

RÉPUBLIQUE ALGERIÈNNE DÉMOCRATIQUE ET
POPULAIRE MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

FACULTE: **Technologie**

DÉPARTEMENT: **HYDRAULIQUE**

N°:



DOMAINE : **SCIENCE ET TECHNIQUE**

FILIERE: **HYDRAULIQUE**

OPTION: **OUVRAGES HYDRAULIQUES**

**Mémoire présenté pour
l'obtention du diplôme de
Master Académique**

Intitulé

**Application du modèle WEAP pour l'élaboration d'un outil de
gestion des ressources en eau d'une retenue hydro-agricole
-Cas du barrage de Fontaine des gazelles (Biskra)-**

Réalisé par:

- ATTOUI DJALLAL
- HADJI SIFEDDINE

Dirigé et encadré par:

- Dr .BERGOUT Ali

Année universitaire: 2021/2022

REMERCIEMENTS

Je remercie Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Je remercie mon encadreur Dr. BERGHOUT Ali pour tout le soutien, l'aide, l'orientation, la guidance qu'elle m'a apporté lors de la réalisation de mon mémoire.

je tiens également à remercier a mon binome dans ce mémoire
Nous remercions vivement l'ensemble des enseignants de la spécialité hydraulique,

Je tiens également à remercier tous les membres de la famille pour leur aide

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs remarques et critiques constructives.

Je n'oublie pas aussi mes amis (es) pour leur soutien et leurs différents conseils qui m'ont encouragé parfaitement pour atteindre mes objectifs.

A tous Merci

RESUME

La région d'El-Outaya (Biskra) située en aval d'Oued EL_hai est considérée comme une région chaude et pauvre en termes de précipitations.

Devant cette situation l'irrigation des terres agricole est indispensable. Ce travail vise à développer un système d'aide à la décision (DSS) pour modéliser les ressources en eau et leurs usages (irrigation), évaluer les besoins en ressources d'équilibre-équilibre et analyser la situation future de l'eau en appliquant le logiciel WEAP "water assessment and planning". On constate que l'utilisation de l'eau est excessive ce qui se traduit par une future demande (dés 2030) sous les conditions d'irrigation actuelles non satisfaite. Par conséquent l'utilisation des techniques d'irrigation économiques sont indispensables.

Abstract

The region of El-Outaya (Biskra) located downstream of Oued EL_hai is considered as a hot region and poor in terms of rainfall.

Faced with this situation, the irrigation of agricultural land is essential. This work aims to develop a decision support system (DSS) to model water resources and their uses (irrigation), assess the balance-balance resource needs and analyze the future water situation by applying the WEAP software "water assessment and planning". It can be seen that the use of water is excessive, which translates into a future demand (from 2030) under the current irrigation conditions that is not satisfied. Therefore the use of economical irrigation techniques are essential.

الملخص :

تعتبر منطقة لوطاية ببسكرة الواقعة عند مصب وادي الحي منطقة حارة و فقيرة من حيث كمية الأمطار المتساقطة.

في مواجهة هذا الوضع ، فإن سقي الأراضي الزراعية أمر ضروري. يهدف هذا العمل إلى تطوير نظام دعم القرار (DSS) لنمذجة موارد المياه واستخداماتها (السقي) ، وتقييم احتياجات الموارد المتوازنة وتحليل الوضع المستقبلي للمياه من خلال تطبيق برنامج WEAP .

يمكن ملاحظة أن استخدام المياه بشكل مفرط ، وهو ما يترجم الطلبات المستقبلية (بداية من عام 2030) في ظل ظروف السقي الحالية لا يمكن استوفائها . لذلك فإن استخدام تقنيات الري الاقتصادية أمر ضروري.

LISTE DE FIGURE:

Figure I -1: Position géographique de la Wilaya de Biskra.....	04
Figure I -2: Températures moyennes, maximales, minimales de Biskra (2010- 2019)...	05
Figure I.3: Précipitations moyennes mensuelles de Biskra (2010 -2019).....	06
Figure I.4: Moyennes mensuelles de vitesse du vent de Biskra (2010-2019).....	07
Figure I.5: Moyennes mensuelles de l'humidité relative de Biskra (2010-2019).....	07.
Figure I -6: Diagramme Ombrothermique de Biskra (2010-2019).....	08
Figure I -7: Localisation et situation de la zone étudiée.....	10
Figure I -8: Carte Structurale.	14
Figure I -9: Coupe tectonique du bassin au niveau d'El Kantara.....	15
Figure I -10: carte de perméabilité du bassin versant de l'oued Biskra.	18
Figure I -11: Carte de la végétation du bassin versant de l'Oued El Hai.	21
Figure I -12: Carte de l'érosion du bassin versant de l'Oued El Hai.	22
Figure I -13: Réseau Hydrographique Du bassin versant Oued El Hai.....	24
Figure I -14: Carte hypsométrique du B.V de l'oued El Hai.....	25
Figure I -15: La courbe hypsométrique.....	26
Figure I -16: Rectangle équivalent du bassin versant Oued El Hai.....	29
Figure I -17: Les pentes dans le bassin de l'oued El Hai.....	30
Figure I -18: Carte du Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued El Hai.....	34
Figure I -19: Profile en long du cours d'eau principal.....	35
Figure I -20: Localisation de barrage de Fontaine des Gazelles (Athmani et al.,2018)....	42
Figure I -21: Variation mensuelle des apports liquides.....	45
Figure II. 1 : Etapes de l'établissement d'un Sad	54
Figure II. 2 : Aperçus du Modèle Arcview Swat	55
Figure II. 3 : Représentation simplifiée du Modelé Swat.	56
Figure II. 4 : Interface Mikebasin - Exemple de vue schématique.....	58
Figure II. 5 : Processus de prise de décision au sein du système Mulino-Dss.....	60
Figure II. 6 : Interface Hyd 2002 - Exemple de vue schématique.....	61
Figure II. 7 : Le Processus de gestion des ressources en eau par le Hyd2002.....	62
Figure II. 8 : Exemple de vue schématique de l'outil strateau.....	63
Figure II. 9 : Schéma méthodologique global de Strateau.....	64
Figure II. 10 : Exemple de vue schématique du Dss.....	65
Figure III-1: Différentes zones de la retenue utile pour la modélisation avec WEAP	76
Figure III-2: Situation de la zone d'étude.....	77
Figure III-3: Les couches de la zone d'étude,	77
Figure III-4: Arbre des scénarios.....	79
Figure III-5: Variation du volume d'eau dans le barrage (observé) du 01/01/2014 au 31/12/2020.....	80
Figure III-6: Variation du volume d'eau dans le barrage (simulé) du 01/01/2014 au 31/12/2020.....	81
Figure III-7: Variation du volume d'eau dans le barrage (observé) du 01/01/2014 au 31/12/2020.....	81
Figure III-8: Variation du volume d'évaporation nette dans le barrage (observé) du 01/01/2014 au 31/12/2020.....	82
Figure III-9: Variation du volume d'eau entrée dans le barrage (observé) du 01/01/2014 au 31/12/2020.....	83
Figure III-10: Variation du volume d'eau sortant destiné à l'irrigation (observé) du 01/01/2014 au 31/12/2020.....	83

Figure III-11: Evolution de la capacité de stockage de la retenue du barrage.....	85
Figure III-12: Evolution des besoins en eau d'irrigation jusqu'en 2050.....	86
Figure III-13: Evolution des pertes par évaporation (nette) jusqu'en 2050.....	87
Figure III-14: Variation des volumes entrants et sortants jusqu'en 2050.....	88

LISTE DE TABLEAU

Tableau I.1: Les valeurs de température mensuelles dans la période (2010-2019).....	05
Tableau I.2: Les moyennes de précipitation de Biskra (2010-2019).....	06
Tableau I.3: Moyennes mensuelles de vitesse de vent de Biskra (2010-2019).....	06
Tableau I.4: Moyenne mensuelle de l'humidité relative de Biskra (2010-2019).....	07
Tableau (I.5) : Caractéristiques des matériaux bassin versant.....	16
Tableau (I.6) : Degré de perméabilité.....	17
Tableau (I.7) : Répartition en % des types de végétation et d'occupation du sol.....	21
Tableau (I.8) : Calcul des surfaces partielles et cumulées.....	26
Tableau (I.9) : L'altitude moyenne et surface partielle.....	27
Tableau (I.10) : Largeurs des intervalles du rectangle équivalent.....	29
Tableau (I.11) : deuxième classification d'après l'O.R.S.T.O.M.....	32
Tableau (I.12) : Calcul La densité hydrographique.....	37
Tableau (I.13) : Calcul le rapport de confluence.....	38
Tableau (I.14) : Calcul le rapport de longueur.....	38
Tableau (I.15) : Principales caractéristiques morphométriques du B.V de Oued El Hai.....	41
Tableau (I.16) : Variation interannuelle des apports liquide, débit liquide et lame d'eau.....	44
Tableau (I.17) : Variation mensuelle des apports liquides, débits liquides et lame d'eau.....	45
Tableau (I.18) : Caractéristique des stations hydrométriques et périodes de mesure.....	46
Tableau (I.19) : Les apports liquides (Al), solides (As) et les dégradations (Ass).....	48
Tableau (III-1): Bilan hydrique de la retenue du barrage Fontaine des gazelles	84

Sommaire

Remerciement

Résumé

Liste des Tableaux

Listes des Figures

Introduction Générale	01
<i>Chapitre I : Présentation du milieu de l'étude:</i>	
I.1 Introduction	04
I.2 Situation géographique.....	04
I.2.1 Willaya de Biskra.....	04
I.3 Hydro climatologie	04
I.3.1 Climat.....	04
I.3.2 Température.....	05
I.3.3 Précipitations.....	05
I.3.4 Vent.....	06
I.3.5 Humidité de l'air.....	07
I.3.6 Diagramme Ombro thermique.....	07
II -Présentation du bassin versant.....	09
II.1 Introduction	09
II.2. Situation géographique du bassin Oued El-Hai et du Barrage de fontaine des gazelles.....	09
II.3. Les grands ensembles physiques	11
II.3.1. Les montagnes	11
II.3.2. Les piedmonts	11
II.3.3. Les plaines	11
II.4. La structure du bassin	11
II.4.1. Stratigraphie et aperçu lithologique global	11
II.5. Les caractéristiques lithologiques et la perméabilité des roches des sous bassins versants ..	14
II.5.1. les formations imperméables	15
II.5.2. Les formations à perméabilité moyenne.....	15
II.5.3. Les formations à forte perméabilité	16
I.6. Le couvert végétal	18
II.6.1 . Rôle du couvert végétal	18
II.6.2. Méthodes d'approches et classification de la végétation.....	19
II.6.3. Approche cartographique	19
III-Etude hydrographique.....	22
III-1 Introduction.....	22
III -2 Caractéristiques de la disposition dans le plan.....	23
III-2-1 Surface.....	23
III-2-2 Longueur.....	23
III-3 Caractéristiques des altitudes (hypsométrie).....	25
III-3-1 Les altitudes maximale et minimale.....	25
III.3.2 La courbe hypsométrique.....	25
III.3.3 L'altitude moyenne.....	27
III-3-4 La dénivelée simple.....	28
III-3-5 Rectangle équivalent.....	28
III-4 Les indices de pentes.....	29
III-4-1 Pente moyenne.....	30
III-4-2 Indice de pente de Roche	31
III-4-3 Dénivelée spécifique.....	31
III -5 Caractéristiques du réseau hydrographique.....	32

III-5-1 Hiérarchisation du réseau.....	33
II-5-2 Profil longitudinal d'un cours d'eau principale	34
III-5-3 Degré de développement du réseau hydrographique.....	35
III-6 Barrage de Fontaine des Gazelles.....	42
III-6-1 Présentation de barrage de Fontaine des Gazelles.....	42
Conclusion	43
IV- Estimation des apports liquides.....	44
V -1 Introduction.....	46
V-2 Etude du transport solide en suspension dans le B.V d'Oued el Hai.....	46
V2-1 présentation des données.....	46
V- 2-2 Calcul des apports.....	47
Conclusion	49

Chapitre II La modélisation et la gestion des ressources en eau :

Introduction.....	51
II.1. Les outils numériques d'aide à la prise de décision.....	51
II.1.1 Modèles mathématiques.....	51
II.1.2 Systèmes d'informations géographiques (SIG).....	52
II.1.3 Systèmes experts (SE).....	53
II.1.4 Systèmes d'aide à la prise de décision (SAD).....	53
II.2. Exemples des différentes modèles hydrologiques et de la gestion des ressources en eau.....	55
II.2.1 Le modèle SWAT.....	55
II.2.1.1. Présentation du Modèle.....	55
II.2.1.2. Application du modèle.....	56
II.2.2 Mike Basin	57
II.2.2.1. Description.....	57
II.2.2.2. Applications de ce logiciel.....	57
II.2.2.3 Avantages de Mike Basin.....	58
II.2.3 MULINO.....	59
II.2.4 HyD2002.....	61
II.2.4.1 Caractéristiques techniques.....	61
II.2.5. STRATEAU	62
II.2.5.1. Description.....	62
II.2.5.2. Principales fonctionnalités.....	64
II.2.5.3. L'exception de STRATEAU.....	64
II.2.6 DSS pour la planification des ressources en eau basée sur l'équilibre environnemental.....	65
II.2.6.1. Description.....	65
II.2.6.2. Structure du modèle DSS.....	66
II.2.7 Le Système d'évaluation et de planification des ressources en eau (WEAP).....	66
II.2.7.1. Description du logiciel.....	66
II.2.7.2 . Background	67
II.2.7.3. Développement de WEAP.....	68
II.2.7.4. L'approche de WEAP.....	68
II.2.7.5. Structure du programme.....	69
II.2.7.6. Structure du tutorial.....	73
CONCLUSION.....	74

Chapitre III : Application du modèle WEAP pour le cas du Barrage de fontaine des gazelles :

I- Application du modèle WEAP au barrage Fontaine des gazelles	76
I -1 Caractéristiques du barrage Fontaine des gazelles.....	76
I -1-1 Caractéristiques physiques du bassin versant Oued El-Hai.....	76
I -1-2 Caractéristiques physiques du barrage Fontaine des Gazelles.....	76
I -2 Modélisation sur WEAP.....	77
I -2-1 Importation des couches.....	77
I -2-2 Mise en place des objets.....	78
I -2-3 Introduction des données.....	80
I -3 RESULTATS.....	85
I -3 -1 Evaluation des ressources en eau.....	85

I-3 -2	Quantité d'eau disponible au niveau de la retenue à l'horizon 2050.....	85
I-3 -3	Evolution future de besoin en eau du site de demande (irrigation)	86
I-3 -4	Evolution future des pertes en eaux	86
I-3 -5	Adéquation entre l'offre et la demande.....	87
	CONCLUSION.....	88

INTRODUCTION GENERALE

La gestion intégrée des ressources en eau est un concept très moderne qui prend en compte tous les critères nécessaires à la gestion des ressources. Il comprend tous les utilisateurs des ressources en eau (habitations, industries, agriculture, etc.). Cette approche a été établie par la communauté internationale lors des conférences sur la question de l'eau et de l'environnement qui se sont tenues à Dublin et Rio de Janeiro en 1992. Depuis ces conférences, la GIRE a suscité un grand intérêt de la part des chercheurs de tous bords, qui a ouvert la voie à de nombreuses Méthodes qui s'adaptent aux problèmes posés. En Algérie, plusieurs chercheurs ont travaillé sur la GIRE et un guide a été élaboré pour traiter des étapes de mise en œuvre de la GIRE. Dans le cadre de notre travail, nous avons essayé d'adapter ce concept à notre domaine de travail. Dans lequel nous avons opté pour l'utilisation de WEAP, ce dernier prend en compte de nombreux paramètres qui permettent d'obtenir un maximum d'informations en termes de résultat nécessaires pour une gestion efficace.

Comme toutes les régions du sud algérien, qui se caractérisent par une faible pluviométrie, le barrage Fontaine de Gazelles destiné à l'irrigation du périmètre d'El-Outaya situé en aval du bassin versant d'Oued El-Hai qui reçoit une précipitation annuelle moyenne de 150 mm. A cet effet, la satisfaction des agriculteurs passe par l'utilisation d'une planification de l'exploitation de l'eau qui doit se faire par l'implication des gestionnaires du barrage.

Dans ce sens, notre travail est une contribution à la création d'un outils de planification de l'exploitation de l'eau du barrage Fontaine des Gazelles destinés à l'irrigation du périmètre El-Outaya en utilisant WEAP.

WEAP est une plate-forme de modélisation qui permet l'évaluation intégrée du climat, de l'hydrologie, de l'utilisation des terres, des infrastructures et des priorités de gestion de l'eau des bassins versants.

WEAP a été utilisé par de nombreux chercheurs dans différents contextes (hydrologique, changement climatique, irrigation, hydroélectricité, social, etc.).

Nous avons divisé notre travail en trois grands chapitres :

Le premier chapitre définit la zone de notre étude : le bassin versant de OUAD Al-Hai et le barrage Fontaine des Gazelles.

Le deuxième chapitre est consacré à bibliographie sur la modélisation dans la gestion des ressources en eau.

Le troisième chapitre sera consacré à Application du modèle WEAP pour le cas du Barrage de fontaine des gazelles .

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale.

***Chapitre I : Présentation du
Milieu de l'étude:***

I.1.1 Introduction:

Ce chapitre constitue un rapport sur la situation du barrage de Fontaine des Gazelles, et de donner le détail du barrage sur la base des informations collectées au près de service du barrage.

I.1.2 Situation géographique

I.1.2.1 Wilaya de Biskra

La Wilaya de Biskra se situe au Sud-Est de l'Algérie (Fig I -1), et plus exactement au Sud des Aurès. Elle est limitée au Nord par la wilaya de Batna, au Nord-Ouest par la wilaya de M'sila et au Nord-Est par la wilaya de Khenchela. Cependant au sud elle est limitée par la wilaya d'Ouargla, au Sud-Est par la wilaya d'El-Oued et au Sud-Ouest par la wilaya de Djelfa. Biskra s'étend sur une superficie de 22379.95 Km² (DPTA,2010). Elle comporte 12 daïras et 33 communes, parmi eux la commune d'El-Outaya qui a fait l'objet de notre travail. Elle se situe au Nord-Ouest (lat. 35°, 12'7" long 5° 60'7") par rapport au chef-lieu Biskra, occupe une superficie de 121400 hectares avec une population de 58000 habitants (Sayah,2018).

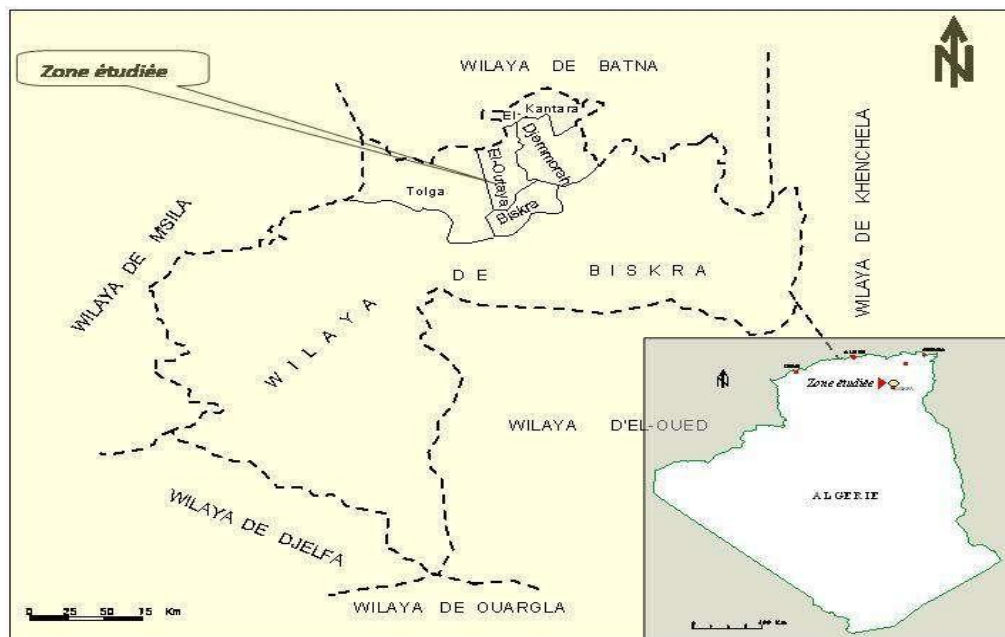


Figure I -1:Position géographique de la Wilaya de Biskra (siteweb2).

I.1.3 Hydroclimatologie

I.1.3.1 Climat

Le climat est un élément principal pour toute étude sur l'environnement. Les données climatiques de région de Biskra durant la période (2010-2019) sont obtenues à partir de site web:www.tutiempo.net.

I.1.3.2 Température:

La température est l'élément du climat le plus important étant donné que tous les processus métaboliques en dépendent. La grande majorité des êtres vivants ne peut subsister que dans un intervalle de températures comprises entre 0 et 50 C°, les exceptions se rencontrant sur tout dans le milieu aquatique.(DAJOZ,2006). Les valeurs de température mensuelle (minimale maximale et moyenne) dans notre région pendant la période 2010 -2019 sont enregistré dans le Tableau I.1.

Tableau I.1: Les valeurs de température mensuelles (minimale, maximale et moyenne) dans la période (2010-2019).

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
M(C°)	18.02	19.1	23.11	28.13	29.42	37.77	41.33	40.12	35.39	29.64	22.59	16.8
m(C°)	7.14	7.93	11.50	15.60	19.56	24.66	28.37	27.69	21.49	18.33	12.10	7.16
T (C°)	12.58	13.51	17.3	21.86	24.49	31.21	34.85	33.90	28.44	23.98	17.34	11.99

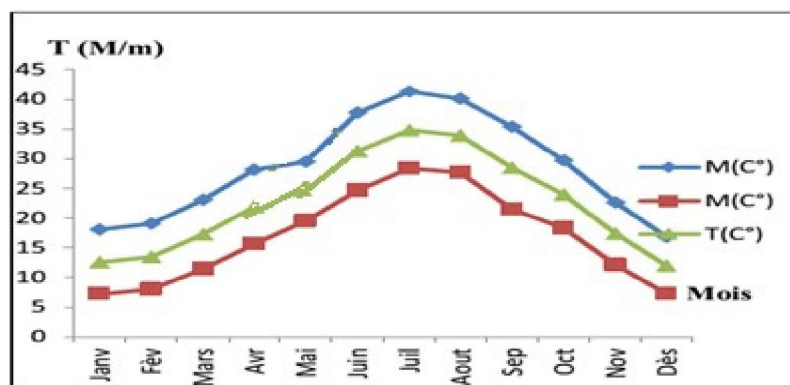


Figure I -2:Température moyennes, maximales, minimales de Biskra (2010-2019).

A partir de ces données des températures minima et maxima dans le tableau 7 on observe que les mois les plus chauds sont Juin, Juillet, Aout et Septembre et avec des moyennes des températures mensuelles : 37.77, 41.33, 40.12 et 35,39, cependant le mois le plus froid est Janvier avec un moyenne de température mensuelle égale à: 7.14 C° sur la période d'observation (2010-2019), (Figure I -2).

I.1.3.3Précipitations:

Le terme «précipitations» englobe toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, que se soit sous forme liquide (pluie) ou sous forme solide (neige, grêle) (Dajoz, 2006). Avec une série d'observation relativement longue, relevée sur la station de Biskra (2010-2019). Tableau I.2 est marquée les moyennes de précipitation de Biskra (2010-2019).

Tableau I.2: Les moyennes de précipitation de Biskra (2010-2019).

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avar.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Somme
P(mm)	10.108	5.182	15.873	19.862	13.487	7.549	0.534	2.464	16.942	29.362	10.97	3.326	135.659

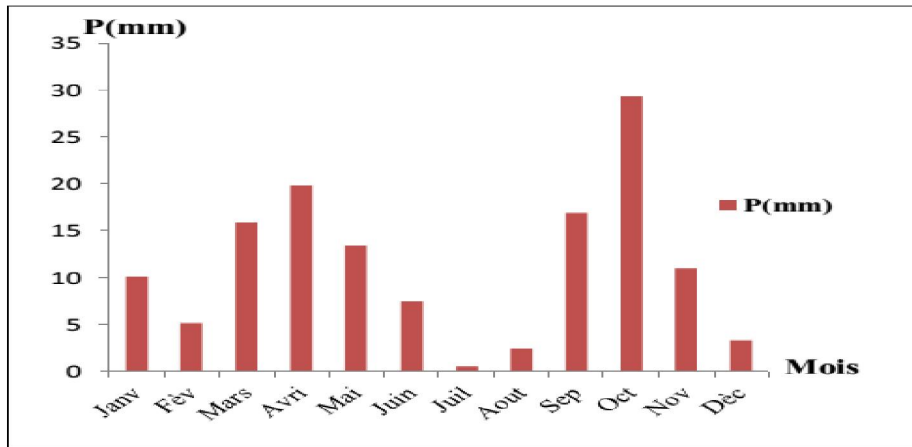


Figure I.3: Précipitations moyennes mensuelles de Biskra (2010-2019).

Le total des précipitations est de 135.659 mm, la valeur la plus élevée est enregistrée avec 29.362 mm durant le mois d’Octobre, suivie par celle d’Avril avec 19.862 mm. Par contre le mois le moins pluvieux est celui de Juillet 0.534mm. (Figure I.3).

I.1.3.4 Vent:

Selon la (Figure I. 3), la vitesse maximale du vent est enregistrée au mois Avril, et la minimale au mois d’Août. Les vents les plus dominants dans la région sont ceux venant du nord-ouest pendant l’hiver ; Cependant le ciroco (Vent sec), qui vient du sud souffle en printemps et en été. Malgré les apparences, le Sahara n’est pas un pays venteux, mais un pays où, par suite de la dénudation, on ressent le plus facilement le vent (Dubief, 1952).

Tableau I.3: Moyennes mensuelles de vitesse de vent de Biskra (2010-2019).

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Vent (m/s)	11.36	13.55	16.56	15.76	16.03	14.71	12.13	9.83	10.26	9.59	10.68	9.3

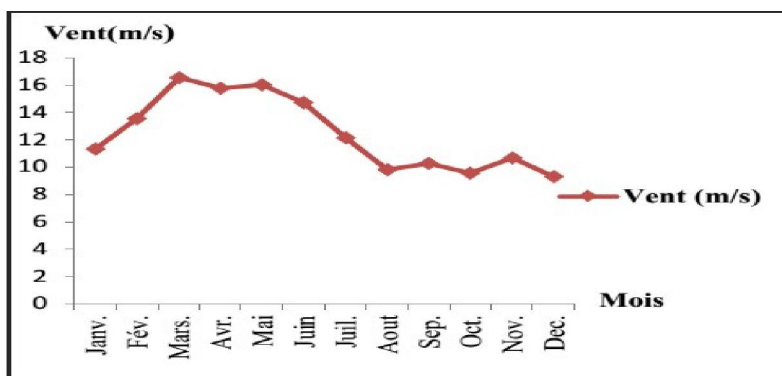


Figure I.4: Moyennes mensuelles de vitesse du vent de Biskra (2010-2019).

I.1.3.5 Humidité de l'air:

Elle exprime le rapport en pourcentage de la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air(Pa), à la pression de vapeur saturante (Pr) dans les mêmes conditions de mesure de température lue au thermomètre sec et en pression.(Tableau I.4).

Tableau I.4: Moyenne mensuelle de l'humidité relative de Biskra (2010-2019).

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Humidités	54.37	48.75	42.59	40.41	35.21	29.48	26.16	31.44	37.52	45.47	53.52	56.78

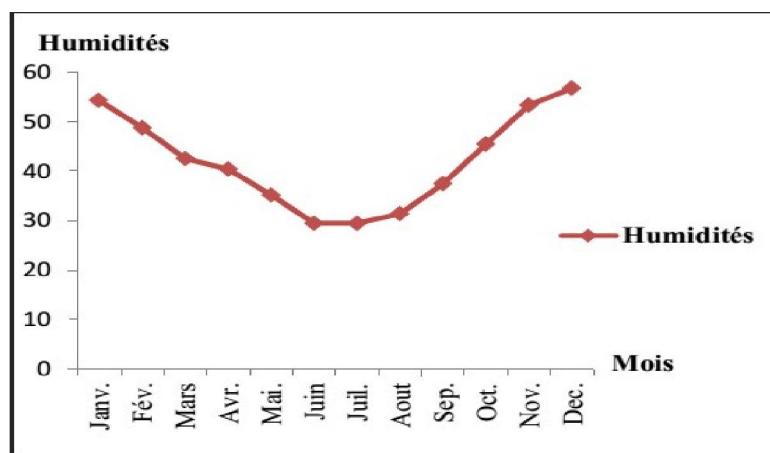


Figure I.5: Moyennes mensuelles de l'humidité relative de Biskra (2010-2019).

Selon le Tableau I.4 , l'humidité relative est faible, varie beaucoup dans l'année par l'effet des températures élevées et les amplitudes thermique importantes, elle est estimée 26.16% au mois de juillet jusqu'à 56.78 % au mois de Décembre, pour la période 2010-2019 (Figure I.5).

I.3.6 Diagramme Ombrothermique

Le diagramme ombrothermique est une méthode graphique qui permet de définir les périodes sèche et humide de l'année, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées

les précipitations (P) et les températures (T), avec $P=2T$.

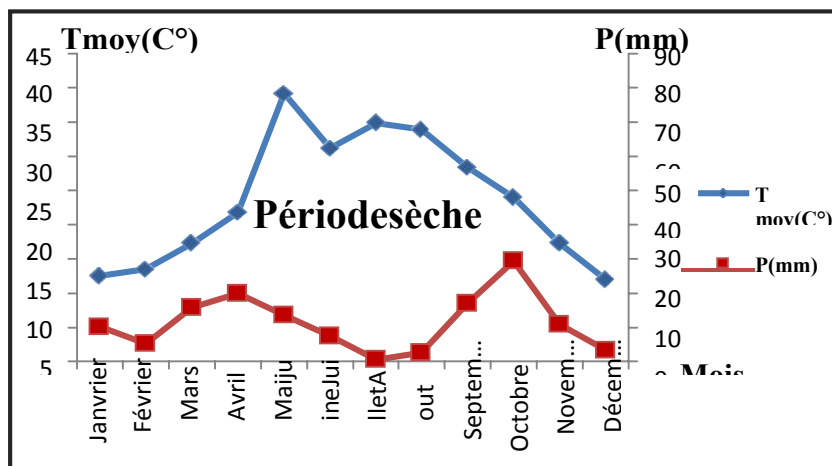


Figure I -6. Diagramme Ombrothermique de Biskra (2010-2019).

L'observation de la figure I -6, relative à la courbe ombrothermique montre que le climat de la région étudiée est caractérisé par une seule saison sèche s'étalant sur toute l'année. C'est d'ailleurs un des paramètres marquant le climat des zones arides.

I.2 -Présentation du bassin versant

I.1- INTRODUCTION

La géologie est une partie très importante dans toute étude hydro chimique. Et le couvert végétal qui est nécessaire pour une étude hydrologique Ainsi, la lithologie, la tectonique et la structure géologique.

La géologie, la lithologie et le couvert végétal des terrains influent non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement des surfaces. Dans ce dernier cas, l'étude géologique d'un bassin versant dans le cadre d'un projet hydrologique a surtout pour objet de déterminer la perméabilité des formations lithologiques. Celle-ci intervient sur la vitesse de montée des crues, sur leur volume, ainsi que sur l'aggravation du phénomène d'érosion.

I.2-2 Situation géographique

Le sous bassin de Oued EL-Hai, appartient au grand bassin du Chott Melrhir(06). Ce sous bassin s'étale sur une superficie de 1120 km². Il est limité au Nord par la Daira de Batna, celle de Merouana, au Sud par la Wilaya de Biskra, à l'Ouest par la Daïra de N'Gaous et Barika, à l'Est par Tazoult, Arris et Menaâ. Il prend naissance dans les monts de Batna et se jette dans la plaine de l'Outaya à travers un réseau hydrographique formées essentiellement par Oued El-Hai et alimentant le barrage des fontaines des Gazelles (35°7.4' Nord - 5°34.7' Est).

C'est une région entourée de chaînes montagneuses peu élevées (jusqu'à 2091 m monts de Bellzema), les flancs Nord sont couverts de forêts, tandis que les flancs Sud sont rocaillieux et dénudés, les uns et les autres sont abrupts aux pieds des talus ; on trouve beaucoup d'éboulis. Ce secteur constitue la partie la plus arrosée, elle est drainée par l'oued El Hai ; oued Tilatou descend des flancs des monts de Bellezma et après le confluent avec oued Fedhala, il s'appel " oued El Hai".

Le sous bassin versant d'oued El Hai se situe dans une zone limitée par les longitudes (5°28'-6°14' Est) et les latitudes (35°09'-35°37' Nord).

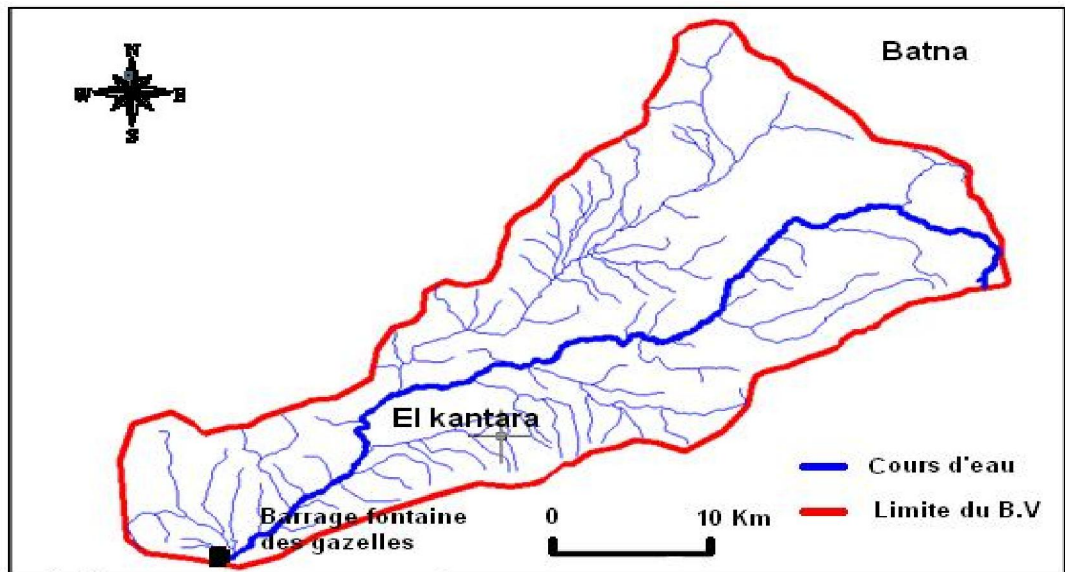
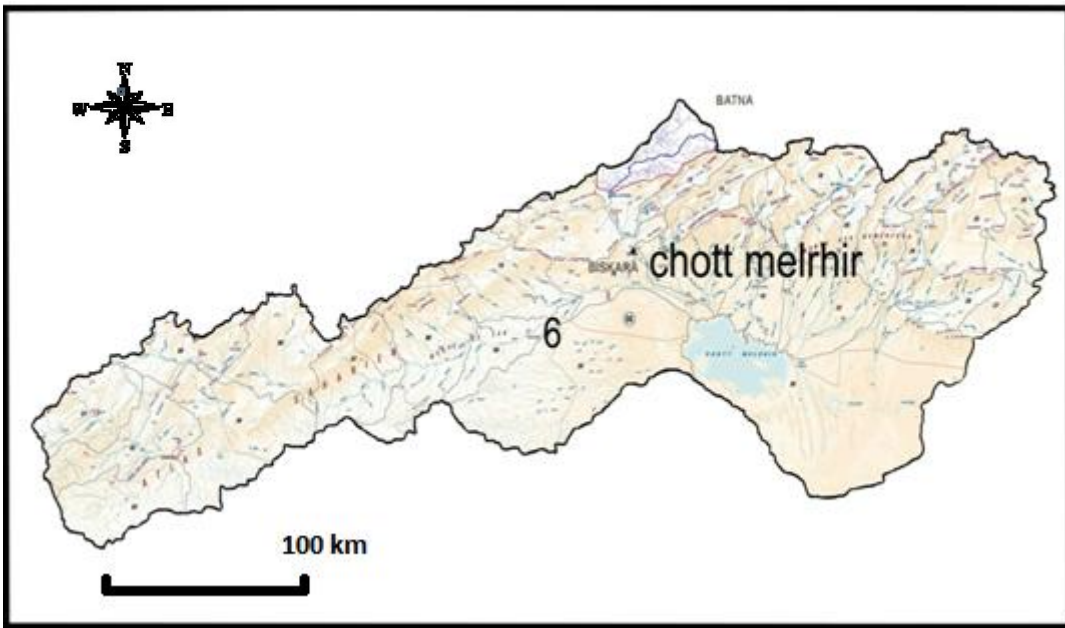


Figure (I -7) Localisation et situation de la zone étudiée.

I.2-3 Les grands ensembles physiques

Le bassin versant de l'oued Biskra présente des ensembles naturels fortement variés qui agissent sur le comportement hydrologique du bassin. Il est subdivisé en trois milieux naturels:

I.2-3-1 Les montagnes

Elles sont composées essentiellement de massifs montagneux des Aurès dans la partie nord du bassin. Elles sont constituées par les monts de Asker (1833m), Djebel Ich Ali (1815m) et chaîne montagneuse de Bellezma (2091m) caractérisée par de forts reliefs en plusieurs chaînons orientés sensiblement leurs altitudes s'élèvent progressivement de l'Ouest en Est, ainsi que Djebel Metlili (1496m) au Sud-Ouest du bassin, Ces reliefs forment une barrière naturelle, qui joue un rôle climatique et hydrologique important. Les différents paramètres climatiques sont fortement influencés par ces reliefs.

I.2-3-2 Les piedmonts

C'est une zone de transition entre la montagne et la plaine : elle s'allonge de l'Est à l'Ouest on trouve également le piedmont méridional avec ses collines et ses étendues planes, étagées et en pente douce ; son altitude varie entre 1200 et 1600m.

I.2-3-3 Les plaines

C'est la zone plate du bassin la plus exposée aux crues, elle se situe au sud-Ouest des piedmonts, elle est circonscrite par les courbes de niveau 800 à 1200m, les dépôts accumulés dans cette plaine sont composés de sable, gravier et de limon résultant de la charge solide des oueds .Ce terrain est utilisé pour les activités agricoles saisonnières.

I.2-4 La structure du bassin

La diversité des milieux topographiques du bassin de l'oued El Hai relevée dans le début de cette partie, trouve son origine dans la constitution géologique et structurale de cette région. Les différents mouvements tectoniques qu'a connus cette dernière ont engendré le soulèvement des reliefs et l'affaissement des dépressions.

Le bassin de l'oued El Hai a été le siège d'un tectonique assez complexe, qui est relativement souple, ayant aboutie à la formation des anticlinaux et synclinaux de direction générale NE-SO, ces structures font de la région une zone très tectonisée (R. Laffitte 1939).

I.2-4-1 Stratigraphie et aperçu lithologique global

Les terrains les plus anciens qui affleurent dans cette région sont attribués au crétacé le plus récent et au quaternaire le plus ancien (R. Laffitte 1939)

a) Le Crétacé :

Il constitue les principaux affleurements des monts de Bellezma et Djebel Metlili, la série de crétacé inférieur est caractérisée par des roches gréseuses dures et des marnes tendres contenant par endroit des cristaux de gypse ; elle affleure sur les sommets des monts de Bellezma, au Nord-Est de Thniet El Abed, au Sud-Ouest de Menaâ, cette série est bien liée et attribuée au jurassique. Alors que le crétacé supérieur qui s'étend du cénomanien au turonien est constitué essentiellement de marno-calcaire, il apparaît approximer de dechra Tilatou (extrémité Nord du Djebel Metlili) et dans la vallée de l'oued Fedhala. Le sénonien complet s'observe à El Kantara, où il fait suite au cénomanien-turonien étudiés précédemment, mais d'une épaisseur de 2200 à 2300m, dont 350m de mæstrichtien calcaire au lieu de 2900m.

b) Le Tertiaire

Les terrains attribués au miocène non différencié affleurent largement dans le secteur d'étude, il s'agit d'une formation marneuse très puissante, se caractérise par deux assises d'épaisseurs très différentes et largement discordantes, l'une par rapport à l'autre :

- La première appartient au miocène inférieur, elle occupe les reliefs de Maafa, Djebel Mahmal et Kef Ed Darsa (au Sud d'El Kantara).

- La deuxième partie représente le miocène moyen et supérieur, sa puissance d'environ 1800m dans le bassin du Djemoura, les marnes deviennent très gypseuses annonçant ainsi les faciès évaporitiques du miocène terminal de Branis au Nord d'El Outaya au voisinage de Djebel El Felleg.

- L'éocène inférieur, d'une épaisseur varie entre 150 à 200m, il est représenté par des marno-calcaire, marnes, calcaires blancs riches en silices et souvent fissurés, il affleure à l'Est -Sud-Est de Djebel El Melah, où il est représenté par quelques dizaines de mètres de marnes jaunes, verdâtre légèrement gypseuses et des calcaires argileux. Cette formation affleure également à l'Est d'El Outaya les reliefs de Bouzina et le Nord d'El Kantara.

- L'éocène moyen est surmonté par une assise rouge gréso-marneuse à la base conglomératique au sommet, dont l'épaisseur atteint au maximum 300m, les séries détritiques rouges d'El Kantara pourraient alors représenter l'éocène moyen et pourraient être la base de l'éocène supérieur.

- Le pliocène repose sur le miocène marneux, avec une légère discordance constituée par des grés, sables, argiles, marnes brunes et gypses, avec quelques poudingues, l'épaisseur de ces formations peut atteindre les 400m. Dans le bassin de l'oued El Hai, il est caractérisé par une formation gréseuse épaisse de plusieurs dizaines de mètres, elle débute par quelques bancs de

grés relativement tendres bruns rosâtres à petits galets, qui alternent avec des marnes gréseuses rosâtres.

c)Le Quaternaire

Les terrains quaternaires sont très répondeus dans cette partie, ces formations sont caractérisées par des conglomérâtes épaisses, des graviers-sableux et éventuellement des limons sableux contenant des galets de gravier, des alluvions sableuses et caillouteuses de lit de Djebel Melah. Le quaternaire moyen est représenté par des alluvions sableuses et argileuses dans toutes les grandes plaines, vers l'oued Biskra. La terrasse du quaternaire ancien est bien développée elle est formée exclusivement par des poudingues aux alentours des montagnes.

d)Le Jurassique

Il s'agit de marnes, de calcaires marneux et de dolomies, constituant la succession de cet étage. Représenté dans la plaine de Ain Touta La partie supérieure est constituée de calcaire de plus en plus dolomitique jusqu'à la dolomie pure.

e)Le Trias

Le Trias apparaît sous forme de diapirs ou jalonnant les contacts anormaux. Il consiste en une série argilo-gréseuse à la base suivie d'une série évaporitique comprenant des passées calcaro-dolomitiques. Le gypse est le plus fréquent et le sel caractérise quelques pointements (djebel El Melah à El Outaya).

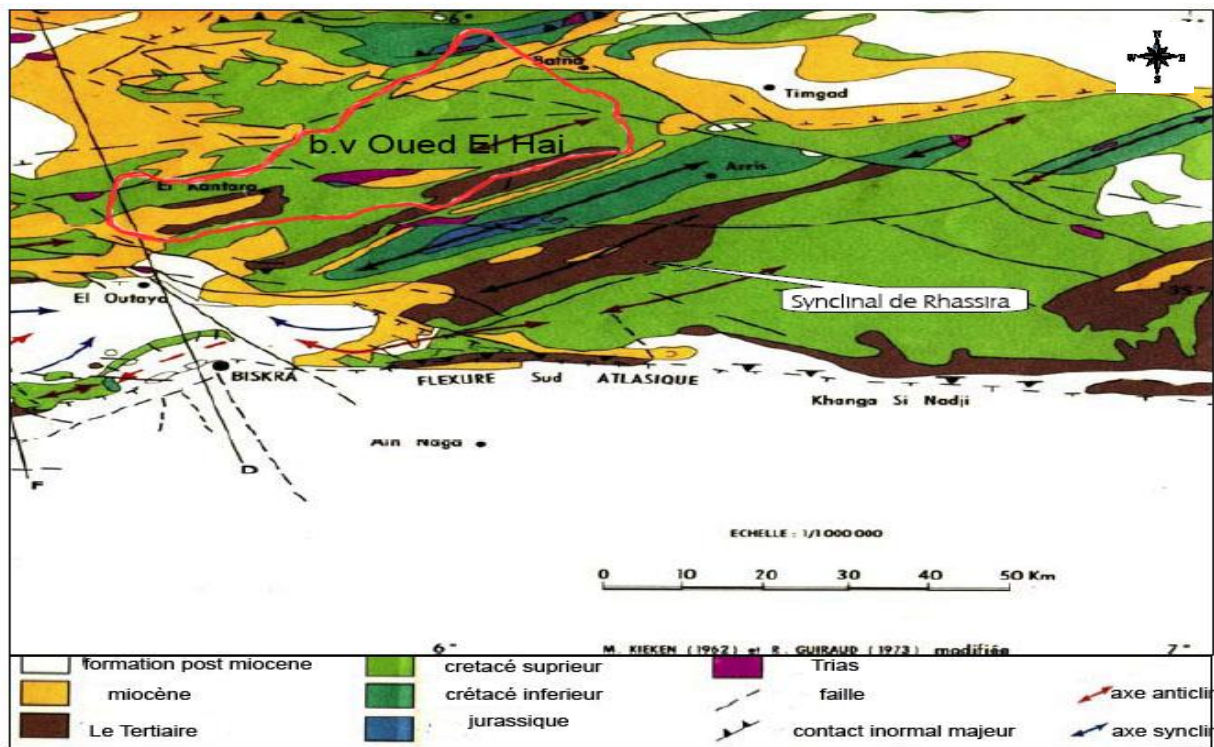


Figure (I -8) Carte Structurale. [8]

I.2-5 Les caractéristiques lithologiques et la perméabilité des roches des sous bassins versants

Les caractéristiques hydrologiques des sous bassins sont dans une large mesure influencées par l'imperméabilité des roches et les sols qui ont dérivé d'absorber l'eau et de la retenir de manière temporaire. Les descriptions lithologiques qu'on abordera ci-après, sont inspirées en grande partie des notices des cartes géologiques à 1/50.000 de Batna, El Kantara et Biskra. Dans le sous bassin de l'oued El Hai : on trouve les formations calcaires du cénomaniens supérieur et des formations marno-calcaires du turonien ; ces formations apparaissent approximer de dechra Tilatou et la vallée de l'oued Fedhala, des marno-calcaires gréseux du miocène affleurent au Sud d'El Outaya, Ain Touta et le Nord des tamarins, ainsi que les pieds des montagnes. Les autres formations ont une extension très réduites : les masses de marnes associées aux conglomérates et calcaires sont représentées au Nord d'El Kantara.

En général, dans le bassin de l'oued El Hai on constat trois types de roches ou trois grands ensembles (voir Figure (II-1)).

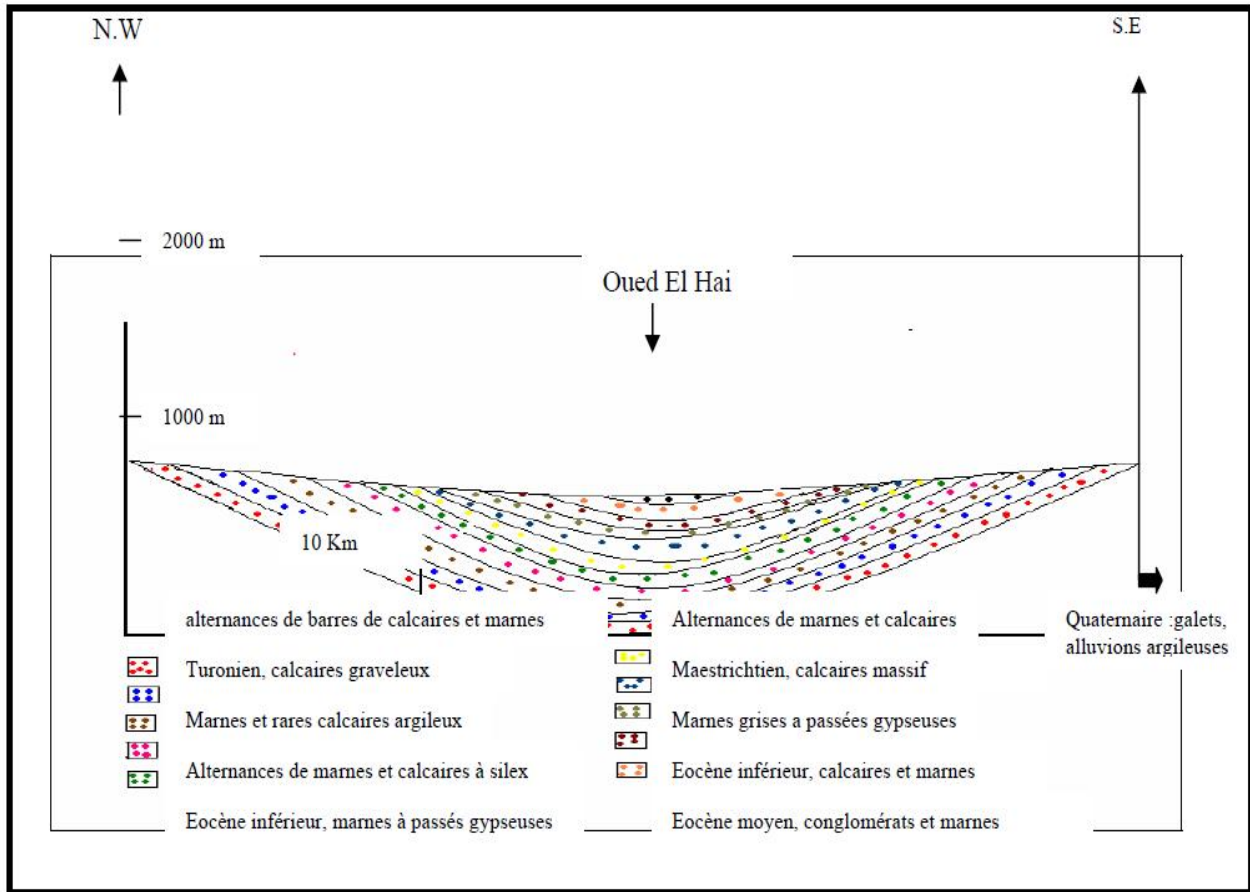


Figure (I -9) Coupe tectonique du bassin au niveau d'El Kantara. [9]

I.2-5-1 les formations imperméables

Constituées des marnes, marno-calcaires et sols argileux de telles assises rencontrent dans la formation marno-calcaire turonienne et la formation marneuse miocène, ainsi que sous forme de divers recouvrements quaternaire (sols forestiers). Sur les zones de cette nature, l'infiltration doit être inférieure à 10% des précipitations, s'élève à 23% et 12% pour les sols à texture moyenne et lourde or ces derniers, plus hétérogènes que les terrains considérés et plus perméables qu'eux.

Ainsi ces assises sont pratiquement imperméables, cependant de par leur nature argileuse, elles peuvent emmagasiner par imbibition une importante quantité d'eau., s'étend entre la plaine El Kantara et Djebel Mahmel.

Les argiles rouges occupent toute la rive droite de l'oued Abdi et Biskra.

I.2.5.2 Les formations à perméabilité moyenne

Ces formations sont formées de calcaires du cénomanien supérieur et les formations dolomitiques, ainsi que les marnes du miocène. Elles apparaissent approximer de dechra Tiltatou

(extrémité Nord du Djebel Metlili), la vallée de l'oued Fedhala, sa puissance de 200 à 400 m au Aurès, Maafa et Kef Ed Dersa.

Il s'agit des calcaires biodétritiques et sublithographiques du crétacé, ou des calcaires d'algues du miocène, ou encore de la dolomie grenue, ces roches sont très compactes ; la formation dolomitique retenue cependant de rares poches de minéralisation ferrugineuse plus au moins caverneuse, seules susceptibles d'accroître localement sa perméabilité.

Ainsi du point de vue purement lithologique, les assises calcaires et dolomitiques sont donc très peu perméables.

I.2.5.3 Les formations à forte perméabilité

Ces niveaux se rencontrent dans la formation marno-calcaire du turonien, dans la formation détritique inférieur et l'assise du miocène, ainsi que dans le quaternaire.

Par ordre de perméabilité croissante, ces terrains se classent de la manière suivante :

- Les marno-calcaires indurés et souvent biodétritiques du turonien et les marno-calcaires gréseux de l'assise de miocène.

Ces terrains affleurent au nord du barrage fontaine des gazelles, Ain Touta et le Nord des tamarins, ainsi que les pieds des montagnes ; leurs puissances peuvent atteindre 400m.

- Les conglomérates et les brèches du miocène marin, dont les éléments généralement très grossiers sont soudés entre eux par un ciment calcaire biodétritique fin, laissant subsister autour d'eux des rives importants ; ces formations occupent le Nord d'El Kantara, le Nord de Djebel El Mahmel.

- Le gré calcaireux très vacuolaire, qui correspondent aux marno-calcaires miocène et les divers recouvrements quaternaires, très peu consolidés formés de débris calcaires ou dolomitiques à taille variable, parfois arrondis, de limon sableux et caillouteux verts.

Ces divers terrains possédant une porosité relativement importante, peuvent donc permettre l'infiltration des précipitations et en fonction de leur épandage, le drainage des eaux vers les zones basses. Cette catégorie occupe 28% de la surface totale du bassin soit 780km²

Tableau (I.5) :Caractéristiques des matériaux bassin versant.

Formations	Résistance à matériaux	Perméabilité
Marne	Non résistant	Perméabilité faible
Calcaire et marne	Résistant	Semi-perméable
Grès	Très résistant	Semi-perméable

Argile et grès	Très résistant	impermeable
Marne et grès	Résistant	perméable
Eboulis et pentes	Résistance moyenne	perméable
Alluvions quaternaires	Résistance moyenne	perméable

En peut considérer le bassin de l'Oued El Hai comme un bassin perméable. En peut choisie le paramètre caractéristique de la perméabilité du bassin ($K = 350$), voir le **table**

Tableau (I.6) : Degré de perméabilité.

K	DEGRÉ DE PERMÉABILITÉ
8.5	Élevée
75	Moyenne
350	Moyenne faible
1400	Faible
3200	Imperméable

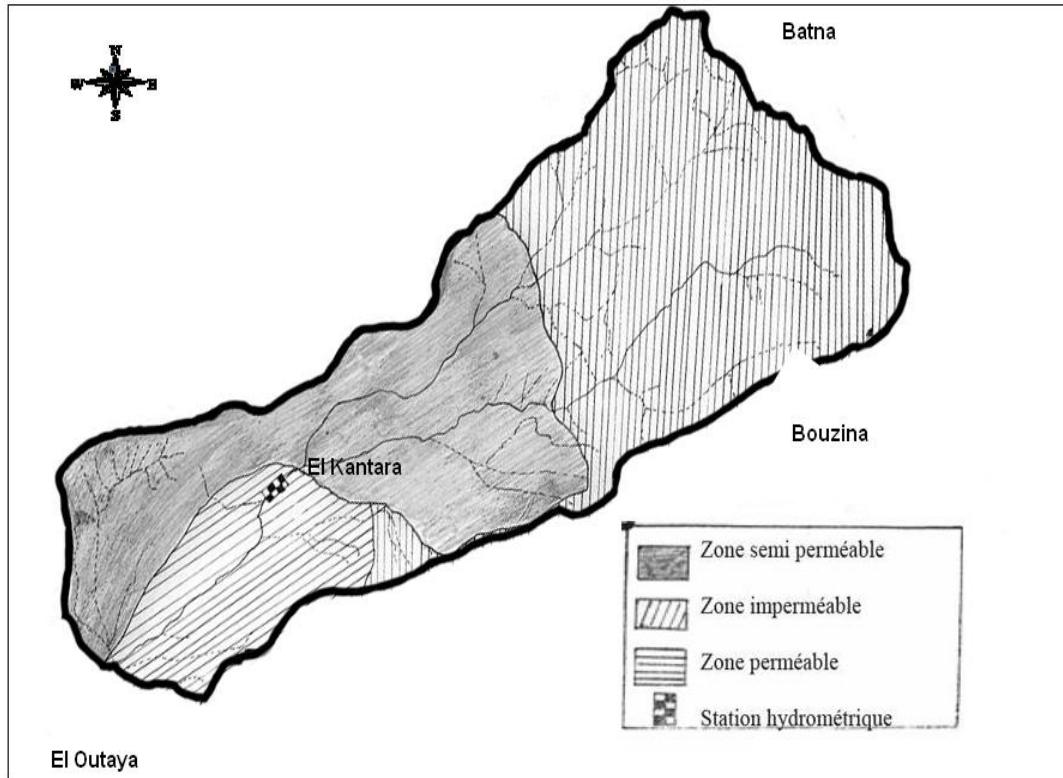


Figure (I -10) carte de perméabilité du bassin versant de l'oued Biskra.

I.2-6 Le couvert végétal

D'une manière générale la couverture végétale conditionne et influence la rapidité du ruissellement superficiel, le taux d'évaporation et la capacité de rétention du bassin versant.

L'intérêt de cette couverture végétale est double : elle permet d'une part un amortissement notable des crues, leur étalement dans le temps, d'autre part elle augmente l'infiltration et limite le transport solide.

Nous ne prétendons pas à faire une étude de la végétation, ce n'est pas le but de notre recherche, mais nous essayons de donner quelques éléments descriptifs sur les principaux types de la couverture végétale et surtout sur l'état de dégradation de cette couverture.

Mais avant de parler de tout ça, il sera utile de parler du rôle de la végétation sur l'écoulement.

I.2-6-1 Rôle du couvert végétal

La végétation joue un rôle essentiel dans la protection du sol, elle exerce une protection mécanique directe sur l'écoulement fluvial, en diminuant la force vive des eaux et en favorisant leur infiltration ; cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense.

Enfin, elle donne de l'ombre, ce qui conserve l'humidité et l'activité biologique nécessaire à l'équilibre du sol, l'infiltration en profondeur est facilitée par les fissurations préparées au sein du sol les eaux qui ruissellent rencontrent des obstacles, qui les obligent à ralentir leurs vitesses.

I.2-6-2 Méthodes d'approches et classification de la végétation

Plusieurs classifications plus ou moins complexes ont été proposées, mais la classification des types de couverture par ordre de densité de J, Tricart est plus apte à montrer l'impact du couvert végétal sur les conditions d'écoulement à notre contexte.

Nous reprendrons les trois grandes catégories de type de couverture végétale distinguées :

- Les surfaces bien protégées : Ce sont les surfaces qui bénéficient de couverture végétale plus ou moins dense, permanente et plus spécialement les forêts, ces dernières protègent contre l'érosion et la concentration rapide des eaux.
- Les surfaces incomplètement protégées : Ce sont les surfaces partiellement nues en permanence et les surfaces saisonnièrement protégées, dont les averses peuvent engendrer un ruissellement important qui peut déclencher des actions érosives et des crues inondantes.

Il s'agit généralement des terres de culture destinées soit pour la céréaliculture, qui occupe densément le sol pendant une période de l'année et de l'arboriculture qui laisse le sol nu en permanence entre les arbres. Ainsi la pratique de la jachère nue est dommageable puisque les terres sont laissées au repos une année sur deux sans aucune protection.

- Les surfaces mal protégées ou nues : Elles incluent les terrains dénudés, les terrains de parcours taillis et broussailles à faible densité de recouvrement, où le ruissellement et l'érosion hydrique sont largement favorisées, surtout dans les terrains dénudés imperméables et sur les terrains de parcours fortement pâturés.

I.2-6-3 Approche cartographique

Le travail cartographique est basé directement sur le plan de l'environnement forêts (plan établi par la conservation des forêts de la wilaya de Batna et Biskra en 2001), ainsi que le plan de mobilisation agricole et forestière au 1/50.000.(voir Figure (II-4)).

Ces plans nous permettent de distinguer dans le secteur correspondant, la répartition des différents types de végétations indiqués précédemment.

Le paysage végétal du bassin de l'oued El Hai a été largement dégradé et défriché en montagne, le taux de boisement est estimé à 27%. L'effet dévastateur dû aux conséquences de la guerre d'indépendance est à signaler ; les belles forêts sont localisées sur le versant Nord-Est entre 1400 et 1600 mètres également les montagnes des Aurès, les monts de Bellezma, la région de Manaa et la partie Ouest de Bouzina. Ces forêts sont composées de cèdre, chêne vert et pin d'alpe, ces dernières (chêne vert et pin d'alpe) se trouvent dans un état de dégradation avancé, elles occupent le versant Sud de Djebel El Mahmel, Asker et Djebel Matlili.

Par ailleurs, le couvert forestier assure une protection optimale contre l'érosion hydrique et les inondations.

Les prairies qui sont classées avec la couverture forestière, du fait de leur rôle protecteur du sol en permanence, suivent les vallées alluviales de Bouzina-Menaa.

Les surfaces occupées par des plantes pendant seulement une période de l'année (couverture végétale saisonnière) et le jardinage des oasis assurent une protection faible du sol contre la remontée rapide des crues, la céréaliculture occupe la partie Est de, Bouzina, Beni Fedhala et Maafa.

Les terrains dénudés occupent les piedmonts, les vallons et les massifs montagneux, où on trouve aussi des formations rocheuses, la disparition des forêts a laissé place aux terrains nus relativement importants, qui n'assurent aucune protection du sol bien au contraire ; c'est un terrain favorable aux inondations.

-En conclusion, La majorité des terres du bassin de l'oued El Hai est considérées comme mal protégées ou nues, car ces terres sont couvertes de steppes et de broussailles. Ces formations végétatives se trouvent dans un état de dégradation très avancé, qui se traduit par des taux de recouvrement très faibles, on trouve ce type de végétation surtout dans le nord de la plaine d'El Outaya, où la végétation devient rare, laisse place à des vastes nappes sableuses qui n'offrent plus d'obstacle ou frein à la remontée des eaux et les crues désastreuses se produisent, se sont des terrains imperméables favorables aux transports solides et à la coulée des boues.

-Les surfaces bien protégées sont celles représentées par une couverture forestière (végétation dense), elles constituent une excellente protection pour le sol, qui se trouve fixé par les racines des arbres et des végétaux. C'est un obstacle naturel à l'écoulement, elles en freinent le ruissellement et favorisent l'infiltration vu leur très fortes perméabilités ; ce qui protège le sol contre les phénomènes naturels : l'érosion, les inondations, l'envasement des barrages et des retenues,...etc.

Malheureusement, cette barrière naturelle ne représente qu'à 27% du bassin de l'oued El Hai et se trouve généralement dans un état très dégradé, elle occupe les reliefs de Djebel Mahmel, Metlili et Asker.

-En fin, les surfaces incomplètement et moyennement protégées sont occupées par les céréales et l'arboriculture, elles sont semi-perméables.

Les pratiques agricoles intensives diminuent la capacité du terrain à retenir l'eau et augmentent le ruissellement plus ou moins violent et exercent une érosion plus ou moins importante.

Tableau (I.7) : Répartition en % des types de végétation et d'occupation du sol.

Surfaces bien protégées		Surfaces incomplètement protégées	Surfaces mal protégées ou nues
Forêts et Maquis	Prairies naturelles	Terres labourées (céréales, cultures et maraîchères,...)	Terrains dénudés, steppes d'alfas et broussailles.
27,07	0,098	5,882	66,95

D'après ces statistiques, les surfaces dénudées (nues) représentent la part majoritaire dans le bassin, dont la proportion est d'environ 67% de la surface totale du bassin les terrains boisés occupent une surface importante (27,07%), quant aux terrains occupés par les céréales et les cultures maraîchères occupent seulement une proportion de 5,882% \approx 6% du bassin, on peut dire que c'est une extension très faible. Tandis que les prairies naturelles occupent une surface négligeable par rapport à la surface totale du bassin de l'oued Biskra (0,098 \approx 0,1).

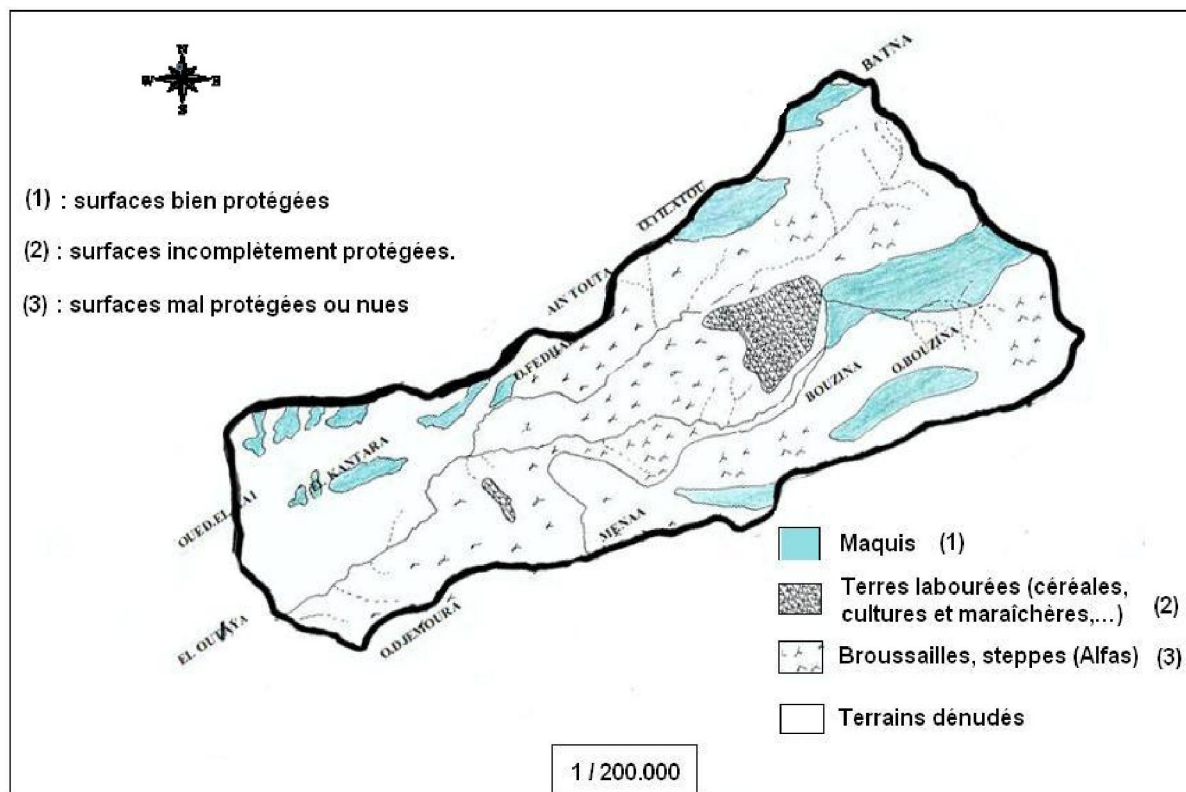


Figure (I -11) Carte de la végétation du bassin versant de l'Oued El Hai. [12]

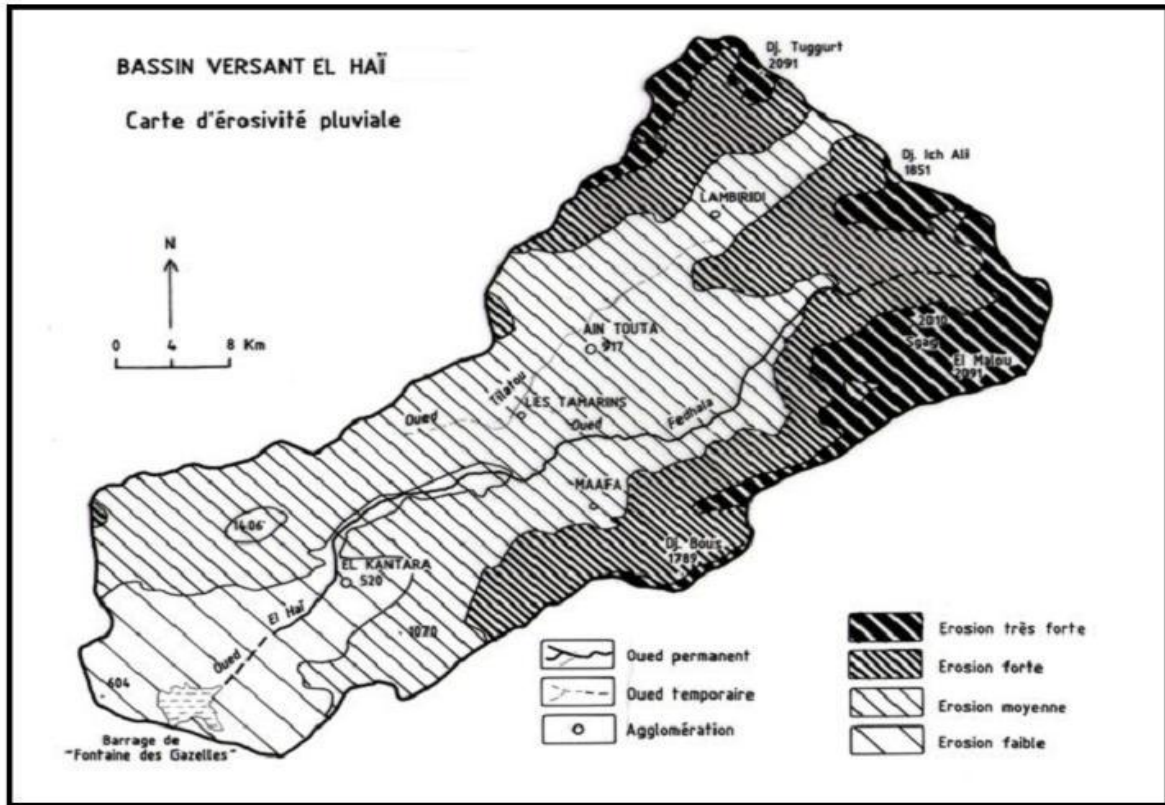


Figure (I -12) Carte de l'érosion du bassin versant de l'Oued El Hai.

I.3 -Etude hydrographique

I.3-1 Introduction

Le bassin hydrographique, ou bassin versant est l'unité ou le cadre de toute étude hydrologique. Les limites d'un bassin sont formées par les lignes de partage des eaux ; qui le séparent des bassins adjacents. Elles sont facilement réparables dans les régions où le relief est bien marqué, il n'en est pas de même dans les régions très plates, où les eaux divaguent dans celles où les écoulements temporaires se perdent dans les sables ou dans les cuvettes désertiques.

Dans un bassin hydrographique, la topographie ou le système de pentes commande la trajectoire des écoulements et l'organisation du drainage ou réseau hydrographique, celui-ci dépend de l'alimentation en eau. Le terme de bassin hydrographique est parfois remplacé par celui du bassin versant ; qui désigne la surface d'interception des précipitations alimentant un cours d'eau.

I.3-2 Caractéristiques de la disposition dans le plan

I.3-2-1 Surface

Elle s'obtient par planimétrie sur une carte topographique après que l'on y ait tracé les limites topographiques, comme elle peut être déterminée en utilisant les techniques de digitalisation à l'aide des logiciels : (*Autocad*–*Surfer* – *Mapscan* – *Covadis*). La surface du B.V du Oued El Hai a été mesurée par logiciel *AUTOCAD 2004* Elle est de l'ordre **1122 Km²**.

I.3-2-2 Longueur

On utilise différentes caractéristiques de longueur ; Parmi ces dernières on cite :

a) Périmètre

Le périmètre du bassin versant est la longueur de la ligne de partage des eaux.

Le périmètre du B.V du Oued El Hai mesuré par "AUTOCA 2004" est de **174 Km**.

b)Longueur du bassin versant

C'est la ligne droite qui relie l'exutoire et le point le plus éloigné situé à l'amont du bassin. Pour le Bassin de l'Oued El Hai cette valeur est : **L_{BV} =61.60 Km**.

c) Longueur du talweg principal

On admet qu'il faut poursuivre le thalweg indiqué sur les cartes topographiques, vers l'amont jusqu'à la limite du bassin. De même, si la partie avale présente des méandres, on curvimètre généralement tous les méandres.

La longueur du talweg principal du B.V Oued El Hai mesuré par "AUTOCAD 2004" est de **79.8 Km**.

d) Largeur du bassin versant

Elle se définit comme la plus grande largeur (l) perpendiculaire à la plus grande longueur. Elle peut être également calculée par la relation suivante : $l = \frac{S}{L_{B.V}}$

S : superficie du bassin versant en Km^2 .

$L_{B.V}$: longueur du bassin versant en Km .

Pour le B.V du Oued El Hai elle est égale à $l = 18.21 \text{Km}$

e) Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité (K_G) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout, sur l'allure de l'Hydrogramme à l'exutoire du bassin. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle ayant la même surface du bassin.

Il s'exprime par la formule suivante ; **M. ROCHE, (1963)** :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{A} \cdot \pi} \approx 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre stylisé en km du bassin versant

A : Superficie du bassin versant en km^2 .

* Lorsque K_G est proche de 1 le bassin versant est de forme quasiment circulaire

* Lorsque le K_G supérieur à 1 bassin versant est de forme allongée.

Un bassin versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé.

$K_G = 1$	forme d'un cercle
$K_G = 1.12$	forme d'un carré
$K_G > 1.12$	forme d'un rectangle

Le coefficient de Gravelius du B.V du Oued el Hai est égal à **1.45** ce qui explique la forme

allongée du bassin.

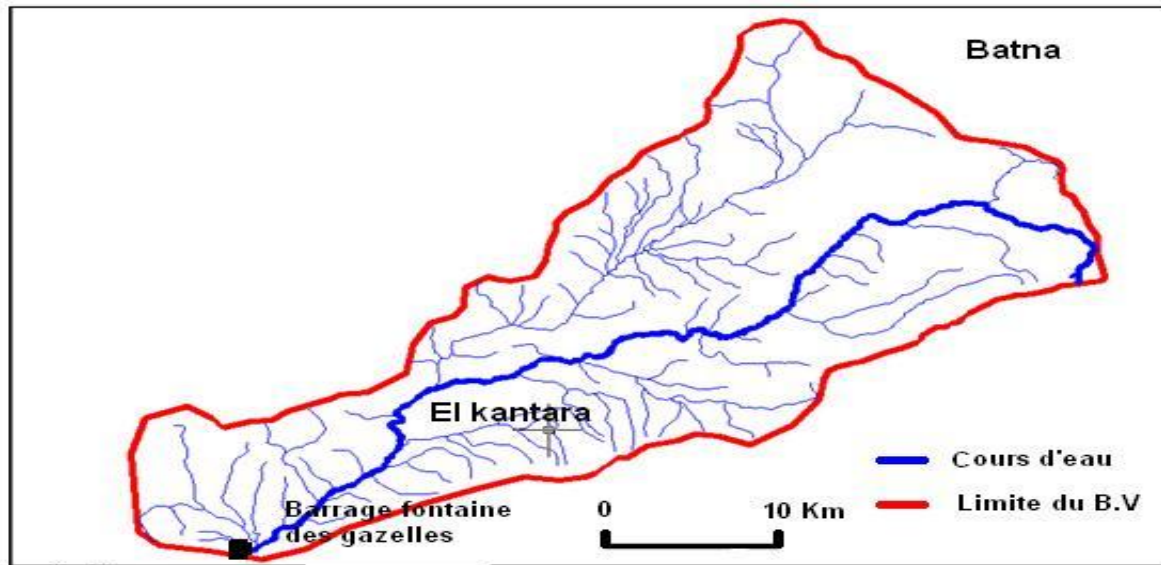


Figure (I -13) Réseau Hydrographique Du bassin versant Oued El Hai.

I.3-3 Caractéristiques des altitudes (hypsométrie)

I.3-3-1 Les altitudes maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques point le plus élevé du bassin tandis que ment à l'exutoire. Pour notre bassin nous trouvons

$Z_{MAX} = 2091 \text{ m}$

$Z_{MIN} = 350 \text{ m}$

I.3.3.2 La courbe hypsométrique.

Le relief est caractérisé par la courbe hypsométrique. Cette courbe est obtenue en portant en abscisses les surfaces partielles cumulées du bassin versant pour laquelle chaque point a une cote au moins égale à cette altitude et en ordonnées l'altitude considérées.

Le planimétrage des surfaces partielles a été réalisé en utilisant le logiciel **AUTOCAD 2004** Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau (III-1); et les courbes de niveau du bassin versant sont données dans la Figure (III-3), à l'aide du **AUTOCAD 2004**.

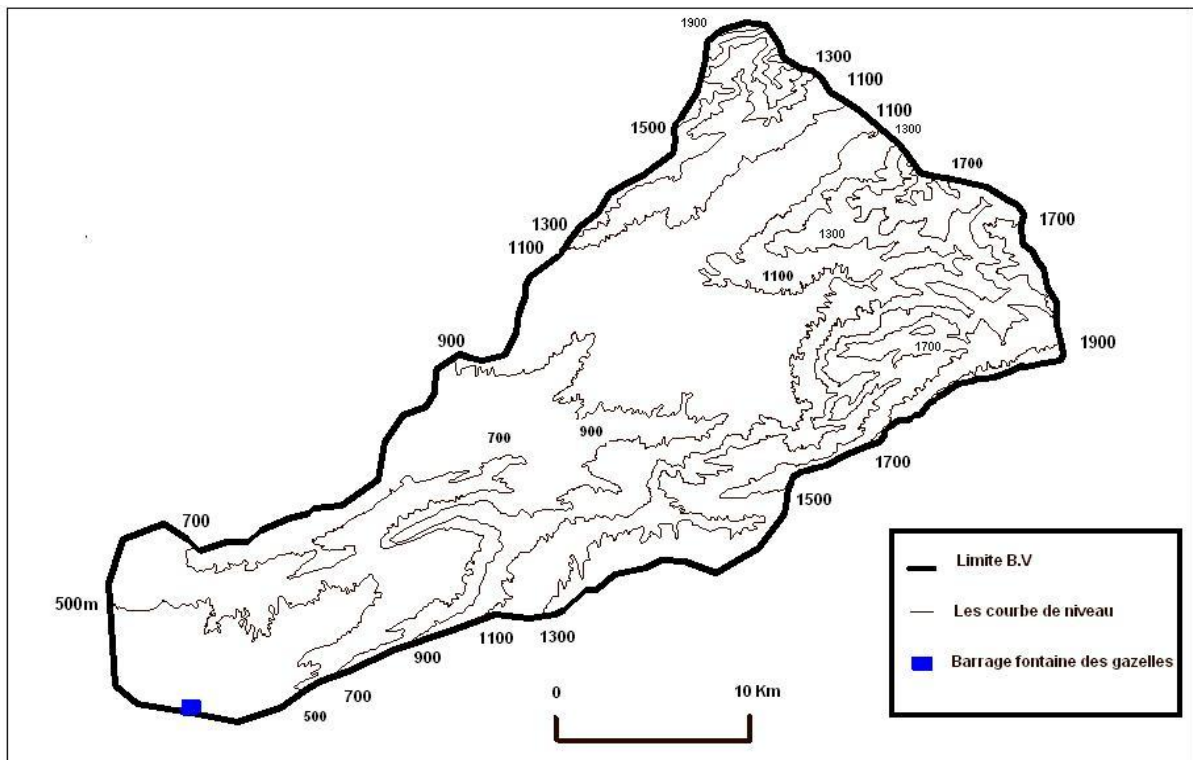


Figure (I -14) Carte hypsométrique du B.V de l'oued El Hai.

Tableau (L.8) : Calcul des surfaces partielles et cumulées.

Altitudes	Bornes sup en(m)	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
		en(Km ²)	en (%)	en(Km ²)	en (%)
1900-2094	2091	8,42	0,75	8,42	0,75
1700-1900	1900	46,64	4,16	55,06	4,91
1500-1700	1700	84,97	7,57	140,03	12,48
1300-1500	1500	152,74	13,62	292,77	26,1
1100-1300	1300	164,92	14,69	457,69	40,79
900-1100	1100	286,44	25,54	744,13	66,33
700-900	900	161,5	14,39	905,63	80,72
500-700	700	122,64	10,93	1028,27	91,65
350-500	500	93,73	8,35	1122	100

La zone d'altitude comprise entre 700m et 1300m correspond en majorité au bassin des hautes plaines d'Arris plus de 54%, les secteurs d'altitude entre 500 à 700m où se fait la jonction de l'oued El Hai avec ces deux principaux affluents en l'occurrence les oueds Fedhala et Tilatou. Cette répartition altitudinale de relief du bassin a une influence directe sur le régime hydrologique du bassin.

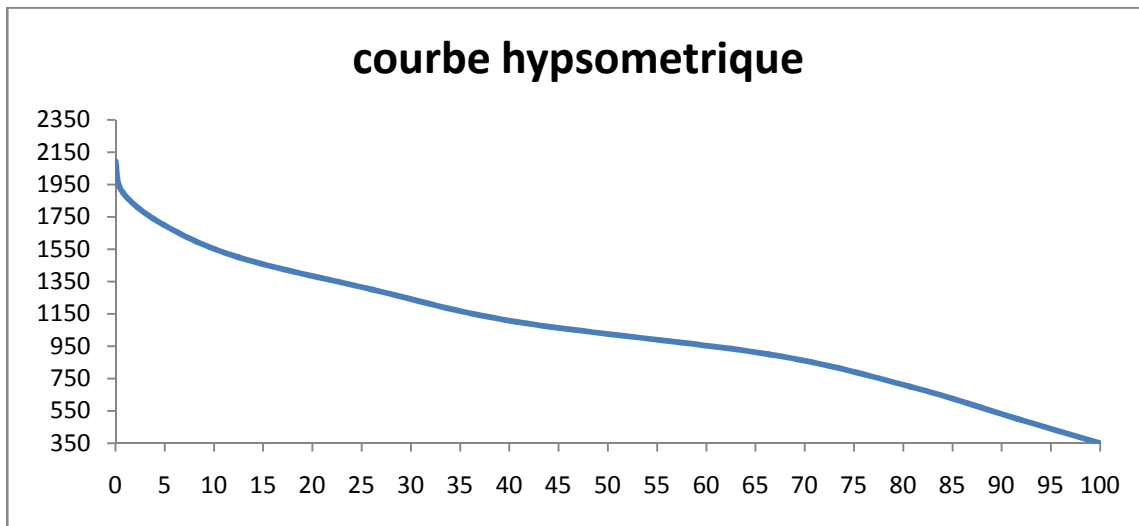


Figure (I -15) La courbe hypsométrique.

À partir de cette courbe, on détermine :

* l'altitude à 95% de la surface, $Z_{95\%} = 440 \text{ m}$;

* l'altitude à 5% de la surface, $Z_{5\%} = 1698\text{m}$;

* l'altitude médiane, $Z_{50\%} = 1025 \text{ m}$;

I.3.3.3 L'altitude moyenne

L'altitude moyenne est définie aussi par la formule suivante :

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{H_i \cdot A_i}{A}$$

D'où :

S : surface totale du bassin versant ;

Si : surface partielle ;

\bar{H}_i : L'altitude moyenne entre deux courbes de niveau

Tableau (I.9) : L'altitude moyenne et surface partielle.

\bar{H}_i	Si	Si * \bar{H}_i
1997	93.73	187178.81

1800	122.64	220752
1600	161.50	258400
1400	286.45	401030
1200	164.92	197904
1000	152.75	152750
800	84.98	67984
600	46.65	27990
425	8.43	3582.75
$\sum Si * \bar{H}_i$	1517571.56	
\bar{h}	1352,56	

H=1353

I.3-3-4 La dénivelée simple

On définit la « dénivelée D » comme étant la différence de cote entre $Z_{5\%}$ et $Z_{95\%}$;

Celles-ci sont lues sur la courbe hypsométrique.

$$D = Z_{5\%} - Z_{95\%}$$

Pour le bassin versant du Oued El Hai on trouve : $D = 1258 \text{ m}$;

I.3-3-5 Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux côtés du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes.

- **La longueur**

$$L_{\text{rec}} = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right]$$

Pour application, la longueur du rectangle équivalent du B.V de l'Oued el El Hai est de l'ordre de **70.90 Km**

- **La largeur**

$$l = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right]$$

Pour application, la longueur du rectangle équivalent du B.V est de **15.82 Km** ;

Tableau (I.10) : Largeurs des intervalles du rectangle équivalent.

Surface partielle	Largeur $l_{rec.}$	Largeur partielle X_l
93,73	15,82	5,92
122,64		7,75
161,5		10,21
286,45		18,10
164,92		10,42
152,75		9,65
84,98		5,37
46,65		2,95
8,43		0,53
1122		70,90

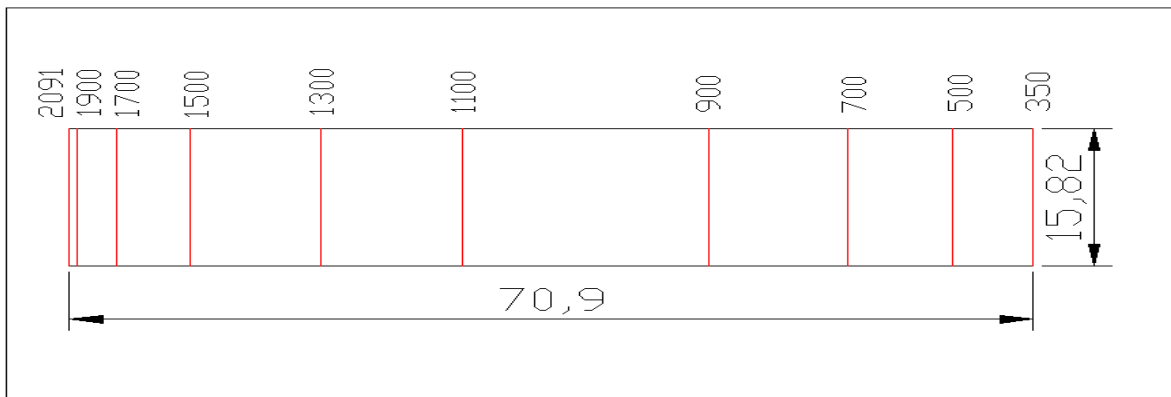


Figure (I -16) Rectangle équivalent du bassin versant Oued El Hai.

I.3-4 Les indices de pentes

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de comparer les bassins versant entre eux.

La carte des pentes est l'instrument qui permet de visualiser les nuances topographiques à l'intérieur de l'espace étudié ; elle peut être établie à partir des cartes topographiques d'échelle $> 1/100,000$.

Pour notre bassin la carte topographique d'échelle $> 1/250,000$ ont été utilisées. La classification a été faite à partir de différents calculs effectués sur la carte topographique et grâce à notre enquête sur le terrain.

Dans le bassin de l'Oued El Hai, on distingue les pentes seuils suivantes :

- Plus de 17%: versants érodés, absence de sol.
- 8 - 17% : bas de versant, quelques dépôts, sol mince cultivé.
- moins 8% : plaine et terrasse alluviales, dépôts alluviaux et colluviaux.

La carte de la pente Figure (10) montre une forte proportion de terrains dont la pente 5 - 20%, ce qui témoigne du caractère peu montagneux de ce bassin.

Mr J. TRICART (1962), est divisée l'écoulement suivant la pente en trois catégories:

- Écoulement faible : pente $< 3\%$;
- Écoulement fort : pente à limite de 10% ;
- Écoulement très fort : pente $> 10\%$.

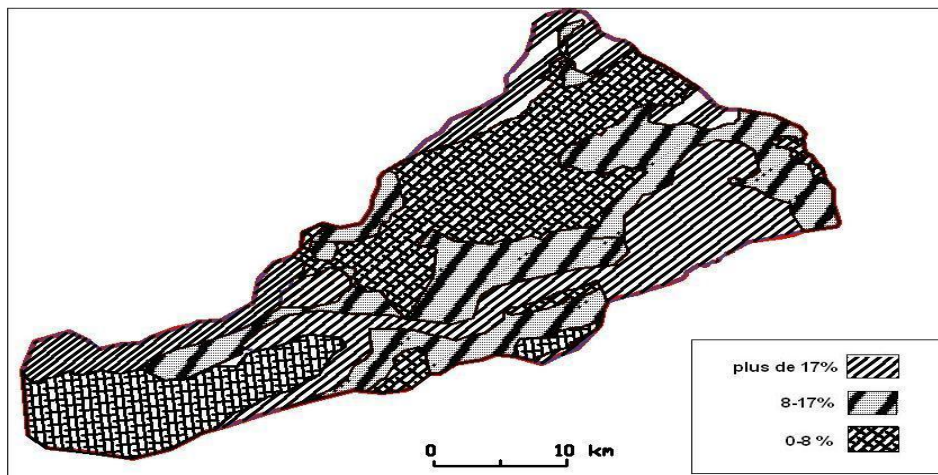


Figure (I -17) Les pentes dans le bassin de l'oued El Hai.

I.3-4-1 Pente moyenne

C'est une caractéristique importante des bassins versants qui renseigne sur la topographie du bassin. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à

l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible, par conséquent le bassin réagira d'une façon rapide aux averses. Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle qui sont à l'origine des crues dévastatrices.

La pente moyenne du bassin versant est donnée par **M. ROCHE, (1963)** comme étant la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires pour lesquelles on peut considérer que la ligne de plus grande pente est constante. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$i_m = \frac{D \cdot L}{A}$$

Avec :

i_m : Pente moyenne du bassin versant en [m /Km] ;

L : longueur totale des courbes de niveau en [km] ;

D : équidistance entre deux courbes consécutives en [m] ;

A : Surface élémentaire en [km²] ;

La pente moyenne du bassin versant de l'Oued El Hai est de l'ordre de **149.21 m/Km**

I.3-4-2 Indice de pente de Roche

Roche a proposé un indice de pente plus facile à calculer quel' autre, il est donné par la formule suivante:

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L_{rec}}} \sum_{i=1}^n \left(x_i \sqrt{\frac{d}{x_i}} \right)$$

I_p : indice de pente [%] ;

L : Longueur de rectangle équivalent [m] ;

X_i : distance qui sépare deux courbes sur le rectangle (facteur de pondération), en [m] ;

d : distance entre deux courbes de niveau successives (peut être variable) en [m] ;

d/X_i : pente moyenne d'un élément [%] ;

Soit $I_p = 38,91$ %, pour le B.V du Oued El Hai

I.3-4-3 Dénivelée spécifique

L'indice I_g décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique D_s ne présente pas cet inconvénient :

$$D_s = I_g \sqrt{A} = \frac{D}{L} \sqrt{L \cdot l} = D \sqrt{\frac{l}{L}}$$

La dénivelée spécifique ne dépend donc que de l'hypsométrie ($D = Z_{5\%} - Z_{95\%}$) et de la forme du bassin (l/L).

Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M, indépendante des surfaces des bassins :

Tableau (I.11) : deuxième classification d'après l'O.R.S.T.O.M.

R 1	Relief très faible	$D_s < 10 \text{ m}$
R 2	Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$
R 3	Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$
R 4	Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$
R 5	Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$
R 6	Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$
R 7	Relief très fort	$500 \text{ m} < D_s$

Pour le B.V de Oued El Hai on trouve $D_s = 594.23\text{m}$. D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M, notre bassin versant présente un **relief très fort (R₇)**, car : $500 \text{ m} < D_s$.

I.3-5 Caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué de l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant. La définition d'un cours d'eau est difficile à donner avec précision, en particulier pour les cours d'eau temporaires. Selon le support cartographique utilisé, on étudiera le réseau avec plus ou moins de détails : en photographie aérienne, on pourra déceler des thalwegs de très faibles extensions, tandis qu'on ne verra que les cours d'eau pérennes et importants sur une carte au 1/250 000^{ème}.

L'étude du chevelu hydrographique servant surtout à comparer des bassins entre eux, il suffit, dans la plupart des cas, de se fixer une définition du thalweg élémentaire et de l'appliquer pour l'étude de tous les bassins (par exemple : thalwegs = traits bleus temporaires ou pérennes sur carte I.G.N. au (1/250 000^{ème}).

L'oued El Hai prend son origine sur les flancs d'Atlas Saharien, qui à son tour prend sa naissance du confluent des deux oueds :

- oued Fedhala issue du djebel Ich Ali (1815m) et le nord de djebel Mahmel 2000m sud-est du bassin versant Oued El Hai , C'est la source de l'oued Bouaoun, qui après le confluent avec l'oued Doufana forme l'oued Fedhala qui coule du NO-SO.

- l'oued Tilatou qui descend des monts de Bellezma (2091m) sud-est du bassin versant et coule dans la direction SE-NO.

Ces deux affluents collectent toutes les eaux qui ruissellent sur l'Oued el Hai . Après la confluence. L'Oued El Hai coule dans la direction sud-ouest et contourne le djebel Metlili et malou chergui. Il reçoit plusieurs affluents dont oued Bou Bayada, issu des monts de kroucha au sud-ouest du bassin, et oued El Bell qui descend des contreforts du djebel Metlili au nord-ouest du bassin. Les cours d'eau alimentant l'oued El Hai en un caractère d'écoulement périodique : seul l'oued El Hai demeure relativement permanent, mais lui aussi se perd par endroit dans les dépôts de sable et de gravier de son lit pendant les périodes d'étiages, en aval de la station d'El Kantara il draine les massifs de Metlili, Mekrizane et Haouidja.

Le réseau hydrographique peut se caractériser par trois éléments : sa hiérarchisation, son développement (nombres et longueurs des cours d'eau) et son profil en long.

I.3-5-1 Hiérarchisation du réseau

Pour chiffrer la ramification du réseau, chaque cours d'eau reçoit un numéro fonction de son importance. Cette numérotation, appelée ordre du cours d'eau, diffère selon les auteurs. Parmi toutes ces classifications, nous adopterons celle de Strahler :

- tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1,
- au confluent de deux cours d'eau de même ordre n, le cours d'eau résultant est d'ordre n+1,
- un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre, ce qui se résume par:

$n + n = n + 1$ et $n + m = \max (n.m)$. Pour notre cas « **B.V Oued El Hai est d'ordre 5** » ;

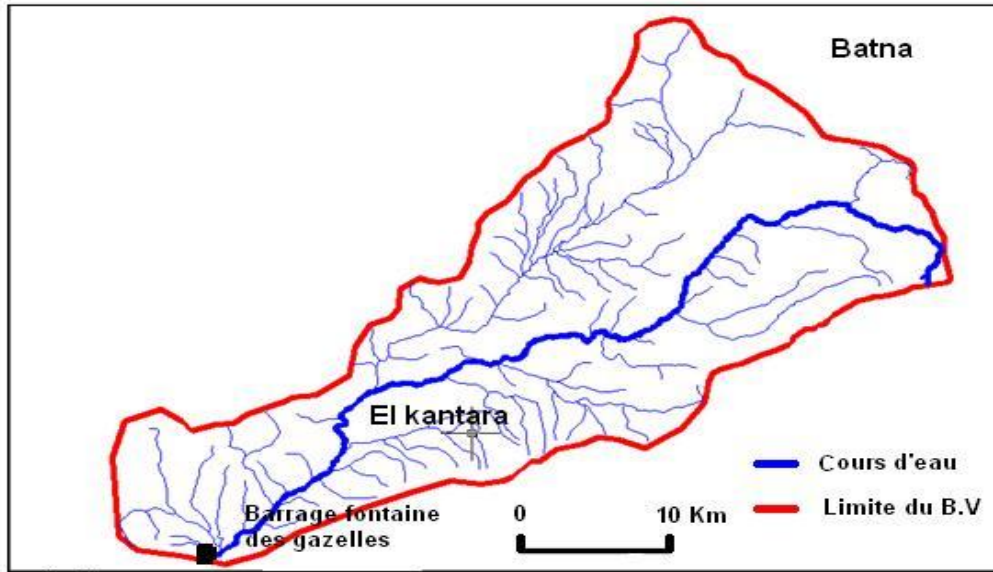


Figure (I -18) Carte du Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued El Hai.

I.3-5-2 Profil longitudinal d'un cours d'eau principale :

Ce profil est établi en portant en abscisses les longueurs développées du lit de la rivière à partir d'un point de référence (exutoire) et en ordonnées les cotes de l'eau dans le cours d'eau principal et de ces affluents (parfois on donne la cote du font). Ce relevé se fait, soit par nivellement sur le terrain, soit plus sommairement à partir des cartes topographiques.

Le profil en long d'un cours d'eau est un graphique représentant les différentes élévations du fond du cours en fonction de la distance à l'exutoire.

Les profils en long permettent d'estimer la pente moyenne du cours d'eau qui sert surtout à évaluer les temps de concentration d'un bassin versant, ce dernier étant lié à la vitesse de propagation des particules fines ; elle-même proportionnelle à \sqrt{I} .

On calcul généralement la pente moyenne I d'un cours d'eau par la formule suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{I}} = \frac{1}{L_{cp}} \sum_{j=1}^n \frac{l_j}{\sqrt{I_j}}$$

I : pente moyenne du cours d'eau principal ;

L_{cp} : longueur totale du cours d'eau principal ;

l_j : longueur d'un tronçon j du cours d'eau principal ;

i_j : différence d'altitude du tronçon j ;

Pour notre cas, en mesuré longueur totale et les tronçons par des techniques digitalisations « **AUTOCAD** »;Donc $\frac{1}{\sqrt{I}} = 0.07299\%$

La pente moyenne du cours d'eau principal du B.V d'Oued El Hai I est égale à **0.00081**

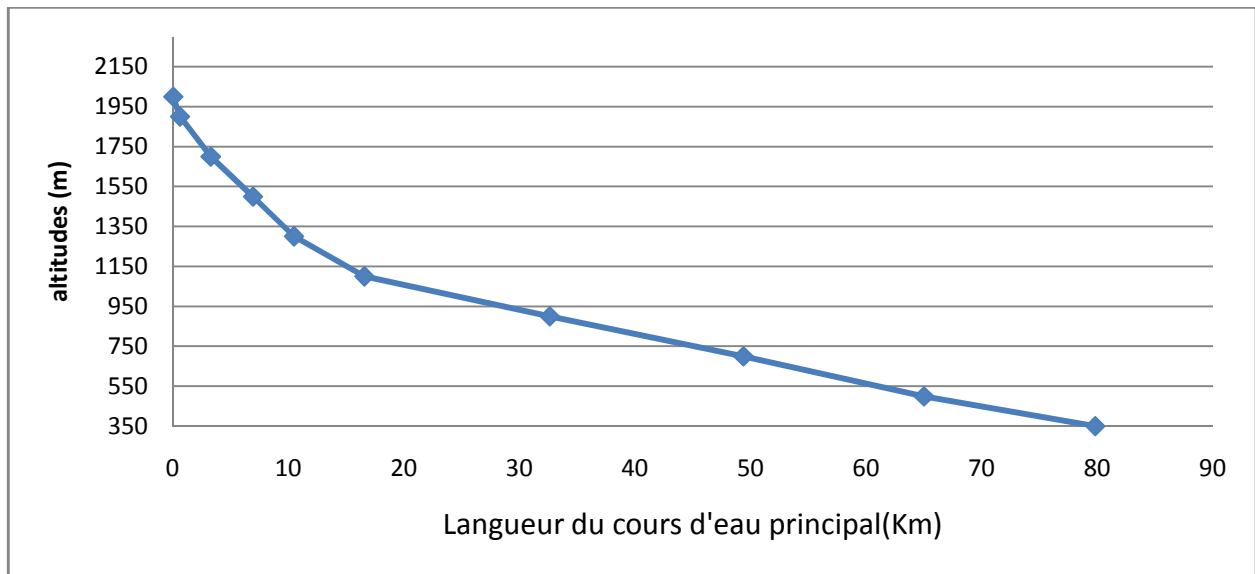


Figure (I -19) Profile en long du cours d'eau principal.

I.3-5-3 Degré de développement du réseau hydrographique

a) Densité de drainage

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle correspond pour un bassin versant donné, de superficie A, comme étant le rapport de la longueur totale des cours d'eau d'ordre quelconque sur la superficie totale A du bassin versant. La densité de drainage est exprimée en km/km^2 ou en km^{-1} . elle est donc :

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

Avec :

L_i : Longueur totale des cours d'eau en km ;

A : Superficie du bassin versant en km^2 ;

La longueur totale des cours d'eau du B.V du Oued El Hai est de : $\sum L_i = 573.43 \text{ Km}$;

Et leur surface $A = 1122 \text{ Km}$;

Donc : **$D_d = 0.511 \text{ Km}^{-1}$** .

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant dans une certaine mesure et des conditions climatologiques et atmosphériques. En effet, les secteurs situés en zones de roches perméables ont en général des densités de drainage faibles, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités plus élevées.

Selon Schumm, la valeur inverse de la densité de drainage, $C = 1/D_d$ s'appelle «**constante de stabilité du cours d'eau**». Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans une vecteur hydrographique unitaire section du réseau). Ce paramètre est reflet de la dynamique du bassin versant, de la stabilité du réseau hydrographique et du type de ruissellement de surface. Pour notre cas est : **$C = 1.956 \text{ Km}$** .

b) La densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de thalwegs d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N_i}{A}$$

Ou :

F : densité hydrographique [Km^{-2}] ;

N_i : nombre de cours d'eau ;

A : superficie du bassin [Km^2].

La fréquence des thalwegs d'ordre 1 : F_1 , est le rapport du nombre total de thalwegs d'ordre 1 à

la surface du bassin versant : **$F_1 = \frac{N_1}{A}$** [Km^{-2}]

Tableau (I.12) : Calcul La densité hydrographique.

Ordre	Nombre d'ordre N_i	Surface du B V	Densité hydrographique F en (Km ²)
1	86	1122	0.07765
2	20		0.01783
3	4		0.00357
4	2		0.00178
5	1		0.00089
Total	113		0.10071

c) Les rapports de confluence et de longueur

Sur la base de la classification des cours d'eau, Horton(1932) et Schumm (1956) ont établi différentes lois. Ces « lois » empiriques relient le nombre, la longueur, la moyenne et l'ordre des cours d'eau :

Loi des nombres : $R_c = \frac{N_i}{N_{i+1}}$

Loi des longueurs : $R_L = \frac{L_i}{L_{i+1}}$

Avec :

R_c : rapport de confluence des cours d'eau ;

R_L : rapport des longueurs des cours d'eau ;

i : ordre d'un cours d'eau i varie entre 1 et n (n est l'ordre du cours d'eau principal, classification selon *Strahler*) ;

N_i : nombre du cours d'eau d'ordre i ;

N_{i+1} : nombre du cours d'eau suivant ;

L_i : longueur moyenne des cours d'eau d'ordre i ;

Le rapport de confluence est un nombre sans dimension exprimant le développement du réseau de drainage. Il varie suivant l'ordre considéré, c'est un élément important à considérer pour établir des corrélations d'une région à une autre.

Selon **Strahler (1964)**, le R_c varie de 3 à 5 pour une région où la géologie n'a aucune influence.

Pour un bassin homogène, R_C et R_L sont sensiblement constants ; **J. P. LABORDE (2000)**

Tableau (I.13) : Calcul le rapport de confluence.

Ordre	Nombre N_i	Rapport de confluence	
		R_{Ci}	R_C
1	86		$\frac{\sum R_{Ci}}{nR_{Ci}} = 3.33$
		4.3	
2	20		
		5	
3	4		
		2	
4	2		
		2	
5	1		
		2	

Tableau (I.14) : Calcul le rapport de longueur.

Ordre	Langueur L_i en (Km)	Rapport de longueur	
		R_{Li}	R_L
1	369.01		$\frac{\sum R_{Li}}{nR_{Li}} = 2.21$
		3.94	
2	93.76		
		1.64	
3	57.13		
		1.79	
4	31.86		
		1.47	
5	21.67		

d) Le coefficient d'élancement

$$C_E = \frac{2\sqrt{A/\pi}}{L_{\max}}$$

Où :

L_{\max} : longueur maximale du bassin versant. Elle s'obtient en prolongeant le cours d'eau principal au point le plus éloigné possible du bassin versant et on mesure la longueur de l'exutoire jusqu'à ce point, $L_{\max} = 80.5 \text{ Km}$.

A : surface du bassin versant ;

Le coefficient varie de 1 pour un bassin versant plat à 0.6 pour un bassin versant à relief accentué. Pour le bassin versant du **Oued El Hai** : $C_E = 0.50 \Rightarrow$ **B V à relief accentué.**

e) Coefficient de torrentialité

Ce coefficient donne une idée sur la densité des drains d'ordre 1. Donc il prend en considération la densité de drainage et la densité des talwegs élémentaires (ordre 1). Le coefficient de torrentialité peut être déterminée par la formule suivante :

$$C_t = F_i \times D_d$$

→ (11) d'où $F_i = N_i/A$

Pour notre bassin, $C_t = 0.07765 \times 0.511 = 0.039 \text{ Km}^{-1}$.

Ce qui explique un écoulement moyen par apport à la surface du bassin

f) Temps de concentration

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau tombée à un point élevé du bassin versant, pour atteindre l'exutoire, il est exprimé par plusieurs formules, dans notre travail on se limite à la formule de *GIANDOTTI* ; **Lottl. C. (1987).**

• **Formule de GIANDOTTI :**

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{h}}$$

D'où :

t_c : temps de concentration en [heures] ;

S : Surface du bassin versant, en [Km^2] ;

L : longueur du talweg principal, en [Km] ;

h : différence d'altitude moyenne du bassin et celle de l'exutoire, en mètres.

Donc :

La détermination du temps de concentration nous permettra de mieux connaître la réponse hydrologique du bassin; le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la

surface mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief. D'après les résultats obtenus, le bassin d'Oued El Hai présente un temps de concentration d'ordre **8.62 heures**.

g) Vitesse d'écoulement de l'eau

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_e = \frac{L}{T_c}$$

Avec :

V_e : Vitesse d'écoulement de l'eau [m /s] ;

L : longueur de talwegs principale en [m] ;

T_c : temps de concentration en [s] ;

Donc :

La vitesse d'écoulement dans notre bassin est : $V_e = 2.57 \text{ m/s}$.

Nous récapitulons les caractéristiques morphométriques du bassin versant d'Oued El Hai dans le tableau suivant :

Tableau (I.15) : Principales caractéristiques morphométriques du B.V de Oued El Hai.

Caractéristiques morphométriques et hydrographiques	Résultats	Unité	Observation
Surface	1122	Km ²	-----
Périmètre	174	Km	-----
Longueur du bassin versant : "L _{BV}	61.60	Km	-----
Longueur du talweg principal : " L _{CP}	79.8	Km	-----
Longueur maximale L _{max}	98.06	Km	-----
Largeur du bassin versant	18.21	Km	-----
Indice de compacité de Gravelius	1.45	m	forme allongée
L'altitude maximale	2094	m	-----
L'altitude minimale	350	m	-----
l'altitude à 95%	440	m	-----
l'altitude à 50%	1025	m	-----
l'altitude à 5%	1698	m	-----
L'altitude moyenne	1353	Km	-----
La dénivelée simple D	1258	Km	-----
Longueur du rectangle équivalent	70.90	Km	-----
Largeur du rectangle équivalent	15.82	Km	-----
Pente moyenne	149.21	m/Km	-----
Indice de pente de Roche	38,91	%	-----
Dénivelée spécifique D _s	594.23	m	Relief fort
pente moyenne d'un cours d'eau principal	0.07299	‰	-----
Densité de drainage D _g	0.511	Km ⁻¹	Moins dense
La densité hydrographique : F	0.10071	Km ⁻²	-----
rapport de confluence des cours d'eau	3.33		-----
rapport des longueurs des cours d'eau	2.21		-----
Le coefficient d'élanement : CE	0.50		Relief accentuée
Coefficient de torrencialité : Ct	0.039	Km ⁻¹	
Temps de concentration	8.62	heure	
Vitesse de l'écoulement de l'eau : V _e	2.57	m/s	

I.3-6 Barrage de Fontaine des Gazelles

Le site du barrage de fontaine d gazelles est se trouve ou voisinage de village fontaine des gazelles à 35 km environ au nord ouest de Biskra, sur l'Oued El Hai à 3 km au nord ouest du croisement des routes n°3 (Biskra-Batna) et n°35 (Biskra-Barika).

Coordonnées Lambert X=762.435

Y=206.745

Z=350

Le barrage en terre et constituée des matériaux hétérogène.

Cote de la crête du barrage est 388.00 m

Cote de la crête du déversoir 384 m

Capacité nominal 34 hm³

Construit en l'an 2000 sur oued El Hai, sur une superficie de 1720 km², avec une capacité brute d'environ 55,491 Hm³ et un volume régularisable de 14 Hm³. Sa construction rentre dans le cadre du développement agricole (irrigation) de la plaine d'El Outaya (A.N.A.T,2003). C'est un barrage à noyau central doté d'un évacuateur de crues en labyrinthe, destiné à l'irrigation du périmètre d'El-Outaya (actuellement 1100 ha).

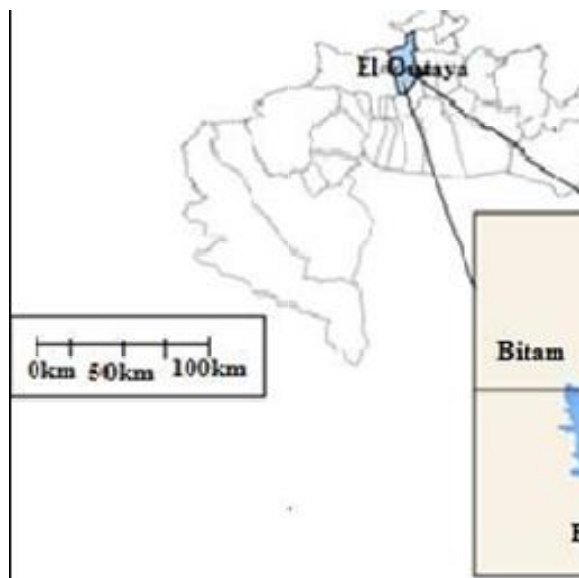


Figure I -20. Localisation de barrage de Fontaine des Gazelles (Athmani *et al.*, 2018)

I.3.7. Conclusion

La majorité des formations lithologiques du bassin ont de par leur structure physique, une perméabilité assez faible. Les réserves en eaux souterraines sont liées essentiellement aux nappes superficielles des formations plioquaternaires, (les formations marneuses) et aux phénomènes karstiques des massifs calcaires.

D'une façon générale, il est possible d'en tirer que les formations imperméables occupent la grande partie du bassin, pour arriver finalement à dire que le phénomène d'érosion apparaît nettement ici sans doute.

Au total, les formations végétales assurent une protection médiocre au sol, les plus présentées dans le bassin de l'oued El Hai, dont les caractères dégradés ou discontinués sont les steppes d'alfas, qui n'offrent aucune protection au sol. Les formations végétales qui protègent le sol seulement une période de l'année, on les trouve plus pendant les mois des crues (septembre, octobre), donc si les eaux surviennent sous formes des averses brusques, elles ne peuvent être absorbées, ces averses se transforment en une érosion excessive.

La prédominance des surfaces dénudées (nues), qui représentent la part majoritaire dans le bassin, dont la proportion est d'environ 67% de la surface totale du bassin. Ainsi que les terrains favorisant le ruissellement des eaux de surface durant toute l'année sont des facteurs favorisant l'érosion.

Notre bassin de l'oued El Hai s'étale sur une superficie de 1122 km², avec un périmètre de 174 km, le B.V de Oued El Hai et de forme allongée exprimée par l'indice de compacité 1.45, la forme de B V aide à la réponse rapide de l'écoulement, l'altitude varie entre 350m et 2094m avec une altitude moyenne de 1353m. Le B.V du Oued El Hai est de relief fort et accentué exprimé par le dénivelé spécifique = 594.23m, La pente favorise le ruissellement et le déclenchement des phénomènes érosifs. Le réseau hydrographique est caractérisé par un cours d'eau principal de 79.8 km et l'ordre du bassin versant est de 5 avec un temps de concentration de 8.62 Heure, et une vitesse de ruissellement de 2.7 m/h.

I.4. Estimation des apports

I.4.1- Estimation des apports liquides

$A = Q \cdot N$. A : apport annuel (hm^3), Ql : débit liquide moyen annuel (m^3/s) et N : nombre de seconde dans l'année (31536000s).

D'où :

$$Le = (A / S) \cdot 10^3$$

Tableau (I.16) : Variation interannuelle des apports liquide, débit liquide et lame d'eau.

ANNEES	Al (Hm^3)	Ql (m^3/s)	Le (mm)
1968-1969	22,49	0,71	20,04
1969-1970	72,39	2,30	64,52
1970-1971	0,49	0,02	0,44
1971-1972	31,99	1,01	28,51
1972-1973	10,32	0,33	9,20
1973-1974	47,98	1,52	42,76
1974-1975	0,99	0,03	0,88
1975-1976	-----	-----	-----
1976-1977	0,04	0,00	0,04
1977-1978	3,07	0,10	2,74
1978-1979	11,21	0,36	9,99
1979-1980	4,97	0,16	4,43
1980-1981	0,25	0,01	0,22
1981-1982	82,62	2,62	73,64
1982-1983	1,56	0,05	1,39
1983-1984	3,32	0,11	2,96
1984-1985	10,11	0,32	9,01
1985-1986	12,7	0,40	11,32
1986-1987	8,29	0,26	7,39
1987-1988	10,23	0,32	9,12
1988-1989	3,08	0,10	2,75
1989-1990	3,29	0,10	2,93
1990-1991	-----	-----	-----
1991-1992	1,1	0,03	0,98
1992-1993	0,03	0,00	1
moyenne	13,60	0,43	12,12

D'après ce tableau on remarque que l'apport liquide se varie d'une année à l'autre avec un écart considérable dont en quelques années l'apport liquide est fort tels que l'an 1969-1970 et 1981-1982 en valant 72,39 et 82,62 respectivement. Par contre dans quelques années on a eu des apports si faibles tels que les années de 1974-1975, 1976-1977 et 1992-1993 en valant 0.99, 0.04 et 0.03

respectivement. Des lacunes sont enregistrées en 1975-1976 et 1990-1991.

Tableau (I.17) : Variation mensuelle des apports liquides, débits liquides et lame d'eau.

Mois	Ql mensuel (m ³ /s)	Al mensuel (hm ³)	Al saisonnier (hm ³)	A (%)	Le (mm)
Sep	0.87	2.74	5,49	64,87	2.45
Oct	0.40	1.26			1.12
Nov	0.47	1.48			1.32
Dec	0.24	0.76	2,52	4,67	0.67
Jan	0.19	0.60			0.35
Fev	0.37	1.17			1.04
Mar	0.53	1.67			1.49
Avr	0.46	1.45	3,78	16,92	1.29
Mai	0.21	0.66			0.59
Jui	0.23	0.73			0.65
Juil	0.20	0.63	1,80	13,54	0.56
Aou	0.14	0.44			0.39
	Total	13.60	13.60	100	12.11

Comme vous constatez, la majorité des apports liquides est enregistrée en saison d'automne plus de 64 % notamment le mois de septembre.

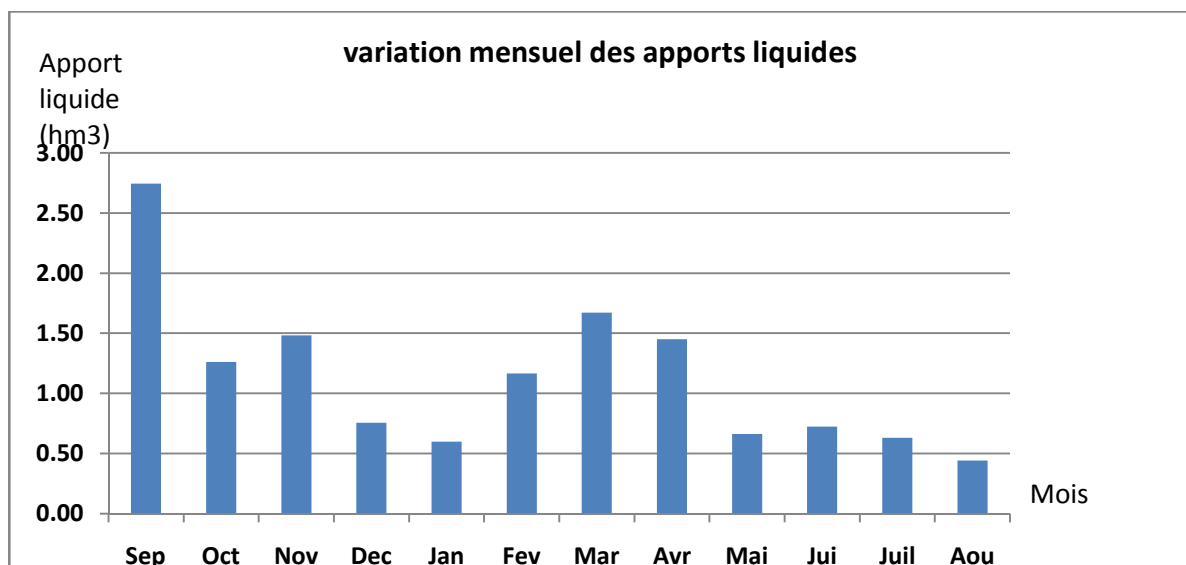


Figure (I -21) Variation mensuelle des apports liquides.

I.4.2- Estimation des apports liquides

I.4.2.1 Introduction

L'étude des transports solides du bassin versant de l'oued El Hai, se heurte à l'insuffisance données, aussi bien qualitatives que quantitatives. Dans ce bassin caractérisé par l'irrégularité de la pluviométrie, des averses torrentielles, par un couvert végétal souvent discontinu, l'érosion est très active, essentiellement sur les pentes fortes et les berges des oueds. Ainsi les transports en suspension traduisent l'importance des hautes eaux et les crues qui sonla conséquence d'un ruissellement intensif des précipitations torrentielles. En effet, l'oued Biskra et ses affluents transportent chaque année une importante quantité de matériaux de fond, qui est d'ailleurs inconnue. La taille des matériaux charriés peut atteindre jusqu'à une tonne, lors des crues qui menacent la région.

I.4.2.2 Etude du transport solide en suspension dans le B.V d'Oued el Hai.

I.4.2.3 présentation des données

Les apports annuels en transports solides en suspension de l'oued El Hai et ses affluents à la stations hydrométrique El Kantara.

La station d'El Kantara située en amont du barrage. Nous possédons des données de mesure des concentrations des matières en suspension. Ces données nous ont été fournies par les services hydrologiques de l'ANRH et concernent les périodes suivantes (tableau) :

Tableau (I.18) : : Caractéristique des stations hydrométriques et périodes de mesure.

Bassin	Stations	code	X	Y	Z	Période
Oued El Hai	El Kantara	061201	774,7	217,4	513	1968-1993

L'étude est basée sur les valeurs instantanées des débits liquides (Ql), donnés en m³/s, mesurés à station. A chaque mesure effectuée, a été évaluée la charge de la matière en suspension obtenue à partir d'échantillons d'eau prélevés sur les rives de l'oued au moyen d'un conteneur de 50cl. La boue recueillie sur un papier filtre est pesée après séchage à l'étuve à 105°C pendant 30 minutes. On détermine ensuite la charge correspondante à un litre d'eau prélevé, ce qui établit la concentration, donnée en g/l. La fréquence des prélèvements effectués dépendait de la variation de la hauteur d'eau. En période de crue, à chaque variation de 10 cm de hauteur d'eau, on prélevait un échantillon. En période normale on prélevait une fois tous les deux jours.

Le calcul du débit solide en suspension est basé sur la mesure du débit liquide de l'écoulement puisque :

$$Q_{SS} = C \cdot Q_L$$

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

Q_L : Débit liquide (m³/s)

C : Concentration ou turbidité (g/l)

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

I.4.2.4 Calcul des apports

Les apports solides en tonnes ou en millions de tonnes, A_s (106t ou MT) et les apports spécifiques en tonnes par kilomètre carré par an, A_{ss} (t/km²/an) sont données par :

$$A_s = Q_s \cdot N \cdot 10^{-3}$$

$$A_{ss} = (A_s \cdot 10^6) / S$$

Avec :

A_s : apport solide annuel, mensuel ou saisonnier (MT)

Q_s : débit solide annuel, mensuel ou saisonnier (Kg/s)

N : temps en secondes. (s)

A_{ss} : apport solide spécifique (t/km²/an)

S : superficie du bassin versant (km²)

a) Les apports annuels

Le flux annuel des matières solides en suspension exporté par les différents oueds étudiés est calculé par la formule :

$$A_s = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j C_j$$

Où,

C_j : est la concentration mesurée à l'instant t_j

Q_j : correspondant au débit liquide à l'instant t_j ,

N : est le nombre de prélèvement effectués sur l'année considérée,

$t_{j+1} - t_j$: est le pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs.

Au moment des crues les prélèvements sont intensifiées, et donc par suite, le pas de temps est réduit.

De même, Al, l'apport liquide annuel engendrant le flux des apports solides As, est calculé par la formule

$$Al = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j .$$

Le (tableau I.19.) présente les apports liquides (Al), solides (As) et les dégradations (Ass) spécifiques au niveau de station aux différentes périodes de mesure.

L'analyse de ces données, permet de déduire que :

Tableau (I.19) : Les apports liquides (Al), solides (As) et les dégradations (Ass)

ANNEES	Al (Hm3)	Le (mm)	As (10 ³ T)	Ass (T/km ²)
1968-1969	22,49	20,04	3175,821	2831
1969-1970	72,39	64,52	694,982	619
1970-1971	0,49	0,44	44,76	40
1971-1972	31,99	28,51	233,488	208
1972-1973	10,32	9,20	1618,702	1443
1973-1974	47,98	42,76	2711,004	2416
1974-1975	0,99	0,88	139,54	124
1975-1976	-----	-----	----	----
1976-1977	0,04	0,04	13,711	12
1977-1978	3,07	2,74	972,282	867
1978-1979	11,21	9,99	1872,9	1669
1979-1980	4,97	4,43	1295,31	1154
1980-1981	0,25	0,22	73,103	65
1981-1982	82,62	73,64	9814,78	8748
1982-1983	1,56	1,39	944,93	842
1983-1984	3,32	2,96	978,08	872
1984-1985	10,11	9,01	1670,47	1489
1985-1986	12,70	11,32	2717,2	2422
1986-1987	8,29	7,39	1264,47	1127
1987-1988	10,23	9,12	1745,33	1556
1988-1989	3,08	2,75	668,274	596
1989-1990	3,29	2,93	364,005	324
1990-1991	----	-----	----	----
1991-1992	1,10	0,98	157,71	141
1992-1993	0,03	1	0,7089	1
moyenne	13,60	12,12	1362,68	1285

D'après ce tableau on remarque que l'apport solide se varie d'une année à l'autre avec un écart considérable dont en quelques années l'apport solide est fort tels que l'an 1968-1969 et 1972-

1973 et 1973-1974, 1981-1982 en valant 3175.821, 1618.702, 2711.004, 9814.78 respectivement. Par contre dans quelques années on a eu des apports si faibles tels que les années de, 1976-1977 et 1992-1993 en valant 13.711 et 0.70 respectivement. Des lacunes sont enregistrées en 1975-1976 et 1990-1991.

L'oued El Hai a évacué des énormes volumes de matériaux solides en suspension. Lors de l'année 1986 qui est caractérisée par un transport solide 27172 tonnes, soit 16369 t/km²/an, en 1979 l'oued El Hai a évacué un volume moyen égal à 1362.68(10³tonnes).

Conclusion

Le bassin versant Oued El Hai est caractérisé par un climat semi-aride à aride vers l'exutoire dont les caractéristiques se manifestent par un hiver froid à frais et un été très chaud et sec.

le bassin versant de l'oued Biskra est situé entre deux zones climatique :

L'une situe au Nord avec ses faibles températures et ses fortes précipitations et l'autre situe au Sud, avec ses fortes températures et ses faibles précipitations.

L'irrégularité et la diminution des précipitations s'affirment en allant de plus en plus vers le Sud. L'apport liquide est irrégulier dont il se varie d'un mois à l'autre tel que le mois de septembre qui caractérise par son apport le plus fort dont il provient des crues brusques ce qui va provoquer un transport solide important.

Chapitre II
La modélisation de la gestion des ressources en
eau

Introduction

La modélisation dans la gestion des ressources en eau s'intéresse à la représentation des variations spatiales et temporelles des flux d'eaux à l'échelle du bassin versant à l'aide de bilans de masse, de quantité de mouvements et d'énergie thermique (Villeneuve J. Petal.,1998). C'est une discipline récente par rapport aux autres disciplines et sciences, cette discipline est émergée face à la complexité du système Eau dans sa gestion primitive, même à l'échelle d'une unité hydrologique réduite (Laurent F., 1996). En plus, la ressource en eau est limitée et distribuée inégalement dans l'espace et dans le temps et qu'elle interagit avec tout son environnement (Hamla tA.E.K.,2014). Il faut ajouter à cela, le problème de la demande de la ressource en eau qui est accroit sans cesse, et la vulnérabilité de cette ressource vis-à-vis la pollution et le gaspillage.

La modélisation ou bien les outils numériques d'aide à la décision ce sont les outils et méthodes grâce auxquels les décideurs sont en mesure de choisir, de manière rationnelle et avisée, entre différentes actions envisageables. Ces choix doivent être fondés sur des politiques reconnues, sur les ressources disponibles, l'impact sur l'environnement et les conséquences sociales et économiques (TAC, 2012).

II.1.Les outils numériques d'aide à la prise de décision

Les outils numériques d'aide à la prise de décisions sont très variés et peuvent être utilisés seuls ou en combinaison, ils sont très conviviales d'utilisation tout en étant très performants et probants (Little J.D.C, 1970). Il y a d'un côté les modèles mathématiques, les systèmes d'information géographique (SIG) et les systèmes experts (SE) qui peuvent être utilisés pour traiter l'information et simuler des scénarios particuliers. De l'autre côté, on retrouve les systèmes d'aide à la décision (SAD) (de l'anglais Décision Support Systems) qui peuvent intégrer un ou plusieurs de ces outils numériques. Ces derniers sont plus spécifiquement orientés que les premiers pour aider le décideur dans la gestion des ressources en eau (Dupont J et al., 2016).

II.1.1. Modèles mathématiques

Les modèles mathématiques en sciences environnementales existent depuis plusieurs décennies et peuvent être utilisés pour simuler divers phénomènes et scénarios liés à l'hydrologie, la qualité des eaux, l'impact des pratiques agricoles, les fonctions de coûts, les risques pour la santé humaine, etc. Ils viennent sous différentes formes allant du modèle très simple au modèle très complexe et du modèle empirique au modèle mécaniste. Les modèles peuvent être utilisés pour

simuler des phénomènes observés, pour prévoir ou prédire un état futur ou simuler des scénarios de planification ou d'intervention. Ces outils numériques sont souvent bien adaptés pour la gestion opérationnelle des interventions, la compréhension des processus à l'œuvre et prévoir divers impacts environnementaux et socio-économiques (Dupont J et al., 2016).

II.1.2. Systèmes d'informations géographiques (SIG)

Les SIG permettent d'intégrer la variabilité spatiale des données en gérant à la fois leur nature thématique et géo-référencée. Plus que de simples outils de stockage et d'affichage, ils offrent des possibilités d'analyse spatiale importante et permettent ainsi d'extraire les relations spatiales qui lient les phénomènes à l'échelle d'une unité hydrologique (Laurent F, 1996).

SIG présente un outil d'aide à la décision qui permet de connaître à chaque site géographique la valeur du bilan global ressources hydriques pour chaque année. Les résultats fournis peuvent contribuer à l'actualisation et à l'extension des zones qui possèdent des potentialités en eau et d'identifier les zones qui présentent un risque de déficit hydrique dans le futur. En plus, il permet avoir la possibilité d'optimiser des dimensions des zones de protection de ces ressources (Aharik et El Garouani A, 2016).

Dans la matière de la gestion des ressources, les Systèmes d'Information Géographiques se présentent comme des technologies efficaces. Ayant un large domaine d'application, ils ont montré une grande efficacité dans la matière de la gestion des ressources grâce à leur performance dans le géo-référencement. Ils offrent des outils appropriés pour la combinaison de données spatiales ainsi que des modèles sur un même support graphiques. Ceci permettra une communication des informations entre les intervenants afin d'assurer une bonne coordination des activités (Trabelsi N et al, 2006).

L'aménagement et la gestion intégrée d'un bassin versant ou d'une nappe souterraine ne peuvent plus être envisagés sans un SIG. Non seulement la connaissance des phénomènes et des enjeux le nécessite, mais de plus la pérennité des données (qui représentent un coût et des efforts importants pour les collecter) ne peut être assurée que par cette structure de gestion de données. Une analyse prospective et tendancielle des grands systèmes aquifères notamment, avec des temps de renouvellement de plusieurs années, imposeront de plus en plus cette notion de pérennité des données et de mises-à-jour (Laurent F, 1996).

Mais le SIG ne constitue pas une solution unique, il bute sur la simulation temporelle lorsque le nombre d'incrémentations est élevé. D'autres outils ont pour but de représenter la variabilité temporelle et parfois spatiale des phénomènes hydrologiques et doivent être utilisés dans le cadre

d'une gestion intégrée des ressources en eau : les modèles hydrologiques (Laurent F, 1996).

II.1.3. Systèmes experts (SE)

Dans la gestion des eaux pour la prise de décisions, on utilise les SE qui sont un domaine de l'intelligence artificielle. Les SE utilisent des règles du pouce et d'autres connaissances pour aider à faire des inférences sur la manière de traiter le problème de la gestion des eaux à l'étude. Les systèmes experts diffèrent considérablement des programmes informatiques classiques en ce que les buts qu'ils poursuivent n'ont aucune solution mathématique et leurs inférences doivent être basées sur des renseignements incomplets ou incertains. Ils traitent des problèmes pour lesquels on devait habituellement recourir à des spécialistes humains pour trouver une solution c'est pour cela on les appelle systèmes experts. Leur succès réside dans leur capacité à analyser de grandes quantités d'information conformément à des règles préétablies qui ressemblent au raisonnement d'un spécialiste humain ou d'un groupe d'experts (Saoudi A, 2016).

II.1.4. Systèmes d'aide à la prise de décision (SAD)

Les systèmes d'aide à la décision (SAD) constituent une évolution récente des outils numériques. Ces SAD peuvent combiner plusieurs et parfois toutes les catégories d'outils numériques présentés précédemment (Dupont J.etal.,2016), Les systèmes l'aide à la décision sont le domaine du développement des approches pour mettre en application la technologie des systèmes d'information a fin d'accroître l'efficacité des preneurs de décision dans des situations où l'ordinateur peut soutenir et rehausser le jugement humain dans la réalisation de taches qui comportent des éléments ne pouvant être spécifiés à l'avance (Noyer M-L, 2000). En outre de l'analyse spatiale assurée par les SIG, les environnements du SAD offre la possibilité de visualisation des scénarios, ils sont adaptés aux thématiques du concept de la gestion intégrée ainsi que la simulation de l'ensemble des processus physiques, chimiques et parfois socioéconomiques de la zone d'étude. Dans la plupart des cas, ces systèmes intègrent des fonctions d'un SGBD (système de gestion de base de données) (Benseddik, Bet El Mansouri, B,2012). Ils peuvent être très complexes au plan de l'utilisation, mais s'avèrent néanmoins très utiles au décideur. Les SAD sont très bien adaptés aux thématiques faisant intervenir le concept de gestion intégrée par bassin où des facteurs environnement aux et humains très variés peuvent avoir de multiples incidences sur la ressource en eau. Il existe encore peu de ce genre d'outils numériques, mais leur développement est en pleine effervescence (Dupont J. et al., 2016).

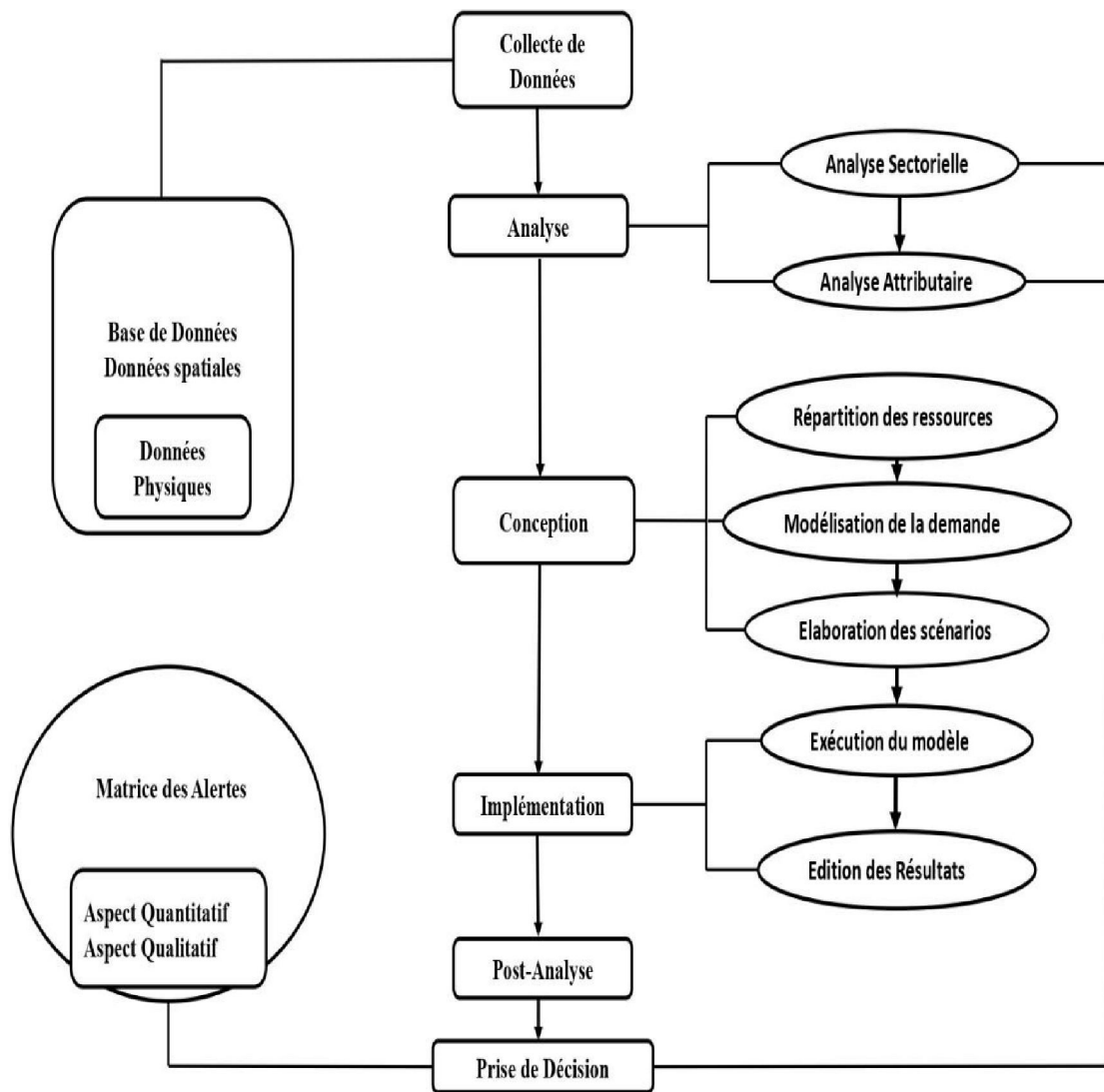


Figure II.1: Etapes de l'établissement d'un Sad (Benseddik, BEl Mansouri, B, 2012).

II.2.Exemples des différents modèles hydrologiques et de la gestion des ressources en eau

II.2.1 Le modèle SWAT

II.2.1.1.Présentation du modèle

Développé par Jeff Arnold pour l'USDA Agriculture Research Service en 1999, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle distribué, disponible en accès libre sur internet (MoreauE,2008), permettant de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques en vue de prédire les effets de la gestion des terres sur la ressource hydrique. Il permet de simuler les transferts de nutriments, de sédiments et pesticides vers le réseau de drainage et vers les aquifères. SWAT simule également les rendements des cultures en présence, en fonction des conditions environnementales et des techniques de culture (BEIERE, 2012).

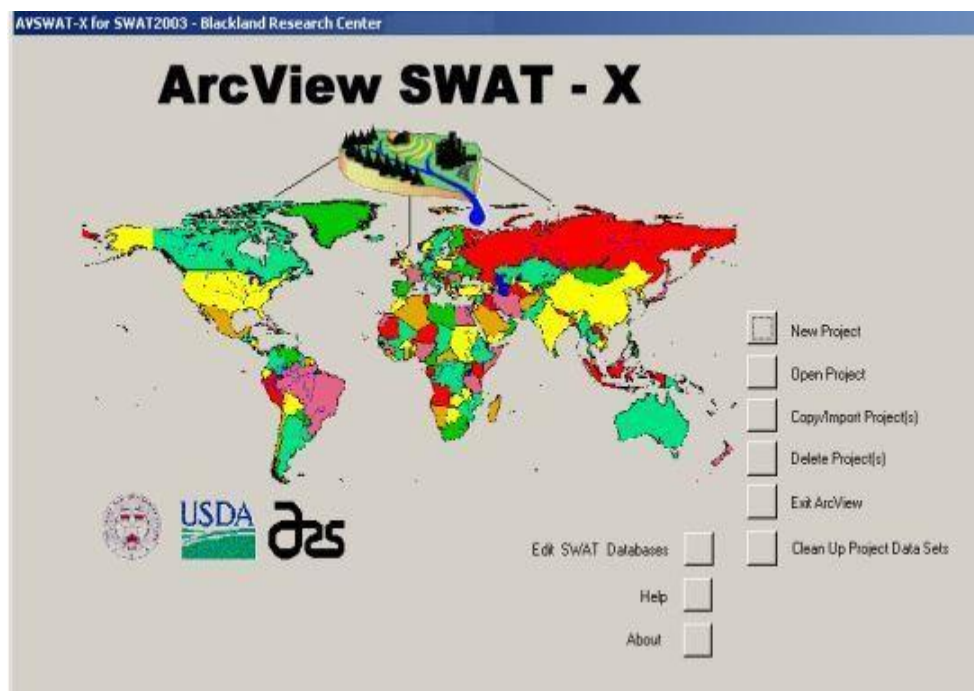


Figure II.2: Aperçus du modèle Arcview Swat (ArnoldJ EtAl,2005).

Il permet de modéliser les flux d'eau et de solutés à l'échelle du bassin versant. Il a été conçu pour de grands bassins versants allant de quelques centaines de km² à plusieurs milliers de km². Il est largement utilisé aux Etats-Unis et dans certains pays européens. Le couplage avec le SIG permet de gérer des données de type raster, vecteur et alphanumériques. Il facilite e automatise la préparation des données d'entrées, il rend plus convivial la phase d'intégration, de

manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation. Plus d'une centaine de fichiers sont requis pour le bon fonctionnement du modèle : modèle numérique de terrain, pédologie, réseau hydrographique, données climatiques de températures et précipitations, occupation du sol, pratiques agricoles, etc.... La partie paramétrage du bassin versant est assez longue, au vu du nombre conséquent de données d'entrées nécessaires. La visualisation des résultats se fait sous forme graphique à partir de bases de données (Moreau E, 2008).

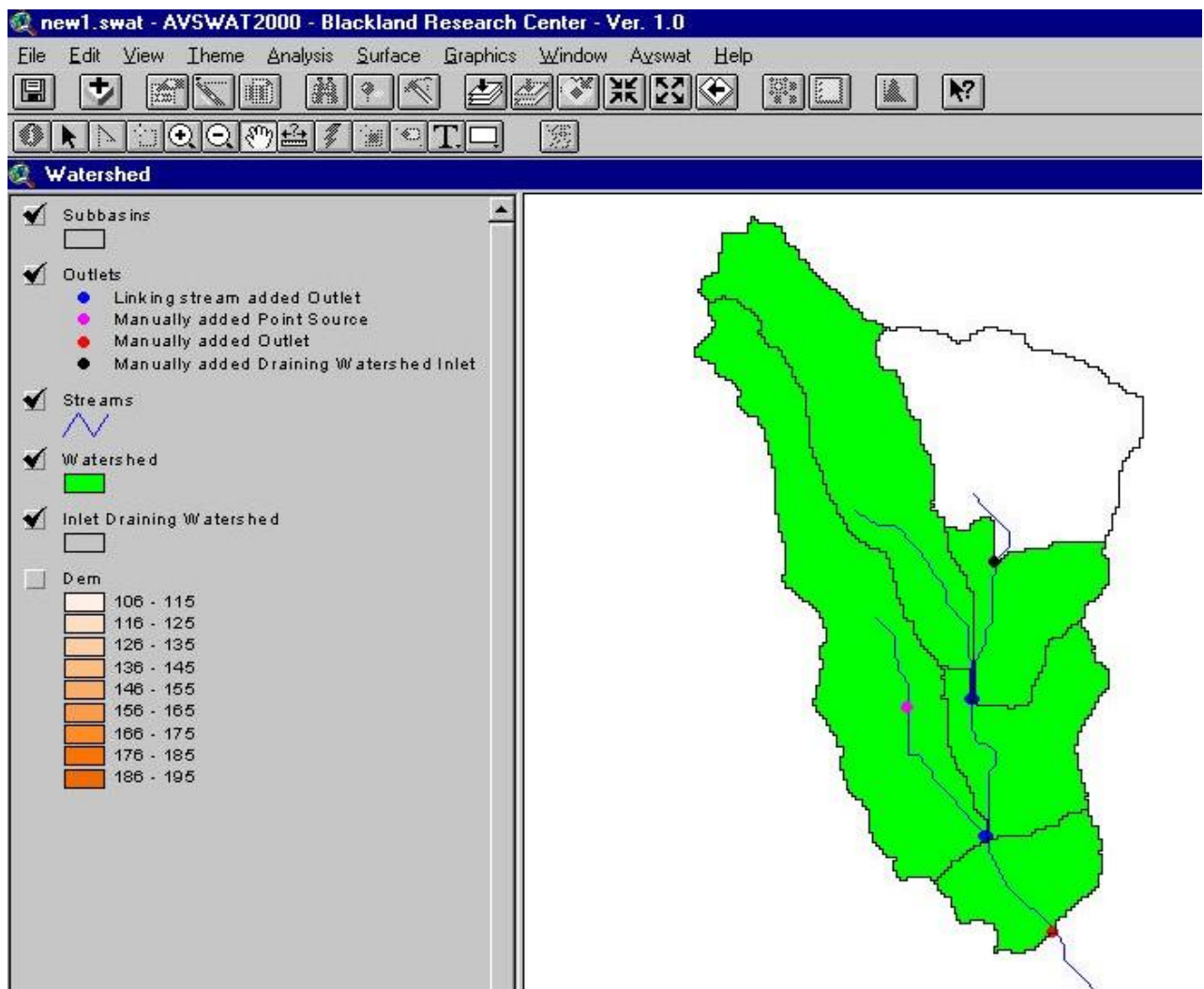


Figure II.3: Représentation simplifiée du modèle Swat. Les flèches indiquent les mouvements d'eau. Les caractères en italique sont quelques paramètres du modèle (Beaufils M, 2012).

II.2.1.2. Application du modèle

Le modèle est surtout utilisé en Amérique du Nord et en Europe dans la production de flux diffus de sédiments, de nutriments et de pesticides. Il est utilisé en France, par exemple, par le CEMAGREF (L'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) pour évaluer les risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole dans deux bassins versants des pays

de la Loire. A Toulouse, ECOLAB (laboratoire écologie fonctionnelle et environnement) s'en sert dans une partie de ses thèmes de recherche (BEIERE, 2012).

II.2.2 Mike Basin

II.2.2.1.Description

Développé par l'Institut d'Hydraulique Danois (Danish Hydraulic Institute : DHI), se positionne comme un outil qui vise à étudier la répartition de l'eau dans un bassin versant. Il peut étudier également la qualité de l'eau et permet de modéliser les aquifères. Ce logiciel est riche de modèles hydrologiques pour l'estimation des ruissellements dues aux précipitations. Parmi les limitations de « MIKE BASIN » c'est qu'il ne considère pas les aspects socio-économiques de la GRE (Gestion des ressources en eau) (Mike Basin, 2003).

II.2.2.2.Applications de ce logiciel :

Le Mike Basin est utilisable pour plusieurs applications, tel que (Hamlat A.E.K.,2014):

- Analyse du fonctionnement hydraulique global
- Analyse du fonctionnement hydrologique global
- Analyse de demandes multisectorielles
- Optimisation de la gestion de la ressource en eau
- Gestion de manœuvres journalières (barrages...)
- Gestion des étiages (périodes de basses eaux)
- Etude de qualité des eaux
- Management environnemental
- Planification des actions sur un bassin versant
- Elaboration de supports de communication

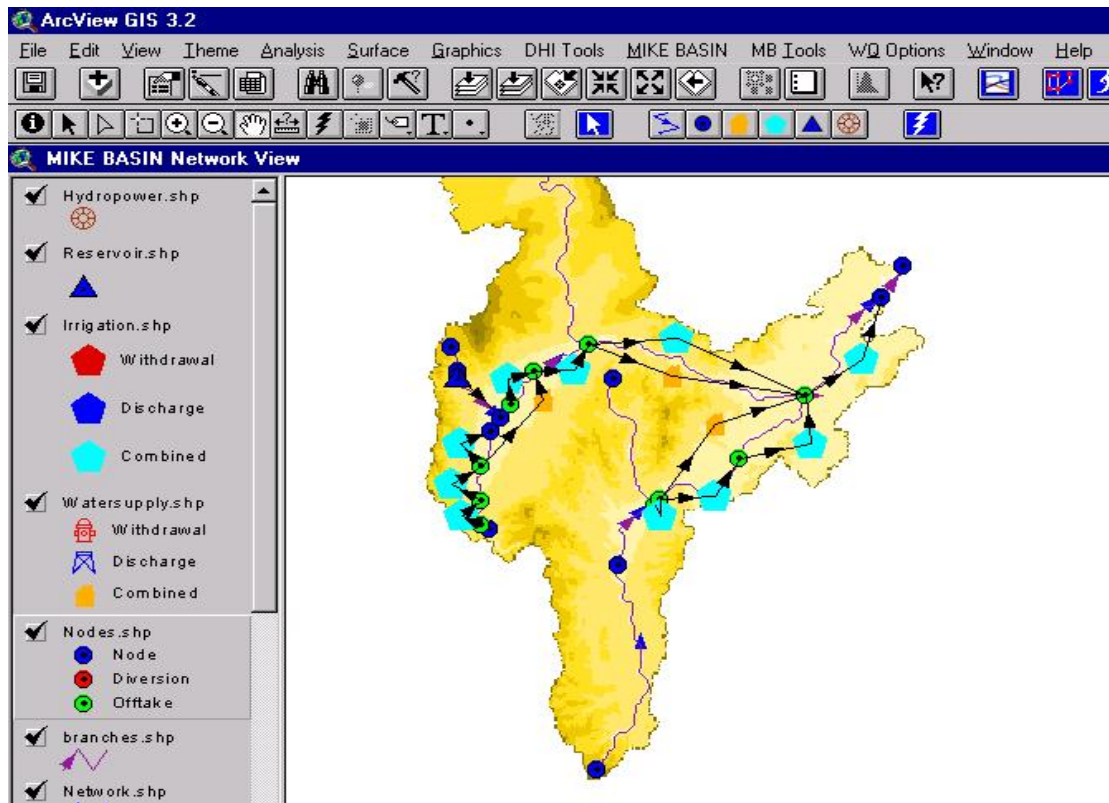


Figure II.4:Interface Mike basin -Exemple de vue schematique (MikeBasin, 2003).

II.2.2.3. Avantages de Mike Basin

Ce logiciel présente les avantages suivants (<http://www.mikepoweredbydhi.com>):

- Le logiciel Mike Basin fournit un cadre de modélisation facile à utiliser et basé sur des cartes pour la gestion et la planification des ressources en eau dans les bassins hydrographiques.
- Il inclut toutes les fonctionnalités de modèle requises dans la plupart des projets pour une modélisation efficace et précise des ressources en eau.
- Mises en page de modèles de conception utilisant des fonctionnalités et des fonctionnalités SIG intégrées.
- Moteur de simulation rapide et flexible avec des options de script.
- Une capacité de simulation de bassin hydrographique mature et fiable obtenue à partir de plus de dix ans d'exemples d'applications de projets.
- Les résultats détaillés des caractéristiques du modèle fournissent un aperçu simple des résultats du scénario, tels que l'utilisation de l'eau, le déficit d'allocation de l'eau, l'énergie générée, les rejets de réservoirs, les pertes d'eau et le bilan massique.

II.2.3 MULINO

L'acronyme MULINO signifie «Système d'aide à la décision multisectoriel, intégré et opérationnel pour l'utilisation durable des ressources en eau à l'échelle du bassin». C'est l'objectif principal du "projet Mulino", financé dans le cadre du cinquième programme-cadre européen pour la recherche et le développement et la démonstration technologiques. Le projet a débuté en janvier 2001 et a une durée de trois ans. Jusqu'au 2003, le premier des trois projets intermédiaires prévus des versions de l'outil ont été présentées et la seconde est en cours de développement (Progea S, 2003), elle incorpore une interface avec les modèles hydrologiques complexes externes qui sont couplés de manière lâche avec le système DSS (DecisionSupport Systems) (Giupponi C et al, 2004).

Le consortium Mulino est composé de spécialistes de la modélisation hydrologique, du développement de logiciels, de l'économie, de la géographie, de la sociologie, de l'agronomie et des SIG issus de divers pays européens et coordonnés par la Fondazione ENI Enrico Mattei à Venise en Italie (Progea S, 2003).

Ce DSS intègre des techniques de modélisation sociale, économique et environnementale aux capacités SIG, une base de données géo-référencée et une approche multicritère des résultats de la simulation. De plus, la structure de base de l'outil est basée sur le pilote Cadre pression- état-impact- réponse proposé et utilisé par l'Agence Européenne pour l'Environnement (Progea S, 2003)

Le système a été conçu comme un outil opérationnel visant à accompagner et guider les décideurs tout au long du processus de décision, de la conception du problème au choix de la meilleure politique pour le résoudre. En tant qu'expression de cette philosophie, une série d'étapes de décision a été proposée dans le Mulino.

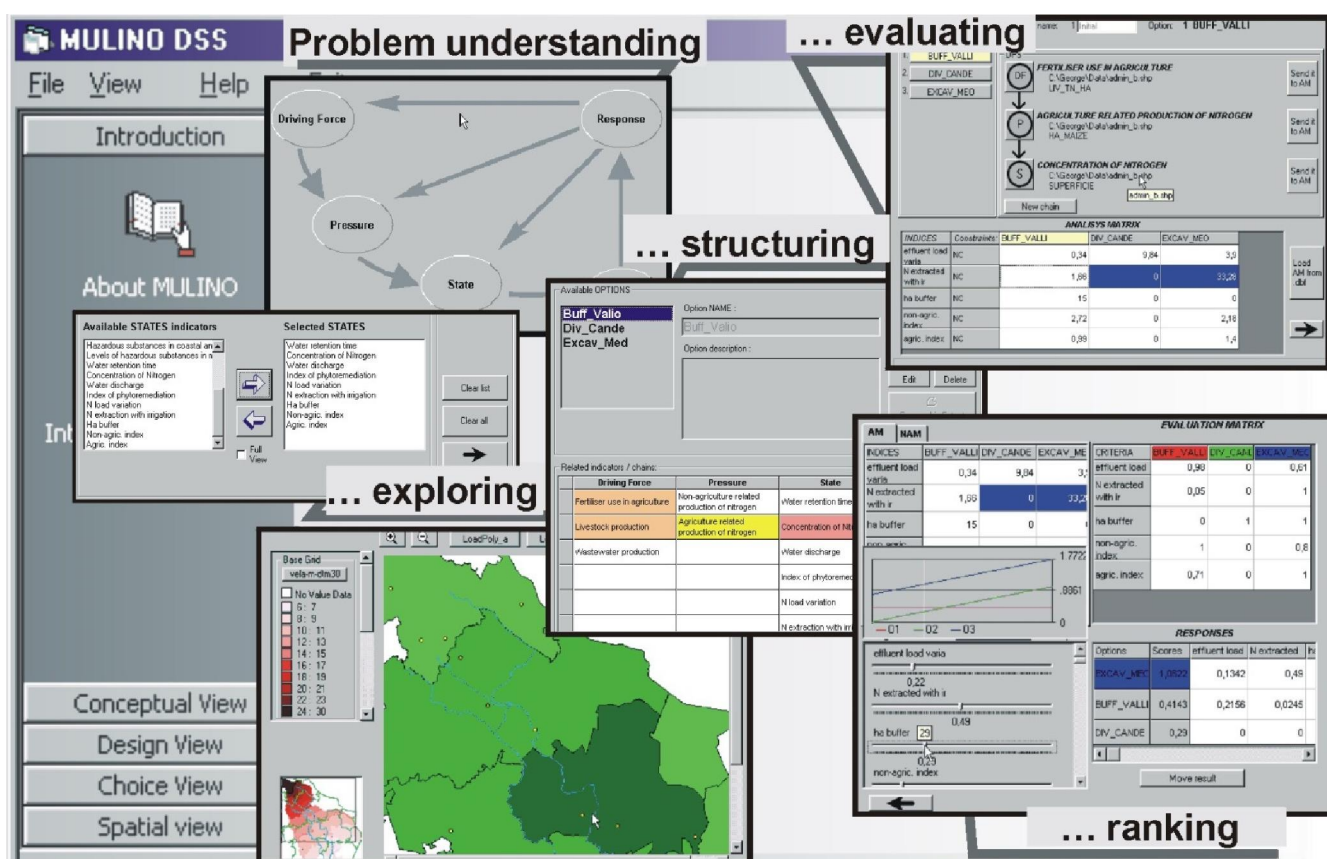


Figure II.5: Processus de prise de décision au sein du système Mulino-Dss (Mysiak J. Et Al, 2002).

Ce DSS, lui-même, est défini au niveau de l'interface utilisateur par les trois vues conceptuelle, conception et choix (Progea S., 2003) :

- Dans la vue conceptuelle, le décideur est directement impliqué; il lui est demandé de définir le problème des ressources en eau et de choisir les critères décisionnels qui seront utilisés pour mesurer et évaluer le statut du bassin hydrographique et l'efficacité des actions conceptualisées pour l'améliorer ;
- Dans la vue Conception, le rôle du technicien est prépondérant en ce qu'il doit mettre en œuvre le problème formulé par le décideur et trouver les solutions pratiques qui constitueront l'ensemble des options possibles à étudier.
- Dans la vue Choix, le décideur conjointement avec le technicien attribue des pondérations aux options afin de sélectionner celle préférée.

II.2.4 HyD2002

L'environnement de modélisation HyD2002 a été développé au sein de l'unité DIVHA (Dynamiques, impacts et valorisation des hydro-aménagements) afin de représenter différents types d'aménagements et de tester divers modes d'allocation (Pouget J-C. et al., 2003).

HyD2002 est un environnement de modélisation pour l'aide à la gestion des ressources en eau, de la planification à long terme des aménagements jusqu'à l'optimisation de la gestion opérationnelle de systèmes d'eau (HyD2002).

II.2.4.1 Caractéristiques techniques

Les caractéristiques techniques de ce modèle sont comme suit (HyD2002):

- Typage d'information, gestion de la précision, des unités, du temps
- Disponibilité multiplate formes: Windows, Linux, Unix...
- Prise en charge des principaux standards vectoriels du marché
- Technologies: UML (Unified Modeling Language), XML(eXtensible Meta Language), Java.

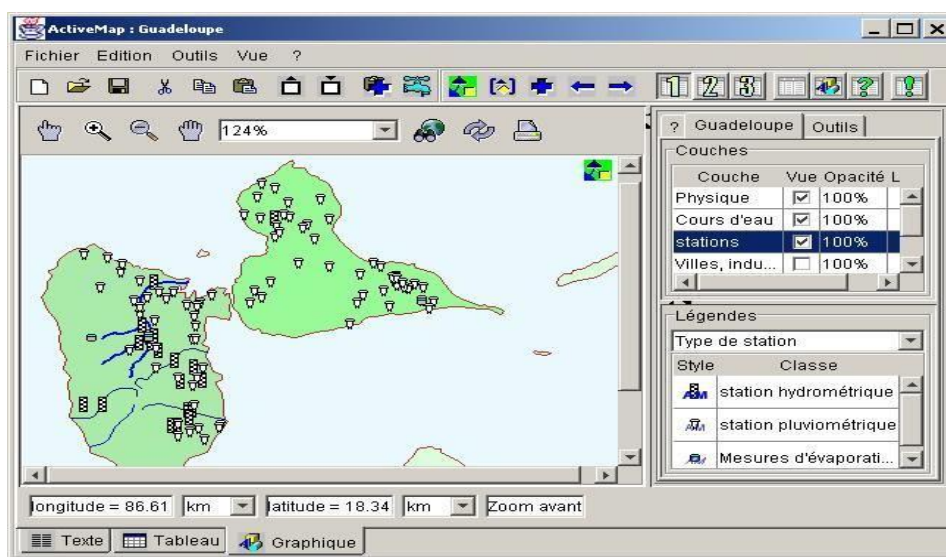


Figure II.6: Interface HyD2002- Exemple de vue schématique (Umr Gestion de l'eau).

Ce modèle fait appel à des degrés divers aux trois grandes fonctionnalités de l'environnement, présentées sur la figure II.7, ci-dessous (UMR Gestion de l'Eau) :

- la construction de systèmes d'eau ;
- la simulation et/ ou l'optimisation de la gestion opérationnelle;

- l'évaluation des performances.

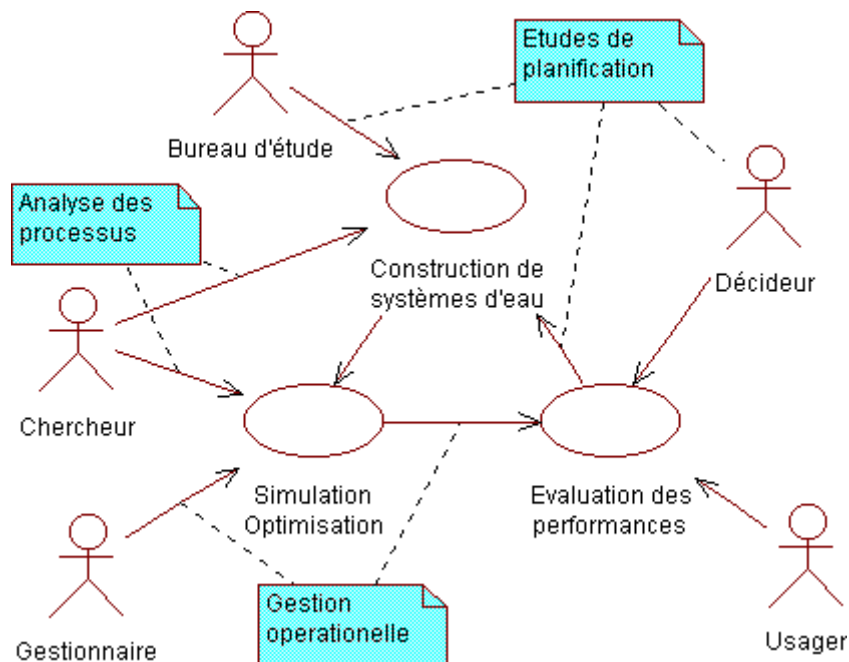


Figure II. 7 : Le Processus de gestion des ressources en eau par le Hyd2002 (Umr Gestion de l'eau).

II.2.5.STRATEAU

II.2.5.1.Description

STRATEAU est un outil d'aide à la décision réalisé par le bureau d'études des Energies de Demain suite à une commande en octobre 2009 de l'Ambassade de l'Eau, une association de type loi 1901 qui s'intéresse aux problématiques de gestion de l'eau dans les pays émergents du bassin méditerranéen.

Le projet était également soutenu par l'Office National de l'Eau et Milieux Aquatiques (ONEMA), les états français, italiens, libanais et marocains, ainsi que l'Union pour la Méditerranée, une organisation intergouvernementale visant à traiter diverses problématiques environnementales et socioéconomiques affectant le bassin méditerranéen.

L'outil est mis gratuitement à disposition des pays méditerranéens. Une première version a été publiée au printemps 2010. Il est présenté comme étant destiné aux décideurs intervenant à des échelles différentes: de la commune au pays. Toute fois il est précisé qu'il s'adresse plus particulièrement aux «spécialistes de l'eau» (Beaufils M, 2012).

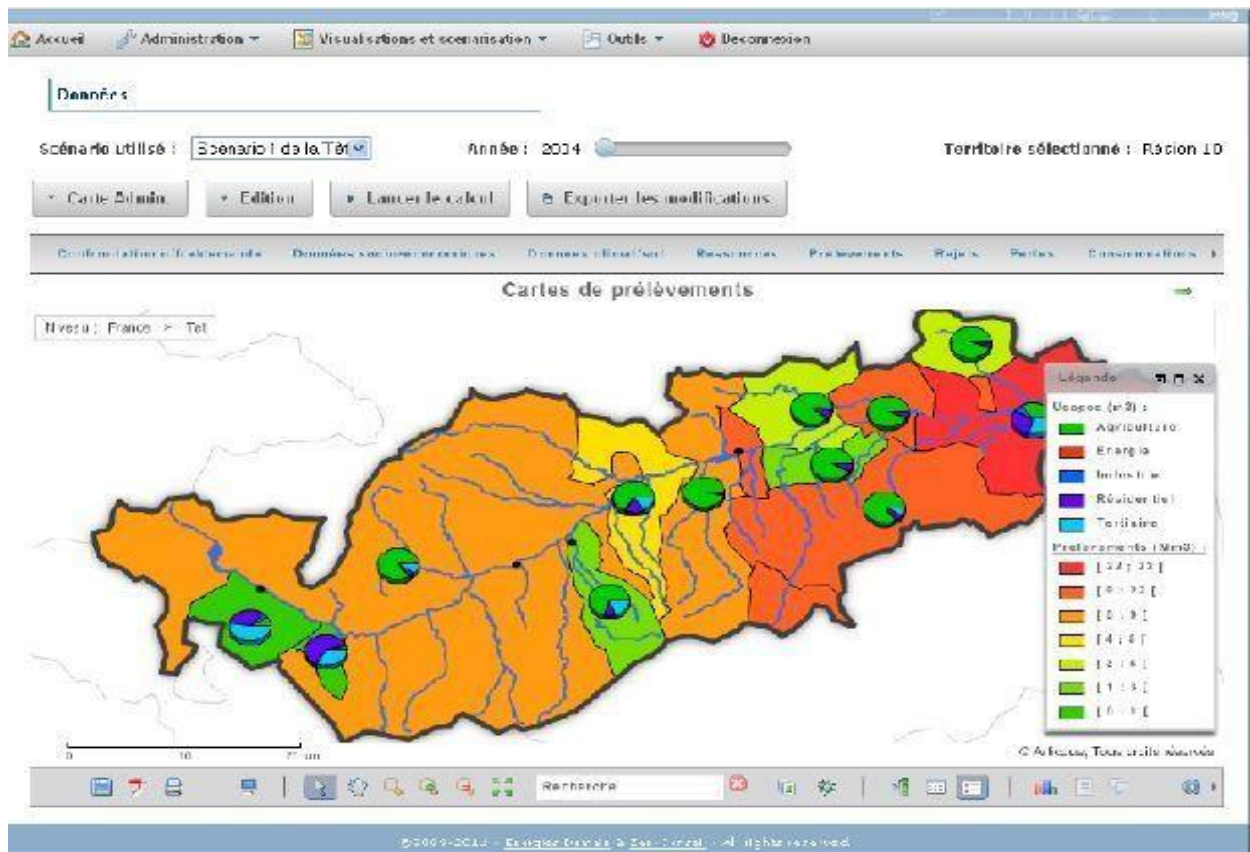


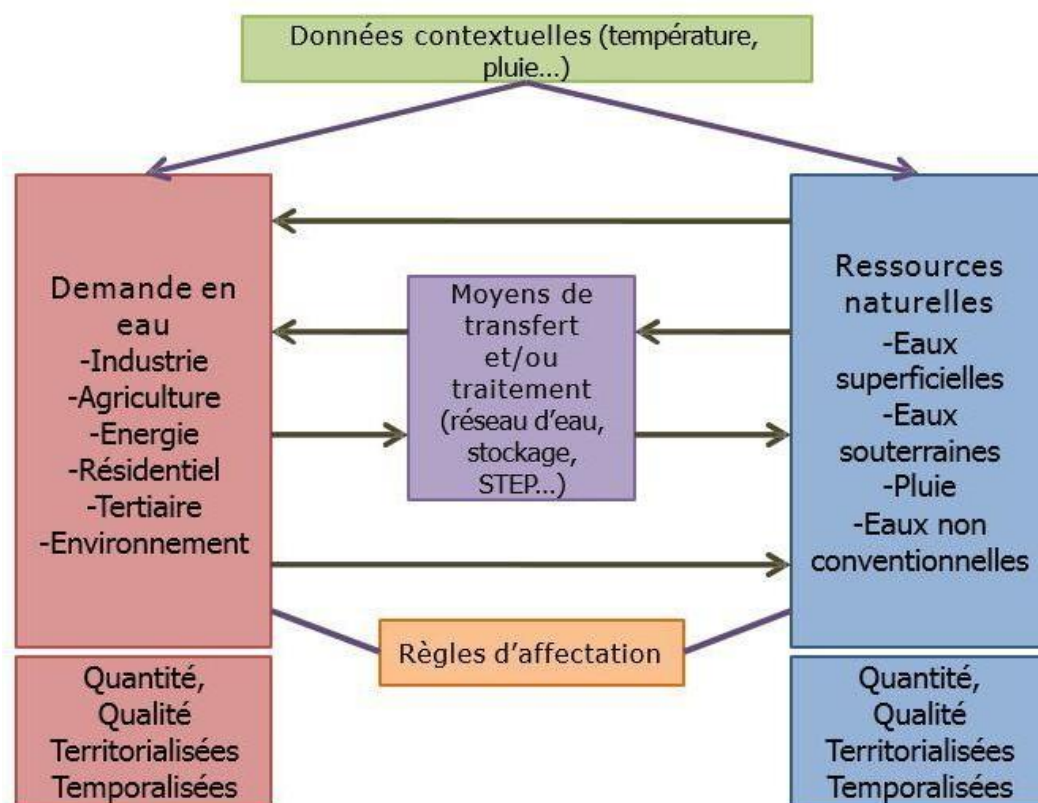
Figure II.8:Exemple de vue schématique de l’outil Strateau (Guide d’utilisation de Strateau).

STRATEAU se distingue des outils existants(HerrouinL,2011):

- Outil simple d’utilisation: accessible par un non technicien
- Agrégation et désagrégation à toutes les échelles territoriales: reconstitution de la demande en eau « Bottom-up », outil intégrateur d’informations
- Exploitation des données socio-économiques
- Rapidité d’implémentation
- Module de scénarisation conviviale accessible aux décideurs
- Basé sur des logiciels libres.

II.2.5.2.Principales fonctionnalités

- Réaliser un état des lieux des équilibres Offre/Demande en eau sur un territoire.
- Développer des politiques de l'eau partagées entre tous les acteurs et à diverses échelles territoriales.
- Un outil prospectif permettant l'amélioration de la gestion quantitative (HerrouinL, 2011).



FigureII.9: Schéma méthodologique global de Strateau (Guide d'utilisation de Strateau)

II.2.5.3.L'exception de STRATEAU

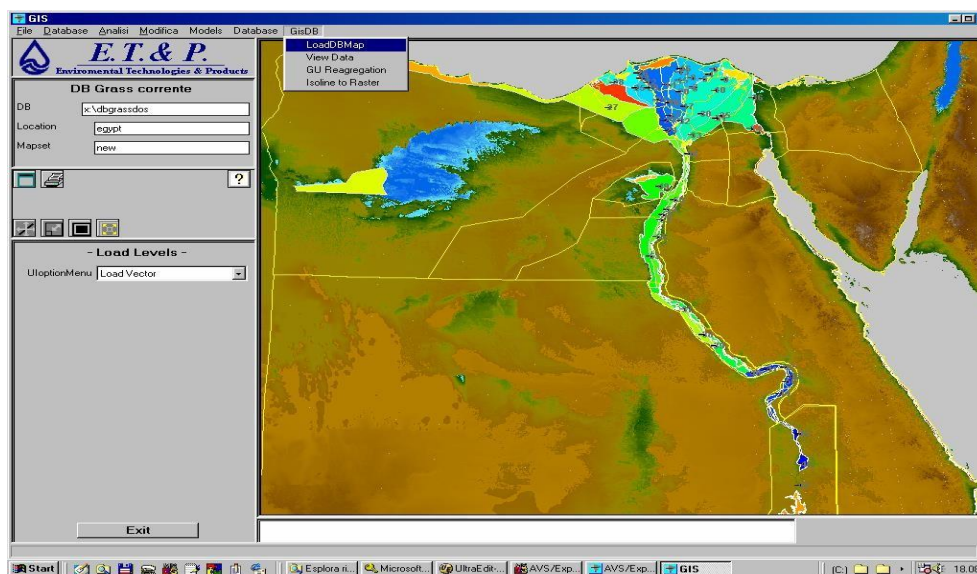
Le modèle d'aide à la décision STRATEAU ne se contente pas de donner une solution à un problème immédiat. Il est essentiellement malléable, capable de projeter ses réponses dans l'espace et dans le temps.

A un moment donné, par exemple, une décision sera prise de construire un équipement pour répondre aux besoins d'une petite ville en milieu rural. STRATEAU va non seulement définir les conditions d'une solution adaptée, les impacts sur les territoires voisins, mais en plus, il va en dessiner l'évolution: Quels seront les besoins en eau dans cinq, dix, quinze ans, compte tenu de l'essor démographique, de l'urbanisation, du réchauffement climatique, de l'augmentation du tourisme, etc...Tous les cas de figures ont envisagés, chacun alimente la stratégie présente: de sa pertinence dépendra le bien-être des générations futures (Ambassade de l'Eau).

II.2.6.DSS pour la planification des ressources en eau basée sur l'équilibre environnemental

II.2.6.1.Description

En début des années 2000, un projet «Système d'aide à la décision pour la planification des ressources en eau basé sur l'équilibre environnemental» financé par la coopération italienne, a vu le jour et vise à développer une approche méthodologique de la planification durable des ressources en eau. Le projet a débuté au début de 1998 avec une phase initiale d'un an, tandis que la mise en œuvre phase du projet a pris fin en août 2001 (Progea S, 2003).



FigureII.10:Exemple de vue schématique du Dss (ProgeaS, 2003).

Le projet constitue une amélioration notable par rapport au nombre très limité de systèmes de gestion des ressources en eau précédents.

Le projet est développé autour de cinq fonctions de base (ProgeaS,2003):

la description du système d'eau, y compris le circuit hydraulique et les caractéristiques environnementales à travers un certain nombre d'indicateurs.

l'évaluation de l'état du système en termes de sources, d'utilisation, de cycles de l'eau (chemins), de qualité de l'environnement (eau, sol, faune, flore,.... Différence entre les cycles d'eau naturels et artificiels,....)

la prévision de l'évolution du système hydrique et de l'environnement sur la base de scénarios supposés ou envisagés, alternatives techniques et politiques de gestion (actions décrites en termes de variables de décision) ;

l'évaluation des effets des actions, en observant les résultats sur la prévision système sur la base des différents scénarios, alternatives et politiques.

la prise en compte des contraintes légales locales, nationales ou internationales et directives à cartographier et liées aux domaines géographique et administratif limites.

II.2.6.2. Structure du modèle DSS

Le lien entre la fonction d'évaluation, de prévision et d'évaluation doit être réalisé grâce à l'intégration de plusieurs modules de traitement de données et de mathématiques. Par conséquent, une architecture ouverte et conviviale a été étudiée et adoptée pour intégrer des modèles mathématiques de différents niveaux d'agrégation et de complexité.

Les modèles sont activés par l'utilisateur via l'interface graphique, qui interagit avec l'unité de coordination logique et de planification (en anglais l'Unité de coordination logique et de planification LCSU). À l'aide d'un ensemble de préprocesseurs (filtres), la LCSU est en mesure de préparer les entrées des modèles en collectant les données de base de données, en prenant avantage du géo-référencement basé sur le SIG. La même architecture est utilisée à l'envers pour stocker et visualiser les résultats. Le stockage dans la base de données est effectué à l'aide de filtres de post-traitement, tandis que l'interface graphique aide l'utilisateur à sélectionner, visualiser et comparer les résultats. Enfin, la structure ouverte du système permet également l'utilisation de données externes et de résultats de modèles externes (Progea S, 2003).

II.2.7. Le système d'évaluation et de planification des ressources en eau (WEAP)

Durant les dernières décennies, une approche intégrée de développement de l'eau avec une vision globale tenant compte de la demande, de la qualité et de la préservation des écosystèmes est apparue. Sur la base de cette approche, un modèle baptisé WEAP (Water Evaluation and Planning System) intégrant ces valeurs dans une approche intégrée de gestion a été développé (Droogers P et al, 2011).

II.2.7.1. Description du logiciel

Le logiciel WEAP est basé sur une représentation du système hydraulique sous forme de réseau où les différents sites représentent des nœuds, ceux-ci étant reliés par des liaisons de transmissions ou des liaisons de retour (Bouklia- Hassane R, 2011). Le WEAP a été mis au point par le Stockholm Environment Institute (SEI) par les chercheurs: Jack Seiber, Modélisateur de systèmes hydriques; Chris Swartz, associé de recherche et Annette Huber - Lee, directrice du programme des ressources en eau du SEI (Rakotondrabe F, 2007). Ce modèle permet

l'évaluation de la planification et de la gestion questions liées au développement des ressources en eau pour microordinateurs. Il fournit une structure compréhensive, flexible et d'utilisation facile pour les analyses des politiques (Arranz R, 2006) et (Tutorial, 2008). Il se base sur une approche cohérente à l'échelle du bassin (Aichouri I, 2016). WEAP peut être appliqué à la fois aux systèmes municipaux et agricoles et peut traiter un large éventail de questions, notamment: analyses de la demande sectorielle, conservation de l'eau, droits sur les ressources en eau et priorités en matière d'allocation, simulation du débit, exploitation du réservoir, exigences de l'écosystème et coût du projet (Arranz R, 2006).

Un nombre croissant de professionnels de l'eau ont trouvé WEAP comme étant un ajout utile à leur boîte à outil de modèles, bases de données, feuilles de calculs et autres logiciels. Le WEAP est déjà utilisé dans divers pays, des quatre coins de la planète (Tutorial, 2008).

II.2.7.2 .Background

Plusieurs régions font face à des défis redoutables de gestion des eaux douces. L'allocation des ressources en eau limitées, la qualité de l'environnement et les politiques soutenues d'utilisation de l'eau sont des issues d'intérêts croissants. Les modèles de simulation conventionnels orientés à la distribution ne sont pas toujours adéquats. Durant la dernière décennie, une approche intégrée pour le développement de l'eau a émergé et qui a placé les projets de distribution d'eau dans le contexte des questions de la demande, la qualité de l'eau et la préservation des écosystèmes.

WEAP vise l'incorporation de ces valeurs dans un outil pratique pour la planification des ressources en eau. WEAP est distingué par son approche intégrée pour la simulation des systèmes d'eau et par l'orientation de sa politique. WEAP place le côté demande de l'équation – modulations de l'utilisation de l'eau, efficacités des équipements, réutilisation, prix et allocation – à pied égale avec le côté distribution – débit de rivière, eau souterraine, retenues et transferts d'eau. WEAP est un laboratoire pour examiner les alternatives de développement de l'eau et des stratégies de gestion

WEAP est complet, simple et facile à utiliser, et tente d'assister plutôt que de substituer les planificateurs habiles. Comme base de données, WEAP fournit un système de maintien de l'information de la demande et de la distribution. Comme outil de prévision, WEAP simule la demande en eau, l'offre, le débit, le stockage, la génération de pollution, le traitement et la distribution. Comme outil d'analyse des politiques, WEAP évalue une gamme complète d'options de développement et de gestion de l'eau, et considère multiples usages compétitifs des systèmes d'eau.

II.2.7.3. Développement de WEAP

L'Institut de l'Environnement de Stockholm (*Stockholm Environment Institute: SEI*) a fourni le support fondamental pour le développement de WEAP. Le "*Hydrologic Engineering Center of the US Army Corps of Engineers*" a financé des améliorations significatives. Des agences, incluant la Banque Mondiale, USAID et le «*Global Infrastructure Fund of Japan*» ont fournies des projets supports. WEAP a été appliqué pour l'évaluation de l'eau dans des douzaines de pays incluant les Etats Unis, Brazil, Mexique, Allemagne, Ghana, BurkinaFaso, Kenya, Afrique du Sud, Mozambique, Egypte, Oman, Central Asia, SriLanka, Inde, Népal, Chine, Koré du Sud et Thaïlande.

II.2.7.4. L'approche de WEAP

Opérant avec les principes de base de la balance d'eau, WEAP est applicable aux systèmes municipaux et agricoles, à des zones de planification uniques ou pour des systèmes complexes de rivières à limites étendues. De plus, WEAP peut traiter une large gamme de questions; analyses sectorielles de la demande, préservation de l'eau, droit à l'eau et priorités d'allocation, simulation des eaux souterraines et de surface, gestion des retenues, production d'énergie hydraulique, suivi des pollutions, exigences des écosystèmes, mesures de vulnérabilité et les analyses de bénéfice - coût des projets.

L'analyste représente le système en terme de ses diverses sources de fourniture d'eau (rivières, cours d'eau, eau souterraine, barrages et stations de dessalement); les retraits, les transferts et les possibilités de traitement des eaux usées; les exigences des écosystèmes; les demandes en eau et la génération de pollution. La structure des données et le niveau de détail peuvent être facilement personnalisés pour atteindre les exigences d'une analyse particulière et pour refléter les limites imposées par des données restreintes.

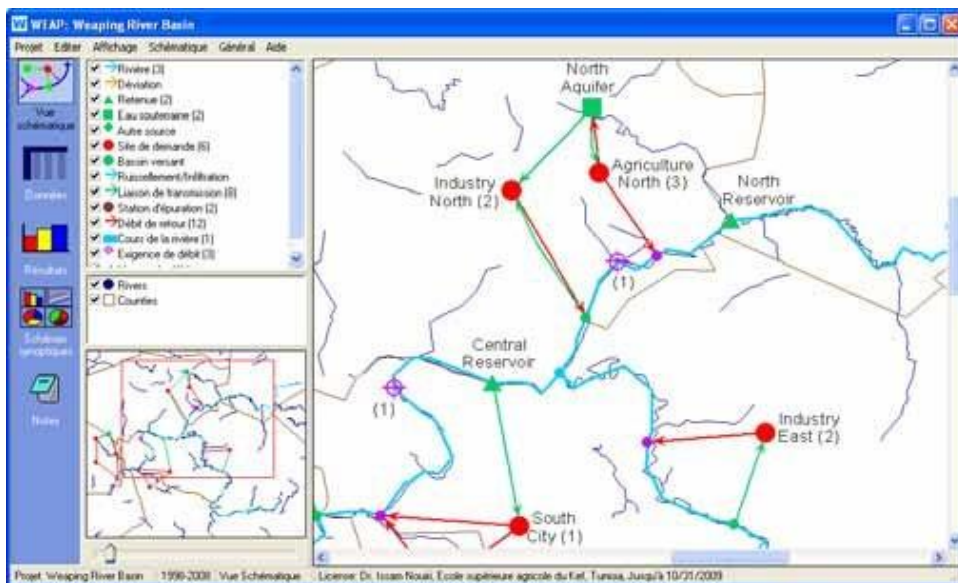
Les applications de WEAP incluent généralement plusieurs étapes. La *définition de l'étude* qui identifie la période de simulation, les limites spatiales, les composantes du système et la configuration du problème. L'*Etat actuel*, qui peut être considéré comme une étape de calage dans l'élaboration d'une application, fournit une vue instantanée de la demande en eau actuelle, de la charge de pollution, des ressources et des fournitures pour le système. Les hypothèses de base doivent être construites dans cet Etat Actuel pour représenter les politiques, les coûts et les facteurs qui affectent la demande, la pollution, la fourniture et l'hydrologie. Les *Scénarios* sont construits sur la base de l'Etat Actuel. Ils permettent d'explorer les impacts d'hypothèses alternatives ou des politiques sur la disponibilité et l'usage de l'eau dans le futur. Finalement les scénarios sont *Evalués* à l'égard de la suffisance de l'eau, des coûts et des bénéfices, de la compatibilité avec les objectifs environnementaux et à l'égard de la sensibilité à l'incertitude dans l'estimation des variables clefs.

II.2.7.5. Structure du programme

WEAP consiste en cinq vues principales: Schéma, Données, Résultats, Schémas Synoptiques et notes. Ces cinq vues sont présentées ci-après .

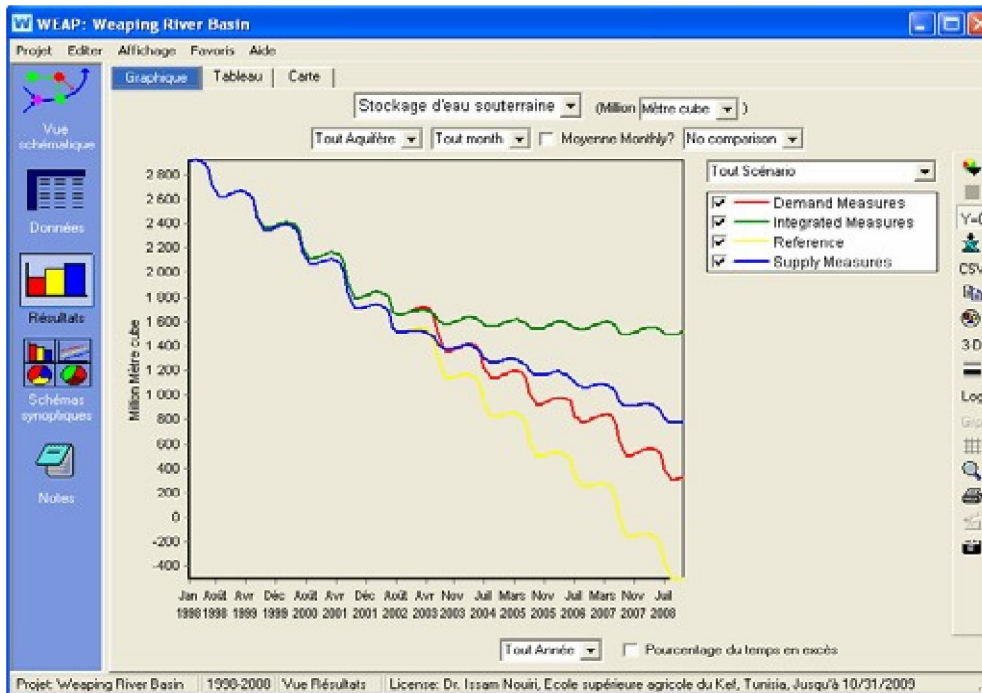
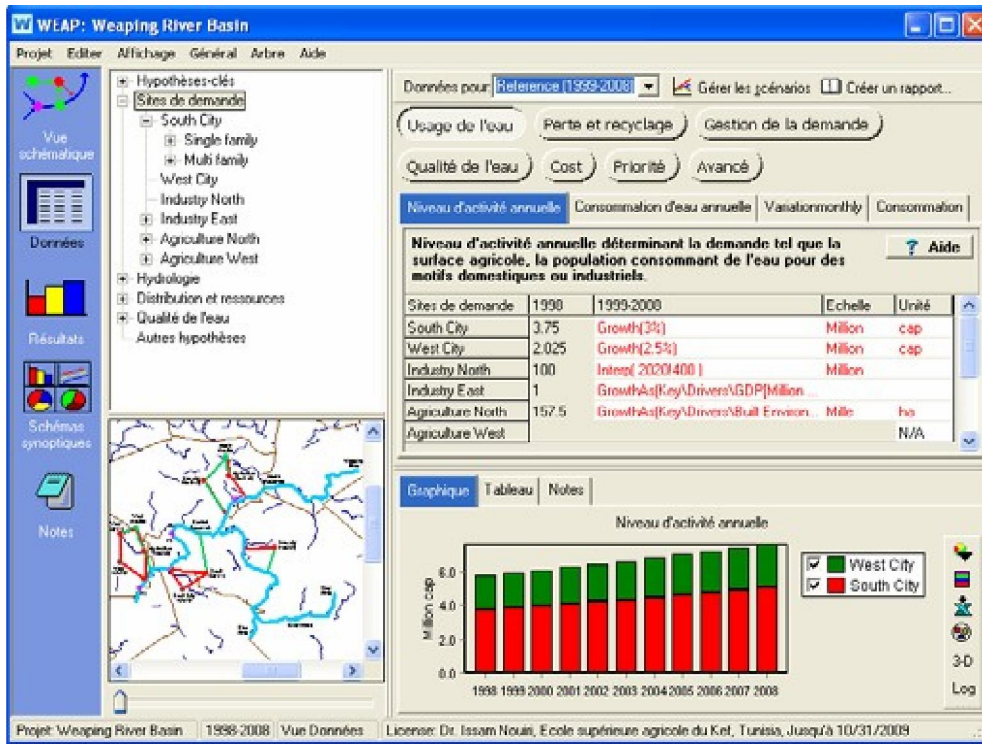
Schéma :

Cette vue contient des outils basés sur les systèmes d'information géographiques (SIG) pour une configuration facile de votre système. Les objets (tels que les nœuds de demande, les retenues) peuvent être créés et placés dans le système par des opérations de sélection, glisser et coller d'articles à partir d'un menu. Des fichiers image (raster) ou vecteur obtenus par ArcView ou d'autres outils SIG standard peuvent être ajoutés au schéma comme arrière plan. Vous pouvez accéder rapidement aux données et aux résultats de n'importe quel nœud en cliquant sur l'objet de votre intérêt.



Données :

La vue des données vous permet de créer des variables et des relations, entrer des hypothèses et des projections utilisant des expressions mathématiques et des relations dynamiques avec Excel.



Résultats:

La vue des résultats permet un affichage détaillé et flexible des sorties du modèle dans des graphiques et des tableaux et dans le schéma.

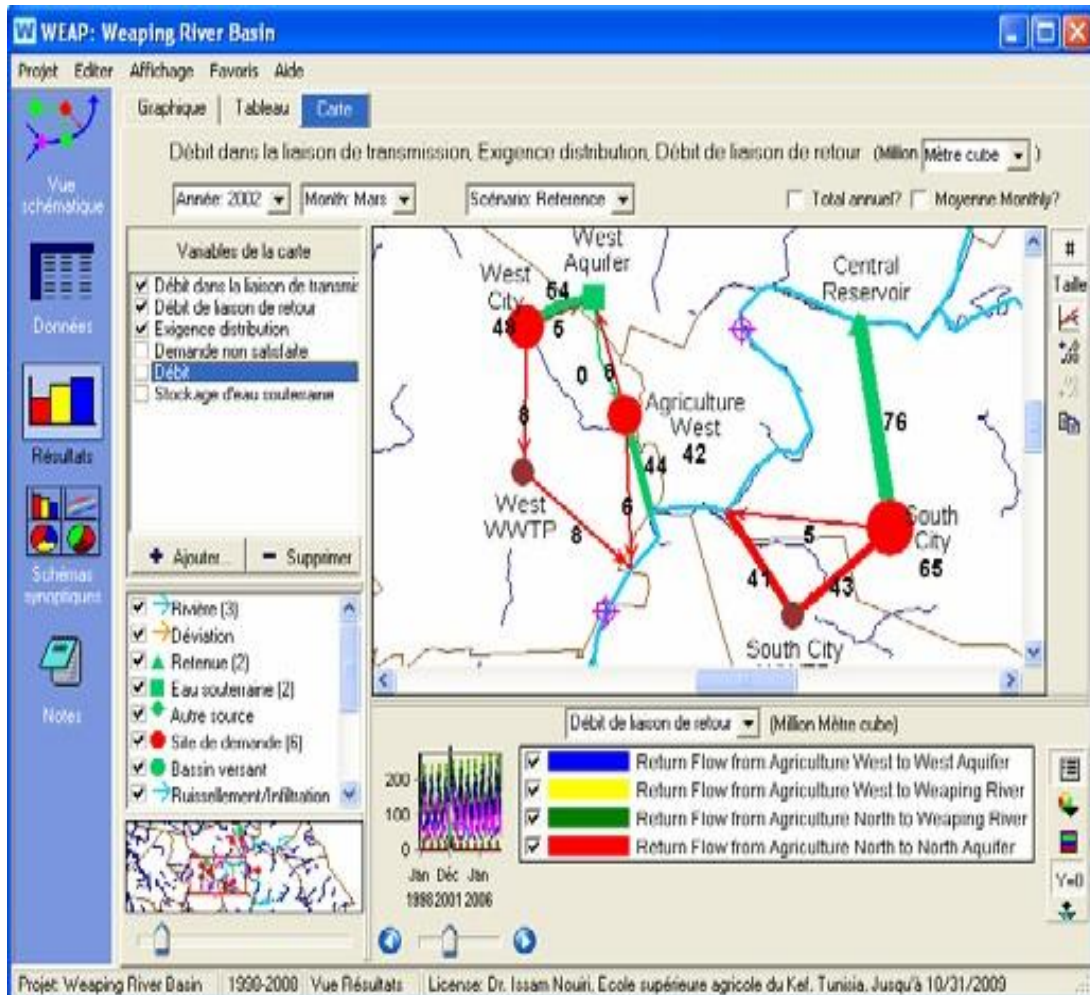
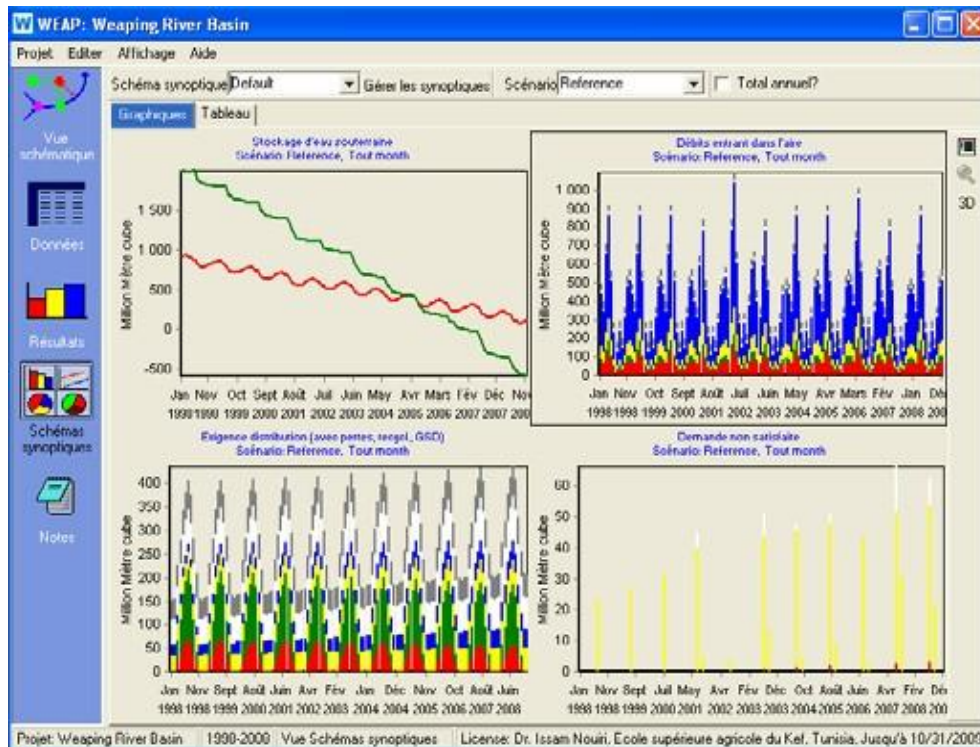


Schéma synoptique:

Vous pouvez mettre en relief les indicateurs clés dans votre système pour une visions rapide.



Notes:

La vue *Note* offre une place pour documenter vos données et vos hypothèses.

The screenshot displays the WEAP software interface in the 'Notes' view. The main window shows a text editor with the following content:

Notes pour la branche: Key

Weeping River Basin

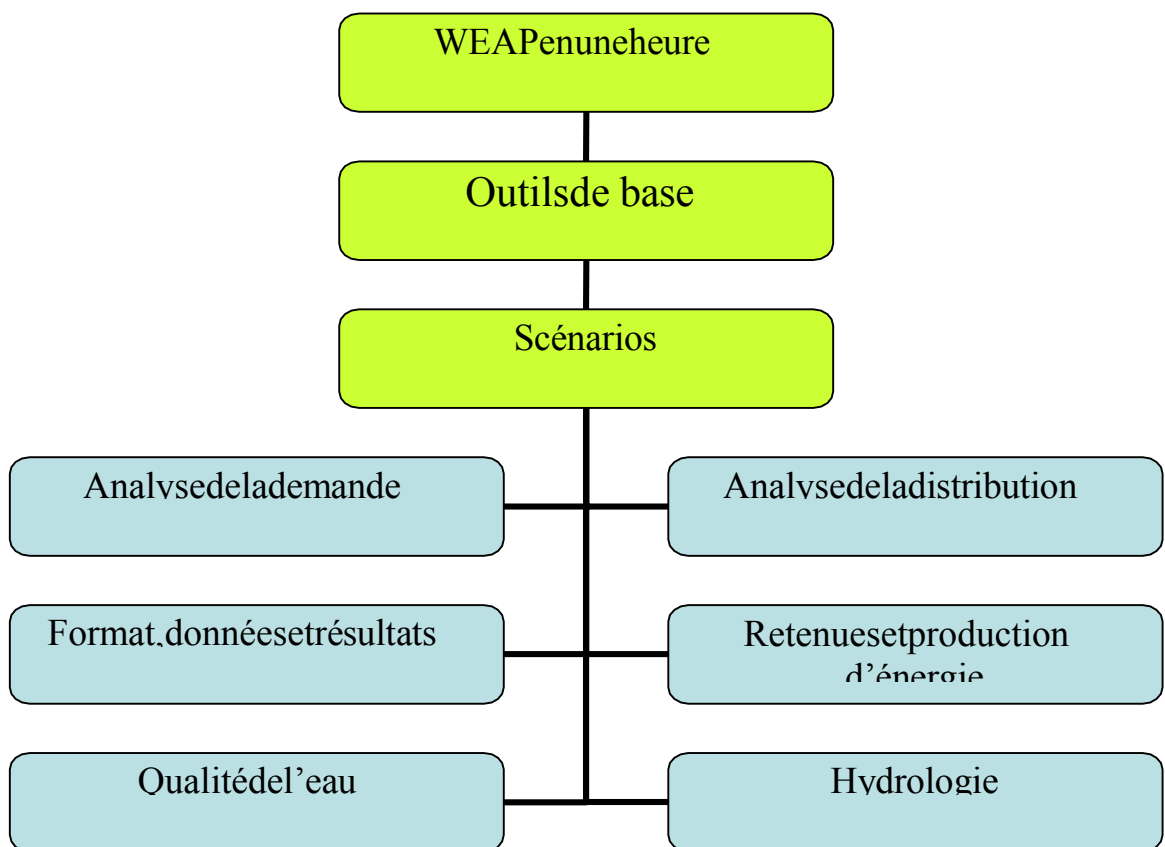
Un ensemble de données exemple pour une zone fictive nommée "Weeping River Basin". Le guide de l'utilisateur fait référence à cet ensemble de données lorsque qu'il décrit les fenêtres d'entrée des données et les rapports.

The interface includes a menu bar (Projet, Editer, Affichage, Arbre, Aide), a toolbar with icons for 'Notes', 'Données', 'Résultats', 'Schémas synoptiques', and 'Notes'. The status bar at the bottom indicates 'Projet: Weeping River Basin 1998-2008' and 'License: Dr. Issam Nouiri, Ecole supérieure agricole du Kef, Tunisie, Jusqu'à 10/31/2009'.

II.2.7.6. Structure du tutorial

Ce tutorial complet vous guide à travers la large gamme d'applications qui peuvent être couvertes par WEAP. Les trois premiers modules (WEAP en une heure, Outils de Base et Scénarios) présentent les éléments essentiels, nécessaires pour tout effort de modélisation avec WEAP. Les autres modules présentent les raffinements qui peuvent ou non être appliqués à votre situation.

Mis à part les trois modules de base, les autres modules sont conçus de façon qu'ils puissent être complétés dans n'importe quel ordre et indépendamment, comme schématisé ci-dessous. Ils commencent tous avec le même modèle que vous allez créer après avoir complété les trois premiers modules.



Conclusion

L'intérêt pour les outils numériques comme support à la décision dans la gestion de la ressource en eau connaît actuellement un essor prodigieux chez les décideurs et scientifiques de nombreux organismes gouvernementaux et centres de recherche de par le monde. Cet essor coïncide avec le passage d'un mode de gestion traditionnel axé sur l'intervention à un mode de gestion intégrée des ressources axé sur la planification et le développement durable des ressources (Dupont J. et al., 2016).

La gestion de l'eau implique le développement, le contrôle, la protection, la régulation, et l'utilisation efficiente des ressources d'eau en répondant de manière efficace aux demandes en eau. Avec la concurrence croissante pour l'utilisation de l'eau entre les secteurs et les régions, un bassin hydrographique a été reconnu comme l'unité d'analyse appropriée pour relever les défis de la gestion des ressources en eau (Zahidul I, 2011). A ce stade, nous allons entamer l'étude du bilan hydrique de l'utilisation de la ressource en eau dans le bassin d'oued El-Hai à travers l'approche WEAP.

***Chapitre III : Application du modèle WEAP pour le cas
du Barrage de fontaine des gazelles***

I-Application du modèle WEAP au barrage Fontaine des gazelles

III -1Caractéristiques du barrage Fontaine des gazelles

III -1-1Caractéristiques physiques du bassin versant Oued El-Hai

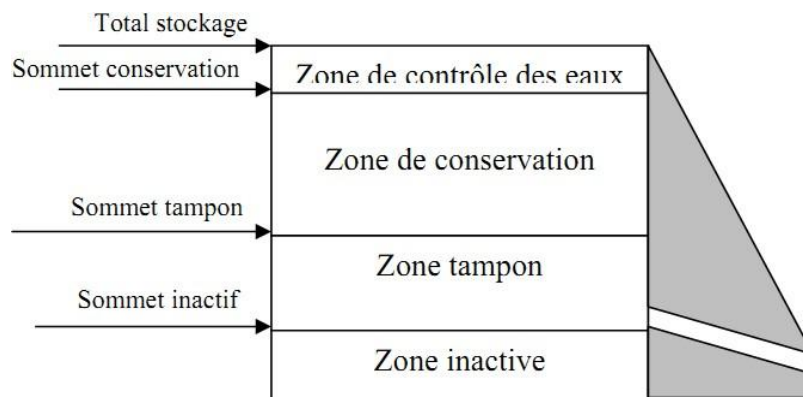
Le bassin versant d'oued El-Hai a une superficie de 1122 km² et un périmètre de 174 km. Son indice de compacité Kc est égal à 1,45. L'altitude maximale, moyenne et minimale est respectivement 2094 m, 1353 m et 350 m (carte 5). Sa pente moyenne est de 14,92 %. Sa dénivelée spécifique est 594,23 m. La longueur de rectangle équivalent est de 70,90 km.

III -1-2 Caractéristiques physiques du barrage Fontaine des Gazelles

Le barrage Fontaine des gazelles est un barrage poids en terre. Elle avait un volume de la retenue de 54,74 Hm³ en 2004. en 2019, ce volume a diminué jusqu'à 44,76 m³ qui correspond au volume d'eau stocké à la cote normale de la retenue 384,00 m (cote du déversoir). A ce même niveau, la surface en eau s'élève à 5931600 m².

Construit en l'an 2000 sur oued El Hai, sur une superficie de 1700 km², avec un volume régularisable de 14 Hm³. Sa construction rentre dans le cadre du développement agricole (irrigation) de la plaine d'El Outaya (A.N.B.T, 2003). C'est un barrage à noyau central doté d'un évacuateur de crues en labyrinthe, destiné à l'irrigation du périmètre El-Outaya.

Pour appliquer le logiciel WEAP sur le barrage, quatre zones de sa réserve devraient être distinguées à savoir : la zone de contrôle des eaux, la zone de conservation, la zone tampon et la zone inactive (figure 1). Pour le barrage Fontaine des gazelles, le sommet de conservation se trouve à la cote 388,00 m donc 4,0 m du niveau normale de la retenue (NNR : 384,00 m) donc le volume d'eau stocké à ce niveau correspond au celui à la limite du niveau de déversoir. En Algérie, généralement la zone tampon se confond avec la zone inactive qui est la cote du volume mort.



Figure(III-1): Différente zones de la retenue utile pour la modélisation avec WEAP

III -2 Modélisation sur WEAP

III -2-1 Importation des couches

Pour le cas du barrage Fontaines des gazelles, trois couches sont ajoutées pour former le milieu d'étude. Il s'agit la couche du bassin versant Oued El-Hai, la retenue et les cours d'eau qui l'alimentent. Ces couches sont délimitées à l'aide de logiciel de traitement cartographique ArcGis avant de les importer dans WEAP (*figures 2 et 3*)

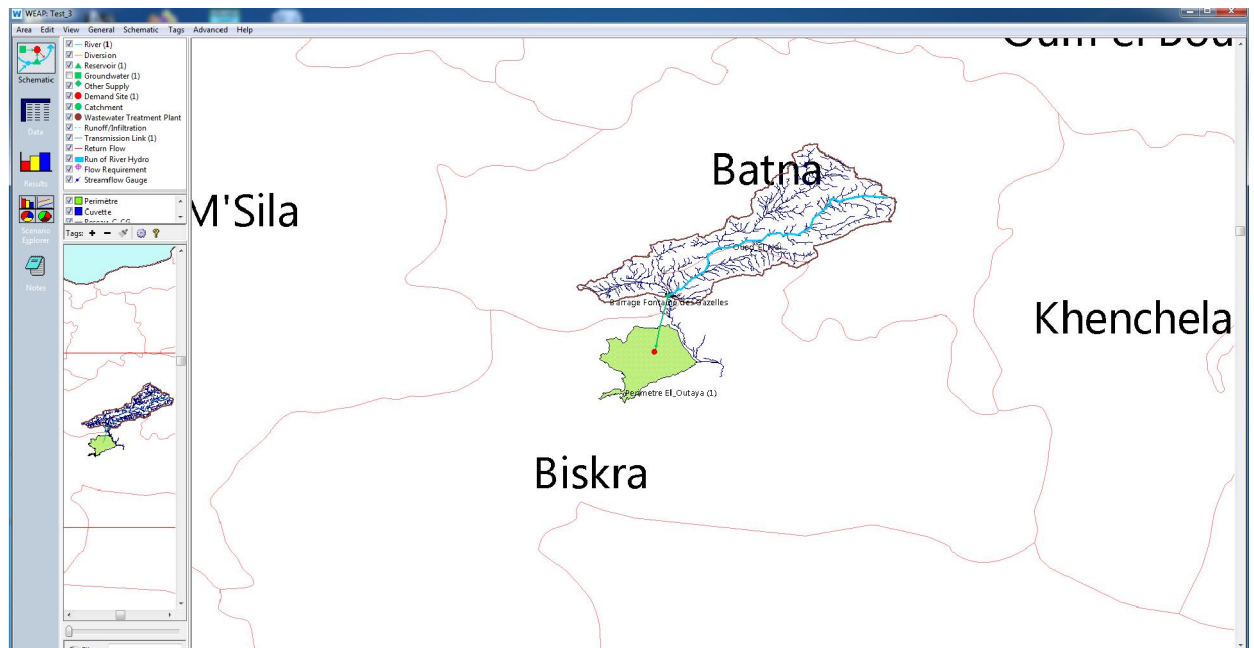


Figure (III-2): Situation de la zone d'étude, la source et le site de demande dans l'environnement WEAP

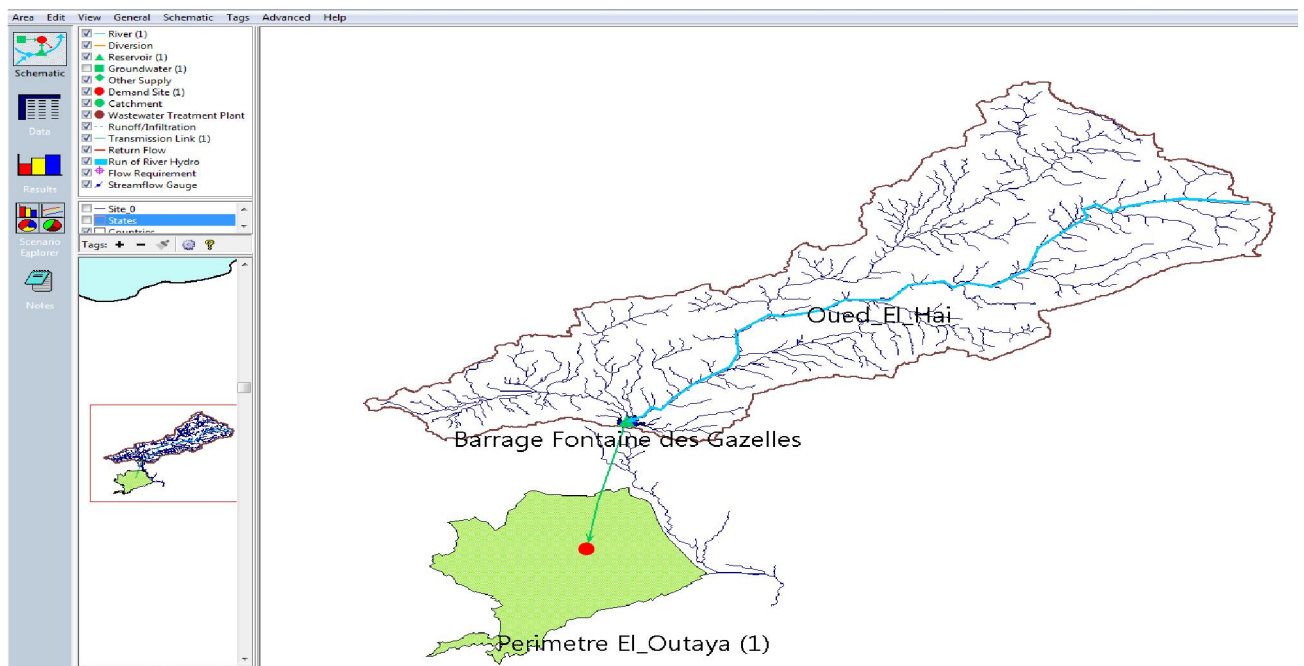


Figure (III-3): Les couches de la zone d'étude, la source et le site de demande dans l'environnement WEAP

III -2-2 Mise en place des objets

Dans la première étape, nous avons placé l'objet nommé « site de demande : Périmètre El-Outaya » (rond coloré en rouge) qui représente dans notre cas un seul type de demande: l'irrigation. Pour le site de captation, pour notre cas c'est le barrage l'objet « retenue : Barrage Fontaine des gazelles» (triangle coloré en vert) et la « rivière » nommé ici « Oued El-Hai ». Pour connecter ces deux types d'objet, nous relierons le site de demande à sa source d'eau avec des objets « flèche » en vert nommés «les liaisons de transmission » (figure 3). Cette action permet de mettre en évidence la quantité d'eau prélevée par le site de demande au niveau de la retenue. Ainsi, elle donne des informations sur la satisfaction de la demande en eau ou le taux de recouvrement du site.

Réglage des paramètres généraux :

- **Période de simulation, pas de temps, unités**

Nous avons choisi l'intervalle de temps de 2014 à 2050 comme période de simulation. Le pas de temps utilisé est journalier (01 Janvier 2014 à 31 Décembre 2050). Dans WEAP, la modification pour configurer l'option« jour calendaire » se fait au niveau du menu principal« General » et« Année et pas de temps ». Toujours dans le menu« Général », un onglet« unité » a été utilisé pour entrer les unités de mesure de chaque variable. Pour le reste des variables, nous avons gardé les unités par défaut soit au niveau de la retenue ou au niveau de la demande.

- **Hypothèses clés**

La vue « données » a été utilisée pour introduire les hypothèses clés. Nous avons pris les hypothèses clés suivantes:

- Volume annuel de sédiment: 665hm^3 (déterminé du des levés bathymétrique de la retenue 2004 et 20019)
- Besoin en eau d'irrigation: $7000\text{ m}^3/\text{ha}$
- La surface irriguée initiale 1100 ha.
- La surface irriguée actuelle 1400 ha.

Le volume annuel de sédiment influe sur la capacité de stockage de la retenue. Il correspond au volume d'eau annuel perdu dû au dépôt de sédiment.

Les deux autres hypothèses clés influent sur les sites de demande. Pour le besoin unitaire en eau, il est connu à partir du rapport entre le volume d'eau total prélevé et la surface totale irriguée..

- **Scénarios**

Notre période de simulation s'étale entre 2014 à 2050. Ainsi, nous avons deux scénarios par défaut nommé «Compte actuel(2014-2020)» et «référence (2021-2050)».Le scénario «référence (2021-2050) » est hérité du scénario de compte actuel (2014-2020) qui constitue le scénario principal de l'analyse des données. En tenant compte des changements possibles qui vont apparaître jusqu'à l'horizon de 2050, nous avons considéré les scénarios suivants en déduction du scénario référence :

- *Apport de sédiment annuel constant*
- *Augmentation du volume d'eau demandé par l'irrigation* (100 ha par an)

Le taux actuel d'extension des superficies des terres irriguées est 100 par an. Le volume d'eau demandé pour l'irrigation dans le scénario référence correspond à ce taux.

Le choix de ce taux s'explique par l'extension de la surface irriguée suite à l'accroissement de la population.

La variation climatique est aussi un facteur influençant les scénarios pour les années futures. Elle est prise en compte en utilisant la fonction « Step » incluse dans WEAP. Cette fonction permet de répartir le taux de variation des variables climatiques qui influent sur le volume d'eau stocké dans le réservoir pour chaque prochaine année en se basant sur les données climatiques de la période 2014-2020.

Ce scénario référence a été introduit dans la vue «Données», menu «Gérer les scénarios».

La figure (III-4): suivante montre l'arbre des scénarios établis:

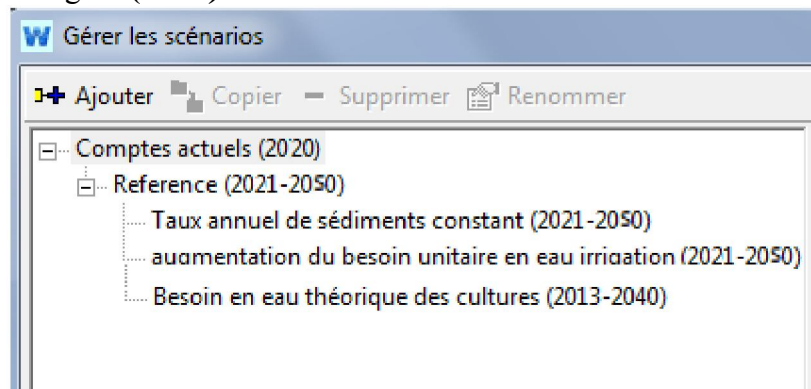


Figure (III-4): Arbre des scénarios

Source : Logiciel WEAP

III -2-3 Introduction des données

- **Site de captation**

Dans la vue des données WEAP, la retenue du barrage trouve dans le volet distribution et ressources. Chaque paramètre utile cité précédemment au niveau de cette retenue possède sa propre case à compléter une fois qu'on clique sur la retenue du barrage Fontaine des Gazelles.

✓ *Capacité de stockage-stockage initial- Volume observé*

La retenue du barrage Fontaine des gazelles a une capacité de stockage initial (en 2014) de 26,801hm³. Son stockage initial correspond au volume d'eau du premier mois de Janvier de l'année 2014 qui est égal à 48085000 m³. Pour celle des autres jours, elle correspond au volume d'eau observé journalièrement au niveau de la retenue du barrage. *figure (III-5).*



Figure (III-5): Variation du volume d'eau dans le barrage (observé) du 01/01/2014 au 31/12/2020

Toutes ces données ont été introduites dans le scénario de compte actuel. Pour les variations journalières comme le volume journalier, nous avons utilisé «l'assistant série journalier» pour les introduire dans la case du volume observé. Dans le scénario référence, nous avons mis l'évolution de la capacité de stockage de la retenue (*figure III-6*) en tenant compte du volume de sédiment annuel entrant dans la retenue.

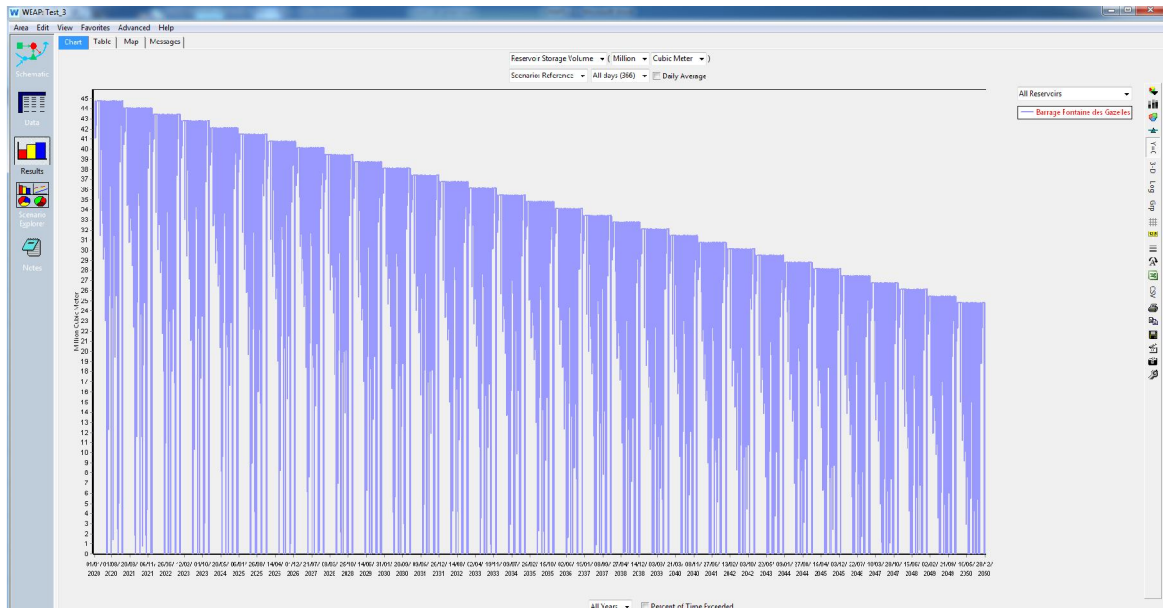


Figure (III-6):Variation du volume d'eau dans le barrage (simulé) du 01/01/2014 au 31/12/2020

✓ *Débit sortant maximum*

Les débits sortants par l'évacuateur, durant la période du scénario actuel ce débit est nul.

✓ *Infiltration*

L'infiltration enregistrée au niveau de la retenue est très faible elle est introduite dans le scénario de compte actuel (figure (III-7)).

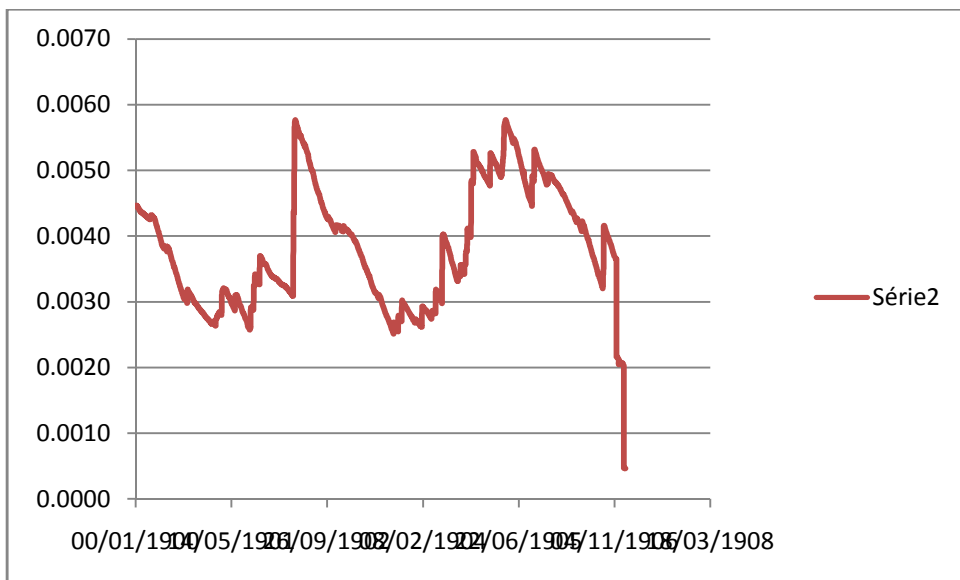


Figure (III-7): Variation du volume d'eau dans le barrage (observé) du 01/01/2014 au 31/12/2020

✓ *Evaporation nette*

Une formule est établie par défaut dans WEAP pour calculer l'évaporation nette d'une retenue. Elle est obtenue par la différence entre l'évaporation directe et la précipitation à la surface du réservoir (*Figure(III-8)*) . Le volume d'eau évaporé et celui des précipitation figurés dans figure ci-dessous sont enregistrés au niveau de la station météo du barrage.

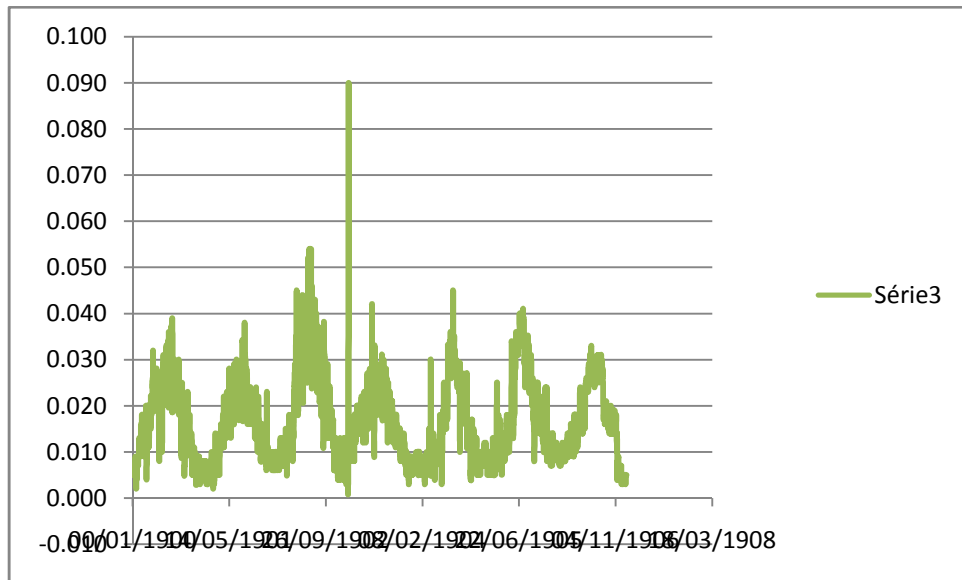


Figure (III-8): Variation du volume d'évaporation nette dans le barrage (observé) du 01/01/2014 au 31/12/2020

Les valeurs négatives signifient qu'il y a un apport en eau et dans le cas contraire, il y a une perte en eau.

✓ *Débits entrants*

Les débits du cours d'eau Oued El-Hai enregistrés à l'entrée de la retenue durant le scénario actuel sont présentés dans la figure suivante (figure (III-9)).

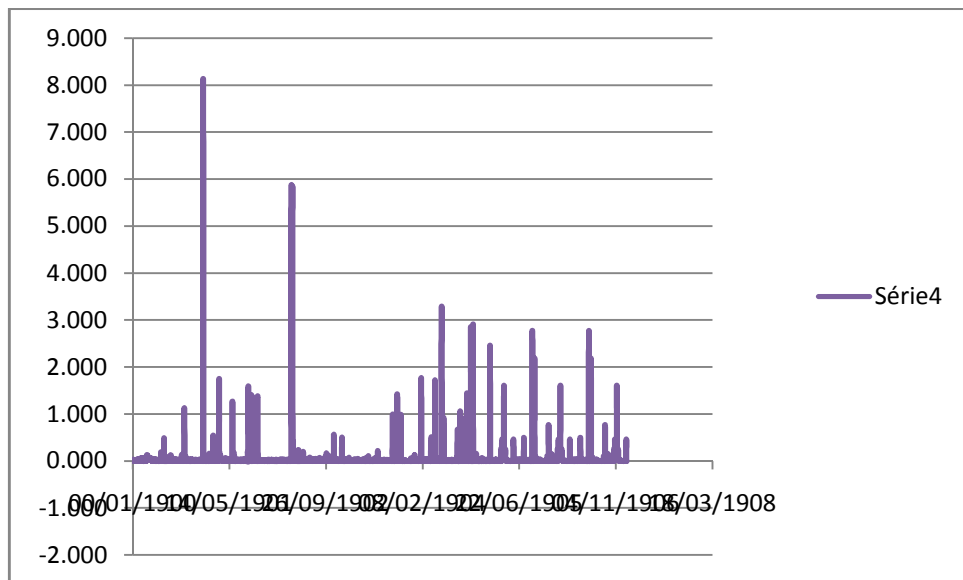


Figure (III-9): Variation du volume d'eau entrée dans le barrage (observé) du 01/01/2014 au 31/12/2020

- **Site de demande**

- ✓ *Irrigation*

Le niveau d'activité annuel pour l'irrigation est formé par la surface cultivée qui s'élève jusqu'à 1100 ha pour l'année 2014. La consommation d'eau annuelle est dans l'ordre de 10 hm³/ha. La projection pour les années futures concerne le scénario de référence (taux de 100 ha par an).

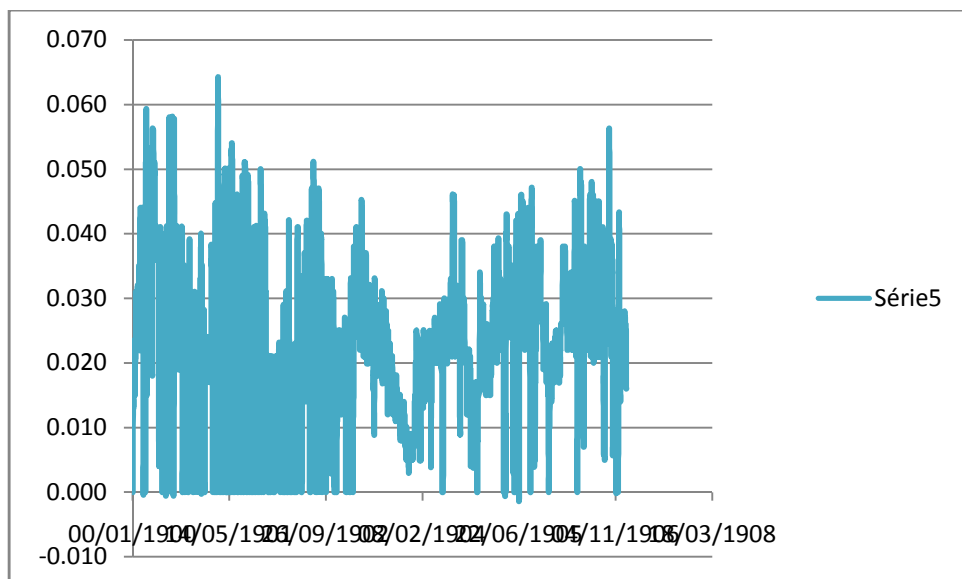


Figure (III-10): Variation du volume d'eau sortant du destiné à l'irrigation (observé) du 01/01/2014 au 31/12/2020

- **Liaison de transmission**

La liaison de transmission est marquée par les objets en flèches vertes (*figure3*). Il n'y a pas de débit de retour. Cette liaison est établie à partir du bilan hydrique au niveau de la retenue qui découle de l'application du principe de la conservation des volumes d'eau. Elle s'écrit sous sa forme la plus complète:

$$dV = Vec + Vp - (Vev + Vid + Vif + Vd + Vu)$$

(NORD,2004)

avec, durant l'intervalle de temps dt :

dV: la variation du stock dans la retenue ;

Vec : les apports en provenance des tributaires;

V : les apports dû aux précipitations tombant directement sur la retenue ;

Vev: le volume d'eau évaporée ;

Vid : les pertes par infiltration à hauteur du barrage ;

Vif : les pertes par infiltration dans le fond de la retenue ;

Vd : le volume d'eau sortant de la retenue par déversement;

Vu: le volume d'eau prélevée pour divers usages

Sa forme réduite est : Apport – perte = stock

Le tableau (III-1): résume ce bilan pour le cas du barrage Fontaine des gazelles du 01/01/2014 au 31/12/2020 :

Tableau (III-1):: Bilan hydrique de la retenue du barrage Fontaine des gazelles du 01/01/2014 au 31/12/2020

	Volume(hm³)
Stock initial	26.801
perte:	
Irrigation	57.801
Evaporation nette	42.553
Infiltration	9.770
Déversement	0.000
total perte	110.123
Apport:	
Précipitation	135.848
Stock + pertes	136.924
Stock final	25.725

III -3 RESULTATS

III -3 -1 Evaluation des ressources en eau

Dans cette partie, nous allons voir l'état d'évolution de volume d'eau du côté de l'offre et du celui de la demande.

III -3 -2 Quantité d'eau disponible au niveau de la retenue à l'horizon 2050

La figure III-11 ci-dessous est l'un des résultats de traitement par WEAP. Elle montre à la fois la courbe simulée du volume d'eau disponible dans la retenue sous l'effet combiné de la sédimentation et d'évaporation nette. La quantité d'eau disponible diminue au fur à mesure que les années avancent. Nous avons constaté que son pas de diminution est considérable car en 2050, elle n'atteint même pas 50% de sa capacité de stockage initiale (en 2014).

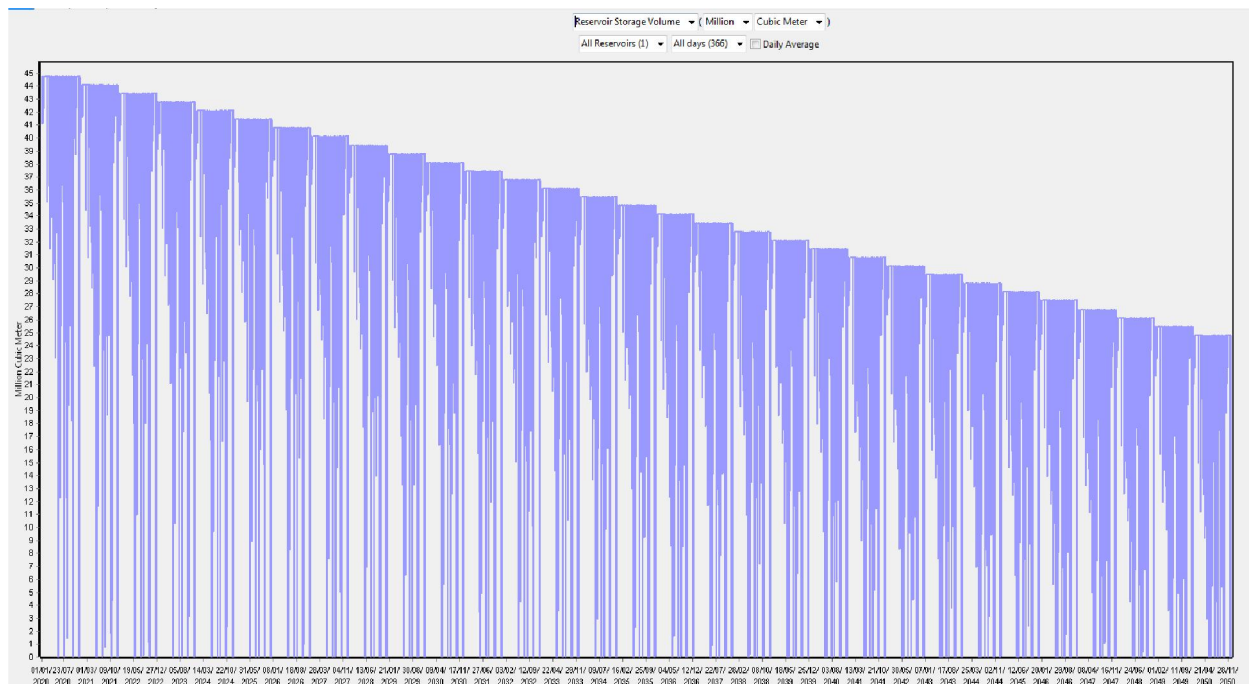


Figure (III-11): : Evolution de la capacité de stockage de la retenue du barrage

III -3 -3 Evolution future de besoin en eau du site de demande (irrigation)

La figure III-12 ci-dessous montre la variation du volume d'eau prélevé pour l'irrigation simulée. On constate que : dans les dix années à venir la demande en eau de l'irrigation va s'augmenter jusqu'à 14hm³ qui correspond au volume régularisable interannuelle du barrage. Si nous regardons la capacité de stockage maximale du barrage en 2030, nous remarquons que le besoin en eau d'irrigation montré par le scénario de référence est dans l'ordre du volume d'eau disponible pendant cette même année.

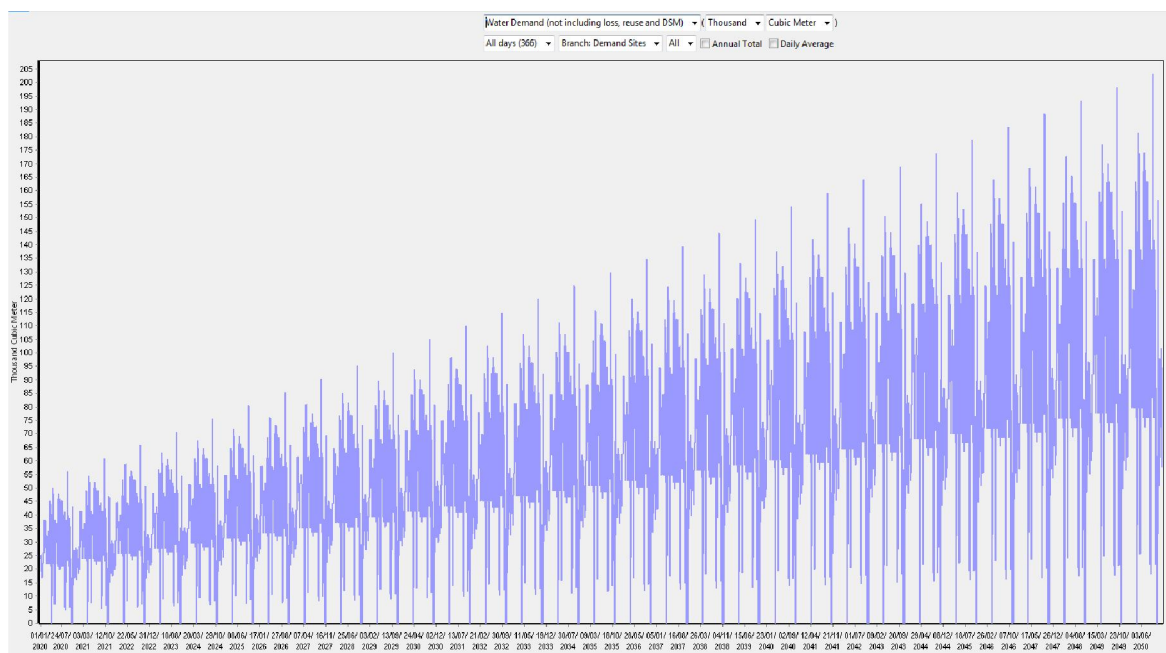
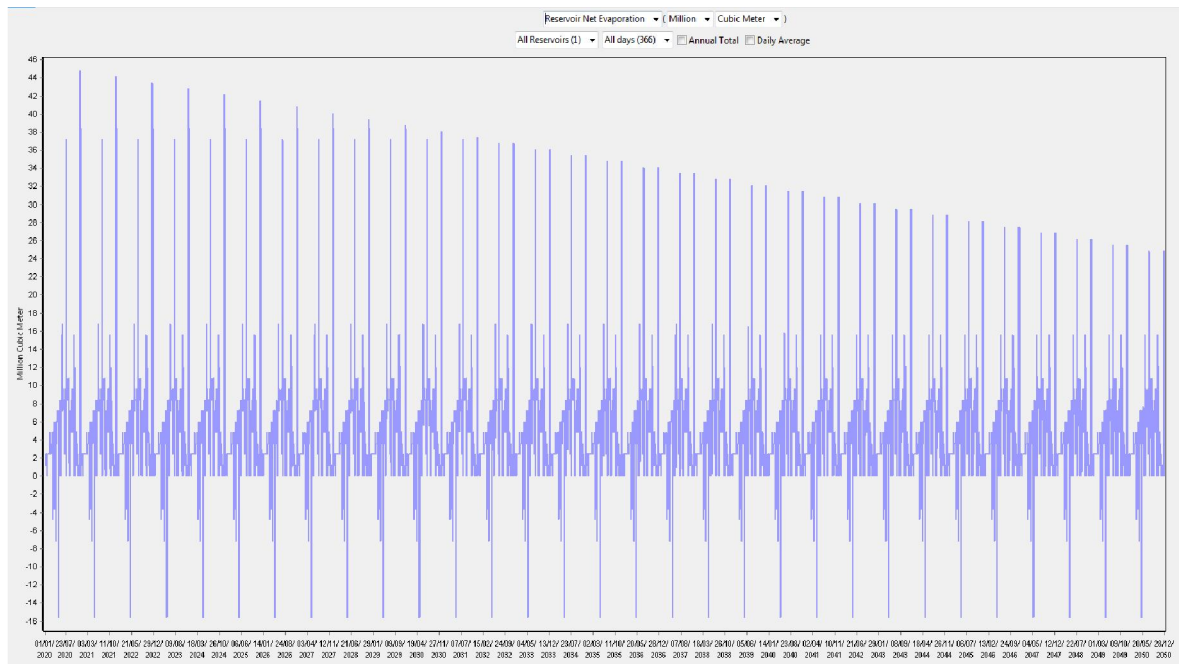


Figure (III-12): Evolution des besoins en eau d'irrigation jusqu'en 2050

III -3 -4 Evolution future des pertes en eaux

La figure III-13 ci-dessous montre la variation du volume d'eau de pertes par évaporation (nette) simulée.

Le volume diminue du fait que les surface exposée à l'évaporation diminuent.



Figure(III-13): Evolution des pertes par évaporation (nette) jusqu'en 2050

III-3-5 Adéquation entre l'offre et la demande

Nous avons vu par les graphes précédents les évolutions futures de quantité d'eau disponible et demandée jusqu'à 2050. La confrontation des courbes d'évolutions de demande et d'offre en eau nous montre que le objectif d'atteindre l'irrigation de 4000 ha est loin de la réalité.

La surface maximale qu'on peut irriguer à partir de ce barrage par cette dotation est 1600 ha (actuellement la surface irriguée à partir du barrage dans l'ordre de 1100 ha)

Cette confrontation montre tout à fait la loi entre l'offre et la demande, c'est-à-dire la demande augmente plus que l'offre. à partir de la l'année 2030 , le volume d'eau régularisable à partir de la retenue sera inférieur à la demande (avec la dotation actuelle).

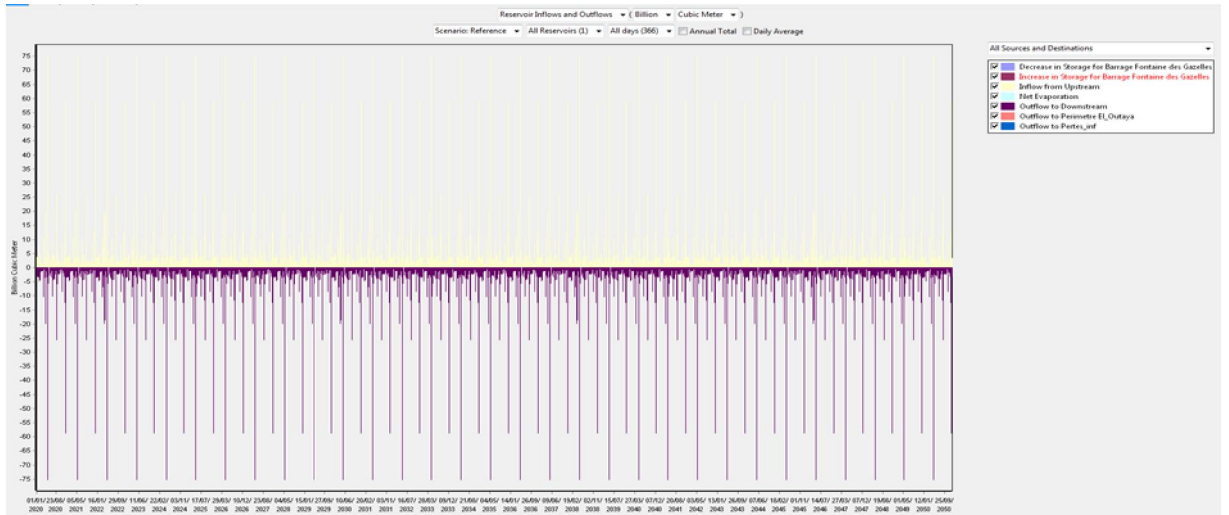


Figure (III-14): Variation des volumes entrants et sortants jusqu'en 2050

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'étudier l'équilibre futur entre l'offre et la demande en eau du barrage Fontaine des Gazelles (W de Biskra).

Dans ce contexte, **WEAP** est utilisé pour avoir un plan de gestion intégré entre les ressources en eau, et pour évaluer les (d'irrigation) afin de pouvoir revendiquer une bonne décision.

Ce programme présente une vision large de l'implication de nombreux acteurs dans l'avenir (stress hydrique, élévation du niveau de vie, etc.) tout en mettant en évidence les éventuelles réserves dans notre gestion de nos ressources en eau.

En utilisant **WEAP**, nous avons simulé l'évolution des besoins en eau en identifiant des variables explicatives : croissance des surfaces irriguées, connectivité, pertes, etc. Cela nous a conduit à construire le scénario de référence, à identifier les besoins des utilisateurs sur une période projetée de 30 ans (jusqu'en 2050) et à effectuer des simulations d'autres scénarios où nous nous appuyons sur ceux pour la gestion de la demande. L'estimation de ces besoins a montré qu'ils augmentent avec le temps et qu'il y a un moment où l'offre ne répond pas de manière adéquate à la demande.

Ce travail a démontré l'importance de la modélisation dans la gestion des ressources en eau et les bénéfices qui peuvent être exploités dans le cadre d'une future analyse. Le modèle **WEAP** a démontré son utilité à la lumière des premiers résultats obtenus, qui ont confirmé que l'approche **WEAP** et les données utilisées sont correctes et ouvrent des perspectives prometteuses pour le développement d'un outil de planification intégrée de la gestion des ressources en eau. Le bassin versant de OUED EL-HAI vise une meilleure exploitation sur des horizons plus larges.

Références bibliographiques

- Amri C. 2006.** Les Collemboles de quelques habitats et biotopes de l'est algérien Inventaire et dynamique saisonnière. Mémoire Magister, Université Mentouri Constantine, Algérie, 108p.
- ANBT. 2021.** (Agence Nationale des Barrages et Trasferts). Fiche technique de barrage fontaine des gazelles, Biskra, algérie: direction de barrage fontaine des gazelles.
- Anonyme. 1999.** Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar (FDR). Annexe II, 24p.
- Athmani H., Boulahdid M., Bouchahm N., Hocini N. 2018.** Géochimie des métaux traces dans les sédiments du barrage de la fontaine des gazelles, Algérie. Université Mohamed Khider-Biskra . Courrier du Savoir – N°26 :481-494pp.
- DPAT (Direction de Planification et d'Aménagement du territoire). 2010.** Monographie de la wilaya de Biskra de 2009.
- Rerboudj A. 2005.** Essai de quantification de l'érosion et perspective de la protection du barrage de la Fontaine des Gazelles contre l'envasement (approche numérique). Mémoire de Magister, université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 147p.
- Sayah N. 2018.** Etude de la biodiversité du couvert végétale et cartographie de l'occupation du sol autour du barrage de Fontaines des gazelles (Biskra). Mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, 104p.
- ANBT.(2017).** document de barrage: Document de barrage. Fontaine des gazelles, Biskra, Algérie : direction de barrage fontaine des gazelles.
- ANBT. (2004).** LEVES BATHYMETRIQUES DES BARRAGES EN EXPLOITATION. Fontaine des Gazelles : ANBT.
- CHEBBAH, M. (2007).** Lithostratigraphie, Sédimentologie et Modèles de Bassins des dépôts néogènes de la région de Biskra, de part et d'autre de l'accident Sud atlasique (Zibans, Algérie). CONSTANTINE : UNIVERSITE MENTOURI
- (MEYLAN ET AL, 1999).Meylan, P et Musy, A, (1999).**Hydrologie fréquentielle. Editions HGA, Bucarest. Hongrie.
- AHARIK K. & EL GAROUANI A., 2016 :** « Application du SIG pour la gestion des ressources en eau dans la région de Saïss (Maroc) », 3^{ème} Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG, Oujda 22-23 Novembre 2016
- Arnold J., Mauro D.L., Ali S. et Cole G., 2005:** «Watershed Modeling using SWAT2003», Third Conference on Watershed Management to Meet Water Quality Standards and Emerging TMDL (Total Maximum Daily Load), Atlanta, Georgia.
- BEI ERE, 2012 :** Energies Renouvelables et Environnement, Bureau d'Etudes Industrielles, Présentation du modèle SWAT.
- Benseddik B. et El Mansouri B. 2012 :** « Synthèse du Système d'Aide à la Décision (SAD) Pour les Ressources en Eaux du Gharb », Master spécialité hydro-informatique et génie de l'eau, université d'Ibn Tofail, Faculté des Sciences, Kenitra - Maroc.
- Dupont J, Smitz J., Rousseau A. N., Mailhot A. et Gangbazo G., 2016 :** « Utilisation des outils numériques d'aide à la décision pour la gestion de l'eau », Revue des sciences de l'eau, Volume 11, numéro hors-série, 1998, <https://doi.org/10.7202/705326ar>
- Giupponi C, Mysiak J., Fassio A., Cogan V., 2004:** « MULINO-DSS: a computer tool for sustainable use of water resources at the catchment scale », Mathematics and Computers in

Simulation, Volume 64, Numéro 1, 5 janvier 2004, PP 13-24.

Guide d'utilisation de STRATEAU, Outil d'analyse stratégique et de prospective sur les équilibres demandes /ressources en eau,

http://www.ambassade-eau.com/sites/default/files/docs/strateau/guideSTRATEAU_fr.pdf,

consulté le : 07/05/2022, 12 :35.

Hamlat A., 2014 : « Contribution à la gestion des ressources en eau des bassins versants de l'ouest Algérien à l'aide d'un système informatisé », thèse doctorat l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf département d'Hydraulique.

Herrouin L., 2011 : « STRATEAU Outil D'aide A La Décision Gestion Demandes/ Ressources En Eau », Communication "["EURO-RIOB 2011" et Assemblée Générale du Réseau Méditerranéen des Organismes de Bassin \(REMOB\)](#)" Septembre 2011, https://www.riob.org/IMG/pdf/AERMC_Luc_Herrouin_Table_ronde_Changement_climatique_Strateau.pdf,

HyD2002, Aide à l'aménagement et la gestion des ressources en eau, <https://www.mpl.ird.fr/divha/fr/soft/hyd2002/docs/user/ref/HydPlaqt.htm>, consulté le 10/05/2022, 09:15.

King N., 1996: « Achieving decision support with GIS: learning from water management» In: Proceedings of the HydroGIS'96 conférence, KOVAR K. and NACHTNEBEL H.P. [Ed], IAHS Publication n°235, pp. 677-684.

Laurent F., 1996 : « Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau, Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux », Thèse de doctorat, de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Little John.D.C, 1970 : « Models and managers: the concept of a decision calculus. », Journal Management Science, Vol. 50, No. 12_supplement, <https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0267>.

Mike Basin, 2003: «A Versatile Decision Support Tool for Integrated Water Resources Management Planning», Guide to Getting Started Tutorial, <http://former.iemss.org/sites/iemss2006/papers/w5/MB-manual.pdf>,

Mike Basin, <http://www.mikepoweredbydhi.com>, consulté le : 14/05/2022, 12:00.

« Mention biologie géosciences agro-ressources environnement master gestion évaluation des ressources en eau (GERE) », mémoire de stage, université des sciences et techniques Montpellier 2, département d'enseignement des sciences de la terre de l'eau et de l'environnement de Montpellier.

Mysiak J., Giupponi C. et Fassio A., 2002: « Decision support for water resource management: An application example of the MULINO DSS », https://www.academia.edu/17463691/Decision_support_for_water_resource_management_An_application_example_of_the_MULINO_DSS, consulté le: 14/05/2022, 10:00.

Noyer M-L., 2000 :« Systèmes d'aides à la décision pour la gestion des hydro-systèmes : Analyse bibliographiques d l'état de l'art », <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-50353-FR.pdf>, consulté le : 10/05/2022, 10 :30.

Pouget J-C., BELLAUBI F., DE SA A., 2003 : « Un environnement de modélisation, pour tester l'allocation de ressources en eau, HyD2002 et ses applications », Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant. Actes de l'atelier du PCSI, 2-3 décembre 2003, Montpellier, France.

Saoudi A, 2016 : « Application du modèle "Mike Basin" a la gestion des eaux du barrage Lakhmess (Siliana) », mémoire de master Université De Tunis El Manar Département de Géologie.

TAC, 2012 :Partenariat mondial pour l'eau, Comité technique consultatif, « La gestion intégrée des ressources en eau », Partenariat mondial pour l'eau, Comité technique consultatif (TAC), Global Water Partner ship SE - 105 25 Stockholm. Suède, ISSN : 1403-5324.