

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



N° d'ordre :/2015

THESE

Présentée Pour obtenir

LE DIPLOME DOCTORAT EN-SCIENCES
SPECIALITE : GENIE CIVIL

Par

ZAOUI Mohamed

**SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET
METHODOLOGIE MULTICRITERE POUR LE CHOIX DE
SITES DE RETENUES COLLINAIRES APPLICATION
POUR LA WILAYA DE MOSTAGANEM ALGERIE**

Soutenu le ...03 juin 2015..... devant le Jury composé de :

Président	MISSOUM Hanifi	Professeur	Université de Mostaganem
Examineurs	KADRI Tahar	Professeur	Université de Mostaganem
	MEKARTA Belkacem	Professeur	Université de Adrar
	BOUANANI Abderazak	Professeur	Université de Tlemcen
Rapporteurs	HIMOURI Slimane	Professeur	Université de Mostaganem
	ETLICHER Bernard	Professeur	Université Jean MONNET

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire ISTHME CNRS EVS 5600 à l'université Jean Monnet Saint Etienne France, en collaboration avec le Laboratoire LMPC du Département Génie Civil et Architecture de la Faculté des sciences et de la technologie de l'université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.

Je souhaite tout d'abord remercier le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique pour nous avoir octroyé la bourse PROFAS, je remercie Monsieur Bernard ETLICHER Professeur et ancien Recteur de l'université Jean Monnet de m'avoir accueilli au Laboratoire ISTHME pour un premier séjour scientifique en Novembre 2008 et d'avoir accepté d'être codirecteur de thèse. Je voudrais aussi remercier Monsieur Himouri Slimane, Professeur et directeur du laboratoire LMEE, d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse. J'adresse également mes sincères remerciements à monsieur Hervé Cubizolle, Professeur et directeur du Laboratoire ISTHME CNRS EVS 5600, de m'avoir accepté au sein du laboratoire pour un séjour scientifique de longue durée.

J'aimerais tout particulièrement remercier Messieurs Thierry Joliveau Professeur à ISTHME et Pierre Olivier Mazagol, enseignants-chercheurs.

Je salue naturellement l'ensemble de mes collègues de l'ISTHME, enseignants-chercheurs, doctorants, stagiaires et en particulier la secrétaire Catherine, et tous ce qui ont rendu mon séjour scientifiques si agréables. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude la plus sincère.

Mes remerciements s'adressent également à BOUANANI Abderazak., Professeur à L'université de Tlemcen et Belkacem MECARTA, Professeur à l'Université Adrar qui ont accepté d'examiner ce mémoire et de faire partie du jury.

Mes remerciement iront également à Monsieur MISSOUM Hanifi, Professeur d'avoir accepté de présider cette thèse, à Monsieur Kadri Tahar Professeur et Directeur du Laboratoire LMPC, tous au département Génie Civil et d'architecture se sont intéressés à mes travaux et m'ont fait honneur d'être membres du jury ; je ne saurais que trop les remercier du temps et de l'attention qu'ils ont consacrée à la lecture de ce manuscrit.

Je salue naturellement l'ensemble de mes collègues du département Génie Civil et Architecture, enseignants-chercheurs et tous ce qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Je remercie également Monsieur Benderdouche Noredine, Professeur, Vice Recteur chargé de la Post graduation et Monsieur BENZIDANE Abdallah enseignant chercheur pour leurs contributions efficace.

Enfin, je ne peux clore cette page de remerciements sans évoquer mes proches et tous ceux avec qui, de près ou de loin, j'ai passé ces dernières années ; je leur suis très redevable.

**Je dédicace cette thèse
A ma défunte mère, mon père
A tous ceux qui me sont chers**

Résumé

La sélection du meilleur bassin versant élémentaire pour une retenue collinaire a besoin de l'agrégation de tous les critères essentiels et tous les décideurs intéressés. Un système d'information géographique (SIG) est un outil puissant pour l'étude de données spatiales, mais n'offre pas une méthodologie appropriée de prise de décision. En raison de leurs fonctions spatiales d'agrégation, les méthodes d'analyse multicritère (AMC) peuvent simplifier la prise de décision dans des situations où plusieurs solutions sont possibles, et lorsque plusieurs critères sont pris en considération et les décideurs ne sont pas d'accord. Néanmoins, ils ne considèrent pas la référence spatiale des données. Par conséquent, l'utilisation des SIG et des méthodes multicritères sont capables de générer un système de prise de décision spatiale énergique. L'approche est testée sur la sélection et le rangement des retenues collinaires établis sur le territoire de la wilaya de Mostaganem au Nord de l'Algérie. L'approche couvre les points suivants : la détermination des critères par l'utilisation de l'outil open source SIG SAGAGIS et l'évaluation de la hiérarchie des alternatives grâce à un outil spécialisé dans AMC (logiciel D-Sight, développé par les laboratoires codé SMG, ULB) en appliquant les algorithmes PROMETHEE-GAIA et la méthode d'AHP. La cohérence des résultats confirme l'efficacité de l'approche suivie. Cette recherche contribue à aider les décideurs à ranger les bassins versants élémentaires drainés par les principaux chevelus hydrographiques de la zone d'étude pour la mise en place d'équipements hydrauliques dans notre cas «des retenues collinaires».

Mots clés : sous bassin versant élémentaire, retenue collinaire, aide multicritères à la décision, PROMETHEE-GAIA, , technologie de rangement.

Summary

The selection of the favourite elementary watershed for a hill reservoir needs the association of all the essential criteria and all the interested decision makers. A geographical information system (GIS) is a strong tool for studying spatial data but it does not offer an appropriate decision making methodology. Due to their spatial aggregation functions, Multicriteria Analysis (MCA) methods can simplify decision making in situations where various solutions are available, and when several criteria have to be considered and decision-makers are not in accord. Nevertheless, they often do not consider the spatial reference of the data. Therefore, the use of GIS and multicriteria methods generate a forceful spatial decision making system. The approach is tested on the selection of hill reservoirs established in the territory of the Wilaya of Mostaganem in Northern Algeria. The approach covers the following points: determination of the criteria by the use of open source GIS tool SAGAGIS and evaluation of the hierarchy of alternatives through a tool specialized in AMC (D-Sight software, developed by laboratories coded SMG, ULB) by applying algorithms PROMETHEE-GAIA thereafter the AHP method was applied. The consistency of results confirms the effectiveness of the followed approach. This research contributes to help decision makers to rank elementary watersheds drained by the main hydrographic streams of the study area for the establishment of hydraulic equipment in our case «hill reservoirs».

Key words: elementary sub-watershed, hill reservoir, multicriteria, decision maker, PROMETHEE-GAIA, AHP, ranking technology.

ملخص

إن الاختيار الأفضل لترتيب الأحواض قصد إنجاز حواجز مائية يحتاج إلى تجميع كافة المعايير الجوهرية كما يتطلب إشراك جميع صناع القرار المهتمين بالتخطيط، دراسة وإنجاز مثل هذه المشاريع.

يعتبر نظام الإعلام الجغرافي وسيلة فعالة من أجل دراسة المعطيات الفضائية ولكنه لا يعطينا منهجية مناسبة من أجل اتخاذ القرارات بسبب وظائفه الفضائية للتجميع، في حين أن نظام التحليل المتعدد المعايير بإمكانه تبسيط اتخاذ القرارات كما يُمكننا من اختيار الحل الأفضل في حالة تعدد الحلول و تعدد المعايير المأخوذة بعين الاعتبار وتعدد الرؤى المأخوذة من طرف صناع القرار، كما يمكنه إمدادنا بحلول متعددة وممكنة.

ولكن هذا النظام (نظام التحليل المتعدد المعايير) لا يأخذ بعين الاعتبار المرجع الفضائي للمعلومات وذلك مرتبط بكون نظام الإعلام الجغرافي والمناهج المتعددة المعايير قادرة على إعداد نظام لاتخاذ القرارات فعالة في حالة المعطيات ذات مرجع فضائي،

حيث أن هذه الطريقة قد تم تطبيقها بإقليم ولاية مستغانم الواقعة شمال الجزائر، لهدف إختيار أنسب المواقع و ترتيب الأحواض المنحدرة الأولية لإنجاز الحواجز المائية.

حيث أن هذه الطريقة اعتمدت على النقاط التالية:

إيجاد المعايير باستعمال وسيلة من وسائل النظام الإعلام الجغرافي المسمى (SAGAGIS)، أما ترتيب الأحواض المنحدرة الأولية فتمت بالاعتماد على برنامج خاص من برامج نظام التحليل المتعدد المعايير (برنامج D-Sight) المطور من طرف المخبر المرموز إليها (SMG , ULB)، بتطبيق برامج (PROMETHEE-GAIA) ثم منهجية (AHP) طبقت لهدف مقارنة النتائج. إن التقارب المنطقي للنتائج المحصل عليها بين الطريقتين يؤكد فعالية الطريقة المتبعة.

إن هذا البحث يساهم في مساعد صناع القرار لترتيب الأحواض المنحدرة المصرفة من طرف المجاري المائية الأساسية في المنطقة موضوع الدراسة، قصد إنجاز منشئة مائية في هذه الحالة (حواجز مائية).

الكلمات المفتاح: حوض منحدر أولي، حاجز مائي، مساعدة متعددة المعايير على اتخاذ القرار، PROMETHEE-GAIA، تكنولوجيا الترتيب.

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1: Situation géographique de la wilaya de Mostaganem
Figure I.2: Carte de la mosaïque de la région d'étude
Figure I.3: Modèle numérique de terrain corrigé des dépressions de la région d'étude
Figure I.4: Unités physiques de la région d'étude
Figure I.5: Carte d'exposition de la région d'étude
Figure I.6: Carte des pentes de la région d'étude
Figure I.7: Carte pluviométrique de la région d'étude
Figure I.8 : Précipitations moyennes de la station de Mostaganem
Fig.I.9 : Variation mensuelles des précipitations à la station de Sidi Lakhdar (1969/2007)
Figure I.10 : Précipitations moyennes saisonnières de la station Dunes cultivées
Figure I.11: Précipitations moyennes saisonnières de la station de sidi Lakhdar
Figure I.12 : Précipitations moyennes saisonnières de la station de Cap Ivi
Figure I.13 : Précipitations moyennes de la station de Mascara-Matmore
Figure I.14: Précipitations moyennes saisonnières de la station de Mascara-Matmore
Figure I.15 : Variation des températures moyennes de la station de Mascara-Matmore
Figure I.16 : Humidité moyenne relative en % de la station de Mascara-Matmore
Figure I.17 : Variation mensuelle de la force des vents de la station de Mascara-Matmore
Figure I.18 : Diagramme Pluviothermique station de Mostaganem
Figure I.19 : Diagramme ombrothermique station de Mostaganem
Figure I.20: Carte Géologique de la région d'étude
Figure I.21: photos montrant le relief érodé dans la région d'étude
Figure I.22 : Carte d'occupation du sol de la région d'étude
Figure II.1 Problématique de choix (MOUSSEAU V. 1993)
Figure II.2 Problématique de Tri (MOUSSEAU V. 1993)
Figure II.3 Problématique de Rangement (MOUSSEAU V. 1993)
Figure II.4 Problématique de Description
Figure II.5 Préférence entre les actions a et b selon le vrai critère
Figure II. 6 Préférence entre les actions a et b selon le quasi –critère
Figure II.7 Préférence entre les actions a et b selon le pré-critère
Figure II.8 Démarche top-down d'analyse multicritère (KENNEY RL. 1992 cité par LAARIBI, 2000).
Figure II. 9 Démarche bottom-up d'analyse multicritère (ROY B. 1990 a in LAARIBI, 2000)
Figure II.10 Démarche intermédiaire d'analyse multicritère (LAARIBI A., 2000)
Figure II.11. Structure hiérarchique de la méthode AHP
FigureII.12. Critère usuel
Figure II.13. Quasi-critère
Figure II.14. Critère à préférence linéaire
Figure II.15. Critère à pallier
Figure II.16. Critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence
Figure. II.17 Critère gaussien
Figure. II.18 Relation de surclassement valuée
Figure II.19. Coordonnées des points
Figure II.20. Représentation des critères dans le plan GAIA

Figure II.21 Figuration des critères dans le plan GAIA

Figure III.1: Diagramme pour le calcul de bassins versants d'un MNT.

Figure III.2 Principaux bassins versant de L'Algérie

Figure III.3. Sources et applications de la géomorphométrie (source : Pike et al., 2008).

Figure III. 4. Carte de MNT obtenue avant traitement de données SRTM sous SAGAGIS.

Figure III.5 Schéma d'une retenue en digue homogène

Figure III.6 : Correction du type d'erreurs de dépression par l'application de la fonction « Fill Sinks »

Figure III. 7. Carte de MNT obtenue après traitement de données SRTM sous SAGAGIS.

Figure III. 8 Carte des aires de contribution (catchent area) sous SAGAGIS.

Figure III. 9. Carte du réseau hydrographique (Channel Network) sous SAGAGIS.

Figure III.10. Carte des Sous bassins versant élémentaires de la région d'étude.

Figure III.11. Relation entre l'indice de compacité et la forme du bassin versant (source : Musy et Higy, 2004).

Figure III.12. Carte des courbes de niveau du sous bassins versant élémentaires Oued El Abid

Figure III.13. Carte du chevelu hydrographique principal du sous bassins versant élémentaires Oued El Abid

Figure III.14. Carte du réseau hydrographique Sous bassins versant élémentaires Oued El Abid

Figure III.15 : Corrélation entre la pluie moyenne mensuelle de la station de Sidi Ali et de la station de Tenes

Figure III.16 : Corrélation pluie mensuelle de la station de Tenes et de la station de Relizane

Figure III.17 : Corrélation entre la pluie moyenne mensuelles et pluie maximale de la station de Tenes

Figure III.18 : Courbes (Intensité durée fréquence) station de TENES

Figure III.19. Carte du MNT Sous bassins versant élémentaires Oued Allalah

Figure III.20 : Corrélation pluie mensuelle - apport liquide Oued Allalah

Figure III.21 : Corrélations apport liquide mensuelle – Turbidités Station de Sidi AKACHA
Modèle de régression linéaire : $Y = a x$

Figure III.22. Fenêtre de présentation du logiciel SFR

Figure III.23. Saisie des données relatives à chaque critère

Figure III.24. Identification des acteurs

Figure III.25. Saisie du rang relatif à chaque critère

Figure III.26. Saisie des cartes blanches entre deux rangs voisins

Figure III.27. Poids des critères par SFR

Figure III.28. Poids des critères par SFR

Figure III.29. Méthodologie de classement

Figure.IV.1. Comparaison des alternatives par rapport aux critères GEOS et SURF

Figure. IV.2. Comparaison des alternatives par rapport aux critères DD et SUIRR

Figure. IV.3. Contribution des critères pour chaque alternative

Figure. IV.4 Représentation graphique du flux net

Figure. IV.5 Flux net

Figure. IV.6. Contribution des critères pour chaque alternative.

Figure IV.7 GAIA plan.

Figure IV. 7. Carte de classification des BVE selon la méthode PROMETHEE

Figure IV.8. Carte de classification des BVE selon la méthode AHP

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Caractéristiques des différentes stations utilisées

Tableau I.2 : Moyenne des précipitations annuelles

Tableau I.3 : Valeurs des précipitations moyennes mensuelles des précipitations aux différentes stations

Tableau I.4 : Précipitation moyenne mensuelle à la station de Sidi Lakhdar

Tableau I.5 : Précipitation moyenne mensuelle à la station CAP IVI

Tableau I.6 : Précipitation moyenne mensuelle à la station Ferme blanche

Tableau I.7 : Précipitation saisonnières moyennes aux différentes stations

Tableau I.8 : Précipitations moyennes saisonnières

Tableau I.9 : Précipitations moyennes saisonnières

Tableau I.10 : Paramètres de la station Mascara-Matmore

Tableau I.11 : Précipitations moyennes mensuelles

Tableau I.12 : Précipitations moyennes saisonnières

Tableau I.13 : Température T_{min}, T_{moy} et T_{max}

Tableau I.14 : Humidité moyenne relative en % de la station de Mascara-Matmore

Tableau I.15 : Vent maximal en (m/s) de la station de Mascara-Matmore

Tableau I.16 : Durée d'insolation en heure à la station de Mascara-Matmore

Tableau I.17 : Précipitations moyennes mensuelles de chaque zone

Tableau I.18 : Précipitations moyennes saisonnières de chaque zone

Tableau I.19 : Moyennes mensuelles et annuelles des températures des trois stations de la région de Mostaganem

Tableau I.20 : Valeurs du rapport P/T et typologie ombrothermique de Rivas-Martinez (1987)

Tableau I.21 : Valeurs du rapport P/T et typologie ombrothermique pour les stations d'étude selon Rivas-Martinez (1987)

Tableau I.22 : Précipitation moyennes mensuelles et températures moyennes mensuelles de la station de Mostaganem

Tableau I.23: valeurs de l'indice d'aridité de De Martonne et bioclimats correspondant

Tableau I.24 : valeurs indices mensuel d'aridité de De Martonne de la région d'études

Tableau I.25: Typologie des sols

Tableau I.26 : Liste des petits barrages dans la Wilaya

Tableau I.27 : Liste des sources d'irrigation

Tableau II.1 Les différentes problématiques de décision (ROY B. 1985)

Tableau II.2 Méthode de la somme pondérée

Tableau II.3 Echelle de Saaty

Tableau II.4. Indice de cohérence moyen

Tableau II.4. Matrice des fonctions de valeurs partielles

Tableau II.5 Tableau d'évaluations

Tableau IV.1 Définitions des critères

Tableau IV.2: Matrice de comparaison par paire des critères

Tableau IV.3 Indices de cohérence moyenne

Tableau IV.4 Paramètres des critères

Tableau IV.5 Matrice normalisée

Tableau IV.6 Matrice de performance des bassins versants élémentaires

Tableau IV.8 Flux positive, négative et net

Tableau IV.9 Rangement des alternatives selon PROMETHEE II

Tableau IV.10 Matrice des scores uni-critères

Tableau IV.11 Sensibilité des poids des critères

Tableau IV.12 Comparaison par paire des alternatives pour SURF

Tableau IV.13: Matrice normalisée des alternatives pour SURF

Tableau IV.14: Comparaison par paire des alternatives pour DDR

Tableau IV.15: Matrice normalisée des alternatives pour DDR

Tableau IV.16: Comparaison par paire des alternatives pour GEOS

Tableau IV.17: Matrice normalisée des alternatives pour GEOS

Tableau IV.18: Comparaison par paire des alternatives pour SUIRR

Tableau IV.19: Matrice normalisée des alternatives pour SUIRR

Tableau IV.20: Comparaison par paire des alternatives pour DDC

Tableau IV.21: Matrice normalisée des alternatives pour DDC

Tableau IV.22: Classement des alternatives selon AHP

SOMMAIRE

Remerciements	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I: CARACTERISTIQUE PHYSIQUES, PARAMETRES CLIMATIQUES ET GEOLOGIQUE DE LA REGION D'ETUDE.....	4
INTRODUCTION	5
I.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE	5
I.1.1 Caractéristiques physiques	5
I.1.2 Les Pentes	9
I.2 ANALYSE CLIMATIQUE	9
I.2.3 Aperçu sur le climat de l'Algérie :	9
I.3 ETUDE DES PRECIPITATIONS	10
I.3.1. Etude des précipitations	11
I.4 ETUDE DU REGIME THERMIQUE	21
I.4.1. Etude du climat.....	22
I. 5 DONNEES GENERALES GEOLOGIQUES	27
I.5.1 Les collines « les monts du Dahra »	28
I.5.2 Les plateaux « le plateau de Achaâcha et le plateau de Mostaganem »	28
I.5.3 Les plaines « plaine de Bordjias et plaine de chélif »	28
I.5.4 Géologie des cinq unités géomorphologiques.....	28
I.5.5 Analyse géomorphologique	32
I.6 ETUDE DES SOLS.....	36
I.6.1 Les sols peu évolués :	37
I.6.2 Les sols peu évolués d'apport colluvial :	38
I.6.3 Les sols peu évolués d'apport éolien :	38
I.6.4 Les sols peu évolués d'apport mixtes :	39
I.6.5 Les sols calcimagnésiques :	39
I.6.6 Les Rendzines :	39
I.6.7 Les sols bruns calcaire :	40
I.6.8 Les sols bruns calciques :	40

I.6.9 les sols isohumiques :	40
I.6.10 les sols marrons hydromorphes :	40
I.6.11 les sols à sesquioxyde de fer :	41
I.6.12 les sols hydromorphes :	41
I.6.13 Les sols halomorphes :	42
I.6.14 Les unités cartographiques complexes :	43
I.7 HYDROGEOLOGIE.....	44
I.7.1 Inventaire des ressources :	44
I.7.2 La piézométrie :	45
I.7.3 Estimation des besoins en eau pour l'irrigation	46
I.7.4 Evaluation des ressources en eau potentielles.....	46
I.8 OCCUPATION DU SOL	46
CONCLUSION	48
Chapitre II : REPRÉSENTATION DES MÉTHODES D'AGRÉGATION MULTICRITÈRE	49
INTRODUCTION	50
II.1 AIDE A LA DECISION.....	50
II. 2 LA PROBLEMATIQUE DE LA DECISION	50
II.2.1 Problématique de choix ($P\alpha$) :	50
II.2.2 Problématique de tri ($P\beta$) :	51
II.2.3 Problématique de rangement ($P\gamma$) :	51
II.2.4 Problématique de description ($P\delta$) :	52
II.3 Analyse multicritère d'aide à la décision	53
II.3.1 Définition de l'aide multicritère à la décision.....	54
II.3.2 Démarche de l'aide multicritère à la décision.....	55
II.4. LES METHODES DE L'ANALYSE MULTICRITERE D'AIDE A LA DECISION ..	57
II.5 PANORAMA DES METHODES MULTICRITERES	58
II.5.1 Les méthodes élémentaires	58
II.6 METHODES D'OPTIMISATION MATHEMATIQUE MULTICRITERE.....	59
II.7 METHODES D'AGREGATION COMPLETE : Les méthodes de l'approche du critère unique de synthèse.....	59
II.7.1 Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process).....	59
II.8 METHODES D'AGREGATION COMPLETE : approche de surclassement de synthèse.....	62

II.8.1. La Méthode PROMETHEE (Brans et Vincke, 1985)	62
II.8.2 Visualisation géométrique :Le plan GAIA	70
CONCLUSION	75
Chapitre III : DETERMINATION DES CRITERES	77
INTRODUCTION	78
III.1 GEOMORPHOMETRIE.....	80
III.1 .1 Descripteurs hydrographiques	81
III.1.2 Extraction du bassin versant et du réseau hydrographique	82
III.2. RANGEMENT DE BASSIN VERSANT POUR L'IMPLANTATION D'UN EQUIPEMENT HYDRAULIQUE	82
III.2.1 Définition des alternatives	83
III.2.2 Des itinéraires de drainage	83
III.2.3 Remplissage de dépression « fill sinks ».....	84
III.2.4 Catchment area (aire de contribution).....	85
III.2.5 Réseau de Drainage (Channel Network).....	86
III.2.6 Découpage en bassin versant	87
III.3. DEFINITION DES CRITERES	90
III.3.1 Surface et périmètre du bassin versant élémentaire	90
III.3.2 Indice de compacité	90
III.3.3 Pente moyenne du SBVE	90
III.3.4. Pente du chevelu hydrographique	92
III.3.5 Densité de drainage	93
III.4 CALCUL DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES	94
III.4.1 Pluviométrie.....	94
III.4.2 Hydrométrie.....	100
III.4.3 Géologie des sites de l'ouvrage	106
III.4.4 Apport solide	107
III.5 FACTEUR ECONOMIQUE	109
III.6 PONDERATIONS DES CRITERES	110
III.6.1 Pondération par la technique du « paquet de cartes »	110
III.6.2 Evaluation des alternatives par rapport aux critères	115
III.7 METHODOLOGIE.....	115

III.7.1 Les méthodes de surclassement utilisées et justification	116
III.8 FORMATION DE LA MATRICE DE DECISION	117
III.9 EVALUATION DES ALTERNATIVES PAR RAPPORT AUX CRITERES	118
III.9.1 Premier critère : La surface du BVE	119
III.9.2 Deuxième critère : La pente moyenne du BVE	119
III.9.3 Troisième critère : La pente moyenne du chevelu principal du BVE	120
III.9.4 Quatrième critère : Densité de drainage du BVE	120
III.9.5 Cinquième critère : La géologie du site	120
III.9.6 Sixième critère : facteur économique (Ratio).....	120
III.9.7 Septième critère : Superficie irriguée.....	120
III.9.8 Huitième critère : Apport d'eau annuel.....	120
III.9.9 Neuvième critère :Apport solide.....	120
III.9.10 Dixième critère : Débit de crue.....	122
III.10 CHOIX DES SEUILS DE PREFERENCE ET D'INDIFFERENCE.....	123
CONCLUSION	123
Chapitre IV : MISE EN ŒUVRE ET APPLICATION.....	125
INTRODUCTION	126
IV.1 APPLICATION DE LA METHODE PROMETHGEE-GAIA	126
IV.1.1 Justification du choix de la méthode PROMETHEE.....	126
IV.1.2 Paramètres pour PROMETHEE	127
IV.1.3 Détermination des poids des critères selon la méthode AHP.....	127
IV.1.4 MATRICE DE PERFORMANCE	129
IV.1.5 L'Algorithme AMC utilisé (Le logiciel D-Sight).....	130
IV.1.6 Analyse de sensibilité des poids	137
IV.2 APPLICATION DE LA METHODE AHP	138
IV.2.1 Comparaison par paire des alternatives pour le critère SURF	138
IV.2.2 Normalisation de la matrice	139
IV.2.3 Comparaison par paire des alternatives pour le critère DDR.....	139
IV.2.4 Normalisation de la matrice	140
IV.2.5 Comparaison par paire des alternatives pour le critère GEOS	141
IV.2.6 Normalisation de la matrice	141
IV.2.7 Comparaison par paire des alternatives pour le critère SUIRR.....	142
IV.2.8 Normalisation de la matrice	142

IV.2.9 Comparaison par paire des alternatives pour le critère DDC.....	143
IV.2.10 Normalisation de la matrice	144
IV.2.11 Classification des alternatives selon la méthode AHP	144
IV.3 RESULTATS ET DISCUSSION.....	145
CONCLUSION	146
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	147
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	149

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie fournit des efforts importants depuis longtemps pour trouver des solutions pour lutter contre la dégradation des ressources naturelles, par la conservation et le stockage des eaux de ruissellement, et ceci par la réalisation de barrages et retenues collinaires. C'est dans les années soixante-dix, que les premières retenues collinaires ont été construites. Un programme a été lancé par l'Etat en vue de la réalisation de retenues en prenant en considération les critères économiques et d'exploitation optimales des réserves. Une série de manuels a été réalisée en Algérie afin de permettre la construction rapide et suivant des règles homogènes, de centaines de retenues collinaires. Des abaques normalisées ont été établies prenant en compte les apports moyens des bassins versants selon le modèle de Moran, et l'utilisation des chroniques d'observations des stations hydrométriques des diverses unités géographiques (Zerrouki et Zsuffa 1988).

Malgré la construction de nouveaux barrages et le recours au dessalement, l'Algérie enregistrera un déficit en eau de 1 milliard de m³ d'ici l'an 2025. Ce déficit sera beaucoup plus accentué au niveau des régions de Chélif-Zahras et de l'Algérois-Soummam-Hodna à l'horizon 2025. La confrontation entre les ressources et les besoins est un indicatif révélateur et très significatif qui nous oriente quant à l'avenir de la politique de l'eau que nous menons afin d'atténuer l'effet du déficit. Il est clair que l'Algérie du Nord enregistre d'un côté, un manque énorme en ressources au moment même où les besoins augmentent et d'un autre côté, le volume d'eau mobilisable est en diminution (Remini B., 2010).

Cependant, l'analyse des retenues collinaires réalisées dans le Nord Algérien a révélé que les programmes n'ont pas bénéficié de la rigueur nécessaire quant à leur mise en œuvre. Beaucoup de lacunes ont été constatées parmi lesquelles le choix des sites d'implantation de ces retenues (Boutkhil M. et al. 2007). Après plusieurs échecs enregistrés dans la réalisation des retenues collinaires en Algérie, du fait de la négligence d'étude préalable, l'administration publique a pris en charge la conception de ces ouvrages sur la base d'un dossier d'études répondant à des normes techniques établies (Benlaoukli et Touaibia., 2004). Une approche méthodologique basée sur deux méthodes PROMETHEE et ELECTRE TRI sur une zone test d'Oran (Algérie) appliquée par (Mendas A., et al., 2010) repose sur l'intégration de critères de neuf sites extraits d'une étude menée par SOGREAH. Les résultats ne sont pas les mêmes par comparaison aux observations déduites de l'étude réalisée par SOGREAH dans le même contexte en utilisant des méthodes classiques basées sur des observations de terrain.

C'est dans cet objectif que sont réalisées les études préliminaires d'un tel équipement hydraulique relatives à la recherche et au choix du meilleur site, à la bonne connaissance des conditions topographiques, géologiques, géotechniques et hydrologiques du site (Rolley, 1977 et Tricoli D., 2003). Nous proposons dans cette étude une nouvelle vision focalisée sur un raisonnement non pas à l'échelle du site mais à l'échelle du bassin versant élémentaire, car à notre avis, il constitue le réceptacle de base nécessaire à l'accumulation des eaux de ruissellement au niveau de son exutoire. Les bassins versants élémentaires, objets de définition

et de rangement, sont situés respectivement dans le sous bassin-versant oued Cheliff maritime faisant partie du bassin-versant bas Cheliff et Mina et sous bassin-versant du fleuve côtier Guelta appartenant au bassin versant Dahra (ANRH, 2004 et 2007) dans le territoire de la wilaya de Mostaganem. La détermination des critères a été réalisée par l'usage de l'outil open source SIG, SAGAGIS (SAGAGIS, 2008) et l'évaluation puis le rangement des différentes actions potentielles à travers un outil spécialisé en AMC (D-Sight, développé par les laboratoires CoDE-SMG, ULB) (Quantin H., et al., 2011) en appliquant le raisonnement PROMETHEE

La production d'informations fiables et précises sur les paramètres morphologiques des bassins versants est généralement considérée comme une étape incontournable dans le processus de dimensionnement des équipements hydrauliques tels que les petits barrages. Les méthodes traditionnelles, longtemps satisfaisantes, sont maintenant peu adaptées. De nos jours, l'utilisation de l'outil SIG semble être la réponse à ces impératifs.

Une étude a été menée par des experts BNEDER (Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural), BNEDER (2006), sur le territoire de la wilaya de Mostaganem en utilisant les informations nécessaires pour des bassins versants de base drainé par les principaux chevelus hydrographiques dans le même contexte, en utilisant des méthodes conventionnelles à base d'observations de terrain. Les experts de BNEDER ont fondé le choix des installations du site de retenues collinaires sur leurs expériences et sur les critères les plus importants.

La présente étude se propose de montrer certains avantages des SIG dans la caractérisation morphologique des bassins versants dans le territoire de la région de Mostaganem. Comme l'ont prouvé les résultats, l'utilisation des SIG dans la caractérisation de ces paramètres s'est révélée très appropriée. De longues journées de travail avec les processus traditionnels, on est passé, pour des informations plus fiables et plus précises, à quelques heures de travail seulement avec les procédés SIG. En outre, ces procédés offrent une série de possibilités graphiques et alphanumériques de grand intérêt qui justifieraient leur utilisation à l'échelle du territoire de la wilaya un certain nombre de bassin versant ont été délimités par l'utilisation de l'outil FOSS SIG SAGAGIS.

Cette thèse se propose en premier lieu d'élaborer et de mettre en œuvre des méthodes et des outils d'analyse permettant de définir des stratégies d'aide aux choix de sites des retenues collinaires eu égard aux objectifs de planification à l'échelle locale. Une stratégie de sélection de ces équipements hydrauliques doit permettre une implantation judicieuse, tout en prenant en considération les aspects topographiques, hydrologiques, géologiques et économiques inhérents au choix de sites de localisation. Le cas d'étude de cette thèse est relatif à la classification des bassins versants élémentaires drainant les principaux chevelus hydrographiques situés sur le territoire de la wilaya de Mostaganem, la partie Nord-ouest de l'Algérie.

Le second axe d'étude de cette thèse concerne les méthodes d'analyses multicritères. Une stratégie soutenable de gestion de ce genre de structure à l'échelle d'un territoire se doit être à la fois efficace et économique. La prise en compte de ces objectifs nécessite un nombre important de critères, critères qui peuvent être d'ailleurs conflictuels entre eux. Le choix d'une stratégie de sélection de ces ouvrages peut alors devenir relativement ardu, d'autant plus que

cette sélection est souvent le fruit de concertation multi acteurs, acteurs pouvant avoir des intérêts très divers. Les méthodes d'analyses multicritères peuvent contribuer à clarifier le problème et à dégager des solutions en cohérence avec les différents objectifs et aspects du problème. Dans cette thèse deux méthodes, de philosophie très différente, seront utilisées et comparées. Il s'agit des méthodes PROMETHEE-GAIA et AHP.

L'objectif final de cette thèse consiste en la construction d'une famille de critères de décision permettant de prendre en compte l'ensemble des aspects, en cohérence avec les objectifs de la gestion des retenues collinaires. Cette famille de critères, construite notamment à partir des deux premiers axes d'étude, a été utilisée pour classer les bassins versants élémentaires localisés dans le territoire de la wilaya de Mostaganem. Ces entités ont été classées, des plus performantes aux moins performantes, à l'aide des deux méthodes d'analyse multicritères retenues.

Le mémoire est organisé selon les étapes suivantes :

Le chapitre 1 est dédié principalement aux caractéristique physiques, paramètres climatiques et géologique de la région d'étude ; il inventorie, analyse et structure les principales couches d'information de base ayant trait à notre thématique de recherche.

Le chapitre 2 engendre une présentation générale des principales méthodes d'agrégation multicritère d'aide à la décision les plus utilisées. Il justifie et explicite les raisons du choix de la méthode PROMETHEE-GAIA et AHP.

Le chapitre 3 concerne la détermination des critères par l'emploi de l'outil SIG et présente la méthodologie pour le rangement des alternatives.

Le chapitre 4 est un élément essentiel de notre recherche qui range les bassins versant élémentaires selon leur intérêt, analyse les résultats du rangement en appliquant l'Algorithme PROMETHEE-GAIA et les comparent avec ceux produits par la méthode AHP à titre de comparaison.

Ensuite, enfin, nous présentons les conclusions et perspectives de cette recherche.

CHAPITRE I

**CARACTERISTIQUE PHYSIQUES,
PARAMETRES CLIMATIQUES ET
GEOLOGIQUE DE LA REGION D'ETUDE**

INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les principales caractéristiques physiques inventoriées puis analysées de la région d'étude qui sont organisées sous forme de couche d'information numérique par l'utilisation de l'outil SIG, de manière qu'elles constituent une base données géoréférencée contenant les données essentielles pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et par la suite, pour l'extraction des critères de base servant à ranger les bassins versants élémentaires prioritaires à recevoir de tels ouvrages hydrauliques par l'emploi de méthodes multicritères d'aide à la décision.

I.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE

La région d'étude illustrée dans la figure I.1 se situe dans le Nord-Ouest de l'Algérie couvre une superficie d'environ 2175 km². Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, à l'Ouest par la wilaya d'Oran et Mascara, à l'Est par la Wilaya de Chélif et au Sud par la Wilaya de Relizane. Elle se caractérise par un climat semi-aride et un hiver tempéré, compte tenu de la proximité de la mer. Les hauteurs de pluies sont inférieures à 400 mm, et varient entre 350 mm au niveau du plateau et 400 mm sur les piémonts du Dahra. Les moyennes des maxima du mois le plus chaud est de 28°4. Les moyennes des minima du mois le plus froid est de 9°. Le relief de la wilaya de Mostaganem se subdivise en 6 grandes unités morphologiques : le cordon littoral, une zone de collines littorales, les monts de Dahra, une zone de plateau, la vallée du bas Chélif et une zone de plaine (la plaine des Bordjias). La diversité de la wilaya de Mostaganem lui permet de posséder d'énormes potentialités naturelles.



Figure I.1: Situation géographique de la wilaya de Mostaganem

I.1.1 Caractéristiques physiques

La mosaïque montrée dans la figure I.2, couvrant la zone d'étude a été réalisée par l'utilisation des cartes topographiques de base au 1/50000 après géoréférencement par l'usage de l'outil SIG. La mosaïque des cartes topographiques au 1/50000 ième couvrant la région d'étude est constituée par la jonction des feuilles : Mostaganem, Sidi Ali, El Marsa, Mazouna, Oued Rhiou, Arzew, Mohamadia. Le modèle numérique de terrain de la région d'étude a été obtenu de l'USGS (U.S. Geological Survey) en utilisant le SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) à résolution spatiale de (90m). Ces données ont été intégrées traitées et corrigées

des dépressions montrées dans la figure I.3, dans un environnement SIG (SAGAGIS2.0.8) sur le territoire de la wilaya de Mostaganem.

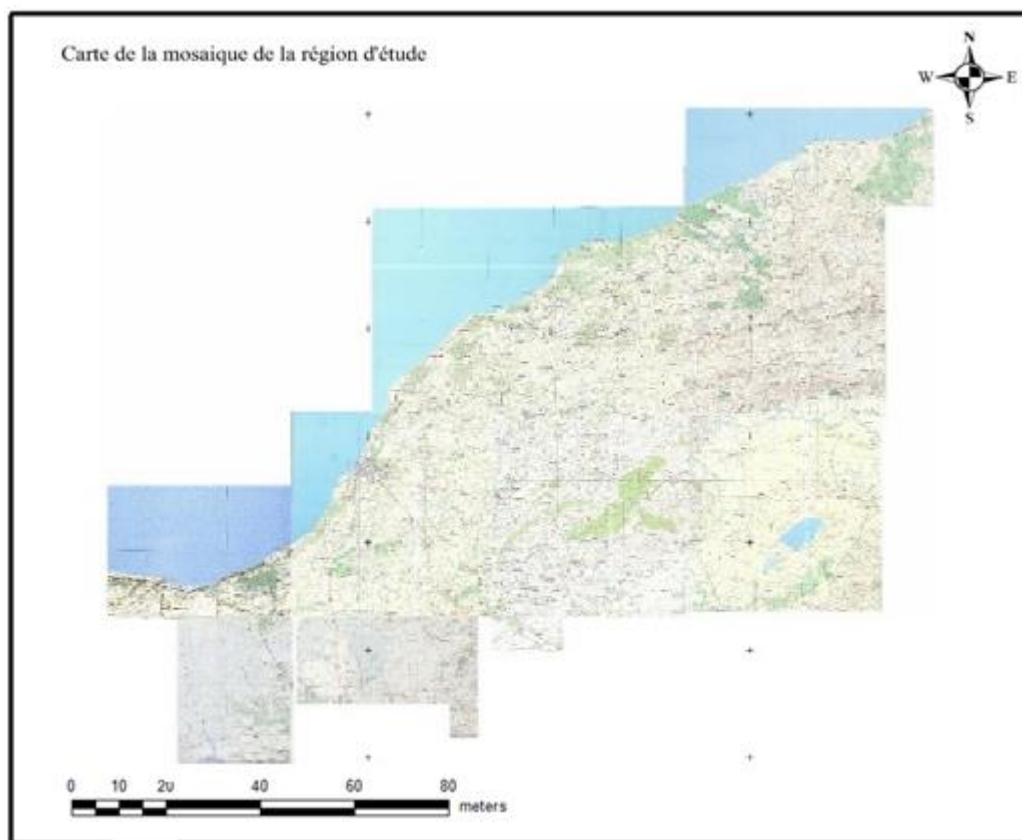


Figure I.2: Carte de la mosaïque de la région d'étude

Et, en s'appuyant sur les paramètres topographiques (pentes et altitudes) dérivés du MNT par l'utilisation de l'outil SIG, on peut distinguer (06) zones homogènes illustrées dans la figure I.4:

- ❖ Le cordon littoral
- ❖ Une zone de collines littorales
- ❖ Les monts de Dahra
- ❖ Une zone de plateau
- ❖ La vallée du bas Chélif
- ❖ Une zone de plaine (la plaine des Bordjias).

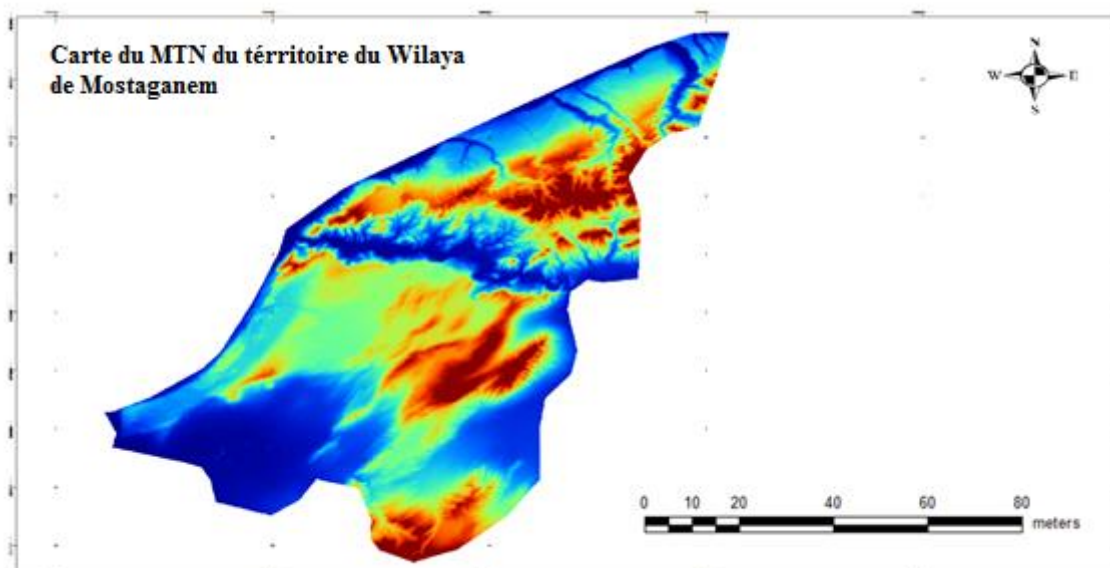


Figure I.3: Modèle numérique de terrain corrigé des dépressions de la région d'étude

1.1.1.1 Le cordon littoral

Cette zone homogène constitue la frange située au littoral de la wilaya et se compose de formation de sables mobiles qui constituent les différentes plages de la wilaya, ainsi que des formations dunaires mobiles ou consolidées jalonnant l'ensemble de la côte.

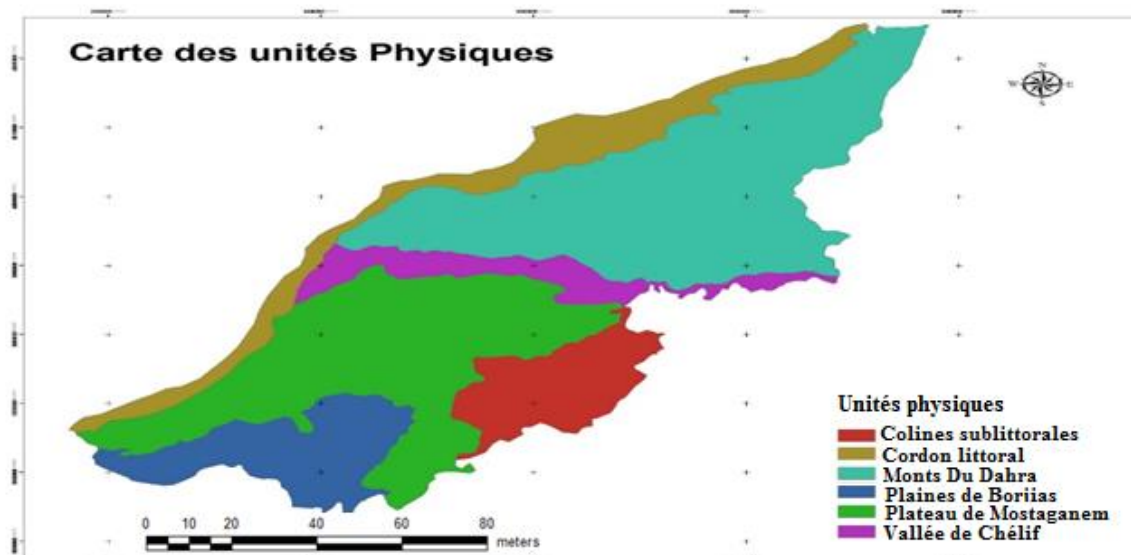


Figure I.4: Unités physiques de la région d'étude

1.1.1.2 Les monts de Dahra

Les monts du Dahra font partie intégrante de l'ensemble des massifs telliens de l'Algérie du Nord. La partie de ces monts comprise dans la Wilaya constitue le prolongement à l'ouest de ces monts, et présente un relief constitué d'une série de petits massifs d'aspect collinaire. Les plus importants sont : d'Ouest en Est, les djebels Zegmoun qui culmine à 353

mètres Djebel Chott (422 mètres), djebel Rahara (300 mètres), djebel Chouachi (441 mètres), djebel Taoussène (436 mètres), djebel Lakkaf (550 mètres), djebel Kirouaou (460 mètres) et djebel Bourzika (412 mètres) qui constitue la limite Est. Le relief est très accidenté dans l'ensemble de cette zone collinaire, il est marqué par un réseau hydrographique très chevelu composé pour l'essentiel de cours d'eau intermittents et demeurant à sec durant la majeure partie de l'année. Les versants présentent des pentes appartenant dans l'ensemble à la classe des 12 à 25 %. Les pentes les plus accusées (supérieures à 25 %) caractérisent les versants de la partie Est de cette zone homogène.

1.1.1.3 Les collines sublittorales

Cette unité géographique constitue dans la partie Ouest le prolongement des monts de Dahra. Elle se compose d'une série de petites collines à topographie ondulée, comportant des sommets généralement lâches et arrondis, orientées en direction générale Sud-Ouest-Nord. Ces collines sont entaillées par un réseau hydrographique constitué pour l'essentiel de pas moins de trois (03) oueds importants (oued El Abid, oued Seddaoua et oued Roumman). Sur le plan topographique, le relief est situé à des altitudes oscillant entre 150 et 200 mètres dans l'ensemble de cette zone collinaire. Quant à l'allure des pentes, l'étude de la carte relève que les prépondérances réintègrent la classe de pente de 3 à 12%. Les valeurs les plus élevées (12 à 25 %) concernent les versants des parties de collines les plus élevés (hauts piémonts).

1.1.1.4 Le plateau de Mostaganem

Il est situé sur une longitude comprise entre 0°6 Ouest et 0°26 Est et sur une latitude Nord comprise entre 35°40 et 36°01. Le plateau de Mostaganem présente un relief relativement ondulé s'abaissant sur la plaine d'El Habra et le Golfe d'Arzew, il est bordé au Sud Est par une ligne de reliefs jalonnée par les forêts d'Enaro et de l'Akboub qui le sépare de la plaine de Relizane. Le plateau présente un relief d'aspect tabulaire dans l'ensemble de la zone centrale. Ailleurs en revanche, il est affecté par de nombreuses ondulations orientées Nord-Est, Sud-Est qui délimitent des cuvettes à fond parfois marécageux. Ils se situent à des altitudes variant entre 200 et 250 mètres dans la partie Nord, entre 150 et 200 mètres dans la partie Ouest et 300 à 350 mètres à l'Est aux limites de la forêt domaniale d'Enaro. Quant au système de pentes, l'analyse de la carte des pentes extraite du MNT (Modèle Numérique de Terrain) fait état de la prédominance de la classe de pente de 3 à 12% pour l'ensemble du plateau et de 12 à 25 % sur les rebords qui limitent au nord le plateau et surplombent la vallée du bas Chélif. Par ailleurs l'analyse de la carte d'exposition rend compte d'une exposition générale orientée vers le Nord illustrée dans la figure I.5

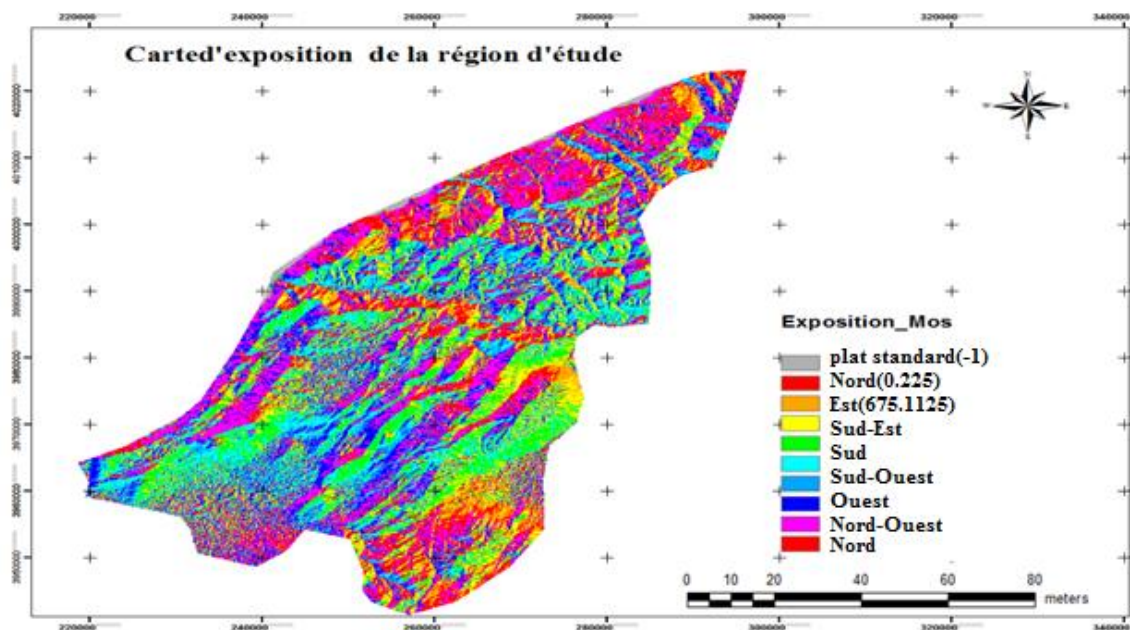


Figure I.5: Carte d'exposition de la région d'étude

1.1.1.5 La vallée du Chélif

La vallée du Chélif fait partie de la plaine du Chélif qui forme dans sa partie orientale une bande d'une dizaine de kilomètres de largeur qui draine le Chélif depuis la Wilaya de Chleff jusqu'à son confluent avec l'oued Mina. Le tracé du cours d'eau est sinueux et présente des méandres tout au long de la partie comprise dans la Wilaya de Mostaganem. La vallée présente par ailleurs de larges terrasses dans la partie amont et centrale et continue en rétrécissant pour ne plus contenir des terrasses jusqu'à l'embouchure où l'oued s'encaisse profondément.

1.1.1.6 La plaine des Bordjias

Elle se situe dans la partie Sud-Ouest de la Wilaya dont elle constitue sa limite. Cette zone homogène fait partie de la grande plaine sublittorale d'El Habra dont elle constitue le prolongement vers le Nord. Cette plaine présente un relief plat, s'élève à des altitudes de l'ordre de 40 à 50 mètres et les pentes y sont en général inférieures à 3%.

1.1.2 Les Pentés

Les différentes classes de pentes illustrent bien la topographie générale de la région d'étude. Pour une caractérisation du territoire couvrant la région d'étude quatre classes de pentes ont été sélectionnées et montrées sur la figure I.6. Ces classes ont été définies à partir de la carte des pentes élaborée sous le logiciel Arcgis version 10.

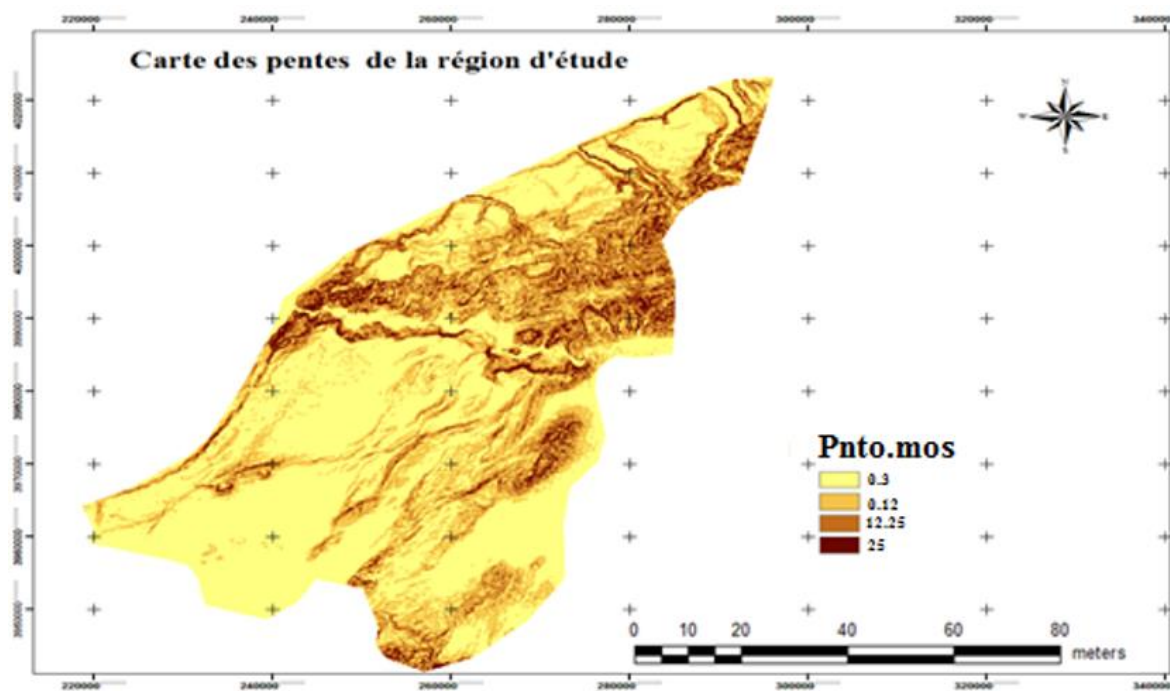


Figure I.6: Carte des pentes de la région d'étude

I.2 ANALYSE CLIMATIQUE

L'équipement climatologique de la région d'étude est cependant loin d'être satisfaisant. Nous allons tenter de faire ressortir les caractères généraux du climat méditerranéen de la région d'étude, ses nuances spatiales et ses irrégularités temporelles à partir de la documentation disponible. Les séries pluviométriques qui présentaient des lacunes ont été largement homogénéisées avant leur utilisation ; cela est essentiel pour arriver à une série longue et continue. Il reste qu'en dépit de données limitées, il est possible de saisir l'importance et la variabilité des précipitations sur l'alimentation des oueds. Malgré le caractère fragmentaire des mesures, les températures atmosphériques de la wilaya seront esquissées en soulignant plus particulièrement l'importance de la saison sèche et donc l'effet déterminant de l'évapotranspiration, paramètre essentiel du déficit d'écoulement.

I.2.1 Aperçu sur le climat de l'Algérie :

Selon (Seltzer, 1946), le climat de l'Algérie est de type méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse allant en moyenne de Septembre à Mai et un été sec et ensoleillé. L'Atlas tellien joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer. L'altitude entraîne une diminution générale de la température, l'éloignement de la mer, une augmentation des amplitudes diurnes et annuelles. Le climat de l'Atlas tellien présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaines plus sec relativement chaud et à forts écarts thermiques. La région de Mostaganem se trouve entre deux domaines géographiques contrastés : les monts de Dahra au Sud et la zone des plaines qui s'étendent vers le Nord. La région d'étude présente en général la même configuration géographique. Cette hétérogénéité se traduit-elle au niveau du climat ? C'est ce que nous essayons d'éclaircir dans cette partie.

I.3 ETUDE DES PRECIPITATIONS

La Pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs, (P. Seltzer :1946, 1913-1938, H. Gaussen :1948, 1918-1947, G. Medinger, 1913-1953, M. Chaumont et C. Paquin :1971, 1913-1963). L'intérêt et le but de cette série et de permettre la confrontation avec l'écoulement correspondant afin de dégager une étude hydro pluviométrique et d'estimer la lame d'eau moyenne tombée sur la région. Nous avons retenu 12 stations illustrées dans le tableau I.1, ce nombre, paraît à priori, satisfaisant, mais il est en réalité très faible comparé à l'étendue de la région d'étude : 1 poste pour 167 km² environ. Ce sous équipement est encore aggravé par une forte disparité géographique du réseau : certaines parties montagneuses de la région d'étude sont paradoxalement dépourvues en postes pluviométriques. Par ailleurs, vu la qualité médiocre des observations, les données ne sont pas toujours dépourvues d'erreurs, de plus, faute de sécurité ces dernières années, plusieurs postes ont cessé de fonctionner. Pour résoudre ce problème de fiabilité des données, l'emploi d'outils statistiques, graphiques et le recours aux données situées dans le même contexte hydro géographique est nécessaire pour contrôler la qualité des échantillons pluviométriques et déceler l'anomalie qui pourrait les affecter en vue de leur homogénéisation.

Cette dernière opération est indispensable si l'on veut déterminer de façon plus ou moins précise les caractéristiques des précipitations. Nous n'avons pas entrepris un contrôle systématique des relevés journaliers, ou mensuels. Cependant, nous avons établi par le moyen de la méthode "double masses et écarts cumulés" une vérification complète de l'homogénéité des totaux annuels, ensuite par la méthode de la corrélation linéaire, nous avons essayé de reconstituer par extrapolation les données manquantes dans les stations pourvues de lacunes, ce qui donc contribue à améliorer la cartographie des isohyètes par interpolation.

Tableau I.1 : Caractéristiques des différentes stations utilisées

Station	longitudes	Latitudes	Altitudes (m)	Période
Mostaganem	0°07	35°53'	137	76-2007
Fornaka	0°06	35°78'	35	76-2007
Bouguirat	0°25	35°75'	60	76-2007
Dunes Cultivées	0°20	35°87'	200	76-2007
Kheir Eddine	0°17	35°98'	190	76-2007
Kalaâ	0°20	35°35'	520	76-2007
Ain Nouissy	0°06	35°80'	90	76-2007
Sayada	0°14	35°95'	57	76-2007
Sidi lakhdar	0°45	36°17'	120	69-96
Ferme blanche	-	-	-	72-96
Ain tedeles	-	-	-	76-2007
Cap ivi	0°14	36°12'	200	70-91

I.3.1. Etude des précipitations

I.3.1.1 Homogénéisation des données pluviométriques

L'objectif de cette étude est de vérifier les mesures effectuées sur une station, ainsi elle nous permet la détection des erreurs et la corrélation des données. Dans notre cas la méthode de la régression linéaire a été appliquée.

I.3.1.2 Variabilité des précipitations annuelles

Pour mieux cerner cette irrégularité inter annuelle des précipitations qui ont un rôle essentiel et déterminant sur l'écoulement fluvial et afin de caractériser le régime des précipitations annuelles, nous allons essayer de trouver une loi d'ajustement de la distribution

des pluies annuelles dans le but d'aboutir à une estimation des paramètres d'ajustement et calculer des variables réduites. L'ajustement graphique des séries pluviométriques des différentes stations de la région d'étude pour la période (1976/2007,) montre que la pluie s'ajuste en général suivant une loi normale de Gauss ou une loi log normale. En outre nous avons calculé pour quelques stations situées dans notre région d'étude, les précipitations relatives à des récurrences données. Le tableau I.2 synthétise les valeurs des pluies moyennes annuelles des stations.

Tableau I.2 : Moyenne des précipitations annuelles

Stations	Pluie moyenne annuelle (mm)
Mostaganem	340.2
Ain nouissy	161.64
Dunes cultivées	310.14
Ain Tedeles	383.88
Kheir eddine	348.18
Fornaka	246
Sayada	354.07
Kalaâ	345.88
Bouguirat	297.6
Mascara-Matmore	278.1
Sidi lakhdar	447.91
Ferme blanche	307.1
Cap-Ivi	334.5

Nous devons souligner que la répartition des stations n'est pas homogène. La plupart se situent sur le plateau de Mostaganem (Mostaganem, Ain nouissy, Dunes-cultivées, Ain Tedeles, Kheir eddine, Fornaka et Bouguirat). Ce dernier ayant fait l'objet de maintes études, ce qui explique la disponibilité des données pluviométriques dans ce périmètre. On ne peut pas en dire autant pour le reste de la région d'étude. Nous n'avons pu nous procurer que les données pluviométriques concernant la station de Cap-ivi (station professionnelle) qui se trouve sur le cordon littoral et celle de sidi Lakhdar qui fait partie des monts de Dahra. Ce manque de données nous a incité à prendre en considération quelques stations se situant à l'extérieur de la limite de la zone d'étude. La station Ferme blanche à proximité de la plaine des Bordjias et celle de Mascara-Matmore (Wilaya de Mascara). Ces deux dernières nous ont servi d'indicateurs. Avec ces 12 stations bien que mal réparties, nous avons pu établir une étude globale du climat de toute la région d'étude, une carte pluviométrique a été établie présentée dans la figure I.7.

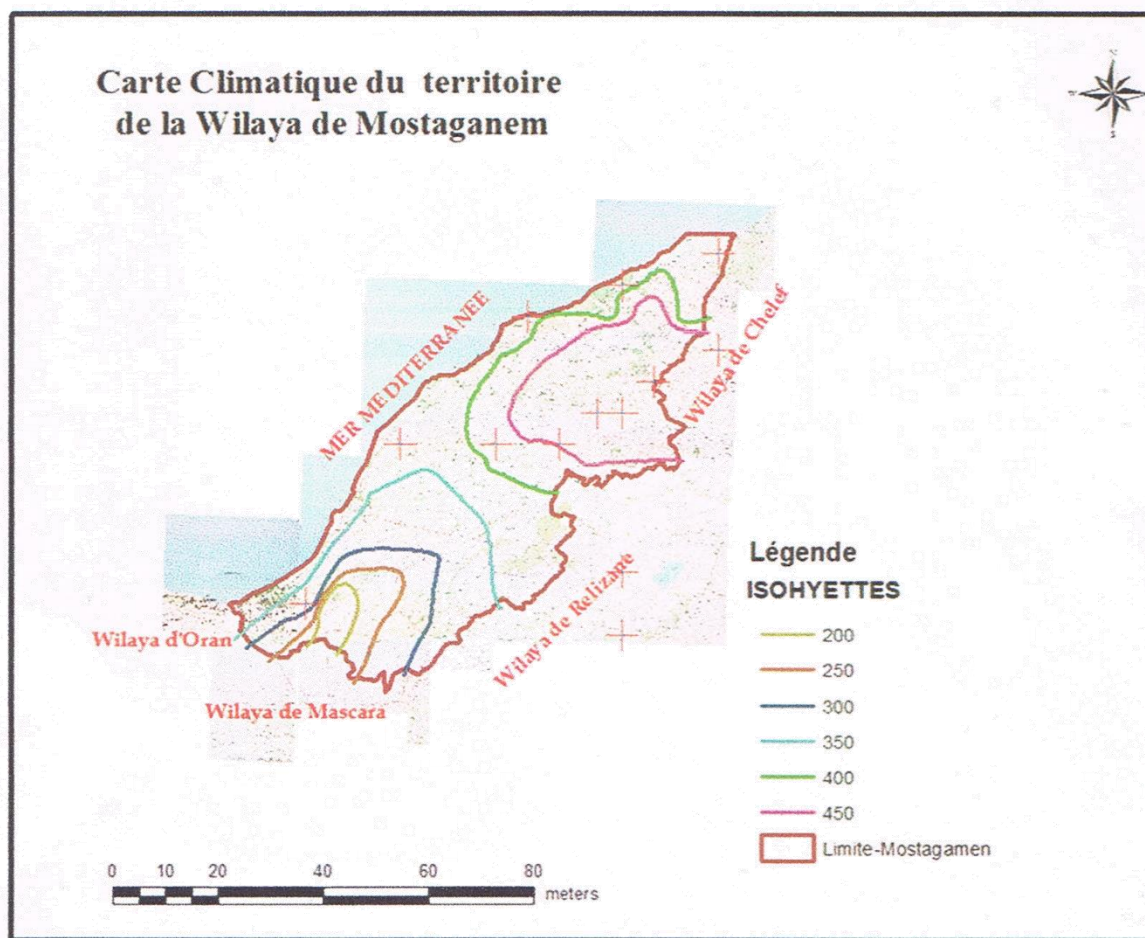


Figure I.7: Carte pluviométrique de la région d'étude

1.3.1.3 Précipitations mensuelles

La répartition mensuelle des précipitations dans l'année et ses variations conditionnent, en relation avec les facteurs thermiques, l'écoulement saisonnier et par là même, le régime des cours d'eau, l'érodabilité des sols et le transport des matériaux en suspension. Cependant, si le phénomène de variabilité des précipitations mensuelles ou saisonnières se prête facilement à l'analyse, vu son caractère tranché dans les bassins, il est néanmoins, malaisé de définir des saisons pluviométriques spatialement homogènes et ce, en raison des différences de régimes de précipitations déterminés eux-mêmes par des variantes à la fois géographiques et météorologiques. Les valeurs moyennes mensuelles pluviométriques relatives à la période (1976/2007), traduisent clairement les variations mensuelles et saisonnières de la distribution des précipitations à l'échelle annuelle. Ainsi, on peut distinguer deux périodes distinctes : - Une période sèche qui correspond à la saison d'été (juin, juillet, août), caractérisée par un déficit pluviométrique bien marqué. - Une période humide qui correspond au reste de l'année ; cependant, il faut souligner que cette période pluvieuse est elle aussi marquée par une succession de mois humides et de mois relativement secs.

a) Concernant le plateau de Mostaganem

Cette zone couvre une superficie importante, et son altitude se trouve insérée entre les courbes 100 m et 350 m. Le tableau I.3 résume les précipitations moyennes mensuelles des différentes stations.

Tableau I.3 : Valeurs des précipitations moyennes mensuelles des précipitations aux différentes stations

Stations	janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Mostag	46.98	43.35	40.8	30.19	25.49	4.157	2.68	1.71	12.17	31.48	49.89	51.3
A- nouis	23.01	29.51	15.75	17.22	10.9	3.33	0.53	1.09	3.31	9.67	24.81	23.08
Du-culiv	42	40	36	30	23	3	1	2	11	28	43	52
A-tedele	52.97	57.76	34	29.5	30.7	3.8	1.23	1.91	10.9	41.4	51.68	67.85
Kheir-ed	44.73	53.2	38	33	22.18	3	1.7	1.4	11.67	34.25	46	59.5
forbaka	32.4	33.56	29.96	22.36	20.09	4.12	0.35	1.3	4.57	21.4	34.14	41.51
Sayada	41.65	45.89	45.55	33.25	31.7	3.2	0.5	1.5	10.1	40.8	42	58.1
Kalaâ	48	47	49.3	34	25.8	6.31	1.67	1.9	7.8	31.5	44.9	48.9
Bouguirat	41.28	40.41	35.14	28.41	24.36	5.42	2.41	1.37	8	27.8	39.73	43.9
S-lakhdar	77.2	74.87	52.93	42.96	28.35	7.45	2.91	1.5	10.07	41.37	45.6	62.7
Cap-Ivi	40.5	41.0	40.3	35.0	26.7	7.8	0.5	1.0	8.8	36.8	41.0	55.2
Mascara	38.8	34.09	48.2	30.68	18.5	6.378	2.878	4.41	12.8	24.3	30.03	27.03
F-blanche	37.8	37.7	50.4	32.6	21.7	7.9	1.8	2.3	10.0	31.0	37.2	36.6

A partir des différents histogrammes des précipitations moyennes mensuelles établis pour nos stations d'étude nous avons pu déduire certaines conclusions (voir histogrammes des pages suivantes). Le mois sec correspond au mois d'Août pour les stations de Mostaganem, Kheir eddine et Bouguirat. Alors que pour les stations de Ain Nouissy, Dunes cultivées, Ain Tedeles, Fornaka, Sayada et Kalaa, il correspond au mois de juillet. Les mois humides diffèrent d'une station à une autre. Décembre pour les stations de Mostaganem, Dunes cultivées, Ain Tedeles, Kheir eddine, Fornaka, Sayada et Bouguirat, Février pour la station de Ain Nouissy et Mars pour la station de Kalaâ. A titre illustratif nous présentons dans la figure 8, l'histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station de Mostaganem.

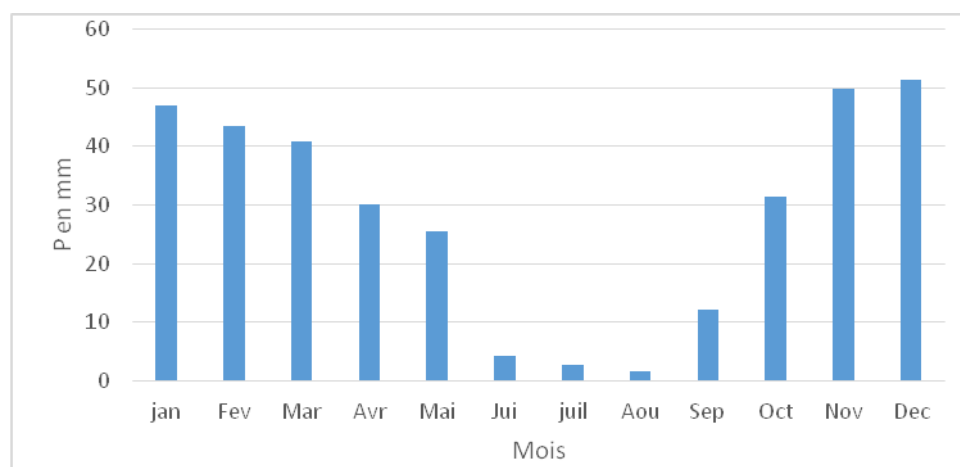


Figure I.8 : Précipitations moyennes de la station de Mostaganem

b) Station de Sidi Lakhdar

La station de Sidi Lakhdar située aux coordonnées (latitude : 36°17 N, longitude : 0°45 N, altitude : 120 m) ne représente pas réellement les monts du Dahra, car elle ne se situe pas loin des zones de montagnes du Dahra, elle peut donc la représenter par manque de données. Son point culminant se trouve à 563 m d'altitude et se situe à environ 14 km de la

mer, on la situera plutôt dans les plaines de l'Est qui englobent aussi les communes de Hadjadj, Khadra, Achaâcha, Benabdelmalek Ramdhane et Ouled Boughalem dont l'orientation générale est parallèle au littoral. Par contre en ce qui concerne les monts du Dahra, ce sont les communes de Ouled Maalah, Sidi Ali, tazgait et Sidi Belattar qui la représentent.

Il s'agit d'un poste pluviométrique, où seules les précipitations sont relevées. Le tableau I.4 montre les précipitations moyennes mensuelles de la station de Sidi Lakhdar, tandis que la figure I.9 illustre les variations mensuelles des précipitations. Cette zone est caractérisée par de fortes pluies d'Automne-Hiver. On constate une augmentation rapide d'octobre à février, puis une décroissance régulière jusqu'au minimum estival.

Tableau I.4 : Précipitation moyenne mensuelle à la station de Sidi Lakhdar

Mois	janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
P mm	77.2	74.87	52.93	42.96	28.35	7.45	2.91	1.5	10.07	41.37	45.6	62.7
%	17	16.7	12	10	6.5	1.5	0.6	0.3	2	9	10	14

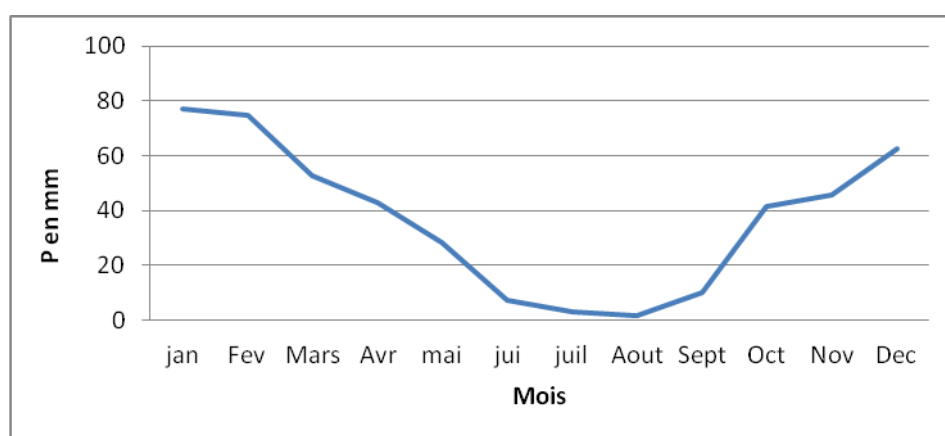


Fig.I.9 : Variation mensuelles des précipitations à la station de Sidi Lakhdar (1969/2007)

Il ressort de cette courbe que les mois les plus arrosés sont Janvier (77.2 mm), Février (74.87 mm) et Décembre (62.7 mm) (ordre décroissant). Le minimum est atteint en Août.

c) Station de CAP IVI

Pour une meilleure compréhension et visualisation de la répartition des précipitations moyennes mensuelles, il serait plus intéressant de les représenter graphiquement. Cette station est localisée au niveau du cordon littoral, le maximum de précipitations s'observe au mois de décembre (52 mm). Le minimum s'observe au mois de juillet (0.5 mm). Les précipitations moyennes mensuelles de cette station sont présentées dans le tableau I.5.

Tableau I.5 : Précipitation moyenne mensuelle à la station CAP IVI

Mois	janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
P mm	40.2	40.5	38.5	33	26.4	7.8	0.5	1	8.8	36	40	52
%	14	14	14	12	9	3	0	0	3	13	14	18

d) Station de ferme blanche

Cette station est localisée géographiquement au niveau de la plaine d'El Habra (wilaya de Mascara) proche de la plaine des Bordjias. Le maximum de précipitation est enregistré au mois de Mars avec (50.4 mm). Le minimum s'observe au mois de juillet avec (1.8 mm). Les précipitations moyennes mensuelles de cette station sont présentées dans le tableau I.6.

Tableau I.6 : Précipitation moyenne mensuelle à la station Ferme blanche

Mois	janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
P mm	37.9	37.7	50.4	32.6	21.7	7.9	1.8	2.3	9	29.8	35	36
%	13	12	17	11	7	3	1	1	10.0	31.0	37.2	36.6

I.3.1.4. Précipitations saisonnières

Les quatre saisons de l'année figurés dans le tableau I.7, correspondent à :

1. L'hiver (Décembre, Janvier, Février)
2. Le Printemps (Mars, Avril, Mai)
3. L'Eté (Juin, juillet, Aout)
4. L'Automne (Septembre, octobre, Novembre).

Alors que les variations des précipitations moyennes saisonnières concernant le plateau de Mostaganem sont exprimées dans la figure I.10.

Tableau I.7 : Précipitation saisonnières moyennes aux différentes stations

Stations	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Mostaganem	91	140	94	7.2
A- nouissy	37.8	75.6	43.8	4.95
Dunes-culivées	81.32	133.8	88.67	6.33
A-tedeles	104	178.6	94.37	6.92
Kheir-eddine	64.4	157.4	92.97	6.05
for naka	60.1	107	72.4	5.77
Sayada	92.72	145.7	110.5	5.2
Kalaâ	83.14	143.7	109.2	9.88
Bouguirat	74.86	125.6	87.91	9.21
Sidi-lakhdar	97.04	214.77	124.44	11.86
Cap-Ivi	86.6	136.7	102	9.3
Mascara	67.13	99.92	97.38	13.67
Ferme-blanche	78.2	112.2	104.7	12

a) Variation des précipitations moyennes saisonnières concernant le plateau de Mostaganem

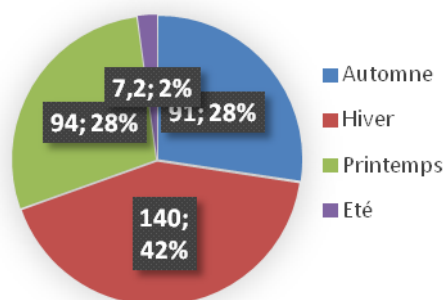


Figure I.10 : Précipitations moyennes saisonnières du plateau de Mostaganem.

Il est à remarquer qu'au niveau du plateau de Mostaganem la saison la plus sèche est l'été pour toutes les stations. La saison la plus pluvieuse étant l'hiver, lui succède le printemps pour toutes les stations mis à part la station de Ain Tedeles ou l'automne présente le maximum secondaire.

b) Station de Sidi Lakhdar

Tableau I.8 : Précipitations moyennes saisonnières

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
P en mm	97.04	214.77	124.44	7.2	447.9
%	22	47.5	28	2.5	100

Le tableau I.8 montre les précipitations moyennes saisonnières de la station de Sidi Lakhdar, tandis que la figure I.11 montre une présentation graphique de ces précipitations. La saison la plus sèche est l'été avec un taux de précipitation de 2 % lui succède l'Automne ensuite le Printemps. L'Hiver est le mois le plus pluvieux (47.5%).

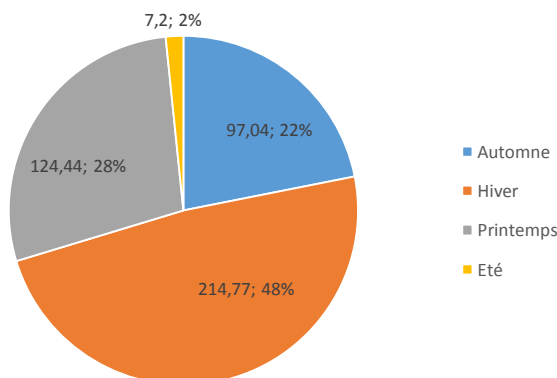


Figure I.11: Précipitations moyennes saisonnières de la station de sidi Lakhdar

c) Station de Cap Ivi

Tableau I.9 : Précipitations moyennes saisonnières

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
P en mm	86.6	136.7	102	9.3	334.6
%	26	41	30	3	100

Le tableau I.9 montre les précipitations moyennes saisonnières de la station de cap- Ivi, tandis que la figure I.12 relate sa représentation graphique.

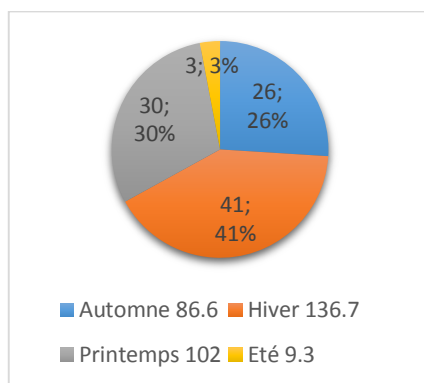


Figure I.12 : Précipitations moyennes saisonnières de la station de Cap Ivi

La saison la plus sèche est l'été avec un taux de précipitation de 3%, lui succède l'Automne ensuite le printemps. L'hiver le plus pluvieux (41%).

d) Station Mascara-Matmore (Wilaya de mascara)

Bien que cette station soit un peu éloignée des autres périmètres et ayant une situation différente, ses données peuvent quand même servir d'indication. Le tableau I.10 résume les informations recueillies auprès de l'Office National de la Météorologie (O.N.M) et le tableau I.11 présente les précipitations moyennes mensuelles de la station Mascara-Matmore :

Tableau I.10 : Paramètres de la station Mascara-Matmore

Stations	coordonnées			Période	Paramètres disponibles
Mascara-Matmore	Long	Lat	Alt(m)	1988-2007	P, T et les occurrences
	0°18'	35°36'	474		

- Données pluviométriques : Selon L'ONM : la pluviométrie moyenne mensuelle de la station de Mascara-Matmore de 1988-2007.

Tableau I.11 : Précipitations moyennes mensuelles

Mois	janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
P mm	38.8	34.09	48.2	30.68	18.5	6.378	2.878	4.411	12.8	24.3	30.3	27.03
%	13	12	17	11	7	3	1	1	3	10	12	12

La figure I.13 exprime les variations des précipitations mensuelles de la station Mascara-Matmore, alors que le tableau I.12, présente les précipitations moyennes saisonnières suivi par une représentation graphiques dans la figure I.14.

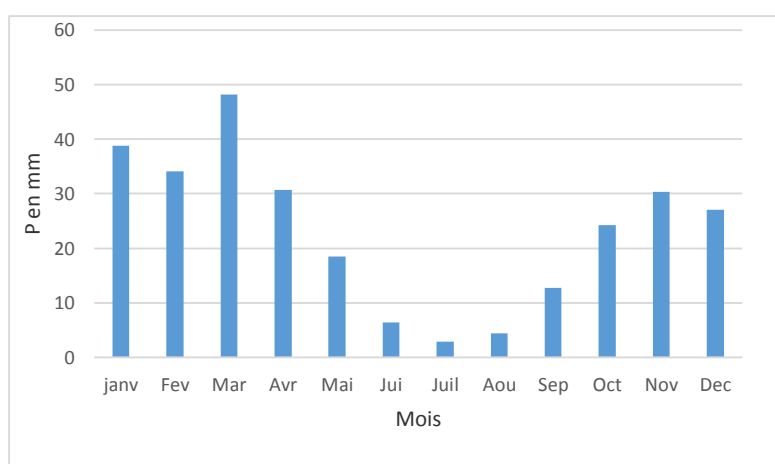


Figure I.13 : Précipitations moyennes de la station de Mascara-Matmore Précipitations moyennes saisonnières

Tableau I.12 : Précipitations moyennes saisonnières

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
P en mm	67.13	99.92	97.38	13.67	278.1
%	24	36	35	3	100

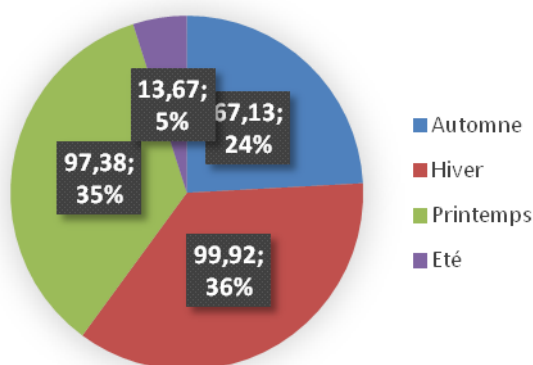


Figure I.14: Précipitations moyennes saisonnières de la station de Mascara-Matmore

La saison la plus humide est l'Hiver avec un taux de précipitation de 36% lui succède le printemps (35%) ensuite l'automne (24%). L'été est la saison la plus sèche.

- Données de la température de l'air

Le tableau I.13 présente les températures minimales, moyennes et maximales de la station Mascara-Matmore alors que la figure I.15 représente la représentation graphique de ces températures.

Tableau 1.13 : Température Tmin, Tmoy et Tmax

Mois	janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Tmax	15.9	20.8	21	25.1	28.4	32.7	38.4	38.4	33.8	27.3	21.6	19.1
Tmin	1	1.5	2.6	5.2	6.5	13.4	16.2	17.3	12.6	9.7	4.6	0.4
Tmoy	8.45	11.15	11.8	15.15	17.45	23.05	27.3	27.85	23.2	18.5	13.1	9.75

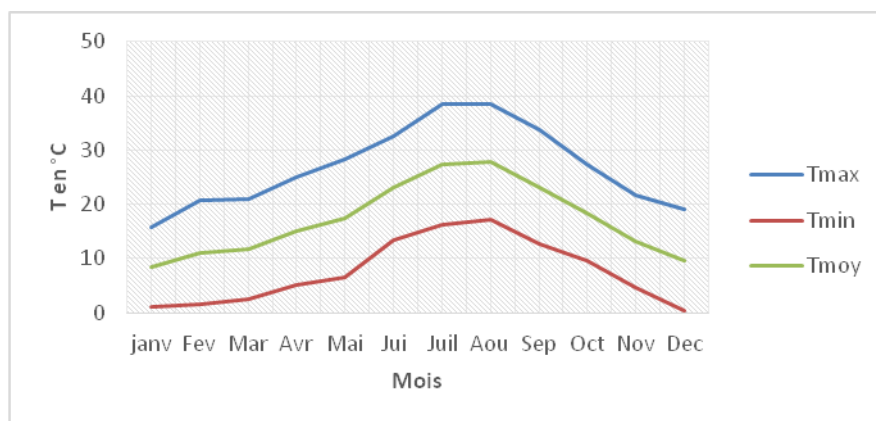


Figure I.15 : Variation des températures moyennes de la station de Mascara-Matmore

La courbe des températures prend une allure croissante jusqu'à atteindre son maximum en juillet, c'est le mois le plus chaud de l'année. Ensuite la courbe décroît pour atteindre son minimum en décembre.

- Données sur l'humidité de l'air (1988-2007)

Les données sur l'humidité de l'air sont résumées sur le tableau I.14, la figure I.16 illustre la représentation graphique de l'humidité moyenne relative de la station Mascara-Matmore ci-après :

Tableau I.14 : Humidité moyenne relative en % de la station de Mascara-Matmore

Mois	janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy
HR %	74.33	73	65.67	66	60	53.25	45.44	46.33	57.33	66	69.67	74.33	62.61

Les valeurs de l'humidité relative moyenne sont représentées graphiquement comme suit :

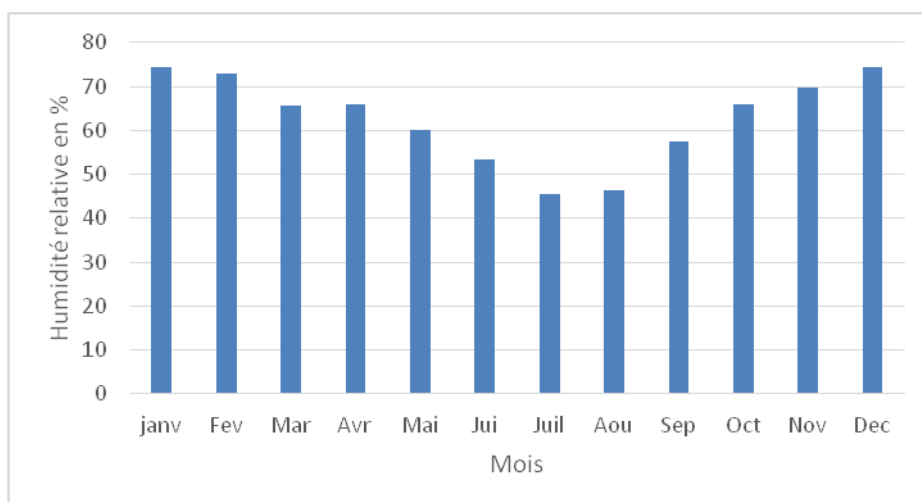


Figure I.16 : Humidité moyenne relative en % de la station de Mascara-Matmore

- Données sur le vent

Le vent est l'un des éléments les plus caractéristiques du climat. Malheureusement, il est aussi un des éléments dont l'observation rencontre beaucoup de difficultés. Par ailleurs l'observation même du vent est des plus délicates, c'est pour cela qu'elle n'est relevée que dans les stations professionnelles. Nous ne disposons pour la station de Mascara-Matmore que les vents maximaux s'étalant de 1988 à 2007. Vents maximal en m/s pour la période 1988-2007, illustrés dans le tableau I.15 ci-après et représenté graphiquement dans la figure I.17:

Tableau 1.15 : Vent maximal en (m/s) de la station de Mascara-Matmore

Mois	Janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moy.	18.44	21.56	19.67	20.22	18.78	18.5	20.78	20	18.56	20.33	18.44	21.11

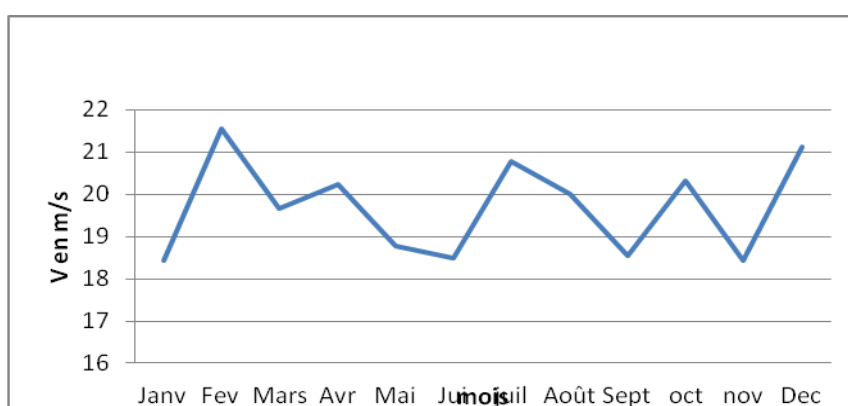


Figure I.17 : Variation mensuelle de la force des vents de la station de Mascara-Matmore

- Données sur la durée d'insolation en en heure (1991-2007)

Le tableau I.16 montre la durée d'insolation en heures enregistrée à la station Mascara-Matmore.

Tableau I.16 : Durée d'insolation en heure à la station de Mascara-Matmore

Mois	janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
I.	178.8	177	208.5	256.3	301	313.3	340.5	316.7	259	213	198.5	177.3

Le maximum d'ensoleillement est relevé durant le mois de juillet avec une valeur de 340.5. Le minimum d'ensoleillement est observé en Février. La période d'observation n'étant que de 17 ans (1991-2007), ces données nous permettent d'estimer la durée d'insolation pendant ces dernières années.

Afin de mieux cerner le climat, nous avons englobé dans le tableau I.17, les précipitations moyennes mensuelles et dans le tableau I.18 les précipitations saisonnières des différentes zones de toute la région d'étude. Le plateau, les monts du Dahra représentés par la station de sidi Lakhdar, le cordon littoral représenté par la station de cap Ivi et la plaine des bordjias représentée par la station de ferme blanche.

- Précipitations moyennes mensuelles :

Tableau I.17 : Précipitations moyennes mensuelles de chaque zone

Zone	Le plateau	Le Dahra	Le cordon littoral	Les Bordjias
P moy mens	300 mm	447.9 mm	447.4 mm	307.1 mm

-Précipitations moyennes saisonnières de chaque secteur :

Tableau I.18 : Précipitations moyennes saisonnières de chaque zone

Saisons	Le plateau	Le Dahra	Le cordon littoral	Les Bordjias
Automne	75.7 mm	97.04 mm	86.6 mm	78.2 mm
Hiver	132.9 mm	214.77 mm	136.7 mm	112.2 mm
printemps	85.57 mm	124.44 mm	102 mm	104.7 mm
Eté	6.45 mm	11.86 mm	9.3 mm	12 mm

D'une manière générale, la région d'étude se caractérise par un climat semi-aride à hiver tempéré .La pluviométrie est irrégulière et varie entre 300 et 500 mm/an, la région Est est la plus arrosée par rapport à la région Ouest.

I.4 ETUDE DU REGIME THERMIQUE

Les températures moyennes annuelles et mensuelles régissent directement en interaction avec les autres facteurs météorologiques (insolation, vitesse et turbulence du vent, précipitation) et biogéographiques, le phénomène d'évapotranspiration et déficit d'écoulement annuel et saisonnier. On dispose des données de températures moyennes mensuelles et annuelles des trois stations représentatives de la région, avec les minima et les maxima (Tableau 1.19).

Tableau I.19 : Moyennes mensuelles et annuelles des températures des trois stations de la région de Mostaganem

Stations	T° C	Janv	Fev	Mar s	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	An
Mostaganem	T max	17.9	19.4	20. 5	21.5	25.9	29. 2	33	33	31.9	26.3	22.8	20.1	25.1
	Tmin	2.3	4.8	5	7.4	9.8	14. 3	17.7	16.5	15.6	12	8	4.3	9.8
	Tmoy	10.1	12.1	12. 75	14.4 5	17.8 5	21. 75	25.3 5	24.7 5	23.7 5	19.1 5	15.4 5	12.2	17.5
	Amplitude thermique													
Cap Ivi	T max	17.4	18.7	19. 1	20.9	22.6	26	32.4	31.1	29.5	25. 5	20.7	18.5	23.5
	Tmin	3.8	8.2	7.3	10.7	13.1	15. 7	17.1	18	16.2	10. 1	3.6	1.1	10.4
	Tmoy	10.6	13.4 5	13. 2	15.8	17.8 5	20. 85	24.7 5	24.5 5	22.8 5	17. 8	12.1 5	9.8	17.0
	Amplitude thermique													
Ferme blanche	T max	17.5	18.5	19. 7	20.9 5	26.0 5	27. 6	32.7	32.0 5	30.7	25. 7	21.7 5	19.3	24.4
	Tmin	3.05	6.50	6.1 5	9.05	11.4 5	15	17.4	17.2 5	15.9	11. 05	5.8	2.7	10.1
	Tmoy	10.6	12. 76	12. 98	15.1 3	17.8 5	21. 3	24.9 6	24.5 6	23.0 8	18. 48	13.7 6	11	17.6

Contrairement aux précipitations, les saisons thermiques semblent bien tranchées. La saison chaude s'étend de Mai à Octobre, mois pendant lesquels les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle, alors que la saison froide correspond à Novembre – Avril. Le maximum de température est atteint en juillet Août avec une moyenne de 25°C, alors que le minimum d'environ 8°C se situe en janvier. Cette division de l'année en deux saisons thermiques, qui est mise en évidence par une détermination des mois biologiquement humides et secs, n'est pas sans conséquence sur le comportement hydrologique et hydrogéologique des bassins.

En effet, les grandes oscillations mensuelles durant les mois les plus froids s'accompagnent d'importants phénomènes tels que les baisses brutales de températures, entraînant des épisodes pluvieux générateurs de crues qui agissent directement sur l'écoulement fluvial, l'érosion et le transport solide dans les bassins. De même, les effets de la saison chaude ne sont pas sans conséquences, ainsi la stagnation des masses d'air anticycloniques provoque souvent un déficit pluviométrique et une forte évapotranspiration. Les périodes d'étiages sont longues et souvent on arrive au tarissement des oueds. Le sol des versants est pratiquement dénudé, asséché et fragilisé pour subir l'action des premières pluies qui surviennent en septembre, octobre ou parfois jusqu'à novembre.

I.4.1. Etude du climat

I.4.1.1 Méthode graphique

Pour l'étude du climat concernant la station de Mostaganem et Cap Ivi, plusieurs méthodes seront utilisées :

- Les unes nous permettent de visualiser l'étendue des saisons sèches et humides (méthodes graphiques),
- Les autres basées, sur le calcul d'indices, nous permettrons à partir des précipitations et des températures de caractériser le climat de la région (méthode analytique).

a) Sécheresse et subsécheresse de Gaussen : le rapport ombrothermique P/T

On doit à Gaussen et Bagnouls (1953,1957) une méthode simple et efficace de discrimination entre un mois sec et un mois humide : le critère $P/T \leq 2$. Pour ces auteurs, un mois est sec, si le rapport des précipitations moyennes mensuelles, par le rapport à la température moyenne mensuelle, est inférieur à 2 (Guyot, 1999). Dans le même sens, il est à noter qu'on ne passe pas d'un mois sec à un mois humide. La transition se fait par un mois « subsec », défini comme un mois ou le total des précipitations est supérieur au double de la température et inférieur au triple de celle-ci (Walter, 1955 cité par Gaussen et al., 1963), i.e. $2 < P/T < 3$. Cette notion de « subsécheresse » est intéressante à retenir pour affiner l'analyse (Richard et Tonnel, 1985).

Maintenant, si l'on considère la typologie ombrothermique établie pour les diverses mois de l'année par Rivas-Martinez (1987), il s'avère qu'elle concorde parfaitement avec le système de Gaussen. En ce sens, que les mois « sec » et « subsecs » respectivement pour Riva-Martinez. Enfin, le rapport $P/T > 3$ délimite les mois humide au sens large pour les deux auteurs. Rivas Martinez (1987) s'est apparemment inspiré de la méthode de Gaussen, qu'il a modernisé en distinguant quatre niveaux d'humidité et autant d'aridité et en prenant en considération dans la définition de la période de sécheresse les mois subsecs sensu Gaussen, soit au total 9 types ombrothermiques au pas de temps mensuel (voir tableau, I.20 ci-contre)

Tableau I.20 : Valeurs du rapport P/T et typologie ombrothermique de Rivas-Martinez (1987)

Valeur de P/T	Typologie ombrothermique de Rivas-Martinez	Typologie de Gaussen
>10	Ultrahyperhumide (UH)	Humide
6-10	Hyperhumide (HH)	
4-6	Humide (H)	
3-4	Subhumide (SH)	
2-3	Sec (S)	Subsec
1-2	Semi-Aride (SA)	Sec
0.5-1	Aride (A)	
0.25-0.5	Hyperaride (HA)	
< 0.25	Ultrahyperaride (UA)	

L'application de ce système de caractérisation de l'arido-humidité à l'échelle mensuelle aux stations d'étude, nous paraît d'un grand intérêt et promet des résultats probants tableau.I.21.

Tableau I.21 : Valeurs du rapport P/T et typologie ombrothermique pour les stations d'étude selon Rivas-Martinez (1987)

Stations	P mm et T °C	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Moy
Mostaganem	P	46.98	43.35	40.8	30.19	25.49	4.16	2.68	1.71	12.17	31.48	49.89	51.3	340.2
	T	10.1	12.1	12.75	14.45	17.85	21.75	25.35	24.75	23.75	19.15	15.4	12.2	17.5
	P/T	4.65	3.58	3.25	2.09	1.43	0.19	0.11	0.07	0.52	1.64	3.24	4.20	
	Typologie Martinez	H	SH	SH	S	SA	UA	UA	UA	A	SA	SH	H	
Cap Ivi	P	40.5	41.0	40.3	35.0	26.7	7.8	0.5	1.0	8.8	36.8	41.0	55.2	334.5
	T	10.6	13.45	13.2	15.8	17.85	20.85	24.75	24.55	22.85	17.8	12.15	9.8	16.97
	P/T	3.82	3.05	3.05	2.22	1.50	0.37	0.02	0.04	0.39	2.07	3.37	5.63	
		SH	SH	SH	S	S	SA	UA	UA	HA	S	SH	H	

b) Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Le type de climagramme le plus répandu est sans doute celui conçu par Bagnouls et Gausсен (1953). La représentation sur un même graphique des précipitations moyennes mensuelles, exprimées en mm, et des températures moyennes mensuelles exprimées en °C, avec en abscisses les mois, permet d'obtenir le diagramme ombrothermique, amélioré et systématisé par Walter et Leith (1957-1966 cité par Leith et al., 1999) à l'échelle mondiale (Climate Diagramm World Atlas, KlimaDiagramm Weltatlas).

Ce dernier permet une visualisation immédiate de la durée de l'intensité de la saison sèche, à condition que les échelles prises en ordonnées soient telles qu'à 1°C corresponde 2 mm (Richard, 1997 ; Guot, 1999). Ce diagramme ombrothermique, qui montre la marche mensuelle des précipitations, et de la température, permet aussi de déterminer la longueur de la saison pluvieuse (Ozenda , 1991 ; le Houérou, 2004 ;). La surface du polygone est utilisée comme « indice d'intensité de sécheresse » (Panini et Amandier, 2005). Il est en soi une information synthétique pertinente pour plusieurs usages (Richard, 1997). Les précipitations moyennes mensuelles et les températures moyennes mensuelles de la station de Mostaganem sont montrées dans le tableau I.22, tandis que la figure I.18 illustre le diagramme pluviothermique de la même station.

Tableau I.22 : Précipitation moyennes mensuelles et températures moyennes mensuelles de la station de Mostaganem

Mois	janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
P en mm	15.9	20.8	21	25.1	28.4	32.7	38.4	38.4	33.8	27.3	21.6	19.1
Tmoy	10.1	12.1	12.75	14.45	17.85	21.75	25.35	24.75	23.75	19.15	15.4	12.2

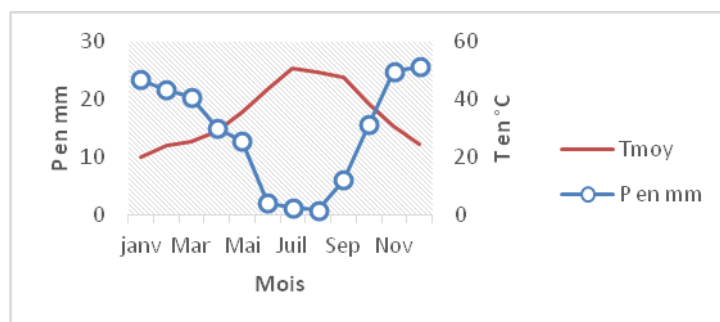


Figure I.18 : Diagramme Pluviothermique station de Mostaganem

Nous constatons qu'à Mostaganem la période excédentaire ou humide, s'étale de mi-septembre jusqu'à début juin, tandis que la période déficitaire ou sèche s'étale de début juin à mi-septembre.

c) Méthode des courbes ombrothermiques

La méthode des courbes ombrothermiques mise au point par EUVERTE (G), 1967, conduit à reporter en ordonnées :

Suivant une échelle logarithmique, les précipitations en mm ;

Suivant une échelle arithmétique, les températures en °C.

Deux courbes peuvent être tracées, l'une concernant l'évolution des températures mensuelles, l'autre l'évolution des précipitations. Les points d'intersection des deux courbes, déterminent les périodes où les besoins en eau sont satisfaits. Lorsque la courbe des températures passe au-dessus de la courbe des précipitations, on est dans une période déficitaire.

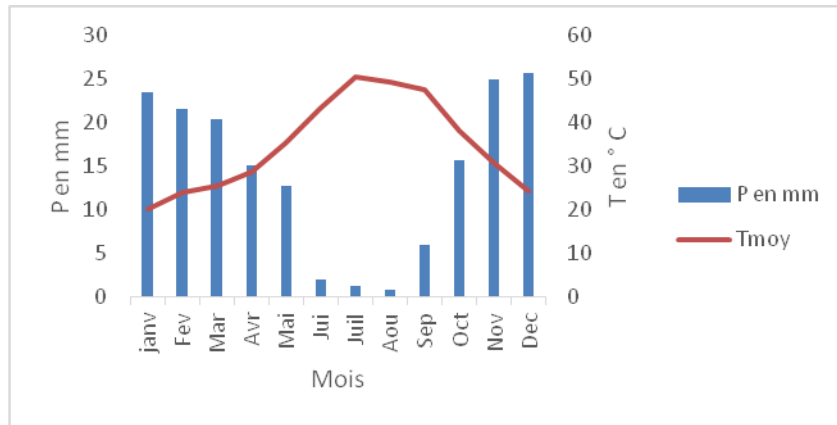


Figure I.19 : Diagramme ombrothermique station de Mostaganem

Les points d'intersection des deux courbes, déterminent les périodes où les besoins en eau sont satisfaits. Lorsque la courbe des températures passe au-dessus de la courbe des précipitations, on est dans une période déficitaire qui dans notre cas s'étend de début juin jusqu'à environ fin septembre. Par contre lorsque la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures, la période correspondante est excédentaire, cela se produit de fin mai à mi-septembre.

1.4.1.2 Méthode analytique (des indices)

Il est également très important et enrichissant d'évaluer la sécheresse globale (sur une période moyenne annuelle) plus particulièrement dans le but d'une comparaison entre plusieurs stations et d'une géospatialisation des divers bioclimats correspondants.

a) Indice d'aridité mensuel de De Martonne

Du fait de sa simplicité, cet indice combinant P et T, deux facteurs fondamentaux agissant directement sur le développement des végétaux, est très largement utilisé (Richard et Tonnel, 1985). De Martonne a ainsi proposé l'indice annuel ($I_{DM} = P/(T+10)$) et pour caractériser le climat à l'échelle mensuelle, les précipitations du mois considéré sont

multipliées par 12 ($I_{DM} = 12 P / (T + 10)$), afin d'aboutir à une valeur comparable à celle de l'indice annuel (Guot, 1999). En fonction des valeurs seuils de cet indice, applicable aussi bien à l'échelle mensuelle qu'annuelle, De Martonne (cité par Guot, 1999) distingue divers bioclimats (tableau I.23).

Tableau I.23: valeurs de l'indice d'aridité de De Martonne et bioclimats correspondant

Valeur de l'Indice	Type du bioclimat	Valeur de l'Indice	Type du bioclimat
0-5	Hyperaride (HA)	20-30	Subhumide (SH)
5-10	Aride (A)	30-55	Humide (H)
10-20	Semi-aride (SA)	> 55	Perhumide (PH)

La valeur biocritique 20 de cet indice marque la limite entre « aridité » et « humidité ». Par ailleurs, en altitude, la chute des températures et, de façon concomitante, l'augmentation des précipitations durant la période hivernale, donnent des valeurs élevées pour I_{DM} (>55). Les valeurs de l'indice mensuel d'aridité de De Martonne de la région d'étude sont illustrées dans le tableau I.24.

Tableau I.24 : valeurs indices mensuel d'aridité de De Martonne de la région d'études

Mois	janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
I.	28.05	23.54	21.52	14.82	10.98	1.57	0.9	0.59	4.33	12.96	23.57	27.73
climat	SH	SH	SH	SA	SA	HA	HA	HA	HA	SA	SH	SH

b) Indice d'aridité annuel de De Martonne

En fonction des classes de valeurs que prend cet indice ombrothermique, une classification bioclimatique globale des stations étudiées a été établie. Pour $P=340.2$ mm et $T = 17.5$ °C on trouve $I_{DM}= 12.37$. En se reportant à l'abaque nous déduisons que notre zone est caractérisée par un climat semi-aride à écoulements temporaires et formations herbacées.

c) Quotient pluviométrique et climagramme d'Emberger

En Algérie, Stewart (1969) a montré que le quotient pluviométrique d'Emberger, après simplification peut s'écrire :

$$Q_a = 3.43 * P / (M - m) \quad \text{I.1}$$

Avec

P : précipitation moyenne annuelle en mm,

M : moyenne des températures maximum du mois le plus chaud en degrés absolus,

m : Moyenne des températures minimum du mois le plus froid en degrés absolus.

C'est cette formule sous utilisée à notre sens, abstraction faite des travaux de Le Houérou (1982, 1989, 1995,2004), qui a prouvé son efficacité, que nous retiendrons ici. On peut rappeler que ce quotient a pour objectif de mettre en évidence la sécheresse globale d'une station à travers des valeurs moyennes annuelles et que le climat est d'autant plus sec que ce quotient est plus petit (Daget, 1977 a &b).

L'interprétation du quotient pluviométrique, autrement dit, le classement bioclimatique d'une station donnée nécessite l'emploi du climagramme d'Emberger (Sauvage, 1963), qui permet de la placer dans l'une des 54 combinaisons bioclimatiques du

climat méditerranéen (réellement observé ou théorique). Ce climagramme, à échelle tantôt arithmétique tantôt logarithmique dans le tracé des limites entre les divers étages bioclimatiques, était oblique à l'origine en raison de la compensation entre température et pluviosité. Rappelons que ce climagramme permet de prendre en considération les deux stress climatiques hydrique Q_2 et thermique m et qu'il a prouvé son efficacité dans l'analyse des relations climat végétation dans le biome méditerranéen.

La prise en considération de m sur le climagramme permet de bien séparer des stations ayant des bioclimats différents, malgré un même quotient pluviométrique (Daget, 1977 a et b), le froid ou stress thermique hivernal étant le facteur biologique différentiel. Les valeurs de m peuvent osciller en région méditerranéenne entre 9°C ou plus et -10°C (hautes montagnes) (Quézel & Médailles, 2003). Ces facteurs sont liés essentiellement au facteur altitudinal et dans une moindre mesure à la position latitudinale et à la continentalité. A la suite d'Emberger (1955), certaines subdivisions thermiques de la région méditerranéenne, selon les classes de valeurs de m , ont été retenues pour distinguer « des variantes thermiques d'hiver » (Sauvage, 1963 ; Daget, 1977a & b).

Nous préférons par conséquent, pour la classification bioclimatique de nos stations, utiliser le climagramme d'Emberger, tel qu'il figure dans les récents travaux de Le Houérou (1995, 2004).

d) Indice de Paul Moral :

Les résultats précédents sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (IM), qui utilise aussi la hauteur annuelle des précipitations (en mm) et les températures moyennes annuelles en $^{\circ}\text{C}$. Cet indice permet de dire :

Si $IM < 1$ on a climat sec et si $IM > 1$ on a climat humide.

$$IM = P / (T^2 - 10T + 200) \quad 1.2$$

Pour

$P = 340.2 \text{ mm}$

$T = 15.58^{\circ}\text{C}$

Ce qui donne

$IM = 1.16$

On peut dire que le climat de région d'étude est à la limite sec-humide, c'est-à-dire qu'il peut être qualifié de semi-aride.

I. 5 DONNEES GENERALES GEOLOGIQUES

La région d'étude fait partie du bassin versant du Chélif codifié 01 et Dahra codifié 03 par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques qui sont jalonnés par une succession de plaines et de plateaux peu élevés. Ce dernier s'allonge d'Est en Ouest, il comprend trois types de classes d'altitude que l'on peut schématiquement définir par leurs caractères hypsométriques. Les collines représentant une altitude moyenne de 500 à 700 m, les plateaux

s'étageant entre 100 et 200 m, et les plaines s'étalant entre 0 et 200 m. Les trois ensembles que l'on peut observer concernent la région d'étude sont :

I.5.1 Les collines « les monts du Dahra »

Elles résultent du plissement des dépôts du Néogène du bassin du bas-Chélif au cours du pléistocène, cette orogénèse tardive a permis, malgré la grande plasticité du matériel Néogène, la formation des reliefs. Cette Zone montagneuse particulièrement développée à l'Est vient s'accoler au massif crétacé du Dahra pour former un même ensemble orographique dont l'altitude ne dépasse guère les 664m (BNEDER, 1996).

I.5.2 Les plateaux « le plateau de Achaâcha et le plateau de Mostaganem »

La transgression calabrienne, en mordant plus ou moins profondément sur le bassin du bas Chélif a déposé des formations gréseuses qui forment une succession de grands entablements parmi lesquels on peut individualiser le plateau de Mostaganem.

I.5.3 Les plaines « plaine de Bordjias et plaine de chélif »

I.5.3.1 La plaine des Bordjias

Constitue la partie Nord-Est de la zone d'effondrement de la Mactaâ, elle est limitée au Nord par le plateau de Mostaganem qui la surplombe topographiquement, au Nord-Ouest par les collines de Fornaka et les forêts de la Mactaâ qui la séparent de la plaine du golfe d'Arzew, au sud par le canal Tinn qui forme la limite entre la plaine et les terres marécageuses et salées de l'Habra. La zone des Bordjias est menacée par le phénomène d'hydromorphie.

I.5.3.2 La vallée du chélif

La vallée du Chélif fait partie de la plaine du Chélif qui constitue dans sa partie orientale une étroite bande d'une dizaine de kilomètres de largeur que draine le Chélif depuis la wilaya de chlef jusqu'à son confluent avec l'oued Mina. Toute cette plaine est drainée par l'oued Chélif et ses affluents. Il semble que dans certains épisodes du comblement récent, les plaines du bas Chélif étaient un vaste marécage où se sont déposées les argiles fines. Cette esquisse situe approximativement les grandes unités géographiques de la région d'étude dont nous allons maintenant résumer la géologie. Nous ajouterons une unité qui est le cordon littoral. Les cinq unités sont respectivement, le plateau de Mostaganem, la vallée du Chélif, la plaine du Bordjias, les monts du Dahra et le cordon littoral.

I.5.4 Géologie des cinq unités géomorphologiques

La carte géologique du territoire de la wilaya de Mostaganem illustrée dans la figure I.20 a été obtenue par numérisation la carte géologique au 1/200000, sous l'outil SIG Arcgis10 dont dispose le laboratoire ISTHME. Nous présentons dans ce qui suit la géologie des six unités géomorphologiques.

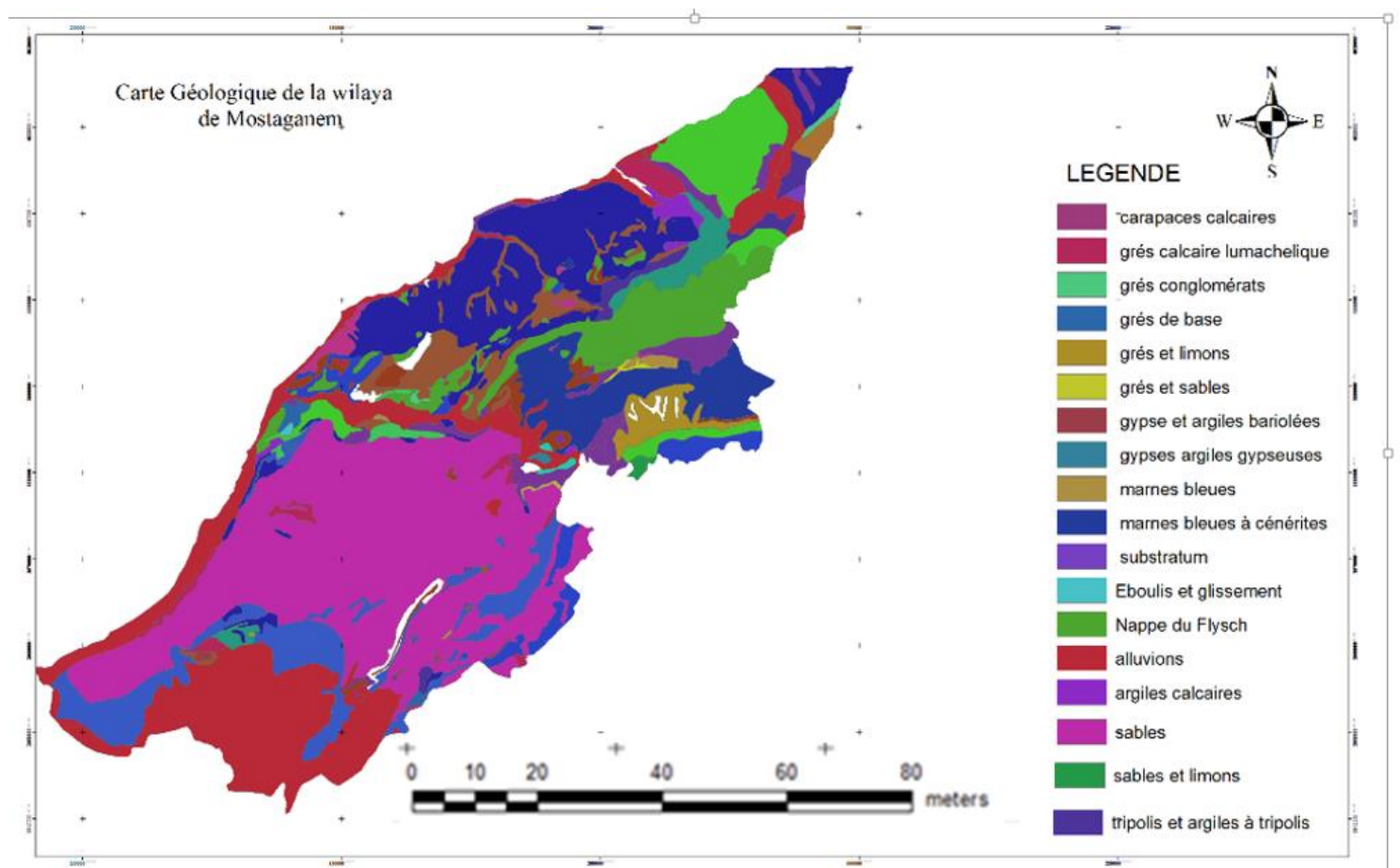


Figure I.20: Carte Géologique de la région d'étude

1.5.4.1 Le plateau de Mostaganem

Il s'abaisse régulièrement vers l'ouest, sur la plaine d'El Habra et le golfe d'Arzew. Il surplombe régulièrement la mer et le bas Chélif par une falaise de 150 à 200 m au Nord et au nord-ouest. Il est bordé au Sud-Est par une ligne de relief jalonnée par les forêts d'Enarro et de l'Akboub qui le séparent de la plaine de Relizane. Le plateau ne présente un aspect tabulaire que dans sa région centrale. Ailleurs, il est affecté de nombreuses ondulations orientées Nord-Est, Sud-Ouest qui délimitent des cuvettes à fond parfois marécageux.

Deux types de formations affleurent sur la carte, les formations allochtones et les formations autochtones qui constituent la majeure partie du plateau.

a) Les formations allochtones : Ce sont les terrains les plus anciens. On peut définir deux types d'allochtones, les diapirisme et les nappes de charriage :

Le diapirisme : se manifeste à l'Est de Ain Nouissy ou affleure un diapirisme de gypse renfermant des roches volcaniques, de marnes vertes ou roses de la pyrite de la dolomie du chlorure de sodium et du sulfate de Magnésium.

Les nappes de charriage : Au Nord de Mostaganem (Kharrouba Djebel Diss) apparaît tout un ensemble de terrains appartenant aux nappes : le flysh violacé, le flysh vert, gypse du trias, marnes et marno calcaire et argiles et grés.

b) Les formations autochtones : Ce sont les terrains post nappe le plus ancien est le Miocène qui affleurent très largement sur la carte.

1. Le Miocène

Le Miocène (le miocène laguno-continentale) : Ce sont des marnes rouges riches en galets et sables, grès quartzeux, conglomérats avec passage latéral à des marnes brunes graveleuses à gypses. La microfaune indique un âge Miocène inférieur.

Le Miocène marin : C'est une série marno-gréseuse bleue qui s'altère en jaune (Miocène moyen). Au-dessus, on trouve des marnes bleues à cristaux de gypse fer de lance. Cet ensemble est recouvert au nord du plateau par une série de sénérites liée au volcanisme régional. Ailleurs, il est surmonté par un banc de gypse qui constitue une limite approximative avec le pliocène.

2. Le Pliocène

Le Pliocène Marin : Il est caractérisé par les étages suivants :

Le Plaisancien : Ce sont des marnes bleues à petits filons de gypses saccharoïdes passant progressivement vers le haut à des marnes sableuses et sables argileux.

L'Astien : C'est une série de couleur jaune foncé formée par des grès à ciment calcaire. L'épaisseur maximale est de 100 m. L'extension de ces grès sous le quaternaire est mal connue.

Le Pliocène continental : Il affleure dans la partie Nord-Est de la carte. Le comblement régulier du bassin a conduit à une phase continentale à sédimentation marneuse terminée par des niveaux détritiques de grès blanchâtres.

3. Le Quaternaire : Ce sont les formations qui constituent la nappe aquifère du plateau de Mostaganem et qui sont représentées par des terrains plus ou moins perméables.

Le calabrien : Il débute dans la région de Mostaganem par un niveau de micro poudingue formé par des galets de grès à ciment calcaire et se poursuit par des grès jaunâtres grossiers et vacuolaires passant à des lumachelles. Le reste du quaternaire est continental. Il est constitué de grès dunaires jaunâtres à stratification entrecroisées et de limons sableux résultant de la désagrégation des formations du calabrien. Ces séries de recouvrement sont localement masquées par une croute grésocalcaire blanchâtre.

1.5.4.2 La Vallée du Chélif

La vallée du Chélif fait partie de la plaine du Chélif qui forme dans sa partie orientale une étroite bande d'une dizaine de km de largeur que draine le Chélif à partir de la wilaya de Chleff. Jusqu'à son confluent avec l'oued Mina. Toute cette plaine est drainée par le Chélif et ses affluents. Il semble que durant certains épisodes du comblement récent, les plaines du bas-Chélif étaient un vaste marécage où se sont déposées des argiles fines. Près de la mare du Chélif, les grès micacés qui surmontent les poudingues de base, renferment une belle faune de mollusques. On remarque aussi à la base de cet ensemble un niveau d'argiles rouge brique

de 1 à 2 m d'épaisseur, renfermant quelques fragments anguleux de schistes crétacés. Les formations conglomératiques les plus grossières ne se développent qu'au-dessus. Les éléments détritiques deviennent de moins en moins grossiers en montant dans la série ; les niveaux se développent progressivement.

1.5.4.3 La Plaine de Bordjias

La plaine fait partie de la Mactaâ qui est situé à l'Est d'Oran. C'est une plaine alluviale, entourée de tous les côtés par des collines et des montagnes sauf au Nord où elle est séparée de la mer par un cordon de dunes de 20 à 30 m de hauteur. La zone favorise des dépôts marins de type lagunaire à cause de l'absence de barrière topographique. La zone est caractérisée par des cônes de déjection actuels des oueds d'apports alluvionnaires et des colluvions vers l'aval.

Des bas-fonds sans végétation indiquent la présence de sels solubles accumulés en grande partie à la suite du lessivage des formations périphériques. Des dépôts salins sont causés par l'intensité de l'évaporation. Des bas-fonds à encroûtement calcaire sont provoqués par les variations de niveau de la nappe chargée en carbonate ; parfois l'encroûtement y est gypseux si la nappe est sulfatée. Des bas-fonds peu salés marécageux constituent la plaine sbarra (Mactaâ). C'est une zone alluviale due à l'érosion hydrique éolienne.

Au Nord les produits à remaniement éoliens recouvrent le sol qui est peu profond constitué par des bas-fonds à encroûtement, au sud et au Sud-Ouest existent de véritables bas-fonds formés d'alluvions salées de oued Mekhouf marqués actuellement par une végétation halophyte. C'est une zone inondée pendant la période des hautes eaux avec dominance d'argile, au Nord-Ouest les marais haciane, zone salée presque plate peuplée de végétaux halophytes, avec une texture argileuse au Nord-Est et sabloargileuse au Nord-Ouest, avec des dépôts éoliens de sable en surface (source agro-pédologique de bordjias).

1.5.4.4 Les monts du Dahra

Les monts de Dahra constituent une partie de la chaîne tellienne au Nord de l'Algérie. Cette région marquée est profondément par les mouvements orogéniques de l'ère tertiaire qui se rattachent au système alpin. Des dépôts se sont accumulés dans ces grands ensembles structuraux. Les déformations importantes dont résulte le relief tourmenté des monts du Dahra se sont produites au contact des plaques africaines et ibériques. Leur histoire se poursuit encore sous forme de séismes qui affectent la vallée de Chéelif, profonde dépression les limitant au Sud.

Stratigraphie : Dans la partie occidentale du Dahra, les experts de BNEDER ont observé des niveaux de sérénités blanches, riches en cristaux de quartz, donnant par décomposition une bentonite plus ou moins blanche. Ils ont dressé dans la région de Ain Zeft, une quinzaine de coupes nous citerons ci-après :

- ❖ A la base, une brèche aux brèches aux blocs anguleux pouvant atteindre 1 m³, devant moins grossière vers le haut (épaisseur : 10 à 15 m),
- ❖ Argiles rouges et blanches (épaisseur : 2 m),

- ❖ Grés et conglomérats, rouges à la base, et renfermant à la partie supérieure de nombreux fossiles marins,
- ❖ Marnes bleues légèrement sableuses,
- ❖ Marnes bariolées avec prédominance d'éléments rouges (d'épaisseur : 10m) recouvertes de grés de base du Miocène supérieur.

Dans la vallée d'oued Roumane par exemple, on observe des formations continentales rouges, renfermant localement des lentilles blanches de bentonite. Cette série est recouverte par des calcaires gréseux et des marnes bleues tout à fait semblables à celle de la bordure sud du massif. Les piedmonts du Dahra sont constitués d'un ensemble recouvert d'un manteau gréso-sableux d'épaisseur variable. Ce manteau gréseux provient de la désagrégation des grés Pliocène (Calabrien et Astien).

1.5.4.5 Le cordon littoral

Il est constitué de Grés calcaire du quaternaire (Calabrien) qui cède la place à proximité de la mer à des marnes bleues du tertiaire (Pliocène). C'est une bande de 10 km de largeur. Elle a été déterminée par le retrait de la mer Pliocène. L'actuel relief ne s'est déterminé qu'une fois que les déformations tectoniques estompées vers la fin du tertiaire se sont achevées. La côte est relevée, bordée par une flexure qui détermine des érosions, elle est parsemée de dunes maritimes.

1.5.5 Analyse géomorphologique

Une analyse géomorphologique est nécessaire dans le cas de notre région d'étude, car elle permet de porter une appréciation, aussi fiable que possible, de la portée des phénomènes liés à l'érosion et à la sensibilité des sols. Elle détermine aussi la morphodynamique des sols. Ainsi six unités morphologiques ont été définies (BNEDER, 1996) comme suit :

Cordon littoral : U1 ; Monts de Dahra : U2 ; Vallée du Chélif :U3 ; Plateau de Mostaganem : U4 ; Collines Sub-littorales : U5 et plaines des Borjias : U6.

1.5.5.1. Les unités morphologiques

a) Le cordon littoral : il est représenté par une frange de falaise présentant de fortes pentes de l'ordre de 25% et repose sur un substrat où prédominent des formations tendres.

b) les monts du Dahra : C'est un ensemble de collines présentant une topographie largement accidentée, disséquée par un réseau hydrographique mal hiérarchisé. Les versants présentent des pentes fortes allant de 12 à 25%. Le substrat renferme une lithologie où prédominent les formations dures avec alternance de roches moyennement dures à tendres.

c) La vallée du Chélif : Très encaissée par rapport au relief avoisinant, la vallée du Chélif se caractérise par : Un tracé sinueux, une géologie renfermant un substrat à formation marneuse et argileuse peu résistante et profondément altérable. Une dynamique agressive des processus d'érosion dont essentiellement des sapements de berges très important, entraînant parfois des glissements de terrain et des ravinements intenses.

d) Le plateau de Mostaganem : C'est une unité morphologique relativement plate, reposant sur un substrat à formations tendres avec alternances de formations dures à moyennement

dures. La dynamique hydrique est relativement absente, mise à part l'érosion éolienne, où le vent est le principal agent, il érode par déflation et corrosion, mais aussi il accumule, d'où on remarque que les sables tapissent presque la totalité de la surface du plateau de Mostaganem.

e) Les collines sublittorales : Elles se situent au sud Est du plateau de Mostaganem, présentant un relief moins important que celui des Monts de Dahra. Elles renferment une lithologie où prédominent des formations avec alternances de roches tendres. Le réseau hydrographique est beaucoup moins dense que celui des monts de Dahra.

f) La plaine des Bordjias : Elle présente une surface largement étendue, occupe la partie sud-ouest de la région d'étude. Elle présente une topographie assez plane, très peu ondulée, reposant sur un substrat à prédominance de formations tendres.

1.5.5.2 Typologie de l'érosion :

L'érosion du sol et la dégradation relative des ressources en terre dans les zones semi-arides sont des phénomènes spatio-temporels fortement significatifs qui peuvent se produire dans beaucoup de pays (Bénina, 2010 ; Garouani, A. et al., 2003; Sadiki, A., 2004 ; Boukheir R. et al., 2001; Fistikoglu et Harmancioglu, 2002 ; Demirci, Karaburun, 2011). Ce phénomène généralement liés aux pratiques agricoles dans les régions semi-arides, diminue la fertilité du sol et provoque une série de problèmes néfastes sur l'impact de l'environnement et cause une véritable menace pour la production agricole et une dégradation de la qualité de l'eau. Les recherches entreprises dans ce domaine illustrent que les dégradations spécifiques, des bassins versants magrébins, varient de 1000 à 5000 t/km²/an (Heush et al., 1971 ; Walling, 1984). Les quantités de sédiments transportés en suspension et susceptibles de se déposer dans le littoral méditerranéen des côtes algériennes sont estimées à 47 106 t/an (Probst, 1992). Une véritable politique devra être mise en œuvre pour protéger l'environnement et les terres pour le développement durable de l'agriculture, l'érosion du sol doit être fortement connue car elle constitue un sérieux risque, notamment dans les régions où le relief est très accidenté (Achite, M. et al., 2005) . Dans beaucoup de régions de notre zone d'étude, l'érosion du sol associée à sa dégradation ont fait de vastes secteurs économiquement improductifs. Souvent, une évaluation quantitative est nécessaire pour mettre en évidence l'importance de l'érosion du sol permettant le recours à des stratégies d'aménagement ; à titre illustratif la figure I.21 donne un aperçu du relief de la région d'étude. Cependant, la complexité des variables rend l'évaluation ou la prévision précise de l'érosion difficile. Les derniers avènements dans la technologie de l'information spatiale ont augmenté les méthodes existantes et ont fourni des techniques performantes d'analyse et de gestion des ressources terrestres. Le modèle digital d'altitude (DEM) avec les images satellites et l'emploi de l'outil SIG peuvent être utilisés pour permettre l'évaluation rapide aussi bien que détaillée des risques d'érosion de (Kouli et al., 2009 ; Fistikoglu, O.).

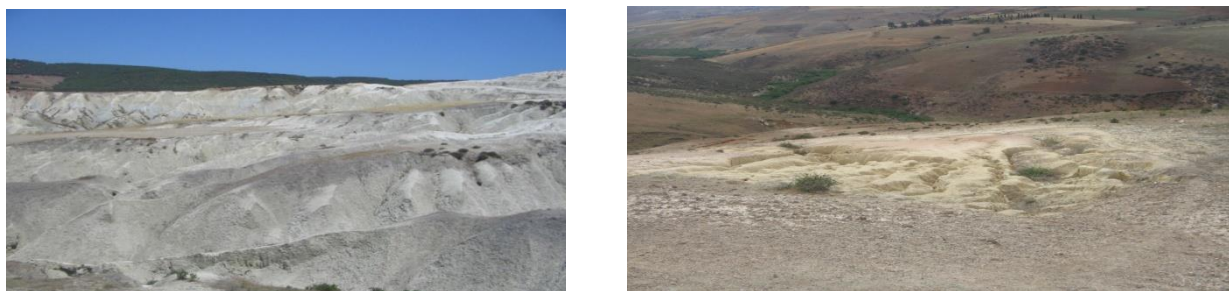


Figure I.21: photos montrant le relief érodé dans la région d'étude

L'information spatiale et quantitative de l'érosion à l'échelle d'un bassin versant ou d'une région contribue de manière significative à la planification pour la conservation du sol et le contrôle d'érosion. Les résultats de l'estimation de la perte de sol dans notre région d'étude ont été effectués sur une base d'expériences dans plusieurs régions, et notamment méditerranéennes, employant différentes techniques de prévisions (Garouani et al. 2008 ;Ozcan Ugur A., et al., 2007 ; Gitas Ioannis Z., et al., 2009). Cependant, des stratégies de gestion d'érosion du sol dans notre zone d'étude est contrainte par la pénurie de telles données, parce que les mesures réelles de la perte de sol des champs de culture et des régions montagneuses sont rares dans le pays. La zone choisie pour la présente étude est propice pour l'implantation d'équipements hydrauliques pour l'accumulation de quantité d'eaux de ruissellement destinées à l'irrigation. L'étude préalable de la carte de sensibilité à l'érosion avant la réalisation de ces ouvrages hydrauliques onéreux revêt d'une grande importance dans l'objectif d'éviter leurs envasements durant les premières années d'exploitation. Néanmoins, la majeure partie de la zone d'étude présente un faible couvert végétal et les parcelles agricoles sont surexploitées par le système de culture traditionnelle et le surpâturage. Par conséquent, la présente étude a pour objectif de présenter une carte de vulnérabilité à l'érosion et pour évaluer le taux annuel d'érosion du sol par l'utilisation des techniques de RUSLE et de SIG peuvent être utilisées pour prioriser les meilleurs sites d'implantations d'ouvrage hydrauliques cités précédemment.

La région d'étude est marquée par la manifestation de différents types de processus érosifs qui agissent individuellement ou ensemble, donnant lieu à une topographie très tourmentée et désordonnée, essentiellement les Monts de Dahra, la vallée de Chélif et les collines sublittorales. Parmi les différents types de processus érosifs citons le ruissellement sous ces deux formes :

a) Le ruissellement diffus :

Il se manifeste sur le terrain par le décapage entraînant les particules fines du sol. Ce phénomène d'érosion est répandu essentiellement sur les versants où les pentes sont relativement importantes, les Monts du Dahra et les collines sublittorales sont un exemple illustrant ce type de ruissellement, telles que : Djebel Chott, Djebel Toumen, Djebel Dar Chouachi, Djebel Meni, Djebel Kharouba, Djebel Mekhalia et aussi au Nord de oued Razzal.

b) La Solifluxion :

Ce type d'érosion affecte le manteau superficiel du colluvion donnant au relief une topographie bosselée. Il naît de la saturation hydrique des horizons superficiels entraînant un fluage plus ou moins plastique que le tapis végétal peine à enrayer. Cette forme d'érosion est présente dans l'ensemble des Monts du Dahra ; Dans la partie Est du Dahra, à l'ouest du Djebel Meni, à l'est de oued Razzal et au sud de oued Yachir. Dans la partie Nord-Est de Dahra, on les retrouve dans la région de Tazgait, au Nord du Djebel Thablid, à l'ouest d'Oued Cherfa et au Nord-Est de Oued Yachir. Ce phénomène érosif est aussi présent sur les versants des collines sublittorales au sud-Est de Djebel Kharouba.

c) Le ravinement :

Sous toutes ses formes, le ravinement n'épargne aucun élément du relief.

- **Le ravinement simple :**

C'est des petites incisions de taille généralement inférieure à 1 mètre, ce ravinement est présent dans le cordon littoral, le plateau de Mostaganem, la plaine des Bordjias et surtout sur les versants des Monts de Dahra et des collines sublittorales.

- **Le ravinement intense :**

Son incision est beaucoup plus importante que celle de ravinement simple, elle dépasse les cinq mètres de profondeur. Cette forme d'érosion affecte la totalité des Monts du Dahra (de l'Est à l'Ouest), les collines sublittorales dans (la région de Souaflia et au Sud-Est de Djebel Zaimia), une partie de cordon littoral (au Nord de Mostaganem) au niveau de Hachem Fouaga jusqu'au Cap Ivi et la vallées du Chélif sur les versants entre Ain Boudinar et Ain tedeles et sur les versants des deux rives gauches et droites de oued Chélif, bien qu'il soit rare, le ravinement intense existe dans une partie de la plaine de Bordjia au sud-Est de Djebel Brah.

- **Le ravinement généralisé « Bad-lands »**

C'est le résultat des ravinements intenses, arrivés aux stades extrêmes, donnant lieu à des formes de bad-lands qui affectent généralement les zones à pentes assez importantes sur une roche altérable (roche moyennement dure) et très souvent ces ravinements généralisés sont combinés avec les mouvements de masses. Cette forme d'érosion existe dans la zone, dans des régions bien précises dans les monts du Dahra, sur les versants Ouest de Oued Kramis, au sud de Djebel Bouzica, au Nor-Ouest de Djebel Touerés et au Nord de Oued Chélif, dans la vallée du Chélif, sur le versant Nord de Oued Khaine.

- **L'érosion combinée**

C'est l'association de deux ou plusieurs types d'érosion. Elle représente l'association du ravinement et de la solifluxion dans l'extrémité Est des Monts de Dahra, sur le versant Ouest de Oued el Hammam, comme elle représente l'association du décapage et du ravinement dans la vallée du Chélif.

- **L'érosion fluviale**

Elle concerne essentiellement les bordures des oueds soumis aux sapements de berges, présentant des risques d'inondation de la basse terrasse souvent cultivée. A l'instar de toute la région d'étude, les monts de Dahra, la vallée du Chélif et les collines sublittorales, sont marquées par la manifestation d'importants processus érosifs donnant au relief une topographie très tourmentée et profondément fragilisée ; ceci est dû essentiellement au système de pente qui dépasse les 12%, à la variété du faciès lithologique, au climat à saisons contrastées, à la dégradation du couvert végétal et à l'absence de techniques culturales antiérosives.

Ayant une topographie plane, la plaine des Bordjias et le plateau de Mostaganem sont épargnés du risque causé par l'érosion hydrique, mis à part les quelques petits ravins et ravines qui sont accentués par le travail culturel fort généralement dans le sens contraire de la pente. Cependant, l'érosion éolienne prend place dans ces deux unités morphologiques.

I.6 ETUDE DES SOLS

Selon (**BNEDER, 1996**), L'analyse du sol a nécessité l'utilisation et le suivi d'une approche peu générale, laquelle a été vérifiée par rapport aux études antécédentes (**ANRH,**). La base de données utilisée dans le cadre de cette approche comprend, les cartes topographiques aux 1/50000, les photographies aériennes, la carte des pentes, la carte d'occupation du sol, la carte géomorphologique et les données d'analyses physico-chimiques des sols. En définitive la méthodologie suivie par le (**BNEDER, 1996**), a suivi les étapes suivantes : travaux préliminaires de bureau qui consistent à rassembler et à exploiter la documentation existante, travaux de terrain (prospection pédologique, implantation des profils), analyse des échantillons au laboratoire et interprétation sommaire des résultats.

Sur la base des études antécédentes (**BNEDER, 1996**), a suivi la même structure de classification des sols qui est celle de la classification française adoptée par la (**D.E.M.R.H, 1970**), cette structure détermine les classes et les sous classes qui sont subdivisées en groupes de sols et sous-groupes. Les groupes de sols sont définis par les caractères morphologiques du profil, par contre les sous-groupes sont déterminés sur la base des processus secondaires, indiqué par certains éléments nouveaux du profil (tâches d'hydromorphie, halomorphie, élargissement de la structure...). En définitive, les différents types de sols inventoriés dans la zone d'étude comprennent :

- Classes de sols peu évolués,
- Classe des sols calcimagnésiques,
- Classe des sols isohurmiques,
- Classe des sols sesquioxides de fer,
- Classe des sols hydromorphes,
- Classe de sols halomorphes.

Selon (**BNEDER, 1996**), les études des terrains de la zone d'étude, ont permis de mettre en évidence sept grands types de sol.

I.6.1 Les sols peu évolués :

Il s'agit de sols jeunes, à profil AC, caractérisés essentiellement par une faible altération du milieu minéral. Dans la zone d'étude, la classe des sols peu évolués est la plus présente :

- **Les sols peu évolués d'érosion** : Un seul type ou sous-groupe a été déterminé celui des sols régosoliques (symbole cartographique U1). Ce type de sol évolue sur des roches mères friables, pénétrables par les racines, il s'agit de sols qui caractérisent les pentes où il a été constaté un rajeunissement par érosion. Les sols peu évolués « régosoliques » sont épais et présentent un seul horizon faiblement différencié du matériau sous-jacent. Le substratum est constitué de marne, et parfois de grès friable calcaire. Il convient de les protéger surtout contre l'action de l'érosion qui fixe et favorise la régénération du sol.

- **Les sols peu évolués d'apport alluvial** : Il s'agit de sols profonds, dont l'humification est généralement activée par les conditions favorables de l'humidité du sol. Sur le plan de leur texture, les sols alluviaux ont essentiellement la composition et les propriétés des matériaux transportés. Ils se développent le plus souvent sur les alluvions récentes. Les sols alluviaux de la zone d'étude se localisent surtout sur le plateau de Mostaganem, la vallée de l'oued Chélif et oued Kramis, les unités suivantes ont été distinguées :

U2 : Sols évolués d'apport alluvial modaux,

U3 : Sols évolués d'apport alluvial hydromorphe,

U4 : Sols évolués d'apport alluvial à caractère vertique.

U2 : Sols évolués d'apport alluvial modaux : Ce sont des sols profonds, moyennement calcaires de texture le plus souvent moyenne surtout en profondeur. Ils se reposent sur des dépôts récents (alluvions) parfois sur des sols rouges d'où il a été très difficile parfois de les cartographier surtout lorsque la superficie est inférieure à 10 hectares. La structure est polyédrique moyenne, parfois particulière par manque de colloïde. Les sols peu évolués d'apport alluvial modaux dans l'ensemble présentent des qualités agronomiques satisfaisantes (perméabilité, texture), ils sont aptes à l'irrigation et à la diversification des cultures.

U3 : Sols évolués d'apport alluvial hydromorphe : Ce sont des sols profonds d'origine alluviale, de couleur peu claire (brun-noir) situés sur des zones qui se présentent sous forme de légère dépression affectée par l'hydromorphie. Ils se rencontrent surtout du côté du sud-ouest de la commune de Bouguirat, précisément dans les stations où les conditions topographiques et de matériau ralentissent l'infiltration des eaux. Ils se distinguent de l'unité précédente (U2) par :

- L'apparition d'une couche argileuse compacte de couleur noire en profondeur,
- L'apparition de taches d'oxydoréduction,
- Une faible perméabilité en profondeur.

U4 : Sols évolués d'apport alluvial à caractère vertique : Ces sols ne sont pas assez étendus dans la zone d'étude, on ne les localise que dans la vallée du Chélif et oued Kramis. Leur évolution est activée par des apports, les matières organiques sont incorporées profondément dans les profils caractéristiques par l'effet mécanique et non par l'effet biologique, parfois le

caractère vertique est peu accentué. Ils se différencient des unités précédentes, surtout l'unité U2 par la fraction argileuse qui reste élevée surtout en profondeur. D'une manière générale, les profils de cette unité pédologique se caractérisent par :

- un horizon de profondeur plus argileux, compact de couleur noire,
- une structure le plus souvent prismatique et polyédrique grossière,
- les horizons de surface de texture limono-argileux, présentant des fentes de retrait peu développées,
- la profondeur dans tous les cas est toujours supérieure à 01 mètre.

1.6.2 Les sols peu évolués d'apport colluvial :

Les sols peu évolués d'apport colluvial sont localisés aux formations colluviales. Ce sont des sols d'apport en situation de piémont, à profil homogène et dépourvu d'horizons, constitués par un mélange de matériaux ou colluvions fines et grossières le plus souvent contenant du calcaire, d'où ils présentent des caractéristiques morphologiques similaires à celle des Rendzines. La texture des sols peu évolués d'apport colluvial est variable, de même pour la structure, pour les sols colluviaux de texture fine la structure est mal définie à tendance polyédrique, par contre pour les sols colluviaux de texture grossière, la structure se présente sous forme particulière. En outre, les sols peu évolués d'apport colluvial sont de faible porosité, mais ils sont bien assainis surtout en surface puisqu'ils se développent sur des formations de pentes moyennes.

1.6.3 Les sols peu évolués d'apport éolien :

Les sols peu évolués d'apport éoliens sont les formations pédologiques les plus représentées dans le plateau et les collines sublittorales de la zone d'étude. En effet, ils résultent de l'action éolienne qui se développe sur des formations de texture légère et de morphologie diverse : dunes de sables, voiles sableux, couvertures sableuses. D'où il a été parfois difficile de les distinguer vu leur étendue.

Les dunes se présentent le plus souvent sous forme de collines ou sous forme d'une « butte » constituée de dépôts sableux éoliens qui s'observent surtout dans la partie centrale et le Nord du plateau ainsi que sur les collines sublittorales de la zone d'étude. Par contre le voile sableux qui affecte presque tout le plateau est constitué d'un dépôt sableux d'une épaisseur de quelques centimètres qui repose soit sur une croûte ou un encroûtement calcaire, soit sur un sol rouge méditerranéen.

D'une manière générale, (BNEDER, 1996) évoque que les profils de cette unité portent les caractéristiques extérieures suivantes :

- La texture est le plus souvent sableuse en surface, rarement sablo-argileuse, parfois elle est fine en profondeur, c'est le cas des horizons qui ont été enrichis en éléments fins provenant d'horizons supérieurs remaniés et transportés,
- La structure est particulière ou défavorable dans tous les cas par faute de colloïdes humiques d'où les éléments sableux sont entassés sans aucune liaison,
- La couleur variable équivaut à des teintes allant du marron-rougeâtre ou rouge jaunâtre,

- La profondeur est aussi variable, parfois plus de 2 mètres, mais parfois moins et repose alors sur des substrats variés.

I.6.4 Les sols peu évolués d'apport mixtes :

Il s'agit des sols d'apport colluvial-éolien ou de sols qui évoluent sur des dépôts de colluvions de piémont qui reçoivent des apports sableux éoliens présentant morphologiquement surtout du côté de la route nationale N°11 reliant Mostaganem à Oran, des caractéristiques semblables aux sols peu évolués d'apport éolien. Les sols peu évolués d'apport mixte sont profonds et reposent sur des formations calcaires, soit sur une croûte soit sur un encroûtement calcaire. D'une manière générale, les profils de cette unité pédologique se caractérisent par :

- Une texture grossière en surface à moyenne en profondeur (limoneux équilibrée à limono-argileuse), le taux d'argile le plus souvent est inférieur à 10%,
- Une structure particulaire en surface à légèrement polyédrique en profondeur,
- Une matière organique très faible même dans la partie superficielle,
- un taux de calcaire élevé en surface surtout en profondeur.

L'utilisation agricole des sols peu évolués d'apport mixte dépend étroitement de la texture et de la profondeur sur des pentes faibles, ils peuvent cependant être conduits en irrigué et conviennent le mieux aux cultures maraîchères adaptées aux textures grossières. Par contre pour la mise en valeur en culture sèche , c'est surtout les céréales et les arbres fruitiers rustiques, ainsi que la vigne sous réserve de vérifier le taux du calcaire actif qui sert pour le choix du porte greffe.

I.6.5 Les sols calcimagnésiques :

Ce sont des sols qui évoluent sur du matériau calcaire. La nature et la composition du matériau calcaire lié à la topographie constituent évidemment le facteur écologique fondamental qui conditionne la formation et l'évolution des sols calcimagnésiques.

Du point de vu pédologique, les sols calcimagnésiques de la zone d'étude sont subdivisés en deux sous classes :

- Sous classe des sols carbonatés avec deux sous-groupes, celui des Rendzines modales et les bruns calcaires,
- Sous classe des sols saturés avec un seul sous-groupe, celui des bruns calciques.

I.6.6 Les Rendzines :

On distingue essentiellement les Rendzines de type modal à profil AC, localisés aux glacis encroûtés de piémont. Ces sols sont peu épais (jusqu'à 50 cm) possèdent souvent une seule pente supérieure à 3% et comportent des matériaux grossiers surtout des débris de croute calcaire, ils sont parfois érodés avec des signes de décapages ;

D'une manière générale les Rendzines de la zone d'étude se caractérisent par :

- Une texture le plus souvent équilibrée parfois argilo sableuse ou sablo-argileuse,

- Une texture granulée très stable et aérée,
- L'horizon de profondeur contient des cailloux calcaires, il est riche en calcaire,
- La couleur est brune à brun sombre.

I.6.7 Les sols bruns calcaire :

Il s'agit de sols qui se développent sur des alluvions et colluvions présentant dans l'ensemble des caractéristiques agronomiques très intéressantes par rapport aux Rendzines, ils sont bien structurés et bien drainés. Les profils de cette unité pédologique selon (BNEDER, 1996) se caractérise par :

- Les caractéristiques analytiques, donnent un taux de calcaire faible en surface le complexe absorbant est caractérisé par la dominance des cations Ca^{++} et Mg^{++} . La salinité est très faible et le PH est nul. La composition granulométrique est limono-sableuse surtout au niveau de la couche 0-55cm. Quant aux caractéristiques biologiques, le taux de matière organique est moyen avec C/N inférieur à 11 traduisant de bonnes propriétés physiques biologiques.

I.6.8 Les sols bruns calciques :

Il s'agit essentiellement de sols possédant les mêmes caractéristiques que les sols de la sous classe des carbonatés (Rendzines et bruns calcaires), sauf qu'ils sont dépourvus de calcaire. Ce sont des sols minoritaires et n'ont pas la possibilité de former des complexes humo-calcaire. D'après (DUCHAUFOR, 1965), ces sols peuvent avoir deux origines différentes selon qu'ils proviennent de la décarbonation du calcaire (sol brun calcique monocyclique) ou au contraire d'une décarbonation secondaire.

Les sols brun calciques de la zone d'étude sont épais et sont localisés surtout dans la partie centrale du plateau, de même il convient de noter qu'ils conviennent à toutes les cultures

I.6.9 les sols isohumiques :

Ces sols présentent une seule sous classe, celle des sols à pédo-climat frais pendant les saisons pluvieuses avec un seul groupe celui des sols marron. Dans la zone d'étude, il est distingué deux sous-groupes :

- U11 : Sols marron modaux,
- U12 : Sols marron modaux à caractères hydromorphes.
- **Les sols marron modaux** : Il s'agit de sols évolués, leur formation est marquée par une décarbonation poussée du profil avec une accumulation du calcaire surtout en profondeur sous forme de nodules. De même, les sols marron modaux de la zone se caractérisent par une teneur en matière organique régulièrement décroissante dans le profil.

I.6.10 les sols marron hydromorphes :

Dans l'ensemble, ces sols possèdent les mêmes caractéristiques que les sols marrons modaux, ils se distinguent par l'apparition de traces d'hydromorphie dans les horizons profonds sous forme de taches rouillées de pseudo-gley due probablement à un assainissement de surface. Ils se localisent au niveau du plateau de Mostaganem, peu étendus,

leur assainissement de surface est recommandé. Ils conviennent surtout aux cultures céréalières, fourragères et maraichères.

I.6.11 les sols à sesquioxyde de fer :

Ces sols sont aussi appelés « sols fersiallitiques », ils se caractérisent par des profils de type ABC ou A(B)C, l'individualisation des sesquioxydes de fer lui confère une couleur rouge à rouge-brun, cette coloration concerne particulièrement les horizons A et B.

En plus, ils constituent une classe très répandue dans le plateau et les collines sublittorales, ils sont anciens en majorité décarbonatée fortement rubéfiée. Du point de vue pédologique, ce sont des sols dans la zone d'étude possèdent une seule sous classe qui est celle des sols rouges et bruns formés sous climat méditerranéen avec des sous-groupes suivants :

- U12 : Sols rouge non lessivés modaux,
- U14 : Sols rouges lessivés modaux.
- U15 : Sols rouges et bruns calcimorphes.

Sols rouge non lessivés modaux : Les sols méditerranéens non lessivés sont le plus souvent situés sur des glacis encroutés (cas du plateau), ils se développent sur des matériaux sableux éoliens presque constamment recouvert d'un voile sableux. Les profils des sols rouges lessivés modaux portent dans l'ensemble des caractéristiques extérieures suivantes :

- La profondeur est variable et oscille entre 30 et 120 cm,
- La couleur est rouge, rouge brique à rouge jaunâtre,
- La texture est le plus souvent grossière, sableuse à sablo-argileuse,
- La structure est particulière dans les horizons sableux, polyédrique fine dans les horizons sablo-argileux,
- Le taux de la matière organique est faible dans tous les horizons.

Sols rouges lessivés modaux : Ils présentent une accumulation en éléments fins en profondeur, la présence de revêtement argileux sous de cutanés dans l'horizon B est la preuve d'un enrichissement en argile dans cet horizon. Ils se distinguent de l'unité pédologique précédente par :

- Une texture particulière en surface qui devient prismatique moyenne en profondeur,
- Des horizons superficiels perméables,
- Une texture argileuse à très argileuse en profondeur.

Sols rouges et bruns calcimorphes : Pas assez étendus dans la wilaya, ils se différencient des unités pédologiques précédentes (U13 et U14), par la fraction élevée du calcaire. De même, la rubéfaction pour ces sols est parfois incomplète et peu accentuée, ils sont perméables et très riche en azote et en matière organique.

I.6.12 les sols hydromorphes :

Les sols hydromorphes de la wilaya sont très réduits par rapport aux autres unités pédologiques décrites précédemment. Ils portent des caractères dus essentiellement à une évolution pédologique dominée par l'effet d'un excès d'eau suite à un engorgement temporaire de surface ou de profondeur à cause de la remontée de la nappe phréatique ou du manque d'infiltration des eaux pluviales. L'hydromorphie, qui est la principale contrainte de

ces sols, se traduit par la présence de Gley ou de pseudo Gley qui déterminent la distinction de deux catégories.

Par ailleurs, il convient de noter que seule la sous classe des sols hydromorphes minéraux ou peu humiphères est représentée dans la zone d'étude avec l'apparition de deux unités ou sous-groupe :

- U16 : Sols hydromorphes à gley profonds,
- U17 : Sols hydromorphes à pseudo-gley de surface.

Sols hydromorphes à gley profonds : L'hydromorphie de ces sols est due essentiellement à la présence d'une nappe phréatique dont l'horizon de gley apparaît à 1 mètre environ de couleur bleuâtre verdâtre. Les sols hydromorphes à gley profonds de la Wilaya sont très réduits, ils se développent le plus souvent sur un matériau sableux à sableux argileux et sont très calcaires en profondeur. Ce sont des sols possédant des aptitudes moyennes pour les cultures à enracinement peu profond, les travaux de drainage sont recommandés pour maintenir la nappe à un niveau favorable pour les cultures mises en place.

Sols hydromorphes à pseudo-gley de surface : Ce sont des sols à nappe perchée d'origine pluviale, l'hydromorphie est temporaire due au manque d'infiltration des eaux de pluies. L'hydromorphie se manifeste par la présence d'horizons portant des taches rouillées. Les horizons minéraux superficiels prennent un aspect tacheté. Ces sols ne sont pas très présents dans la wilaya, ils correspondent à des zones où la topographie présente un blocage pour les écoulements de surface d'où la nécessité d'un assainissement de surface ou de drainage de la nappe perchée. Du reste les sols hydromorphes à pseudo-gley de surface possèdent de mauvaises propriétés physiques ; massivité de la structure et compacité de l'horizon hydromorphe, ce qui donne réduit l'aptitude de ces sols à quelques cultures à enracinement superficiel particulièrement les cultures céréalières et fourragères.

I.6.13 Les sols halomorphes :

Ces sols sont formés dans les zones basses de la plaine des Bordjias et dans des endroits mal drainés du plateau de Mostaganem. L'évolution des sols halomorphes de la zone est dominée :

- Soit par la présence de sels solubles qui apparaissent sur le terrain sous forme de tâches blanchâtres en provoquant une modification importante de la végétation,
- Soit par la présence et l'apparition d'une structure dégradée due souvent à la présence du sodium.

Du point de vue pédologique, les sols halomorphes de la zone se subdivisent en deux sous classes :

- Sous classe des sols à structure non dégradée avec un groupe celui des salins (Solontckak) composé du sous-groupe des hydromorphes (U18 : sols salins à caractère hydromorphes).
- Sous classe des sols à structure dégradée avec un seul groupe, celui des sols à alcalis composés du sous-groupe des hydromorphes (U19 : sols salins à alcalis hydromorphes)

- **Les sols salins hydromorphes** : Sols peu profonds qui se distinguent des sols salins à alcalis par leur structure en plus de l'apparition de taches blanchâtres des sels auxquels s'ajoutent les problèmes d'hydromorphie. La texture est diversifiée, moyenne en surface à argileuse en profondeur.
- **Les sols salins à alcalis hydromorphes** : Sols profonds se développant sur des alluvions le plus souvent récents, ils caractérisent surtout la plaine des Bordjias et localement le plateau de Mostaganem. Ils se distinguent des sols salins hydromorphes par une structure dégradée sous l'influence des ions sodium auquel s'ajoutent une salure élevée et une hydromorphie bien visibles au niveau de la plaine des Bordjias. Dans ces conditions seules les végétaux halophiles (plantes salsolacées ; ex : Salicorne) peuvent résister.

On les rencontre sur des terrains enclavés sur lesquels les eaux pluviales stagnent. Des études pédologiques réalisées sur la plaine des Bordjias déterminent l'origine de la salinité à la sédimentation complexe, due à la présence de plusieurs sels minéraux toxiques. Cette hétérogénéité rend extrêmement difficile l'appréciation de la toxicité des sols. Toutefois les éléments toxiques décelés dans les sols de la plaine des Bordjias sont essentiellement le NaCl et le MgCl₂ ou leur association.

En général, la constitution granulaire des sols salés de la plaine des Bordjias est composée d'éléments très fins, pauvres en sables grossiers et fins, très plastiques et difficiles à travailler en raison de la teneur élevée en argile et en limon. La teneur en calcaire est satisfaisante, et atteint son maximum dans les terres les plus riches en limon et argile. La réaction du sol est toujours alcaline, les sols sont bien pourvus d'éléments de fertilité. Malheureusement, la présence d'un taux élevé de chlorure les rend impropres aux cultures.

D'une manière générale, les profils de cette unité pédologique se caractérisent par :

- Une profondeur qui dépasse 1 mètre,
- Une texture argileuse qui provoque des problèmes d'hydromorphie cas de la plaine des Bordjias, elle est moyenne à grossière en surface pour le cas des sols du plateau de Mostaganem
- Un taux calcaire élevé avec un calcaire actif qui atteint 13% dans la couche superficielle.

I.6.14 Les unités cartographiques complexes :

- **La succession des sols** : Ces sols sont cartographiés sous le symbole U_α (voir carte des sols). Ce sont des successions de sols qui englobent d'une manière générale les Rendzines brunifiées sur matériau calcaire, les sols rouges et Isothermiques sur matériau calcaire ainsi que des formations à base de grés d'où il a été difficile de les cartographier séparément.

Ces sols comprennent parfois des formations de dunes sur les sommets, caractérisant les reliefs et les zones ondulées et les versants de Djebel Milar et Djebel Mouzaia. C'est surtout la pente et les formations superficielles qui déterminent leur mise en valeur, la protection contre le phénomène d'érosion s'avère nécessaire.

- **Les sols à unités complexes** : Cartographiés sous le signe U_β, l'Unité comprend essentiellement les sols minéraux bruts d'érosion, les sols calcimagnésiques avec ou sans

croûte et encroûtement calcaire. Ce sont des sols qui se localisent au niveau des monts du Dahra qui surplombent la vallée d'oued Chélif d'où il a été observé l'influence négative du relief qui confère à ces sols des profondeurs le plus souvent faibles à moyenne ; on note dans certaines endroits des affleurement de roches calcaires et de roches tendres.

Généralement ces sols sont à possibilités très limités, leur situation les expose aux problèmes d'érosion par un décapage des horizons de surface. Leur teneur en matière organique est faible qui leur donne certaines possibilités de mise en valeur pour les cultures céréalières avec des rendements moyens. Le tableau I.25 suivant illustre toutes les classes de sols suscitées.

Tableau I.25: Typologie des sols

Taxon	Définition		
U1	Sols peu évolués Non Climatiques		D'érosion régosoliques
U2			D'apport alluvial modal
U3			D'apport alluvial, hydromorphe
U4			D'apport alluvial, à caractère verticale
U5			D'apport colluvial, modal
U6			D'apport éolien, modal
U7			D'apport mixte, colluvial, éolien, modal
U8			Sols calcimagnésiques	Carbonatés	Rendzines, modaux
U9	Bruns, calcaires, modaux		
U10	Saturés	Brun calcique épais	
U11	Sols isohumiques à pédo-climat frais Pendant les saisons pluvieuses		Marron modaux
U12			Marrons à caractère hydromorphe
U13	Sols sesquioxyde de Fer	Rouges et bruns sous climat méditerranéen	Rouges non lessivés modaux
U14			Rouges lessivés modaux
U15			Rouges et bruns calcimorphes
U16	Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères		A gley profonds
U17			A pseudo-gley de surface
U18	Sols Halomorphes	A structure non dégradée	Sols salins à caractères hydromorphe
U19		A structure dégradée	Sols salins à caractère hydromorphe
U α	Succession de sols (Rendzines brunifiés, Isohumiques et rouges sur matériaux calcaire)		
U β	Sols à unités complexes		

I.7 HYDROGEOLOGIE

I.7.1 Inventaire des ressources en eau :

Selon (BENEDER, 2007) L'inventaire détaillé de tous les points d'eau situés dans la wilaya s'avère difficile, il n'est cité que les puits importants destinés à l'alimentation en eau et quelques puits destinés à l'irrigation, les forages en exploitation et les barrages.

a) les puits :

Les puits sont destinés soit à l'alimentation en eau potable des populations ce sont des puits communaux qui bénéficient d'un abri et gardés, soit à l'irrigation et sont creusés généralement au milieu des périmètres agricoles, sans margelles et équipés de pompes le tableau I.27 illustre les puits recensés.

Les puits destinés à l'irrigation ont un diamètre variant entre 1,40 à 1,60 mètres. Ils sont creusés jusqu'à environ 20 mètres, le débit varie de 1/2 et 3 litres par secondes.

b) Les sources :

Les sources se trouvent en majorité dans la partie Nord Est de la Wilaya principalement dans les Monts du Dahra, les plus importantes sont captées et destinées à l'alimentation des populations avoisinantes.

c) Les forages : Les Forages sont localisés en majorité au niveau du plateau les débits varient de 2 à plus de 30 l/s, ce sont les principales sources d'alimentation en eau potable de la population de la Wilaya le tableau I.27 illustre les forages.

d) Les petits barrages : La Wilaya de Mostaganem dispose de deux petits barrages destinés à l'irrigation, ils ont une capacité totale de 528032 m³, présentés dans le tableau I.26.

Tableau I.26 : Liste des petits barrages dans la Wilaya

N°	Nom de l'ouvrage	Localisation		Capacité (m3)
		X	Y	
1	Sidi Moussa	290,43	318,21	325050
2	Seddaoua	299,75	319,98	203270

Source : Direction de l'Hydraulique de la wilaya de Mostaganem

Ces petits barrages vont servir à irriguer une superficie d'environ 112 ha, 31 ha pour le barrage Seddaoua et 81 ha pour Sidi moussa. Le tableau I.27 ci-après récapitule les principales sources de l'irrigation de la région d'étude.

Tableau I.27 : Liste des sources d'irrigation

Source d'irrigation	Nombre	Volume hm ³
barrage	02	1/218
Forage	7	0,6
Puits	8562	539,4
Sources	28	1.31

Source : Direction de l'Hydraulique de la wilaya de Mostaganem

I.7.2 La piézométrie :

Il n'existe qu'une seule carte piézométrique réalisée pour le plateau de Mostaganem Novembre 1997. Ce plateau constitue la principale source hydrique de la wilaya, et elle a permis de mettre en évidence plusieurs axes d'écoulement. Les lignes de partage des eaux nous ont permis d'individualiser les bassins hydrologiques du plateau, c'est-à-dire des drains. Les uns se dirigent du Nord vers le Sud, les autres de l'Est à l'ouest, les axes de drainage empruntent des directions différentes.

L'étude hydrogéologique menée par (BNEDER, 1996) a montré que dans son ensemble, la zone d'étude comporte un substratum marneux imperméable surmonté de grés à passées sableuses ou argileuses, qui contiennent l'aquifère principal. La puissance de la nappe diminue d'Est en Ouest, elle peut atteindre 100 à 200 mètres dans les dépressions topographiques et seulement 20 à 30 m sur les bombements du socle.

La nappe de l'aquifère principale est située essentiellement dans les grés du calabrien et les sables qui constituent le principal réservoir. Au Nord le système est limité par l'affleurement des marnes bleues du Miocène supérieur dont la présence entraîne l'existence d'une ligne de sources au contact des sables du plateau. Au Sud, ces mêmes marnes du Plaisancien et du Miocène supérieur qui définissent les limites de l'aquifère.

I.7.3 Estimation des besoins en eau pour l'irrigation

Nous nous contentons ici de donner une grandeur des besoins en eau que pour l'irrigation compte tenu que nos équipements futurs objet de classification sont destinés à accumuler une réserve pour les besoins de l'irrigation. Ces besoins sont évalués pour chaque commune en fonction des terres agricoles travaillées et considérées comme irriguées. La dose moyenne retenue est de l'ordre de 3000 m³/ha/an, pour les cultures maraichères et de 4150 m³/ha/an pour l'arboriculture fruitière excepté l'arboriculture rustique. Les superficies irriguées ont été collectées auprès des subdivisions de l'agriculture et concernent celle de la campagne 2006/2007 (DHW).

I.7.4 Evaluation des ressources en eau potentielles

Sur le plateau de Mostaganem, le réseau hydrographique est absent, on observe qu'un ensemble de dépressions peu profondes constitue des zones d'accumulation des eaux de ruissellement. Dans la partie Nord coule un cours d'eau important le Chélif en drainant les eaux. Il reçoit l'oued Mina à une quinzaine de kilomètre en amont et oued el kheir. Les dépressions présentent des éléments de drainage naturel exoréique : le bassin de oued el kheir, cet oued présente deux thalwegs : Ouest (Ain Hallouf) et Est (Ain Soltane).

Pour l'évaluation des ressources en eau dans la wilaya de Mostaganem, le travail préliminaire était le tracé des limites des sous bassins versant élémentaires dans les monts du Dahra et les collines sublittorales sur la carte topographiques de base à l'échelle 1/50000. Chaque sous bassin versant est codifié. Ainsi par exemple le sous bassin versant élémentaire codifié (1.1), le premier chiffre indique le numéro du sous bassin versant, le second celui du sous bassin versant élémentaire. Il s'agit en effet des :

- 1- Sous bassin versant Chélif Maritime codifié par L'ANRH (01-1), issu du bassin versant Chélif Zahres
- 2- Sous bassin versant Guelta codifié par l'ANRH (02-1) issu du bassin versant Dahra

Tous les calculs et les paramètres de chaque sous bassin versant élémentaire selon détaillés et calculées dans le chapitre 3.

I.8 OCCUPATION DU SOL

La répartition générale des terres dans la région d'étude a été tirée de la carte d'occupation du sol, réalisée sur la base des images satellites Landsat et complétée par des missions sur terrain. Une carte d'occupation du sol a été établie par l'utilisation de l'outil traitement d'image ENVI (4.8) dont dispose le laboratoire ISTHME. Cinq principaux types d'occupation du sol ont été illustrés dans la figure I.22 :

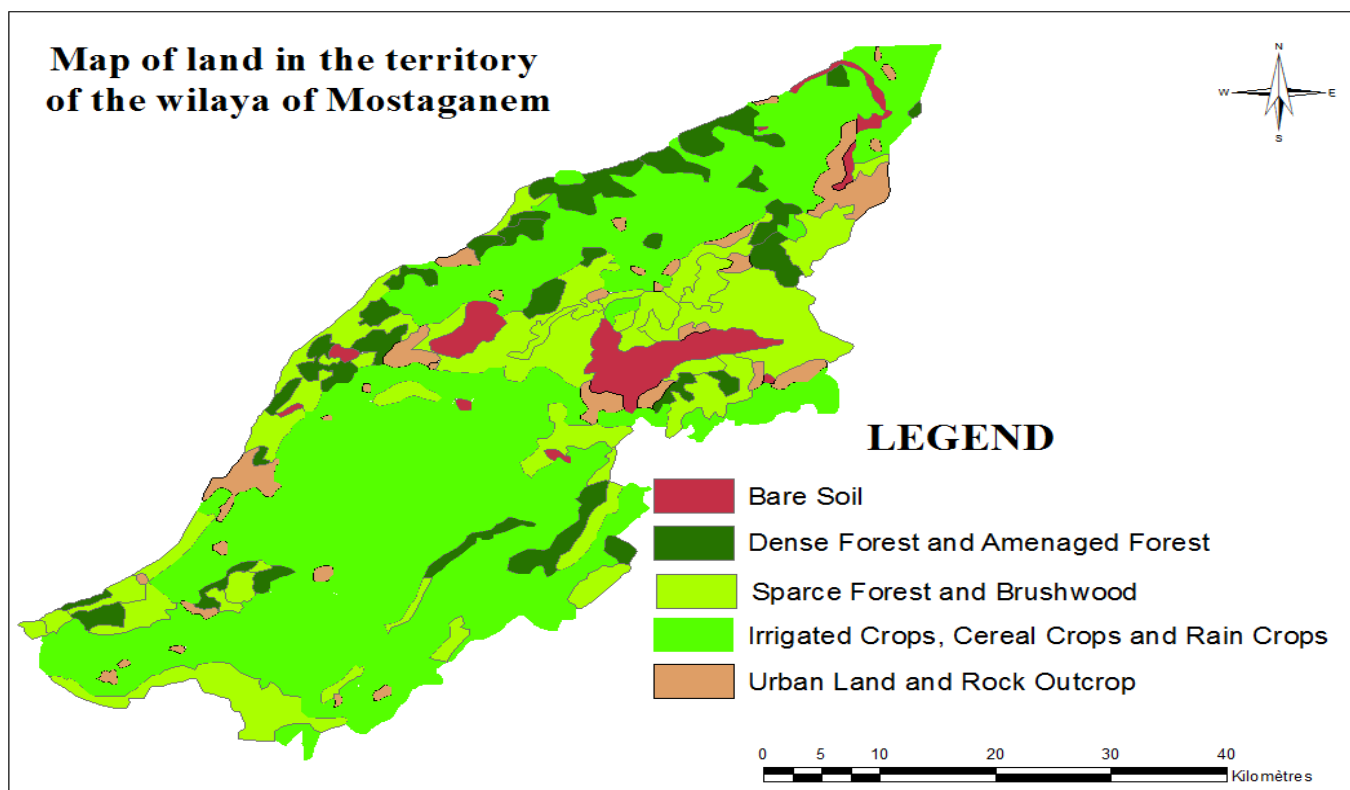


Figure I.22 : Carte d'occupation du sol de la région d'étude

CONCLUSION

La région d'étude est caractérisée par la diversité de son relief, et de ses unités physiques et de couvert végétal. Ces unités recèlent des potentialités caractéristiques aussi bien naturelles ou physiques qu'humaines pour un développement intégré. Le climat est de type semi-aride. Les précipitations moyennes sont de l'ordre de 350 mm/an. Les ressources hydriques sont insuffisantes et restent l'un des problèmes cruciaux les plus urgents des décideurs, la principale ressource hydrique (la nappe phréatique du plateau) est surexploitée selon les informations recueillies auprès des décideurs et se trouve à un niveau inquiétant qui nécessite des solutions à court terme. Les sols sont très divers et sont confrontés à une morphodynamique intense surtout dans les monts du Dahra. La dynamique érosive actuelle apparaît comme l'un des éléments marquant de la zone d'étude. Elle est très variée aussi bien dans ses formes, ses modalités que de son ampleur. L'occupation du sol montre elle aussi une grande diversité et constitue l'une des caractéristiques marquantes des unités morphopédologiques. L'irrigué se focalise surtout au niveau du plateau, les forêts sont les domaines des monts de Dahra et du cordon littoral et une végétation naturelle halophile dans la plaine des Bordjias.

A la lumière donc de l'ensemble des potentialités et contraintes précitées et analysées dans ce présent chapitre, l'objet de cette recherche vise à mettre à la disposition des décideurs une base de données spatiale renfermant les informations nécessaires par l'utilisation de l'outil SIG pour le choix des meilleurs positions pour l'implantation des retenues collinaires ou de petits barrages par l'utilisation des méthodes d'analyse multicritères d'aides à la décision de manière à aider les décideurs à accroître la capacité de mobilisation des ressources en eau.

CHAPITRE II
REPRÉSENTATION DES MÉTHODES
D'AGRÉGATION MULTICRITÈRE

INTRODUCTION

Le problème de choix d'un site d'implantation d'un équipement hydraulique en retenue collinaire ou petit barrage est de nature multiobjectif (implantation dans un endroit géologiquement résistant, capable d'accumuler une quantité de réserve importante, irriguer des surfaces conséquentes, résistance aux vulnérabilités d'érosion,...). Il importe donc de récapituler les approches multi-objectifs afin d'expliquer leur fonctionnement et saisir leur intérêt et leur dissimilitude. Nous exposons donc, dans ce chapitre, un panorama des méthodes d'agrégation multicritères les plus employées pour le rangement ou toute autre action ou alternative dans un problème. Nous développons les fondements de quelques méthodes. Enfin, nous choisissons les méthodes appropriées pour la résolution de notre problématique.

II.1 AIDE A LA DECISION

Le champ de l'aide à la décision a fait l'objet de recherches menées par plusieurs scientifiques de domaines variés ; Il a donc constitué un axe de recherche attrayant pour une multitude d'études et applications. Parmi ces applications, nous retrouvons beaucoup de cas relatifs à des problèmes liés à la référence spatiale (ROY et al., 92), planification urbaine et régionale, transports, gestion des ressources en eau, gestion environnemental, etc. Il est donc habituel, dans une étude d'aide à la décision, de devoir prendre en considération divers points de vue pour confronter l'attractivité relative des différentes actions susceptibles de résoudre le problème de décision observé. L'aide à la décision emploie des techniques et des méthodologies découlant du domaine des mathématiques appliquées telles que l'optimisation, les statistiques, la théorie de la décision.

II. 2 LA PROBLEMATIQUE DE LA DECISION :

(ROY B., 1985) montre que la problématique de décision peut être aperçue comme étant une orientation de la disquisition qu'on choisit pour un problème de décision donné. Elle formule les termes dans lesquels le décideur pose le problème et explique le type de la prescription qu'il souhaite obtenir spécifie quatre problématiques, tout problème de décision multicritère doit se rapporter formellement à l'une d'entre elles :

II.2.1 Problématique de choix ($P\alpha$) :

Cette problématique selon (E COSTA C A., 1996), comporte à sélectionner un sous ensemble aussi étroit que possible de l'ensemble des actions A , comportant les meilleures actions. L'idéal est d'obtenir une seule et meilleure action. Cependant, en raison de la nature contradictoire des critères, il est meilleur de produire au décideur quelques actions qui dévoilent différentes variantes de la "meilleure action". Certainement, le résultat final peut être affiné en appliquant de l'information additionnelle ou avec une analyse plus précise.

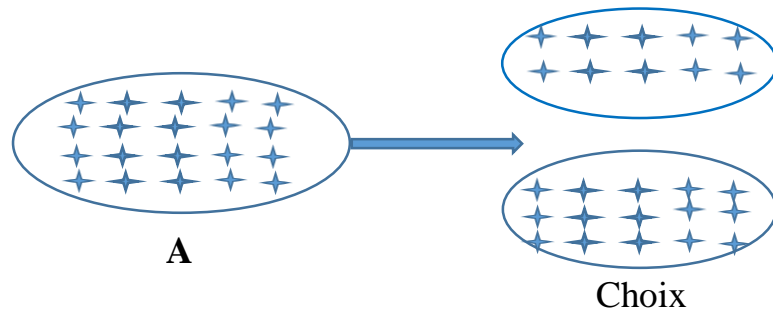


Figure II.1 Problématique de choix (MOUSSEAU V. 1993)

II.2.2 Problématique de tri ($P\beta$) :

Selon (MOUSSEAU V., 1993), cette problématique (voir figure II.2 ci-contre) sert à affecter chaque action à un ensemble de catégories prédéfinies. Cette énonciation est applicable lorsque le problème de décision consiste à examiner chaque action séparément des autres (en prenant en considération que des caractéristiques essentielles de chaque action) dans le but de procurer une recommandation parmi un ensemble de consignes désignées préalablement. Chaque consigne peut être adjointe avec une catégorie. Le problème de décision est alors perçu comme trier les actions potentielles aux différentes catégories définies en termes de normes prédéfinies. La procédure de tri doit être définie de telle sorte que chaque action est assignée à une et seule catégorie. Clairement, une prescription consiste à une partition de A .

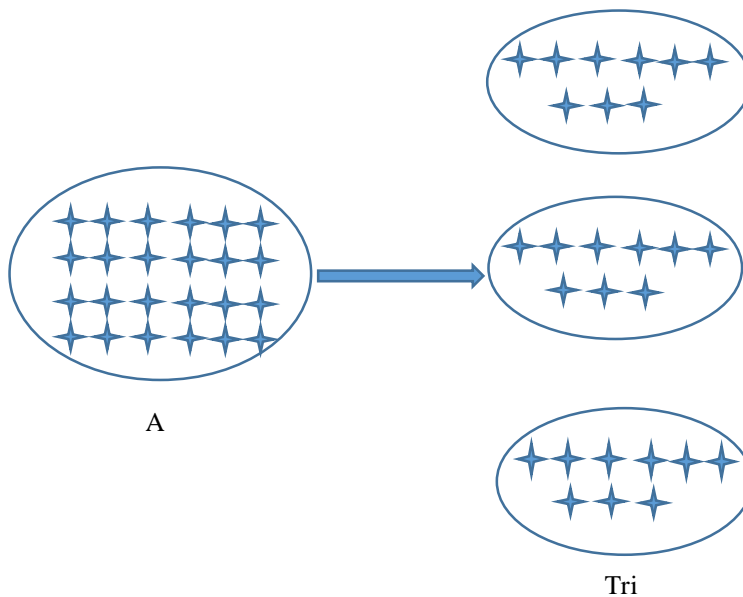


Figure II.2 Problématique de Tri (MOUSSEAU V. 1993)

II.2.3 Problématique de rangement ($P\gamma$) :

En se référant à (MOUSSEAU V. 1993), cette problématique consiste à classer les différentes actions par ordre de préférence. Elle est intéressante lorsque les actions sont à distinguer selon leur intérêt relatif. L'idéal est d'obtenir un ordre complet. Toutefois, en raison de la nature contradictoire des critères, à l'incertitude, à l'existence de systèmes de valeurs

hétéroclites, il est souvent plus réaliste d'exposer au décideur un ordre partiel. Il est à signaler qu'en pratique, le rangement peut être nécessaire uniquement pour les actions les plus intéressantes. Distinctement, la prescription est un ordre partiel, une relation transitive définie sur A (ou un sous ensemble de A).

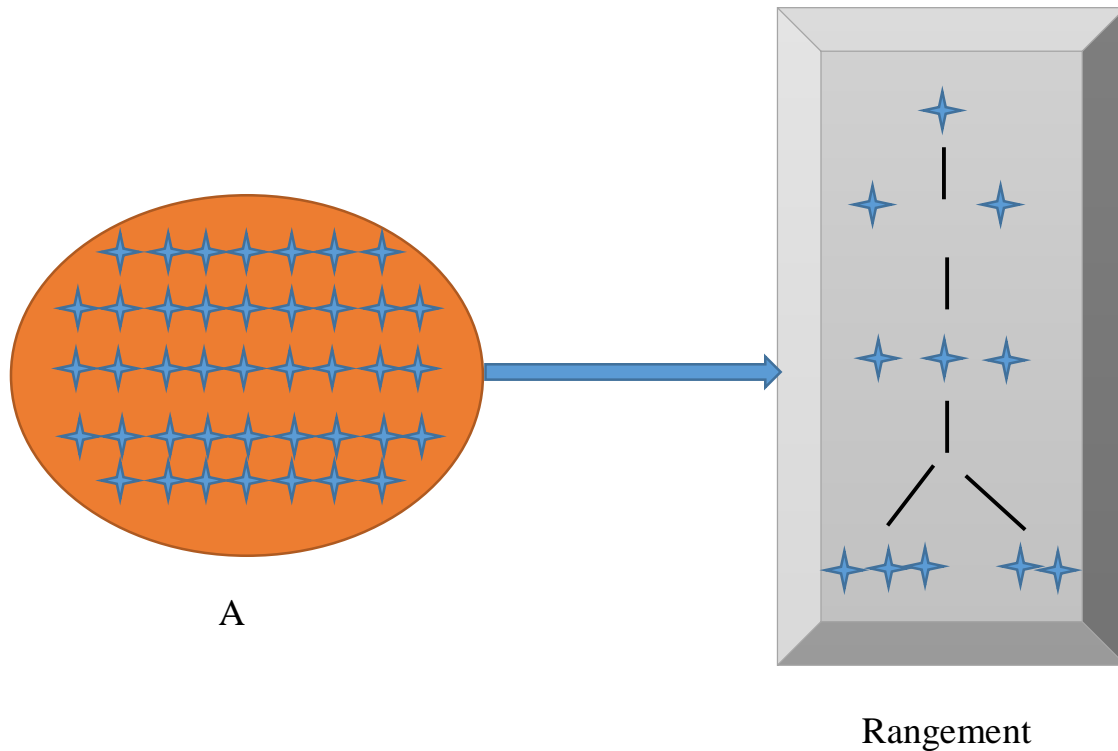


Figure II.3 Problématique de Rangement (MOUSSEAU V., 1993)

II.2.4 Problématique de description (P δ) :

(ROY B., 1985), illustre que cette problématique consiste aisément à décrire les actions et leurs conséquences et non pas à les confronter comme c'est le cas avec les trois autres problématiques précédentes. Dans ce cas, il n'existe pas une prescription et la procédure d'investigation est .

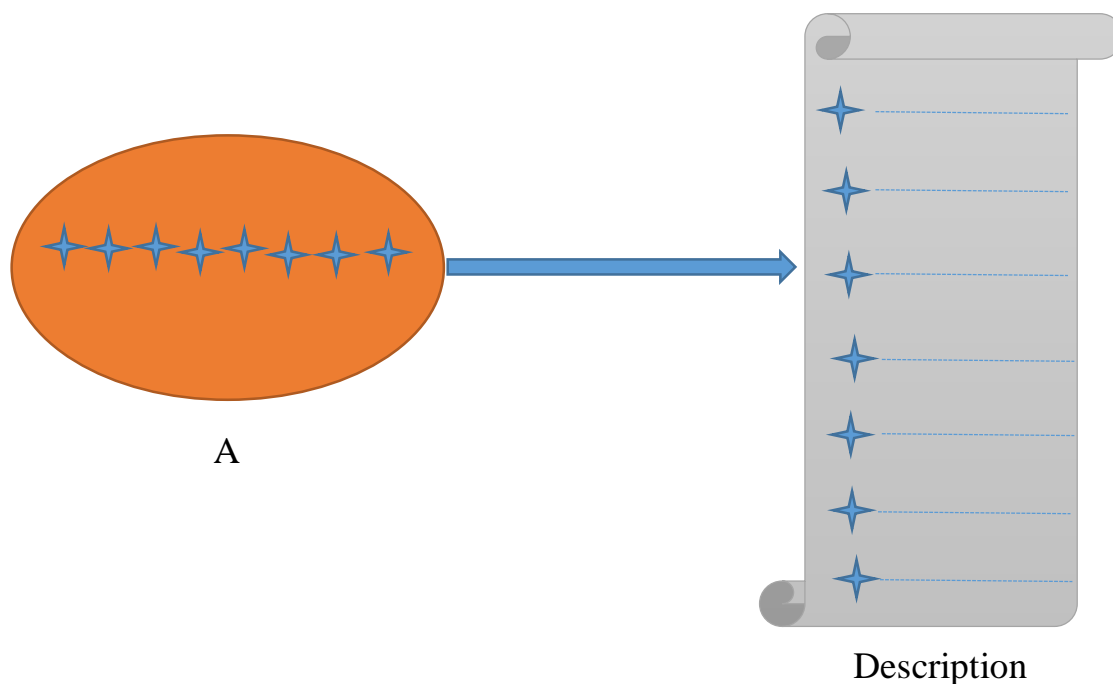


Figure II.4 Problématique de Description

Tableau II.1 Les différentes problématiques de décision (ROY B. 1985)

Problématique	Procédure d'investigation	Prescription	Résultat	Objectif
P. α	Sélection	Sous ensemble de A	Un choix ou une procédure de sélection	Sélectionner un sous ensemble aussi restreint que possible de A contenant les meilleures actions.
P. β	Segmentation	Partition de A	Un tri ou une procédure d'affectation	Affecter chaque action de A à une et une seule des catégories définies selon des normes préétablies.
P. γ	classement	Ordre partiel de A	Un rangement ou une procédure de classement	Ordonner des actions de A de la meilleure à la moins bonne.
P. δ	cognitive	Aucune prescription	Une description ou une procédure cognitive	Décrire les actions et leurs conséquences.

II.3 ANALYSE MULTICRITÈRE D'AIDE A LA DECISION

(KEENEY R L., 1992), évoque que la détermination de l'action idéale (optimale, de meilleur compromis...) forme un défi intellectuel continu en sciences et en génie. L'aide multicritère à la décision s'est alors développée pour fournir à la fois une démarche et des outils de solutions à des problèmes décisionnels complexes. De ce fait, l'analyse multicritère est actuellement vue comme l'une des branches les plus importantes de la recherche opérationnelle et des théories de la décision.

II.3.1 Définition de l'aide multicritère à la décision

(POHEKAR SD. et al, 2006), indiquent que techniquement, l'aide multicritère à la décision est développée pour traiter plusieurs classes de problèmes de décision (choix, tri, description, rangement...) tout en considérant plusieurs critères (attributs), souvent contradictoires et non commensurables, tout en cherchant à modéliser au mieux les préférences et les valeurs du ou des décideurs.

Tandis que (VINCKE PH., 1989), définit l'aide multicritère à la décision comme étant : « L'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à mettre à la disposition d'un décideur des outils lui consentant de progresser dans la résolution du problème de décision ou plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte ». Alors que (MAYSTRE LY., 1994) examine que l'aide multicritère à la décision comme une analyse ayant pour objectif d'émettre une famille cohérente de critères permettant d'apercevoir les différents résultats d'une action. Ainsi, un critère permet d'évaluer et de comparer des actions potentielles selon un objectif bien défini. A chaque critère est associée une donnée descriptive unique. Un critère est une fonction à valeurs réelles permettant de déterminer les conséquences de la comparaison de toute paire d'action comparativement à un objectif associé, de sorte que :

$$\forall a \text{ et } b \in A, g(a) > g(b) \Rightarrow a P b \quad \text{II.1}$$

Où Pg est l'expression des préférences partielles de a par rapport à b relativement au critère. A chaque critère est associée une échelle de mesure représentant les valeurs possibles que peut prendre le critère (VANDERPOOTEN D., 1988). A toute action est associé un vecteur de performance traduisant l'image de l'action dans l'espace des critères : (MOUSSEAU V., 1993)

$$\forall a \in A, (g_1(a), g_2(a), \dots, g_n(a)) \quad \text{II.2}$$

Il existe plusieurs types de critères :

-Le vrai critère : Nous exprimons de vrai critère lorsque l'action qui reçoit le meilleur score sera préférée à l'autre. Il n'y a indifférence que si les deux scores sont égaux.

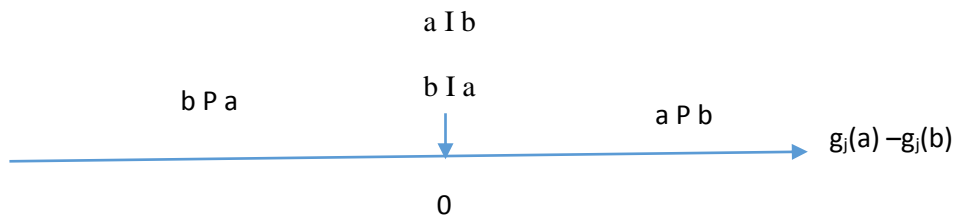


Figure II.5 Préférence entre les actions a et b selon le vrai critère

-Le quasi-critère : Nous parlons de quasi-critère lorsqu'il y a un intervalle d'indifférence [-q, q]. Il y a indifférence entre les actions et lorsque l'écart de leur évaluation tombe dans l'intervalle [-q, q].

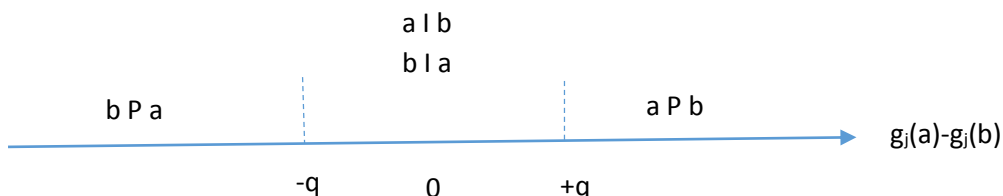


Figure II. 6 Préférence entre les actions a et b selon le quasi -critère

-Le pré-critère : Un pré-critère est un vrai critère auquel on a introduit un intervalle de préférence faible.

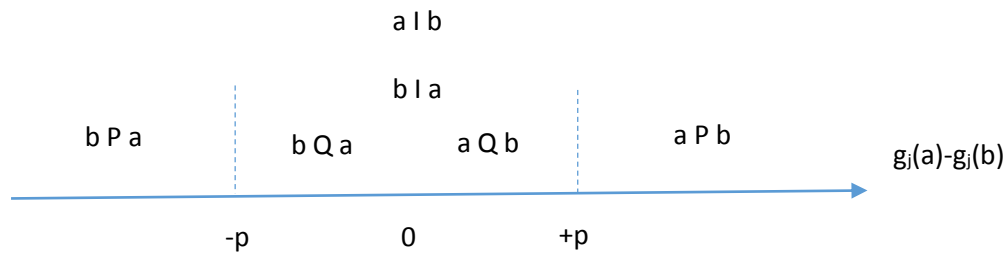


Figure II.7 Préférence entre les actions a et b selon le pré-critère

L'analyse multicritère ou les méthodes d'aide à la décision multicritères définissent fréquemment un ensemble de méthodes permettant d'agréger plusieurs critères avec l'objectif de sélectionner une ou plusieurs actions, options ou solutions.

En outre, l'analyse multicritère vise à fournir des outils de résolution de problème de décision où plusieurs objectifs, qui permettront souvent de progresser dans le contradictoire, doivent être pris en compte (VINCKE P., 1989). A la différence d'un problème uni-critère à résoudre, le problème multicritère n'a pas de solution unique mais des solutions de meilleurs compromis. La raison réaliste selon lequel la réalité étant multidimensionnelle, il est naturel que l'on prenne en compte plusieurs points de vue pour aider à la décision et donc qu'on utilise des méthodes multicritères, ne peut à lui seul justifier d'adopter une démarche multicritère pour aider à la décision.

II.3.2 Démarche de l'aide multicritère à la décision

Il existe plusieurs approches pour affronter la situation de décision multicritère. Chacune attire l'attention sur certains aspects aux dépens d'autres et, par conséquent, chacune a ses avantages et ses inconvénients.

-l'approche du "haut vers le bas" (top down) : selon (KENNEY RL. 1992 cité par LAARIBI, 2000), cette approche illustrée dans la figure II.8, comporte à produire une structure hiérarchique détenant à son premier niveau l'objectif global qui est "subdivisé" en sous-objectifs jusqu'à ce que l'on aboutisse un niveau mesurable que l'on désigne d'attributs. En outre, (KENNEY RL. 1992 cité par LAARIBI, 2000) assemble de manière précise chaque attribut avec un objectif fondamental, où les attributs peuvent être désignés descripteurs, les niveaux d'impacts destinés à être employés pour décrire les impacts probables des actions potentielles par rapport à chaque point de vue.

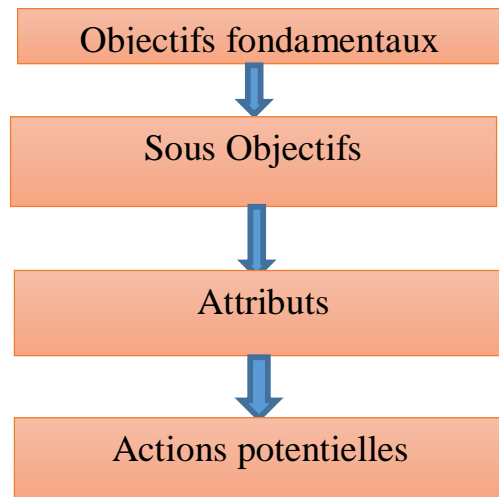


Figure II.8 Démarche top-down d'analyse multicritère (KENNEY RL. 1992 cité par LAARIBI, 2000)

-l'approche du "bas vers le haut" (bottom-up) :

selon (ROY B., 1990b cité par LAARIBI, 2000) cette approche indiquée par la figure II.9, consiste à identifier toutes les conséquences pouvant résulter de la mise en œuvre des actions, que l'on structure en dimensions puis en axes de signification autour desquels sont construits les critères.

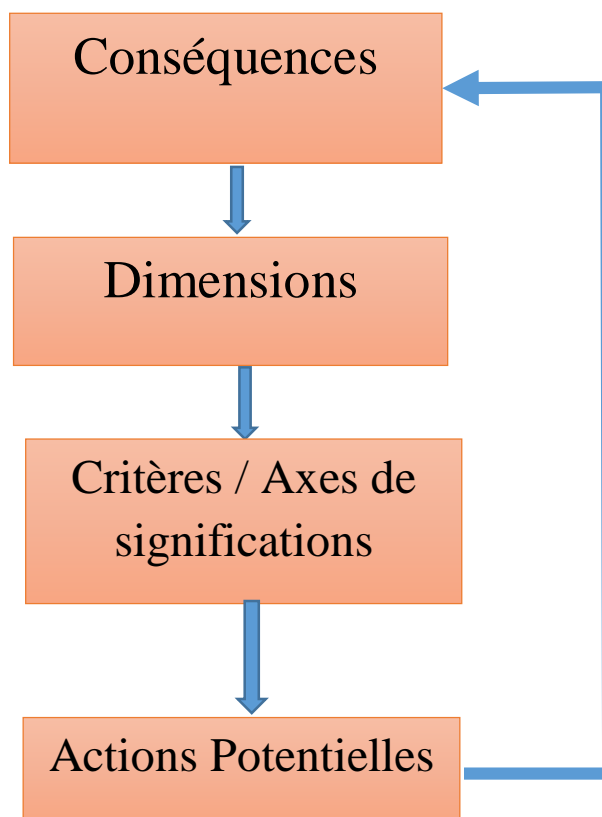


Figure II. 9 Démarche bottom-up d'analyse multicritère (ROY B. 1990a cité par LAARIBI, 2000)

-l'approche "intermédiaire" : (LAARIBI A., 2000) a présenté une approche intermédiaire présentée dans la figure II.10, comme suit : commençant d'une situation de décision quelconque (intellection d'un problème de décision), il y a lieu d'essayer d'exhaler au départ les objectifs qu'on cherche à aboutir. En prenant en considération de ces objectifs, un ensemble de points de vue pourrait s'émaner, formulant en quelque sorte des classes de critères.

En conséquence, les objectifs consentiraient de définir des actions (globales) ou des scénarios (ensemble des actions fragmentées), tandis que la famille de points de vue s'exprime habituellement par un ensemble de critères qui agréeraient d'accomplir à une évaluation des actions ou des scénarios.

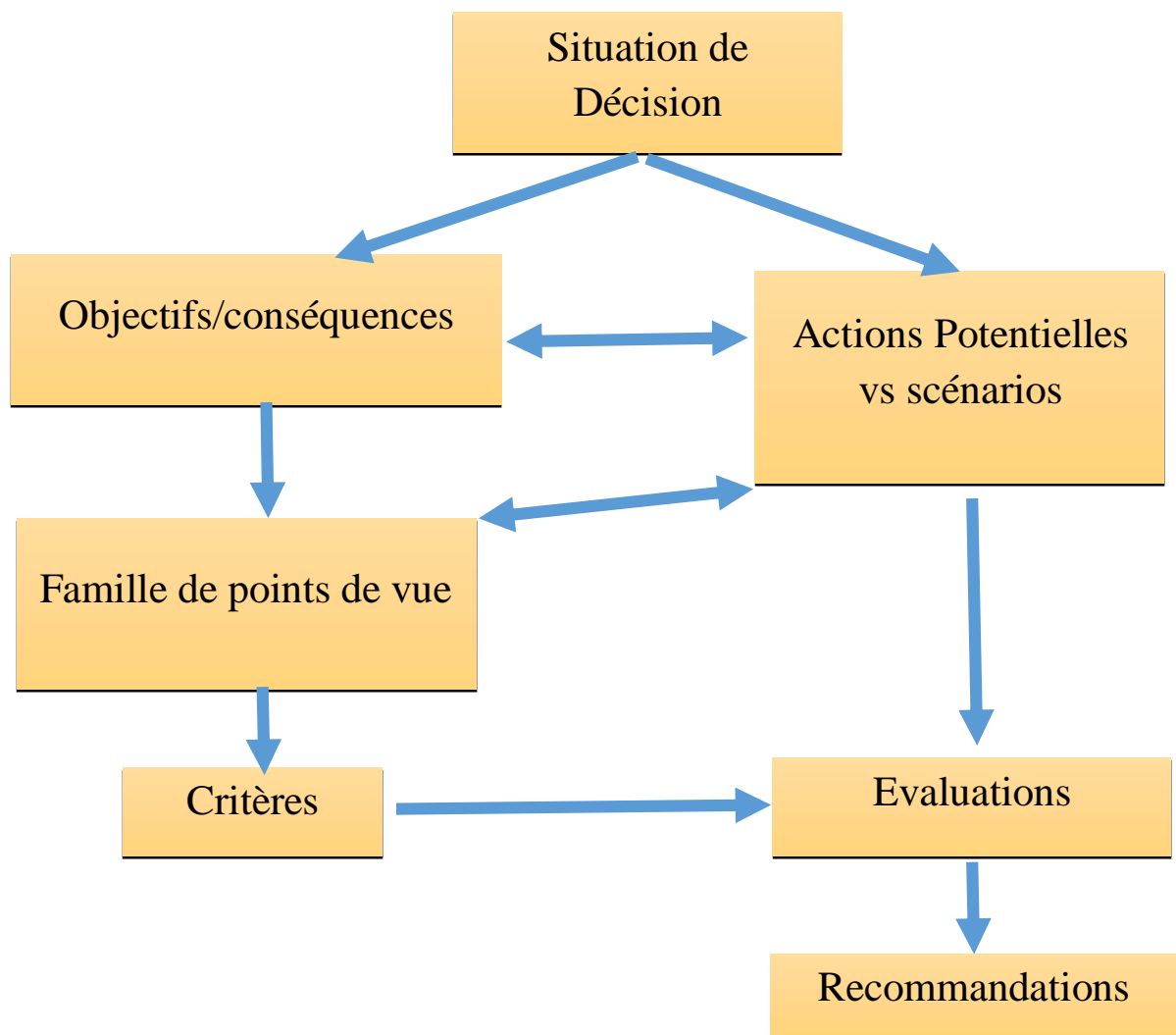


Figure II.10 Démarche intermédiaire d'analyse multicritère (LAARIBI A., 2000)

II.4. LES METHODES DE L'ANALYSE MULTICRITERE D'AIDE A LA DECISION

En se référant à (CAILLET R., 2003), les méthodes d'analyse multicritère sont des outils d'aide à la décision développées depuis les années 1960. Plusieurs méthodes ont été procurées afin de souscrire aux décideurs de faire un bon «choix ». Pour certains experts du

domaine, ce choix existe dans l'esprit du décideur, et le processus d'aide à la décision doit le faire ressortir pour d'autres, le processus d'aide à la décision doit créer ce choix. Ainsi, un ou plusieurs décideurs sont devant à un problème, et disposent pour cela de plusieurs solutions, le décideur prend en considération plusieurs critères pour juger ces actions. Mais aucune action ne se dégage du lot, de plus les critères sur lesquels sont évaluées ces actions sont contradictoires.

(BEN MENA S., 2000), souligne que les méthodes d'analyse multicritère ou, plus exactement, les méthodes d'aide multicritère à la décision sont des techniques qui permettent d'intégrer tout type de critères, ces procédures s'avèrent mieux permettre de se diriger vers un judicieux compromis plutôt qu'un optimum souvent désuet.

II.5 PANORAMA DES METHODES MULTICRITERES

Nous catégorisons les méthodes de sélection en trois catégories :

1. Les méthodes élémentaires ou basiques.
2. Les méthodes d'optimisation mathématique.
3. Les méthodes d'aide à la décision multicritère.
 - Méthode d'agrégation complète : approche du critère unique de synthèse
 - Méthode d'agrégation partielle : approche de surclassement de synthèse

II.5.1 Les méthodes élémentaires

II.5.1.1 La méthode catégorique (*Categorical method*)

En se référant à (Timmerman, 1986), la méthode catégorique consiste à faire une évaluation des performances de chaque action par rapport à chaque critère, et ce en destinant un « grade » : un terme catégorique simple, par exemple « Bon », « insatisfaisant », « neutre ». On accomplit dans une seconde étape la somme des évaluations de chaque action pour obtenir un score global par action. La méthode catégorique est l'une des méthodes les plus souples pour résoudre un problème de sélection. Elle est simple à mettre en œuvre. Cependant, elle fait appel à des jugements appuyés sur la mémoire et l'expérience du décideur. Ainsi, les évaluations des actions par rapport aux critères ne sont pas précises. La méthode catégorique permet la classification des actions les unes par rapport aux autres. Elle emploie le même ordre d'importance pour tous les critères. La méthode catégorique est compensatoire.

II.5.1.2 La méthode de la somme pondérée (*the linear averaging method or weighted point method*)

Mise au point également par (Timmerman, 1986), cette méthode consiste à se fixer un ensemble de critères et à les ordonner en affectant à chacun d'eux un poids. La méthode de la somme pondérée se présente de la façon suivante :

Étape 1 : Identifier les critères pertinents à la problématique.

Étape 2 : Arranger les éléments identifiés en catégories homogènes.

Étape 3 : Affecter des poids (traduisant l'importance relative des critères) aux critères listés.

Étape 4 : Construire une matrice pour procéder à une moyenne linéaire (Tableau II.2).

Tableau II.2 Méthode de la somme pondérée

	C ₁	C _i	C _n	Somme pondérée	Score
	P ₁	P _i	P _n		
Action A1					
Action Ai					
Action An					

$$S(A_i) = \sum_{i=1}^n C_i * P_i \quad \text{II.3}$$

Étape 5 : Développer des procédures spécifiques pour mesurer les performances des actions.

Étape 6 : Évaluer chaque action sur chacun des critères en se référant aux procédures développées à l'étape précédente ;

Étape 7 : Calculer le score global (weighted-ratings) pour chaque action.

La méthode de la somme pondérée est l'une de méthodes les plus employées. Elle a le privilège d'être simple à appréhender et à mettre en œuvre. Toutefois, sa difficulté réside dans la définition de procédures de conversion des évaluations qualitatives en des évaluations quantitatives. La méthode de la somme pondérée est compensatoire.

II.6 Méthodes d'Optimisation mathématique multicritère

Les méthodes d'optimisation mathématique sont les plus pratiquées, dans le domaine de la recherche scientifique, pour traiter le problème de sélection. Le problème est souvent théorisé sous la forme d'une ou de plusieurs fonctions objectifs et d'un ensemble de contraintes à respecter. Les modèles obtenus peuvent être linéaires, linéaires avec variables entières, linéaires mixtes, quadratiques, non linéaires... et ce en fonction du problème à formaliser. Les méthodes d'optimisation mathématique sont souvent exploitées en deux étapes :

- Première étape de modélisation : elle consiste à formaliser le problème étudié en un modèle d'optimisation,
- Deuxième étape de résolution : elle consiste à résoudre le modèle proposé.

On ne détaille pas chacune de ces étapes dans le cadre de cette thèse. On trouvera beaucoup plus de détails dans le livre (Hillier et Lieberman, 2001).

II.7 Méthode d'agrégation complète : approche du critère unique de synthèse

II.7.1 Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)

La méthode AHP a été proposée par Saaty en 1980 (Saaty, 1980), cette méthode est simple dans son principe et dans son application. Cette simplicité explique le nombre important de travaux scientifiques où la méthode AHP a été appliquée avec succès. Elle procède par combinaisons deux à deux des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport aux éléments du niveau supérieur. La méthode AHP est utilisée avec succès dans de nombreux domaines, dont celui de la décision multicritères. La méthode commence par la définition de l'objectif principal à atteindre ou la décision à prendre, à partir de là, elle décompose cet objectif en une structure hiérarchique de critères et de sous critères d'évaluation. Dans le dernier niveau hiérarchique nous retrouvons les actions à évaluer (les alternatifs). Parmi les avantages de la méthode AHP, sa capacité de structurer un problème complexe ; multicritère ; permet la comparaison des éléments (alternatifs, critères et sous critères) et facile à implémenter.

II.7.1.1 Points forts de la méthode AHP

Les raisons de la popularité de la méthode AHP sont :

- Structure hiérarchique : tri les éléments d'un problème dans différents niveaux et dans des groupes à caractéristiques similaires ;
- Interdépendance : permet de considérer l'interdépendance des éléments d'un problème sans insister sur le raisonnement linéaire (les éléments de chaque niveau de la structure hiérarchique sont dépendant) ;
- Consistance : permet de garder une consistance logique des jugements utilisés pour déterminer les priorités ;
- Synthèse : permet d'obtenir une appréciation générale de la désirabilité de chaque alternatif ;
- Identification des priorités : permet de considérer la priorité relative de chaque critère pour ainsi obtenir le meilleur alternatif selon l'objectif identifié.

II.7.1.2. Différentes étapes de la méthode AHP

Nous allons développer dans cette partie les différentes étapes de la méthode AHP. La figure II.11 montre la structure hiérarchique de la méthode AHP.

Étape 1 : Décomposer le problème en une structure hiérarchique

Au début de la méthode, définissons une arborescence hiérarchique des critères, des sous critères et des alternatifs. Chaque élément de cette hiérarchie doit être défini.

- Définir l'objectif (*niveau 0*).
- Définir les critères de décision ou de jugement (*niveau 1*).
- Le dernier niveau de la hiérarchie comprendra les différents alternatifs, choisies au préalable (*niveau 2*).

Étape 2 : Effectuer les combinaisons binaires niveau par niveau

- Comparer l'importance relative de tous les éléments appartenant à un même niveau de la hiérarchie deux par deux, par rapport à l'élément du niveau supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Echelle de comparaison binaires), présentée dans le tableau II.3 ci-après.
- Les matrices de comparaison ainsi obtenues auront la propriété suivante :

$$A = a_{ij}$$

$$a_{ii} = 1 \text{ et } a_{ji} = 1 / a_{ij} \quad \text{II.4}$$

Tableau II.3 Echelle de Saaty

Degré d'importance	Définition	Explication
1	Importance égale des deux éléments.	Deux éléments contribuent autant à la propriété
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre.	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent légèrement un élément à un autre.
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre.	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent fortement un élément à un autre.
7	Importance affirmée d'un élément par rapport à un autre	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est confirmée dans la pratique.
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre.	Les preuves favorisent un élément par rapport à un autre sont aussi convaincus que possible.
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines.	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations.

Etape 3 : Déterminer les priorités

- Calculer l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie à partir des évaluations obtenues de l'étape 2 ;
- La détermination des priorités des éléments de chaque matrice se fait par la résolution du problème de vecteur propre ;
 1. L'importance relative des différents critères est exprimée par les valeurs du vecteur normalisé ;
 2. Plus cette valeur est grande, plus le critère correspondant est important.

Etape 4 : Synthétiser les priorités

Vérifier la cohérence des jugements.

- On calcul d'abord, l'indice de cohérence IC :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{II.5}$$

Où λ_{max} est la valeur propre maximale correspondant à la matrice des comparaisons par paires et n est le nombre des éléments comparés.

- On calcule le ratio de cohérence (RC) définit par (voir tableau II.4 ci-après) :

$$RC = 100 * \frac{IC}{ACI} \quad \text{II.6}$$

Où ACI est l'indice de cohérence moyen obtenu en générant aléatoirement des matrices de jugement de même taille.

Tableau II.4 Indice de cohérence moyen

Dimension de la matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cohérence aléatoire ACI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Une valeur de RC inférieure à 10% est généralement acceptable, sinon, les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences.

Etape 5 : Etablir la performance relative de chacune des actions.

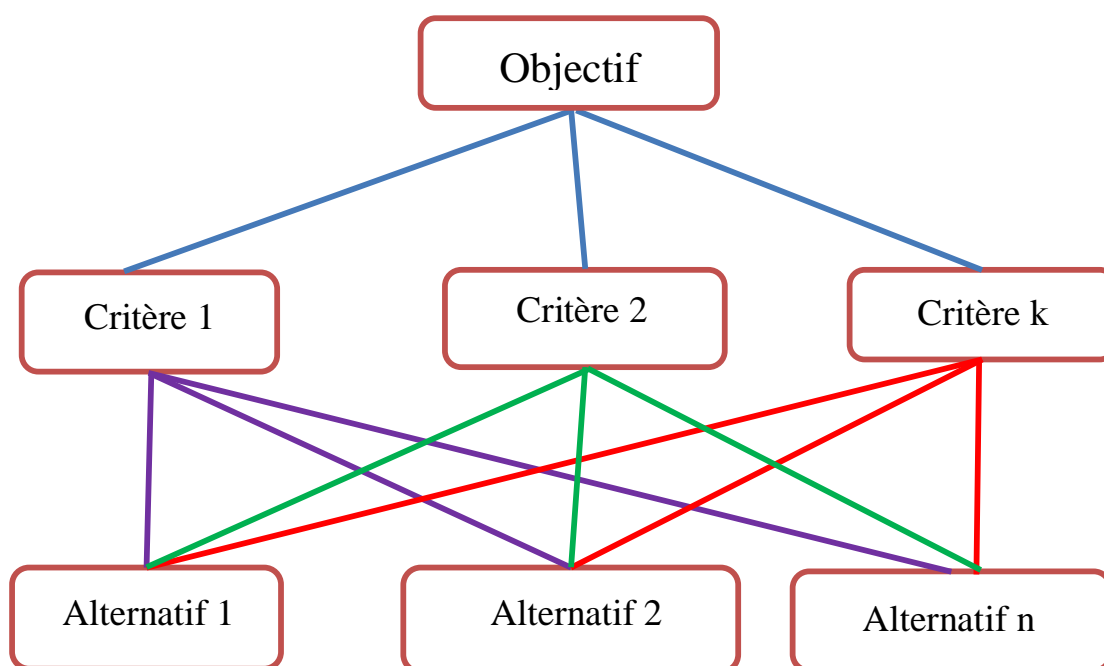


Figure II.11. Structure hiérarchique de la méthode AHP

II.8 Méthode d'agrégation complète : approche de surclassement de synthèse

II.8.1. La Méthode PROMETHEE (Brans et Vincke, 1985)

PROMETHEE (Préférence Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations) est une méthode qui consiste à construire une relation de surclassement évaluée mais en essayant de se baser sur des concepts et des paramètres qui ont une interprétation compréhensible par le décideur.

Les méthodes PROMETHEE se fondent sur une extension de la notion de critère par l'introduction d'une fonction formulant la préférence du décideur pour une action a_i par rapport à une autre action a_k . Pour chaque critère, le décideur est appelé à choisir une des six formes de courbes représentées ci-dessous. Les paramètres relatifs à chaque courbe représentent des seuils d'indifférence et/ou de préférence.

$$\text{Max}\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_j(x), \dots, f_k(x) / x \in A\} \quad \text{II.7}$$

Où A est un ensemble fini énuméré de n actions potentielles et $f_j(\cdot)$; $j = 1, 2, \dots, k$, k critères qui sont des applications de A sur l'ensemble des nombres réels. Chaque critère est assorti d'unités propres. Ces critères sont soit à maximiser, soit à minimiser (Brans et Marshall, 2000).

Les alternatives d'un tel problème peuvent être présentées sous forme d'un tableau (voir tableau II.5 ci-après), comprenant $n \times k$ évaluations.

Tableau II.5 Tableau d'évaluations

	$f_1(\cdot)$	$f_2(\cdot)$	...	$f_j(\cdot)$	...	$f_k(\cdot)$
a_1	$f_1(a_1)$	$f_2(a_1)$	...	$f_j(a_1)$	...	$f_k(a_1)$
a_2	$f_1(a_2)$	$f_2(a_2)$	...	$f_j(a_2)$	...	$f_k(a_2)$
...
a_i	$f_1(a_i)$	$f_2(a_i)$	...	$f_j(a_i)$	...	$f_k(a_i)$
...
a_n	$f_1(a_n)$	$f_2(a_n)$	...	$f_j(a_n)$	...	$f_k(a_n)$

1. Enrichissement de la structure de préférence

La notion de critère généralisé, est définie à partir d'une fonction de préférence, est introduite afin de tenir compte de l'amplitude des écarts entre les évaluations sur chacun des critères. Cette étape est indispensable.

2. Enrichissement de la relation de dominance

Une relation de surclassement évaluée tenant compte de l'ensemble des critères est proposée. Pour chaque paire d'actions, un degré de préférence global d'une action sur l'autre est établi.

3. Aide à la décision

La relation de surclassement évaluée est exploitée en vue d'éclairer le décideur. PROMETHEE I fournit un rangement partiel des actions, PROMETHEE II un rangement total et PROMETHEE III amplifie la notion d'indifférence.

II.8.1.1 Enrichissement de la structure

Fonctions de préférence et critère généralisé

Nous avons vu que des comparaisons par paires entre les actions de A donnent lieu à une relation de dominance naturelle (I, P) telle que :

$$\forall a, b \in A \begin{cases} f_j(a) > f_j(b) \Leftrightarrow a P_j b \\ f_j(a) = f_j(b) \Leftrightarrow a I_j b \end{cases} \quad \text{II.8}$$

Soit à présent :

$$d_j(a, b) = f_j(a) - f_j(b) \quad \text{II.9}$$

L'écart entre les évaluations $f_j(a)$ et $f_j(b)$.

La relation de dominance est insuffisante et parfois présente des erreurs aux yeux du décideur car l'amplitude des écarts n'est prise en considération mais uniquement de leur signe.

Afin de parfaire, considérons une fonction $P_j(a,b)$ donnant le degré de préférence de a sur b en fonction de $d_j(a,b)$:

$$P_j(a,b) = P_j[d_j(a,b)] \quad \text{II.10}$$

Supposons que ce degré de préférence soit normé de telle manière que :

$$0 \leq P_j(a,b) \leq 1 \quad \text{II.11}$$

Et que :

$$\begin{cases} P_j(a,b) = 0 \text{ si } d_j(a,b) \leq 0 \text{ (pas de préférence)} \\ P_j(a,b) \approx 0 \text{ si } d_j(a,b) > 0 \text{ (préférence faible)} \\ P_j(a,b) \approx 0 \text{ si } d_j(a,b) \gg 0 \text{ (préférence forte)} \\ P_j(a,b) = 1 \text{ si } d_j(a,b) \gg \gg 0 \text{ (préférence stricte)} \end{cases} \quad \text{II.12}$$

La fonction $P_j(a,b)$ change de façon non décroissante et s'annule en $d_j \leq 0$. Lorsque $d_j(a,b) \leq 0$, $P_j(a,b)$ est nulle, mais $P_j(b,a)$ peut être positive. Dans le but de mieux faire montrer les zones d'indifférence et de préférence faible, introduisons la fonction $H_j(d_j)$ telle que :

$$\begin{cases} P_j(a,b) \text{ si } d_j(a,b) \geq 0 \\ P_j(b,a) \text{ si } d_j(b,a) \leq 0 \end{cases} \quad \text{II.13}$$

Le critère généralisé est dès lors aussi déterminé par le couple $\{f_j(.), H_j(.)\}$. Un critère généralisé doit être associé à chaque critère $f_j(.)$. Un ensemble de six types de critères généralisés sont proposés aux décideurs :

Type I

: critère usuel

$$H_j(d_j) = \begin{cases} 0 \text{ si } d_j = 0 \\ 1 \text{ si } d_j = 1 \end{cases} \quad \text{II.14}$$

Il n'y a indifférence entre a et b que si $f_j(a) = f_j(b)$. Dès qu'il y a un écart, il y a préférence stricte pour l'action détenant l'évaluation la plus élevée. Ce type de critère est généralement employé lorsque le critère n'admet que deux niveaux de comparaison (indifférence ou préférence). Par exemple, dans un problème d'inondation, la nécessité d'évacuer les villages situés dans des zones à hauts risques. Alors, la moindre augmentation ou diminution du nombre de villages à évacuer influence le choix du décideur. Il est représenté par la figure II.12.

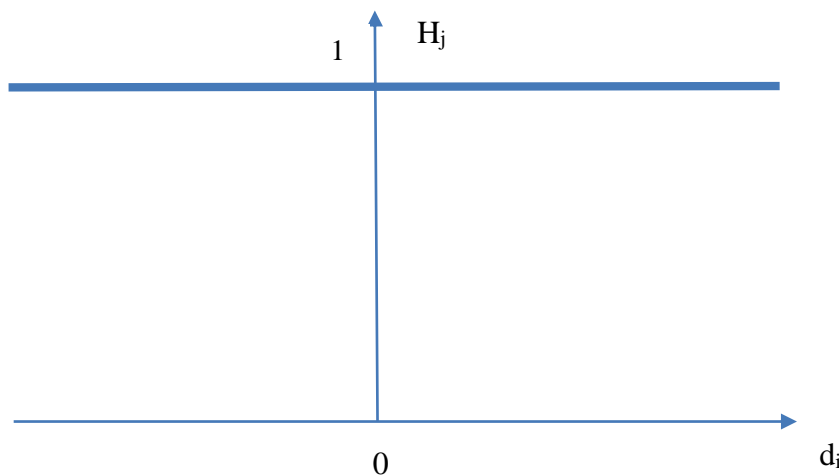


Figure II.12. Critère usuel

Type II : quasi-critère

$$H_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } |d_j| \leq q_j \\ 1 & \text{si } |d_j| > q_j \end{cases} \quad \text{II.15}$$

Les actions a et b sont indifférentes tant que l'écart $d_j(a,b)$ ne dépasse pas un seuil q_j . Au-delà de ce seuil, la préférence est stricte. Ce genre de critère généralisé peut être employé dans le cas de l'implantation d'un site commercial ou autre. Il est représenté par la figure II.13.

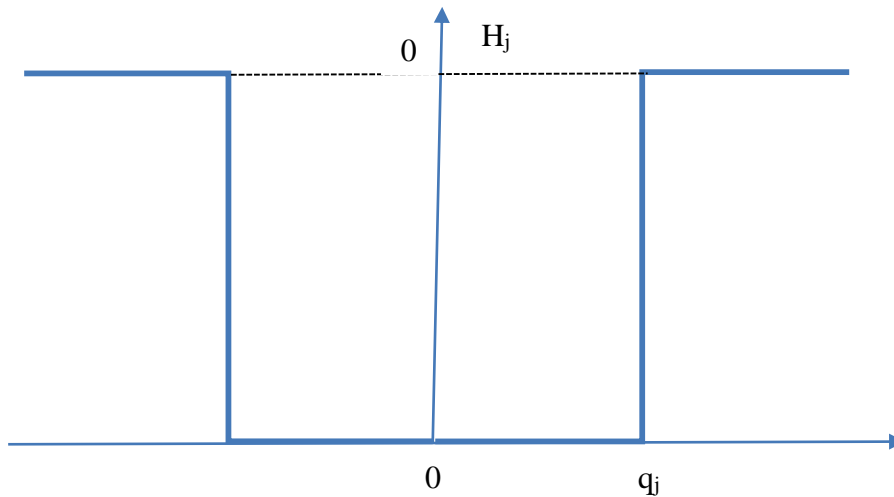


Figure II.13. Quasi-critère

Type III : critère à préférence linéaire

$$H_j(d_j) = \begin{cases} \frac{|d_j|}{p_j} & \text{si } |d_j| \leq p_j \\ 1 & \text{si } |d_j| > p_j \end{cases} \quad \text{II.16}$$

Un tel critère permet au décideur de préférer graduellement a à b en fonction de l'écart observé entre $f_j(a)$ et $f_j(b)$. Le degré de préférence croît linéairement jusqu'à ce qu'un seuil p_j soit atteint. Au-delà de ce seuil, la préférence est stricte.

Lorsque le décideur estime ne pas devoir tenir compte d'un seuil, il peut utiliser ce type de critère généralisé. Il est représenté par la figure II.14.

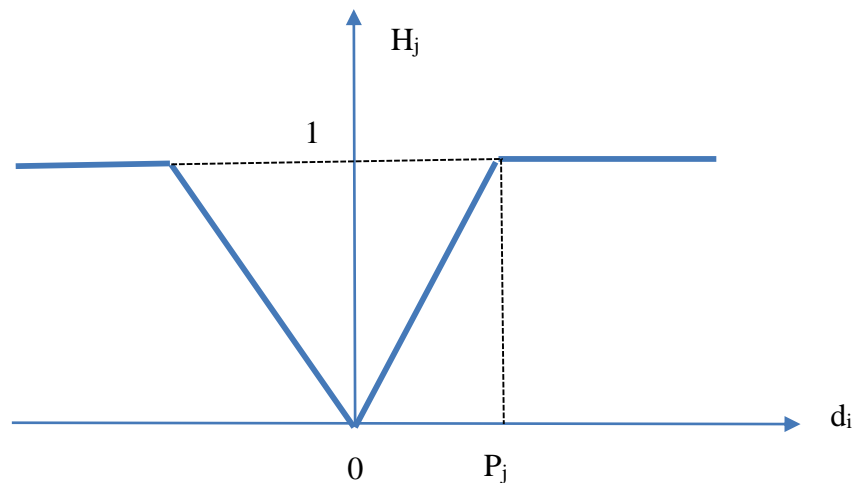


Figure II.14. Critère à préférence linéaire

Type IV : critère à pallier

$$H_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } |d_j| \leq q_j \\ \frac{1}{2} & \text{si } q_j \leq |d_j| \leq p_j \\ 1 & \text{si } |d_j| > p_j \end{cases} \quad \text{II.17}$$

Dans ce cas, a et b sont considérés comme indifférents tant que l'écart entre $f_j(a)$ et $f_j(b)$ ne dépasse pas q_j ; entre q_j et p_j , le degré de préférence est faible (1/2) et, au-delà de p_j , la préférence devient stricte.

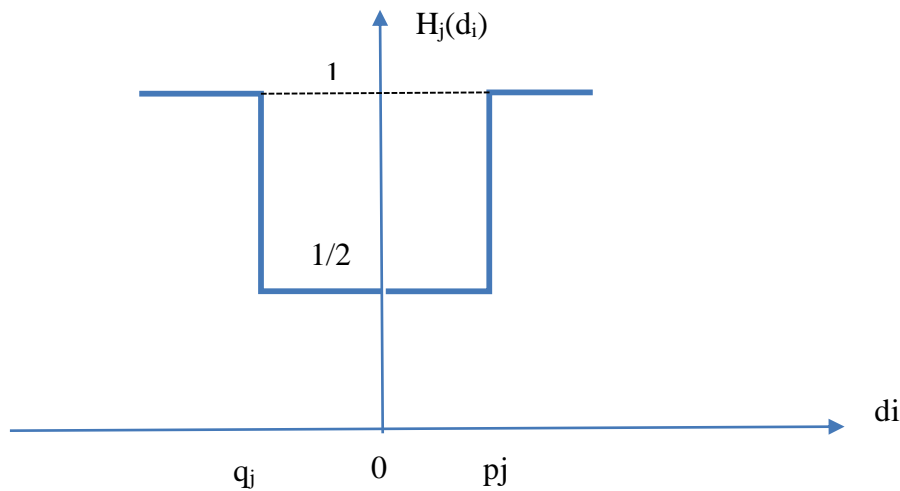


Figure II.15 Critère à pallier

Il peut être appliqué lorsqu'on désire analyser des données qualitatives mesurées sur une échelle discrète. Il est préférable de définir au préalable une échelle numérique associée au critère à titre d'exemple, dans un problème de construction d'une grande surface, pour un critère tel que le nombre d'accès au réseau routier, l'utilisation de ce type de critère généralisé est indiqué. On peut considérer qu'une différence d'un accès routier ne permet de départager objectivement les deux alternatives. La valeur deux constitue un seuil de préférence. Il est évoqué par la figure II.15.

Type V : critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence

$$H_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } |d_j| = q_j \\ \frac{|d_j|-q_j}{p_j-q_j} & \text{si } q_j \leq |d_j| \leq p_j \\ 1 & \text{si } |d_j| > p_j \end{cases} \quad \text{II.18}$$

Dans ce cas, a et b sont autant indifférents tant que l'écart entre $f_j(a)$ et $f_j(b)$ ne dépasse pas q_j . Au-delà, le degré de préférence croît linéairement avec d_j jusqu'à atteindre une préférence stricte à partir de p_j .

Ce type de critère est habituellement utilisé pour des évaluations qui sont des nombres réels variant de façon continue, la présence d'un seuil d'indifférence et d'un seuil de préférence permet au décideur d'identifier les zones de préférence et d'indifférence. Si la présence d'un seuil d'indifférence n'est pas nécessaire, il est préférable que le décideur utilise le critère généralisé de type III (figure II.13). Ce type de critère généralisé est utilisé par exemple pour les coûts. Il est représenté par la figure II.16.

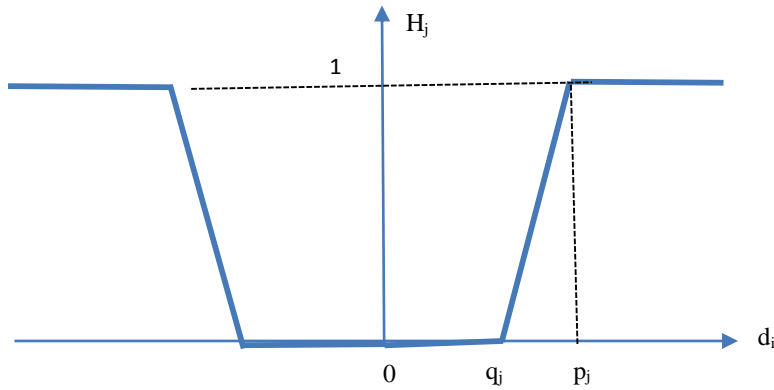


Figure II.16. Critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence

Type VI : critère gaussien

$$H_j(d_j) = 1 - e^{-\frac{d_j^2}{2s_j^2}} \quad \text{II.19}$$

Dans ce cas, le degré de préférence croît d'une manière continue en fonction de d_j . Un seul paramètre s_j doit être fixé. Pour un écart égal à s_j on obtient un degré de préférence égal à 0.39 qui correspond à une préférence moyenne. Ce critère généralisé est employé dans le cas où le décideur souhaite consolider le degré de préférence pour de petits écarts. Il est illustré dans la figure II.17. Pratiquement, les critères généralisés les plus employés sont ceux de type III et V et parfois de type VI.

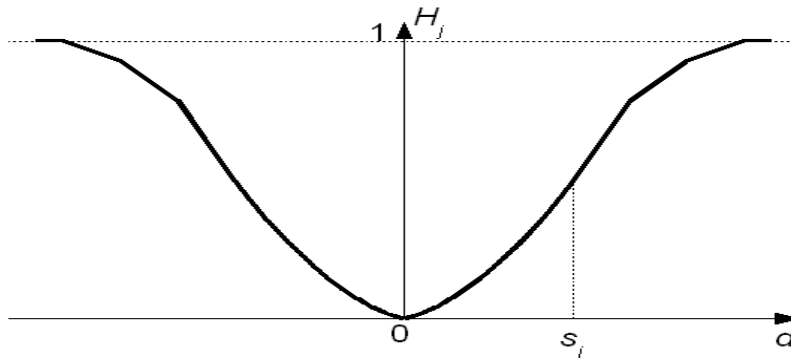


Figure. II.17 Critère gaussien

II.8.1.2 Relation de surclassement

Partant du problème (tableau II. 1) défini par le tableau d'évaluation et en supposant qu'un critère généralisé ait été associé à chaque $f_j(\cdot)$; $j = 1, 2, \dots, k$, on peut évaluer l'indice de préférence multicritère et mettre une relation de surclassement entre les actions.

II.8.1.3 Indice de préférence multicritère

Soit

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b) * w_j \quad \left(\sum_{j=1}^k w_j = 1 \right) \quad \text{II.20}$$

Où $w_j > 0, j=1,2,\dots,k$, sont des poids décrivant la puissance relative de chaque critère. Ces poids ont un rôle très important et sont spécifiques à chaque décideur ; ils expriment une partie de son espace liberté. L'indice $\pi(a,b)$ est une évaluation de préférence de a sur b sur l'ensemble de critères. Les relations suivantes sont élaborées :

$$\pi(a, a) = 0 \quad \text{II.21}$$

$$0 \leq \pi(a, b) \leq 1 \quad \text{II.22}$$

$$\begin{cases} \pi(a, b) \approx 0 \Leftrightarrow \text{faible préférence globale de } a \text{ sur } b \\ \pi(a, b) \approx 1 \Leftrightarrow \text{forte préférence globale de } a \text{ sur } b \end{cases} \quad \text{II.23}$$

II.8.1.4 Relation de surclassement valuée

Le graphe valué $(A ; \pi (. , .))$, ayant pour sommets les actions de A et tel que $\forall a, b \in A$, les arcs (a, b) et (b, a) existent et ont comme valeurs respectives $\pi(a, b)$ et $\pi(b, a)$ (figure II.18), détermine la relation de surclassement valuée de PROMETHEE.

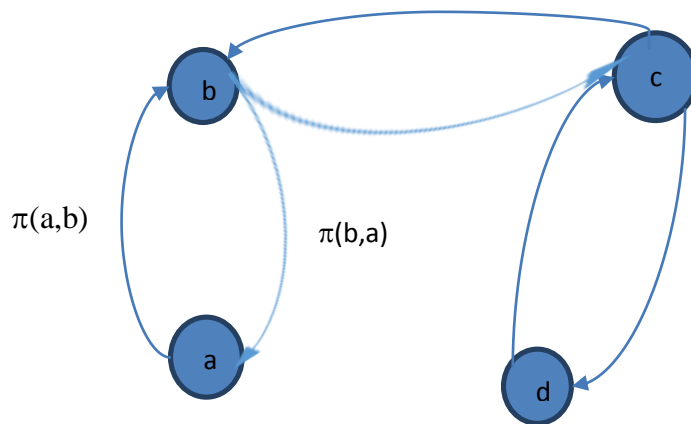


Figure. II.18 Relation de surclassement valuée (J. P. Brans and B. Mareschal, 2002)

On examine que si a surpasse b, $\pi(b,a)=0$ et $\pi(a,b) \geq 0$. En général, $\pi(a,b)$ n'est pas égal à 1 (il pourrait même être égal à 0), la préférence de a sur b n'étant pas nécessairement stricte sur tous les critères.

II.8.1.5 Flux de surclassement

Dans cette section, nous allons estimer comment chaque action de A se manifeste face aux $(n - 1)$ autres actions. Pour cela, nous introduisons les trois flux de surclassement suivants.

II.8.1.6 Flux de surclassement sortant

Soit :

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad \text{II.24}$$

Ce flux formule le caractère surclassant de l'action a face aux $(n - 1)$ autres actions, ou encore sa force.

II.8.1.7 Flux de surclassement entrant

Soit :

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad \text{II.25}$$

Ce flux formule le caractère surclassé de l'action a face aux $(n - 1)$ autres actions, ou encore sa faiblesse.

II.8.1.8 Flux de surclassement net

Soit le flux $\phi(a)$ dont l'expression est :

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad \text{II.26}$$

Ce flux exprime le bilan des flux entrant et sortant de l'action a . Plus $\phi(a)$ est grand, meilleure est l'action. Le flux net d'une action peut être positif ou négatif (il varie de -1 à +1). S'il est positif, l'action surclasse davantage les autres qu'elle est elle-même surclassée, et inversement si le flux net est négatif. Les méthodes PROMOTHEE et leurs variantes ont largement été utilisées pour la résolution de problèmes dans divers domaines (Behazadian et al., 2010).

II.8.1.9 Flux unicritère

Sachant que (II.20), (II.24) et (II.25), on peut déduire :

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \sum_{j=1}^k P_j(a, x) \cdot w_j = \sum_{x \in A} \phi_j^+(a) \cdot w_j \quad \text{II.27}$$

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \sum_{j=1}^k P_j(x, a) \cdot w_j = \sum_{x \in A} \phi_j^-(a) \cdot w_j \quad \text{II.28}$$

Où les quantités

$$\phi_j^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k P_j(a, x) \quad , j = 1, 2, \dots, k \quad \text{II.29}$$

$$\phi_j^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k P_j(x, a) \quad , j = 1, 2, \dots, k \quad \text{II.30}$$

Sont appelées respectivement flux sortant et entrant unicritères.

Si $\phi_j(a)$ désigne le flux net unicritère, c'est-à-dire :

$$\phi_j(a) = \phi_j^+(a) - \phi_j^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)] \quad \text{II.31}$$

On en déduit que :

$$\phi(a) = \sum_{j=1}^k \phi_j(a) \cdot w_j \quad \text{II.32}$$

De (II.31) on déduit aisément :

$$\sum_{j=1}^k \phi_j(a) = 0 \quad \text{II.33}$$

Ce qui signifie que les flux nets unicritères sont centrés à l'origine. Ces deux dernières relations jouent un rôle essentiel dans l'approche GAIA, qui est une procédure visuelle interactive associée à PROMETHEE. Nous en discuterons à la partie suivante.

II.8.1.10 PROMETHEE I : Rangement partiel

Les flux sortant et entrant permettent de ranger les actions de A de façon naturelle. Désignons par (S^+, I^+) et (S^-, I^-) les deux préordres complets induits par ces flux :

$$\begin{cases} a S^+ b \Leftrightarrow \phi^+(a) > \phi^+(b) \\ a I^+ b \Leftrightarrow \phi^+(a) = \phi^+(b) \end{cases} \quad \text{II.34}$$

Une action est d'autant meilleure que son flux sortant est élevé.

$$\begin{cases} a S^- b \Leftrightarrow \phi^-(a) < \phi^-(b) \\ a I^- b \Leftrightarrow \phi^-(a) = \phi^-(b) \end{cases} \quad \text{II.35}$$

Une action est d'autant meilleure que son flux entrant est faible.

PROMETHEE I construit un rangement partiel en prenant l'intersection de ces deux préordres :

$$a P^{(1)} b \Leftrightarrow \begin{cases} a S^+ b \text{ et } a S^- b \\ a S^+ b \text{ et } a I^- b \\ a I^+ b \text{ et } a I^- b \\ a I^+ b \text{ et } a I^- b \end{cases} \quad \text{II.36}$$

$$a I^{(1)} b \Leftrightarrow a I^+ b \text{ et } a I^- b$$

$$a R^{(1)} b \quad \text{Si non}$$

où $(P^{(1)}, I^{(1)}, R^{(1)})$ désignent respectivement la préférence, l'indifférence et l'incomparabilité dans PROMETHEE I. Les résultats possibles de la comparaison de deux actions sont les suivants :

$a P^{(1)} b$: a est préférée à b : dans ce cas, a est simultanément plus « puissante » et moins « faible » que b. L'information produite par les deux flux de surclassement va donc dans le même sens et peut être considérée comme certaine. On peut donc confirmer que a est préférée à b.

$a I^{(1)} b$: a et b sont indifférentes : les force et faiblesse de a et de b sont identiques. Rien ne nous permet objectivement de départager a et b.

$a R^{(1)} b$: a et b sont incomparables : dans ce cas de figure, une plus grande puissance d'une des actions est assortie d'une faiblesse moindre de l'autre. L'information fournie par les deux flux est contradictoire.

II.8.1.11 PROMETHEE II : Rangement complet

Dans certains cas, le décideur désire disposer d'un rangement complet de toutes les actions. PROMETHEE II accomplit un tel rangement. Il est obtenu en considérant le flux net (II.26) :

$$\begin{cases} a P^{(2)} b \Leftrightarrow \Phi(a) > \Phi(b) \\ a I^{(2)} b \Leftrightarrow \Phi(a) = \Phi(b) \end{cases} \quad \text{II.37}$$

Où $P^{(2)}$ et $I^{(2)}$ indiquent respectivement la préférence et l'indifférence au sens de PROMETHEE II. Une action est d'autant meilleure que son flux net est élevé. Il est important de souligner que PROMETHEE II ne laisse pas de place à l'incomparabilité. Une partie de l'information disparaît dans la différence entre les flux (II.26). Le résultat est donc discutable.

II.8.2 Visualisation géométrique : le plan GAIA

Avec les méthodes vues antérieurement, nous avons obtenu les préordres permettant le rangement des actions. GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Assistance) quant à elle est une méthode de visualisation géométrique des données. GAIA complète et prolonge harmoniquement les conséquences obtenus par PROMETHEE. Cette approche date de 1988 avec la première publication par Bertrand Mareschal et Jean Pierre Brans et a connu depuis lors plusieurs développements complémentaires et d'applications économiques et industrielles.

II.8.2.1 Principe

Considérons le problème multicritère (tableau II.5) dont les données sont assemblées dans un tableau d'évaluations $f_j(a_i)$; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, k$. Les flux unicritères (II.31) calculés auparavant déterminent la matrice Φ suivante :

$$\begin{bmatrix} \phi_1(a_1) & \phi_2(a_1) \cdots \phi_j(a_1) \cdots & \phi_k(a_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_1(a_n) & \phi_2(a_n) \cdots \phi_j(a_n) & \phi_k(a_n) \end{bmatrix} \quad \text{II.38}$$

Cette matrice est similaire au tableau d'évaluations initial (Tableau II.5). Elle est néanmoins plus riche en information car les flux nets unicritères tiennent compte des degrés de préférence attribués aux écarts observés entre les évaluations. GAIA est une méthode visuelle interactive dont le but est de faire montrer graphiquement l'information contenue dans cette matrice. Chaque action est représentée par un point α_i :

$$\alpha_i: (\phi_1(a_i), \phi_2(a_i), \dots, \phi_j(a_i), \dots, \phi_k(a_i)) \quad \text{II.39}$$

$i = 1, 2, \dots, n$, d'un espace euclidien à k dimensions dont les axes sont représentatifs des critères.

Nous disposons alors dans \mathcal{R}^k d'un nuage de n points, centré à l'origine. Dans la mesure où il est impossible de visualiser ce nuage dans \mathcal{R}^k , Il sera projeté orthogonalement sur un plan passant par l'origine, et ce de manière à perdre aussi peu d'information que possible. Ce plan est nommé plan GAIA.

Les vecteurs unitaire $e_j (j = 1, 2, \dots, k)$ de \mathcal{R}^k , qui représentent les différents critères, sont également projetés sur le plan GAIA. Soient $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ les projections des points du nuage et $c_j (1, 2, \dots, k)$ celle des vecteurs unitaires de \mathcal{R}^k (tableau II.6).

Tableau II.6. Projections

	\mathcal{R}^k	Plan GAIA
Actions	α_i	A_i
Critères	e_j	C_j

Le plan GAIA est obtenu par la technique de l'analyse en composantes principales, dont quelques principes de base sont rappelés au paragraphe suivante.

Le vecteur $w : (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_k)$ des poids fixant l'importance relative des critères peut également être projeté sur le plan GAIA. L'axe correspondant est appelé axe de décision PROMETHEE et donne la direction dans laquelle se trouvent les actions les meilleures du classement PROMETHEE II.

II.8.2.2 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales est abordée avec plus de détails dans le chapitre 4 de (J. P. Brans and B. Mareschal, 2002). On abordera ici, que les résultats obtenus par l'analyse en composantes principales.

Partant de la matrice variance-covariance C des Φ_i (les Φ_i étant centrés à l'origine) tel que $nC = \Phi' \Phi$, on détermine les valeurs propres (ainsi que les vecteurs propres qui leurs sont associés) de cette matrice. Etant donné que c 'est une matrice symétrique et semi-définie positive, toutes ses valeurs propres sont réelles et non négatives.

En choisissant λ_1 et λ_2 les deux plus grandes valeurs propres de la matrice Φ d'une part, u et v les vecteurs propres unités qui sont associés à λ_1 et λ_2 respectivement, il est aisé de vérifier que $u \perp v$ et que les deux vecteurs déterminent le meilleur plan sur lequel peut être projeté les points du nuage.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n |op_i|^2 = u' C_u = \lambda_1 \\ \sum_{i=1}^n |oq_i|^2 = v' C_v = \lambda_2 \end{cases} \quad \text{II.40}$$

où p_i et $q_i (j = 1, 2, \dots, n)$ sont respectivement les projections des points α_i sur les vecteurs u et v , la quantité :

$$\delta = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\sum_{j=1}^k \lambda_j} \quad \text{II.41}$$

Est un paramètre qui permet de mesurer la quantité d'informations préservée en projetant le nuage sur le plan.

Les points A_i (projections des points α_i sur le plan (u,v)) ont pour coordonnées :

$$\begin{cases} |Op_i| = \alpha_i' u \\ |Oq_i| = \alpha_i' v \end{cases} \quad \text{II.42}$$

D'une manière générale, les coordonnées de la projection d'un point quelconque x de \mathcal{R}^k sur le plan (u,v) sont données par $(x'u)$ et $(x'v)$.

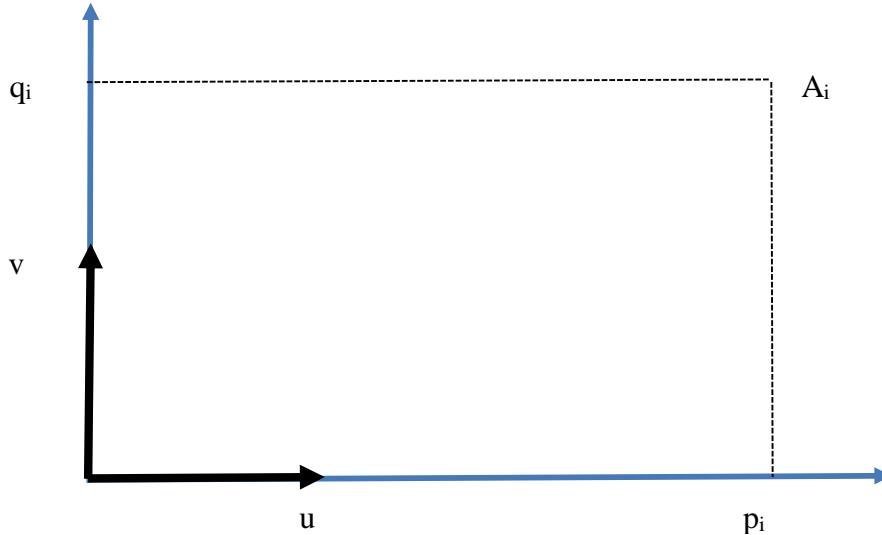


Figure II.19. Coordonnées des points A_i

En vue de représenter également les critères dans ce plan, les vecteurs unités de \mathcal{R}^k sont également projetés :

$$e_j : (0,0,\dots,1,0,\dots,0) \quad j=1,2,\dots,k \quad \text{II.43}$$

Soient c_j ($j=1,2,\dots,k$) les axes ainsi obtenus dans le plan GAIA. c_j est représentatif du critère f_j . Les coordonnées (u_j, v_j) de l'extrémité de cet axe conformément à (figure II.19), sont données par :

$$\begin{cases} u_j = e_j' u \\ v_j = e_j' v \end{cases} \quad j=1,2,\dots,k. \quad \text{II.44}$$

L'interprétation de la longueur et de la position des axes c_j dans le plan GAIA est particulièrement intéressante pour la compréhension du problème multicritère.

Remarques

1- Pouvoir distinguant des critères

Si le critère généralisé associé à $f_j(\cdot)$ caractérise fermement les actions, la variance $\phi_j(\cdot)$ est importante. Au contraire, pour un critère généralisé qui caractérise peu les actions, la variance de $\phi_j(\cdot)$ est plus petite et l'analyse en composantes principales va avoir tendance à favoriser les critères distinguant.

On observe que les longueurs des axes c_j permettent de comparer le pouvoir distinguant des différents critères : en général, plus c_j est long et plus $f_j(\cdot)$ différencie les actions.

2- Critères similaires

Dans la représentation graphique GAIA, les axes des critères sont dirigés dans des directions voisines l'une de l'autre, c'est le cas des critères c_1 et c_2 illustrés dans la figure II.19.

3- Critères contradictoires

Dans la représentation graphique GAIA, les axes des critères sont dirigés dans des directions opposées l'une de l'autre. C'est le cas des critères c_4 et c_1 montrés dans la figure II.19.

4- Critères indépendants

Dans la représentation graphique GAIA, les axes représentant les critères sont environ orthogonaux. C'est le cas des critères c_2 et c_3 .

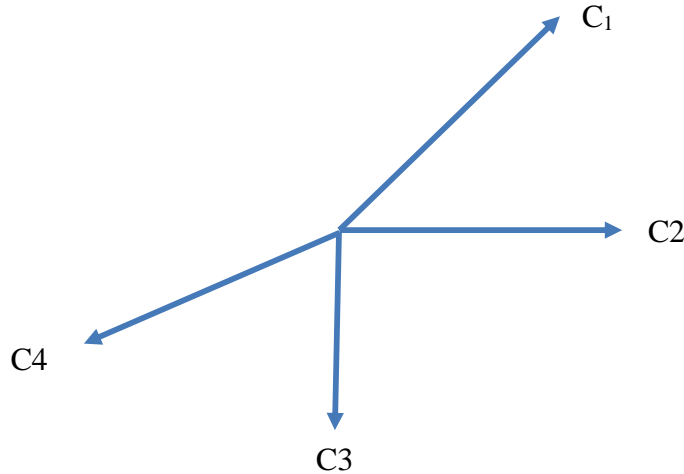


Figure II.20. Représentation des critères dans le plan GAIA

II.8.2.3 Représentation des actions

Les actions a_i ($i=1,2,\dots,n$) sont présentées par des points α_i dans \mathfrak{R}^k et par des points A_i dans le plan GAIA (figure II.21).

Caractéristiques

- 1- Si deux actions a_r et a_s sont telles que leurs images A_r et A_s soient proches l'une de l'autre dans le plan GAIA, elles sont caractérisées par des lignes α_r et α_s similaires dans la matrice Φ . En particulier, les points localisés proches de l'origine caractérisent des actions moyennes qui constituent souvent de bons compromis en présence de critères forts contradictoires.
- 2- A propos du rapport entre une action a_i et un critère f_j , une action a_i ayant une image A_i proche de l'extrémité de l'axe c_j est considérée comme étant bonne pour ce critère.
- 3- Une action bonne pour un critère f_j l'est aussi pour tout critère similaire à f_j et mauvais pour tout critère contradictoire.
- 4- Deux actions sont incomparables si elles sont localisées dans des directions inverses du plan GAIA, ce qui correspond à des critères contradictoires. Cette incomparabilité est d'autant plus grande que la distance entre ces actions est grande.

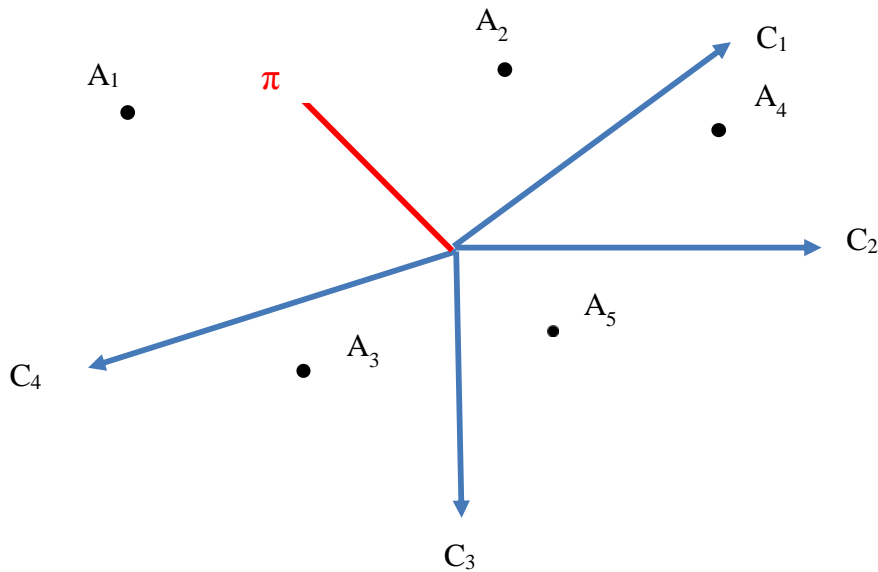


Figure II.21 Figuration des critères dans le plan GAIA

II.8.2.4 Axe de décision PROMETHEE

Considérons à présent le vecteurs poids :

$$w : (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_k) \quad \text{II.45}$$

On peut exprimer le flux net en fonction des flux unicritères et des poids (II.32).

$$\phi(a_i) = \sum_{j=1}^k \phi_j(a_i) \cdot w_j = (\alpha_i, w) \quad \text{II.46}$$

Le flux net est donc le produit scalaire entre α_i et w , l'axe w permet de ranger les actions. La projection π du vecteur unité \bar{w} correspondant à w avec $w/\|w\|$ dans le plan GAIA est appelé axe de décision PROMETHEE (la ligne rouge dans la figure II.20).

Compte tenu de (II.44) :

$$\pi = \bar{w}'u + \bar{w}'v = \sum_{j=1}^k (u_j + v_j) \cdot \bar{w}_j = \sum_{j=1}^k c_j \cdot w_j \quad \text{II.47}$$

π est donc une combinaison linéaire des c_j et l'on observe que si la totalité du poids est concentrée sur un seul critère $f_h(w = 0, 0, \dots, 1, 0, \dots, 0)$, $\pi = c_h$, c'est à dire que le vecteur π se confond alors avec c_h . Nous pouvons ajouter que plus grandes sont les longueurs de π et des c_j , plus faible est l'information représentée.

Analyse

- 1- Lorsque l'axe de décision π est long, le décideur est appelé à décider aussi loin que possible dans sa décision.
- 2- Si π est court, l'axe de décision n'a pas la capacité de décision très forte, w est à peu près orthogonal au plan GAIA. Cela correspond à une situation où certains critères sont très contradictoires et un bon compromis peut alors souvent être trouvé près de l'origine.
- 3- Plus une action est bonne, plus loin est située son image dans la direction de l'axe π .

Pour empêcher tout désordre, il est préconisé de comparer le plan GAIA au rangement PROMETHEE II.

II.8.2.5 Analyse de la sensibilité : Stick de décision

La théorie développée dans les paragraphes précédents montre que les positions des critères et des actions dans le plan GAIA restent inchangées en cas de modification des poids. Seuls sont modifiés : la position de w dans \mathcal{R}^k , la position de l'axe de décision π dans le plan GAIA, et bien entendu le rangement PROMETHEE II. Grâce au stick de décision w , le décideur peut se livrer à un véritable pilotage multicritères. Il peut pousser dans l'une ou l'autre direction en faisant apparaître dans chaque cas les décisions les meilleures.

CONCLUSION

Une décision nécessite la prise en considération de plusieurs critères hétérogènes et souvent antagonistes. Ce nombre important de critères, couplé au fait qu'il ne peut exister de solution permettant l'optimisation concomitante de l'ensemble de ces critères, met la prise de décision difficile et problématique. L'utilisation de méthodes multicritères peut alors clarifier et simplifier le choix du décideur. Au préalable la démarche de l'analyse multicritère, est identique à l'ensemble des méthodes, permet de définir un canevas précis et rigoureux du processus de décision. Ce canevas permet de dissocier le problème et d'élucider un certains nombres de difficultés. Il permet particulièrement de définir formellement le problème et ses objectifs, d'établir et de déterminer l'ensemble des critères de décision, d'exprimer l'importance de ces critères et de concevoir les différentes alternatives au problème.

A la fin de ces différentes étapes, il est possible qu'une solution se distingue parmi les différentes alternatives de départ. Néanmoins, si aucune alternative ne se manifeste clairement comme préférable aux autres, les méthodes multicritères sont des outils qui permettent alors d'éclairer et de démêler la décision. Il existe plusieurs méthodes d'analyse multicritères fondées sur des principes différents et ayant donc, des modes d'action très distincts, et le choix de telle ou de telle méthode est souvent laborieux. On distingue toutefois deux principaux concepts dans les méthodes multicritères. Le premier, qui est originaire de l'école de réflexion anglo-saxonne et échu de la théorie de l'utilité, vise les méthodes d'agrégation complète. Ces méthodes sont appuyées sur la construction d'une fonction d'utilité, spécifique du problème initial, qu'il faut optimiser. Le second concept, est natif de l'école francophone et s'appuyant sur le principe de Condorcet, concerne les méthodes d'agrégation partielle. Ces méthodes sont conçues sur des relations de surclassement réalisées à partir de comparaison par paire des différentes alternatives. La philosophie de ces méthodes est fondée sur l'axiome de Condorcet qui formule qu'une alternative est meilleure qu'une autre si elle est au moins aussi bonne pour une majorité de critères sans être clairement plus mauvaise pour les autres critères. Le choix d'une méthode d'analyse multicritère n'est donc pas insignifiant, chaque méthode ayant ses caractéristiques intrinsèques et dépendant de problématiques diverses.

Ces méthodes sont des outils très efficaces dans un processus de décision, néanmoins, comme tous les outils il faut connaître dans quel cas et comment les user. Il est préférable toujours d'utiliser ces méthodes avec un esprit critique, et de tester la validité et la robustesse des résultats obtenus. Les méthodes d'analyse multicritères ne doivent être des outils d'affirmation, confirmant telle ou telle solution définie préalablement, nonobstant, des outils de réflexion permettant de mieux appréhender le problème.

Il existe une grande distinction dans les principes des deux écoles de l'analyse multicritères, ce qui mène à des méthodes ayant des fonctionnements très diversifiés et pouvant donner des résultats incohérents. Dans le cadre d'un problème environnemental, se pose alors la question de savoir quel type de méthode est la plus adéquate. De par leur principe de fondement, s'appuyant sur le principe de Condorcet et donc la recherche de consentement

entre les critères, les méthodes d'agrégation partielles semblent mieux adaptées à un problème environnemental, alors que les méthodes d'agrégation complète sont certainement mieux adaptés aux problèmes d'optimisation ayant une marge plus restreinte (pour des problèmes appropriés aux finances ou techniques à titre d'exemple). Il a été décidé d'utiliser dans le cadre de cette thèse deux méthodes provenant chacune d'une école de concept différent. Cela permettra d'un point de vue de comparer le fonctionnement et le comportement de chacune des méthodes, et de l'autre de pouvoir conforter ou d'infirmer, les résultats obtenus pour chacune des méthodes et donc de parfaire la recommandation finale. La méthode d'agrégation partielle employée sera PROMETHEE, qui est la méthode la plus appropriée pour les problèmes environnementaux et AHP sera la méthode d'agrégation complète testée en parallèle, elle aussi régulièrement employée dans des problèmes liés à l'environnement.

Chapitre III

DETERMINATION DES CRITERES

INTRODUCTION

Le développement et le perfectionnement de techniques de délimitation de bassins versants peuvent être mises en œuvre dans l'environnement SIG, comme les travaux de (Ocallaghan et Mark, 1984), (Jenson et Domingue, 1988), (Band, L. E., 1986), (Tarboton et al, 1991), (Fairfield et leymarie, 1991), (Verdin ,1999), (Turcotte et al ., 2001), (Vogt et al., 2003), (Jordan et Schott, 2005) et Merkel et al.(2008) l'ont montré.

Jenson et Domingue (1988), affirment que des paramètres hydrologiques extraits de MNT se montrent compatibles avec ceux obtenues avec les méthodes manuelles lesquelles exigent plus de temps pour le traitement, et moins dans sa configuration (Tarobotton et al., 1991) et (walker et Wilgoose, 1999) décrivent que le MNT présente une bonne corrélation entre la déclivité et le secteur de contribution en exhibant les points d'inflexion qui marquent le début de la captation fluviale de manière que le filet puisse être déterminé avec une confiance élevée.

Le MNT rend possible l'obtention d'information sur les variations d'altitude de la surface terrestre en étant applicable à diverses études rapportées à la géomorphologie à l'analyse du réseau hydrographique, à la délimitation de secteurs inondables et à la délimitation automatique de bassins hydrographiques.

La mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) réalisée en 2000 et met à disposition publiquement les données à l'échelle globale par l'intermédiaire de l'USGS(2002) (United States Geological Survey). Diverses recherches sont conduites avec l'objectif d'analyser, comparer et mettre à jour des informations de la surface terrestre au moyen de données SRTM (Gerstencker et al. 2005), en évaluant plusieurs bases pour la génération de MNT des cartes topographiques ont conclu que la mission SRTM est une étape d'importance considérable. (PINHEIRO, E.S., 2006) a conclu que les altitudes mesurées par MNT obtenues des données SRTM après correction ont présenté des résultats meilleurs comparés avec les MNT produits à partir des cartes topographiques aux échelles 1/50000.

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'analyse d'une méthodologie pour la délimitation automatique et la détermination de quelques caractéristiques morphométriques de bassin versant en utilisant les données SRTM, intégrées et traitées dans un environnement SIG validés dans le territoire de la wilaya de Mostaganem.

Le processus de délimitation automatique de bassins versants a été développé sous l'outil Free Open Source SAGA GIS. La méthodologie illustrée dans la figure III.1 obtenue dans ce processus s'est subdivisée en plusieurs étapes : remplissage de dépressions « fill sinks », direction de flux « flow direction », flux d'accumulation « flow accumulation » et délimitation de bassins « watershed »...etc.

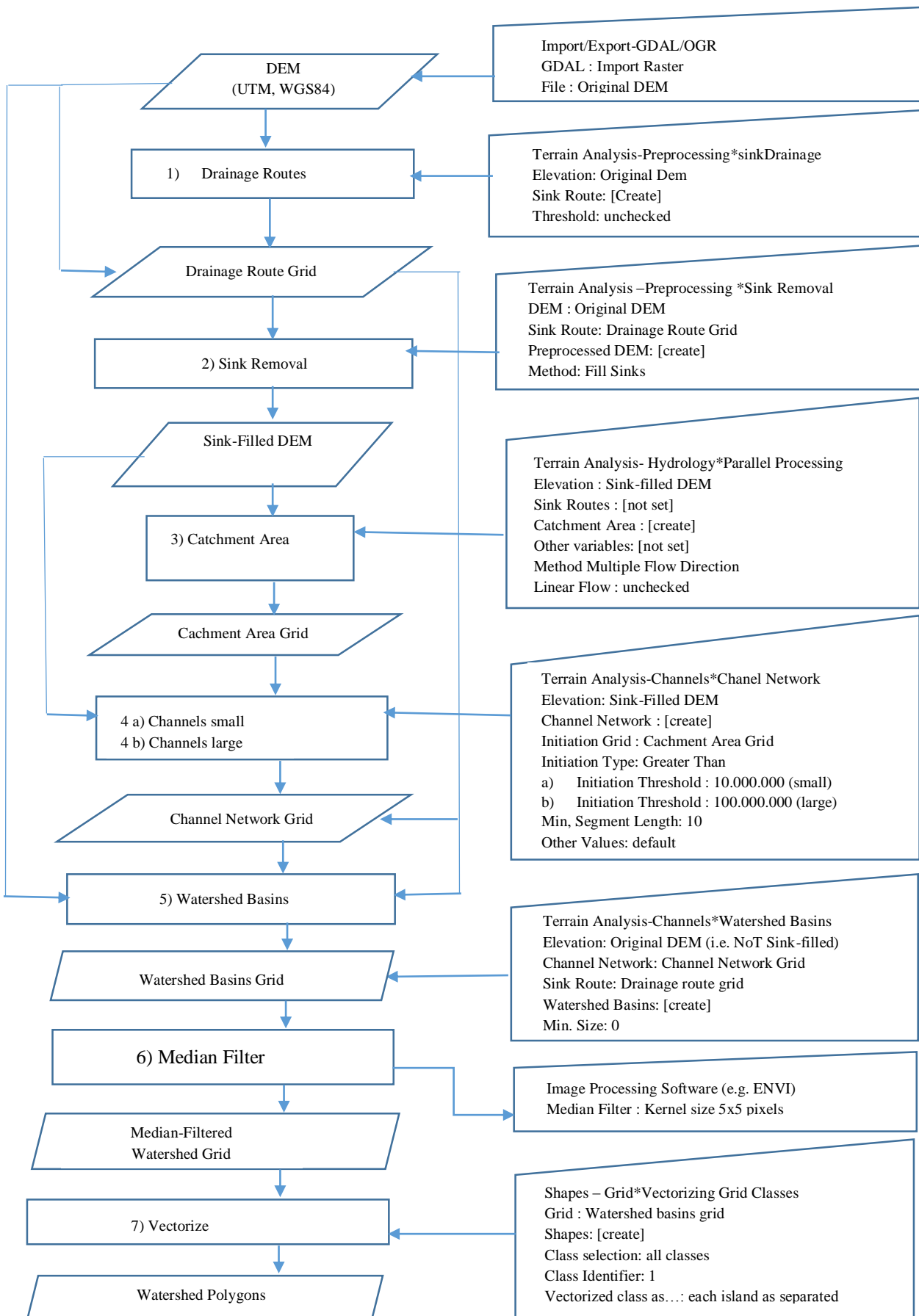


Figure III.1: Diagramme pour le calcul de bassins versants d'un MNT. Les instructions contenues dans la colonne de droite se réfèrent à SAGA-GIS logiciel la version 2.0.8. Les fonctions sont situées dans la fenêtre de l'espace de travail sur le panneau Modules.

Les sites de l'ouvrage à projeter sont situés dans le territoire de Mostaganem dans les bassins versants codifiés par L'ABHCZ¹ respectivement 0136 : SBV Oued Chélif Maritime du BV Bas Cheliff et Mina codifié 01 dans la figure III.2. et, 0201 : SBV côtier Guelta du bassin hydrographique du côtier Dahra codifié 02 dans la figure III.2. Les coordonnées des centroides des bassins déterminées par l'utilisation du logiciel SIG open source SAGAGIS² sont récapitulées dans le tableau III.1 :

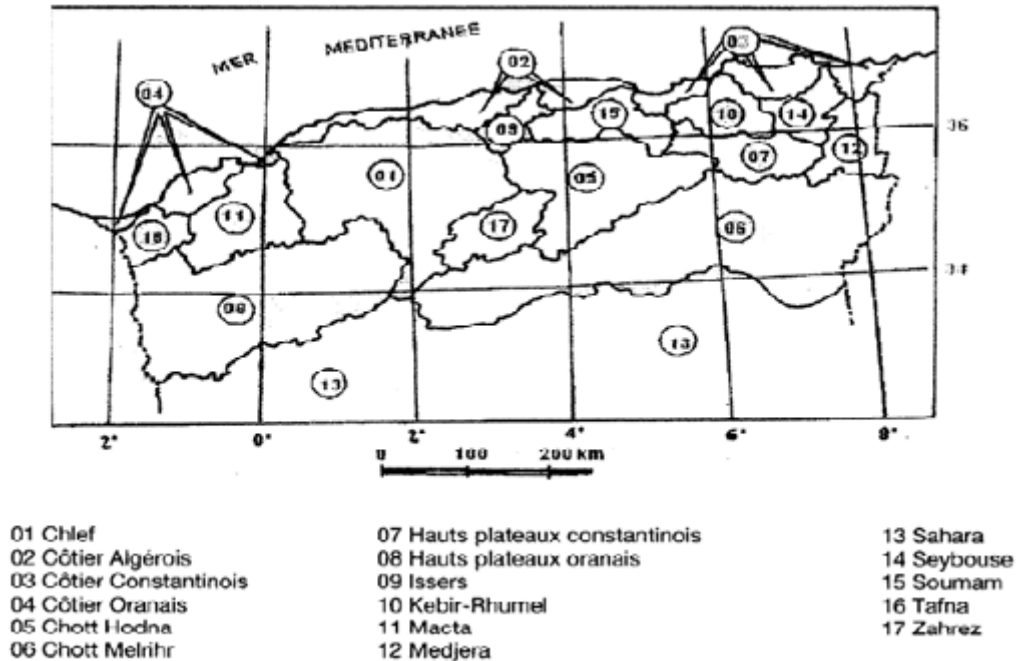


Figure III.2 Principaux bassins versant de L'Algérie

III.1 GEOMORPHOMETRIE

La description morphologique du terrain est réalisée par géomorphométrie (Rasemann et al. 2004) définissent la géomorphométrie comme étant la « science de la description quantitative et de l'analyse des caractéristiques géométriques-topologiques de la surface terrestre ». Elle rassemble la géoscience, les mathématiques et l'informatique pour modéliser la surface terrestre, la paramétrer puis l'analyser. En conséquence, plusieurs applications utilisent cette science pour répondre à leurs besoins. La figure III.3 représente les sources et les applications de la géomorphométrie.

¹ ABHCZ : Agence du bassin Hydrographique Cheliff Zahrez

² SAGA : System for Automated Geoscientific Analyses: <http://www.saga-gis.org/en/index.html>

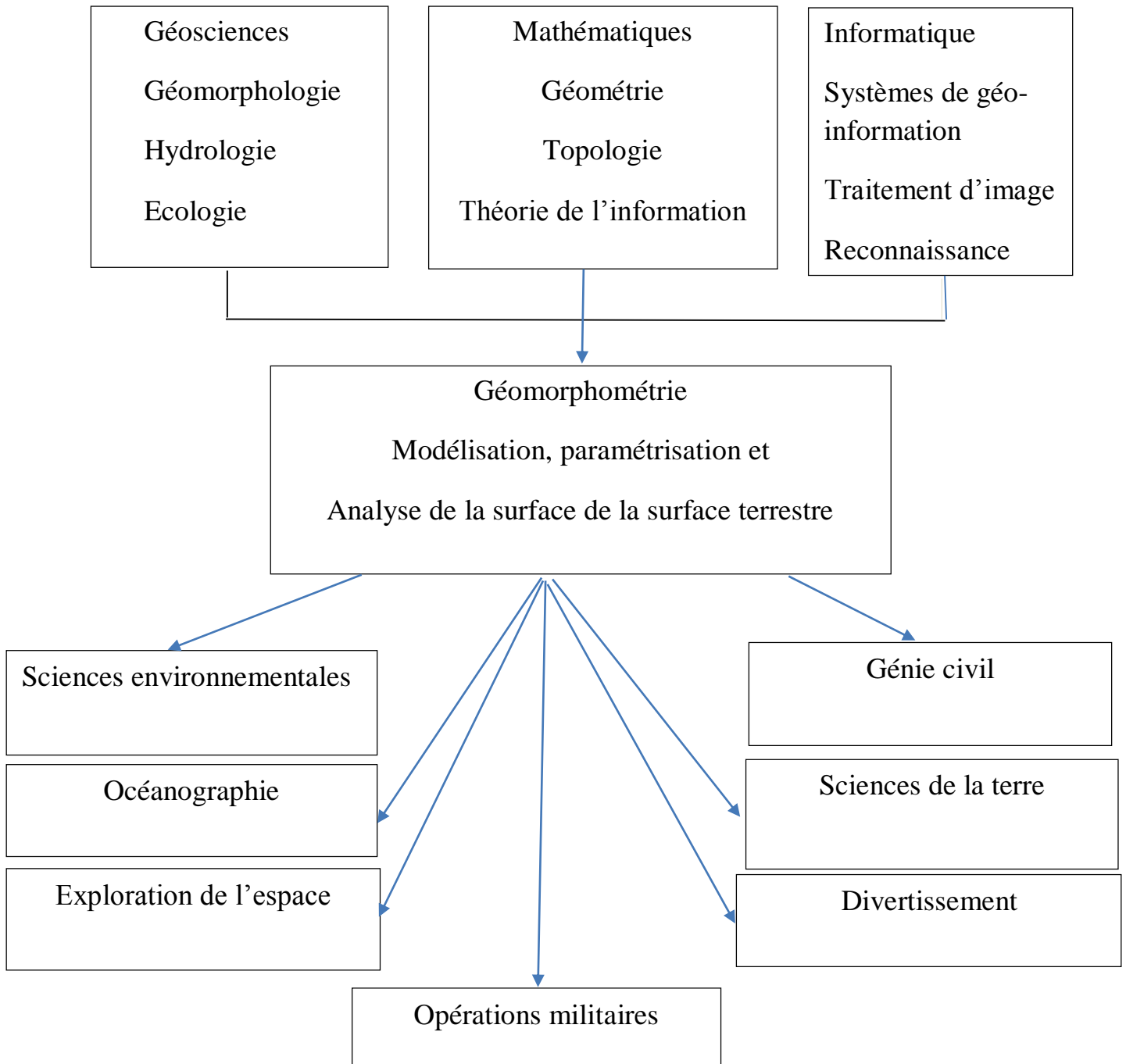


Figure III.3. Sources et applications de la géomorphométrie (source : Pike et al., 2008).

L'invention des MNT a permis de passer de la plateforme physique à la plateforme numérique, ce qui a beaucoup facilité la quantification numérique des indices morphologiques tels que la pente et la courbure. Cette quantification a permis ensuite d'analyser la surface terrestre et les différents phénomènes affectant cette surface.

III.1 .1 Descripteurs hydrographiques

Le bassin versant et le réseau hydrographique sont aussi extraits du MNT. Ces objets gouvernent l'écoulement de l'eau vers un exutoire. Le bassin versant est une surface hydrologiquement close comprenant le réseau hydrographique amenant l'eau de l'amont à

l'aval jusqu'à l'exutoire. Dans cette étude, nous nous intéressons à la description de la forme du bassin versant et à la géométrie et la topologie du réseau hydrographique.

III.1.2 Extraction du bassin versant et du réseau hydrographique

Nous avons utilisé le logiciel SAGAGIS pour extraire les bassins versants et le réseau hydrographique. La première étape dans cette extraction est le remplissage du MNT pour ne pas obtenir un réseau hydrographique discontinu à cause de la présence des dépressions. Un point ayant une altitude plus petite que ses 8 points voisins est considéré comme dépression et son remplissage se fait en se basant sur ces points. Ensuite, la direction du flux est extraite suivant la pente maximale calculée par trigonométrie sur une fenêtre carrée 3×3. En se basant sur cette direction de flux, les bassins versants et le réseau hydrographique peuvent être obtenus.

III.2. RANGEMENT DE BASSIN VERSANT POUR L'IMPLANTATION D'UN EQUIPEMENT HYDRAULIQUE

Les étapes suivantes décrivent, le processus de classification de bassins versants pour l'implantation d'un ouvrage hydraulique, dans notre cas une « retenue collinaire » dont les principales composantes sont décrites dans la figure III.5. Jadis le document topographique privilégié pour le dimensionnement des retenues collinaires et les barrages étaient les cartes topographiques au 1/50000. La totalité des équipements hydrauliques en exploitation actuellement ont été étudiés sur la base de ces documents cartographiques. Nous avons fait une étude comparative des caractéristiques morphométriques extraites des deux documents suscités, les résultats ont été très satisfaisants, c'est pour cette raison que nous avons opté pour le MNT de 90 m de résolution présenté dans la figure III.4 couvrant la région d'étude et nous avons utilisé l'outil SIG SAGAGIS2.08.

Figure III. 4. Carte de MNT obtenue avant traitement de données SRTM sous SAGAGIS.

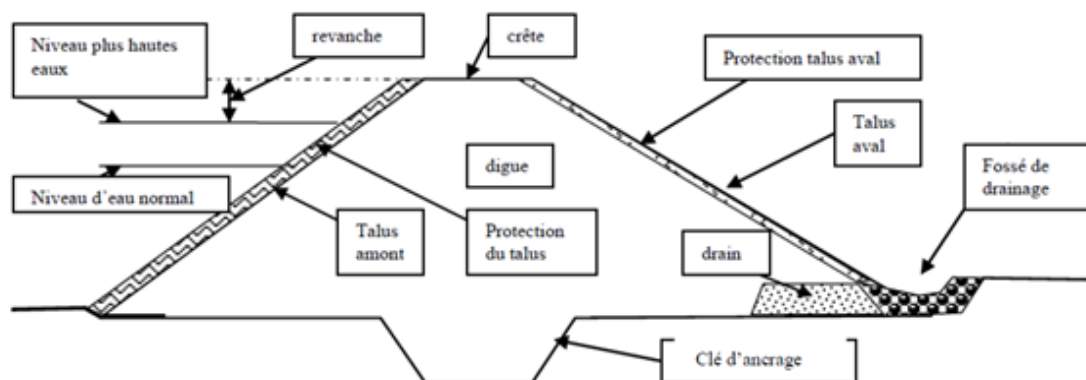


Figure III.5 Schéma d'une retenue en digue homogène

III.2.1 Définition des alternatives

Chaque chevelu hydrographique important, faisant partie de la zone d'étude est susceptible d'être obstrué par une digue pour former un ouvrage hydraulique, et par conséquent il peut constituer une alternative. Dans le cadre de notre application, les alternatives que nous allons étudier sont des alternatives présentant les sous bassins versants élémentaires drainés par les principaux chevelus hydrographiques du territoire de la wilaya de Mostaganem. Toutes les informations relatives à ces entités ont été déterminées par l'utilisation de l'outil SIG; celles concernant les informations relatives à l'hydrologie ont été déterminées en s'appuyant sur les données situées dans un contexte hydrométéorologique similaire ou l'utilisation des formules empiriques, des sorties sur terrain faites par nos soins.

La délimitation correcte des lignes de partage des eaux est essentielle pour les unités territoriales pour la planification et la gestion des ressources en eau. Ainsi, ce travail vise à évaluer une méthodologie pour la délimitation automatique des bassins de drainage. Les données topographiques SRTM ont été intégrées et traitées dans le système d'information géographique (SIG). Les résultats montrent des valeurs de secteur compatibles avec ceux obtenues sur les données topographiques. Ainsi, l'automatisation de la délimitation des lignes de partage des eaux par les données SRTM et l'environnement SIG semble être avantageuse par rapport aux avantages de coûts et bénéfices.

III.2.2 Des itinéraires de drainage

Les itinéraires de drainage sont nécessaires pour le comblement de dépressions et pour le calcul de la ligne de partage des eaux dans SAGA GIS :

- a- Sélectionner la fonction **Terrain Analysis-reprocessing** : Sink Drainage Route detection
 - i. Select the Grid System
 - ii. Pour l'élévation sélectionner le MNT
 - iii. Set sink route to [create] et
 - iv. Sous les options laissé le seuil inchangé et laissé le seuil à sa valeur par défaut.

Exécuter et sauvegardez la grille « drainage route », sous un nouveau nom

III.2.3 Remplissage de dépression « fill sinks »

Enlever les dépressions et les puits du MNT. C'est nécessaire parce que les dépressions et les puits sont problématiques pour l'analyse hydrologique en général et pour le calcul des lignes de partage des eaux en particulier, puisque l'eau ne peut s'écouler dans ces endroits : par conséquent le calcul de la ligne de partage des eaux ne s'effectue pas de façon correcte dans SAGA GIS. La précision des données de SRTM a été vérifiée de diverses façons par plusieurs chercheurs (Jarvais et al., 2004), (Rodriguez et al., 2006), (Kocak, G., et al., 2005), (Smith, B., Sandwell, D ; 2003), (Sun et al., 2003). Néanmoins, l'étude développée par (Falorini et al., 2005) et (KAAB, 2005), indique que la précision des données du SRTM dépend de la topographie locale en constatant une plus grande fréquence d'erreurs dans les données afférentes à des terrains avec relief raide ou montagneux. Les imperfections dans MNT dans les données SRTM sont appelées des « Sinks » illustré dans la figure III.6 ci-après. Le remplissage de ces petites dépressions est le premier traitement donné à la matrice d'altitude.

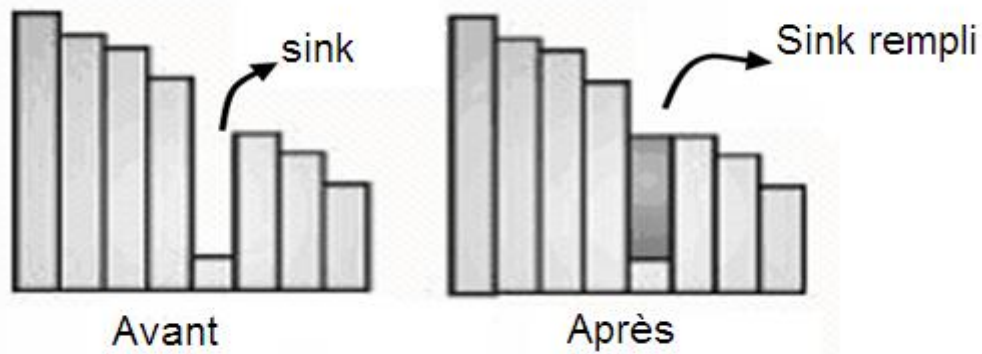


Figure III.6 : Correction du type d'erreurs de dépression par l'application de la fonction « Fill Sinks »

Conformément à la figure III.5, les corrections de MNT sont faites au moyen de la fonction « fill sinks » du module de SAGA GIS, il considère les altitudes des pixels voisins pour remplir les « sinks » en promouvant ainsi, la génération de la carte MNT avec consistance meilleure, telle exposée dans la figure III.7.

- a- Sélectionner la fonction **Terrain Analysis-reprocessing** : Sink Drainage Route détection
 - i. Select the Grid System et le MNT
 - ii. Pour « Sink Route » sélectionner la grille Drainage Route créée dans l'étape 1
 - iii. Set preprocessed MNT à créer et
 - iv. Choisir une méthode pour « fill sink »

Exécuter le processus et enregistrer le MNT corrigé sous un nouveau nom

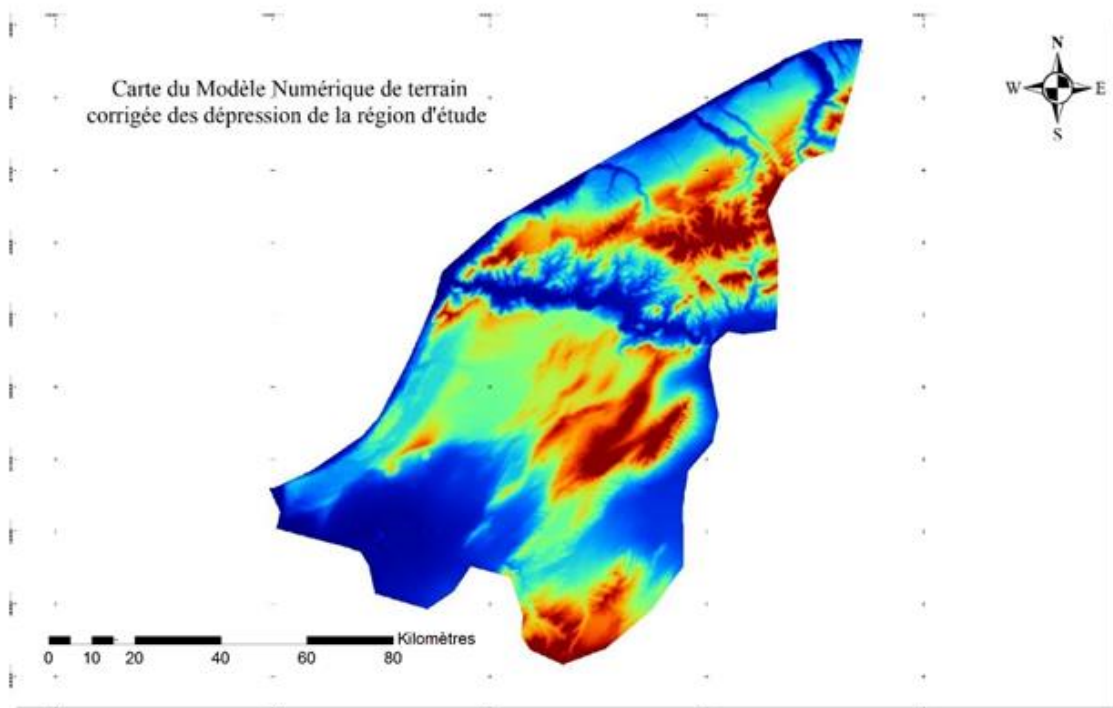


Figure III. 7. Carte de MNT obtenue après traitement de données SRTM sous SAGAGIS.

III.2.4 Catchment area (aire de contribution)

Calculer le bassin de captation exposé dans la figure III.8, pour chaque pixel. Le bassin de captation est défini comme étant un secteur de toutes les cellules de déclivité descendante qui fournissent l'écoulement d'eau à la cellule considérée, plus la surface de la cellule elle-même. Le bassin de captation est exigé comme une couche de données d'entrée pour le calcul des lignes de partage des eaux dans SAGAG GIS.

- a- Sélectionner la fonction **Terrain Analysis-Reprocessing** : hydrology –catchment area (parallel) et
 - i. Sélectionner le Grid System
 - ii. Pour l'élévation sélectionner le MNT rempli créée dans l'étape 2
 - iii. Mettre bassin de captation à créer
 - iv. Laisser tous les autres paramètres inchangés y compris le « sink routes »
 - v. Sous l'option Méthodes choisir « multiple Flow Direction », laisser les autres valeurs par défaut (étape 1 : écoulement linéaire, seuil : 500 et convergence :1)
- b- Exécuter le processus et enregistrer la grille résultante de bassin de captation sous un autre nom.

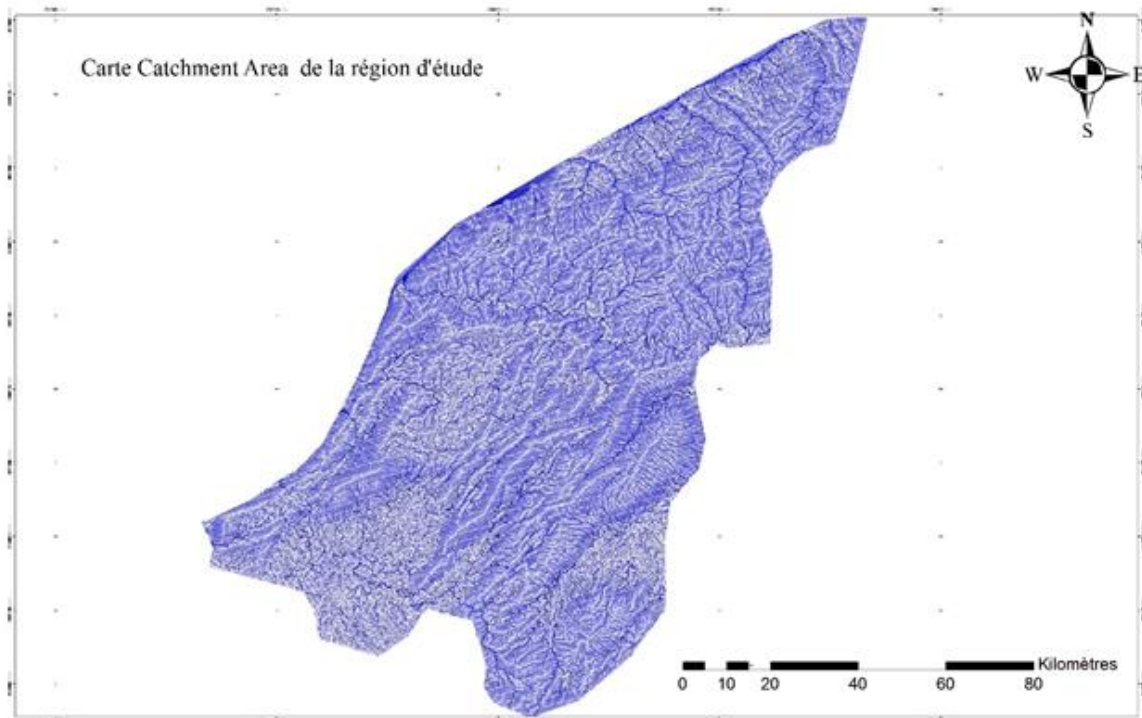


Figure III. 8. Carte des aires de contribution (catchment area) sous SAGAGIS.

III.2.5 Réseau de Drainage (Channel Network)

Calculer le réseau de drainage présenté dans la figure III.9, à deux échelles. L'échelle fine des lignes de partage des eaux ont une aire minimum de 2km², des lignes de partage des eaux sont employées pour extraire des bassins versants. Dans SAGA GIS.

- a- Sélectionner la fonction **Terrain Analysis-Reprocessing** : Channels –Channel Network et
 - i. Sélectionner le Grid System
 - ii. Pour l'élévation sélectionner le MNT rempli créée dans l'étape 2
 - iii. Pour « initiation Grid » sélectionner le bassin de captation créée dans l'étape 3
 - iv. Mettre Channel Network et Channel direction à créer
 - v. Mettre initiation type « Greater than »
 - vi. Mettre le seuil d'initiation à la valeur 2000000
 - vii. La longueur de segment minimal réglée à 10, et laisser tous les autres paramètres à leur valeurs par défaut. Le seuil d'initiation détermine à quel point un canal ou un chevelu

viii. débute. Une valeur de 2000000 m² correspond à 2 km² en tant que secteur ascendant minimum pour qu'un chevelu puisse être pris en considération. Cette valeur commande la taille minimale du bassin (watershed).

b) Exécuter le processus et sauvegarder le résultat de la grille du réseau de drainage sous un nouveau nom. Exportez également la couche vecteur du réseau de drainage en fichier de forme.

c) répéter les étapes 4 a et b, en choisissant un plus grand seuil d'initiation 20. 000000. S'assurer que la fonction est « Terrain Analysis- Channels*Channel Network

i) Remise la grille Système – Channel Network à créer et

ii) Remise de la couche de forme –Channel Network à créer. Enregistrer le résultat sous un nouveau nom. Ce réseau de canal avec un plus grand seuil aura comme conséquence moins de chevelus. C'est la couche employée pour calculer la ligne de partage du bassin.

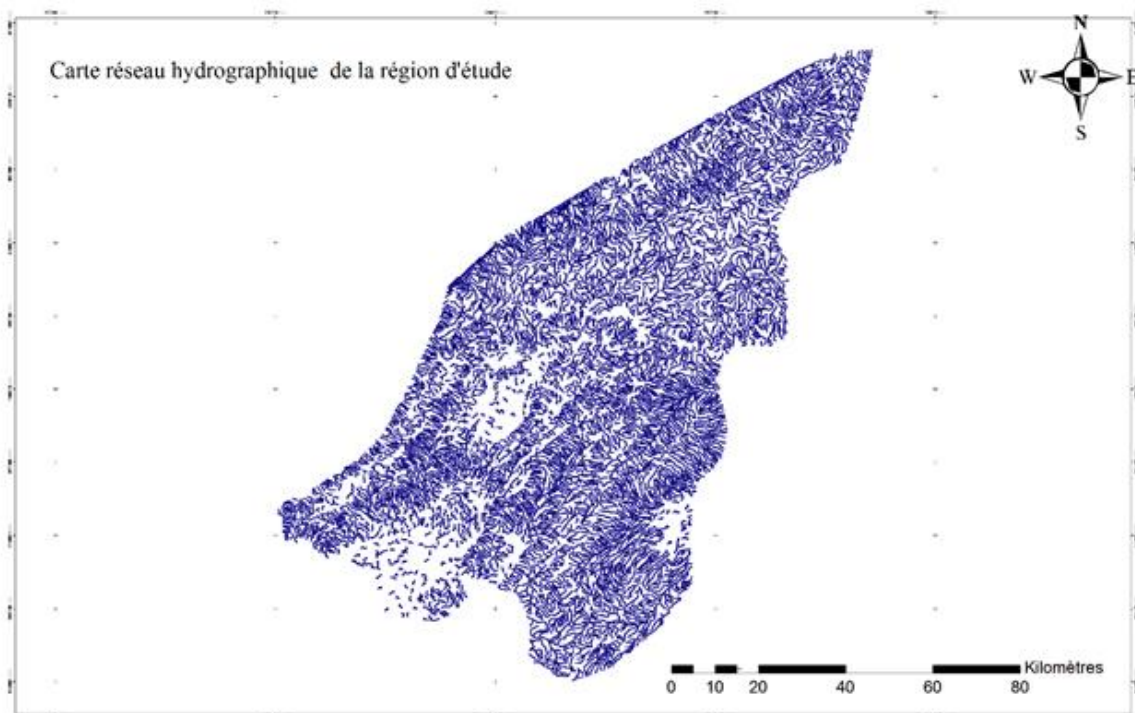


Figure III. 9. Carte du réseau hydrographique (Channel Network) sous SAGAGIS.

III.2.6 Découpage en bassin versant

La délimitation des bassins est réalisée en traitant les cartes de direction de flux et le flux accumulé dans la fonction « watershed ». La valeur de l'aire de chaque bassin produit correspond à la quantité de cellules. Comme chaque cellule du MNT obtenue du SRTM possède un pixel de 90 m, l'aire de chaque pixel est équivalente à 8100 m². De cette façon s'est réalisée la définition de la valeur de cellules en réalisant des essais jusqu'à obtenir au mieux une aire correspondante au secteur d'étude. Le nombre de cellules dans notre zone d'étude est de 45000 cellules. Ainsi, il a été procédé à la délimitation de bassins jusqu'à 364500000 m², équivalent à 36450 ha. Après traitement des informations sous le module

«watershed extension» de SAGA GIS, se sont délimités les bassins, qui ultérieurement ont été convertis pour le format vectoriel dans le module « shape grid ».

Après la délimitation des bassins hydrographiques présentés dans la figure III.10, la commande « channel network » a été utilisée pour l'extraction du réseau hydrographique en utilisant les résultats de flux de direction et du flux d'accumulation et en adoptant une valeur de 500 comme nombre minimum de cellules pour la génération de flux.

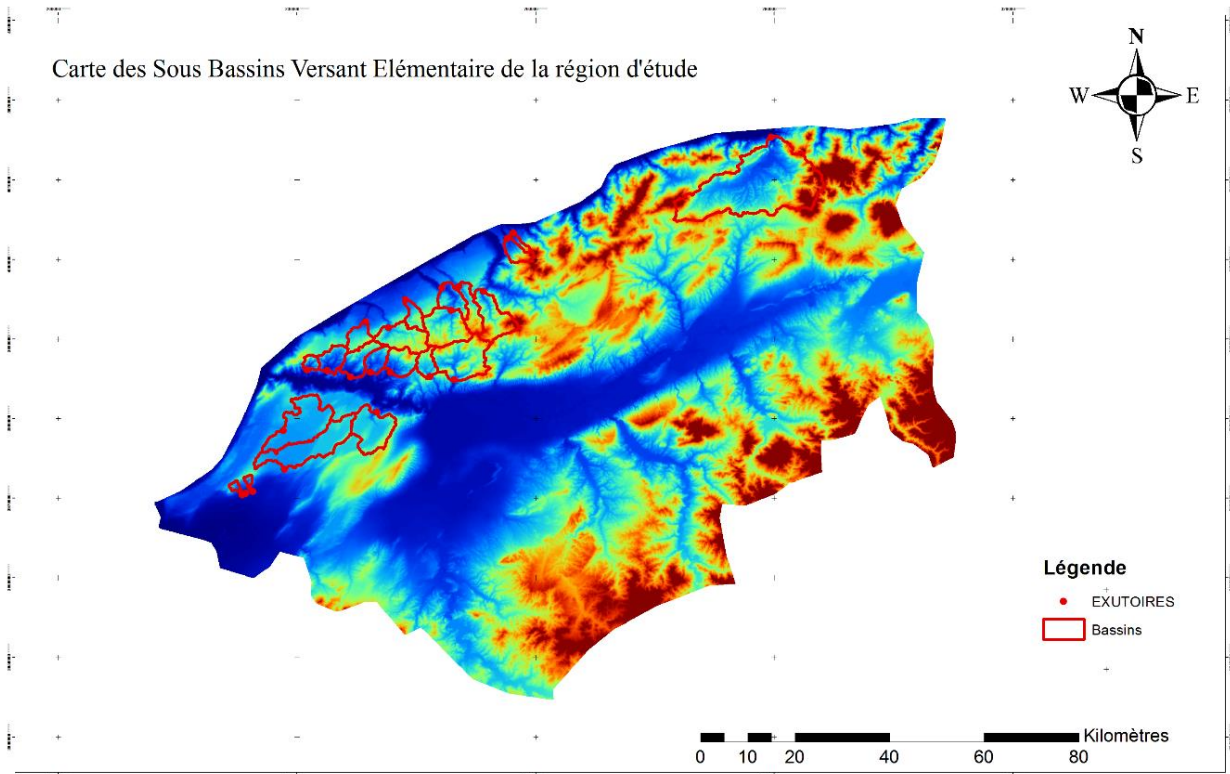


Figure III.10. Carte des Sous bassins versant élémentaires de la région d'étude.

Les coordonnées des centroides et des exutoires des bassins déterminées par l'utilisation du logiciel SIG open source SAGAGIS³ sont récapitulées dans le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1 : Coordonnées géographiques du barycentre des bassins

Nom des bassins	Coordonnées des centroides des bassins		Coordonnées des exutoires des bassins	
	X (m)	Y(m)	X (m)	Y(m)
Sidi_Moussa_SA	261649.79	3999209.41	263153.74	4002554.13
Ain_Sefra	249569.79	3980968.32	245765.74	3979538.13
Ben_Amar_AN	235714.87	3967565.17	237029.74	3965930.13
Ben_Amar_OM	276018.50	3993748.01	276761.74	3990962.13
Bouzuguert	295061.70	4017276.57	293057.74	4020110.13
Cheurfa	280024.51	4001323.96	281297.74	4004906.13
Derdousse	261684.13	3994570.95	259961.74	3990878.13
El_Abid	271170.28	3990082.64	268025.74	4001294.13

³ SAGA : System for Automated Geoscientific Analyses: <http://www.saga-gis.org/en/index.html>

Kaddour_Saider	256186.59	3994712.78	255005.74	3992222.13
Kerrada	265470.32	3994453.93	264161.74	3991886.13
Kouachih	251635.30	3993836.68	250805.74	3992390.13
Malah_AN	238416.68	3968762.31	239297.74	3966686.13
Malah_SA	270609.16	3994107.96	268361.74	3991886.13
Malah_OM	283469.30	3994790.56	281969.74	3990290.13
Oued_El_Kheir	264441.11	3979787.51	265505.74	3983486.13
Roumane	281472.02	4007151.64	279281.74	4009694.13
Seddaoua	273359.70	4003581.29	271637.74	4007174.13
Sidi_Bakhti	290080.17	4003352.06	288101.74	4008938.13
Zaker	295707.90	4019258.56	294317.74	4021286.13
Zerrifa	285503.47	4004937.58	282809.74	4009946.13

Après avoir étudié la cartographie à l'échelle 1 :50000 nous avons pu déterminer les caractéristiques physiques et hydrographiques des bassins drainés par les chevelus hydrographiques les plus importants du territoire objet de notre étude. Le tableau III.2 illustre les superficies déterminées par digitalisation sur la mosaïque des cartes topographiques de base à l'échelle 1 :50000 couvrant la région d'étude et celles déterminées par l'outil SIG SAGAGIS par l'utilisation du SRTM90⁴ de la même région d'étude.

Tableau III.2 : Superficies déterminées par Digitalisation et par l'outil SIG (SAGAGIS)

Nom des bassins	Superficie digitalisée (km ²)	Superficie par SAGAGIS (km ²)
Sidi_Moussa_SA	21.16	21.71
Ain_Sefra	88.01	87.82
Ben_Amar_AN	5.49	4
Ben_Amar_OM	18.23	19.47
Bouzuert	18.57	18.80
Cheurfa	60	61.82
Derdousse	32.51	32.65
El_Abid	46.94	48.88
Kaddour_Saider	23.97	24.41
Kerrada	22.97	20.63
Kouachih	9.9	9.14
Malah_AN	3.22	3.16
Malah_SA	32.78	32.26
Malah_OM	79.16	81.36
Oued_El_Kheir	62.4	61.28
Roumane	30.57	28.23
Seddaoua	16.6	17.41
Sidi_Bakhti	54.83	53.09
Zaker	5.53	6.05
Zerrifa	27.51	28.65

Généralement, pour déterminer la superficie d'un bassin versant, on projette ses limites sur un plan. A l'aide d'un planimètre ou d'un papier millimétré, on évalue la superficie du bassin. Avec l'utilisation de l'outil SIG, ce processus se fait de façon automatique en utilisant le module approprié pour le fichier raster en choisissant seulement

⁴ SRTM90: Shuttle Radar Topographic Mission a 3 arc second (approx. 90 m resolution).

la localisation de l'exutoire. En outre, le tableau III.2 montre bien que les résultats issus de l'utilisation du modèle numérique de terrain sont performants.

En se référant aux différents critères sur lesquels se base le rangement des SBVE pour un ouvrage hydraulique. Les onze critères essentiels énumérés dans le tableau III.3 :

Tableau III.3. Définition des critères

Numéro de critère	Nom du critère	unité	observations
1	Surface	Km ²	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : topographie
2	Indice de compacité	–	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : topographie
3	Pente moyenne du SBVE	%	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : topographie
4	Pente du chevelu Principal	%	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : topographie
5	Densité de drainage du SBVE	Km/K m ²	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : topographie
6	Apport liquide	Hm ³	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : hydrologie
7	Apport solide	Hm ³	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : hydrologie
8	Débit de crue	m ³ /s	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : hydrologie
9	Géologie site ouvrage	nominale	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : géologie
10	Périmètre irrigué	ha	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : topographie
11	Facteur économique	–	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : économie

III.3.1 Surface et périmètre du bassin versant élémentaire

Ces deux paramètres ont été déterminés par l'utilisation du modèle numérique de terrain de 90 m de résolution, corrigé des dépressions ensuite les exutoires ont été fixés par la création d'une couche Point SHP (shapefile) sous SAGAGIS puis on procède à la délimitation automatique des limites des bassins versants. La figure III.5 montre les limites des SBVE.

III.3.2 Indice de compacité

Les bassins versants topographiques sont délimités par la ligne de crête. Pour caractériser ces bassins, nous avons choisi de calculer le périmètre et l'aire des bassins versants en 2D. Comme leur forme influe sur le débit d'eau écoulé à travers le bassin nous avons aussi choisi de calculer un indice de forme. L'indice utilisé est celui de compacité de Gravelius (Musy et Higy, 2004). La valeur de cet indice est toujours supérieure à 1 et une

valeur proche de 1 signifie que le bassin est rond. Plus cet indice s'éloigne de 1, plus le bassin est allongé (figure II.11). Il est calculé par la formule III.1, P est le périmètre du bassin versant et A son aire.

$$K_C = \frac{P}{2\pi\sqrt{S}} \quad \text{III.1}$$

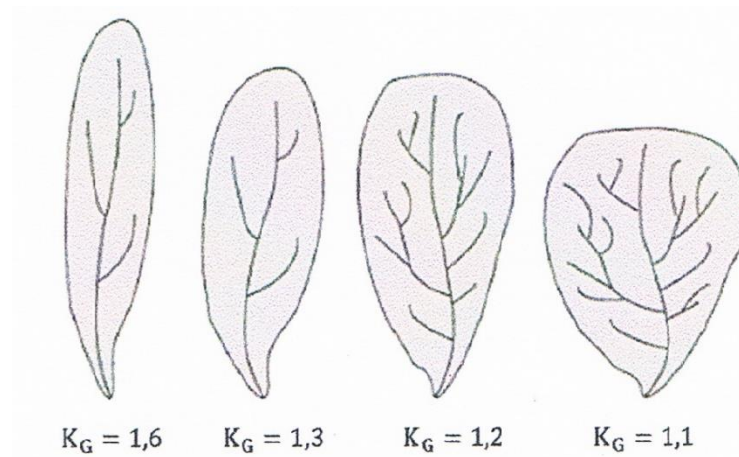


Figure III.11. Relation entre l'indice de compacité et la forme du bassin versant (source : Musy et Higy, 2004).

III.3.3 Pente moyenne du SBVE

Notre raisonnement est basé essentiellement sur la comparaison de la pente moyenne des bassins versants élémentaires pondérées par les surfaces. La pente moyenne du SBVE a été déterminée par l'expression suivante :

$$I_{CBVE} = \frac{D \sum l_j}{A} \quad \text{III.2}$$

Où:

I_{SBVE} : Pente moyenne du bassin versant élémentaire

D: Equidistance des courbes de niveaux

$\sum l_j$: Longueur totale des courbes de niveau

A: surface du bassin versant élémentaire

Nous citerons à titre d'illustration les courbes de niveaux présentées dans la figure III.12, interpolées par l'utilisation de l'outil SIG (SAGAGIS) du bassin versant élémentaire drainé par oued el Abid.

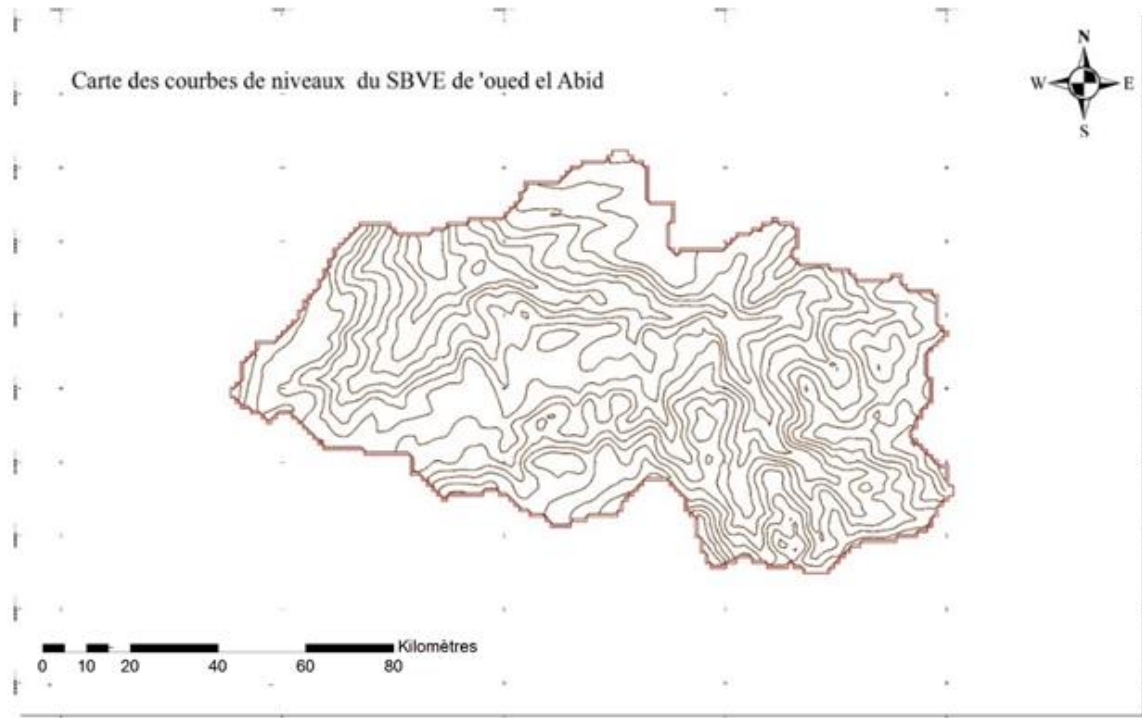


Figure III.12. Carte des courbes de niveau du sous bassins versant élémentaires Oued El Abid

III.3.4. Pente du chevelu hydrographique

La pente du chevelu hydrographique principal « I » est déterminée par l'expression suivante

$$\frac{1}{\sqrt{I}} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^n \frac{l_j}{\sqrt{l_j}} \quad \text{III.3}$$

Dans cette expression, la longueur totale "L" du chevelu principal est divisée en n sections j où la pente "i_j" est constante sur la longueur l_j. Nous montrons dans la figure III.13 ci-après la carte du chevelu hydrographique principal du bassin versant élémentaire de Oued El Abid.

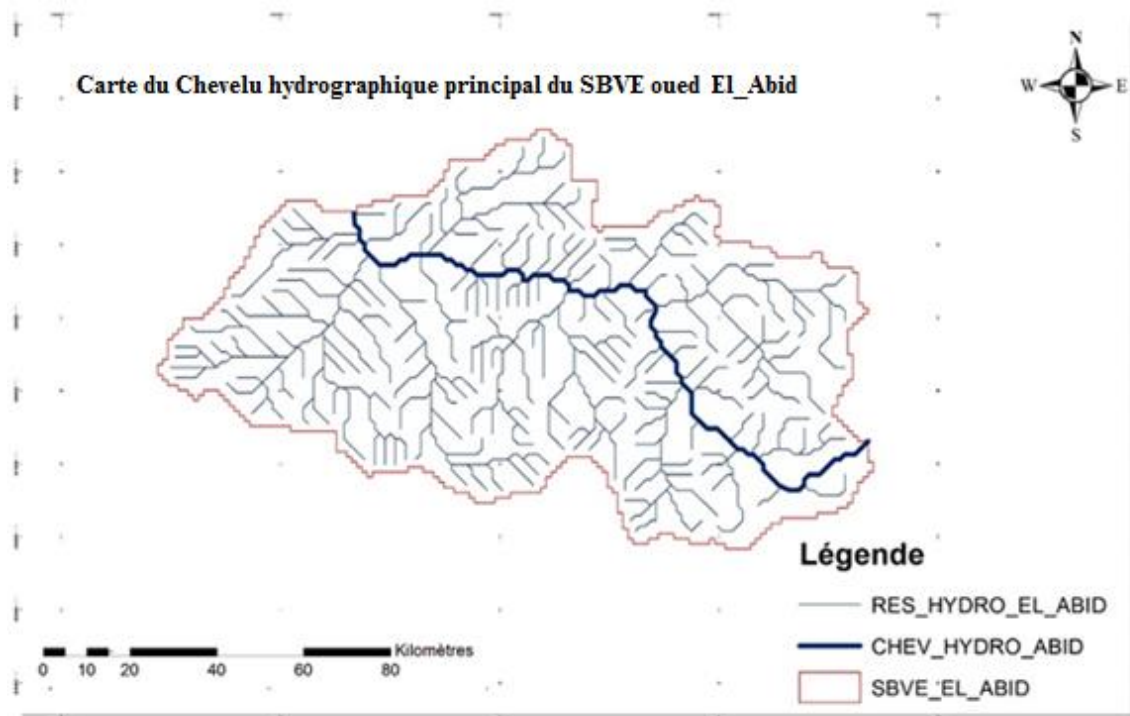


Figure III.13. Carte du chevelu hydrographique principal du sous bassins versant élémentaires Oued El Abid

III.3.5 Densité de drainage

La densité de drainage est définie par :

$$Dd = \sum L / A \quad \text{III.4}$$

Où,

Dd : densité de drainage en km/km²

L : longueur cumulée de tous les talwegs du bassin en km.

A : aire du bassin en km²

Dans notre application, le réseau hydrographique de chaque bassin versant élémentaire a été déterminé par l'outil SAGAGIS, à titre d'illustration nous présentons le réseau hydrographique de Oued Abid (voir figure III.14, ci-contre).

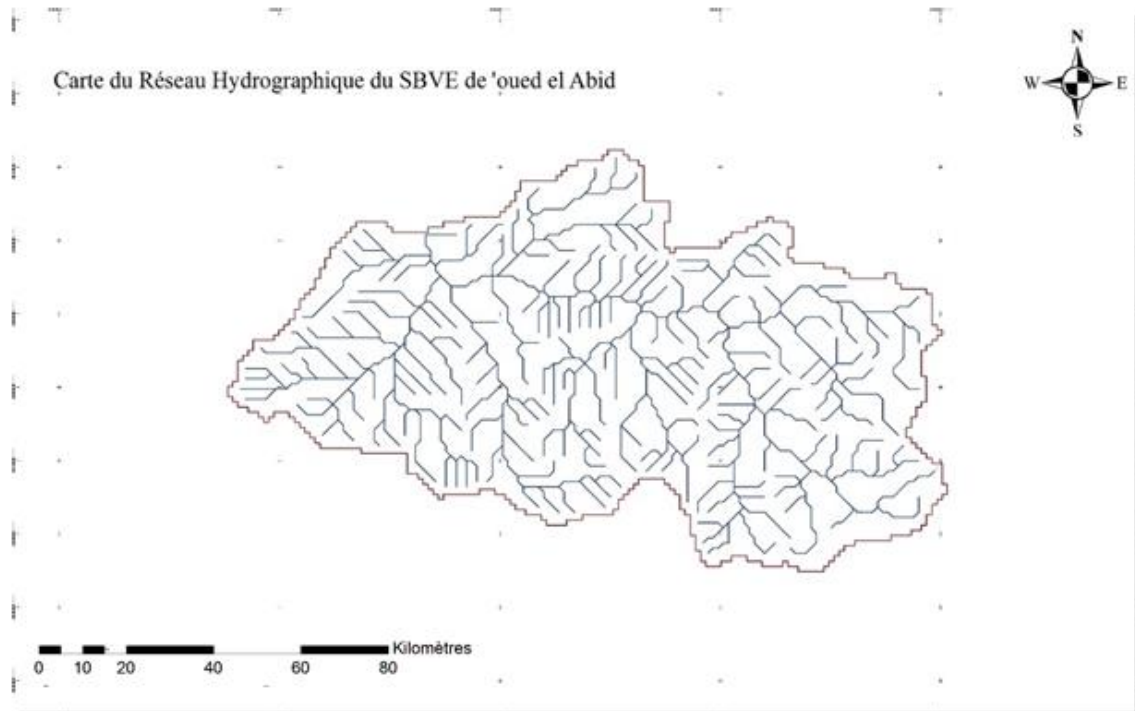


Figure III.14. Carte du réseau hydrographique bassins versant élémentaires Oued El Abid

II I.4 CALCUL DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES

La présente partie a pour but de procéder à l'étude hydrologique. L'objectif de l'étude est de déterminer les valeurs des débits d'apports et des débits de crues dans le contexte d'événements extrêmes pour une période de retour établie. L'enquête a été menée sur la base de toutes les informations pluviométriques, climatiques et hydrométriques disponibles dans certaines stations de mesures situées à proximité des sites à projeter.

III.4.1 Pluviométrie

L'analyse statistique des précipitations qui intéressent notre zone d'étude a été menée en se référant aux mesures journalières enregistrées aux stations de Tenes (62 ans d'observations), Relizane (44 ans d'observations) et Sidi Ali (27 ans d'observations). Les événements de pluie attendus ont été interprétés selon la loi de probabilité basée sur les valeurs maximum de pluie de « Gumbel ». Les coordonnées géographiques des stations sont reportées au tableau III.4, suivant :

Tableau III.4 : Coordonnées géographiques des stations pluviométriques

Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Tenes	36°33'N	1°20'E	59
Sidi Ali	36°32'N	1°42'E	159
Relizane	35°73'N	0°55'	75

III.4.1.1 Série historique des observations

Les informations disponibles dans les différentes stations localisées dans la zone d'étude examinée ne sont pas homogènes et disposent des précipitations moyennes annuelles. En ce qui concerne la station de Tenes localisée en dehors de la zone d'étude mais située dans un même contexte géographique, on dispose des précipitations moyennes mensuelles pendant une période d'observation complète allant de 1938 à 2004 et l'enregistrement des pluies journalières d'intensité maximale pendant les dix ans 1995-2004. Pour la station de Sidi Ali,

on dispose des précipitations moyennes mensuelles pendant une période d'observations allant de 1983 à 2009 et concernant la station de Relizane, on dispose des seules moyennes mensuelles sur 44 ans d'observation. Les mesures pluviométriques de la station de Tenes sont sans aucun doute les plus fiables en tant qu'informations complètes (précipitations maximales journalières à rythme mensuel et précipitations moyennes mensuelles) et longueur de la série historique. Toutefois, la série de mesures couvre un total de 62 années.

Dans le but d'intégrer la série historique de Tenes et combler les lacunes de certains enregistrements moyens mensuels, nous avons choisi de mettre en corrélation les mesures de Tenes avec les mesures synchrones enregistrées par la station de de Sidi Ali. La station de Sidi Ali, bien que localisée dans la zone d'étude, disposant d'une série d'observations plus réduite, ne présente pas d'interruptions dans l'enregistrement des hauteurs de pluies.

La loi choisie pour l'interpolation des précipitations moyennes mensuelles de Tenes avec celles de Sidi Ali est du type linéaire sous la forme :

$$P_{mT} = aP_{mSA} \quad \text{III.5}$$

où: P_{mT} = précipitations moyennes mensuelles [mm], station de Tenes;
 P_{mSA} = précipitations moyennes mensuelles [mm], station de Sidi Ali;
 a = coeff. d'échelle.

L'analyse de régression présentée dans la figure III.15, de la relation linéaire a été menée sur la base de la méthode des moindres carrés. Il en sort une bonne corrélation parmi la série pour une valeur de $a = 0.77$.

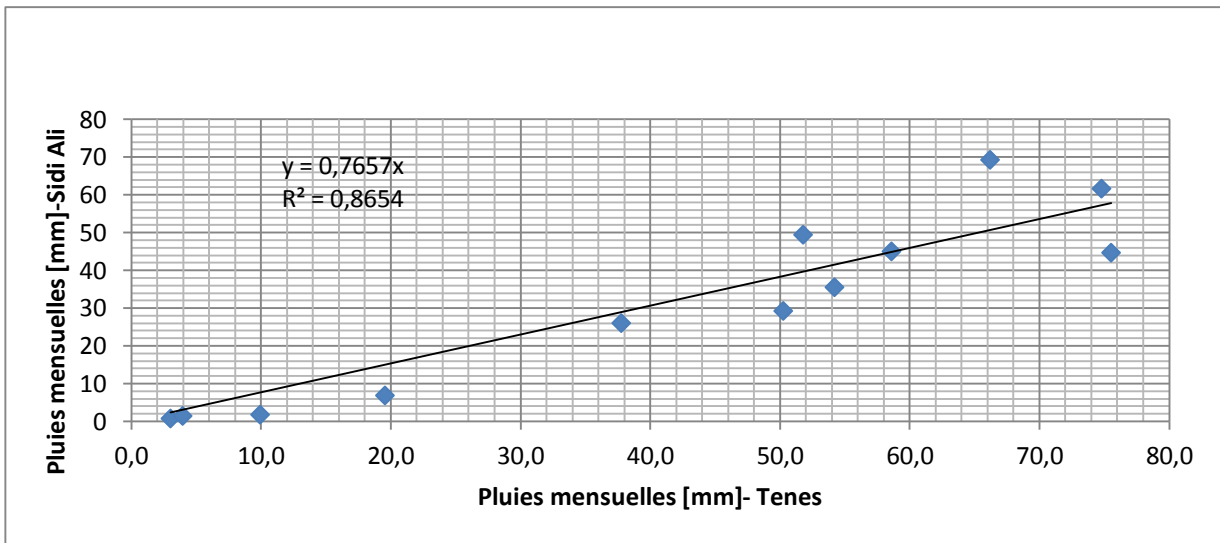


Figure III.15 : Corrélation entre la pluie moyenne mensuelle de la station de Sidi Ali et de la station de Tenes

En observant la série complète des mesures de la station de Tenes pendant une période de 62 ans on relève un cycle bien formé qui comprend une période d'années pluvieuses (1950-1972, avec des précipitations moyennes annuelles de 603 mm) et une période d'année de sécheresse (1973-1977 avec des précipitations moyennes annuelles de 411 mm). Les mesures des dix dernières années mettent en valeur une période pluvieuse faible (moyenne annuelle 395 mm) à l'exception de l'an 2001 (capacité pluvieuse annuelle 628 mm). La moyenne annuelle de toute la période 1936-2004 a été de 528 mm/an. Et qui est très proche de la précipitation moyenne annuelle des stations situées au niveau de la zone d'étude.

III.4.1.2 Pluies dans la région d'étude

La station de Relizane, est localisée à proximité des sites et présente une bonne analogie climatique. Sur la base de cette analogie, nous avons décidé d'introduire un coefficient d'échelle afin de mettre en corrélation la pluviométrie du site de Tenes avec celle des bassins objet de notre étude. L'analyse de régression a été menée en interprétant à l'aide d'une loi linéaire les précipitations moyennes mensuelles des deux stations selon la méthode des moindres carrés. Le résultat illustré sur le graphe figure III.16, du calcul porte à un coefficient d'échelle $\varphi = 0.62$.

En d'autres termes, nous pouvons affirmer que la capacité pluvieuse moyenne de la zone d'étude est d'environ 62% de celle caractérisée du site de Tenes.

**CORRELATION PLUIES MENSUELLES
TENES - RELIZANE**

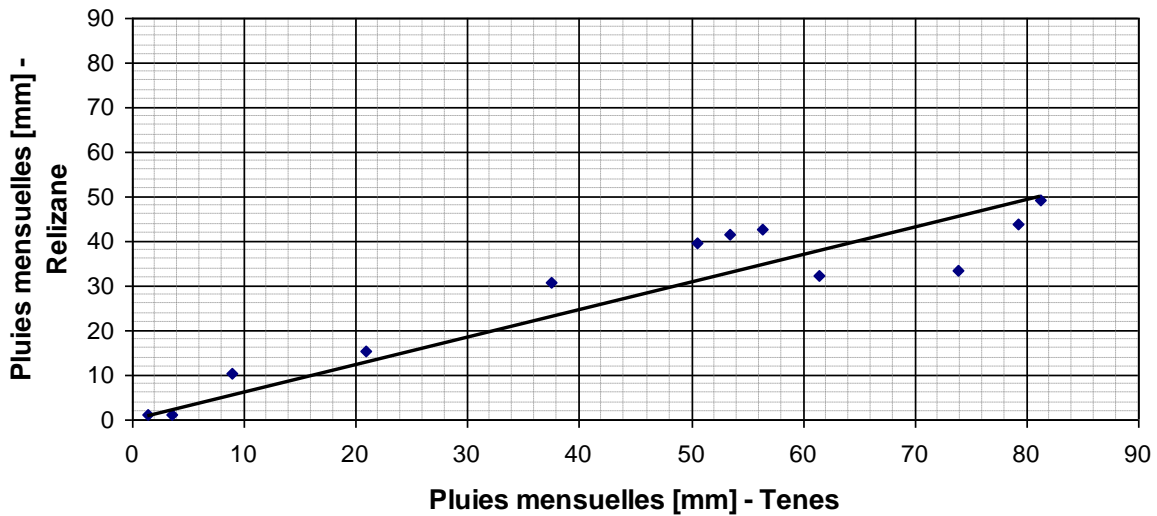


Figure III.16 : Corrélation pluie mensuelle de la station de Tenes et de la station de Relizane

Modèle de régression linéaire : $Y = ax$

$a = 0.6168$

Coefficient de corrélation : 0.845

III.4.1.3 Précipitations maximales annuelles

Afin d'étudier les hauteurs maximales de pluie journalières de basse fréquence, nous avons considéré la série historique mensuelle de la station de Tenes en extrapolant de cette dernière la valeur annuelle maximale. Les enregistrements des hauteurs maximum de pluie journalières disponibles dans la station de Tenes concernent une série historique de 10 ans d'observations (1995-2004). Le modèle statistique adopté d'une série aussi brève porte certainement à des incertitudes quant à l'estimation des paramètres d'échelle et une incompatibilité de forme dans les tests de fiabilité.

Afin d'intégrer la série historique de Tenes et disposer ainsi d'une série plus longue d'observations, nous avons choisi de procéder à la corrélation des précipitations mensuelles avec les mesures des hauteurs maximum de pluie journalière enregistrée par la station sus décrite (pour un total de 180 enregistrements durant la période 1995-2004).

La loi choisie pour l'interpolation des données du type puissance est exprimée comme suit :

$$P_{Mj} = b \cdot (P_{Mm})^n \quad \text{III.6}$$

Où: P_{Mj} = précipitation maximale journalière [mm];
 P_{Mm} = précipitation moyenne mensuelle [mm];
 b, n = paramètres d'échelle.

Le résultat présenté graphiquement dans le graphe III.17 ci-après, du calcul dévoile un bon accord quant aux valeurs de b soit 1.115 et n 0,837.

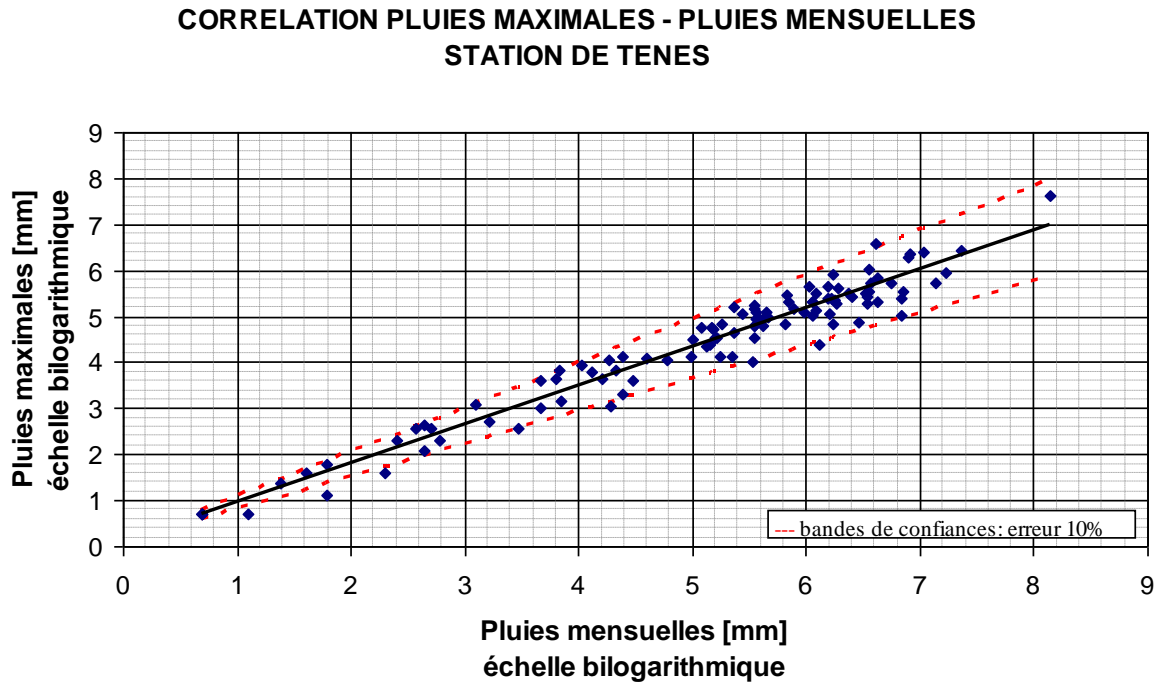


Figure III.17 : Corrélation entre la pluie moyenne mensuelles et pluie maximale de la station de Tenes

Modèle de régression linéaire (bilogarithmique): $Y = ax+c$

$a = 0.847, \quad c = 0.1095$

Coefficient de corrélation : 0.948

L'analyse de régression de la loi de puissance a été menée en appliquant à l'aide de la méthode des moindres carrés et validée avec la méthode graphique des limites d'erreur à 10%. Pour simplifier la représentation graphique de la loi de puissance on a adopté une échelle bi-logarithmique, obtenant ainsi une corrélation linéaire.

III.4.1.4 Interprétation statistique des pluies maximales

Le modèle statistique choisi pour interpréter la variable aléatoire des précipitations maximales annuelles est la distribution de Gumbel. La fonction de répartition de cette loi est décrite par la formule suivante:

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{h - \mu}{\sigma}\right)\right) \quad \text{III.7}$$

Où: μ = paramètre de localisation;
 σ = paramètre d'échelle ;
 h = hauteur de pluie [mm].

Cette loi de distribution possède deux paramètres à estimer : un paramètre de localisation μ ainsi qu'un paramètre d'échelle σ . Ces deux paramètres peuvent être estimés au moyen de nombreux estimateurs. Citons, entre autres, les estimateurs des moments ou

l'estimateur du maximum de vraisemblance. Une fois fixée la signification de $\alpha = 5 \%$ les intervalles de confiance produit définis pour la valeur moyenne μ (loi normale inverse) et pour la variance σ (distribution χ^2).

En connaissant la signification de α on peut par ailleurs déceler les courbes qui enveloppent l'oscillation maximum de la K-ème valeur avec probabilité $(1-\alpha)\%$.

La compatibilité de la série historique avec l'intervalle de confiance des segments encadrant le nuage de points observés constitue une première méthode importante de vérification de la fiabilité de la distribution choisie. En observant le résultat graphique, nous pouvons déduire une adaptation optimale de la série, en fait, 100% des mesures expérimentales s'insèrent à l'intérieur des segments théoriques.

Pour l'étude de la fonction de Gumbel généralement on introduit une variable réduite soit:

$$y = -Ln(-Ln(F(h))) \quad \text{III.8}$$

y permet de remettre à l'échelle les graphiques sous forme logarithmique obtenant une représentation rectiligne de la courbe de probabilité. Le contrôle de la fiabilité de la distribution adoptée a été mené en utilisant aussi bien le test du χ^2 de Pearson que le test de Kolmogorov-Smirnov. Le test de Pearson est un test effectué sur la masse de données, il vérifie en particulier, que l'échantillon a bien été tiré d'une masse ayant une distribution prédéterminée ou que deux ou plusieurs échantillons sont issus de la même masse.

Le test de Smirnov vérifie la forme des distributions des échantillons et analyse les différences maximum entre la série des données et la valeur théorique prévue. Comme résultat de la vérification, les deux tests ont validé la fiabilité du modèle statistique de Gumbel.

La densité de la probabilité cumulée, est liée au temps de retour T d'un évènement (soit à la probabilité de non dépassement) selon la formule :

$$F(h) = \frac{T(h)-1}{T(h)} = 1 - \frac{1}{T(h)} \quad \text{III.9}$$

Cette formule permet de mettre en corrélation les attentes maximum avec les périodes de retour des évènements de pluie. L'adéquation à la loi de la probabilité de Gumbel concernant la répartition statistique des pluies maximales journalières annuelles (durée 24 heures) enregistrées par la station de Tenes, a fourni les résultats suivants :

Tableau III.13 : Estimation des pluies maximales journalières à la station pluviométrique de TENES pour différentes périodes de retour et pour la période 1938- 2004

Temps de retour	20	50	200	500	1000	10000
Fréquence en %	0.95	0.98	0.995	0.998	0.999	0.9999
Pluies journalières maximales (mm)	133.9	156.9	191.2	213.7	230.8	287.4

III.4.1.5 Pluies de courtes durées de différentes fréquences et leurs intensités

Dans la région objet des bassins, les mesures des précipitations de durée inférieure à 24 heures, ne sont pas disponibles. Pour obtenir un rapport entre les pluies journalières et les

pluies de courte durée, nous avons utilisé le résultat de l'étude hydrologique conduite par l'ANRH et fournie par K. Body (1981). La formule proposée est la suivante:

$$P_{t,T} = 1.13 \cdot P_{jmax} \left(\frac{t}{24} \right)^c \quad \text{III.10}$$

- où: $P_{t,T}$ = pluie de durée t et période de retour T ;
 P_{jmax} = pluie de durée de 24h et période de retour T ;
 b = coefficient d'exposition climatique, 0.41 pour Tenes.

Cette formule permet d'exprimer graphiquement le rapport entre la durée (h) et la hauteur de la pluie (mm) pour une période de retour fixée. Les courbes obtenues sont définies « courbes IDF » (Figure II.18). Le tableau suivant résume le résultat de la mise en corrélation entre les pluies journalières et les pluies de courte durée valable dans la région de Tenes.

**COURBES DES PROBABILITES PLUVIOMETRIQUES
STATION DE TENES**

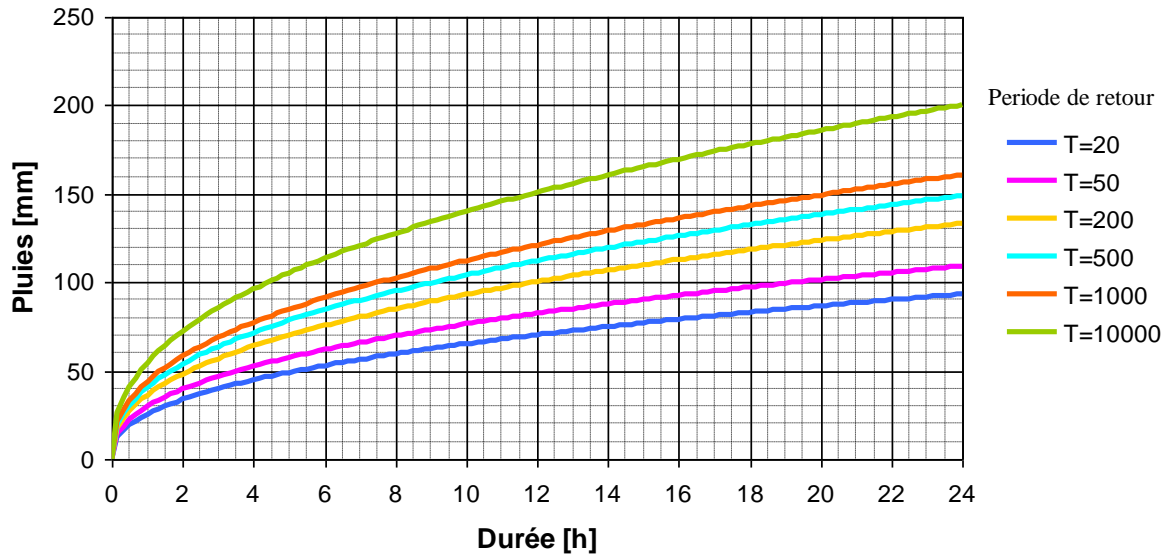


Figure III.18 : Courbes (Intensité durée fréquence) station de TENES

Tableau III.17 : Courbes (Intensité durée fréquence) station de TENES

Durée période retour	1	3	6	12	24
20	41.11	64.50	85.71	113.88	151.31
50	48.17	75.58	100.43	133.44	177.30
200	58.71	92.11	122.38	162.61	216.06
500	65.61	102.95	136.78	181.74	241.48
1000	70.86	111.19	147.73	196.29	260.80
10000	88.24	138.45	183.96	244.42	324.76

En appliquant le coefficient d'échelle $\varphi = 0.61$, qui établit un rapport entre les hauteurs de pluie du site de Tenes et les caractéristiques des bassins, on obtient un tableau analogue valable dans la région des sites de retenues et employé lors de l'estimation de la pluie nette associée à l'évènement du projet.

Tableau III.7 : hauteurs de pluie au niveau des sites de retenues

Durée (heure) période retour	1	3	6	12	24
20	25.08	39.35	52.28	69.47	92.30
50	29.39	46.11	61.26	81.40	108.15
200	35.81	56.19	74.65	99.19	131.79
500	40.02	62.80	83.44	110.86	147.30
1000	43.23	67.82	90.12	119.74	159.09
10000	53.83	84.46	112.21	149.10	198.10

III.4.2 Hydrométrie

III.4.2.1 Station Hydrométrique

Au niveau des sites des bassins il n'y a pas de stations hydrométriques. Pour obtenir une estimation de l'apport liquide de ces bassins, on s'est basé sur les informations hydrométriques disponibles de la station de Sidi Akacha, localisée le long de l'oued Allalah. La station hydrométrique de Sidi Akacha dispose d'une série de mesures mensuelles du volume liquide et de la concentration des sédiments sur une période de 12 ans (1973-1984). Les coordonnées géographiques de la station de Sidi Akacha sont les suivantes :

Tableau III.8 Localisation de la station hydrométrique

Latitude	Longitude	Altitude (m)
36° 30'	1°18'	71

La station pluviométrique de Tenes est implantée à l'intérieur du bassin de l'oued Allalah, il existe donc une bonne analogie climatique entre la région de Tenes et le site de la station de Sidi Akacha. En s'appuyant sur cette analogie, nous avons confirmé que les informations pluviométriques de la région de Tenes sont bien corrélées avec le processus du versant dans le bassin de oued Allalah (voir figure III.19).

III.4.2.2 Coefficient d'écoulement moyen

Si l'on interprète à l'aide d'une loi mathématique, la corrélation entre la série de mesures du volume mensuel de la station hydrométrique de Sidi Akacha et la série qui représente les précipitations mensuelles synchrones enregistrées par la station de Tenes, nous avons déterminé le coefficient moyen du bassin de l'oued Allalah considéré en tant que bassin analogue aux bassins situés dans notre région d'étude. La loi choisie pour l'interpolation des données du type linéaire se présente sous forme de:

$$V_{mA} = \psi \cdot P_{mT} \cdot A \quad \text{III.11}$$

où: V_{mA} = apport liquide mensuel mesuré à la station de Sidi Akacha [hm^3];
 P_{mT} = précipitation moyenne mensuelle mesurée par la station di Tenes [m];
 ψ = coefficient d'écoulement moyen;
 A = aire du bassin de l'oued Allalah, est de 307 km^2

L'analyse de régression de la loi linéaire a été établie à l'aide de la méthode des différences minimum. Le résultat du calcul présente un bon accord parmi les séries pour une valeur de $\psi = 0.240$.

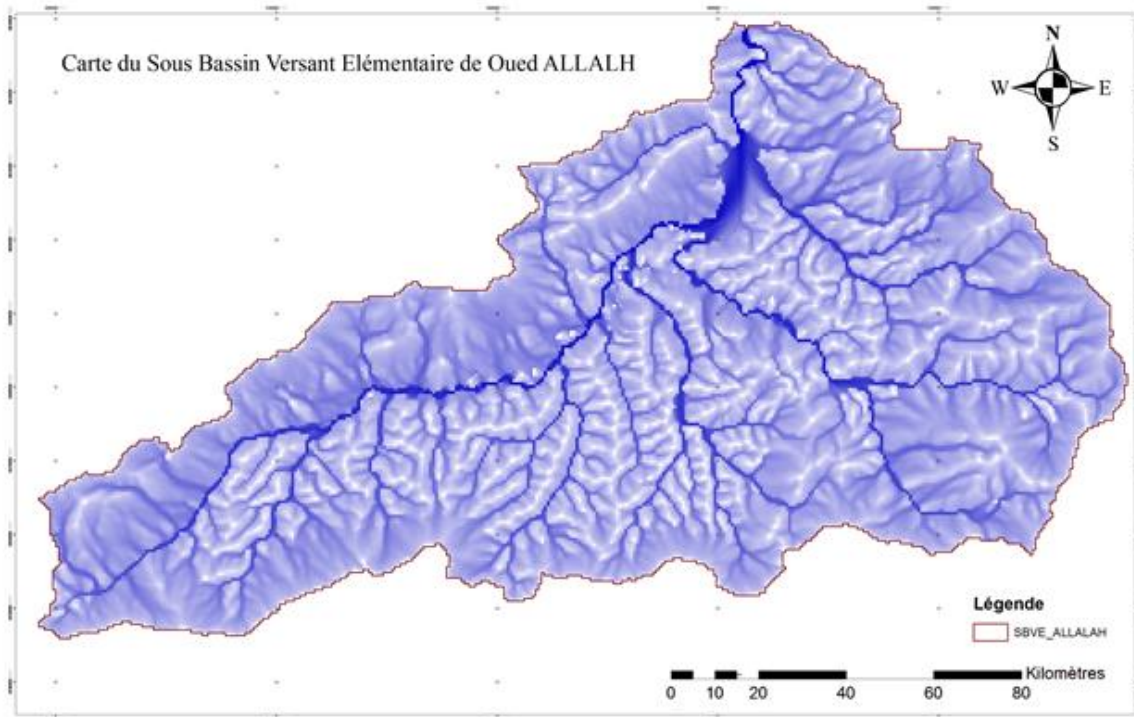


Figure III.19. Carte du MNT Sous bassins versant élémentaires Oued Allalah

III.4.2.3 Apport liquide :

Les mois ayant un apport liquide majeur au niveau du bassin Allalah sont ceux qui vont du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril, le volume mesuré pendant ces mois constitue environ 95,6% du total annuel. Les seuls mois de Février et Mars en particulier, contribuent avec un pourcentage de 49,6%. Ces informations hydrométriques s'accordent bien avec les mesures pluviométriques relevées dans la région de Tenes (voir figure III.20 ci-contre). La répartition mensuelle du volume liquide annuel au niveau des bassins de notre région d'étude a été considérée au même niveau que la distribution caractéristique du bassin d'Allalah. Les volumes annuels des apports liquides des bassins objet de notre étude ont été estimés en tenant compte du coefficient moyen d'écoulement du bassin d'Allalah et en considérant les pluies moyennes annuelles des bassins en question.

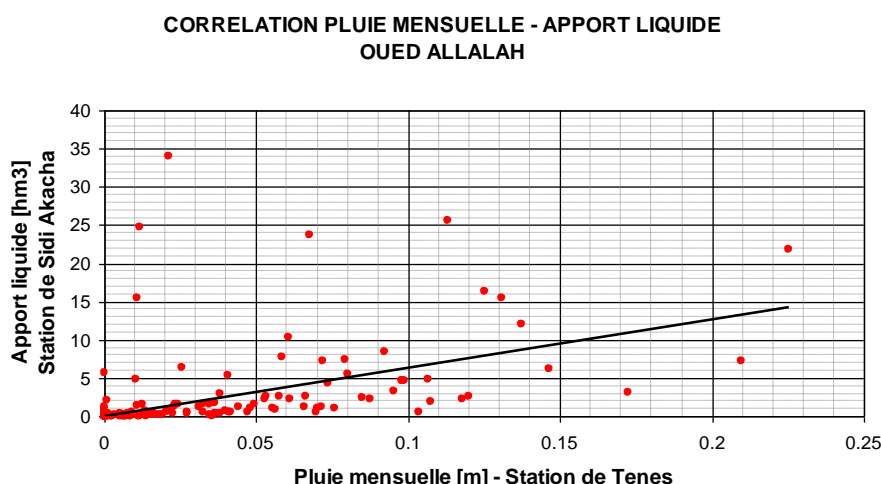


Figure III.20 : Corrélation pluie mensuelle - apport liquide Oued allalah

Modèle de régression linéaire : $Y = a x$, $a = 63.55$, coefficient de corrélation : 0.427

III.4.2.4 Débit de crue

La méthode de Mallet-Gauthier est couramment utilisée pour le calcul des débits de crue en Algérie. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$Q_T = \left[2K \log(1 + AP) * \frac{S}{\sqrt{L}} \right] \left[(1 + 4 \log T - \log S)^{1/2} \right] \quad \text{III.12}$$

Où

K et A : facteurs topographiques (K=1,5 et A = 20).;

P : Pluie moyenne annuelle ;

S : surface du bassin versant,

L : Longueur du chevelu hydrographique principal,

T : période de retour.

Le tableau III.9 résume les valeurs des débits de crue pour différentes périodes de retour pour les différents bassins versant

Tableau III.9 Débit de crue par l'expression de Mallet et Gauthier

k	Période de retour (T)							
	1,5	10	20	50	100	5000	10000	
Débit de crue en (m ³ /s)								
SBV	S (km ²)	LP (km)						
Sidi_Moussa_SA	21,71	8,87	39,94	46,04	53,04	57,77	79,35	82,59
Ain_Sefra	87,82	17,02	106,54	125,78	147,42	161,88	226,81	236,46
Ben_Amar_AN	4	3,78	12,35	13,94	15,80	17,07	22,96	23,85
Ben_Amar_OM	19,47	8,57	36,68	42,21	48,57	52,87	72,52	75,47
Bouzuert	18,8	7,87	37,03	42,60	48,99	53,32	73,11	76,08
Cheurfa	61,82	10,3	98,78	115,84	135,13	148,06	206,36	215,05

Derdousse	32,65	12	50,38	58,43	67,63	73,82	101,97	106,18
El_Abid	48,88	12,3	72,60	84,78	98,60	107,88	149,86	156,12
Kaddour_Saider	21,41	6,94	44,57	51,36	59,16	64,43	88,49	92,10
Kerrada	20,63	8,35	39,24	45,19	52,03	56,66	77,78	80,94
Kouachih	9,14	3,65	27,52	31,36	35,81	38,83	52,75	54,85
Malah_AN	3,16	4,25	9,31	10,48	11,85	12,79	17,16	17,82
Malah_SA	32,26	7,9	61,39	71,20	82,39	89,93	124,20	129,32
Malah_OM	81,36	13,74	110,45	131,50	152,44	167,30	234,14	244,08
Oued_El_Kheir	61,28	12,02	90,69	106,34	124,03	135,89	189,38	197,36
Roumane	28,23	11/53	47,60	55,09	63,65	69,42	95,70	99,63
Seddaoua	17,41	9,41	31,50	36,20	41,60	45,26	61,99	64,50
Sidi_Bakhti	53,09	13,6	74,58	87,22	101,54	111,16	154,59	161,07
Zaker	6,05	6,41	14,05	15,93	18,12	19,61	26,51	27,55
Zerrifa	28,61	14,15	40,99	47,44	54,82	59,80	82,45	85,84

III.4.2.5 Apports Liquides Mensuels De L'oued Allalah – Station De Sidi Akacha

Tableau III.10 Apports liquides mensuels de l'Oued ALLALAH – STATION DE SIDI AKACHA

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Totale
Année	hm3	hm3	hm3	hm3	hm3	hm3	hm3	hm3	hm3	hm3	hm3	hm3	hm3
1973	12.01	15.39	7.14	1.60	0.30	0.46	0.03	0.02	0.38	2.64	0.09	6.29	46.35
1974	1.35	8.37	24.71	16.37	2.07	0.46	0.10	0.03	0.05	3.02	0.57	0.23	57.33
1975	0.37	0.38	4.68	1.54	0.48	0.03	0.00	0.00	0.01	0.02	4.83	4.87	17.21
1976	1.23	33.93	1.54	2.25	3.24	0.29	0.11	0.05	0.12	1.93	2.17	2.54	49.40
1977	4.29	0.62	0.28	0.22	1.14	0.05	0.02	0.03	0.00	0.00	2.25	0.68	9.58
1978	2.45	0.42	1.14	2.51	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	7.14	1.09	2.65	17.68
1979	0.73	25.53	23.62	2.99	0.41	0.14	0.03	0.03	1.27	1.01	0.94	5.56	62.26
1980	15.38	1.49	10.31	0.43	0.44	0.06	0.02	0.02	0.01	0.03	0.13	21.76	50.08
1881	5.37	7.70	1.71	2.19	1.48	0.21	0.07	0.01	0.03	0.05	0.07	0.35	19.24
1982	0.59	4.70	0.28	0.39	0.45	0.01	0.01	0.01	1.06	1.19	6.25	7.39	22.33
1983	0.49	5.65	0.62	0.24	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	1.00	0.55	8.63
1984	1.04	1.62	0.68	0.10	0.56	0.05	0.01	0.00	0.00	0.60	1.00	1.16	6.82
Moyenne	3.78	8.82	6.39	2.57	0.91	0.15	0.03	0.02	0.24	1.47	1.70	4.50	30.58
Percent %	12.3%	28.8%	20.9%	8.4%	3.0%	0.5%	0.1%	0.1%	0.8%	4.8%	5.6%	14.7%	

La station pluviométrique de Tenes est localisée à l'intérieur du bassin de l'oued Allalah, il existe donc une bonne analogie climatique entre la région de Tenes et le site de la station de sidi Akacha. Sur la base de cette analogie, nous avons mis en corrélation les informations pluviométriques de la région de Tenes avec le processus du versant de l'oued Allalah.

Tableau III.11 PRECIPITATIONS MENSUELLES DE LA STATION DE TENES

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Année	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1938	101	62.4	8.2	14.8	42.8	0	0	37.2	23.5	59.2	149.1	118.3
1939	31.4	136.1	94.8	170.4	28.6	36.1	0	41.8	0.3	34.6	41.6	16.4
1940	102.5	27.7	11.1	5.2	15	49.4	0	2	0.3	130.6	46.6	64.1
1941	22.9	39.6	74.9	48.9	28.2	2.5	0.4	0.5	10.3	45.2	100.1	48.6
1942	64.2	77.9	11.4	42.3	2	0	0	0.7	42	2.6	123.2	265
1943	35.7	133.2	180.6	5.3	47.4	0	0	0	68	81.6	133.7	228.3
1944	1.6	120.5	19.6	17	4	9.8	0	2.9	58.8	56.4	14.1	121
1945	96.3	13	12.8	0	12.4	8	0	4.9	2.6	22.1	91.2	19.4
1946	328.5	62.7	61.8	133.3	51.5	13.5	0	0.1	0	33	53.5	57.2
1947	50.7	100.1	7.8	6.4	33.5	0.2	0.8	24.5	52.3	43.1	22.2	166.2
1948	105.5	76.6	1.9	9.4	34.2	0	10.2	0	0.3	153	2.7	18.8
1949	80.7	43.3	46.2	60.5	45.5	2.3	0	0	19.2	4	68.6	59
1950	122.1	17.5	91.3	35	28.3	3.5	0	0	65	92.7	14.5	109.9
1951	69.8	50.6	53.2	22.7	62.1	3.4	0	0	27.3	128.2	67.5	38.5
1952	113.5	54.5	4.5	141	96.9	0	5.3	14.5	2.3	26	87.9	25.7
1953	49.5	55	115	10.3	48.5	21.5	0	1.5	48.2	132.9	23.6	88
1954	93	82.8	58.9	226	8.5	9	0	0	0	23	32	62
1955	155	55.5	81.5	95.5	0	33.6	4	0	57.5	38	57.5	38
1956	81.5	243	20.5	67	10	6	3	0	9.5	93	105.5	81
1957	104	0	46	116	36.5	5.5	1	0	5	106.5	186	205.5

1958	210.5	32	17	70	0.5	6	2.5	0	0	123.5	196.5	89
1959	43.5	87.8	26	14	85	28.5	0	1	66.5	83.5	106.4	83
1960	83	42	43	26	30	3.5	0.3	0.3	9	5.5	15	124.5
1961	202	0	6.5	32.5	2.5	28	3	0.5	2	36.5	105.3	34
1962	54	212	98.5	47	14.2	53.5	0	0	0	8	151	71.8
1963	83	141.5	21	18	81	10.5	0.5	0	27.1	16	47	249.4
1964	96.2	74.4	64.9	103.6	0.2	14.8	0	0.4	0	79.6	45.7	109.5
1965	173	60.6	25.3	86.3	0.2	13.5	0	0	3.2	54.7	32.3	55.6
1966	27	0.2	54.7	42.6	80.7	4.7	0	0	28.2	130.1	81.1	12.9
1967	32.9	72.6	8.7	220.7	13.5	33.2	0	3.4	9.7	96.4	87.7	297.5
1968	11.6	69.3	65.2	45.4	139.3	0.2	0	-	26.8	323	41.5	179.2
1970	76.5	1	50.4	56.2	33.7	5	0	0	3	121.3	0	130.6
1971	188.3	15.6	89.1	45.4	115.7	3.5	4.3	0	48.5	48	177.5	110.2
1972	220.3	96.5	204	86.5	103	17.3	0	0.2	173.7	94	28.2	86.5
1973	137.5	11	72	12.5	0	27.5	2	1	5.2	66.5	12.5	25.4
1974	11	92.3	11.8	125	1	9.2	0	0	0	-	-	-
1975	13.5	22.5	-	24.1	32.3	0	0	0	35.5	-	106.7	10.3
1976	22.8	21.3	23.4	87.5	95.5	15.5	-	1.5	12.2	-	-	-
1977	-	-	-	34.5	31.1	0	11.5	7	7	7.5	118	22
1978	85	8	71.5	120	37	1	0	0	0	209.5	48	57.5
1979	22	113	67.5	38	1.5	16.5	0	0	44	76	56.5	80
1980	131	32.5	60.5	20.5	-	1	-	2.5	6	14	19	225.5
1981	40.7	58.5	36.5	61	34.5	6.5	0	1.5	5.5	8.5	0	38
1982	-	-	-	-	-	-	-	-	0	65.7	146.4	79.4
1983	0	0	20.6	18	0	0	0	0	0	2.5	55.4	41.6
1984	70.1	49.4	39.7	8.5	103.6	0	0	0	6.3	0	0	0

1985	76.1	20.2	129.8	18.7	77.8	0	0	0	2.2	69.4	119.3	58.2
1986	84.1	63.8	88.5	11.2	1	1.9	11.3	0	56.6	44.3	91.7	229.4
1987	20.1	109.3	10.6	0	7.6	4.7	0	3.3	2.4	28.9	79.5	54.5
1988	69.4	8.9	46	34.6	106.3	3	-	-	0	4.4	59.4	79.5
1989	22.3	18.4	111.2	35.6	0	11.8	0	14	35.5	24.2	38	15.4
1990	106.2	0	56	94.7	35.8	0	8.5	0	10.8	60.8	95.6	85.8
1995	51	44	75	18	0	6.1	0	8	49	15	50	49
1996	45.4	93.8	58.3	49.5	18.3	6.7	4.6	1.4	27.7	17.2	7.6	25.1
1997	43.7	7.1	0.5	113.4	7.2	0.6	1.1	11.8	10	27.5	94.5	26.1
1998	16.7	18.8	25.6	50.9	67.7	1.4	0	0.6	19.3	28.6	33.6	23.1
1999	158.2	75.2	25.6	1	0	4.5	0	5.6	25.9	17.6	125.2	136.7
2000	42.4	0.2	16.1	14.7	73.9	0.4	0	0.3	34.2	99.6	69.9	8.1
2001	68.7	69	0	51.8	17.9	0	0	0	2.5	3.9	343.4	71.1
2002	21.5	3.9	99.7	42.9	41.4	2.2	1.5	1.6	0	26.4	69.7	21.4
2003	92.6	63.6	8.8	53.4	28.8	0.2	0.2	0.2	1.3	36.1	53	25.7
2004	25.7	20.9	34.5	39.6	84.6	4.7	0	0	3.2	42.6	60	25.4

III.4.3 Géologie des sites de l'ouvrage

L'étude géologique du terrain le plus souvent a pour but de classer les matériaux selon leur résistance et leur perméabilité ; celle-ci intervient de façon directe sur la réponse du bassin versant lors des crues ou le soutien qu'elle apporte aux débits d'étiage par les nappes souterraines, de plus elle apporte beaucoup d'indications sur l'érodabilité du matériau rocheux, indispensables à l'évaluation de l'érosion, le transport solide, et l'envasement des équipements hydrauliques. La région d'étude s'inscrit dans l'évolution générale de l'atlas Tellien en général. Il n'est pas question ici de revenir sur la longue histoire géologique de la région mais simplement donner quelques indications sur les caractéristiques du matériau rocheux constituant la région d'étude et son influence sur le comportement du réseau hydrographique. Les formations essentielles appartiennent au Crétacé et l'Eocène. Il s'agit surtout d'une alternance de calcaires et marnes et parfois quelques grès. Ces formations sont fortement plissées en une série d'anticlinaux et synclinaux d'orientation générale Nord-est / Sud-ouest. Cette première série lithologique est surmontée en discordance par des formations plus récentes appartenant essentiellement au Miocène et au Pliocène caractérisées par des conglomérats, des argiles et des sables. Ces dernières se localisent surtout vers le Sud de la zone.

Tableau III.12 : Les caractéristiques des matériaux de la région d'étude

Formation	Résistance à l'érosion	Perméabilité
Calcaire fissuré	Très résistant	perméable
Dolomie	Très résistant	impermeable
grés	Très résistant	Semi-perméable
Calcaire gréseux	résistant	Semi-perméable
Calcaire marneux	résistant	Semi-perméable
Quaternaire	Résistance moyenne	perméable
marne	Non résistant	Perméabilité faible
galets	Résistance moyenne	Perméable
graviers	Résistance moyenne	perméable
éboulis	Résistance moyenne	perméable

Les actions (sites potentiels) seront notées sur ce critère en se basant sur la complexité géologique présentée pour chaque site. Le tableau suivant permet d'exprimer la relation entre le degré de satisfaction du décideur, la formation géologique de chaque site et sa projection sur l'intervalle [0,1].

Tableau III.13 : Degré de satisfaction et convention numérique du critère géologique

Les degrés de satisfaction	La formation géologique	Conversion numérique Dans l'intervalle [0,1]
Très favorables	Formation Calcaire-massif	1
Favorable	Formation Marno-calcaire plus recouvert par des alluvions	0,75
Moyen	Formation marno-calcaire plus recouvert argileux	0.5
Défavorable	Formation schisteuse	0.25
Très défavorable	Formation schisteuse plus présence de gypse	0

III.4.4 Apport solide

Pour l'estimation de l'apport solide des bassins objet de notre étude nous avons utilisé les informations relatives à la concentration mensuelle des sédiments en suspension ayant été mesurée par la station hydrométrique de Sidi Akacha. Les informations sur la turbidité moyenne mensuelle enregistrée par la station de Sidi Akacha comprennent une série de 12 ans de mesures (1973-1984), montrées dans le tableau III.14. La concentration moyenne annuelle de sédiments est d'environ 14,5 kg/m³. En interprétant à l'aide d'une loi mathématique la corrélation entre le volume liquide annuel et la turbidité moyenne annuelle mesurés par la station de Sidi Akacha, nous avons pu déterminer un coefficient morphodynamique indicatif du transport solide en suspension de l'oued Allalah, considéré de nouveau, en tant que bassin analogue à celui des bassins de notre zone d'étude. La loi choisie pour l'interpolation des données est du type linéaire et sous forme de :

$$C_{Mm} = \varepsilon \cdot V_m \quad \text{III.13}$$

où: C_{Mm} = concentration moyenne mensuelle [kg/m³]
 V_m = apport liquide mensuel [m³]
 ε = coefficient morphodynamique [kg/m³*hm³]

Tableau III.14 TURBIDITES (concentration moyenne mensuelle g/l) OUED ALLALAH – STATION DE SIDI AKACHA

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Moyenne
Année	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³
1973	31.48	20.06	17.53	0.34	0.01	75.32	0.04	0.05	40.3	22.67	0.03	35.26	20.26
1974	3.81	30.14	51.39	18.07	0.35	0.07	0.04	0	5.35	41.98	8.46	0.07	13.31
1975	2.81	0.86	23.75	3.81	5.13	0.15	0.06	0	0.13	0.07	81.12	46.92	13.73
1976	5.21	34.63	5.35	29.89	79.34	72.88	0.29	0.23	6.43	23.98	26.78	27.29	26.03
1977	27.33	0.27	1.83	1.92	24.21	0	0	0	0	0.16	67.9	20.1	11.98
1978	37.82	0.59	21.42	61.56	20.54	0.2	0	0	0	141.4 7	69.98	40.18	32.81
1979	4.39	47.41	40.7	21.51	0.06	0.23	0.02	0	39.63	7.58	17.96	18.36	16.49
1980	21.77	7.65	24.05	0.08	2.75	0.78	0.04	0	0.04	1.56	3.59	0.04	5.20
1981	24.61	15.96	0.92	10.93	0.49	0.02	0	0	0.00	0.00	0.00	6.83	4.98
1982	2.03	16.65	0.06	6.25	0.34	0.05	0	0	75,32	37.13	42.7	27	11.02
1983	0.06	11.17	2.25	0.46	0	0.56	0.07	0	0.09	0.06	44.53	8.62	5.66
1984	4.97	10.74	0.13	4.88	4.88	0.13	0.18	0	0	21.84	1.26	22.5	5.96
Moyenne	13.86	16.34	15.78	13.31	11.51	12.53	0.06	0.02	7.66	24.88	30.36	21.10	14.47*

* Turbidites moyennes annuelles

L'analyse de la régression linéaire illustrée dans la figure III.21, a été menée à l'aide de la méthode des différences minimum. Le résultat du calcul démontre une bonne corrélation pour une valeur de $\varepsilon = 4.24 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hm}^3$. Les concentrations moyennes des sédiments des bassins de notre région d'étude ont été estimées en appliquant le coefficient morphodynamique obtenu pour le bassin Allalah aux apports liquides moyens annuels des bassins en question. Les concentrations moyennes annuelles des sédiments caractéristiques des bassins sont récapitulées dans le tableau ci-après.

L'analyse de la régression linéaire a été menée à l'aide de la méthode des moindres carrés. Le résultat du calcul démontre une bonne corrélation pour une valeur de $\varepsilon = 4.24 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hm}^3$.

La concentration moyenne des sédiments des bassins objet de notre étude a été estimée en appliquant le coefficient morphodynamique obtenu pour le bassin Allalah aux apports liquides moyens annuels des bassins.

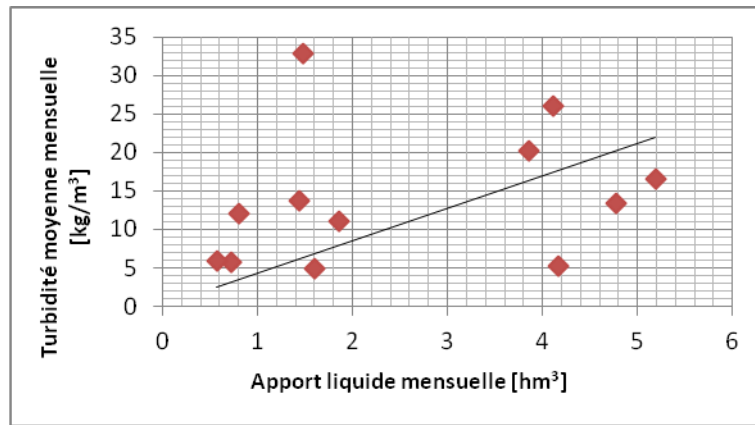


Figure III.21 : Corrélations apport liquide mensuelle – Turbidités Station de Sidi AKACHA

Modèle de régression linéaire : $Y = a x$, $a = 4.346$, Coefficient de corrélation : 0.409

En estimant la concentration moyenne des sédiments, nous avons déterminé le poids total annuel qui résulte du transport solide en suspension, égal à $9.38 \cdot 10^3$ t/a. En considérant une densité moyenne de 1.9 t/m^3 on obtient un volume total de $4936 \text{ m}^3/\text{a}$. Le pourcentage de sédiments du au transport solide sur le fond, peut être estimé à 20% du total annuel dû au transport en suspension. Cette considération porte à une estimation du volume total annuel global (sur le fond + en suspension) à $5200 \text{ m}^3/\text{a}$.

II.5 FACTEUR ECONOMIQUE

Le choix du site doit non seulement assurer la sécurité de l'ouvrage, mais encore conduire à un prix de revient raisonnable de l'eau mise à la disposition de l'utilisateur ; et on revient à la topographie du site qui doit permettre d'obtenir un volume maximal d'eau pour un cubage de terrassement minimal. Il faut que $3 < R < 10$.

$$R = \frac{\text{Volume d'eau de la reserve}}{\text{Volume de terre de la digue}} \quad \text{III.14}$$

Le tableau III.15 suivant résume les principales caractéristiques des bassins versant élémentaires :

Tableau III.15 : principales caractéristiques morphométriques) des bassins

Nom bassin	Superficie Km ²	Périmètre km	Indice de compacité K _C	Dimensions du rectangle équivalent		Densité de drainage Km/Km ²	Pente moyen du BV (%)	L chev principal km	Pente du Ch principal (%)
				L (Km)	l (Km)				
Sidi_Moussa_SA	21.71	28.06	1.69	12.26	1.77	3.29	26	8.87	3
Ain_Sefra	87.82	72.07	2.15	33.41	2.63	3.59	5	17.02	1
Ben_Amar_AN	3.16	12.01	1.89	5.42	0.58	4.45	46	3.78	5
Ben_Amar_OM	19.47	26.38	1.67	11.50	1.69	3.07	37	8.57	4
Bouzuert	18.8	24.19	1.56	10.26	1.83	3.31	49	7.87	8

Cheurfa	61.82	43.51	1.55	18.39	3.36	3.51	31	10.3	3
Derdousse	32.65	40.15	1.97	18.29	1.79	3.48	35	12	3
El_Abid	48.88	43.34	1.74	19.11	2.56	3.46	28	12.3	3
Kaddour_Saider	24.41	27.72	1.57	11.79	2.07	3.49	30	6.94	4
Kerrada	20.63	24.53	1.51	10.25	2.01	3.18	27	8.35	4
Kouachih	9.14	15.62	1.45	6.38	1.43	3.31	47	3.65	8
Malah_AN	3.16	12.01	1.91	5.47	0.58	3.77	50	4.25	6
Malah_SA	32.26	30.58	1.51	12.76	2.53	3.46	33	7.9	5
Malah_OM	81.36	52.75	1.64	22.81	3.57	2.29	10	13.74	3
Oued_El_Kheir	61.28	46.87	1.68	20.44	3	4.09	19	12.02	2
Roumane	28.23	32.76	1.73	14.42	1.96	3.66	37	10.23	5
Seddaoua	17.41	27.38	1.84	12.27	1.42	3.12	30	9.41	3
Sidi_Bakhti	53.09	48.89	1.88	22.04	2.41	2.25	40	13.6	3
Zaker	6.05	18.48	2.10	8.53	0.71	3.89	59	6.41	10
Zerrifa	28.61	40.82	2.14	18.89	1.52	2.02	43	14.15	3

III.6 PONDERATIONS DES CRITERES

Il n'existe pas de directives spécifiques pour PROMETHEE pour déterminer les poids des critères. Un outil adopté dans cette présente recherche montrée dans la figure III.21, basée sur la technique du «paquet de cartes» est implémenté dans le logiciel Simos Roy Figueira (SRF) (Figuiera J. et Roy B., 2002), disponible dans la version 2.2. Cet algorithme a été conçu par Jean Simos de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Il a été ensuite remanié par Bernard Roy du Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'aide à la Décision (LAMSADE, Paris, France), et programmé par José Figueira de la Faculty of Economics University of Coimbra (FEUC-Portugal).

III.6.1 Pondération par la technique du « paquet de cartes »

La technique du «paquet de cartes» implémentée dans le logiciel Simos Roy Figueira (SRF) est illustrée dans la figure III.22, et disponible dans la version 2.2. Ce logiciel a été conçu par Jean Simos de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Il a été ensuite remanié par Bernard Roy du Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'aide

à la Décision (LAMSADE, Paris, France), et programmé par José Figueira de la Faculty of Economics University of Coimbra (FEUC-Portugal).



Figure III.22. Fenêtre de présentation du logiciel SFR

Le logiciel SRF permet la détermination des poids des critères en les comparant avec des cartes, où chacune possède un numéro qui indique son importance relative aux autres cartes. Les étapes suivies par le logiciel pour aboutir à la pondération des critères sont décrites comme suit :

III.6.1.1 Première étape

Cette étape débute par la symbolisation de tous les critères sous forme d'un enchainement renfermant toutes les informations relatives à chaque critère. Le logiciel permet l'accès à la saisie de ces informations au moyen d'une boîte de dialogue décrite dans la figure III.23, qui permet d'introduire chaque critère un par un. Pour chacun des n critères, on doit mentionner un intitulé, un code et un numéro



Figure III.23. Saisie des données relatives à chaque critère

Une fois tous les critères saisis, une autre boîte de dialogue s'affiche exposée dans la figure III.24. Elle permet d'identifier l'acteur (décideur) par son nom, on peut entrer plusieurs noms.



Figure III.24. Identification des acteurs

En continuant, la colonne intitulée RANG doit être remplie, au moyen d'une boîte de dialogue étalée dans la figure III.25. Chaque critère lui correspond une carte. Le numéro de cette carte évoque en fait le rang auquel le critère appartient, rangé dans un ordre croissant. Le critère le moins important reçoit le rang 1, le critère qui vient ensuite reçoit le rang 2 et ainsi de suite. Les mêmes cartes correspondantes à des critères de même poids sont regroupées de façon à constituer des paquets d'ex aequo, qui seront le plus souvent réduite à une seule carte.



Figure III.25. Saisie du rang relatif à chaque critère

L'outil prend en compte le fait que deux classes de critères successives dans le rangement peuvent avoir, des importances plus ou moins proches. Afin que le calcul reflète ce plus ou moins grand écart d'importance, l'interrogé doit insérer des cartes blanches entre deux cartes (ou paquet de cartes) en nombre d'autant plus élevé que cet écart d'importance est plus grand. Pas de carte blanche signifie que les critères n'ont pas le même poids, mais que l'écart existe quand même et qui est doublé en insérant une carte, triplé en insérant deux cartes, etc. (voir figure III.26 ci-contre).

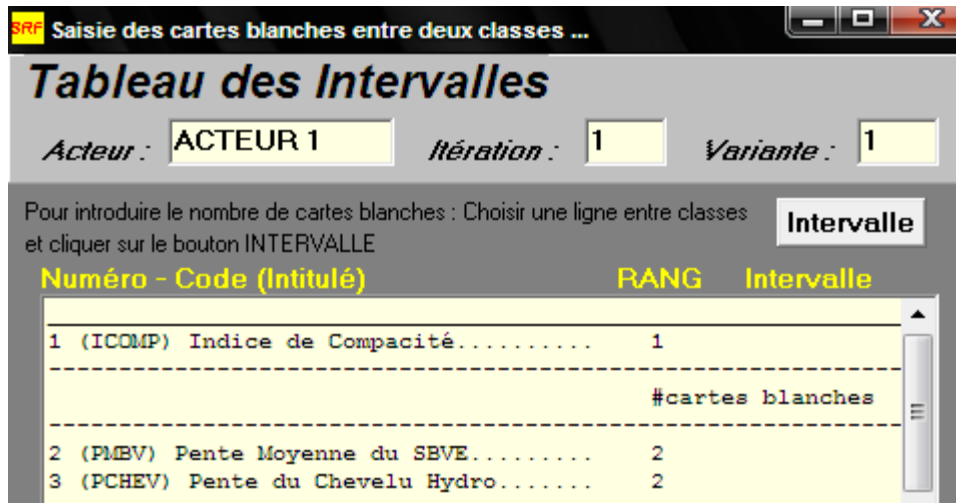


Figure III.26. Saisie des cartes blanches entre deux rangs voisins

III.6.1.2 Deuxième étape

Cette étape est consacrée au calcul et au traitement des données déjà saisies pendant la phase précédente. Le logiciel procède au calcul des poids, en tenant compte du rapport entre le poids du critère le plus important et le poids du critère le moins important. Une normalisation des poids est ensuite effectuée pour obtenir le tableau des résultats présenté dans la figure III.27, ainsi récapitulé dans le tableau III.16 qui dévoile le résultat final. On peut représenter le résultat sous forme d’histogrammes comme le montre la figure III.28.

Numéro - (Code) Intitulé	Rang	Intervalle	Poids non Normés	Poids Normés
2 - (PMBV) Pente Moyenne du SBVE.....	2	1	1,67	4
3 - (PCHEV) Pente du Chevelu Hydro.....	2	1	1,67	4
4 - (DDBV) Densité de Drainage du	3	2	2,67	7
5 - (SURFB) Surface du SBVE.....	4	2	3,67	9
6 - (AAL) Apport Annuel Liquide.....	5	2	4,67	12
7 - (AAS) Apport Annuel Solide.....	6	2	5,67	14
8 - (DCRUE) Débit de crue.....	6	2	5,67	14
9 - (GEOSI) Géologie du site de l'.....	7	1	6,33	16
10 - (FACEC) facteur économique.....	8	1	7	18

Figure III.27. Poids des critères par SFR

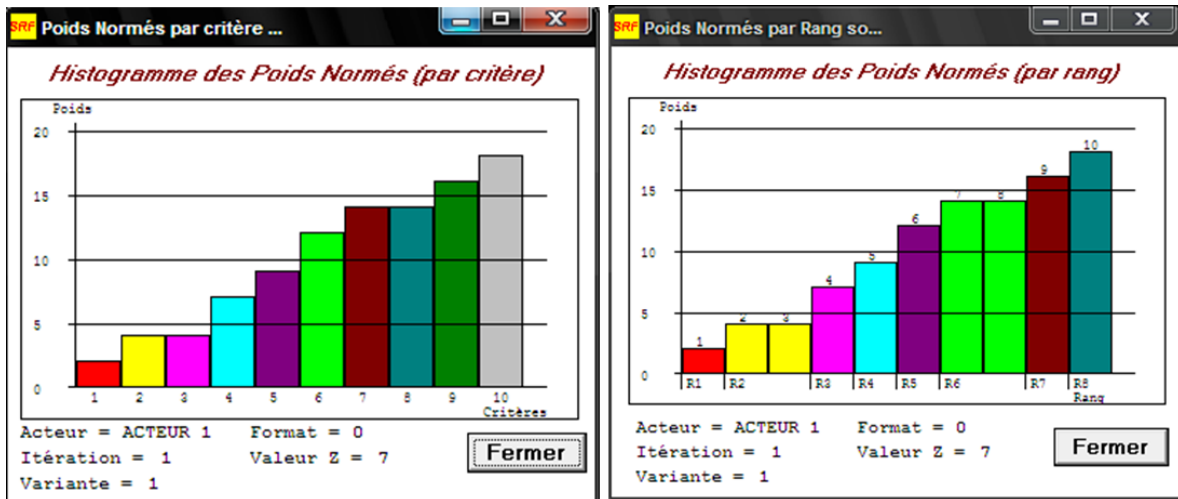


Figure III.28. Poids des critères par SFR

Tableau III.16. Rang et poids des critères

Numéro de critère	Nom du critère	Rang	Poids non normés	Poids normés
1	Indice de compacité	1	1	2
2	Pente moyenne du SBVE	2	1,67	4
3	Pente du chevelu Principal	2	1,67	4
4	Densité de drainage du SBVE	3	2,67	7
5	Surface du SBVE	4	3,67	9
6	Apport Annuel liquide	5	4,67	12
7	Apport Annuel solide	6	5,67	14
8	Débit de crue	6	5,67	14
9	Géologie site ouvrage	7	6,33	16
10	Facteur économique	8	7	18

III.6.2 Evaluation des alternatives par rapport aux critères

Cette étape constitue l'une des plus cruciales dans le processus de décision. D'une part, parce qu'elle représente l'un des piliers de la matrice d'évaluation sur lequel s'appuie l'ossature de l'algorithme de calcul. D'autre part, parce que c'est une étape qu'il faut conduire avec beaucoup de soin et d'attention. Ceci est étroitement lié à sa nature subjective et fortuite. En effet, chaque décideur perçoit les alternatives et les critères de son propre point de vue. L'estimation ou l'évaluation des actions sur chacun des critères peut être différente d'un décideur à l'autre. La chose la plus importante qu'on remarque dans la majorité des cas d'évaluation des alternatives est que les décideurs sont parfois imprécis ou incertains dans leurs estimations.

Par exemple, pour la question posée à un décideur : quelle est la formation géologique la plus adéquate pour l'implantation d'une retenue collinaire ? Il peut répondre par « formation géologique résistante », il peut répondre aussi par « formation géologique assez résistante ». Mais comment interpréter le qualitatif « résistante » et celui de « assez résistance » ? Comment peut-on leur attribuer une note d'évaluation ? Quelle est, dans ce cas, la limite entre « résistante » et de « assez résistante » .

La représentation floue de chaque critère (sous forme de sous ensemble flou) permet de mieux évaluer chaque alternative, en lui donnant une note qui correspond exactement au degré d'appartenance de chaque réponse. Cette modélisation des réponses des décideurs permet de mieux gérer la part vague et imprécise des évaluations fournies par les décideurs. C'est une manière simple d'exprimer les évaluations du décideur, puis de les projeter sur l'intervalle [0,1].

III.7 METHODOLOGIE

La recherche a commencé par identifier les parties prenantes clés qui seraient impliqués dans la planification des équipements hydrauliques. Leur implication est importante de s'assurer que l'approche suivie est rationnelle, équitable et transparente. (Franco L. A. et Montibeller G., 2009) ont défini les principales parties prenantes telles que les individus ou les groupes qui ont le pouvoir d'influer sur la décision lors de l'étude, les groupes qui sont concernés, ou perçus comme étant concernés par la décision. La méthodologie présentée dans la Figure 29 a été employée dans le but de classer les SBVE. Cette méthodologie est simple, transparente et efficace, tout en tenant compte de toutes les alternatives pour résoudre le problème. Le processus séquentiel, permet à chaque étape et aux étapes récursives d'améliorer la qualité de la décision.

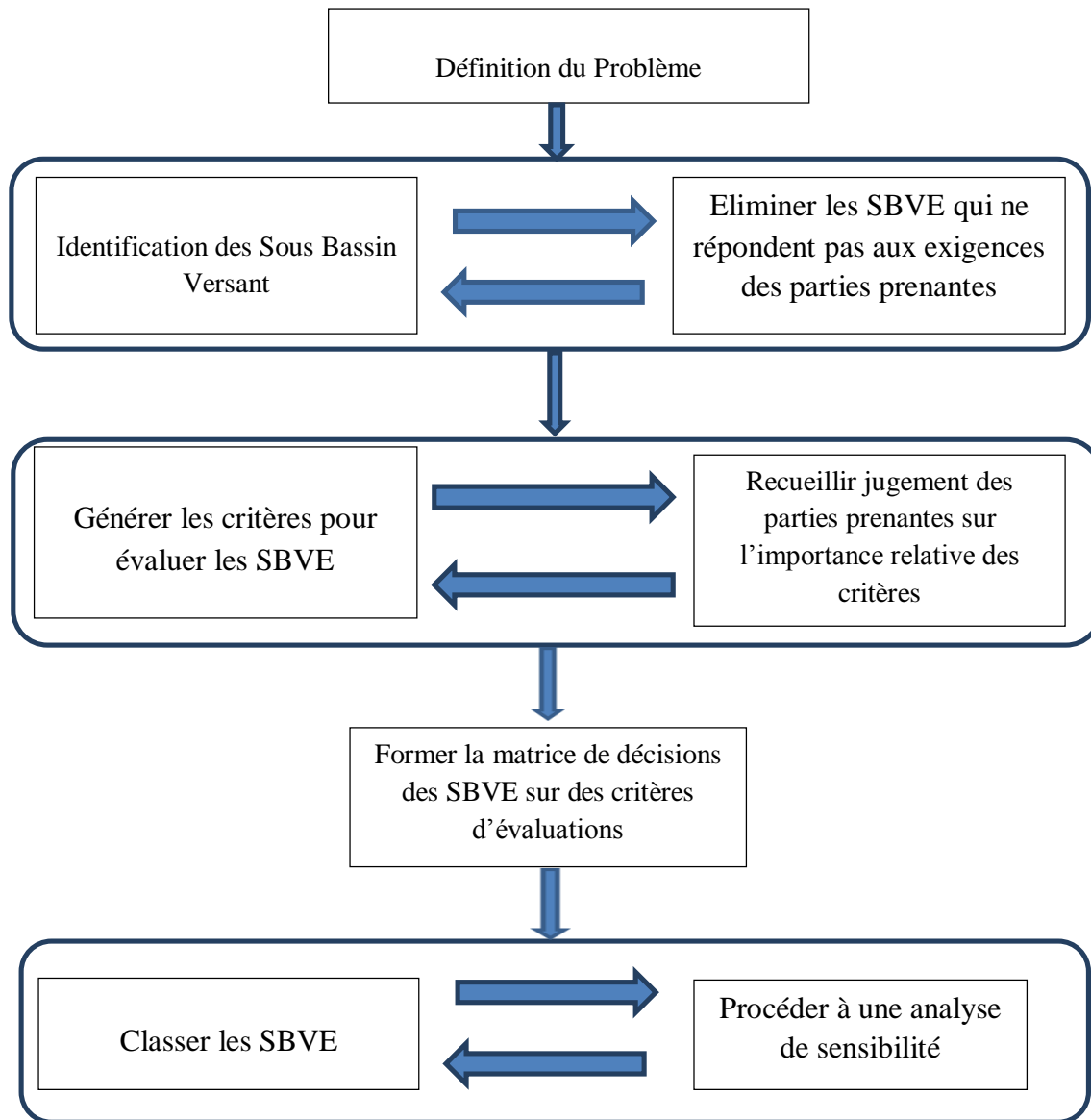


Figure III.29: méthodologie de classement

III.7.1 Les méthodes de surclassement utilisées et justification

La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHODS for Enrichment Evaluation) appartient à la famille des méthodes de surclassement (Brans J. P. et Vincke P. 1985), (Mareschal B. et Smet Y. V 2009) (Nemery Ph. Et al., 2012). Premièrement, Les alternatives sont comparées par paires sur chaque critère selon les préférences du décideur, produisant des résultats locaux. Ces résultats locaux sont alors agrégés à un résultat global, qui mène au classement PROMETHEE I ou à PROMETHEE II. Le résultat du rangement dans PROMETHEE I, est un préordre partiel tandis que, le résultat donné par PROMETHEE II est un préordre total. Habituellement cette approche prescriptive est combinée avec une approche descriptive, c'est la méthode GAIA. Nous décrivons brièvement ces deux méthodes ci-après :

Le problème consiste à déterminer les caractéristiques nécessaires pour chaque bassin versant élémentaire pouvant abriter une retenue collinaire. Pour mener une évaluation

multicritères avec la méthode PROMETHEE-GAIA, basée sur les critères présentés dans le tableau III.17 suivants :

Tableau III.17 : Définition des critères

Numéro du critère	Nom du critère	Notation	Echelle	Observations
1	Surface	SURF	numérique	Critère lié aux choix à la classification des SBVE : conditions topographiques
2	Pente moyenne du bassin versant élémentaire	PMSBV	numérique	Critère lié aux choix à la classification des SBVE : conditions topographiques
3	Pente du chevelu hydrographique principal	PCHV	numérique	Critère lié aux choix à la classification des SBVE : conditions topographiques
4	Densité de drainage	DDR	numérique	Critère lié aux choix à la classification des SBVE : conditions topographiques
5	Géologie du site de l'ouvrage	GEOS	qualitative	Critère lié aux choix à la classification des SBVE : conditions géologiques
6	Ratio : rapport du volume de l'ouvrage au volume de la cuvette	RATIO	numérique	Critère lié aux choix à la classification des SBVE : conditions économiques
7	Superficie irriguée	SUIRR	numérique	Critère lié aux choix à la classification des SBVE : conditions économiques
8	Apport moyen annuel	AAL	numérique	Critère lié aux choix à la classification des SBVE : conditions Hydrologiques
9	Apport annuel solide	AAS	numérique	Critère lié aux choix à la classification des SBVE : conditions Hydrologiques
10	Débit de crue	DDC	numérique	Critère lié aux choix à la classification des SBVE : conditions Hydrologiques

III.8 FORMATION DE LA MATRICE DE DECISION

Une fois que les alternatives sont déterminées, l'étape suivante consiste à évaluer les alternatives pour les critères définis. Les données ont été obtenues par des calculs avec l'outil SIG SAGAGIS. La majorité des critères sont généralement mesurés quantitativement, à l'exception du critère géologie du site de l'ouvrage qui a une échelle qualitative adaptée avec cinq niveaux de mesure. La matrice de décision ainsi construite est donnée dans le tableau III.18.

Tableau III.18 : Matrice d'évaluation des bassins versants élémentaires

ALTERNATIVE	SURF	PMSBV	PCHV	DDR	GEOS	RATIO	SUIRR	AAL	AAS	DDC
SBV1	21,71	26	3	3,29	Non résistant	2.47	191	1,35	4950	57.77
SBV2	87,82	5	1	3,59	résistant	9.21	460	3,37	30848	161.88
SBV3	3,16	46	5	4,45	Résistance moyenne	10.24	469	0,05	7	17.07
SBV4	19,47	37	4	3,07	Résistance faible	5.51	180	1,43	5554	52.87
SBV5	18,8	49	8	3,31	Non résistant	0.32	449	0,93	2349	53.32
SBV6	61,82	31	3	3,51	Résistance moyenne	7.50	124	4,5	55004	148.06
SBV7	32,65	35	3	3,48	Résistance moyenne	10.98	600	2	10865	73.82
SBV8	48,88	28	3	3,46	Non résistant	3.43	267	3,45	32330	107.88
SBV9	24,41	30	4	3,49	Non résistant	5.11	180	1,35	4950	64.43
SBV10	20,63	27	4	3,18	Très résistant	14.26	192	1,44	5632	56.66
SBV11	9,14	47	8	3,31	Non résistant	9.72	64	0,48	626	38.83
SBV12	3,16	50	6	3,77	Résistance moyenne	22.15	8	0,06	10	12.79
SBV13	32,26	33	5	3,46	Non résistant	6.88	299	2,24	13629	89.93
SBV14	81,36	10	3	2,29	Non résistant	13.51	725	5,44	80384	167.30
SBV15	61,28	19	2	4,09	Non résistant	20.88	439	3,29	29401	135.89
SBV16	28,23	37	5	3,66	résistant	8.90	239	1,79	8703	69.42
SBV17	17,41	30	3	3,12	Très résistant	17.59	156	1,17	3718	45.26
SBV18	53,09	40	3	2,25	Résistance moyenne	9.68	469	3,52	33655	111.16
SBV19	6,05	59	10	3,89	Très résistant	20.08	41	0,31	261	19.61
SBV20	28,61	43	3	2,02	Non résistant	8.55	267	2,09	11865	59.80

III.9 EVALUATION DES ALTERNATIVES PAR RAPPORT AUX CRITERES

Cette étape constitue l'une des plus cruciales dans le processus de décision. D'une part, parce qu'elle représente l'un des piliers de la matrice d'évaluation sur lequel s'appuie l'ossature de l'algorithme de calcul. D'autre part, parce que c'est une étape qu'il faut conduire avec beaucoup de soin et d'attention. Ceci est étroitement lié à sa nature subjective et fortuite. En effet, chaque décideur perçoit les alternatives et les critères de son propre point de vue. L'estimation ou l'évaluation des actions sur chacun des critères peut être différente d'un décideur à l'autre. La chose la plus importante qu'on remarque dans la majorité des cas d'évaluation des alternatives est que les décideurs sont parfois imprécis ou incertains dans leurs estimations.

III.9.1 Premier critère : La surface du BVE

Les alternatives seront notées sur ce critère en se basant sur l'importance de la valeur de la surface de chaque BVE, le tableau III.19 affiche le degré de satisfaction et les conventions numérique pour le critère surface. Cette valeur est obtenue par une délimitation automatique au niveau du MNT. Les BVE ayant une surface importante auront la note complète, dans l'hypothèse où le BV a une surface inférieure, les autres sites ont leur note réduite en proportion.

Tableau III.19 : Degré de satisfaction et convention numérique du critère surface

Degré de satisfaction	Surface en Km ²	Convention numérique dans l'intervalle [0,1]
Très favorable	87,82<S>61,82	1
Favorable	53.09<S>32.65	0,75
moyen	32.65<S>24,41	0.5
défavorable	24.41<S>6.05	0.25
Très défavorable	6.05<S>3.16	0

III.9.2 Deuxième critère : la pente moyenne du BVE

Les alternatives seront notées sur ce critère en se basant sur l'importance de la valeur de la pente moyenne du BVE (voir expression III.2). Les BVE ayant des Pentes moyennes faible auront la note maximale, les autres sites ont leur note réduite en proportion. Le tableau III.20 révèle le degré de satisfaction et les conventions numériques pour le critère PMSBV.

Tableau III.20 : Degré de satisfaction et convention numérique du critère PMSBV

Degré de satisfaction	PMSBV en %	Convention numérique dans l'intervalle [0,1]
Très favorable	19<PMSBV>5	1
Favorable	19<PMSBV>30	0,75
moyen	30<PMSBV>40	0.5
défavorable	40<PMSBV>60	0

III.9.3 Troisième critère : la pente moyenne du chevelu principal du BVE

Les alternatives seront notées sur ce critère en se basant sur l'importance de la valeur de la pente moyenne du chevelu principal du BVE (voir expression III.3). Les BVE ayant des Pentes moyennes des PCHV faible auront la note maximale, les autres sites ont leur note réduite en proportion. Le tableau III.21 expose le degré de satisfaction et les conventions numériques pour le critère PCHV.

Tableau III.21 : Degré de satisfaction et convention numérique du critère PCHV

Degré de satisfaction	Surface en Km ²	Convention numérique dans l'intervalle [0,1]
Très favorable	1<PCHV>3	1
Favorable	3<PCHV>5	0,75
moyen	5<PCHV>6	1/2
défavorable	6<PCHV>8	1/55

III.9.4 Quatrième critère : Densité de drainage du BVE

Les alternatives seront notées sur ce critère en se basant sur l'importance de la valeur de la densité de drainage de chaque BVE. Cette valeur est obtenue par calcul (voir expression III.4). Les BVE ayant des valeurs de densités de drainage faible auront la note maximale, les autres BVE auront leur note réduite en proportion. Le tableau III.22 relate le degré de satisfaction et les conventions numériques pour le critère DDR.

Tableau III.22 : Degré de satisfaction et convention numérique du critère densité de drainage

Degré de satisfaction	DRR [-]	Convention numérique dans l'intervalle [0,1]
favorable	2.02<DRR>3.07	1
moyen	3.07<DRR>3.49	0.5
moyen	3.49<DRR>4.49	0

III.9.5 Cinquième critère : la géologie du site

Les alternatives seront notées sur ce critère en se basant sur la complexité géologique présentée pour chaque site (selon la localisation des exutoires de chaque BVE sur carte géologique). Le tableau III.23 suivant expose la relation entre le degré de satisfaction, la formation géologique de chaque site et sa projection sur l'intervalle [0,1]. Chaque site est évalué par une note en fonction de la complexité géologique. L'ensemble des notes est récapitulé ci-contre.

Tableau III.23. Degré de satisfaction et convention numérique du critère 9.

Les degrés de satisfaction	La formation géologique	Convention numérique dans l'intervalle [0,1]
Très favorable	Formation grés et sables, grés calcaire lumachelique	1
favorable	Sables, grés conglomérats et argiles rouges	0,75
Moyen	Tripolis et argiles à tripolis, alluvions,	0.5
Défavorable	Marnes à cinérites, marnes bleues,	0.25
Très défavorable	Gypses et argiles gypseuses	0

III.9.6 Sixième critère : facteur économique (Ratio)

Les alternatives seront notées sur ce critère en se basant sur le calcul du ratio volume de l'ouvrage/volume de la cuvette. Il faut que le volume de l'ouvrage ne dépasse pas le volume de la cuvette de 20%. Par conséquent, les alternatives pour lesquelles ce ratio est supérieur à 20% auront la note 0, ceux dont le ratio est égal à 10% auront la moyenne de 1/2 et ceux dont le ratio est inférieur à 5% auront la note maximale à savoir 1, les autres alternatives auront une note intermédiaire (voir tableau III.24) ci-contre :

Tableau III.24. Degré de satisfaction et convention numérique du critère Ratio.

Les degrés de satisfaction	Facteur économique	Convention numérique dans l'intervalle [0,1]
Très favorable	< 5%	1
favorable	7,5 %	0,75
Moyen	10 %	0.5
Défavorable	15 %	0.25
Très défavorable	>20%	0

III.9.7 Septième critère : Superficie irriguée

Les alternatives seront notées sur ce critère en se basant sur l'importance de la valeur de la superficie à irriguer.. Les BVE ayant des superficies à irriguer importante auront la note maximale, les autres sites ont leur note réduite en proportion. Le tableau III.25 affiche le degré de satisfaction et les conventions numériques pour le critère superficie irriguée.

Tableau III.25 : Degré de satisfaction et convention numérique du critère superficie irriguée

Degré de satisfaction	Superficie irriguée [Ha]	Convention numérique dans l'intervalle [0,1]
Très favorable	400<SIRR>750	1
Favorable	400<SIRR>350	0,75
moyen	350<SIRR>250	0.5
défavorable	250<SIRR>64	0.25
Très défavorable	<64	0

III.9.8 Huitième critère : Apport d'eau annuel

Les alternatives seront notées sur ce critère en se basant sur l'apport moyen annuel calculé selon (§III4.2.3). Les BVE ayant un volume important auront la note maximale, les autres BVE qui ont une capacité inférieure auront leur note réduite en proportion (voir tableau III.26 ci-après).

Tableau III.26 Degré de satisfaction et convention numérique Apport annuel.

Degré de satisfaction	Apport Moyen annuel Mm3	Convention numérique dans l'intervalle [0,1]
Favorable	3	1
Moyen	1,5	0.5
Défavorable	0	0

III.9.9 Neuvième critère : Apport solide

Les alternatives seront notées sur ce critère en se basant sur l'apport moyen annuel des sédiments calculé Selon (§III4.4). Les SBVE ayant un volume moins important auront la note maximale, , les autres SBVE auront leur note réduite en proportion (voir tableau III.26 ci-après).

Tableau III.27 Degré de satisfaction et convention numérique du critère 7.

Degré de satisfaction	Apport Moyen annuel t/ha/an	Convention numérique dans l'intervalle [0,1]
favorable	3	1
Moyen	1,5	0.5
Défavorable	0	0

III.9.10 Dixième critère : débit de crue

Les alternatives seront notées sur ce critère en tenant compte du débit de crue calculé par l'expression III.12. Les SBVE ayant un débit de crue moins important auront une note plus importante que les autres (voir tableau III.28 ci-après).

Degré de satisfaction	Débit de crue en m3/s	Convention numérique dans l'intervalle [0,1]
Favorable	1	1
Moyen	1/2	0.5
Défavorable	0	0

Tableau III.28. Degré de satisfaction et convention numérique du critère 8.

A la fin de cette étape nous obtiendrons la matrice d'évaluation illustrée dans le tableau III.29 suivant (Cr = critère) :

Tableau III.29 Matrice d'évaluation

Alternatives \ Critères	CR1 Surface du BVE	CR2 Pente Moyenne du BVE	CR3 Pente du cheveu Hydro	CR4 Densité de Drainage	CR5 Géologie du site de l'ouvrage	CR6 Facteur économique	CR7 superficie irriguée	CR8 Apport Annuel Liquide	CR9 Apport Annuel Soli	CR10 débit de crue
Sidi_Moussa_SA	0.5	0.5	1	0.75	0	0	0.25	0.75	0	0
Ain_Sefra	1	1	1	0.5	0.75	1	1	0	0.75	1
Ben_Amar_AN	0	0	0.5	0.25	0.5	0.48	1	1	0.5	0.48
Ben_Amar_OM	0.75	0.5	0.5	0.75	0.25	0.45	0.25	0.75	0.25	0.45
Bouzuert	0.5	0	0	0.75	0	0.63	1	0.75	0	0.63
Churfa	1	0.5	1	0.5	0.5	1	0.25	0	0.5	1
Derdousse	0.75	0.5	1	0.5	0.5	0.54	1	0.75	0.5	0.54
El_Abid	0.75	0.5	0.5	0.5	0	0.43	0.5	0.5	0	0.43
Kaddour_Saider	0.25	0.5	0.5	0.5	0	1	0.25	0.75	0	1
Kerrada	0.5	0.5	0.5	0.75	1	1	0.25	0.75	1	1
Kouachih	0.25	0	0	0.75	0	0.35	0.25	1	0	0.35
Malah_AN	0	0	0.5	0.25	0.5	0.46	0	1	0.5	0.46
Malah_SA	0.75	0.5	0.5	0.5	0	0	1/2	0.5	0	0
Malah_OM	1	1	1	1	0	0.56	1	0	0	0.56
Oued_El_Kheir	1	1	1	0.25	0	0.37	1	0	0	0.37
Roumane	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.49	0.25	0.75	0.75	0.49
Seddaoua	0.5	0.5	1	0.75	1	0.29	0.25	0.75	1	0.29
Sidi_Bakhti	1	0	1	1	0.5	0.47	1	0.5	0.5	0.47
Zaker	0.25	0	0	0.25	1	0	0	1	1	0
Zerrifa	0.75	0	1	1	0	0.50	1/2	0.75	0	0.50

III.10 CHOIX DES SEUILS DE PREFERENCE ET D'INDIFFERENCE

La méthode multicritère PROMETHEE, fait introduire la notion de seuil variable. Dans le cas de notre application, pour chaque critère on a défini les deux seuils p et i comme des seuils fixes,

- La détermination du seuil d'indifférence sur un critère donné se fait en fonction de la plus petite différence entre deux évaluations. Cette différence est considérée comme la marge d'incertitude minimale liée aux calculs.
- Le seuil de préférence strict est déterminé de façon qu'il soit toujours supérieur au seuil d'indifférence d'une part, et d'autre part, il faut qu'il modélise les préférences du décideur, à savoir la marge maximale d'erreur liée aux calculs.

Le tableau suivant présente l'ensemble des seuils d'indifférence et de préférence utilisés dans le cadre de notre application.

Tableau IV.30 Seuils d'indifférence et de préférence

Critères Seuils	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9	Cr10
Indifférence « i »	0.2	5	1	0.1	0.25	5	50	1.5	300	5
Préférence « p »	1	10	10	0.3	0.5	10	100	4	1000	20

CONCLUSION

La méthodologie appliquée se révèle appropriée et d'utilisation facile et pouvant être employée pour d'autres secteurs d'étude. L'extraction automatique des chevelus hydrographiques obtenus au moyen des données SRTM présente une précision compatible avec celle basée sur l'emploi des cartes topographiques. Les principaux avantages de l'emploi des données SRTM, sont la gratuité des données, l'économie de temps pour la réalisation de recherches et diagnostics environnementaux, spécialement dans les régions dénuées de couvertures cartographique. La délimitation automatique des bassins, au moyen de traitement de données sur la base d'outils SIG, se présente avantageuse concernant le coût et de bénéfice proportionné, permettant en outre d'établir la normalisation du tracé.

CHAPITRE IV

MISE EN ŒUVRE ET APPLICATION

INTRODUCTION

La première analyse multicritère a été réalisée avec la méthode PROMETHEE-GAIA (cf.II.8). Cette analyse a été conduite en prenant en considération la série de poids définie dans le chapitre précédent. Pour cette pondération, les résultats obtenus ont été soumis à une analyse de sensibilité. Au final, l'analyse de sensibilité et de robustesse fournit une multitude de classements qui seront synthétisés. La synthèse de l'ensemble des résultats permet d'émettre de façon simple une recommandation fiable et robuste.

IV.1 APPLICATION DE LA METHODE PROMETHEE-GAIA

Dans cette recherche, la méthode PROMETHEE a été choisie en raison de sa simplicité et sa capacité de rapprocher la façon dont l'esprit humain exprime et synthétise les préférences en face des multiples perspectives de décision contradictoires. La méthode PROMETHEE appartient à la famille élargie des méthodes de surclassement.

IV.1.1 Justification du choix de la méthode PROMETHEE

Certes les décideurs optent pour certaines méthodes d'AMCD parmi plusieurs autres en fonction de la problématique abordée mais aussi en fonction des propriétés des méthodes qui traitent la matrice d'évaluation des alternatives par rapport à chaque critère. Notre objectif consiste à comparer les résultats des deux méthodes suscitées afin de dresser une classification des bassins versant élémentaires pour un équipement hydraulique, en combinant des critères hétérogènes dont les valeurs sont sujettes à des imprécisions et des incertitudes. Il ne s'agit pas donc de la recherche d'un optimum mais plutôt d'un bon compromis. Les avantages de l'agrégation partielle des critères, nous conduisent au choix de cette approche opérationnelle.

En effet, la richesse des relations possibles entre les alternatives (indifférence, préférence forte, préférence faible et incomparabilité). Dans d'étude actuelle la méthode PROMETHEE a été choisie comme méthode d'analyse multicritère d'aide à la décision, principalement en raison de ses propriétés non compensatoires, sa simplicité, la clarté de son l'algorithme. Le caractère non-compensatoire de PROMETHEE est significativement est également important dans le contexte de la présente étude que la méthode conserve les principes d'assurer un rangement des alternatives par l'utilisation d'une variété de critères émanant de perspectives diversifiées, techniques, économiques, environnementaux et sociaux. Elle est autant facile à comprendre par rapport à d'autres méthodes de surclassement tel que la famille ELECTRE (Brans et Mareschal, 2005). L'étude menée par le Gilliams et al. (2005) fait remarqué que PROMETHEE a un avantage sur ELECTRE III, en termes de convivialité, la simplicité de la stratégie de modèle, la variation de la solution, et la mise en œuvre. En outre, les méthodes PROMETHEE ont semblé être plus stable par rapport à l'ELECTRE III en termes d'analyse de sensibilité (Brans

et al., 1986). En outre, ils sont faciles à utiliser, intuitif, vérifiable, et disposant de plusieurs outils graphiques et interactifs (Mutikanga et al., 2011).

Finalement, le choix de PROMETHEE a aussi résulté d'une facilité d'usage. En effet, cette méthode se décline sous la forme d'un outil associé à une interface graphique conviviale, elle permet donc un traitement facile des résultats et une vérification de la robustesse des résultats. Tenant compte de la problématique abordée qui est classée dans la catégorie des problématiques Gamma (γ), et associée à une démarche constructive, les méthodes qui sont envisageables dans cette recherche sont les méthodes : PROMETHEE I, PROMETHEE II et AHP.

IV.1.2 Paramètres pour PROMETHEE

L'application de la méthode PROMETHEE nécessite, comme pour les autres méthodes d'agrégation partielle, la mise en place de seuils pour chaque critère. Dans le cas de PROMETHEE, il faut définir deux seuils, d'indifférence et de préférence, pour chaque critère. Dans ce paragraphe sont présentés les différents seuils utilisés pour obtenir la solution de base. En effet, ces seuils subiront des variations dans l'analyse de sensibilité afin d'étudier leurs influences sur les résultats obtenus. Ces seuils sont en effet fixés par « choix », c'est-à-dire qu'ils ne reposent pas forcément sur des bases théoriques fortes, il est donc important d'étudier leurs influences afin de valider la recommandation finale. Les seuils utilisés pour la solution de base sont présentés dans le tableau IV.4. Le seuil d'indifférence pour le critère SURF a été fixé à 0.1 (0.1 km², soit 10 ha). Le seuil de préférence est dix fois supérieur à ce seuil d'indifférence. Les deux seuils retenus pour le critère densité de drainage, ont été fixés en respectant un ratio de 4. Les seuils d'indifférence et de préférence des autres critères ont été fixés à partir de l'amplitude des évaluations présentées dans le tableau IV.7.

IV.1.2.1 Critères utilisés

Les critères utilisés pour le rangement des bassins versant élémentaires sont récapitulés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Définition des critères

<i>Numéro de critère</i>	<i>Nom du critère</i>	<i>Notation</i>	<i>Echelle</i>	<i>Observations</i>
1	Superficie	SURF	numérique	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : topographie
2	Densité de drainage	DD	numérique	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : topographie
3	Géologie du site de la structure	GEOS	qualitatif	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : géologie
4	Superficie irriguée	SUIRR	numérique	Criterion related to the choice of classification EW: economic conditions
5	Débit de crue	DC	numérique	Critère lié aux critères de rangement des SBVE : hydrologie

IV.1.2.2 Paramètres des critères

Le Tableau IV.4 résume les paramètres de préférences, la fonction sélectionnée est "linéaire", les seuils et les préférences indifférence sont également exprimés. Certains paramètres sont à maximiser tandis que d'autres doivent être minimisés.

IV.1.3 Détermination des poids des critères selon la méthode AHP

IV.1.3.1 Détermination des poids critères

Les poids des critères illustrés dans le tableau IV.2 sont déterminés conformément à la méthode AHP (cf.II.7), suivi de la matrice normalisée illustrée dans le tableau IV.5. En bref, la valeur propre maximisée, CI (indiqué dans le tableau IV.3) et CR sont employés pour obtenir le poids de chaque critère. Tous les critères ont été comparés par paires afin de déterminer leur importance relative. AHP a été utilisée afin de déterminer quels sont les critères de sélection des bassins versants élémentaires, à savoir la surface de bassin versant élémentaire (SURF), la densité de drainage (DDR), la géologie du site de la structure (GEOS), la superficie irriguée (SUIRR) et le débit de crue (DC). Les résultats de la pondération des critères par la méthode AHP sont donnés dans (cf.IV.2, les tableaux de Comparaison par paire des alternatives pour les cinq critères), suivie par les matrices normalisées pour les critères en question.

Tableau IV.2. Matrice de comparaison par paires des critères

	SURF	DDR	GEOS	SUIRR	DDC
SURF	1	4	1/2	1/5	8
DDR	1/5	1	1/7	1/8	2
GEOS	2	7	1	1	8
SUIRR	4	8	1	1	9
DDC	1/8	1/2	1/8	1/9	1

Table IV.3: Indices de cohérence moyen

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rando m Index	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Randon

n 5 Randon Index 1,12
 λ_{max} 5.16772285
 $CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ 0.04193071
 CI/RI 0.03743814 3.17381 <10%

Une valeur de RC inférieure à 10% est généralement acceptable, sinon, les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences.

IV.1.3.2 Choix des seuils de préférence et d'indifférence

Dans le modèle du pseudo critère, on fait intervenir les deux seuils : p de préférence et i d'indifférence pour prendre en compte l'imprécision et l'incertitude qui affectent les évaluations (ou performances). Ce dernier, tient compte, en plus des seuils d'indifférence et de préférence de la pondération des critères.

- Dans le cas de notre application, pour chaque critère on a défini les deux seuils p et i comme des seuils fixes,
- La détermination du seuil d'indifférence sur un critère donné se fait en fonction de la plus petite différence entre deux évaluations. Cette différence est considérée comme la marge d'incertitude minimale liée aux calculs.

- Le seuil de préférence strict est déterminé de façon qu'il soit toujours supérieur au seuil d'indifférence d'une part, et d'autre part, il faut qu'il modélise les préférences du décideur, à savoir la marge maximale d'erreur liée aux calculs.

Le tableau IV.4 englobe les paramètres essentiels des critères servant au rangement des alternatives.

Tableau IV.4. Paramètre des critères

criteria	Type	Min/Max	Function	Weights	Indif.	Pref.	Unit	scale
AEW	Pair Wise	Max	linear	17.95 %	0.1	1	km ²	Num
DD	Pair Wise	Min	linear	5.12 %	0.5	2	km/km ²	Num
GEOS	Pair Wise	Max	linear	33.24 %	0.25	0.5	-	Num
IRA	Pair Wise	Max	linear	40.35 %	10	100	ha	Num
FD	Pair Wise	Min	linear	3.34 %	5	20	m ³ /s	Num

IV.1.3.4 Normalisation de la matrice

Tableau IV.5. Matrice normalisée

	SURF	DDR	GEOS	SUIRR	DDC	PRIORITY VECT		POIDS EN %
SURF	0,136	0.2	0,1806	0,101	0.286	0,89763328	0,1795	18
DDR	0,034	0,05	0,0516	0,05	0,071	0,05119992	0,0512	5
GEOS	0.271	0,34	0,3613	0,402	0.286	1,6618891	0,3324	33
SUIRR	0.542	0,39	0,3613	0,402	0,321	2,01757031	0,4035	40
DDC	0,017	0,02	0,0452	0,045	0,036	0,16690771	0,0334	3
						1.00	100	

IV.1.4 Matrice de performance

Table IV.6. Matrice de performance des bassins versant élémentaires

ALTERNATIVE	AEW	DD	GEOS	IRA	FD
B1	21.71	3.29	Not résistant	191	57.77
B2	87.82	3.59	résistant	460	161.88
B3	19.47	3.07	Weak resistant	180	52.87
B4	18.8	3.31	Not resistant	449	53.32
B5	61.82	3.51	Medium resistant	124	148.06
B6	32.65	3.48	Medium resistant	600	73.82
B7	48.88	3.46	not resistant	267	107.88
B8	24.41	3.49	Not resistant	180	64.43
B9	20.63	3.18	Very resistant	192	56.66
B10	32.26	3.46	Not resistant	299	89.93
B11	81.36	2.29	Not resistant	725	167.30
B12	61.28	4.09	Not resistant	439	135.89
B13	28.23	3.66	resistant	239	69.42
B14	53.09	2.25	Medium resistant	469	111.16
B15	28.61	2.02	Not Resistant	267	59.80

Après normalisation du critère GEOS le tableau IV.6 devient :

Table IV.7. Matrice de performance des bassins versant élémentaires

ALTERNATIVE	AEW	DD	GEOS	IRA	FD
B1	21.71	3.29	0	191	57.77
B2	87.82	3.59	0.75	460	161.88
B3	19.47	3.07	0.25	180	52.87
B4	18.8	3.31	0	449	53.32
B5	61.82	3.51	0.5	124	148.06
B6	32.65	3.48	0.5	600	73.82
B7	48.88	3.46	0	267	107.88
B8	24.41	3.49	0	180	64.43
B9	20.63	3.18	1	192	56.66
B10	32.26	3.46	0	299	89.93
B11	81.36	2.29	0	725	167.30
B12	61.28	4.09	0	439	135.89
B13	28.23	3.66	0.75	239	69.42
B14	53.09	2.25	0.5	469	111.16
B15	28.61	2.02	0	267	59.80

IV.1.5 L'Algorithme AMC utilisé (Le logiciel D-Sight)

D-Sight appartient à la troisième génération de logiciels d'aide à la décision basée sur la méthodologie PROMETHEE-GAIA. Il permet de structurer le problème de décision intuitivement par le regroupement des critères similaires ou alternatives similaires. Les alternatives pourraient être marquées soit sur des échelles numériques ou définies par des échelles qualitatives. Facile à utiliser D-Sight permet une décision plus rapide et par ses outils visuels permettent une meilleure interaction entre les parties prenantes. Outils disponibles pour l'analyse de sensibilité permettrait d'examiner des scénarios de manière plus transparente, ce qui permet d'accroître la confiance des parties prenantes dans les solutions trouvées. Une version 3.3.2 du logiciel a été utilisée pour cette étude. Dans la figure IV.1 ci-dessous, les différentes alternatives sont comparées suivant les critères «GEOS» et «SURF». L'alternatif "B11" est meilleur pour GEOS tandis que "B4" est moins bon.

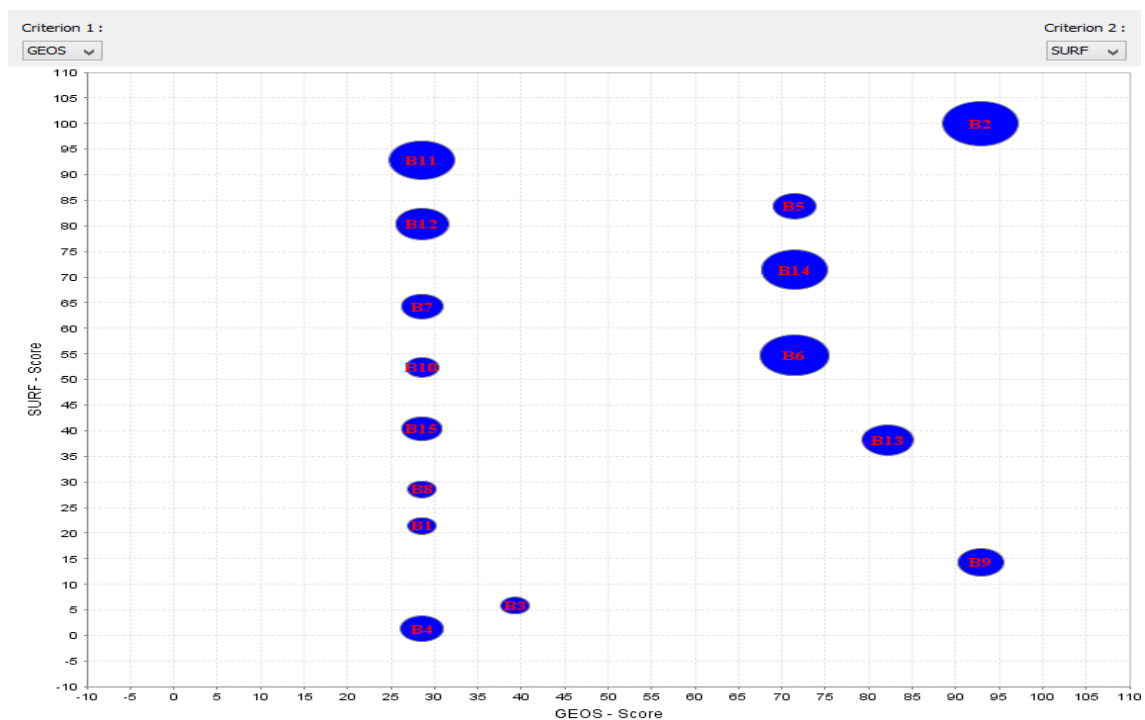


Figure.IV.1. Comparaison des alternatives par rapport aux critères GEOS et SURF

Dans la figure IV.2 suivante, les alternatives sont comparées selon les critères «DD» et «SUIRR». Dans cette figure, "B6" et "B11" sont à la fois les meilleurs pour les deux critères «DD», et "SUIRR" tandis que l'alternative « B5 » est pire pour les deux critères.

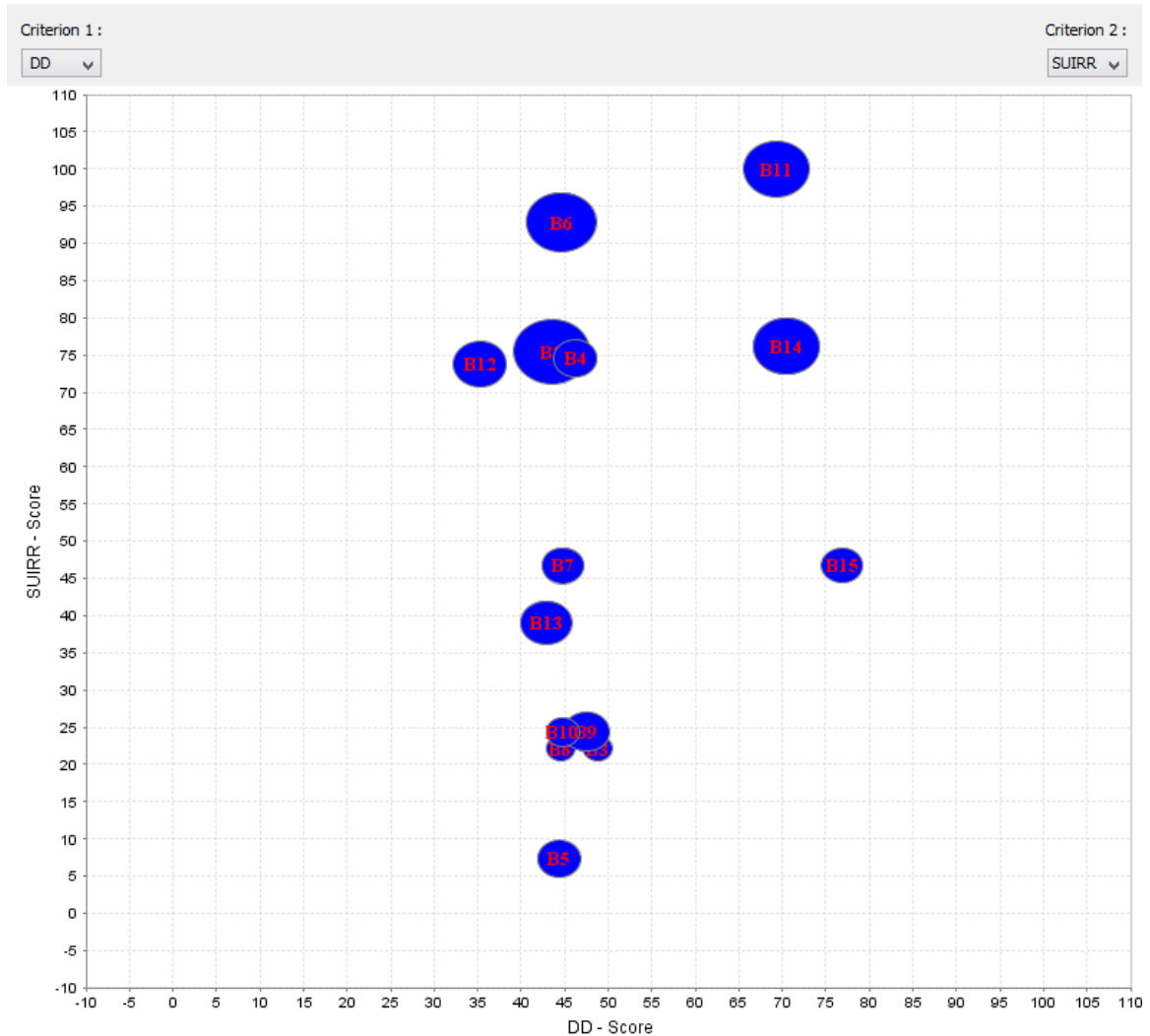


Figure. IV.2. Comparaison des alternatives par rapport aux critères DD et SUIRR.

IV.1.5.1 PROMETHEE I : Dans PROMETHEE Diamond, les alternatives sont représentées dans un plan incliné à 45° en fonction de leur flux de préférence positive (Φ^+) et négatif (Φ^-). La figure IV.3 illustre la Représentation « PROMETHEE Diamond», les flux de préférence est (Φ^+ , Φ^-) des alternatives sont tracés de telle façon que l'axe vertical donne le flux net ($\Phi = \Phi^+ - \Phi^-$) des alternatives dans l'ordre croissant. Le rangement des alternatives est établi selon PROMETHEE I, c'est-à-dire l'incomparabilité est tolérée.

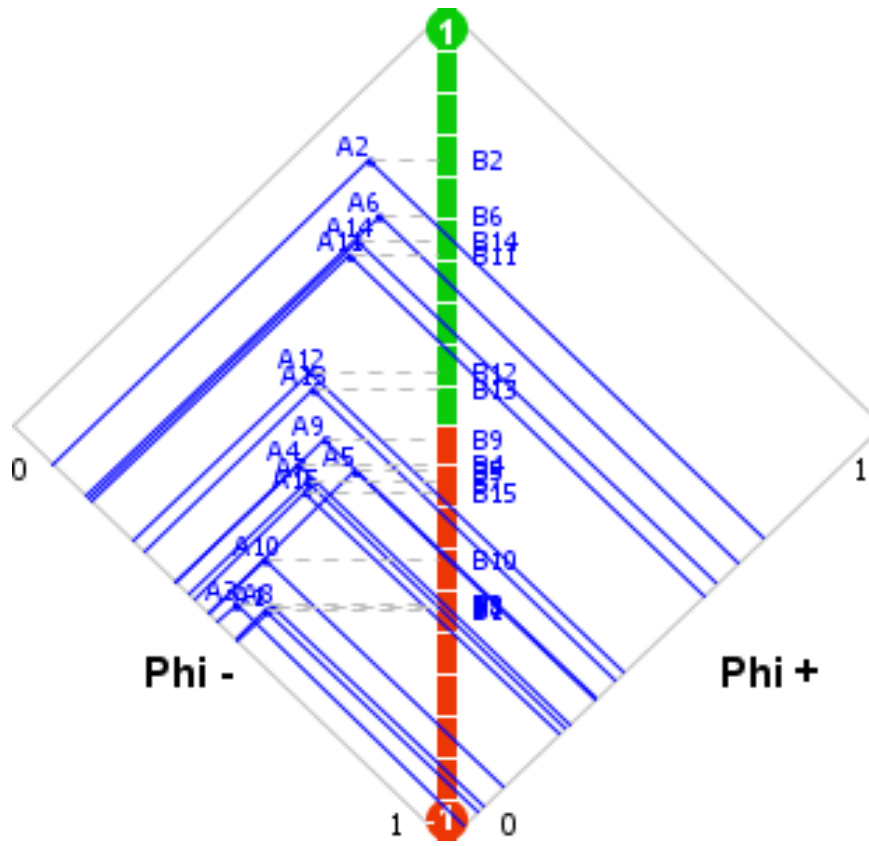


Figure. IV.3. Contribution des critères pour chaque alternative

IV.1.5.2 PROMETHEE II : la figure IV.4 et tableau IV.8, expriment les scores globaux (flux nets) de toutes les alternatives. Alors que le tableau IV.9 présente les résultats de la méthode PROMETHEE II pour le rangement des alternatives avec l'utilisation de la fonction linéaire.

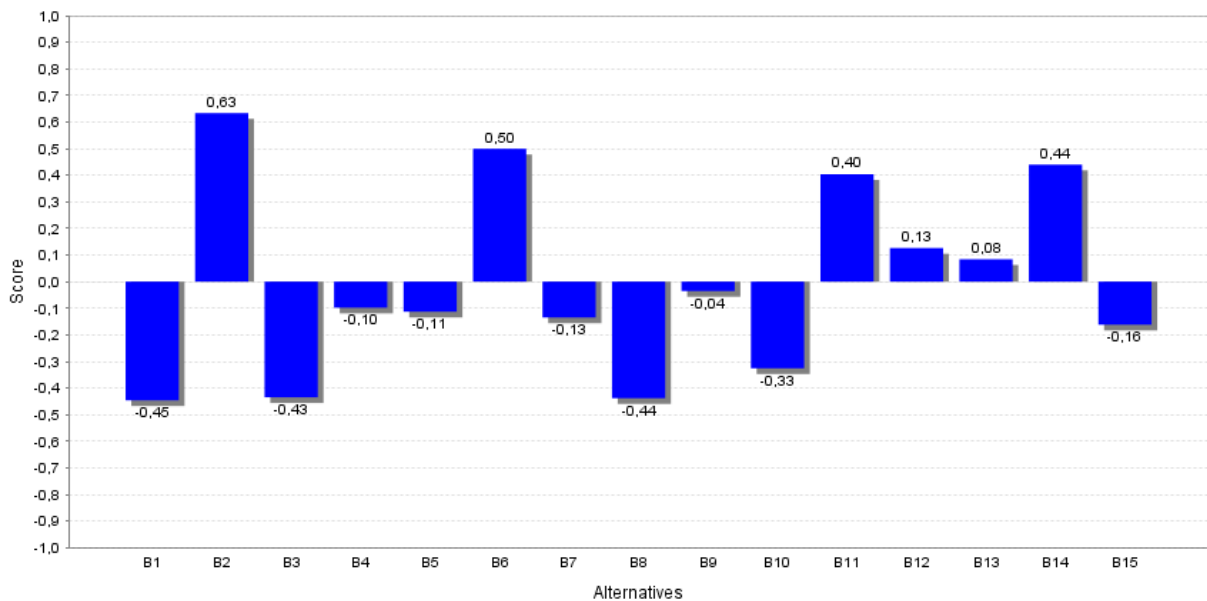


Figure. IV.4 Représentation graphique du flux net

Ces paramètres conduisent aux résultats indiqués dans le tableau IV.10.

Tableau IV.9 Flux positive, négative et net.

Alternatives	Rang	$\Phi^+(\cdot)$	$\Phi^-(\cdot)$	$\Phi(\cdot)$
B1	15	0.069	0.515	-0.446
B2	1	0.728	0.115	0.094
B3	13	0.040	0.441	0.475
B4	8	0.280	0.325	0.378
B5	9	0.338	0.460	0.451
B6	2	0.671	0.170	0.172
B7	10	0.272	0.443	0.407
B8	14	0.081	0.581	0.519
B9	7	0.343	0.327	0.378
B10	12	0.128	0.451	0.453
B11	4	0.590	0.214	0.186
B12	5	0.406	0.312	0.280
B13	6	0.388	0.347	0.304
B14	3	0.618	0.176	0.178
B15	11	0.257	0.325	0.418

Tableau IV.10 Rangement des alternatives selon PROMETHEE II

Action	Rank	Score
B1	15	27,700
B2	1	81,669
B3	13	28,271
B4	8	45,109
B5	9	44,351
B6	2	74,967
B7	10	43,265
B8	14	28,101
B9	7	48,243
B10	12	33,722
B11	4	70,186
B12	5	56,317
B13	6	54,203
B14	3	71,988
B15	11	41,908

Tableau IV.11 Matrice des scores uni-critères

	SURF	DD	GEOS	SUIRR	DC
B1	19,699	46,405	28,571	24,167	76,038
B2	100,000	43,500	92,857	75,476	5,143
B3	6,222	48,762	39,286	22,143	79,771
B4	2,820	46,214	28,571	74,563	79,450
B5	82,970	44,310	71,429	7,341	14,498
B6	54,117	44,595	71,429	92,857	52,671
B7	64,286	44,786	28,571	46,746	32,143
B8	28,571	44,500	28,571	22,143	67,743
B9	14,117	47,452	92,857	24,405	76,831
B10	53,026	44,786	28,571	24,405	76,831
B11	92,857	69,310	28,571	100,000	3,652
B12	81,316	35,238	28,571	73,770	19,564
B13	38,759	42,833	82,143	39,048	59,657
B14	71,429	70,452	71,429	76,190	32,143
B15	39,812	76,857	28,571	46,746	73,864

On peut noter que les bassins élémentaires B2 et B6 sont au premier rang par les deux méthodes de AHP et PROMETHEE, et sont donc un choix recommandé. Ils sont suivis par B11 et B14.

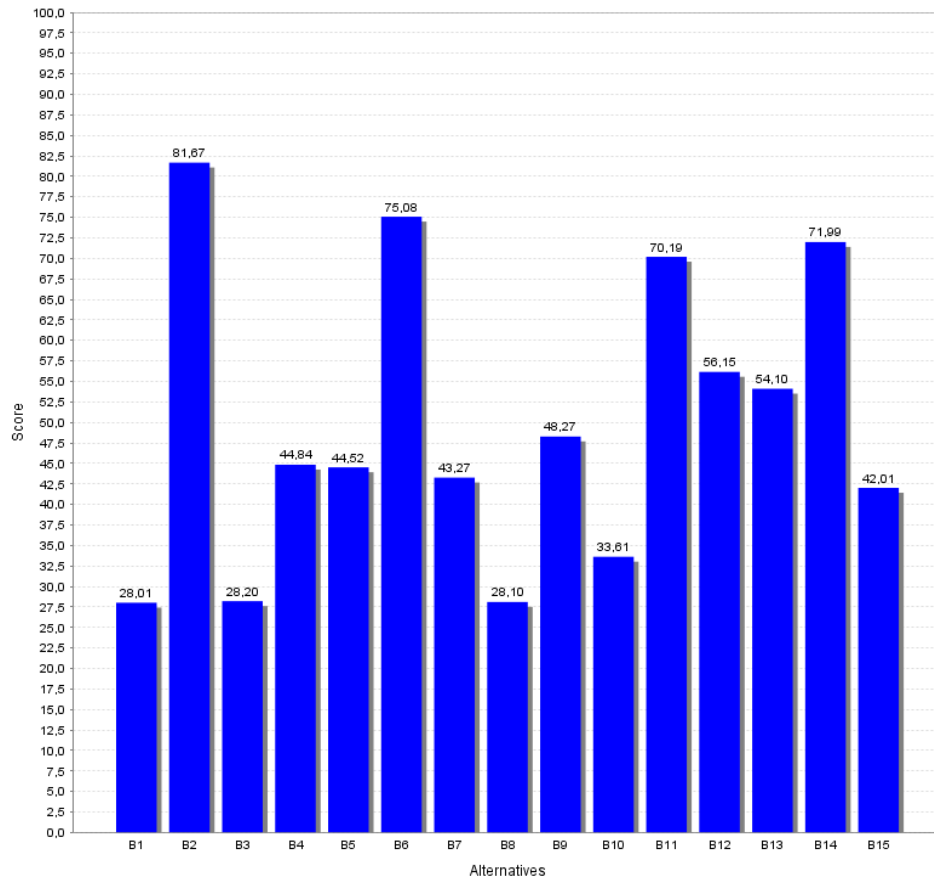


Figure. IV.5 Flux net

Cependant, d'autres bassins élémentaires sont ensuite classés à peu près à la même position. La Figure IV.5 définit le classement des alternatifs en ce qui concerne le flux net, tandis que la figure IV.6 exprime la contribution de chaque critère pour chaque alternative, qui valide la cohérence des deux méthodes.

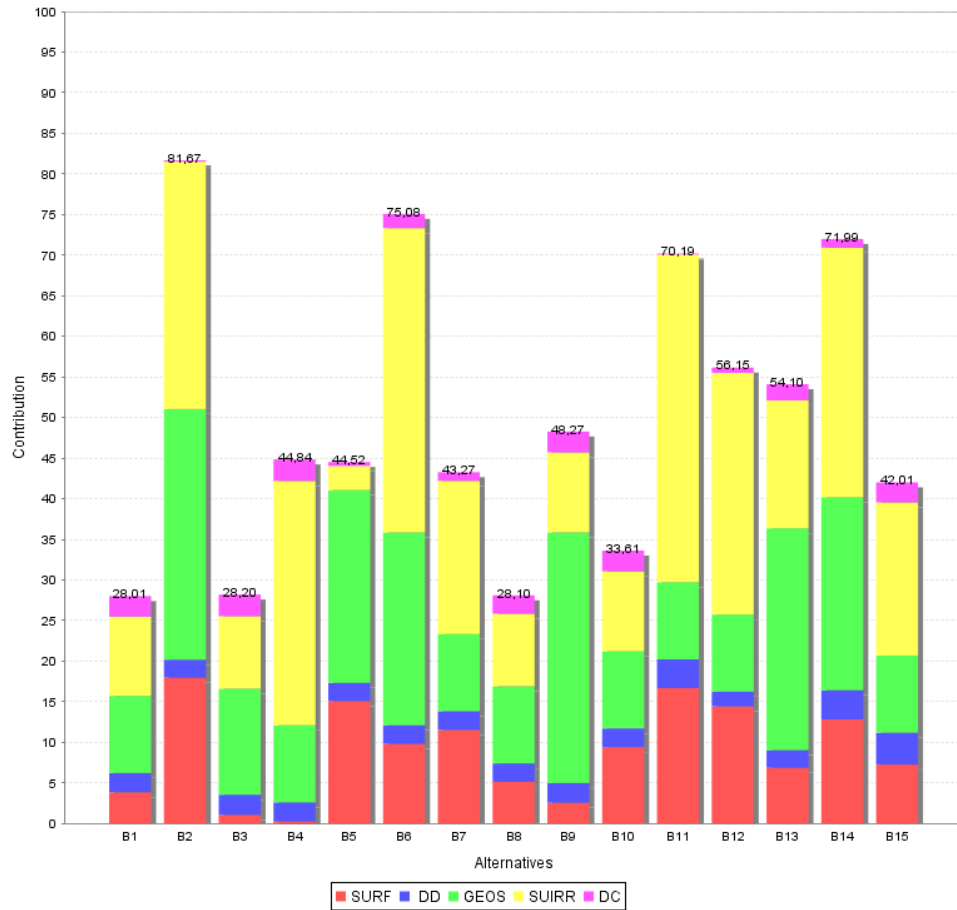


Figure. IV.6. Contribution des critères pour chaque alternatif.

IV.1.5.3 Représentation GAIA

Dans le plan GAIA, les critères SUIRR et densité de drainage sont fortement en conflit avec GEOS car leur projection a un grand angle comme illustré dans Figure IV.7. Les critères densité de drainage et SUIRR d'une part et le GEOS et SURF d'autre part distinguent les alternatifs de la même manière (leurs projections sont presque unies). Pour cet ensemble de paramètres, les alternatifs B1, B8 et B15 sont sensiblement différents de toutes les autres alternatives tandis que les alternatifs B2, B5, B11, B6 et B14 sont relativement étroites. D'ailleurs, les alternatifs B3, B9, B10 et B13 sont l'opposé des autres alternatives, ce qui explique pourquoi elles ont différentes caractéristiques et sont clairement surpassées par toutes les autres alternatives situées dans la direction opposée de l'axe de décision D (bâton de décision) figuré en rouge dans figure IV. 7. Les alternatives B2, B10, B11, B12 et B14 sont puissantes pour la densité de drainage, SURF et GEOS car elles sont projetées dans la même

orientation. En outre, GAÏA a une puissance descriptive pour détecter les alternatives avec le comportement différent sur les critères qui ne peuvent pas être montrés par le flux net.

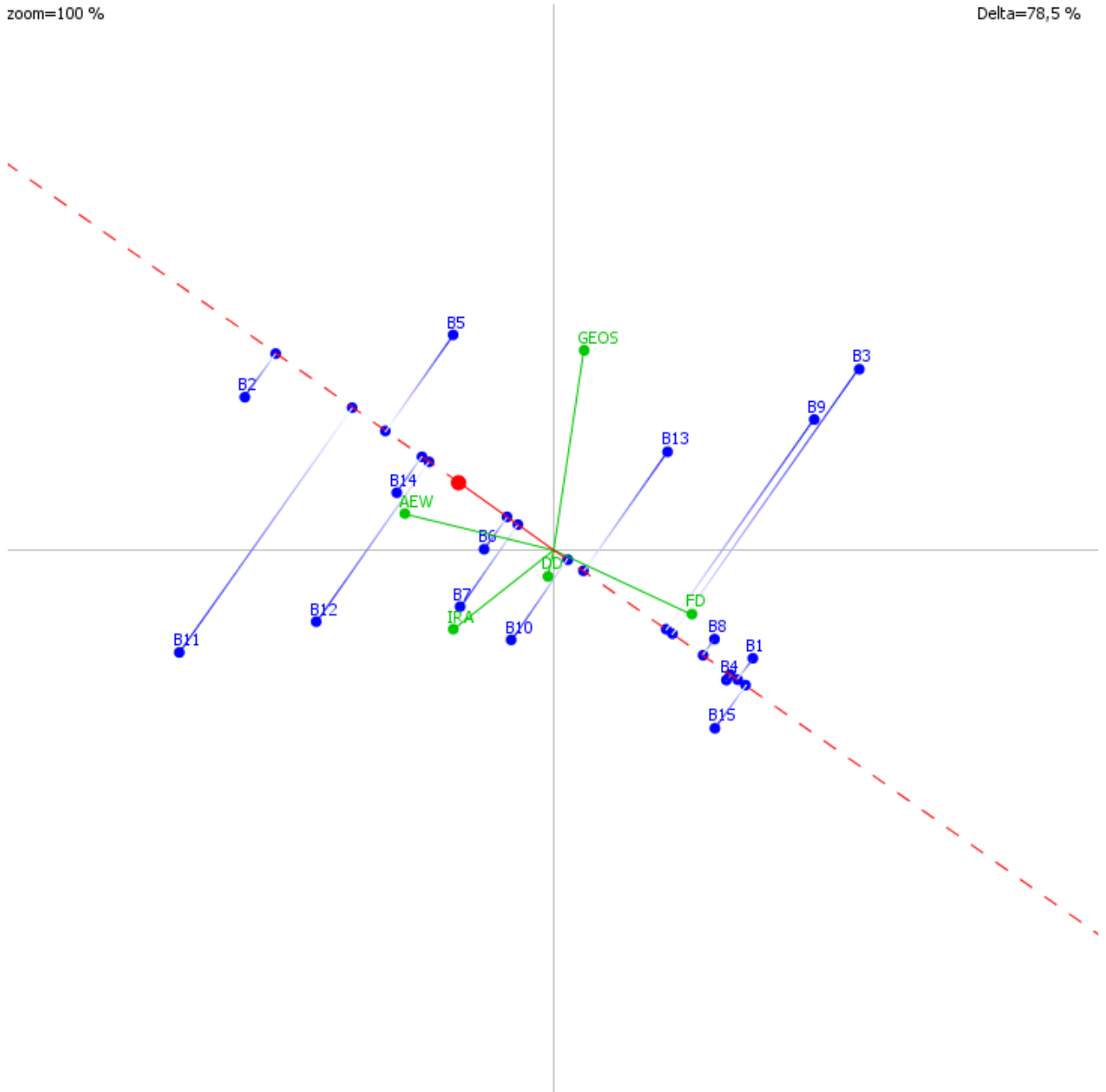


Figure IV.7 GAIA plan.

La carte thématique montrée sur la figure IV. 8 illustre la classification en cinq groupes des bassins élémentaires par rapport à la méthode de PROMETHEE, tandis que la Figure IV.8 montre le classement donné par la méthode AHP.

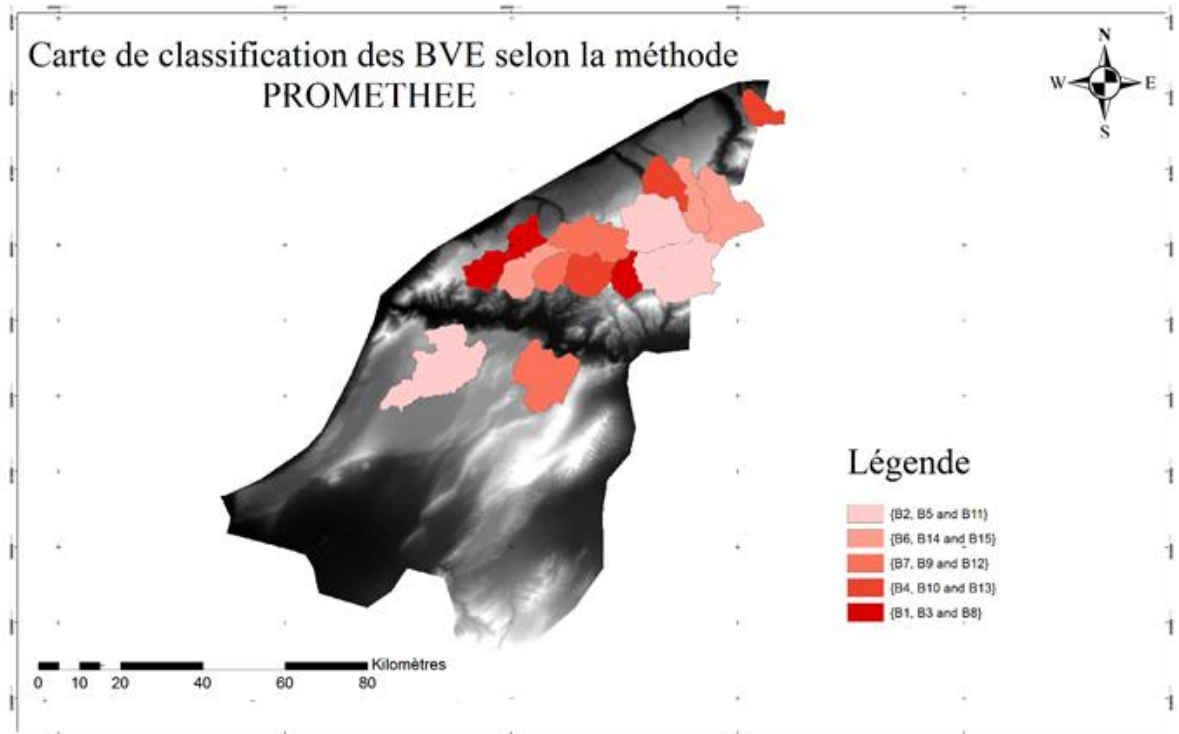


Figure.IV. 7.Carte de classification des BVE selon la méthode PROMETHEE

IV.1.6 Analyse de sensibilité des Poids

Le tableau IV.12 illustre l'analyse de sensibilité en termes d'intervalles de stabilité des poids. Les intervalles de stabilité de poids fournissent la gamme de poids sur les critères (maximaux et minimaux) dans lequel le classement des alternatives est considéré comme stable. La colonne «poids» dans le tableau IV.12 montre les coefficients de pondération obtenus pour tous les critères pris en compte dans l'étude. Les colonnes min / max du tableau IV.12 indiquent la gamme de poids qui peuvent être affectés à différents critères, de sorte que les classements B2, B6, B14 et B11 reste inchangés (en haut) parmi tous les bassins versant élémentaires. L'intervalle de stabilité de poids (sur un critère donnée) implique la stabilité du critère dans le rangement. Agrandir l'intervalle d'un critère donnée de stabilité de poids, il est moins probable qu'un critère aura un effet important sur la modification des classements et vice versa. Dans le tableau IV.12, le critère densité de drainage a le plus grand intervalle de la stabilité (7.78%) par rapport aux autres critères indiquant sa stabilité élevée dans les classements. Les critères GEOS et SUIR peuvent être considérés comme les critères les plus sensibles (en modifiant les classements) car ils ont les plus petites gammes de l'intervalle de stabilité moyenne de (2.23 %). Les autres critères peuvent également être considérés comme sensibles compte tenu de leurs gammes moyennes de l'ordre (4.35%) d'intervalles de stabilité.

Tableau IV.12: Sensibilité des Poids des critères

Critères	Poids Min	Poids	Poids Max	écarts
SURF	14,06%	17,95%	18,57%	4,51 %
DD	1,19%	5,12%	8,97%	7,78 %
GEOS	32,17%	33,24%	34,40%	2,23 %
SUIRR	39,67%	40,35%	41,95%	2,28 %
DC	2,20%	3,34%	6,39%	4,19 %

IV.2 APPLICATION DE LA METHODE AHP

Les calculs des matrices de comparaison des alternatives par paires ainsi que la matrice de normalisation de chaque critère sont présentés dans les tableaux ci-après :

IV.2.1 Comparaison par paire des alternatives pour le critère SURF

Tableau IV.13: Comparaison par paire des alternatives pour SURF

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
B1	1	1/9	8	8	1/9	1/9	1/9	1/8	8	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9
B2	9	1	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
B3	1/8	1/9	1	4	1/9	1/9	1/9	1/9	1/8	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9
B4	1/8	1/9	1/4	1	1/9	1/9	1/9	1/9	1/8	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9
B5	9	1/9	9	9	1	9	9	9	9	9	1/9	6	9	9	9
B6	9	1/9	9	9	1/9	1	1/9	9	9	4	1/9	1/9	9	1/9	9
B7	9	1/9	9	9	1/9	9	1	9	9	9	1/9	1/9	9	1/9	9
B8	8	1/9	9	9	1/9	1/9	1/9	1	9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9
B9	1/8	1/9	8	8	1/9	1/9	1/9	1/9	1	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9
B10	9	1/9	9	9	1/9	1/4	1/9	9	9	1	1/9	1/9	9	1/9	9
B11	9	1/9	9	9	9	9	9	9	9	9	1	9	9	9	9
B12	9	1/9	9	9	1/6	9	9	9	9	1/9	1/9	1	9	9	9
B13	9	1/9	9	9	1/9	1/9	1/9	9	9	1/9	1/9	1/9	1	1/9	1/4
B14	9	1/9	9	9	1/9	9	9	9	9	1/9	1/9	1/9	9	1	9
B15	9	1/9	9	9	1/9	9	1/9	9	9	1/9	1/9	1/9	4	1/9	1

IV.2.2 Normalisation de la matrice

Tableau IV.14: Matrice normalisée des alternatives pour SURF

															Sum	Wij
0,01	0,04	0,07	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02

0,09	0,39	0,08	0,08	0,44	0,14	0,19	0,10	0,08	0,21	0,79	0,34	0,12	0,24	0,12	3,41	0,23
0,00	0,04	0,01	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,01
0,00	0,04	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,01
0,09	0,04	0,08	0,08	0,05	0,14	0,19	0,10	0,08	0,21	0,01	0,23	0,12	0,24	0,12	1,77	0,12
0,09	0,04	0,08	0,08	0,01	0,02	0,00	0,10	0,08	0,10	0,01	0,00	0,12	0,00	0,12	0,84	0,06
0,09	0,04	0,08	0,08	0,01	0,14	0,02	0,10	0,08	0,21	0,01	0,00	0,12	0,00	0,12	1,10	0,07
0,08	0,04	0,08	0,08	0,01	0,00	0,00	0,01	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	0,03
0,00	0,04	0,07	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,01
0,09	0,04	0,08	0,08	0,01	0,00	0,00	0,10	0,08	0,02	0,01	0,00	0,12	0,00	0,12	0,76	0,05
0,09	0,04	0,08	0,08	0,44	0,14	0,19	0,10	0,08	0,21	0,09	0,34	0,12	0,24	0,12	2,36	0,16
0,09	0,04	0,08	0,08	0,01	0,14	0,19	0,10	0,08	0,00	0,01	0,04	0,12	0,24	0,12	1,33	0,09
0,09	0,04	0,08	0,08	0,01	0,00	0,00	0,10	0,08	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	1/21	0,03
0,09	0,04	0,08	0,08	0,01	0,14	0,19	0,10	0,08	0,00	0,01	0,00	0,12	0,03	0,12	1,08	0,07
0,09	0,04	0,08	0,08	0,01	0,14	0,00	0,10	0,08	0,00	0,01	0,00	0,05	0,00	0,01	0,70	0,05

Random
Index 1,58

n 15
 λ_{max} 28,2389771
 $CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ 0,094564122
 CI/RI 0,05985071 5,985071033 <10%

IV.2.3 Comparaison par paire des alternatives pour le critère DDR

Tableau IV.15: Comparaison par paire des alternatives pour DDR

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
B1	1	3	1/2	1	2	2	2	2	1	2	1/7	6	4	1/7	1/8
B2	1/3	1	1/5	1/3	1	1	1	1	1/4	1	1/8	1/5	1	1/8	1/8
B3	2	5	1	2	4	4	4	4	1	4	1/6	7	6	1/6	1/7
B4	1	3	1/2	1	2	2	2	2	1	2	1/7	6	4	1/7	1/8
B5	1/2	1	1/4	1/2	1	1	1	1	1/3	1	1/7	6	2	1/8	1/8
B6	1/2	1	1/4	1/2	1	1	1	1	1/3	1	1/8	6	2	1/8	1/8
B7	1/2	1	1/4	1/2	1	1	1	1	1/3	1	1/8	6	2	1/8	1/8
B8	1/2	1	1/4	1/2	1	1	1	1	1/3	1	1/8	6	2	1/8	1/8
B9	1	4	1	1	3	3	3	3	1	3	1/6	6	5	1/6	1/8
B10	1/2	1	1/4	1/2	1	1	1	1	1/3	1	1/8	6	2	8	8
B11	7	8	6	7	7	8	8	8	6	8	1	8	8	1	1/3
B12	1/6	5	1/7	0,17	1/6	1/6	1/6	1/6	1,6	1/8	1/9	1	4	1/8	1/9
B13	1/4	1	1/6	1/4	1/2	1/2	1/2	1/2	1/5	1/8	1/4	1/9	1	8	8

B14	7	8	6	7	8	8	8	8	6	1	8	1/9	1/8	1	1/2
B15	8	8	7	8	8	8	8	9	8	1/8	9	1/9	1/8	2	1

IV.2.4 Normalisation de la matrice

Tableau IV.16: Matrice normalisée des alternatives pour DDR

															Sum	Wij
0,03	0,06	0,02	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,08	0,01	0,09	0,09	0,01	0,01	0,66	0,04
0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,24	0,02
0,07	0,10	0,04	0,07	0,10	0,10	0,10	0,09	0,04	0,15	0,01	0,11	0,14	0,01	0,01	1,12	0,07
0,03	0,06	0,02	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,08	0,01	0,09	0,09	0,01	0,01	0,66	0,04
0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,01	0,09	0,05	0,01	0,01	0,37	0,02
0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,01	0,09	0,05	0,01	0,01	0,37	0,02
0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,01	0,09	0,05	0,01	0,01	0,37	0,02
0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,01	0,09	0,05	0,01	0,01	0,37	0,02
0,03	0,08	0,04	0,03	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,11	0,01	0,09	0,12	0,01	0,01	0,86	0,06
0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,01	0,09	0,05	0,37	0,42	1,15	0,08
0,23	0,16	1/4	0,23	0,17	0,19	0,19	0,19	0,23	0,30	0,05	0,12	0,18	0,05	0,02	2,57	0,17
0,01	0,10	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,09	0,01	0,01	0,27	0,02
0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,37	0,42	0,93	0,06
0,23	0,16	1/4	0,23	0,20	0,19	0,19	0,19	0,23	0,04	0,41	0,00	0,00	0,05	0,03	2,39	0,16
0,26	0,16	0,29	0,26	0,20	0,19	0,19	0,21	0,30	0,00	0,46	0,00	0,00	0,09	0,05	2,69	0,18

n	15	Random Index	1,58
λ_{max}	26,4817479		
$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$	0,082012485		
CI/RI	0.051906636	3.285230	<10%

IV.2.5 Comparaison par paire des alternatives pour le critère GEOS

Tableau IV.17: Comparaison par paire des alternatives pour GEOS

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
B1	1	1/7	1/3	1	1/5	1/5	1	1	1/9	1	1	1	1/7	1/5	1
B2	7	1	7	7	7	7	7	7	1/9	7	7	7	1	7	7
B3	3	1/7	1	3	1/5	1/5	3	3	1/9	3	3	3	1/7	1/5	3
B4	1	1/7	1/3	1	1/5	1/5	1	1	1/9	1	1	1	1/7	1/7	1
B5	5	1/7	5	5	1	1	5	5	1/9	5	5	5	1/7	1	5
B6	5	1/7	5	5	1	1	5	5	5	5	5	5	1/7	1	1/5
B7	1	1/7	1/3	1	1/5	1/5	1	1	1/9	1	1	1	1/7	1/5	1
B8	1	1/7	1/3	1	1/5	1/5	1	1	1/9	1	1	1	1/7	1/5	1
B9	9	9	9	9	9	1/5	9	9	1	9	9	9	9	9	9
B10	1	1/7	1/3	1	1/5	1/5	1	1	1/9	1	1	1	1/7	1/5	1
B11	1	1/7	1/3	1	1/5	1/5	1	1	1/9	1	1	1	1/7	1/5	1
B12	1	1/7	1/3	1	1/5	1/5	1	1	1/9	1	1/9	1	1/7	1/5	1
B13	7	1	7	7	7	7	7	7	1/9	7	7	1/9	1	1/7	1/7
B14	5	1/7	5	7	1	1	5	5	1/9	5	5	1/9	7	1	1/5
B15	1	1/7	1/3	1	1/5	1	1	9	1/9	1	1	1/9	7	5	1

IV.2.6 Normalisation de la matrice

Tableau IV.18: Matrice normalisée des alternatives pour GEOS

															Sum	Wij
0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,24	0,02
0,14	0,08	0,17	0,14	1/4	0,35	0,14	0,12	0,01	0,14	0,15	0,19	0,04	0,27	0,22	2,42	0,16
0,06	0,01	0,02	0,06	0,01	0,01	0,06	0,05	0,01	0,06	0,06	0,08	0,01	0,01	0,09	0,61	0,04
0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,24	0,02
0,10	0,01	0,12	0,10	0,04	0,05	0,10	0,09	0,01	0,10	0,10	0,14	0,01	0,04	0,15	1,16	0,08
0,10	0,01	0,12	0,10	0,04	0,05	0,10	0,09	0,67	0,10	0,10	0,14	0,01	0,04	0,01	1,67	0,11
0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,24	0,02
0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,24	0,02
0,18	0,71	0,22	0,18	0,32	0,01	0,18	0,16	0,13	0,18	0,19	1/4	0,34	0,35	0,28	3,68	1/4
0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,24	0,02
0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,24	0,02
0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,00	0,03	0,01	0,01	0,03	0,22	0,01
0,14	0,08	0,17	0,14	1/4	0,35	0,14	0,12	0,01	0,14	0,15	0,00	0,04	0,01	0,00	1,75	0,12
0,10	0,01	0,12	0,14	0,04	0,05	0,10	0,09	0,01	0,10	0,10	0,00	0,26	0,04	0,01	1,18	0,08
0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,05	0,02	0,16	0,01	0,02	0,02	0,00	0,26	0,19	0,03	0,84	0,06

n	15	Random Index	1,58
λ_{max}	2,06312034		
$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$	0,040222881		
CI/RI	0,02545752	2,545751985	<10%

IV.2.7 Comparaison par paire des alternatives pour le critère SUIRR

Tableau IV.19: Comparaison par paire des alternatives pour SUIRR

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
B1	1	1/9	1	1/9	2	1/9	1/2	9	9	1/4	1/9	1/8	1	1/9	1/2
B2	9	1	9	1	9	1/4	6	4	5	6	1/9	1	9	1	6
B3	1	1/9	1	1/9	2	1/9	1/2	1	1	1/4	1/9	1/9	1/2	0,11	1/2
B4	9	1	9	1	9	1/4	6	9	9	5	1/9	1	8	1	6
B5	1/2	1/9	1/2	1/9	1	1/9	1/4	1/2	1/2	1/4	1/9	1/9	1/4	1/9	1/4
B6	9	4	9	6	9	1	9	9	9	9	1/4	6	9	4	9
B7	2	1/4	2	1/6	4	1/9	1	2	2	1	1/9	1/4	1	1/9	1
B8	1/91	1/4	1	1/9	1/9	1/9	1/2	1	1	1/4	1/9	9	1/2	1/9	1/2
B9	1/9	1/5	1	1/9	2	1/9	1/2	1	1	1/4	1/9	1/8	1	1/9	1/2
B10	4	1/4	4	1/5	6	1/9	1	4	4	1	1/9	1/4	2	1/6	1
B11	9	9	9	9	9	4	9	9	9	9	1	9	9	9	9
B12	8	1	9	1	9	1/4	6	1/9	8	1/9	1/9	1	7	1/2	1/4
B13	1	1/9	2	1/8	4	1/9	1	2	1	1/9	1/7	1/9	1	1/8	1
B14	9	1	9	1	9	1/4	9	9	9	1/9	2	1/9	8	1	8
B15	2	1/4	2	1/6	4	2	1	9	2	1	6	1/9	1	1/8	1

IV.2.8 Normalisation de la matrice

Tableau IV.20: Matrice normalisée des alternatives pour SUIRR

															Sum	Wij
0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,13	0,13	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,40	0,03
0,14	0,05	0,13	0,10	0,11	0,03	0,12	0,06	0,07	0,18	0,01	0,04	0,15	0,06	0,14	1,38	0,09
0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,17	0,01
0,14	0,05	0,13	0,10	0,11	0,02	0,12	0,13	0,13	0,15	0,01	0,04	0,14	0,06	0,14	1,46	0,10
0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,11	0,01
0,14	0,22	0,13	0,59	0,11	0,11	0,18	0,13	0,13	0,27	0,02	0,21	0,15	0,23	0,20	2,83	0,19
0,03	0,01	0,03	0,02	0,05	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,32	0,02

0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,32	0,01	0,01	0,01	0,46	0,03
0,00	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,17	0,01
0,06	0,01	0,06	0,02	0,08	0,01	0,02	0,06	0,06	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,49	0,03
0,14	0,49	0,13	0,89	0,11	0,46	0,18	0,13	0,13	0,27	0,10	0,32	0,15	0,51	0,20	4,21	0,28
0,12	0,05	0,13	0,10	0,11	0,02	0,12	0,00	0,11	0,00	0,01	0,04	0,12	0,03	0,00	0,98	0,07
0,02	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,02	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02	0,26	0,02
0,14	0,05	0,13	0,10	0,11	0,03	0,18	0,13	0,13	0,00	0,19	0,00	0,14	0,06	0,18	1,57	0,10
0,03	0,01	0,03	0,02	0,05	0,23	0,02	0,13	0,03	0,03	0,57	0,00	0,02	0,01	0,02	1,19	0,08

n	15	Random Index	1,58
λ_{max}	20,9596003		
$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$	0,042568573		
CI/RI	0.026942135	2,694213495	< 10%

IV.2.9 Comparaison par paire des alternatives pour le critère DDC

Tableau IV.21: Comparaison par paire des alternatives pour DDC

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
B1	1	9	1	1	9	4	9	8	1	9	9	9	2	9	1
B2	1/9	1	1/9	1/9	0,5	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1	1/8	1/9	1/9	1/9
B3	1	9	1	1	9	6	9	2	1	8	9	9	4	9	1
B4	1	9	1	1	9	6	9	4	1	8	9	9	4	9	1
B5	1/9	2	1/9	1/9	1	1/9	1/8	1/9	1/9	1/9	4	1/2	1/9	1/8	1/9
B6	1/4	9	1/6	1/6	9	1	8	1	1/4	4	9	9	1	8	1/2
B7	1/9	9	1/9	1/9	8	1/8	1	1/8	1/9	1/4	9	8	8	1	1/8
B8	1/8	9	1/2	1/4	1	1	8	1	1	1/6	9	9	1	8	1
B9	1	9	1	1	9	4	9	1	1	8	9	9	2	9	1
B10	1/9	9	1/8	1/8	9	1/4	4	6	1/8	1	9	8	9	6	1/8
B11	1/9	1	1/9	1/9	1/4	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1	1/8	1/9	1/9	1/9
B12	1/9	8	1/9	1/9	2	1/9	1/8	1/9	1/9	8	1/9	1	1/9	1/6	1/9
B13	1/2	9	1/4	1/4	9	1	1/8	1	0,5	9	9	1/9	1	8	7
B14	1/9	9	1/9	1/9	8	1/8	1	1/8	1/9	9	6	1/9	1/8	1	1
B15	1	9	1	1	9	1	8	9	1	8	9	1/9	1/7	1	1

IV.2.10 Normalisation de la matrice

Tableau IV.22: Matrice normalisée des alternatives pour DDC

															Sum	Wij
0,15	0,08	0,15	0,15	0,10	0,16	0,14	0,24	0,13	0,12	0,09	0,12	0,06	0,13	0,02	1,84	0,12

0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,01
0,15	0,08	0,15	0,15	0,10	0,24	0,14	0,06	0,13	0,11	0,09	0,12	0,12	0,13	0,02	1,79	0,12
0,15	0,08	0,15	0,15	0,10	0,24	0,14	0,12	0,13	0,11	0,09	0,12	0,12	0,13	0,02	1,85	0,12
0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,16	0,01
0,04	0,08	0,02	0,03	0,10	0,04	0,12	0,03	0,03	0,05	0,09	0,12	0,03	0,12	0,01	0,91	0,06
0,02	0,08	0,02	0,02	0,09	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,09	0,11	0,24	0,01	0,00	0,72	0,05
0,02	0,08	0,07	0,04	0,01	0,04	0,12	0,03	0,13	0,00	0,09	0,12	0,03	0,12	0,02	0,92	0,06
0,15	0,08	0,15	0,15	0,10	0,16	0,14	0,03	0,13	0,11	0,09	0,12	0,06	0,13	0,02	1,62	0,11
0,02	0,08	0,02	0,02	0,10	0,01	0,06	0,18	0,02	0,01	0,09	0,11	0,28	0,09	0,00	1,07	0,07
0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,01
0,02	0,07	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,11	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02
0,08	0,08	0,04	0,04	0,10	0,04	0,00	0,03	0,07	0,12	0,09	0,00	0,03	0,12	0,11	0,93	0,06
0,02	0,08	0,02	0,02	0,09	0,01	0,02	0,00	0,01	0,12	0,06	0,00	0,00	0,01	0,02	0,47	0,03
0,15	0,08	0,15	0,15	0,10	0,04	0,12	0,27	0,13	0,11	0,09	0,00	0,00	0,01	0,02	1,43	0,10

n	15	Random Index	1,58
λ_{max}	24,0706453		
$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$	0,064790324		
CI/RI	0,041006534	4,100653397	<10%

IV.2.11 Classification des alternatives selon la méthode AHP

Le classement définitif des alternatives selon la méthode AHP est illustré dans le tableau

Tableau IV.23: Classement des alternatives selon AHP

SURF	DDR	GEOS	SUIRR	DDC	WEIGHT-CRIT		classement	Alternatives
0,01975101	0,04385626	0,01613743	0,02690166	0,12442687	0,1795	0,0262	14	B1
1/527029	0,01589779	0,16127768	0,09221678	0,00744352	0,0512	0,1326	2	B2
0,00806744	0,07447322	0,04085917	0,01143674	0,12106025	0,3324	0,0275	13	B3
0,00597066	0,04385626	0,01598912	0,09701631	0,13821535	0,4035	0,0524	8	B4
0,1182755	0,02457752	0,0776027	0,00748834	0,0107362	0,0334	0,0517	9	B5
0,0560877	0,02451724	1/95506	0,18882969	0,06099781		0,1266	3	B6
0,0735007	0,02451724	0,01613743	0,02119358	0,04817105		0,0300	12	B7
0,02682973	0,02451724	0,01613743	0,03043013	0,06193693		0,0258	15	B8
0,01484287	0,05719197	1/54531219	0,01144836	0,10966053		0,0954	4	B9

0,05055558	0,07659068	0,01613743	0,03246413	0,07179981		0,0339	11	B10
0,15723865	0,17141797	0,01613743	1/58048164	0,00726382		0,1558	1	B11
0,08872949	0,01782899	0,01490571	0,06500291	0,0202512		0,0487	10	B12
0,03422157	0,06230112	0,11679256	0,01709559	0,06262254		0,0571	7	B13
0,07229378	0,15928857	0,07871075	0,10471712	0,03177396		0,0906	5	B14
0,04660633	0,17916791	0,05575003	0,07963193	0,08559729	1,0000	0,0711	6	B15

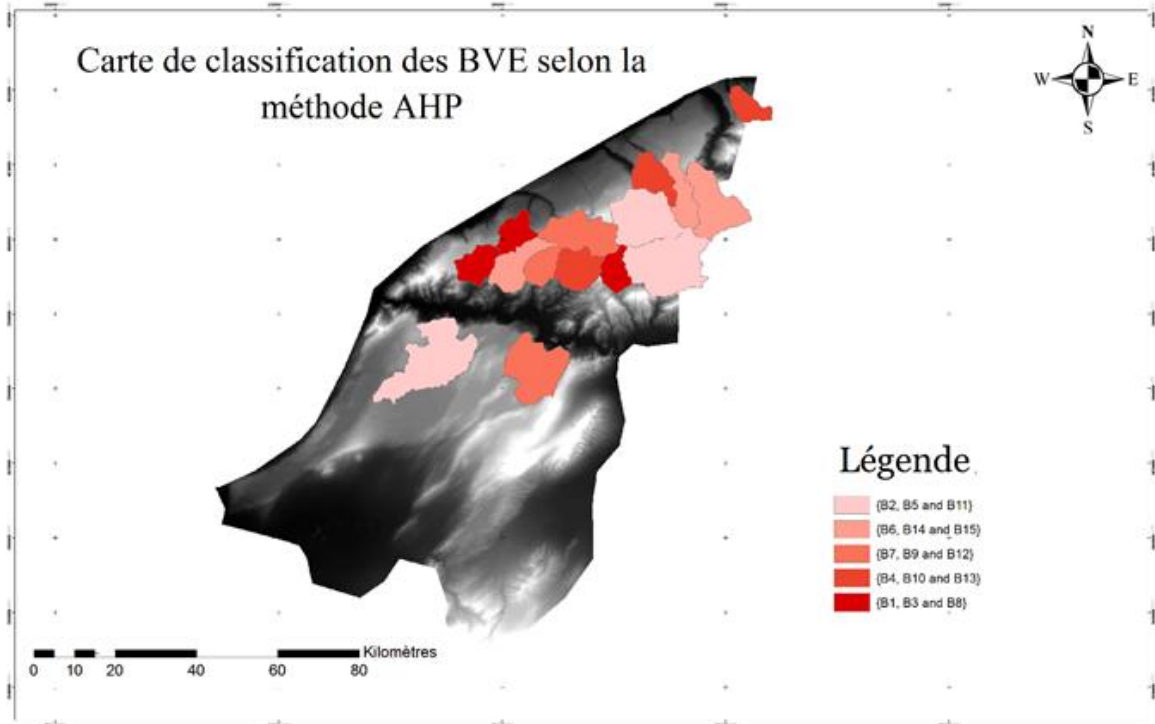


Figure IV.8. Carte de classification des BVE selon la méthode AHP

IV.3 RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de cette étude peuvent être considérées comme acceptables, parce que, les solutions obtenues par les deux méthodes «PROMETHEE» et «AHP» montrent généralement que les mêmes bassins versants élémentaires B2, B6, B11 et B14 sont au premier rang. En outre, ces résultats sont globalement proches de l'observation déduite de l'étude réalisée dans le cadre d'un procédé classique basé sur les observations réalisées par BNEDER (2006). Les résultats obtenus dans cette étude sont plus proches de la réalité, car tous les critères sont pris en compte en même temps la performance globale sont agrégées. Les experts BNEDER ont présenté leurs conclusions, sur la base de leurs expériences et des critères les plus importants. En effet, selon cette étude, B11, est intéressant et nécessite la construction d'une retenue collinaire à une hauteur significative ($h = 16$ m). B2 est également extrêmement intéressant parce que la ville de Mostaganem est située à l'exutoire du bassin versant (oued Ain safra). Un événement s'est produit vers de l'an 2000 qui a causé d'importants dégâts. Pour éviter ce genre de catastrophe, la construction d'une retenue collinaire permettrait de mieux lutter contre les inondations. En outre, ce site est intéressant malgré la nécessité de sacrifier des terrains fertiles. B14 est intéressant et doit être étudié car il peut contribuer au maintien de la population rurale qui se localise à proximité de la future structure. Par conséquent, le processus de décision doit tenir compte de toutes les données

nécessaires pour établir une classification des bassins versants élémentaires (BVE) du meilleur au pire pour la mise en œuvre des projets d'implantation d'équipements hydrauliques dans la zone d'étude.

CONCLUSION

L'utilisation des SIG et analyse multicritère dans un cadre unique fournit une base de données dans le contexte de la prise de décision spatiale. Cette étude peut guider et assister le décideur dans le processus de prise de décision afin de faciliter l'attribution et / ou de sélection des meilleurs bassins versant à implanter d'équipements hydrauliques en retenues collinaires dans notre cas. Il aide à surmonter les difficultés sur le nombre de solutions possibles, l'élaboration d'une variété de critères pour la prise de décision, et la possibilité de l'existence de plusieurs décideurs. Les deux méthodes différentes, de surclassement PROMETHEE-GAIA et AHP appliquée dans cette recherche offrent la possibilité de comparer les résultats. Les différents bassins versant ont été rangés à partir de la meilleure jusqu'à la moins bonne. Les alternatives B2, B6, B11 et B14 ont été classés meilleure obtenues par la méthode PROMETHEE. La cohérence des résultats reproduits par les deux méthodes augmente la confiance et affirme l'efficacité de la méthode. Dans ce contexte, nous constatons également que les résultats obtenus dans cette étude sont généralement proches des conclusions formulées par BNEDER, qui classent les sites B2, B14 et B6 aussi intéressants. Une fois le rangement des bassins versant du meilleur jusqu' au pire est formulé pour la réalisation de retenues collinaires est donné, les décideurs peuvent choisir la meilleure option selon leur capacité financière. L'application de cette méthode a été très utile pour structurer et organiser l'ensemble des données sous forme d'une base de données géoréférencées dédiées à ce genre de problème. L'exploitation des potentialités de cette étude fournit au décideur une grande quantité d'informations. Comparé à d'autres méthodes, AHP est une méthode aussi extrêmement intéressante car elle permet une comparaison des différentes alternatives.

Comme pour PROMETHEE, qui permet à différents rangs ou (groupe) tout en tenant compte de la pondération des critères pour classer les alternatives. Nous allons intégrer la carte des potentialités hydriques et la carte de sensibilité à l'érosion d'enrichir la base de données déjà développé et de révéler des critères importants pour le choix du bassin versant élémentaire en mesure de recevoir de tels équipements hydrauliques.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les principales conclusions des divers aspects de cette recherche sont résumées ci-dessous.

Cette thèse présente une nouvelle vision de raisonnement à l'échelle du bassin versant élémentaire et présente l'intérêt de l'utilisation de la méthode d'analyse multicritère d'aide à la décision pour sélectionner le meilleur site pour un équipement hydraulique. Choisir la meilleure localisation des petits barrages est complexe et elle dépend de différents paramètres (variable quantitative et / ou qualitative ayant des comportements contradictoires). D'où la nécessité de moyens, des techniques et des méthodes puissantes qui devraient aider à gérer et à analyser des données à référence spatiale qui peuvent être de nature et d'origine diverses. Le SIG est un outil robuste pour manipuler, gérer et analyser des données à référence spatiale. Il contribue à la collecte de données, de production de l'information et de manipulation d'une grande quantité de données pour contribuer à étudier le problème dans toute sa complexité. Il permet de représenter les différents éléments du problème. Cependant, il ne prend pas en considération les préférences des décideurs car le choix peut être confronté à des objectifs et des critères contradictoires. Les méthodes d'analyse multicritères sont appropriées pour analyser au cours du processus de prise de décision les différentes solutions et que le choix soit conforme aux différentes évaluations faites. Elles contribuent à agréger les informations afin de rendre l'interprétation plus claire pour la prise de décision. En outre, elles facilitent le choix du meilleur système à l'aide des fonctions d'agrégation spatiales. C'est pourquoi l'utilisation combinée des méthodes d'analyse multicritères et des SIG constitue un puissant moyen d'exploiter les puissantes fonctionnalités des SIG pour aider à la prise de décision.

Nous avons défini les méthodes de classification multicritère comme permettant de ranger des alternatives de la meilleure à la moins bonne. De multiples problèmes font appel à ce type de méthode et de nombreuses approches sont proposées pour les résoudre. Celles-ci font l'objet du chapitre 2. Parmi ces méthodes, rares sont celles qui sont focalisées sur le rangement de bassins versant élémentaires pour l'implantation d'un équipement hydraulique, retenues collinaires ou petit barrage dans notre cas, la modélisation des préférences (utilisation de relations de préférence et d'indifférence): nous nous sommes donc intéressé à l'approche de la classification dans un cadre d'aide multicritère à la décision. Cette méthodologie s'appuie sur l'outil SIG, qui fournit une nouvelle approche de détermination des paramètres nécessaires par l'emploi du modèle numérique de terrain couvrant la zone d'étude et en raisonnant à l'échelle du bassins versant et non pas à l'échelle du site lors de la confrontation des alternatives. Le concept de bassins et l'utilisation de l'outil Free Open Source SIG (SAGA GIS) dans notre cas a démontré son efficacité en matière de calcul des paramètres descriptifs du bassin versant de façon rapide et précise.

Dans l'ensemble, la méthodologie a démontré une approche rationnelle pour le classement de bassin-versants élémentaires, et il est clair que la méthodologie sera bénéfique pour les professionnels de la gestion des ressources en eau, pour évaluer l'accumulation des eaux de ruissellement. En utilisant ces outils, les décideurs ont le choix, conformément à leur capacité financière, d'établir une planification pour la réalisation par ordre de priorité ce genre d'équipement hydraulique puisqu'ils disposent d'une liste d'alternatives judicieusement

rangées de la meilleure à la moins bonne. L'étude décrit et explique la procédure de détermination des critères puis du classement des quinze bassins versant sélectionnés vis-à-vis des critères retenus, SURF (superficie des bassins versant), densité de drainage (DDR), structure géologique des sites d'ouvrage (GEOS), superficie irriguée (SUIRR) et débit de crue (DC). Les résultats des performances des alternatives sont formulés dans la matrice d'évaluation (ou matrice de décision), qui peut être évaluée avec n'importe quelle méthode standard d'analyse multicritère d'aide à la décision disponibles (voir chapitre II).

Les décideurs disposent présentement d'une base de données complète de la zone d'étude et une liste des meilleurs bassins versant élémentaires convenablement classés. Les bases théoriques des deux méthodes PROMETHEE-GAIA et AHP ont été explicitées dans le chapitre II, puis employées dans cette recherche : La méthode d'AHP exige un poids pour chaque critère et la comparaison des évaluations des alternatives par paires pour chaque critère. La méthode PROMETHEE-GAIA exige des poids pour chaque critère, des paramètres des seuils de préférences et d'indifférence et la fonction de préférence choisie. Les résultats ne seront jamais les mêmes pour les deux méthodes.

Cette étude peut guider et aider le décideur dans le processus de prise de décision pour l'implantation des retenues collinaires dans notre cas. Il aide à surmonter les difficultés nées du nombre de solutions possibles, de la variété et l'hétérogénéité des critères et de l'existence possible de plusieurs décideurs aux points de vue différents. Les deux méthodes différentes, PROMETHEE et AHP employées dans cette recherche offrent la possibilité de comparer les résultats. Les différents bassins versant ont été rangés du meilleur jusqu'au moins bon. Les alternatives B2, B6, B11 et B14 ont été classées meilleures par la méthode PROMETHEE. La cohérence des résultats reproduits par les deux méthodes augmente la confiance et confirme l'efficacité de la méthode. Dans ce contexte, nous constatons également que les résultats obtenus dans cette étude sont généralement proches des conclusions formulées par BNEDER, qui classe les sites B2, B14 et B6 aussi intéressants. L'application de cette méthode a été très utile pour structurer et organiser l'ensemble des données dédiées à ce genre de problème. L'exploitation des potentialités de cette étude fournit au décideur une grande quantité d'informations. Comparée à d'autres méthodes, AHP est une méthode intéressante car elle permet une comparaison des différentes alternatives. Comme pour PROMETHEE, qui permet un classement par (groupe) ou de manière individuelle en tenant compte des poids des alternatives.

A l'avenir, il est recommandé d'intégrer divers autres critères techniques, sociaux, économiques et environnementaux afin de fournir une évaluation complète des alternatives. Nous allons intégrer la carte des potentialités hydriques et la carte de sensibilité à l'érosion afin d'enrichir la base de données déjà développée et de révéler des critères importants pour le choix du bassin versant élémentaire en mesure de recevoir de tels équipements hydrauliques. Notre travail se concentre actuellement sur l'extension de cette étude à utiliser pour d'autres problèmes de ressources en eau. Les travaux actuellement en cours vise à intégrer les méthodes appliquées dans un environnement flou tel que PROMETHEE flou et AHP flou ainsi que l'automatisation du calcul des critères en utilisant le langage Python.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achite M, Meddi M., 2005. Variabilité spatio-temporelle des apports liquides et solides en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'Oued Mina (Nord-Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau*, 18: 37-56.

AZZABI L. AYADI D. KOBI A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y., 2010. Outils multicritère d'aide à la décision pour le diagnostic des procédés industriels, International Metrology Conference CAFMET.

ANRH., 2004. Cadastre Hydraulique du bassin hydrographique du Chélif-Aval : Deuxième Partie : Bas Cheliff et mina.

A.N.R.H., 2007. Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du côtier Dahra, Quatrième partie : côtier Dahra.

A. Ugur Ozcan, Gunay Erpul, Mustafa Basaran and H. Emrah Erdogan., 2008. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass ,Ankiri, Turkey, *Journal of Environmental Geology.*, Vol 53, pp 1731–1741.

Band, L. E., 1986. Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models," *Water Resources Research.*, 22(1): 15-24.

BEN MENA S., 2000. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision » *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 4 (2), 83–93

Benlaoukli B., Touaibia B., 2004. The Algerian experience in the field of studies dams, *Journal of Water Science*, rev.Dci.Eau, 153-162.

Boutkhil M., Habi M., Hammoudi, A., 2007. Contraintes et perspectives des aménagements hydroagricoles et antiérosifs en Algérie, *Actes des JSIAUF*, Hanoi, 6-9, Novembre, 1-9.

BENDER., 2006. Study of a Director of Agricultural Development de Mostaganem, Mostaganem, vol.1, 203p.

B.N.E.D.E.R. 1996. Projet de mise en valeur en montagne : la Wilaya de Tlemcen. Rap. Inédit, 184 p. 54 fig. 7 pl.

Bagnouls, F. & H. Gaussen., 1953. Saison sèche et régime xérothermique. Documents pour les cartes des productions végétales, Tome. III, vol. I, art. 8, 47p. Toulouse.

Bagnouls, F. & Gaussen, H., 1957. Les climats biologiques et leur classification, *Ann. de Géographie.* 66, pp. 193-220, Paris

BOUKHEIR R., GIRARD M.C., SHABAN A., KHAWLIE M., FOUAR G. et DARWIRCH T., 2001. Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. *Télédétection*, vol. 2, n° 2, p. 79-90.

- BEN MENA S., 2000. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Biotechnol.Agron.Soc.Environ.*2000.4(2), 83-93.
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albadvi, A. et Aghdasi, M., 2010. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198-215.
- Brans J. P. and Vincke P., 1985. A preference ranking organization method: PROMETHEE method for MCDM, *Management Sciences*, 31,6, pp. 647-656.
- Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B., 1986. How to select and how to rank projects The Promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228-238.
- Brans, J. P., & Mareschal, B., 2005. PROMETHEE methods. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 163-186.
- Chaumont M. et Paquin C., 1971. Carte pluviométrique de l'Algérie, éch. 1/50 000. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord, Alger. 4 feuilles. 1 notice.
- CAILLET R., 2003. Analyse multicritère : étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie, série scientifique, centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations. Montréal.
- Charnes, A., Cooper, W.W., 1961. *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*. Wiley & Sons, New York.
- Chen, Y., Kilgour, D.M., Hipel, K.,W., 2006. Multiple criteria classification with an application in water resources planning, *Computer and operation Research*, 33, p.3301-3323.
- Demirci, A., 2011. Using Geographic Information Systems (GIS) at schools without a computer laboratory. *Journal of Geography*: 110 (2): 49 – 59.
- Daget Ph., 1977a. Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation, *végétatio*, 34(1) : 1-20.
- Duchaufour P., 1965. *Précis de Pédologie*. Masson, Paris. 482 p.
- E COSTA C A., 1996. Les problématiques de l'aide à la décision : vers un enrichissement de la trilogie «choix-tri-rangement», *Recherche opérationnelle*, vol. 30, n°2, p.191-216.
- EUVERTE (G), 1967. *Les Climats et l'Agriculture*. 2ème édition QSJ N0824, PUF PARIS 125 p.
- EMBERGER, L. 1955. Une classification biogéographique des climats. *Rec. Trav. Lab. Bot. Géol. Fac. Se.* 7(11): 3-43 .

- El Garouani A., Merzouk A., Jabrane R., Boussema M.R., 2003. Cartographie de l'érosion des sols dans le bassin versant de l'Oued Jemâa (Pré-rif, Maroc). *Géomaghreb*, Vol. 1, n° 1, p. 39-46.
- Figuiera J. et Roy B., 2002. Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure-European Journal of Operational Research, London.
- Fairfield, J. and P. Leymarie, 1991. Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models, *Water Resources Research*, 27(5): 709-717.
- Fistikoglu O, Harmancioglu NB., 2002. Integration of GIS with USLE in assessment of soil erosion, *J. Water. Resour. Manag.*, 16: 447-467.
- Falorni, G., Teles, V., Vivoni, E.R., Bras, R.L. and Amaratunga, K.S., 2005. Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. *Journal of Geophysical Research* 110. doi: 10.1029/2003JF000113. issn: 0148-0227.
- Franco L. A. et Montibeller G., 2009. Problem Structuring for Multi-Criteria Decision Analysis Interventions, *The London of Economics and Political Science*, London.
- Gerstenecker K.C., Laufer G.L., Steineck D., Tiede C., Wrobel B., 2005. Validation of digital elevation models around Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Perugia, 5, 863-876.
- Guyot, G., 1999. Climatologie de l'environnement – Cours et exercices corrigés. Dunod, Paris. P.525. Gaussen, H. 1968. Les Cupressacees Fasc. X in *Les Gymnospermes, Actuelles et Fossiles*. Lab. Forest. Univ. Toulouse, France.
- Guitouni, A. and J.-M. Martel, 1998. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research* 109(2): 501-521.
- Gaussen H. & Bagnouls F., 1953. Saison sèche et indice xérothermique, Université de Toulouse, Faculté des Sciences.
- Guitouni A., 2000. Méthodes Multicritère d'Aide à la Décision. Notes de cours MQT-60791, Université Laval.
- Gilliams, S., Raymaekers, D., Muys, B., & Orshoven, J. V., 2005. Comparing multiple criteria decision methods to extend a geographical information system on afforestation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49(1), 142-158.
- Heusch B. & millies-lacrois A., 1971. Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin : application au Maghreb. *Mines et géologie*33, pp : 21-39.
- Hillier F.S, Lieberman G.J., 2001. Introduction to Operations Research. McGraw-Hill, 7th Edition, New York, NY.

HAMMAMI A., 2003. Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau. Thèse de doctorat spécialité Génie industrielle, L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Ioannis Z. Gitas, Santis, A., and Mitri, G. H., 2009. Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems Remote Sensing of Burn Severity. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg., pp. 129 - 148.

Ijiri, Y., 1965. Management goals and accounting for control. Amsterdam: North Holland;

JARVIS, A., RUBIANO, J., NELSON, A., FARROW, A. and MULLIGAN, M., 2004. Practical use of SRTM data in the tropics—comparisons with digital elevation models generated from cartographic data. Working Document, 198, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

J. P. Brans and B. Mareschal, 2002. PROMETHEE-GAIA. Editions de l'Université de Bruxelles and Ellipses.

JOHN F. O'CALLAGHAN J. F., and DAVID M. MARK D. M., 1984. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data COMPUTER WSION, GRAPmCS, AND IMAGE PROCESSING 28, 323-344.

Jenson S.K., Domingue J. O., 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photographic Engineering and Remote Sensing, 54, 1593-1600.

Jordan, G., and Schott, B., 2005. Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. A case study. Remote Sensing of Environment 94 (2005) 31–38.

Kocak, G., Buyuksalih, G., Oruc, M., 2005. Accuracy assessment of interferometric digital elevation models derived from the Shuttle Radar Topography Mission X- and C-band data in a test area with rolling topography and moderate forest cover. Optical Engineering 44 (3).

KEENEY, R.L., 1992. Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decision making, Harvard University Press, Cambridge, MA.

Kouli M., P. Soupios, F. Vallianatos., 2009. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece Environmental Geology, 57, pp. 483–497

Kääb, A., 2005. Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya. Remote Sensing of Environment 94 (4), 463–474.

Keeney R. and Raifa H., 1976. Decision with Multiobjectives, Preferences and Value Trade-Offs. Wiley, New York.

- LE HOUÉROU H.N., 2004. An agro-bioclimatic classification of arid and semi-arid lands in the isoclimatic Mediterranean zones. *Arid land research and management*, 18, 301-346.
- LE HOUÉROU H.-N., 1982. Experiments on the relations between energy consumption and body weight change in dry, fat-tail barbary ewes. 13 p. Mimeo. Techn. Doc. N° 41, Lib/018, FAO & Agric. Res. Centre, Tripoli, Libya.
- LE HOUÉROU H. N., 1989. The grazing land ecosystems of the African Sahel. Berlin. Springer-Verlag, Ecological Studies, n° 75, 282 p.
- LE HOUÉROU, H.N., 1995. Bioclimatologie et Biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. *Diversité biologique, développement durable et désertisation, Options méditerranéennes, sér. B : recherches et études* : 1-396 p.
- Lieth, H., Berlekamp, J., Fuest, S., and Riediger, S., 1999. *Climate Diagram World Atlas on CD*, Backhuys Publ. B. V., Leiden.
- LAARIBI A., 2000. *SIG and analyse multicritère*. Hermès Sciences Publications, Paris.
- Mutikanga, H., Sharma, S., & Vairavamoorthy, K., 2011. Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management. *Water resources management*, 25(14), 3947-3969. doi: 10.1007/s11269-011-9896-9.
- Mendes A., Errih M., Benahmed S. A. D., Hamdouche M. A., Saidi A., 2010. Water impoundment location Approach using GIS and multicriteria decision making. *Revue internationale de géomatique*, 20, 87-103.
- Medinger G., 1956. *Hauteurs de pluies en Algérie, moyenne 1913 - 1953 (recueil statistique)*. S. E. S., Alger. 23p.
- MARTEL J-M., 1998. Multicriteria analysis under uncertainty, The approach of outranking synthesis. Working Paper 1998-039, Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval.
- MOUSSEAU V., 1993. *Problèmes liés à l'évaluation de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision : réflexions théoriques, expérimentations et implémentations informatiques* », Thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine.
- Maystre L.Y., Pictet J. & Simos J., 1994. *Méthodes multicritères ÉLECTRE. Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Lausanne, Suisse : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Martin C. , Ruperd Y. & Legret M., 2007. Urban stormwater drainage management: the development of a multicriteria decision aid approach for best management practices. *Eur. J. Oper. Res.*, 181(1), p.338-349.
- Merkel W, Kaushika R, Gorman E., 2008. NRCS GeoHydro—A GIS interface for hydrologic modeling. *Comput & Geosciences* 34(8):918–930

Walker, J. and G. Willgoose, 1999. On the Effect of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrology and Geomorphology. *Water Resources Research* 35(7), 2259-2268

Musy, A. et Higy, C., 2004. *Hydrologie, une science de la Nature*. Ed. Pressens polytechniques et universitaires romandes, collection gérer l'environnement. 314 p. ISBN 2-88074-546-2.

Mareschal B. and Smet Y. V., 2009. New Developments of the PROMETHEE & GAIA MCDA Methods, Available at: <http://homepages.ulb.ac.be/~bmaresc/PromGaia/pptSanDiego.html>

Nemery Ph. and Ishizaka A., Camargo M. and Morel L., 2012. Enriching descriptive information in ranking and sorting problem with visualisations techniques, *journal of modeling in Management*, 7(2), 130-147.

Pike, R.J., Evans, I. et Hengl, T., 2008. *Geomorphometry: A Brief Guide*. In: T. Hengl et H.I. Reuter, ed. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 3–33.

POHEKAR S D, Ramachandran M., 2006. Multi-Criteria Evaluation of Cooking Devices with special reference to Parabolic Solar Cooker (PSC) in India , *Energy*, Vol 31, No 8-9, pp 1215-1227,

Quantin H., De Smet Y., Bonney J., 2011. D-Sight: A New Decision Support System to Address Multi-Criteria Problems CoDE-SMG , Technical Report Series CoDE-SMG, Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium.

Quézel P. & Médail F., 2003. *Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Elsevier, Collection Environnement, Paris, 573 p.

Rodrigues E., Morris C. S., Belz J. E., 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, s.261 - 267. Remote Sensing, XX ISPRS Congress, XXXV, B1, Comm. I, pp. 474 - 478.

Rolley R., 1977. Standing Working Group for Rural Development Dams. Technical dams rural development. French Republic, Ministry of Agriculture, Directorate of Planning Ed. LUIS-Jean.

Remini B., 2010. La problématique de l'eau en Algérie. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, 8 (06), 27-46.

RIVAS MARTÍNEZ, S., 1987. Memoria y mapa de las series de vegetación de España. 1:400.000. ICONA. Serie Técnica. MAPA. Madrid

Richard, L., and A. Tonnel, 1985. Contribution à l'étude bioclimatique de l'arc alpin. *Doc. Cartogr. Ecol.*, 28, 33-61.

RICHARD P.J.H., 1997. Les climats annuels, la variabilité climatique et bioclimatique. www.georg.umontreal.ca/donees/geo3152.

ROY B. and BOUYSSOU D., 1993, *Aide multicritère d'aide à la décision*, Economica, Paris.

- ROY B., 1985. Méthodologie multicritère d'aide à la décision », Economica, Paris.
- Roy B., Slowinski R., Treichel W., 1992. Multicriteria programming of water Supply Systems for Rural Areas, Water Ressources Bulletin, vol. 28(1), p. 13-31,
- Rasemann, S., Schmidt, J., Schrott, L. et Dikau, R., 2004. Geomorphometry in mountain terrain. In: M.P. Bishop et J.F. Shroder, ed. GIS & Mountain Geomorphology. Springer, Berlin, 101–145.
- SAGA GIS, 2.08 - <http://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/SAGA%20>
- STEWART P., 1969. Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique, quelques réflexions. Bull. Soc. Hist. Afr. du Nord, p. 24-25.
- SAUVAGE Ch., 1963. Etages bioclimatiques. Atlas du Maroc, Notice explicative : Sect. II-Physique du globe et météorologie, 44 p.
- SELTZER, P., 1946. Le climat d'Algérie. Int. Météo. Et Physique du Globe, Univ. D'Alger. 219 p.
- Sadiki A., Bouhlassa S., J., Auajjar J., Faleh A., Macaire J.J., 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'équation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab, Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, 26, 69-79.
- Saaty, T.L., 1980. The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York,.
- Smith B. and Sandwell D., 2003, Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data, Geophysical Research Letters, VOL. 30, NO. 9, 1467, doi:10.1029/2002GL016643,
- Sun, G., Ranson, K.J., Khairuk, V.I., Kovacs, K., 2003. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. Remote Sensing of Environment 88 (4), 401–411.
- Tricoli D., 2003. Framework for the design and study of hill reservoirs. Training course on hill ponds, annex 3, A3-1/17, FAO-AGWL green plan, Beirut-Liban, on line at: www.tricardi.it.
- Touaibia B., 2010. Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie Septentrionale, secheresse, 21 (1e): 1-6
- Timmermans, 1986. An approach to Vendor Performance Evaluation, Journal of Purchasing and Materials Management.
- Tarboton DG, Bras RF, Rodriguez-Iturbe I., 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. Hydrological Processes 5: 81– 100.

- Turcotte, R., J. –P. Fortin, A. N. Rousseau, S. Massicotte and J. –P. Villeneuve, 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 240: 225–242
- USGS, 2002. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Elevation Data Set. <http://seamless.usgs.gov/2002>(Accessed October 3, 2011).
- VINCKE P., 1989. L'aide multicritère à la décision. Bruxelles, Edition de l'Université de Bruxelles, p.179 (Collection statistique et mathématiques appliquées). ISBN 2-8004-0970-3.
- VANDERPOOTEN D., 1988. A Multicriteria Interactive Procedure Supporting a Directed Learning of Preferences», *Cahiers du Lamsade*, Université de Paris-Dauphine.
- Verdin, K., and J. Verdin, 1999. A topological system for the delineation and codification of the Earth's river basins. *Journal of Hydrology*, vol 218, pp. 1-12.
- Vogt, J. V., R. Colombo,, and F. Bertolo, 2003. Deriving Drainage Networks and Catchment Boundaries: A new Methodology Combining Digital Elevation Data and Environmental Characteristics. *Geomorphology* 53:281-298.
- Walling, D.E., 1984. The sediment yield of African rivers. In: *Challenges in African Hydrology and Water Resources* (Proc. Harare Symp. July 1984), IAHS Publ. no. 144, 265-283.
- Probst J.L. & Amiotte Suchet P., 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb. *Hydro. Sci. J.* 37(6), pp: 621-637.
- Zerrouk N., Zsuffa I., 1988. Sizing hydrological hill reservoirs in Algeria. *Hydrol. Continental*, 2, 141-153.
- ZARATE P., 2005. Des Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision Aux Systèmes Coopératifs d'Aide à la Décision : Contributions conceptuelles et fonctionnelles », Habilitation à Diriger des Recherches Spécialité Informatique, Institut National Polytechnique de TOULOUSE.