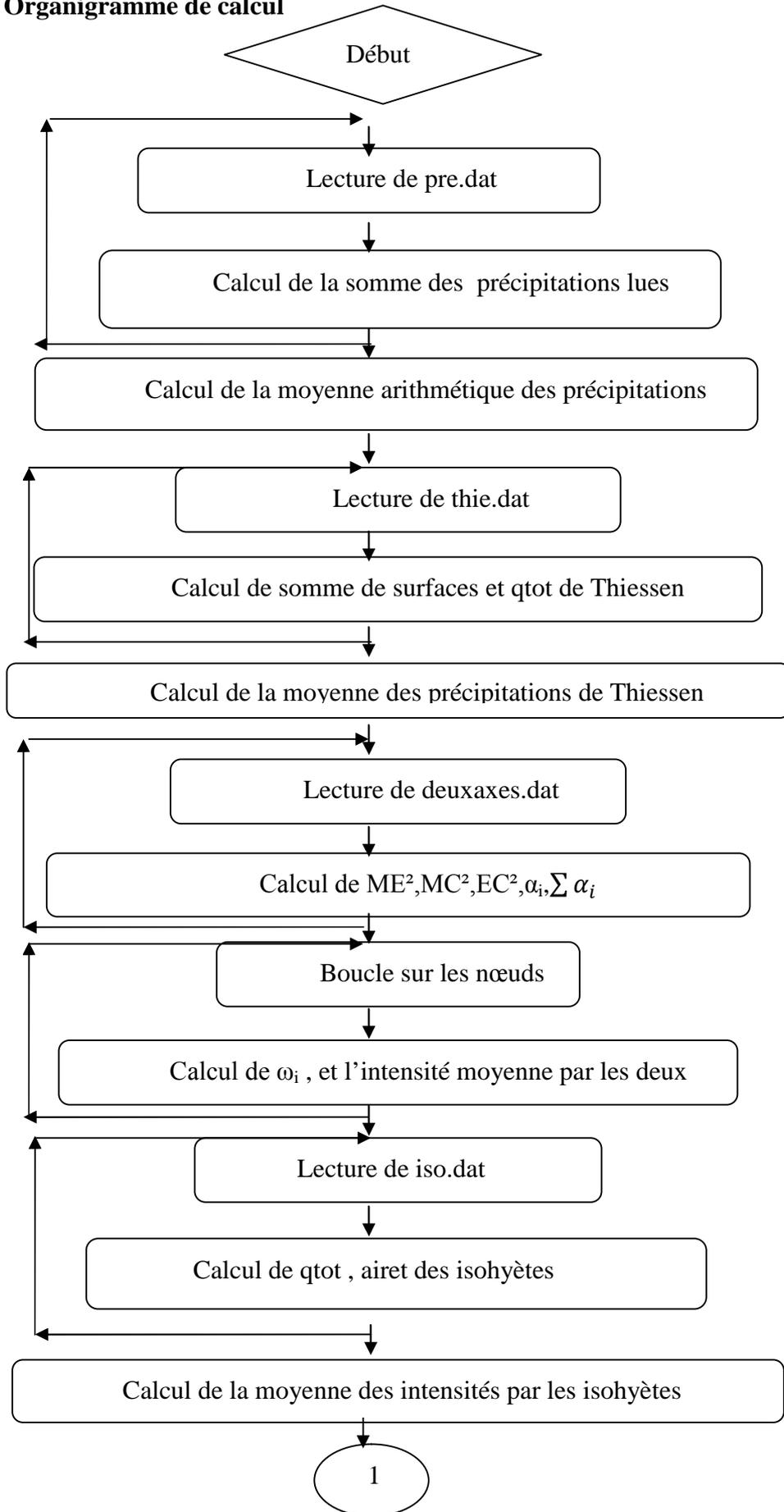
Figure 4.4: Discrétisation quadrilatérale du bassin versant du Sébaou.

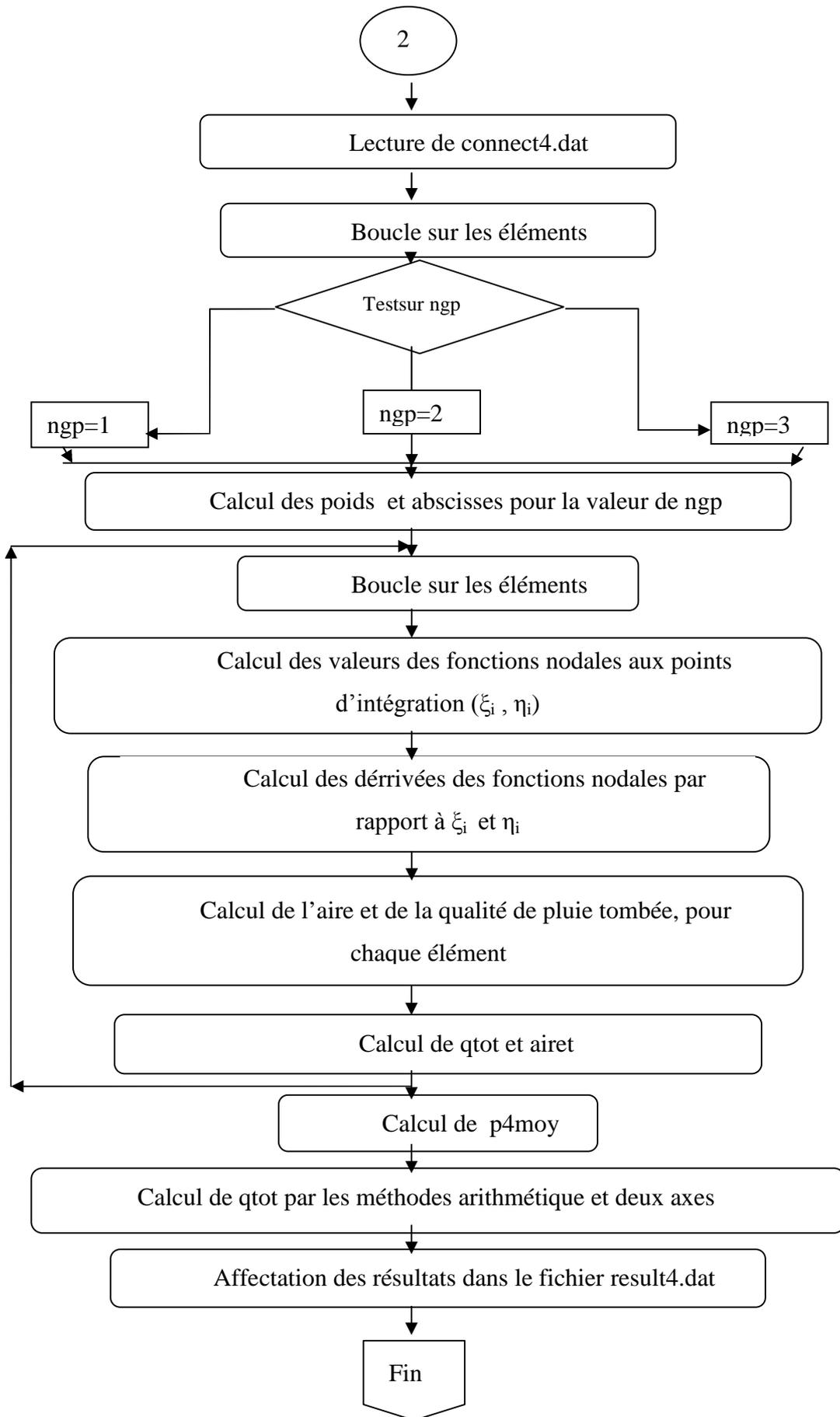
Les informations extraites des différentes discrétisations, serviront pour la construction des fichiers de données pour le programme de calcul.

4.2.2 Architecture informatique du programme de calcul

Un programme de calcul en langage Fortran (99) 85 élaboré en intégrant les différentes méthodes, pour calculer la quantité de pluie qui tombe dans le bassin versant du Sébaou. Ce programme comporte environ 310 lignes, il est composé d’un programme principal et de 5 sous programmes, présentés en annexe A. L’organigramme de calcul donné si après résume les différentes étapes du programme

a. Organigramme de calcul





b. Unités utilisées

Les unités utilisées dans le programme sont résumées dans le tableau 4.1 qui suit.

Tableau 4.1 : Différentes unités utilisées

Mesures	Unité
Longueurs, coordonnées	Km
Aires	Km ² , ha
Intensités	l/s/ha
Débits	l/s

c. Structure des fichiers de données

Les fichiers de données sont écrits en format libre (valeurs séparées par un blanc)

Méthode arithmétique

1 nnt

nnt : Nombre de nœuds total

2 i Prec(i) i=1,nnt Geom(i,j) j=1,2

i : Numéro du nœud i=1,nnt

Prec(i) : Intensité pluviométrique du nœud i

Geom : Coordonnées des nœuds

Méthode de Thiessen

1 nnt

nnt : Nombre de nœuds total

2 i Prec(i) i=1,nnt Surfthie(i) i=1,nnt

i : Numéro du nœud

Prec (i) : Intensité pluviométrique du nœud i

Surfthie : Surface du polygone de Thiessen

Méthode des deux axes

1 nnt

nnt : Nombre de nœuds total

- 2 $iPrec(i) \quad i=1, nnt$ $geoM(i,j) \quad j=1,2$ $geoE(i,j) \quad j=1,2$ $geoC(i,j) \quad j=1,2$
- i : Numéro du nœud
- $Prec(i)$: Intensité pluviométrique du nœud i
- $geoM$: Coordonnées (x,y) du nœud
- $geoE$: Coordonnées (x,y) des extrémités de l'axe EF
- $geoC$: Coordonnées (x,y) des extrémités de l'axe CD

Méthode des isohyètes

- 1 nbr
- nbr : Nombre de pas
- 2 $Preciso(i) \quad i=1, nbr$ $Surfiso(i) \quad i=1, nbr$
- $Preciso(i)$: Intensité moyenne entre deux isohyètes successives
- $Surfiso(i)$: Surface entre deux isohyètes successives

Méthode des éléments finis

- 1 nel nne ngp
- nel : Nnombre d'éléments
- nne : Nombre de nœuds par élément
- ngp : Nombre de poids de gauss
- 2 k $convec(k,j) \quad j=1, nne$
- k : numéro de l'élément
- $convec$: matrice de connectivité

4.2.3 Résultats du calcul de l'intensité moyennes

Les valeurs des intensités pluviométriques moyennes estimées par le programme de calcul et par des différentes méthodes sont résumées dans le tableau 4.2 qui suit.

Tableau 4.2 : Valeurs des intensités moyennes calculées

Les méthodes	Surfaces calculées [Km ²]	Intensités moyenne calculé [l/s/ha]	<i>MEF</i>
			<i>Méthode classique</i>
Arithmétique	2445,17	146.78	0,930917
Thiessen	2499,70	139.15	0,948017
Deux axes	2445,17	145.82	0,937868
Isohyètes	2498,44	137.03	0,933574
MEF	2445,17	136.76	

Les résultats montrent que la valeur de l'intensité pluviométrique décennale moyenne, donnée par la méthode des éléments finis ne s'éloigne pas trop de celles données par les méthodes classiques, mais étant plus élaborée elle des valeurs plus exacte.

4.3 Détermination de l'intensité pluviométrique moyenne en considérant l'effet d'altitude

Afin de considérer l'effet de l'altitude dans l'estimation de l'intensité pluviométrique moyenne, nous déterminons des relations d'interpolation de l'intensité pluviométrique en fonction de l'altitude. Celles-ci seront employées dans le programme de calcul avec quelques aménagements de ce dernier.

4.3.1 Relations d'interpolation

En fonction des stations pluviométriques disponibles dans le bassin versant du Sébaou et leurs répartitions en son sein, nous avons pu extraire trois fonctions d'interpolations de l'intensité pluviométrique en fonction de l'altitude. La première appartient au Bas Sébaou, la deuxième au Moyen Sébaou et la troisième appartient au Haut Sébaou.

Les différentes équations de l'intensité pluviométrique en fonction de l'altitude sont obtenues à partir des courbes tracées dans chacune des zones considérées (haut, moyen et bas Sébaou)

➤ Bas Sébaou

L'équation d'intensité pluviométrique en fonction de l'altitude ($I(z)$) du bas Sébaou est déduite de la figure (4.5) à savoir :

$$I(z) = -0.036 * z + 132 \quad [l/s/ha] \quad (4.1)$$

avec :

z : altitude de la station

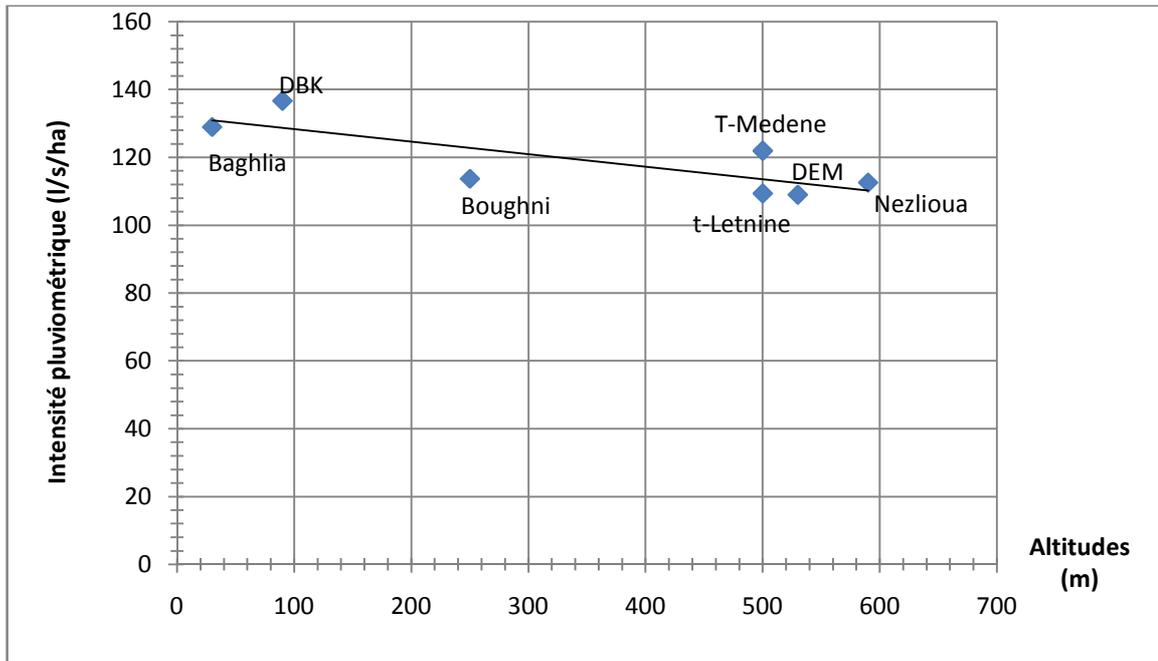


Figure 4.5 : Relation entre l'intensité pluviométrique et l'altitude dans le Bas Sébaou

➤ Moyen Sébaou

L'équation d'intensité pluviométrique en fonction de l'altitude $I(z)$ dans le Moyen Sébaou est déduite à partir de la figure 4.6. Elle s'écrit comme suit :

$$I(z) = 4,692 * \ln(z) + 113,8 \quad [l/s/ha] \quad (4.2)$$

➤ Haut Sébaou

A partir de la figure 4.7, nous déduisons l'équation d'intensité pluviométrique en fonction de l'altitude $I(z)$ dans le Haut Sébaou. Elle s'écrit comme suit :

$$I(z) = 0,102(z) + 114,1 \quad [l/s/ha] \quad (4.3)$$

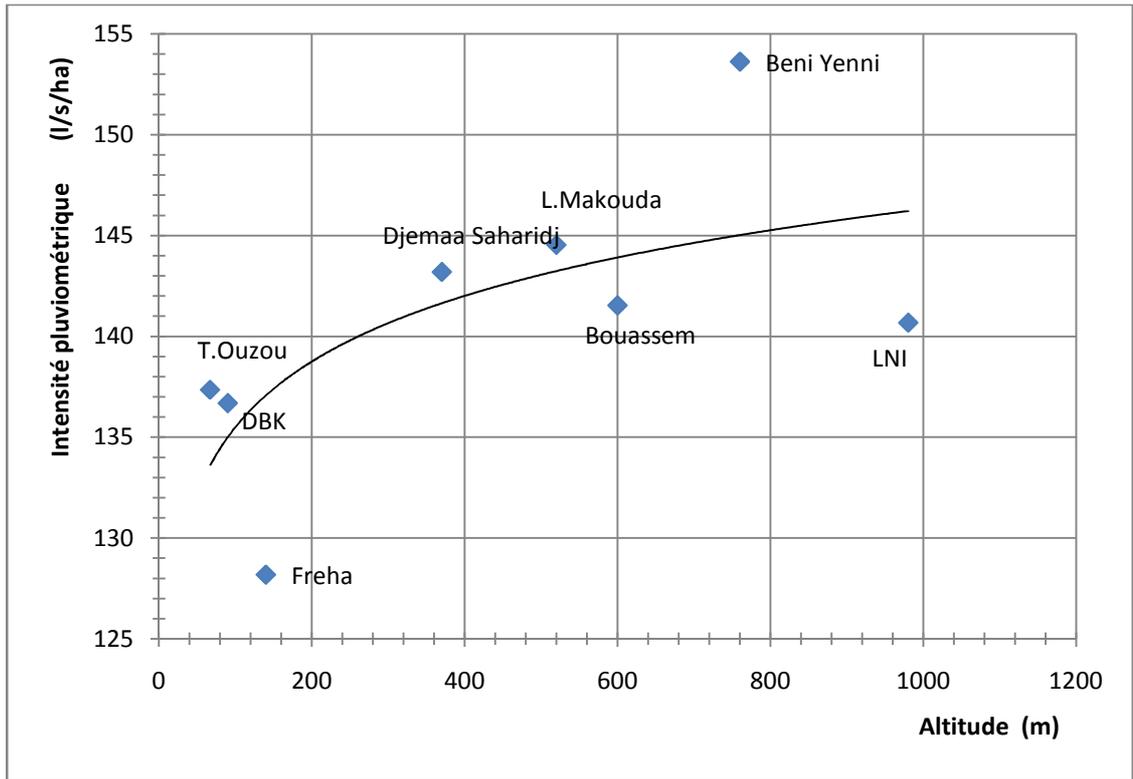


Figure 4.6 :Relation entre l'intensité pluviométrique et l'altitude dans le Moyen Sébaou

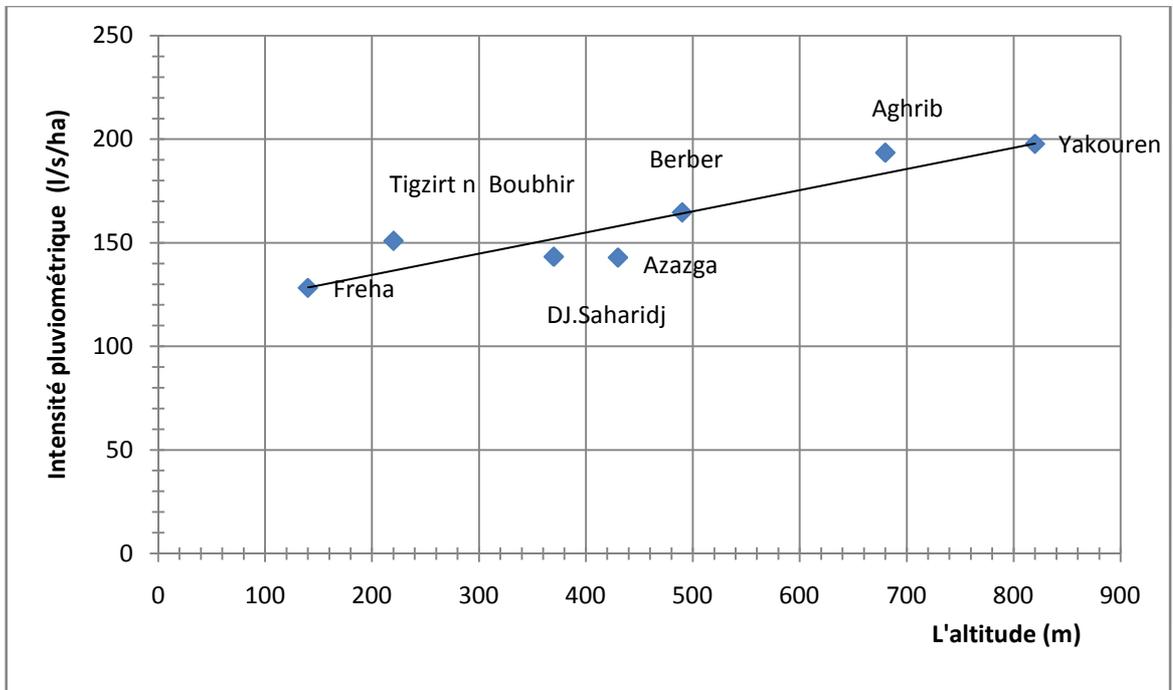


Figure 4.7 :Relation entre l'intensité pluviométrique et l'altitude dans le Haut Sébaou

4.3.2. Aménagements apportés au programme Fortran élaboré

Pour calculer l'intensité pluviométrique moyenne par les différentes méthodes, tenant compte de l'effet de l'altitude, nous introduisons les fonctions d'interpolations de l'intensité pluviométrique en fonction de l'altitude dans le programme principal précédemment développé, sous forme de Soubroutine.

d. Soubroutine de calcul de l'intensité pluviométrique en fonction de l'altitude

```

Cette subroutine est structurée comme suite ;
subroutine foncz(izone,altitude,precipz)
implicit double precision (A-H,O-Z)
if (izone==1) then
precipz=-0.036*altitude+132
else if (izone==2) then
precipz=4.692*log(altitude)+113.8
else if (izone==3) then
precipz=0.102*altitude+114.1
end if
return
end

```

4.3.3. Résultat de différentes intensités moyennes

Le résultat de calcul de l'intensité pluviométrique moyenne est présenté dans le tableau (4.3) suivant ;

Tableau 4.3 : Valeurs des intensités moyennes calculées

Les méthodes	Surfaces [Km ²]	Intensités pluviométrique [l/s/ha]		MEF
		Avec altitude	Sans altitude	Méthode classique
Arithmétique	2445,17	160.42	146.78	0,93043261
Thiessen	2499,70	147.65	139.15	1,01090417
Deux axes	2445,17	154.23	144.29	0,9677754
Isohyètes	2498,44	148.68	137.03	1,003901
MEF	2445,17	149.26	136.76	

Nous remarquons que dans le tableau (4.3) les intensités pluviométriques sont plus importantes en tenant compte de l'altitude.

4.4 Calcul des quantités de pluie

Nous déduisons les quantités de pluie tombées dans le bassin versant du Sébaou, en multipliant les différentes intensités par la surface, le tableau (4.4) suivant nous donne la

comparaissant des quantités de pluie obtenues par les différentes méthodes avec et sans tenir compte de l'effet de altitude.

Tableau 4.4 : Résultats de calcul de la quantité de pluie

Les méthodes	Quantités de pluie sans altitude [l/s]	Quantité de pluie avec altitude [l/s]
Arithmétique	358,90499	392,24752
Thiessen	347,82622	369,08319
Deux axes	356,548.94	377,11285
Isohyètes	342,37213	371394.51
MEF	334,09685	364,96919

Nous remarquons, qu'en tenant compte de l'altitude les quantités de pluie sont plus élevées ce qui veut dire que le paramètre altitude ne peut pas être négligé lors de l'évaluation de la quantité de pluie afin de dimensionner correctement l'ouvrage.

4.5 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons calculés l'intensité pluviométrique moyenne et la quantité de pluie totale qui tombe dans le bassin versant du Sébaou, par différentes méthodes.

Les résultats des intensités pluviométriques moyennes ainsi que la quantité de pluie tombée montrent que la méthode des éléments finis élaboré donne des résultats satisfaisant et ne s'éloigne pas beaucoup des résultats des méthodes classiques.

Conclusion générale

Nous avons vu dans ce travail que l'évaluation exacte des précipitations constitue un élément majeur dans les stratégies d'aménagement. Ainsi nous avons réalisé des cartes d'intensités pluviométriques fréquentielles qui serviront comme outil décisionnel pour l'ingénieur concepteur, en lui permettant de dimensionner ses ouvrages d'une manière optimale.

Les cartes ainsi élaborées nous permettent de connaître à n'importe quel point de l'espace du bassin versant l'intensité pluviométrique d'une fréquence donnée, telles que l'intensité décennale pour le dimensionnement d'un réseau d'assainissement, l'intensité vingtennale pour le dimensionnement d'une retenue collinaire, l'intensité cinquantennale pour le dimensionnement des ouvrages de lutte contre les inondations.

Avec la seconde partie de ce travail, nous mettons à la disposition des ingénieurs praticiens un second outil complémentaire au premier qui est l'application informatique développée avec le langage Fortran. Cette application numérique basée sur la méthode des éléments finis et faisant appel à la discrétisation quadrilatérale, qui nous permet d'évaluer la quantité de pluie tombée dans une région donnée en tenant compte de la variation spatiale et fréquentielle de l'intensité pluviométrique, chose qui à ce jour était négligée par les praticiens tant le problème posé était complexe.

Effectivement, traditionnellement les calculateurs considéraient à tort ou à raison selon les points de vue, que l'intensité pluviométrique était constante sur tout l'espace du bassin versant pour mener leurs dimensionnements. Cette manière de faire menait selon les cas à un surdimensionnement lorsqu'elle ne menait pas à un sous dimensionnement.

Nous pouvons conclure que ces deux outils développés contribuent à faire avancer l'état des connaissances de nos ingénieurs évoluant dans notre région car ils s'inscrivent dans une logique de recherche appliquée.

A. Khennane, " Méthode des éléments finis énoncé des principes de base", OPU Alger, 1997.

A.Musy, Hydrologie Appliquée, édition HGA, Bucarest, 1998.

B.Yakoub, l'eau dans le bassin versant du Sébaou et le village de Tizi-Ouzou, Evaluation Contrainte et Recommandation (1997). Thèse de doctorat (UMMTO).

FORTRAN77 - Guide pour l'écriture de programmes portables sous la direction de F. Ficheux-Vapné - Éditions Eyrolles France.

G. Dhatt, G. Touzot, E. Lefrancois. Méthode des Eléments Finis. Éditions Lavoisier, 2005.

H.Hammoum, R.Bouzida, Pratique des Systèmes d'Information Géographiques SIG, édition « les pages bleues internationales », ISBN 978-9947-850-67-1, Alger, 2010.

J.LALMAS. Hydrologie générale. Principe et application.

JL.Bertrand-krajewski, Cours d'Hydrologie Urbaine, Partie 2, la pluie,éditions du Seuil,Paris (France)(1990).

JP.Labord, l'hydrologie de surface, 2000.

K.Mahfoud, B.Si Salem, Calcul Numérique de la pluviométrie Par La Méthode Des Eléments Finis(1998). Thèse d'ingénieur d'état en hydraulique (Ecole Nationale Polytechnique).

M.Djemai.(1985)

P.Seltzer, A. Lasserre, A.Grandjean, R.Auberty, & A. Fourey. Le climat de l'Algérie: Impr." La Typo-litho" et J. Carbonel. (1946).

S.Abbani, Application de la Méthode des éléments finis pour l'estimation des pluies moyenne sur les bassins versants, 1er Séminaire International sur la Ressource en eau au sahara : Evaluation, Economie et Protection, le 19 et 20 janvier 2011(ouargla), Département de Génie civil et hydraulique, Université de Ouargla.

Tutorial de Formation en français sur ArcGIS, 2001 « Support de cours avec exercices pratiques et données » ESRI France.

Programme développé sur Fortran

```

*$noext
c  programme de calcul d'une Quantite de pluie sur une region donnee
c      Approximation pr des élèment finis quadrilatéraux iso prametricque bi-linéaires
c
c  variables entieres
c
c  nne :      Nombre de noeuds par element
c  nel :      Nombre d'elements
c  nnt :      Nombre de noeud ou de station
C  ngp :      Nombre de points d'integration de gauss
c  num(nne) : vecteur contenant les numeros des noeuds
c  connec(nel,nne)  matrice contenant les numeros des noeuds correspondants
c                  à chaque élément, et qui expliquera la maniere dont les
c                  éléments sont connectés entre eux
c
c  variables réelles
c
c  aire:      aire d'un élément
c  airt:      aire totale
c  qel :      quantité de pluie calculée pour un élément
c  qtot:      quantité de pluie totale
c  somp:      somme des précipitations de toutes les stations
c  P4moy:     précipitation moyenne en vue de la discrétisation
c             quadrilatérale
c  arithmmoy : moyenne arithmétique des précipitations enregistrées
c             sur chaque station (méthode de la moyenne arithmétique)
c  arithmqtot : quantité de pluie totale par la méthode
c             de la moyenne arithmétique
c
c  thiemoy :  moyenne des précipitation par la méthode de Thiessen
c  thieqtot:  quantité de pluie totale par la méthode de Thiessen
c  ysomoy :   moyenne des précipitations par les isohyètes
c  ysoqtot:   quantité de pluie totale par les isohyètes
c  axeqtot:   quantité totale de pluie tombée par la méthode des deux axes
c  det:       déterminant du Jacobien
c  Xi:        abscisse du point d'intégration
c  eta:       ordonnée du point d'intégration
c  wi et wj   poids d'intégration
c  geom(nnt,2): matrice des coordonnées X,y des nœuds en (Km)
c  prec(nnt):  vecteur contenant les précipitation enregistrées en
c             chaque nœud en (cm)
c  coord(nne,2): matrice contenant les coordonnées des nœuds d'un
c             mêmeéléments
c  deriv(2,nne) : Dérivée d'une fonction nodae Ni/Xi et Eta
c  qjac(2,2):  Matrice Jacobéenne
c  vn(nne):   vecteur contenant les precipitation d'un element
c  fn(nne):   vecteur contenant les valeurs des fonctions nodales
c  gauss(ngp,2): matrice contenant les abscisses des points

```

```

c          d'integration de gauss ainsi que les poids
c          correspondants
c  surfthie(nnt): vecteur contenant les surfaces en km2 relative a chaque
c          station par la méthode de Thiessen
c  surfiso(nbr) : vecteur contenant des surfaces comprise entre deux
c          isohyètes consécutives et tel que nbr=nombre de pas
c  preciso(nbr) : vecteur contenant les précipitations moyennes entres
c          deux isohyètes consécutives
c  geoE(nnt,2) : matrice des coordonnées du point E pour chaque station
c  geoC(nnt,2) : matrice des coordonnées du point C pour chaque station
c  a(nnt) : vecteur contenant les valeurs de ME2 pour chaque station
c  aMCcare(nnt) : vecteur contenant les valeurs de MC2 pour chaque station
c  ECcare(nnt) : vecteur contenant les valeurs de EC2 pour chaque station
c  omega(nnt) : vecteur contenant les valeurs du facteur de ponderation pour chaque
station
c
c  subroutine quadr(nnt)
c
Implicit double precision (A-H,O-Z)
  Dimension geom(40,2),prec(40),surfthie(36),surfiso(67),preciso(67)
  Dimension geoE(36,2),geoC(36,2),aMEcare(36),aMCcare(36),ECcare(36)
Dimension alpha(36),omega(36)
  Dimension coord(4,2),vn(4),fn(4),deriv(2,4),gauss(3,2),qjac(2,2)
  INTEGER connec(30,4),num(4)
c
  OPEN(3,file='prec.dat')
  READ(3,*)nnt
  write(*,*)nnt
  somp=0.d0
  Do 20 i=1,nnt
  READ(3,*)K,prec(i),(geom(i,j),j=1,2)
  write(*,*)K,prec(i),(geom(i,j),j=1,2)
  somp=sompk+prec(i)
20  continue
  close(3)
  arithmmoyp=somp/nnt
c
c  evaluation de la qantité de pluie totale par Thissen puis la moyenne
c
  open(5,file='thie.dat')
  read(5,*)nnt
  thieqtot=0.d0
  somsurf=0.d0
  do 15 i=1,nnt
  read(5,*)k,prec(i),surfthie(i)
  thieqtot=thieqtot+prec(i)*surfthie(i)
  somsurf=somsurf+surfthie(i)
15  continue
  close(5)
  thiemoy=thieqtot/somsurf

```

```

c
c  quantité de pluie totale par la méthode des deux axes puis la moyenne
c
    open(7,file='deuxaxes.dat')
read(7,*)nnt
    somalphai=0.d0
    do 17 i=1,nnt
        read(7,*) k,prec(i),(geoM(i,j),j=1,2),(geoE(i,j),j=1,2),
*(geoC(i,j),j=1,2)
        aMEcare(i)=(geoM(i,1)-geoE(i,1))**2+(geoM(i,2)-geoE(i,2))**2
        aMCcare(i)=(geoM(i,1)-geoC(i,1))**2+(geoM(i,2)-geoC(i,2))**2
        ECcare(i)=(geoE(i,1)-geoC(i,1))**2+(geoE(i,2)-geoC(i,2))**2
        temp1 = aMEcare(i)+aMCcare(i)-ECcare(i)
        temp2 = 2*sqrt(aMEcare(i)*aMCcare(i))
        alpha(i)=acos(abs(temp1)/temp2)
        somalphai=somalphai+alpha(i)
17    continue
        axepmoy=0.d0
        do 18 i=1,nnt
            omega(i)=alpha(i)/somalphai
            axepmoy=axepmoy+omega(i)*prec(i)
18    continue
        close(7)
c
c  quantité de pluie totale par les isohyètes plus la moyenne
open(6,file='iso.dat')
    read(6,*)nbr
    ysoqtot=0.d0
    somsurfiso=0.d0
    do 16 i=1,nbr
        read(6,*)preciso(i),surfiso(i)
        ysoqtot=ysoqtot+preciso(i)*surfiso(i)
        somsurfiso=somsurfiso+surfiso(i)
16    continue
    close(6)
    ysomoyp=ysoqtot/somsurfiso
c
c  caleul pour la discrétisation quadrilatèrele
c
    open(4,file='connect4.dat')
    open(8,file='connect4.out')
    read(4,*)nel,nne,ngp
    do 30 i=1,nel
30    read(4,*)k,(connec(k,j),j=1,nne)
    close(4)
c    déterminer les abscisses et poids de gauss pour l'integration numerique
    call samp(gauss,ngp)
c
    airet=0.d0
    qtot=0.d0

```

```

write(8,104)
do 60 ie=1,nel
do 40 in=1,nne
num(in)=convec(ie,in)
coord(in,1)=geom(num(in),1)
coord(in,2)=geom(num(in),2)
vn(in)=prec(num(in))
40 continue
qel=0.d0
aire=0.d0
do 50 ig=1,ngp
do 50 jg=1,ngp
xi=gauss(ig,1)
wi=gauss(ig,2)
eta=gauss(jg,1)
wj=gauss(jg,2)
call func(xi,eta,fn)
call deriva(xi,eta,deriv)
call pscal(fn,vn,nne,fonc)
call matmul(deriv,2,nne,coord,nne,2,qjac)
det=qjac(1,1)*qjac(2,2)-qjac(1,2)*qjac(2,1)
aire=aire+wi*wj*det
qel=qel+wi*wj*det*fonc
WRITE(8,*)
50 continue
write(8,103)ie,aire,qel
airet=airet+aire
qtot=qtot+qel
60 continue
P4moy=qtot/airet
arithmqtot=arithmmoyp*airet
axeqtot=axepmoy*airet
c
write(8,107)
107 format(1x,'MEF DISCRETISATION QUADRILATERALE:')
write(8,101)airet
101 format(1x,'superficie totale .. =',f10.2,'Km²')
write(8,102)qtot
102 format(1x,'quantité de pluie totale..=',f10.2,'cm.Km²')
write(8,105)P4moy
105 format(1x,'la precipitation moyenne..=',f10.2,'cm')
c
write(8,108)
108 format(1x,'METHODE DE LA MOYENNE ARITHMETIQUE:')
write(8,125)airet
125 format(1x,'superficie totale ...=',f10.2,'Km²')
write(8,109)arithmqtot
109 format(1x,'quantite de pluie tatale..=',f10.2,'cm,Km²')
write(8,110)arithmmoyp
110 format(1x,'la precipitatopn moyenne..=',f10.2,'cm')

```

```

c
  write(8,111)
111  format(1x,'METHODE DE THIESSEN:')
  write(8,112) somsurf
112  format(1x,'superficie totale =',f10.2,'Km²')
  write(8,113)thieqtot
113  format(1x,'quantité de pluie totale..=',f10.2,'cm.Km²')
  write(8,114)thiemoy
114  format(1x,'la precipitatopn moyenne..=',f10.2,'cm')
c
  write(8,126)
126  format(1x,'METHODE DES DEUX AXES:')
  write(8,127)airet
127  format(1x,'superficie totale ...=',f10.2,'Km²')
  write(8,128)axeqtot
128  format(1x,'quantite de pluie tatale..=',f10.2,'cm,Km²')
  write(8,129)axepmoy
129  format(1x,'la precipitatopn moyenne..=',f10.2,'cm')
c
  write(8,118)
118  format(1x,'METHODE DES ISOHTETES:')
  write(8,115)somsurfiso
115  format(1x,'superficie totale ...=',f10.2,'Km²')
  write(8,116)ysotot
116  format(1x,'quantite de pluie tatale..=',f10.2,'cm,Km²')
  write(8,117)ysomoy
117  format(1x,'la precipitatopn moyenne..=',f10.2,'cm')
c
103  format(2x,i3,6x,f10.2,6x,f10.2)
104  format('RESULTATS OBTENUS:',
  * 1x,'element',4x,'aire(Km²)',4x,'qel(cm.Km²)')
  close(8)
  end
c
  SUBROUTINE SAMP(GAUSS,NGP)
c
c   cette subroutine calcul les ascisses et les poids
c   correspondant pour l'integration avec la methode de GAUSS
  implicit double precision (A-H,O-Z)
  DIMENSION GAUSS(3,*)
  GOTO(1,2,3)NGP
1  GAUSS(1,1)=0.d0
  GAUSS(1,2)=2.d0
  GOTO 70
2  GAUSS(1,1)=0.5773502691896
  GAUSS(2,1)=-GAUSS(1,1)
  GAUSS(1,2)=1.d0
  GAUSS(2,2)=1.d0
  GOTO 70
3  GAUSS(1,1)=0.77459666924

```

```

    GAUSS(2,1)=0.d0
    GAUSS(3,1)=-GAUSS(1,1)
    GAUSS(1,2)=0.5555555555
    GAUSS(2,2)=0.8888888888
    GAUSS(3,2)=GAUSS(1,2)
70    RETURN
    end

c
    SUBROUTINE func(xi,eta,fn)
c
c    cette subroutine calcul les valeurs des fonctions
c    nodales aux points d'integration (XI,ETA)
    IMPLICIT double precision (A-H,O-Z)
    dimension FN(4)
    FN(1)=(1-XI)*(1-ETA)/4
    FN(2)=(1+XI)*(1-ETA)/4
    FN(3)=(1+XI)*(1+ETA)/4
    FN(4)=(1-XI)*(1+ETA)/4
    RETURN
    END
    SUBROUTINE deriva(xi,eta,deriv)
c
c    cette subroutine calcule les derivees des fonctions
c    nodales par rapport a XI et ETA
    implicit double precision(A-H,O-Z)
    DIMENSION DERIV(2,4)
    DERIV(1,1)=- (1-ETA)/4
    DERIV(1,2)=(1-ETA)/4
    DERIV(1,3)=(1+ETA)/4
    DERIV(1,4)=-(1-ETA)/4
    DERIV(2,1)=-(1-XI)/4
    DERIV(2,2)=-(1+XI)/4
    DERIV(2,3)=(1+XI)/4
    DERIV(2,4)=(1-XI)/4
    RETURN
    END
    SUBROUTINE PSCAL (V,W,iv,SCAL)
c
c    cette subroutine pscal calcule le produit scalaire de 02 vecteurs
    implicit double precision(A-H,O-Z)
    DIMENSION V(*),W(*)
    SCAL=0.d0
    do 80 i=1,iv
    SCAL=SCAL+V(i)*W(i)
80    continue
    RETURN
    END
    SUBROUTINE MATMUL(A,ia,ja,B,ib,jb,C)
c
    implicit double precision(A-H,O-Z)

```

```
dimension A(ia,ja),B(ib,jb),C(ia,jb)
Do 100 i=1,ia
Do 100 j=1,jb
C(i,j)=0.d0
do 90 k=1,ja
c(i,j)=C(i,j)+A(I,k)*B(k,J)
90 continue
100 continue
Return
End
```

Fichiers de données de la méthode arithmétique

Prec.dat

106

1	194,0	618,134	4074,761
2	157,9	634,790	4057,360
3	123,2	594,428	4049,423
4	142,3	622,265	4067,398
5	129,0	576,994	4074,989
6	153,0	607,959	4048,784
7	165,0	612,385	4075,327
8	113,9	585,493	4044,748
9	142,0	592,974	4055,079
10	136,5	588,205	4066,044
11	109,2	573,885	4042,832
12	143,0	614,696	4061,268
13	128,5	614,912	4067,018
14	146,0	595,678	4073,724
15	140,0	607,875	4054,336
16	112,9	568,746	4046,848
17	151,0	623,882	4055,590
18	109,2	579,827	4039,714
19	122,5	584,584	4041,951
20	136,5	593,396	4062,729
21	197,0	628,211	4065,631
22	110,0	570,197	4044,767
23	113,3	574,499	4046,653
24	115,5	568,262	4048,922
25	119,8	579,593	4052,768
26	117,9	570,524	4051,741
27	120,9	571,804	4056,095
28	129,6	581,693	4060,275
29	122,8	572,068	4058,859
30	125,1	575,639	4061,156
31	130,3	580,921	4063,185
32	125,9	573,749	4066,376
33	135,2	585,197	4069,845
34	126,0	574,073	4068,843
35	140,6	585,932	4074,178
36	130,1	573,316	4078,245
37	126,4	571,919	4072,410
38	140,7	583,667	4076,016
39	146,5	582,897	4078,769
40	149,3	580,280	4082,557
41	134,1	574,604	4080,787
42	138,3	574,888	4083,379
43	147,9	578,893	4083,813
44	142,4	575,926	4084,799
45	104,7	575,258	4039,864
46	106,4	580,529	4035,948

47	125,4	597,247	4044,505
48	130,2	586,593	4054,730
49	134,6	586,662	4058,605
50	140,4	600,493	4071,775
51	139,9	587,793	4073,020
52	145,5	589,114	4074,816
53	155,8	593,656	4076,472
54	155,0	596,612	4075,995
55	120,6	606,246	4037,130
56	134,6	605,993	4061,579
57	129,9	610,601	4066,705
58	166,6	604,891	4077,456
59	176,0	612,058	4077,171
60	171,6	609,830	4077,453
61	113,5	597,002	4036,055
62	110,4	585,536	4034,931
63	120,9	610,589	4037,657
64	151,2	614,374	4049,905
65	144,6	612,819	4057,405
66	189,5	615,952	4076,069
67	108,5	611,227	4035,557
68	103,7	620,764	4038,166
69	98,3	619,523	4036,893
70	103,5	614,630	4035,846
71	98,8	623,470	4037,745
72	104,5	626,345	4038,922
73	114,8	630,577	4042,153
74	143,5	621,046	4062,105
75	185,3	620,827	4073,352
76	199,2	621,053	4075,049
77	201,0	620,358	4075,143
78	120,0	638,848	4050,309
79	120,1	635,176	4046,230
80	155,1	628,993	4055,509
81	130,5	637,536	4052,759
82	174,9	626,112	4063,205
83	180,2	626,141	4066,729
84	180,7	624,539	4071,205
85	200,0	624,493	4074,294
86	204,0	623,113	4075,126
87	200,1	628,478	4067,550
88	194,1	627,637	4069,736
89	189,6	626,505	4070,778
90	200,0	626,691	4073,095
91	204,8	624,993	4074,920
92	204,6	626,925	4073,968
93	209,8	625,572	4075,595
94	204,5	623,422	4075,372
95	131,3	640,041	4055,379
96	141,3	639,401	4057,127

97	203,4	632,118	4064,777
98	134,3	642,175	4058,604
99	200,1	634,345	4064,713
100	174,6	638,800	4062,885
101	134,0	643,633	4059,905
102	142,8	643,552	4061,535
103	134,0	644,778	4060,871
104	127,6	572,244	4075,632
105	211,2	626,344	4075,692
106	209,4	626,701	4075,119

Fichier de donnée de la table de connectivité

Connect4.dat

```

72 4 3
1 11 23 16 22
2 23 25 24 16
3 24 25 28 26
4 26 28 31 27
5 27 31 30 29
6 30 31 33 32
7 32 33 35 34
8 34 35 5 37
9 37 5 36 104
10 5 35 38 36
11 36 38 39 41
12 41 39 40 42
13 42 40 43 44
14 46 62 19 18
15 46 18 11 45
16 11 18 19 23
17 23 19 8 25
18 25 8 48 28
19 28 48 49 31
20 31 49 10 33
21 33 10 51 35
22 62 61 47 19
23 19 47 3 8
24 8 3 9 48
25 48 9 20 49
26 49 20 50 10
27 10 50 14 51
28 51 14 53 52
29 14 50 54 53
30 61 55 6 47
31 47 6 15 3
32 3 15 56 9
33 9 56 57 20
34 20 57 7 50
35 50 7 58 54
36 58 7 59 60
37 55 63 64 6
38 6 64 65 15
39 15 65 12 56
40 56 12 13 57
41 57 13 1 7
42 7 1 66 59
43 70 69 68 67
44 67 68 64 63
45 69 71 72 68
46 68 72 73 64

```

47	64	73	17	65
48	65	17	74	12
49	12	74	4	13
50	13	4	75	1
51	1	75	76	77
52	73	79	80	17
53	74	82	83	4
54	17	80	82	74
55	80	81	2	82
56	75	84	85	76
57	76	85	86	77
58	4	83	84	75
59	75	84	85	76
60	82	2	21	83
61	83	21	87	88
62	83	88	89	84
63	84	89	90	85
64	85	90	91	86
65	91	90	92	93
66	91	93	94	86
67	93	92	106	105
68	81	95	96	2
69	2	96	97	21
70	96	98	99	97
71	98	101	100	99
72	101	103	102	100

Fichier de donnée pour la méthode des isohyètes

Iso.dat

35

105 15.326996

107.5 14.957716

110 64.722389

112.5 132.993962

115 11.856669

117.5 126.508604

120 39.716651

122.5 163.367259

125 25.633201

127.5 262.423277

130 22.847046

132.5 165.965956

135 185.433457

137.5 352.729794

140 117.895808

142.5 123.149284

145 134.198844

147.5 157.81613

150 48.713505

152.5 19.037102

155 13.219915

157.5 52.259135

160 0.568239

162.5 48.754681

165 29.437724

167.5 43.501058

172.5 0.325527

175 37.263776

182.5 33.968478

190 12.105206

195 20.455275

197.5 1.111003

200 0.217018

205 9.610665

210 10.346063

Fichier de donnée de la méthode des deux axes

Deux axes .dat

106

1	194,0	618,1344074,761	574,562	4082,971	574,028	4041,986
2	157,9	634,7904057,360	574,562	4082,971	574,028	4041,986
3	123,2	594,4284049,423	574,562	4082,971	614,912	4075,813
4	142,3	622,2654067,398	574,562	4082,971	574,028	4041,986
5	129,0	576,994 4074,989	613,578	4035,784	614,912	4075,813
6	153,0	607,9594048,784	574,562	4082,971	574,028	4041,986
7	165,0	612,3854075,327	613,578	4035,784	574,028	4041,986
8	113,9	585,4934044,748	574,562	4082,971	614,912	4075,813
9	142,0	592,9744055,079	574,562	4082,971	614,912	4075,813
10	136,5	588,2054066,044	613,578	4035,784	614,912	4075,813
11	109,2	573,885 4042,832	613,578	4035,784	614,912	4075,813
12	143,0	614,6964061,268	574,562	4082,971	574,028	4041,986
13	128,5	614,9124067,018	574,562	4082,971	574,028	4041,986
14	146,0	595,6784073,724	613,578	4035,784	574,028	4041,986
15	140,0	607,8754054,336	574,562	4082,971	574,028	4041,986
16	112,9	568,7464046,848	613,578	4035,784	614,912	4075,813
17	151,0	623,8824055,590	574,562	4082,971	574,028	4041,986
18	109,2	579,8274039,714	574,562	4082,971	614,912	4075,813
19	122,5	584,5844041,951	574,562	4082,971	614,912	4075,813
20	136,5	593,3964062,729	613,578	4035,784	574,028	4041,986
21	197,0	628,2114065,631	574,562	4082,971	574,028	4041,986
22	110,0	570,1974044,767	613,578	4035,784	614,912	4075,813
23	113,3	574,4994046,653	613,578	4035,784	614,912	4075,813
24	115,5	568,2624048,922	613,578	4035,784	614,912	4075,813
25	119,9	579,5934052,768	613,578	4035,784	614,912	4075,813
26	116,0	570,5244051,741	613,578	4035,784	614,912	4075,813
27	122,0	571,8044056,095	613,578	4035,784	614,912	4075,813
28	129,5	581,6934060,275	613,578	4035,784	614,912	4075,813
29	123,0	572,0684058,859	613,578	4035,784	614,912	4075,813
30	125,0	575,6394061,156	613,578	4035,784	614,912	4075,813
31	130,1	580,9214063,185	613,578	4035,784	614,912	4075,813
32	125,5	573,7494066,376	613,578	4035,784	614,912	4075,813
33	130,2	585,1974069,845	613,578	4035,784	614,912	4075,813
34	125,9	574,0734068,843	613,578	4035,784	614,912	4075,813
35	140,5	585,9324074,178	613,578	4035,784	574,028	4041,986
36	130,0	573,3164078,245	613,578	4035,784	614,912	4075,813
37	126,5	571,9194072,410	613,578	4035,784	614,912	4075,813
38	141,0	583,6674076,016	613,578	4035,784	574,028	4041,986
39	146,0	582,8974078,769	613,578	4035,784	574,028	4041,986
40	149,0	580,2804082,557	613,578	4035,784	574,028	4041,986
41	134,1	574,6044080,787	613,578	4035,784	614,912	4075,813
42	138,2	574,8884083,379	613,578	4035,784	574,028	4041,986
43	148,0	578,8934083,813	613,578	4035,784	574,028	4041,986
44	142,5	575,9264084,799	613,578	4035,784	574,028	4041,986
45	105,0	575,2584039,864	574,562	4082,971	614,912	4075,813
46	106,5	580,5294035,948	574,562	4082,971	614,912	4075,813
47	125,1	597,2474044,505	574,562	4082,971	614,912	4075,813

48	130,0	586,5934054,730	613,578	4035,784	614,912	4075,813
49	134,5	586,6624058,605	613,578	4035,784	614,912	4075,813
50	141,0	600,4934071,775	613,578	4035,784	574,028	4041,986
51	140,2	587,7934073,020	613,578	4035,784	574,028	4041,986
52	145,5	589,1144074,816	613,578	4035,784	574,028	4041,986
53	156,0	593,6564076,472	613,578	4035,784	574,028	4041,986
54	156,0	596,6124075,995	613,578	4035,784	574,028	4041,986
55	121,2	606,2464037,130	574,562	4082,971	614,912	4075,813
56	135,5	605,9934061,579	574,562	4082,971	574,028	4041,986
57	130,0	610,6014066,705	574,562	4082,971	574,028	4041,986
58	166,5	604,8914077,456	613,578	4035,784	574,028	4041,986
59	176,0	612,0584077,171	613,578	4035,784	574,028	4041,986
60	171,5	609,8304077,453	613,578	4035,784	574,028	4041,986
61	113,9	597,0024036,055	574,562	4082,971	614,912	4075,813
62	111,0	585,5364034,931	574,562	4082,971	614,912	4075,813
63	121,5	610,589 4037,657	574,562	4082,971	614,912	4075,813
64	151,0	614,3744049,905	574,562	4082,971	574,028	4041,986
65	144,5	612,8194057,405	574,562	4082,971	574,028	4041,986
66	190,0	615,9524076,069	574,562	4082,971	574,028	4041,986
67	110,0	611,2274035,557	574,562	4082,971	614,912	4075,813
68	105,5	620,7644038,166	574,562	4082,971	574,028	4041,986
69	100,3	619,5234036,893	574,562	4082,971	574,028	4041,986
70	105,0	614,6304035,846	574,562	4082,971	574,028	4041,986
71	100,0	623,4704037,745	574,562	4082,971	574,028	4041,986
72	105,8	626,3454038,922	574,562	4082,971	574,028	4041,986
73	116,0	630,5774042,153	574,562	4082,971	574,028	4041,986
74	143,1	621,0464062,105	574,562	4082,971	574,028	4041,986
75	186,8	620,8274073,352	574,562	4082,971	574,028	4041,986
76	201,0	621,0534075,049	574,562	4082,971	574,028	4041,986
77	201,0	620,3584075,143	574,562	4082,971	574,028	4041,986
78	120,0	638,8484050,309	574,562	4082,971	574,028	4041,986
79	120,0	635,1764046,230	574,562	4082,971	574,028	4041,986
80	155,7	628,9934055,509	574,562	4082,971	574,028	4041,986
81	135,0	637,5364052,759	574,562	4082,971	574,028	4041,986
82	174,0	626,1124063,205	574,562	4082,971	574,028	4041,986
83	178,2	626,1414066,729	574,562	4082,971	574,028	4041,986
84	160,0	624,5394071,205	574,562	4082,971	574,028	4041,986
85	200,5	624,4934074,294	574,562	4082,971	574,028	4041,986
86	203,5	623,1134075,126	574,562	4082,971	574,028	4041,986
87	199,0	628,4784067,550	574,562	4082,971	574,028	4041,986
88	195,2	627,6374069,736	574,562	4082,971	574,028	4041,986
89	189,5	626,5054070,778	574,562	4082,971	574,028	4041,986
90	200,2	626,6914073,095	574,562	4082,971	574,028	4041,986
91	205,5	624,9934074,920	574,562	4082,971	574,028	4041,986
92	205,2	626,9254073,968	574,562	4082,971	574,028	4041,986
93	210,5	625,5724075,595	574,562	4082,971	574,028	4041,986
94	205,5	623,4224075,372	574,562	4082,971	574,028	4041,986
95	131,3	640,0414055,379	574,562	4082,971	574,028	4041,986
96	142,0	639,4014057,127	574,562	4082,971	574,028	4041,986
97	204,0	632,1184064,777	574,562	4082,971	574,028	4041,986
98	204,0	642,1754058,604	574,562	4082,971	574,028	4041,986
99	136,0	634,3454064,713	574,562	4082,971	574,028	4041,986

100	201,0	638,8004062,885	574,562	4082,971	574,028	4041,986
101	201,0	643,6334059,905	574,562	4082,971	574,028	4041,986
102	176,0	643,5524061,535	574,562	4082,971	574,028	4041,986
103	136,0	644,7784060,871	574,562	4082,971	574,028	4041,986
104	143,0	572,2444075,632	613,578	4035,784	614,912	4075,813
105	135,0	626,3444075,692	574,562	4082,971	574,028	4041,986
106	210,2	626,7014075,119	574,562	4082,971	574,028	4041,986

Fichier de données de la méthode de Thiessen

Thie.dat

106

1	194,0	14,4
2	157,9	81,5
3	123,2	26,7
4	142,3	14,1
5	129,0	39,2
6	153,0	44,1
7	165,0	11,4
8	113,9	11,7
9	142,0	24,2
10	136,5	2,5
11	109,2	0,2
12	143,0	2,4
13	128,5	68,5
14	146,0	23,1
15	140,0	17,6
16	112,9	45,0
17	151,0	43,5
18	109,2	59,1
19	122,5	3,2
20	136,5	30,1
21	197,0	37,6
22	110,0	39,0
23	113,3	11,0
24	115,5	8,0
25	119,8	39,9
26	117,9	6,3
27	120,9	28,9
28	129,6	8,3
29	122,8	27,9
30	125,1	61,6
31	130,3	44,1
32	125,9	39,5
33	135,2	17,6
34	126,0	9,1
35	140,6	41,5
36	130,1	2,3
37	126,4	41,6
38	140,7	8,7
39	146,5	0,8
40	149,3	2,6
41	134,1	5,5
42	138,3	11,8
43	147,9	21,1
44	142,4	6,3
45	104,7	35,4

46	106,4	76,9
47	125,4	92,4
48	130,2	60,1
49	134,6	35,9
50	140,4	75,6
51	139,9	34,0
52	145,5	30,1
53	155,8	63,1
54	155,0	65,8
55	120,6	24,6
56	134,6	9,0
57	129,9	16,4
58	166,6	61,4
59	176,0	4,0
60	171,6	9,4
61	113,5	11,0
62	110,4	37,2
63	120,9	16,6
64	151,2	7,8
65	144,6	37,5
66	189,5	76,5
67	108,5	82,9
68	103,7	32,9
69	98,3	15,9
70	103,5	52,6
71	98,8	15,5
72	104,5	0,9
73	114,8	2,1
74	143,5	3,3
75	185,3	2,8
76	199,2	4,1
77	201,0	11,4
78	120,0	10,7
79	120,1	29,0
80	155,1	38,5
81	130,5	6,8
82	174,9	27,6
83	180,2	2,6
84	180,7	10,5
85	200,0	0,6
86	204,0	0,5
87	200,1	0,5
88	194,1	1,5
89	189,6	2,3
90	200,0	1,4
91	204,8	1,1
92	204,6	6,3
93	209,8	12,7
94	204,5	27,9
95	131,3	13,0

96	141,3	9,1
97	203,4	7,3
98	134,3	8,8
99	200,1	16,3
100	174,6	7,9
101	134,0	2,3
102	142,8	5,5
103	134,0	3,8
104	127,6	10,1
105	211,2	7,6
106	209,4	39,2