

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA

جامعة باجي مختار-عنابة

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TERRE
DÉPARTEMENT DE GÉOLOGIE



Année 2018

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option : Hydrogéologie

Analyse multicritère et caractérisation du modèle de gestion intégrée des ressources en eau de la vallée du Rhumel

Par : Hocine Kiniouar

[Ingénieur d'État en Hydrogéologie de l'UM Constantine, Magister en Hydrogéologie de l'UBM Annaba]

Soutenue publiquement en date du 8 novembre 2018, devant le jury :

DIRECTEUR DE THÈSE :	M. Azzedine Hani	Professeur [UBM Annaba]
PRÉSIDENT :	M. Larbi Djabri	Professeur [UBM Annaba]
ÉXAMINATEURS :	M. Hicham Chaffai	Professeur [UBM Annaba]
	M. Sofiane Labar	Professeur [Univ. El Tarf]
	M. Noureddine Zenati	Docteur [Univ. Souk Ahras]
	M. Lassaad Ghrieb	Docteur [Univ. Guelma]

باسم الله الرحمن الرحيم

"وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَسْكَنَاهُ فِي الْأَرْضِ وَإِنَّا عَلَى ذَهَابٍ بِهِ لِقَادِرُونَ"

[سورة المؤمنون 23، الآية 18]

« Et Nous avons fait descendre l'eau du ciel avec mesure. Puis Nous l'avons maintenue dans la terre, cependant que Nous sommes bien Capable de la faire disparaître.»

[Le Coran, sourate AL-MU-MINŪNE (les croyants) 23 :18]

"وَالَّذِي نَزَّلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَنْشَرْنَا بِهِ بَلْدَةً مَيْتًا كَذَلِكَ تُخْرَجُونَ"

[سورة الزخرف 43، الآية 11]

« Celui qui a fait descendre l'eau du ciel avec mesure et avec laquelle Nous ranimons une cité morte [aride]. Ainsi vous serez ressuscités ;»

[Le Coran, sourate AZ-ZUŽRUF (l'ornement) 43 :11]

"قُلْ أَرَأَيْتُمْ إِنْ أَصْبَحَ مَاؤُكُمْ غَوْرًا فَمَنْ يَأْتِيكُمْ بِمَاءٍ مَعِينٍ"

[سورة الملك 67، الآية 30]

« Dis : “Que vous en semble ? Si votre eau était absorbée au plus profond de la terre, qui donc vous apporterait de l'eau de source ? ” »

[Le Coran, sourate AL-MULK (la royauté) 67 :30]

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je dis : « Al-hamdu lillâh ». Ensuite Je tiens à remercier le directeur de cette thèse, Monsieur le professeur Azzedine Hani pour m'avoir fait confiance malgré les connaissances plutôt légères que j'avais en 2009 sur la GIRE, puis pour m'avoir guidé, encouragé, conseillé, tout en me laissant une grande liberté.

Mes vives gratitudes vont à monsieur le professeur Larbi Djabri d'avoir accepté d'être président du jury. Je remercie également Monsieur le professeur Hicham Chaffai, Monsieur le professeur Sofiane Labar, Monsieur le docteur Noureddine Zenati & Monsieur le docteur Lassaad Ghrieb d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Pour leur accueil à Constantine je tiens à remercier le personnel de l'ANRH, de la direction de l'agriculture, de la direction de l'environnement, de l'ONS, de l'ABH CSM, en particulier madame Asma Yousfi et de la DHW, en particulier mon ami Elhadi Haderbache. Cependant, pour leur accueil à Alger je tiens à remercier le personnel du ministère des ressources en eau, de l'ONS et de l'ANRH, en particulier monsieur Abdelmalek AYAD. Sans oublier mes remerciements au personnel de l'ANRH de Jijel, en particulier monsieur Khireddine Babay et au personnel de la direction de l'agriculture, en particulier monsieur Abdelhamid Aliouèche.

Mes remerciements vont également au professeur Kapelan et au professeur Hernandez, pour la gentillesse et la patience qu'ils ont manifestées à mon égard et pour tous les conseils et les orientations qu'ils m'ont données. J'exprime mes sincères remerciements au professeur Younsi, pour son bon accueil et au professeur Adamowski pour l'examen de mes tout-premiers résultats. Sans oublier d'exprimer ma profonde gratitude au SEI de Boston pour l'accompagnement avec le WEAP, en l'occurrence Jack Sieber et Stéphanie Galaitsi.

Ma gratitude aussi va à monsieur le docteur Sadek Brahmi et mes frères Koné et Mustapha qui m'ont été d'un grand soutien moral durant mon tout premier stage scientifique à Beauvais. Merci Beaucoup cher Sadek pour ta gentillesse, ta bienveillance et ta sagesse.

Pour leurs encouragements et leur assistance morale, je remercie chaudement, ma mère, ma femme, mes sœurs et mon frère. Ainsi que le reste de ma grande famille des anciens plombiers de Jijel, en l'occurrence mon père et mes oncles qui m'ont transmis le métier de l'eau et qui l'ont eux-mêmes hérité.

Mes remerciements vont aussi à Belkacem et Farès mes vieux amis et mes collègues à l'Université de Jijel. Avec leurs plaisanteries j'ai surmonté beaucoup de stress. Sans oublié mon cher ami Hassan, l'immigré d'Irlande pour son aide considérable que je n'oublierais jamais.

Je remercie tous ceux sans qui cette thèse ne serait pas ce qu'elle est : aussi bien par les discussions que j'ai eu la chance d'avoir avec eux, leurs suggestions ou contributions.

Hocine

الملخص

بحلول منتصف القرن 21، سحب المياه ربما يصل إلى مستوى الحد من موارد المياه المتجددة في بلدان جنوب البحر الأبيض المتوسط

تعتبر الجزائر واحدة من أفقر البلدان من حيث موارد المياه المتجددة، مع قدرة تخزين سنوية تبلغ 14.6 مليار متر مكعب في مستجمعات المياه الساحلية المتوسطة، وتمثل 7 ٪ من المساحة وتمثل 90 ٪ من إجمالي الجريان السطحي من البلاد.

في هذه الدراسة، قمنا بتقييم الطلب على المياه لتلبية احتياجات مستخدمي المياه في منطقة قسنطينة. وتقع هذه الأخيرة في حوض كبير-رمال تحت مناخ شبه جاف في الجنوب ومناخ شبه رطب في الشمال، مع معدل نمو مرتفع نسبياً من الأنشطة السكانية والزراعية والصناعية.

باستخدام نظام تقييم وتخطيط المياه (WEAP21)، قمنا ببناء نموذج لتقدير الطلب على المياه في مقاطعة قسنطينة باستخدام نهج الحدود الإدارية، ومن ثم كان من الضروري اتباع نهج أفضل لإدارة المياه مع الأخذ بعين الاعتبار الحدود الطبيعية بواسطة الحوض الفرعي. لذلك، تم الاختيار لحوض بومرزوق الفرعي، وهو الحوض العلوي لحوض كبير-رمال.

اختيار عام 2007 كسنة مرجعية تم حساب سيناريو "الطلب على المياه" الأساسي من قبل نموذج WEAP لمحاكاة حالات عدم اليقين خلال فترة 20 سنة (2008-2027) لمقاطعة قسنطينة و30 سنة (2008-2037) لحالة حوض بومرزوق الفرعي.

تم تنفيذ 5 سيناريوهات: (1) النمو السكاني، (2) الزيادة في الأراضي المروية، (3) انخفاض استهلاك مياه الشرب الأساسية، (4) انخفاض استهلاك مياه الري الأساسية، (5) زيادة استهلاك المياه الصناعية الأساسية.

وضحت النتائج أن السيناريو الثالث هو البديل الأفضل وكذلك السيناريو الأكثر كفاءة، مما يقلل من الطلب على مياه الشرب بنحو 12 مليون متر مكعب في 20 سنة من مقاطعة قسنطينة وحوالي 37 مليون متر مكعب في 30 سنة، في حالة الحوض الفرعي

الكلمات المفتاحية: الموارد المائية، الإدارة المتكاملة للموارد المائية، المناخ شبه الجاف، حوض فرعي في البحر المتوسط، الطلب على المياه، النمذجة، السيناريو، WEAP21

RÉSUMÉ

Au milieu du 21^{ème} siècle, dans les pays du sud de la Méditerranée, les prélèvements atteignent probablement le niveau limite des ressources en eau renouvelables.

L'Algérie est l'un des pays les plus pauvres en ressources hydriques renouvelables, avec une capacité de stockage annuelle de 14,6 milliards de m³ dans les bassins versants côtiers méditerranéens, représentant 7% de la superficie et représentant 90% du ruissellement total du pays.

Dans cette étude, nous avons évalué la demande en eau pour répondre aux besoins des utilisateurs de l'eau dans la Wilaya de Constantine. Cette dernière est située dans le bassin du Kébir-Rhumel sous un climat semi-aride au sud et subhumides au nord, avec un taux de croissance relativement élevé de la population, des activités agricoles et industrielles.

En utilisant Water Evaluation And Planning System (WEAP21), nous avons construit un modèle pour estimer la demande en eau de la Wilaya de Constantine en suivant une approche par limites administratives ensuite il s'est avéré nécessaire de suivre une meilleur approche qui celle des d'une gestion de l'eau en prenant en compte les limites naturelles par sous-bassin. Et c'est là que le choix a été fait pour le Boumerzoug qui est le sous-bassin supérieur du Kébir-Rhumel.

En choisissant 2007 comme année de référence, un scénario de base de «demande en eau» a été calculé par le modèle WEAP pour simuler les incertitudes sur la période de 20 ans (2008-2027) pour la wilaya de Constantine et 30 ans (2008-2037) pour le cas du sous-bassin du Boumerzoug.

Cinq scénarios ont été simulés : (1) Croissance démographique, (2) augmentation des terres irriguées, (3) diminution de la consommation de l'eau potable de base, (4) diminution de la consommation de l'eau d'irrigation de base et (5) augmentation de la consommation de l'eau industrielle de base.

Les résultats ont montré que le scénario 3 est le meilleur scénario alternatif et aussi le plus efficace, en réduisant la demande en eau potable d'environ 12 Mm³ en 20 ans de la wilaya de Constantine et 37 Mm³ en 30 ans, pour le cas du sous-bassin du Boumerzoug.

Mots clés : ressources en eau, GIRE, climat semi-aride, sous-bassin méditerranéen, demande en eau, modélisation, scenarii, WEAP21

ABSTRACT

By mid-21st century, the countries of the southern Mediterranean, levies probably reach the limit level of renewable water resources.

Algeria is one of the poorest countries in terms of renewable water resources, with an annual storage capacity of 14.6 billion m³ in Mediterranean coastal watersheds, representing 7% of the area and representing 90% of the total runoff of the country.

In this study, we assessed the demand for water to meet the needs of water users in the Constantine region. The latter is located in the Kébir-Rhumel basin under a semi-arid south and sub humid climate in the north, with a relatively high growth rate of population, agricultural and industrial activities.

Using the Water Evaluation and Planning System (WEAP21), we constructed a model to estimate the water demand of the Constantine province using an administrative boundary approach, and then it was necessary to follow a better approach that of water management taking into account the natural limits by sub-basin. Moreover, this is where the choice was made for Boumerzoug, which is the upper sub-basin of Kébir-Rhumel basin.

Choosing 2007 as a reference year, a baseline "water demand" scenario was calculated by the WEAP model to simulate the uncertainties over the 20-year period (2008-2027) for the Constantine province and 30 years (2008-2037) for the case of the Boumerzoug sub-basin.

Five scenarios were simulated: (1) Population growth, (2) increase in irrigated land, (3) decrease in consumption of basic drinking water, (4) decrease in consumption of basic irrigation water and (5) increased consumption of basic industrial water.

The results showed that scenario 3 is the best alternative and the most efficient scenario, reducing the demand for drinking water by about 12 Mm³ in 20 years of Constantine Province and 37 Mm³ in 30 years, in the case of the sub-basin of Boumerzoug.

Keywords: water resources, IWRM, sub-basin, semi-arid climate, Mediterranean sub-basin, water demand, modelling, scenarii, WEAP21

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE.....	2
GRANDES LIGNES DE LA THESE.....	5
CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	7
1.1.1. L'eau en Afrique.....	7
1.1.2. L'eau au Moyen-Orient et en Afrique du Nord.....	8
1.1.3. L'eau en méditerranée.....	9
1.1.4. L'eau en Algérie.....	12
1.1.4.1. Ressources en eau exploitables.....	12
1.1.4.2. Demande en eau.....	13
1.1.4.3. Changement climatique.....	14
1.1.4.4. Politique algérienne de l'eau.....	14
1.2. Gestion et planification.....	15
1.2.1. Alors, pourquoi planifier, pourquoi gérer ?	15
1.2.2. De la gestion fragmentée à la gestion intégrée.....	15
1.3. Gestion intégrée des ressources en eau.....	16
1.3.1. Le concept moderne de la GIRE.....	16
1.3.2. Principes clés de la GIRE - Les principes de Dublin.....	19
1.3.3. L'Agenda 21, chapitre 18.....	19
1.3.4. Définition de la GIRE.....	20
1.3.5. Les piliers de la GIRE.....	22
1.3.6. Les limites de la GIRE.....	22
1.3.7. Capacité institutionnelle vis-à-vis de la GIRE.....	23
1.3.8. Expériences internationales avec la GIRE	25
1.3.8.1. Expérience des États-Unis.....	25
1.3.8.2. Progrès avec la GIRE et le PP dans les pays méditerranéens.....	26
1.3.9. Statut de mise en œuvre de la GIRE.....	27
1.3.10. Dimension humaine de la GIRE.....	28
1.4. Les systèmes d'aide à la décision (SAD) et la GIRE.....	29
1.4.1. Water Evaluation And Planning system.....	31
1.4.1.1. Informations de base sur le WEAP.....	31
1.4.1.2. Contexte d'utilisation du WEAP.....	32
CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DE LA REGION D'ETUDE.....	36
2.1. Caractéristiques socioéconomiques du bassin du Kébir-Rhumel.....	36
2.1.1. Population.....	36
2.1.2. Agriculture.....	37
2.1.3. Industrie.....	37
2.1.4. Ressources et besoins en eau.....	37
2.1.4.1. Ressources superficielles	37
2.1.4.2. Ressources souterraines.....	38
2.1.5. Besoins en eau.....	38
2.1.6. La pollution des eaux.....	39
2.1.7. Les rejets et leurs impacts sur les écoulements d'étiage.....	39
2.2. Caractéristiques naturelles du grand bassin Kébir-Rhumel.....	40
2.2.1. Chevelu hydrographique.....	40
2.2.2. Principaux oueds.....	41
2.2.3. Hydrologie.....	41
2.2.4. Pluviométrie.....	42
2.2.3. Evapotranspiration	43

2.2.6. Cadre géologique.....	44
2.2.6.1. Géologie régionale.....	44
2.2.6.1.1. Zones internes.....	44
2.2.6.1.2. Zones médianes (les flyschs)	44
2.2.6.1.3. Zones externes.....	45
<i>Les séries ultra-telliennes (Delga, 1969)</i>	45
a) <i>Séries telliennes sensu stricto</i>	45
b) <i>Séries péni-telliennes et les unités méridionales à nummulites</i>	46
2.2.7. Cadre hydrogéologique.....	46
2.2.7.1. Domaine des Hautes-Plaines sud-constantinoises (DI),	46
2.2.7.2. Bassin néogène de Constantine-Mila (DII),	47
2.2.7.3. Domaine des « nappes » tectoniques de Djemila (DIII),	47
2.2.7.4. Domaine de la dorsale kabyle et des massifs gréseux numidiens (DIV).....	47
2.2.7.5. Domaine du socle granitique et cristallophyllien de la petite Kabylie d'El Milia (DV)	47
2.3. Caractéristiques naturelles du Rhumel au sens strict.....	49
2.3.1. Caractéristiques géologiques.....	49
2.3.1.1. Trias.....	49
2.3.1.2. Jurassique.....	49
2.3.1.3. Crétacé.....	50
a. Crétacé inférieur.....	50
b. Crétacé supérieur.....	51
2.3.1.4. Cénozoïque.....	51
a. Paléogène.....	51
b. Néogène.....	51
2.3.1.5. Miopliocène continental.....	51
2.3.1.6. Quaternaire.....	53
2.3.2. Caractéristiques hydroclimatologiques.....	53
2.3.2.1. Précipitations.....	53
2.3.2.1.1. Précipitations moyennes mensuelles.....	54
2.3.2.1.2. Précipitations moyennes annuelles.....	54
2.3.2.2. Températures.....	55
2.3.2.3. Relation températures-précipitations.....	56
2.3.2.4. Le bilan hydrologique.....	57
2.3.2.5. Calcul de l'évapotranspiration.....	58
2.3.2.5.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	58
2.3.2.5.2. Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)	59
2.3.2.6. Interprétation du bilan hydrique.....	60
2.3.2.6.1. Exploitation du bilan hydrologique	60
a) Ruissellements (R)	61
b) Infiltration (I)	61
2.3.3. Caractéristiques hydrogéologiques	62
2.3.3.1. Aquifère d'Oued Rhummel.....	62
2.3.3.2. Aquifère de la région de Constantine.....	63
2.4. Conclusion.....	64
CHAPITRE 3 : MODELISATION ET SIMULATION DE LA DEMANDE EN EAU - WILAYA DE CONSTANTINE.....	67
3.1. Aperçu sur la zone d'étude.....	67
3.2. Etat hydraulique de la wilaya de Constantine en 2010.....	69

3.2.1 Mobilisation des ressources en eau	69
3.2.1.1. Ressources superficielles	69
a. Barrages.....	69
b. Retenues collinaires.....	69
3.2.1.2. Ressources souterraines.....	69
3.2.2. Alimentation en eau potable.....	69
3.2.3. Situation de l’AEP dans chaque commune.....	70
3.2.3.1. Commune de Constantine.....	70
3.2.3.2. Commune de Hamma Bouziane	71
3.2.3.3. Commune Ibn Ziad.....	71
3.2.3.4. Commune Ouled Rahmoune.....	71
3.2.3.5. Commune d’El Khroub.....	71
3.2.3.6. Commune d’Ain Abid.....	72
3.2.3.7. Commune de Ben Badis.....	72
3.2.3.8. Commune d’Ain Smara.....	72
3.2.3.9. Commune de Didouche Mourad	72
3.2.3.10. Commune de Zighoud Youcef.....	72
3.2.3.11. Commune de Messaoud Boudjeriou.....	72
3.2.3.12. Commune de Beni Hamidene.....	72
3.2. Modélisation de la demande en eau de la wilaya de Constantine.....	77
3.3.1. Water Evaluation And Planning system.....	77
3.3.1.2. Analyse du scénario.....	79
3.3.1.2.1. Capacité de gestion de la demande.....	80
3.3.1.2.2. Effets environnementaux.....	80
3.3.1.3. Facilité d'utilisation.....	80
3.3.1.4. Gestion de l'eau urbaine.....	81
3.3.1.5. Etapes opérationnelles.....	81
3.3.1.6. Le module d'hydrologie physique de WEAP.....	81
3.3.1.7. Le système de gestion : le module d'attribution.....	83
3.3.1.7.1. Demandes en eau.....	83
3.3.1.7.1.1. Priorités de la demande et préférences d'approvisionnement.....	84
3.3.1.8. Méthodologie.....	84
3.3.2. Calibration du modèle.....	85
3.3.2.1. Données utilisées.....	85
3.3.2.2. Calibrage des sites de ressources en eau.....	86
3.3.2.2.1. <i>Ressources souterraines</i>	86
3.3.2.2.1.1. <i>Approvisionnement pour l’AEP</i>	86
3.3.2.2.1.2. <i>Approvisionnement pour l’irrigation</i>	86
3.3.2.2.1.3. <i>Approvisionnement pour l’industrie</i>	87
3.3.2.2.2. <i>Eaux de surface</i>	88
3.3.2.2.2.1. <i>Barrages</i>	88
3.3.2.2.2.2. <i>Retenues collinaires</i>	89
3.3.2.3. Calibrage des sites de demande en eau.....	90
3.3.2.3.1. Sites de demande urbains.....	90
3.3.2.3.2. Sites de demande agricoles.....	90
3.3.2.3.3. Sites de demande industriels.....	91
3.3.2.4. Priorités des sites de demande et préférences des sites de ressources.....	93
3.3.2.5. Calibrage des liens de transmission.....	93
3.3.2.6. Schématisation du modèle conceptuel.....	94

3.3. Résultats et discussion.....	96
3.3.3.1. Modèle de référence « Comptes courants »	96
3.3.3.2. Scénario de référence.....	96
3.3.3.3. Simulation des scénarios “Et qu'est-ce qui se passerait si ? ”.....	98
3.3.3.3.1. Scénario 1 : Croissance démographique.....	100
3.3.3.3.2. Scénario 2 : augmentation de la superficie irriguée des cultures.....	100
3.3.3.3.3. Scénario 3 : Diminution de la consommation de base d'eau potable.....	101
3.3.3.3.4. Scénario 4 : réduction de la consommation élémentaire d'eau d'irrigation...	102
3.3.3.3.5. Scénario 5 : Augmentation de la consommation d'eau pour l'industrie.....	102
3.4. Conclusion.....	104

CHAPITRE 4 : MODELISATION ET SIMULATION DE LA DEMANDE EN EAU - SOUS-BASSIN DU BOUMERZOUG.....107

4.1. Présentation de la zone d'étude.....107

4.2. Audit hydraulique du bassin versant de Boumerzoug de 2006.....109

4.2.1. Ressources mobilisées.....109

4.2.1.1. Situation de l'AEPI.....109

4.2.1.1.1. AEP Constantinois

4.2.1.1.2. Commune d'El Khroub.....109

4.2.1.1.3. Commune Ouled Rahmoune.....109

4.2.1.1.4. Commune Ain Abid

4.2.1.1.5. Commune de Ben Badis.....110

4.2.1.1.6. Commune de Sigus.....110

4.2.1.1.7. Nappe d'Ain Kercha.....110

4.2.1.1.8. Communes de Ain M'lila et Ouled Gacem.....110

4.2.1.2. Situation de l'irrigation.....110

4.3. Modélisation de la demande en eau du sous-bassin du Boumerzoug112

4.3.1. Méthodologie.....112

4.3.2. Calibration du modèle

4.3.3. Ensembles de données

4.3.4. Calibrage des sites de ressources en eau.....113

4.3.4.1. Ressources souterraines.....113

4.3.4.1.1. Approvisionnement pour l'AEP.....113

4.3.4.1.2. Approvisionnement pour l'irrigation.....113

4.3.4.1.3. Approvisionnement pour l'industrie.....113

4.3.4.2. Eaux de surface.....115

4.3.4.2.1. Barrages.....115

4.3.4.2.2. Retenues collinaires.....116

4.3.5. Calibrage des sites de demande en eau.....117

4.3.5.1. Sites de demande urbains.....117

4.3.5.1.1. Croissance démographique et l'alimentation en eau potable.....117

4.3.5.2. Sites de demande agricoles

4.3.5.3. Sites de demande industriels.....117

4.3.5.4. Priorités des sites de demande et préférences des sites de ressources..119

4.3.5.4. Calibrage des liens de transmission

4.3.5.5. Schématisation du modèle conceptuel.....120

4.3.5.6. Modèle des comptes courants.....121

4.3.5.6.1. Scénario de référence.....	122
4.3.5.6.1. Scénarios “Et qu'est-ce qui se passerait si ? ”	124
4.3.5.6.1.1. Sc1 : Croissance démographique.....	124
4.3.5.6.1.2. Sc2 : Augmentation de la superficie des terres irriguées.....	125
4.3.5.6.1.3. Sc3 : Diminution de la consommation de base d’AEP.....	126
4.3.5.6.1.4. Sc4 : Réduction de la consom. élém. d'eau d'irrigation	127
4.3.5.6.1.5. Sc5 : Augmentation de la consommation d'eau pour l'industrie....	128
4.3.5.7. Discussion.....	129
4.4. Conclusion.....	130
CONCLUSION GENERALE.....	133
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	137
ANNEXES.....	151

LISTE DES FIGURES

Figure.1.1. Complexité des problèmes de l'eau dans le monde arabe.....	9
Figure.1.2. Distribution des précipitations moyennes en méditerranée.....	9
Figure.1.3. Indice d'exploitation des ressources en eau renouvelables	14
Figure.1.4. Sources d'approvisionnement en eau actuelles des pays méditerranéens.....	15
Figure.1.5. Evolution des ressources en eau par habitant dans les pays de Sud et de l'Est de la méditerranée entre 2000 et 2050.....	15
Figure.1.6. Représentation schématique de la gestion intégrée des ressources en eau.....	22
Figure.1.7. Quatre dimensions de la durabilité de la CDD de l'ONU, 1995	25
Figure.1.8. capacité institutionnelle pour mener à bien diverses fonctions inspirées de la GIRE.....	28
Figure.1.9. Caractérisation du bassin hydrographique (a) pré- et (b) post-développement qui met en évidence les implications de l'infrastructure des ressources en eau sur le cycle hydrologique	37
Figure.2.1. Communes et agglomérations du Kébir Rhumel.....	40
Figure.2.2. Chevelu hydrographique du BV du Kébir-Rhumel.....	44
Figure.2.3. Carte des sous bassins du Kébir Rhumel	45
Figure.2.4. Extrait de la carte des écoulements du mois de décembre 2007.....	46
Figure.2.5. Extrait de la carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien.....	46
Figure.2.6. Extrait de la carte de précipitations du mois de décembre 2007.....	47
Figure.2.7. Extrait de la carte des zones de l'ETP annuelle moyenne de l'Est algérien.....	47
Figure.2.8. Extrait de la carte d'évaporation potentielle moyenne du mois de décembre	48
Figure.2.9. Les grands domaines hydrogéologiques du Kébir-Rhumel.....	52
Figure 2.10. Coupe interprétative dans la région de Constantine	56
Figure 2.11. Coupe interprétative dans la région d'Ain M'lila	56
Figure 2.12. Corrélation lithostratigraphique de la région de Constantine	56
Figure.2.13. Précipitation moyenne mensuelle.....	58
Figure.2.14. Répartition saisonnière de la pluie.....	58
Figure.2.15. Représentation de la précipitation moyenne annuelle.....	59
Figure.2.16. Températures moyennes mensuelles.....	59
Figure.2.17. Diagramme ombrothermique durant la période 1979-2008.....	60
Figure.2.18. Carte climatique de la wilaya de Constantine.....	61
Figure.2.19. Bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite.....	64
Figure.2.20. Principaux systèmes aquifères dans le bassin du Kébir-Rhumel.....	66
Figure.3.1. Communes de la wilaya de Constantine.....	71
Figure.3.2. Schéma synoptique de distribution de la ville de Constantine.....	75
Figure.3.3. Schéma synoptique d'AEP de la commune de Hamma Bouziane.....	77
Figure.3.4. Schéma synoptique d'AEP de la commune d'Ibn Ziad.....	77
Figure.3.5. Schéma synoptique d'AEP de la commune Ouled Rahmoune.....	78
Figure.3.6. Schéma synoptique d'AEP de la commune El Khroub.....	78
Figure.3.7. Schéma synoptique d'AEP de la commune Ibn Badis.....	79
Figure.3.8. Schéma synoptique d'AEP de la commune Ain Smara.....	79
Figure.3.9. Schéma synoptique d'AEP de commune de Didouche Mourad.....	79
Figure.3.10. Schéma synoptique d'AEP de la commune de Zighoud Youcef.....	80
Figure.3.11. Schéma synoptique d'AEP de la commune de Messaoud Boudjeriou.....	80
Figure.3.12. Schéma synoptique d'AEP du Chef-lieu de la commune de Beni Hamidene.....	80
Figure.3.13. Composante hydrologie physique de WEAP21	86
Figure.3.14. Alimentation en eau potable en Mm3 / mois	90
Figure.3.15. Alimentation en eau potable à partir des eaux souterraines en Mm3/ mois.....	91
Figure.3.16. Approvisionnement en eau à partir du Miopliocène et du Cénomanién.....	91
Figure.3.17. Approvisionnement pour l'irrigation à partir des eaux souterraines.....	92

Figure.3.18. Approvisionnement pour l'industrie (eaux souterraines).....	92
Figure.3.19. Capacité des barrages.....	93
Figure.3.20. Alimentation en eau potable en Mm ³ / mois depuis les barrages.....	93
Figure.3.21. Approvisionnement pour l'irrigation à partir des retenues en Mm ³ /m.....	94
Figure.3.22. Nombre d'habitants par commune (ONS, 2008)	95
Figure.3.23. Taux d'accroissement de la population.....	95
Figure.3.24. Consommation annuelle en m ³ /cap.....	95
Figure.3.25. Surfaces irriguées en % de la surface totale.....	96
Figure.3.26. Consommation annuelle en eau pour l'industrie.....	96
Figure.3.27. Modèle conceptuel de la GRE dans la wilaya de Constantine.....	98
Figure.3.28. Modèle simplifié de GRE de la wilaya de Constantine.....	99
Figure.3.29. Demande en eau - tous les sites (Année des comptes courants 2007).....	100
Figure.3.30. Demande en eau potable (AEP seulement).....	102
Figure.3.31. Demande en eau potable -Tous les sites - Scénario de référence 2008- 2027...	102
Figure.3.32. Scenario1-accroissement de la population (2008-2027).....	104
Figure.3.33. Scénario 2-augmentation de la superficie irriguée des cultures (2008-2027)...	104
Figure.3.34. Scénario 3 : diminution de la consommation de base d'eau potable.....	105
Figure.3.35. Scénario 4-réduction de la consommation élémentaire d'eau d'irrigation.....	106
Figure.3.36. Scénario 5-augmentation de la consommation d'eau pour l'industrie.....	106
Figure.3.37. Aperçu de la demande en eau en 2027 pour les cinq scénarios.....	107
Figure.3.38. Représentation des cinq scénarii (2008-2027).....	108
Figure.4.1. MNT du sous-bassin du Boumerzoug dans Kébir-Rhumel.....	107
Figure.4.2. Divisions administratives dans le Kébir-Rhume.....	108
Figure.4.3. Audit de la situation hydraulique du Boumerzoug de l'année 2006.....	111
Figure.4.4. Alimentation en eau potable à partir des eaux souterraines en Mm ³ / mois.....	114
Figure.4.5.Approvisionnement à partir des niveaux aquifères.....	114
Figure.4.6. Approvisionnement pour l'industrie.....	115
Figure.4.7. Débits entrants aux retenues dans le Boumerzoug en m ³ /s.....	116
Figure.4.8. Capacité des retenues collinaires dans le Boumerzoug en m ³	116
Figure.4.9. Nombre d'habitants par commune	118
Figure.4.10. Taux d'accroissement de la population.....	118
Figure.4.11. Surfaces irriguées en % de la surface totale.....	118
Figure.4.12. Demande en eau industrielle.....	119
Figure.4.13. Schéma du modèle conceptuel de distribution des ressources en eau du bassin versant de Boumerzoug dans la GUI de WEAP.....	121
Fig.4.14. Demande en eau pour tous les sites (Année des comptes courants 2007).....	122
Fig.4.15. Toutes les demandes de sites de demande d'eau (Scénario de référence).....	123
Figure.4.16. Scenario1 : accroissement de la population.....	125
Figure.4.17. Scénario 2 : Augmentation de la superficie des terres irriguées.....	125
Figure.4.18. Scénario 3 : Diminution de la consommation d'eau potable élémentaire.....	126
Figure.4.19. Scénario 4 : Réduction de la consommation d'eau d'irrigation élémentaire.....	127
Figure.4.20. Scénario 5 : Augmentation de la consommation d'eau pour l'industrie.....	128
Figure.4.21. Représentation des cinq scenarii (2008-2037).....	130

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.2.1. Capacité des Barrages du Kébir Rhumel et leurs volumes régularisables.....	42
Tableau.2.2. Coordonnées de la station d'Ain El Bey.....	57
Tableau.2.3. Calcul de l'ETP selon Thornthwaite.....	62
Tableau.2.4. Evapotranspiration réelle.....	63
Tableau.3.1 : Variation mensuelle des transmissions entre les nœuds	97
Tableau.4.1.Variation mensuelle des transmissions entre les nœuds	124

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Pour tirer parti des connaissances empiriques et des méthodes traditionnelles dans les systèmes de ressources en eau, les chercheurs doivent établir de nouvelles relations entre les processus eau-alimentation et eau-énergie en utilisant les diverses sources de données existantes et nouvellement observées. À des fins de gestion, il y a un besoin urgent de réformer les institutions actuelles, qui se concentrent sur des secteurs individuels, et d'explorer une gestion coordonnée de la nourriture, de l'énergie et de l'eau partout où cela est nécessaire (Cai *et al.*, 2018)

La gestion de l'eau, le changement et la variabilité climatiques, ainsi que leurs nombreuses interactions et l'étendue des impacts hydrologiques, économiques, sociaux, environnementaux et politiques qui en découlent dans le temps et l'espace sont devenus une préoccupation mondiale croissante. Les incertitudes qui nous empêchent de prévoir les futurs impacts multidimensionnels et multisectoriels du changement climatique rendent les alternatives politiques, la gestion, la gouvernance et les décisions de développement, ainsi que les choix d'investissement sur les stratégies d'adaptation les plus difficiles dans les meilleures circonstances. En conséquence, les facteurs non climatiques sont devenus plus pertinents. L'utilisation des ressources et la gouvernance - c'est-à-dire la prise de décision par de multiples acteurs ayant des intérêts nombreux et dissemblables, et les institutions formelles et informelles qu'ils forment - sont parmi les plus importantes (Tortajada, 2016 ; Tortajada *et al.*, 2017).

L'eau est une ressource essentielle et limitée en particulier dans la région semi-aride méditerranéenne. Atteindre une gestion des ressources en eau durable est un objectif global commun dans cette région. Cela exige un équilibre entre les besoins de la population et la protection des ressources naturelles, sans nuire à l'intégrité du cycle hydrologique ou des systèmes écologiques qui en dépendent, de sorte que ces ressources en eau peuvent continuer à offrir des avantages pour l'amélioration des moyens de subsistance des gens et leur qualité de vie, de réduire la pauvreté et favoriser la croissance économique (Jalala, 2005).

En matière de gestion des ressources en eau, l'approche traditionnelle, sectorielle et fragmentée, a souvent poussé les instances gouvernantes à représenter des intérêts antagoniques. Trop souvent, des objectifs d'action ont été définis sans prendre en compte les implications pour les autres usagers de l'eau et sans consultation au-delà des limites sectorielles et institutionnelles. Par ailleurs, la gestion intégrée de l'eau par bassin versant est un processus qui favorise la gestion coordonnée de l'eau et des ressources connexes à l'intérieur des limites d'un bassin versant en vue d'optimiser, de manière équitable, le bien-être socio-économique qui en résulte, sans pour autant compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux (Partenariat Mondial de l'Eau, 2000).

Dans les pays du pourtour méditerranéen, les ressources en eau sont limitées et inégalement réparties. Les pays de la rive Sud ne reçoivent que 10 % du total des précipitations. La population en situation de pénurie, c'est-à-dire disposant de moins de 500 m³/hab/an, pourrait passer dans le même temps de 60 à 80 millions d'habitants. L'agriculture,

qui reste le premier consommateur d'eau, prélève 82 % des volumes sur les rives Sud et Est du bassin. D'après les projections récentes du Plan Bleu (scénario tendanciel), la demande en eau pourrait encore s'accroître de 50 km³ d'ici 2025 pour atteindre 330 km³/an (pays du Sud et Est). Pour répondre aux besoins croissants en eau, les stratégies nationales continuent à privilégier l'accroissement de l'offre en eau. (Plan Bleu, 2009)

Comme d'autres pays de la région méditerranéenne, l'Algérie est d'ores et déjà en situation de « pénurie » d'eau avec environ 350 m³/habitant/an et la demande globale en eau, a été multipliée par quatre en quarante ans et elle dépasse actuellement la moitié des ressources naturelles mobilisables (Plan Bleu, 2010).

En Algérie, au cours des trente dernières années, la forte poussée démographique, la croissance rapide des villes et la multiplication des activités industrielles ont engendrer des besoins sans cesse croissants en eau, donnant lieu à des situations concurrentielles, voire parfois conflictuelles, entre la ville, l'industrie et l'agriculture (Mutin, 2000)

Vulnérable aux changements climatiques, l'Algérie a subit durant les 30 dernières années une sécheresse intense et persistante, caractérisée par un déficit pluviométrique évalué à 30% (Conférence de haut niveau sur l'eau pour l'agriculture et l'énergie en Afrique, 2008).

Selon le rapport de 2002, du Plan Cadre des Nations Unies pour la Coopération au Développement UNDAF (2002 – 2006), les ressources en eau exploitables en Algérie, sont estimées à 12,9 milliards de m³, dont 6,9 d'eaux souterraines et 6 milliards de m³ d'eaux de surface. L'utilisation de l'eau concerne essentiellement l'alimentation en eau potable (AEP), l'irrigation et l'industrie. (UNDAF, 2002).

Selon le Plan Bleu, la région littorale du Nord, qui regroupe les bassins méditerranéens et ne représente que 7% de la surface du territoire national, accapare 90% du total des écoulements superficiels du pays (estimée à 12,4 milliards de m³ par an), le reste étant partagé entre les Hauts Plateaux pour 6% et les bassins sahariens pour 4%. En outre, les précipitations étant, en moyenne, deux fois plus importantes à l'est qu'à l'ouest, le même déséquilibre se retrouve dans les potentialités hydriques de ces régions (Plan Bleu, 2010)

On peut évaluer à 14,4 milliards de m³ le volume total annuel des eaux renouvelables des nappes souterraines du littoral et des hauts plateaux, réalimentées directement par les précipitations. Mais une partie seulement (10 milliards maximum) de ce volume est exploitable, car physiquement et techniquement mobilisable. Deux autres types de ressources se rajoutent aux eaux renouvelables : les eaux fossiles des grandes nappes profondes du Sahara septentrional et les eaux « non conventionnelles » fournies par les stations de dessalement d'eau de mer récemment installées (Plan Bleu, 2010)

La politique algérienne de gestion de l'eau est, davantage axée sur la mobilisation de nouvelles ressources que sur la recherche d'une meilleure utilisation des ressources déjà disponibles. Les associations d'usagers, et d'une façon générale la société civile, sont encore peu organisées et la consultation de leurs représentants des usagers demeure quasi-inexistante en Algérie (Plan Bleu, 2010)

La recherche est sollicitée pour apporter son concours afin d'effectuer des analyses permettant une meilleure gestion intégrée des ressources, tel que l'analyse des coûts, les aspects institutionnels, la participation de l'ensemble des acteurs, les implications environnementales liées au traitement et à la régénération des eaux usées, avec un développement accru de leur réutilisation.

Il est anormale, en effet, compte tenu des prévisions de la demande urbaine en eau potable en l'an 2000 et 2025 qui seront respectivement, de l'ordre de 2,16 milliards de m³ et de 3,9 milliards de m³ en moyenne que des agglomérations aussi importantes qu'Alger et Constantine vont connaître des déficits en alimentation en eau potable qui engendreront des conflits entre zones urbaines et arrières pays producteurs

Le cas de Constantine, troisième ville du pays dont le volume de consommation annuelle est de l'ordre de 29,2 millions de m³, alors que ses besoins sont estimés à 58 millions de m³. Ce qui donne un déficit important de l'ordre de 50 %. Déficience des infrastructures et pollution sont également des causes de pertes d'eau. La rareté de l'eau, particulièrement dans un pays semi-aride comme l'Algérie, oblige à définir une approche globale des ressources en eau et gérer son utilisation dans un cadre planifié. Les problèmes d'Alger, d'Oran ou de Constantine en eau ne peuvent être solutionnés à terme que grâce à une politique hardie qui combine l'exploitation des eaux souterraines et superficielles, la maîtrise de l'épuration des eaux usées et pourquoi pas du dessalement de l'eau de mer pour les besoins industriels (Kerdoun, 1998).

Le Partenariat Mondial de l'Eau, définit la GIRE comme un processus qui favorise le développement coordonné et la gestion des ressources en eau, de la terre et des ressources connexes, afin de maximiser le bien-être économique et social de façon équitable sans compromettre la durabilité d'écosystèmes vitaux (TAC-GWP, 2000).

C'est dans ce contexte que viens le choix de faire comme étude de cas, la gestion intégrée des ressources en eau de la vallée du Rhumel, qui est un défi complexe, qui exige une nouvelle approche, si la gestion doit être fondée sur des résultats scientifiques solides, afin d'optimiser et de conserver les ressources disponibles en eau.

Pour atteindre nos objectifs, nous avons réalisé plusieurs travaux, à savoir : la collecte et la structuration des données caractérisant la zone d'étude, l'introduction et le traitement des données et la simulation de différents scénarios de gestion liés à l'augmentation de la demande en eau.

La confrontation des résultats des différentes méthodes débouchera sur des recommandations pour l'élaboration d'un modèle prévisionnel pour la gestion des ressources en eau dans la vallée du Rhumel et pour l'étude des différents scénarios d'évolution de ce bassin.

GRANDES LIGNES DE LA THESE

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le problème de l'eau en Afrique, dans le monde arabe, en méditerranée et en Algérie dans sa première partie. Dans la partie suivante la gestion et la planification a été abordée de manière générale. Après, c'est l'évolution historique du nouveau paradigme de la gestion intégrée de ressources en eau GIRE qui a été décrite, depuis les premiers précurseurs dans les années 30, aux états unies jusqu'à l'établissement des principes de Dublin en 1992 et l'application de la GIRE dans plusieurs régions du monde. Dans la partie suivante, on a présenté une synthèse bibliographique sur les systèmes d'aide à la décision utilisés dans le contexte de la GIRE et les Systèmes d'Aide à la Décision (SAD) les plus utilisés dans le monde avec quelques exemples de bassins et de bassins transfrontaliers étudiés grâce aux SAD. Et enfin, on a présenté une bibliographie sur le WEAP qui représente le SAD utilisé dans le cadre de notre recherche.

Le second chapitre décrit les caractéristiques socioéconomiques du grand bassin du Kébir Rhumel qui est l'un des principaux bassins de la région du Constantinois-Seybouse-Mellègue, dans son contexte socioéconomique d'une part et dans son contexte naturel d'autre part. Ensuite, il aborde la description de la vallée du Rhumel au sens strict, en décrivant une géologie plus détaillée ensuite par la présentation d'une brève étude hydroclimatologique et enfin, par une description hydrogéologique sur la base des études déjà réalisées.

Le troisième chapitre dans sa première partie, un bref aperçu sur la wilaya de Constantine a été présenté, ensuite un diagnostic sur l'état du système hydraulique des différentes communes de la wilaya de Constantine en 2010 a été décrit, en vue de montrer le côté réel et très complexe des différentes connexions entre les réseaux d'AEP des différentes communes de Constantine. Cependant, dans la deuxième partie du présent chapitre, qui représente le côté opérationnelle de la thèse, on a présenté une bibliographie complémentaire sur le WEAP21 qui est le SAD utilisé ainsi que sa méthodologie. Ensuite on a abordé la manière avec laquelle on a structuré les données utilisées pour le calibrage du modèle, le choix des hypothèses clés de référence et le choix des hypothèses de chacun des 5 scénarios simulés. Afin, d'aboutir au choix du meilleur scénario alternatif de gestion de l'eau de la wilaya de Constantine sur une période de 20 années.

Le quatrième chapitre présente une étude d'un cas de modélisation de la demande en eau du plus haut sous-bassin du grand bassin du Kébir Rhummel qui est le Bumerzoug, se trouvant dans le sud avec un climat semi-aride et un contexte socioéconomique, qui est le plus développé dans tout le bassin. Dans ce cas l'étude de la demande en eau respecte les limites naturelles du sous bassin et s'adapte plus à la recommandation des principes de la GIRE. Cependant, il faut rappeler que le choix du sous-bassin a été pris aussi selon la disponibilité de données sur la ressource et la demande en eau pour les trois principaux secteurs : l'AEP, l'agriculture et l'industrie. Ensuite on a présenté les données et les paramètres supposés et utilisés pour le calibrage du modèle, le choix des hypothèses clés de référence et le choix des hypothèses de chacun des 5 scénarios simulés. Afin d'aboutir au choix du meilleur scénario alternatif de gestion de l'eau de du Bumerzoug, sur une période de 30 années. Et pour voir aussi l'équilibre entre la demande et les potentialités des ressources en eau du sous bassin.

CHAPITRE 1

~

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur le problème de l'eau en Afrique, dans le monde arabe, en méditerranée et en Algérie dans sa première partie. Dans la partie suivante la gestion et la planification a été abordée de manière générale. Après, c'est l'évolution historique du nouveau paradigme de la gestion intégrée de ressources en eau GIRE qui a été décrite, depuis les premiers précurseurs dans les années 30, aux états unies jusqu'à l'établissement des principes de Dublin en 1992 et l'application de la GIRE dans plusieurs régions du monde. Dans la partie suivante, on a présenté une synthèse bibliographique sur les systèmes d'aide à la décision utilisés dans le contexte de la GIRE et les SAD les plus utilisés dans le monde avec quelques exemples de bassins et de bassins transfrontaliers étudiés grâce aux SAD. Et enfin, on a présenté une bibliographie sur le WEAP qui représente le SAD utilisé dans le cadre de notre recherche.

1.1.1. L'eau en Afrique

L'Afrique est un continent avec de grandes disparités dans la disponibilité de l'eau au sein et entre les pays. La fréquence des sécheresses a augmenté au cours des 30 dernières années, entraînant des coûts sociaux, économiques et environnementaux importants. Il n'est pas surprenant que l'approvisionnement en eau dans les terres arides, qui occupent environ 60% de la superficie totale de l'Afrique, soit soumis à des contraintes croissantes. Le taux d'accroissement de la population en Afrique, qui est encore exacerbé par le déplacement de la population vers les villes, est une question fondamentale qui constitue une menace majeure pour l'élimination de la pauvreté en eau.

Les extrêmes de variabilité ont été plus importants en Tunisie, en Algérie, dans le bassin du Nil et dans l'extrême sud du continent. Cependant, en 1995, la Libye, la Tunisie, l'Algérie, le Rwanda, le Burundi et l'Égypte étaient confrontés à des pénuries d'eau, soit à moins de 1667 m³ de ressources en eau renouvelables par habitant et par an.

Néanmoins, la guerre civile reste un problème endémique dans une grande partie de l'Afrique qui a un double impact sur le développement des ressources en eau, retardant la mise à disposition adéquate d'infrastructures pour les communautés les plus pauvres et retardant les conflits entre les pays touchés au cours des dernières décennies, le Mozambique, la Somalie, l'Éthiopie, l'Érythrée, la Sierra Leone, le Soudan, l'Angola, l'Algérie, l'Ouganda, le Rwanda, le Zaïre et le Libéria.

Cependant, les aquifères tamponnent les précipitations et fournissent des sources fiables d'approvisionnement en eau potable pendant les années sèches. En effet, plus de 75% de la population africaine utilise les eaux souterraines comme principale source d'approvisionnement en eau potable. Cela est particulièrement vrai dans les pays d'Afrique du Nord, tels que la Libye, la Tunisie et certaines parties de l'Algérie et du Maroc, et dans des pays d'Afrique australe comme le Botswana, la Namibie et le Zimbabwe (Mwanza, 2003, Jones *et al.*, 2004)

1.1.2. L'eau au Moyen-Orient et en Afrique du Nord

Les États exportateurs de pétrole, notamment l'Arabie saoudite, les petites cités et les émirats du Golfe et la Libye, ont dépassé leurs ressources en eau douce renouvelables il y a quelques décennies et comptent sur une combinaison de dessalement, d'eaux usées réutilisées et d'exploration des eaux souterraines fossiles.

Les autres États de la région se répartissent principalement en deux groupes : ceux dotés de ressources en eau douce de surface plus importantes comme la Turquie, l'Égypte, le Soudan, l'Iran, l'Irak et le Liban et ceux qui dépendent des eaux souterraines, mais luttent pour mobiliser le type d'investissements nécessaires pour sécuriser de «nouvelles» sources d'eau à grande échelle comme la Jordanie, le Yémen, la Tunisie et l'Algérie. Cependant, certains pays comme le Maroc et la Syrie, sont basés à la fois sur les ressources en eau de surface et les eaux souterraines.

Alors que les pays du Golfe, en particulier l'Arabie Saoudite, possèdent le pourcentage le plus élevé d'installations de dessalement, Les pays en dehors du Golfe comme l'Algérie, l'Égypte, Israël, la Jordanie, la Libye et la Tunisie investissent de plus en plus dans le dessalement pour augmenter l'offre.

Les réseaux d'irrigation et de drainage souffrent de pénuries chroniques d'investissements, ce qui entraîne des pertes d'eau importantes du réseau de distribution. C'est notamment le cas lorsque le conflit a rendu les infrastructures d'irrigation publiques totalement inadéquates, comme dans la bande de Gaza, en Algérie et en Iraq (e.g. UNEP 2003).

La contribution des eaux souterraines est naturellement prédominante dans la majorité des pays de la zone aride qui n'ont pas de cours d'eau originaires des pays voisins, notamment lorsqu'il s'agit de ressources non renouvelables comme l'Arabie Saoudite, la Libye et l'Algérie (Puri *et al.*, 2008)

La répartition de la ressource totale montre que seuls 24% de la population (Irak, Soudan, Maroc et Libye) ont une dotation par habitant supérieure au seuil de rareté de 1000 m³, alors que l'Algérie, Oman, l'Égypte et la Syrie avec 44% de la population arabe, une dotation entre le seuil de rareté et le seuil critique 500 m³ / habitant / an.

En tenant compte uniquement des retraits, l'Irak est le seul pays dont l'allocation annuelle par habitant est de 2000 m³, soit 4 fois la moyenne mondiale. La plupart des pays, l'Égypte, l'Arabie Saoudite, le Soudan, Oman, les Emirats, la Syrie et la Libye ont une dotation entre le seuil de rareté et le seuil critique. Cela montre que la dotation de l'Algérien est la plus faible. (Zella, 2006, Puri, *et al.* 2008)

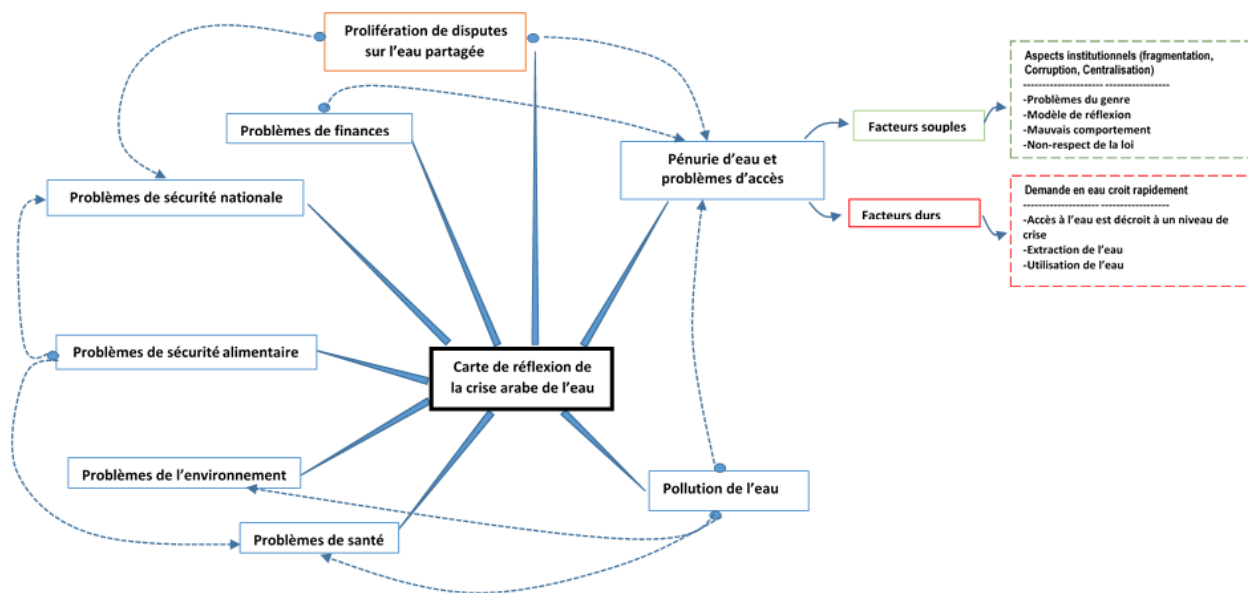


Figure.1.1. cartographie mentale complexité des problèmes de l'eau dans le monde arabe [notre traduction] (Hefny, 2006)

1.1.3. L'eau en méditerranée

Dans les pays autour du bassin méditerranéen, les ressources en eau sont limitées et inégalement réparties. Les pays de la rive sud ne reçoivent que 10% des précipitations totales. Les ressources en eau renouvelables naturelles sont estimées, en moyenne annuelle, à 1080 km³ / an dont 118 km³, soit 11% du total, proviennent de pays non méditerranéens.

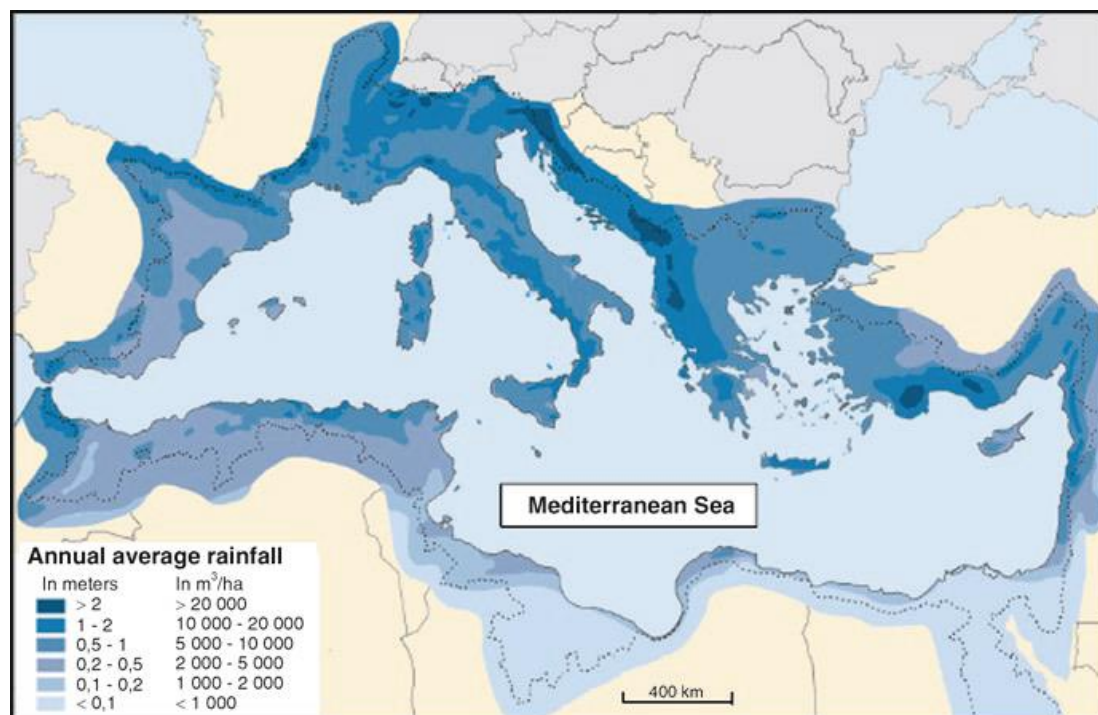


Figure.1.2. Distribution des précipitations moyennes en méditerranée (Plan Bleu, 2009)

Les stratégies nationales continuent à se concentrer sur l'augmentation de l'approvisionnement en eau, par la mise en œuvre de grands projets hydrauliques, le développement de transferts interrégionaux et internationaux, l'exploitation de ressources non conventionnelles non renouvelables telles que la réutilisation des eaux usées traitées, l'utilisation de l'eau de drainage agricole (Egypte), le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres en plein essor. Ces politiques ont donc atteint des limites physiques, économiques et environnementales.



Figure.1.3. Indice d'exploitation des ressources en eau renouvelables (pays entiers, et bassins versants, 2005) (Plan Bleu, 2009)

L'agriculture, qui reste le plus grand consommateur d'eau, absorbe 82% des volumes sur les rives sud et est du bassin. Les surfaces irriguées pourraient ainsi augmenter de 38 % au Sud et de 58 % à l'Est pour atteindre respectivement 9 millions ha et 8 millions ha d'ici 2030 (FAO). Les pressions quantitatives sur les ressources s'ajoutent aux impacts des rejets d'eaux usées urbaines, industrielles et agricoles (Plan Bleu, 2009).

Face à la croissance démographique et au développement économique, la demande en eau, c'est-à-dire la somme des prélèvements de ressources, y compris les pertes pendant le transport et l'utilisation et la production non conventionnelle telle que le dessalement ou la réutilisation des eaux usées, ont doublé depuis 1950 et atteint, en 2007, 280 km³ / an pour tous les pays riverains.

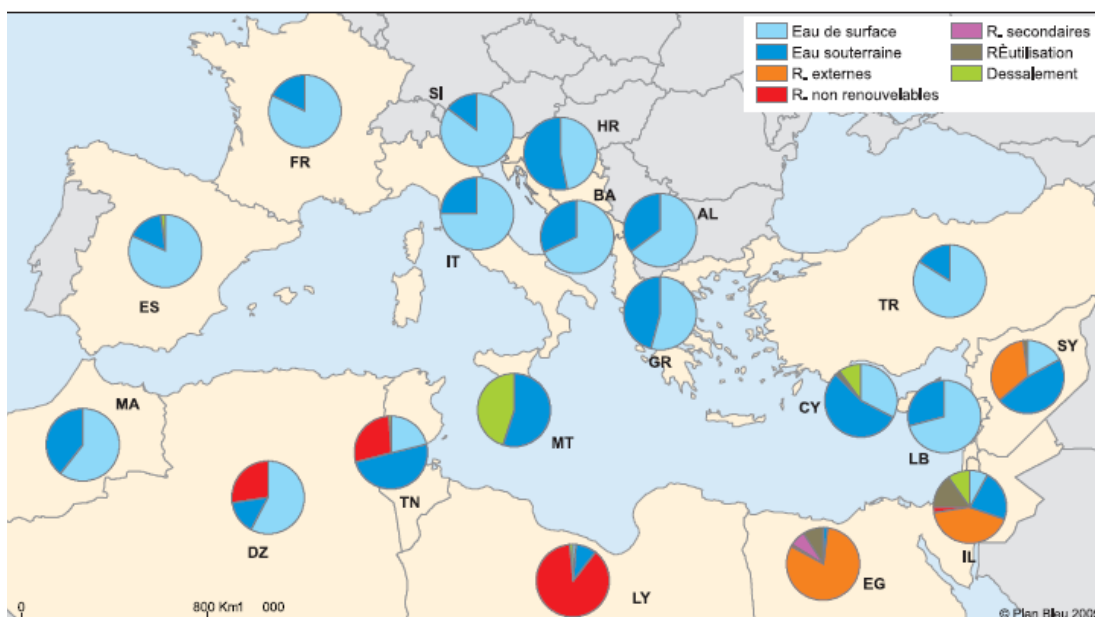


Figure.1.4. Sources d’approvisionnement en eau actuelles des pays méditerranéens (Plan Bleu, 2009)

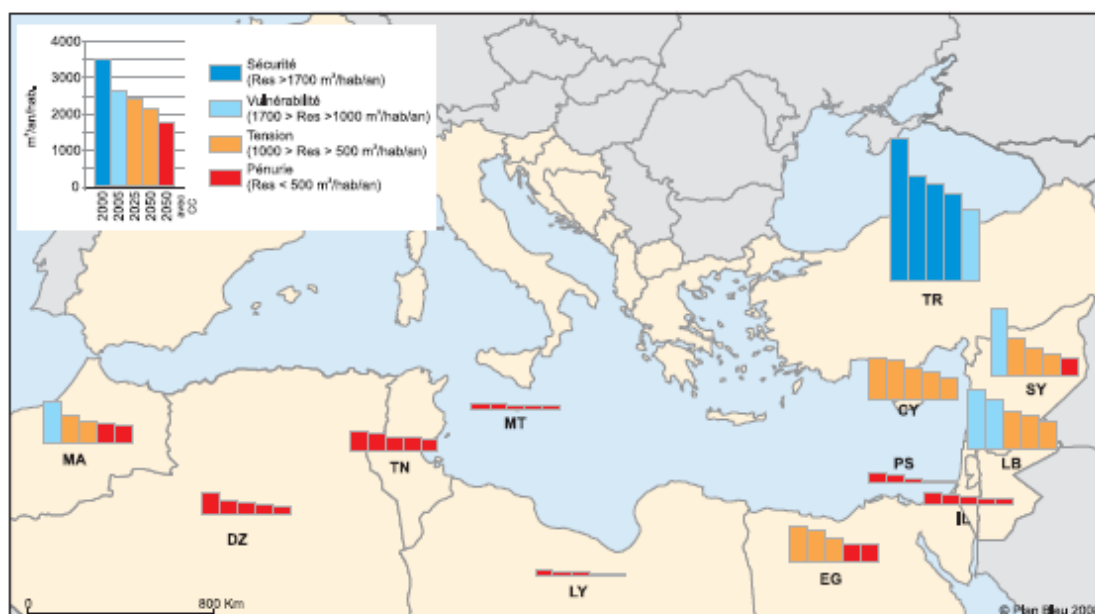


Figure.1.5. Evolution des ressources en eau par habitant dans les pays de Sud et de l’Est de la méditerranée entre 2000 et 2050 (Plan Bleu, 2009)

Actuellement, 400 millions de personnes vivent dans toute la région méditerranéenne et constituent un lourd fardeau pour les approvisionnements en eau. Le problème est aggravé par près de 200 millions de visiteurs internationaux chaque année, dont la majorité séjourne dans des zones côtières riveraines (Howard, 2011).

Actuellement, 8 des 12 pays du Sud et de l’Est (Algérie, Chypre, Egypte, Jordanie, Liban, Libye, Maroc, Territoires palestiniens, Syrie, Tunisie et Turquie) utilisent plus de 50% de leurs ressources en eau renouvelables. , avec deux pays (Territoires palestiniens et Libye) dépassant 100%. (Howard, 2011).

Les rendements d'utilisation de l'eau, malgré des progrès encourageants, sont loin d'être satisfaisants ; les pertes, les fuites de transport et les déchets sont estimés à environ 40% de la demande totale en eau (Plan Bleu, 2009).

Environ les deux tiers de l'eau fournie dans la région est utilisée pour l'irrigation (48% dans le nord et 82% dans le sud plus sec). Le reste est utilisé pour l'approvisionnement intérieur, l'industrie et le secteur de l'énergie. On estime que 20 millions de Méditerranéens sont toujours privés d'accès à l'eau potable, en particulier dans le sud et l'est (Howard, 2011).

En outre, avec environ 300 millions de touristes dans les régions côtières méditerranéennes, qui restent les premières destinations touristiques au monde, on peut s'attendre à une augmentation de la demande en eau potable (Plan Bleu, 2009).

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) dans son rapport de 2007a combiné 25 modèles climatiques mondiaux pour évaluer les impacts des changements climatiques en 2050 et 2100. Dans la région méditerranéenne, il a fourni une élévation de température de 2-3 ° C d'ici 2050, et 3-5 ° C en 2100. Les événements de pluie seront moins fréquents mais plus intenses, tandis que les sécheresses seront plus fréquentes et plus longues (Sahnoune *et al.*, 2013).

1.1.4. L'eau en Algérie

1.1.4.1. Ressources en eau exploitables

Selon le rapport 2002 du Plan Cadre de l'UNDAF (2002-2006), les ressources en eau exploitables en Algérie sont estimées à 12,9 milliards de m³, dont 6,9 milliards d'eaux souterraines et 6 milliards de m³ en eaux de surface. Les ressources souterraines et de surface mobilisées dans le nord du pays pendant les précipitations normales sont estimées à 3,8 milliards de m³, dont 55% pour l'agriculture, 34% pour l'eau potable et 11% pour l'industrie (UNDAF, 2002).

D'après la Conférence de haut niveau, les ressources en eau renouvelables internes s'élèvent à 12 milliards de m³ par an. Les ressources exploitables sont estimées à 7 500 millions de m³/an. La capacité totale des barrages dans les cinq bassins versants du pays, au nombre de 60 en 2008, est 6450 millions de m³. Le dessalement de l'eau de mer est pratiqué dans 23 stations d'une capacité de 127 millions de m³/an. La capacité de traitement des eaux usées installée est de 370 millions de m³/an. Ce chiffre passera à 600 millions de m³ / an en 2009, représentant une capacité d'élimination de 82%. Le volume total collecté en 2007 est estimé à 7 575 millions de m³, dont 65% pour l'irrigation (Conférence de haut niveau, 2008)

D'après les notes d'analyse du CIHEAM (Plan Bleu, 2010) à l'exception des eaux fossiles des eaux souterraines profondes du Sahara, les ressources en eau naturelles de l'Algérie dépendent principalement des précipitations, qui sont très inégalement réparties sur le territoire et caractérisées par de fortes irrégularités intra-annuelles et interannuelles.

Les volumes de précipitations sont très variables dans le temps : concentration sur quelques mois au Nord et quelques jours par an au Sud. Des années de fortes pluies peuvent être suivies de périodes de sécheresse aigue.

Ainsi, la région littorale nord, qui regroupe les bassins méditerranéens et ne représente que 7% du territoire national, représente 90% du ruissellement total du pays (estimé à 12,4 milliards de m³ par an). Le reste étant partagé entre les hauts-plateaux pour 6% et les bassins sahariens pour 4%. De plus, les précipitations sont en moyenne deux fois plus importantes à l'est qu'à l'ouest, le même déséquilibre se retrouve dans le potentiel hydrique de ces régions.

La prise en compte des flux susceptibles de fournir l'eau souterraine située au nord de l'Atlas saharien (région côtière et Hauts Plateaux) et alimentée par les précipitations, peut être estimée à 14,4 milliards de m³ de volume total annuel d'eau renouvelable. Mais seule une partie (10 milliards maximum) de ce volume est exploitable car physiquement et techniquement mobilisable.

Deux autres types de ressources s'ajoutent aux eaux naturelles renouvelables : - les eaux fossiles des aquifères profonds de la région nord du Sahara, dont le taux d'extraction maximal est actuellement fixé à 5 milliards de m³ par an. - les eaux «non conventionnelles» fournies par les usines de dessalement d'eau de mer récemment installées à Oran et Alger et qui se développeront sur le littoral algérien. Comme d'autres pays de la région méditerranéenne, l'Algérie est déjà dans une situation de «pénurie» d'eau avec environ 350 m³/habitant/an (Plan Bleu, 2010).

1.1.4.2. Demande en eau

En Algérie, au cours des trente dernières années, la forte croissance démographique, la croissance rapide des villes et la prolifération des activités industrielles ont conduit à des besoins en eau toujours croissants, créant des situations concurrentielles et parfois conflictuelles entre la ville l'industrie et l'agriculture (Mutin, 2000)

Il dépasse actuellement la moitié des ressources naturelles disponibles.

A ce rythme, les prélèvements atteindront probablement la limite des ressources renouvelables avant le milieu du siècle, ce qui est déjà le cas de plusieurs pays de la rive sud de la Méditerranée.

La demande en eau potable a considérablement augmenté en volume et en proportion.

Il représentait 16% de la demande totale d'eau en 1975. Il a depuis plus que doublé et se situe actuellement à 35%.

Au cours de la même période, la part de l'eau agricole est passée de 80 à 60%, tandis que celle de l'industrie a maintenu à peu près la même valeur de 3,5% (Plan Bleu, 2010).

1.1.4.3. Changement climatique

Vulnérable au changement climatique, l'Algérie a souffert au cours des 30 dernières années d'une sécheresse intense et persistante, caractérisée par un déficit pluviométrique estimé à 30% (Conférence de haut niveau, 2008).

Elle fait partie du point chaud de la Méditerranée, est très vulnérable aux changements climatiques. Dans son rapport de 2007, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a combiné 25 modèles climatiques mondiaux pour évaluer les impacts du changement climatique en 2050 et 2100 et prévoit une augmentation de la température moyenne de 0,8 ° C à 1,1 ° C, et une réduction des précipitations de 10% d'après les modèles régionaux avec les scénarios appliqués à l'Algérie pour la période 1990-2020. L'augmentation de l'évaporation et la diminution des précipitations accentueront la diminution de l'eau mobilisée dans les barrages et les eaux souterraines (Sahnoune *et al.*, 2013).

1.1.4.4. Politique algérienne de l'eau

La nouvelle politique algérienne de mobilisation, de transfert et de gestion des ressources en eau fait partie de la politique de développement régional, qui se fixe comme objectif de rééquilibrer le territoire de manière dynamique. C'est-à-dire le développement durable des hauts plateaux et du Sud. Atteindre cet objectif nécessite d'importants transferts et des ressources non conventionnelles, en particulier le dessalement de l'eau de mer (Conférence de haut niveau, 2008).

L'organisation de la gestion de l'eau en Algérie est sous l'autorité directe du Ministère des Ressources en Eau (MRE). Au niveau national, le MRE exerce ses prérogatives et missions en s'appuyant notamment sur des institutions publiques de compétence nationale dans les domaines : études et gestion de projets, gestion et exploitation de grands périmètres irrigués et installations sanitaires. Au niveau local, dans chaque wilaya, les responsabilités de la MRE sont exercées par la Direction de l'Hydraulique de la Wilaya. Au niveau communal, les communes ont la responsabilité explicite d'assurer l'approvisionnement en eau potable et le traitement des eaux usées. Au niveau régional, il y a eu la création de l'Agence du Bassin Hydrographique (ABH). Couvrant des territoires constitués de plusieurs bassins versants, ne correspondant pas à une division administrative, ces agences visent à promouvoir la gestion intégrée et concertée de l'eau par bassin.

L'évolution considérable de la demande en eau en Algérie, principalement due à la croissance démographique rapide, à la dynamique de l'urbanisation et à l'élévation du niveau de vie, a conduit le pays à augmenter sa capacité de stockage de l'eau. En surface, augmenter l'exploitation des nappes phréatiques disponibles et assurer l'alimentation en eau et le transfert en augmentant les volumes et les distances. Le dessalement a connu un développement récent et très rapide. Les pénuries d'eau subies par les grandes villes - notamment Alger et sa région - au début des années 2000, dues à la sécheresse mais aussi aggravées par les retards de mise en service des eaux et par une mauvaise distribution des systèmes, ont provoqué une fuite en avant vers le dessalement de l'eau de mer (Plan Bleu, 2010).

1.2. Gestion et planification

1.2.1. Alors, pourquoi planifier, pourquoi gérer ?

Les activités de planification et de gestion des ressources en eau sont généralement motivées par la prise de conscience des problèmes à résoudre et des possibilités d'obtenir des avantages d'utilisation de l'eau et des ressources foncières connexes. Il n'est pas facile de s'entendre sur la meilleure façon de mesurer ces avantages, et tout ce qui est proposé peut provoquer un conflit. D'où la nécessité d'une étude et d'une recherche minutieuse, ainsi que d'une pleine implication des parties prenantes, dans la recherche d'une vision partagée du meilleur plan compromis ou de la politique de gestion.

Et en effet, il existe et continuera d'exister des conflits entre les objectifs et buts alternatifs de la gestion de l'eau. Les planificateurs et les gestionnaires doivent identifier les compromis entre les impacts environnementaux, écologiques, économiques et sociaux, même mesurés, et les alternatives de gestion qui peuvent équilibrer ces intérêts souvent conflictuels (Loucks & Van Beek, 2005)

1.2.2. De la gestion fragmentée à la gestion intégrée

En règle générale, dans le passé, avec des populations plus petites, une activité économique moins intense et des sociétés moins riches exigeant beaucoup moins d'eau, l'offre de la ressource était généralement beaucoup plus importante que la demande. Dans de telles circonstances, l'eau destinée à l'agriculture, à l'industrie, à des usages domestiques et autres pourrait être gérés séparément, l'eau étant suffisante pour répondre à tous les besoins et la concurrence entre les utilisateurs et entre les utilisateurs étant faible. De plus, l'utilisation de l'eau par les humains n'a pas indûment empiéter sur l'environnement naturel et les écosystèmes comme c'est le cas aujourd'hui. Il était donc courant et c'est toujours le cas, qu'au sein des gouvernements, aux niveaux national et sous-national, des ministères distincts soient mis en place pour chaque utilisation pour laquelle l'eau est nécessaire.

Au fur et à mesure que les populations ont augmenté, que la production alimentaire a augmenté, que l'activité économique s'est développée et que les sociétés sont devenues plus prospères, la demande en eau a augmenté. Le changement climatique ajoute encore plus de pression sur nos ressources en eau limitées. Dans de très nombreux endroits, la demande a largement dépassé l'offre - ceci peut être particulièrement le cas lorsque l'offre peut être sévèrement limitée ou pendant des années de sécheresse ou lorsque la demande est particulièrement forte, par exemple lorsque la demande d'eau pour l'irrigation est élevée.

Ainsi, les gestionnaires, que ce soit dans le gouvernement, le secteur privé ou les communautés locales doivent prendre des décisions difficiles sur l'allocation de l'eau. Ils se trouvent dans des pays et des régions qui ont des caractéristiques physiques très différentes et qui se trouvent à des stades très différents du développement économique et social : il est donc nécessaire que les approches soient adaptées aux circonstances individuelles du pays et de la région locale.

De plus en plus souvent, les gestionnaires doivent répartir les ressources entre des demandes de plus en plus importantes, en tenant compte des voix plus faibles des pauvres et de l'environnement naturel. L'approche traditionnelle fragmentée ou purement sectorielle n'est plus viable et une approche plus holistique est essentielle.

C'est la raison d'être de l'approche de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) qui a été acceptée à l'échelle internationale comme moyen d'assurer un développement et une gestion efficaces et durables des ressources en eau limitées du monde et de faire face aux demandes contradictoires. La définition la plus largement acceptée de la GIRE est celle donnée par le Partenariat mondial pour l'eau : «La GIRE est définie comme un processus qui favorise le développement et la gestion coordonnés de l'eau, des terres et des ressources connexes afin de maximiser le bien-être économique et social de manière équitable sans compromettre la durabilité des écosystèmes vitaux » (CSD, 2008).

1.3. Gestion intégrée des ressources en eau

1.3.1. Le concept moderne de la GIRE

Un premier exemple d'approche intégrée a eu lieu dans les années 1930 aux États-Unis d'Amérique, avec l'élaboration de plans d'ensemble pour l'utilisation des ressources naturelles (par exemple, Tennessee Valley Authority). Depuis lors, l'ONU et d'autres organisations internationales ont développé différentes formes d'intégration dans le cadre du concept de GIRE, qui a évolué au fil des décennies (Khan *et al.*, 2009)

La GIRE est un concept empirique qui a été construit à partir de l'expérience des praticiens sur le terrain. Bien que plusieurs parties du concept existent depuis plusieurs décennies - en fait depuis la première conférence mondiale sur l'eau à Mar Del Plata en 1977 où a été proposée la Décennie internationale de l'eau (1980-1990) (Hassing *et al.*, 2009).

D'après Snellen & Schrevel (2004) cette question a été abordée dans le rapport de la Commission Brundtland de 1987 intitulé « Notre avenir à tous », qui concluait que le monde était menacé par des problèmes environnementaux extraordinairement graves, en grande partie causés par des schémas de développement, qui laissaient un nombre croissant de personnes pauvres. Le rapport a lancé le concept de «développement durable, qui cherche à répondre aux besoins et aux aspirations du présent sans compromettre la capacité de répondre aux besoins de l'avenir» (Brundtland *et al.*, 1987). En décembre 1989, l'Assemblée générale des Nations Unies a réuni toutes les nations pour faire face au double problème de la destruction de l'environnement et de la nécessité du développement durable : la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED) de Janeiro.

Pour préparer la CNUED, le secteur de l'eau a organisé la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement qui s'est tenue à Dublin, en Irlande, les 26 et 31 janvier 1992. La conférence a attiré 500 experts en eau d'une centaine de pays et 80 organisations

internationales, intergouvernementales et non gouvernementales. Dans un document intitulé *Water and Sustainable Development* de Koudstaal, Rijsberman & Savanije (1991), les auteurs déclarent : "La valeur réelle du concept de développement durable est qu'il souligne que le potentiel - ou la capacité de charge - des ressources doit être examiné premièrement, plutôt que de simplement planifier [pour le développement socio-économique] et minimiser les impacts environnementaux négatifs plus tard. » Ils ont produit un modèle de travail pour le développement durable présenté dans leur document principal : Représentation schématique de la gestion intégrée des ressources en eau (Fig1.6). L'introduction à la figure dans les propres mots de l'auteur se lit comme suit :

"Une approche telle que présentée dans la figure.1.6, pourrait être un bon modèle de développement durable. Dans cette approche, la gestion des ressources en eau est stimulée par des déclencheurs issus de l'environnement et du bien-être socio-économique de la société, agissant à la fois sur l'offre et sur la demande pour un système équilibré entre impacts et capacité de charge. Le danger de déséquilibre demeure cependant toujours présent. En période de récession économique, les gens et les politiciens sont enclins à accorder plus de poids au développement socio-économique et à accepter que les générations futures paient la facture. Le schéma de la figure.1.6, a besoin d'un soutien constant des organisations qui ne sont pas influencées par les instabilités politiques et économiques. "

Ils ont préconisé une nouvelle approche de la gestion intégrée de l'eau, dans laquelle : «La connotation du mot intégré devrait aller au-delà des concepts traditionnels tels que la coordination entre les agences de gestion de l'eau, l'interaction entre les eaux souterraines et de surface ou une approche de planification, qui prend en compte toutes les stratégies et impacts possibles. "

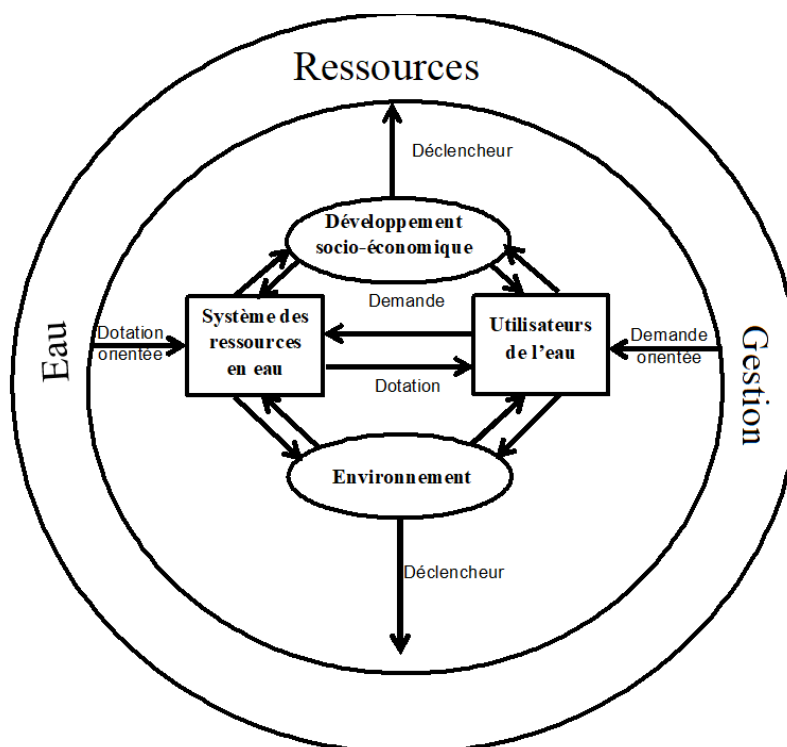


Figure.1.6. Représentation schématique de la gestion intégrée des ressources en eau [notre traduction] (adapté de Koudstaal *et al.*, 1992).

Les principales caractéristiques de la nouvelle approche étaient :

1. La capacité de charge de l'environnement naturel est le point de départ logique, plutôt que l'approche traditionnelle dans laquelle la détérioration de la qualité de l'environnement est considérée comme un coût inévitable du développement économique ;
2. La gestion de la demande, impliquant la formulation et l'application d'incitations visant à limiter la demande d'eau en augmentant l'efficacité et en réduisant les déchets, devrait être considérée comme l'une des composantes les plus importantes de la GIRE ;
3. La gestion intégrée au sens nouveau fait référence au fait que les ressources en eau doivent être gérées comme faisant partie intégrante du développement social et économique d'une nation.

Le document d'orientation intitulé : L'eau et le développement durable de Koudstaal, Rijsberman & Savenije, préparé pour la Conférence de Dublin de 1992, contient presque toutes les caractéristiques de la GIRE telle qu'elle se présente aujourd'hui (Snellen & Schrevel, 2004).

Ce n'est qu'après l'Agenda 21 et le Sommet Mondial sur le Développement Durable (SMDD) en 1992 à Rio que le concept a fait l'objet de longues discussions sur ce que cela signifie dans la pratique. Le concept a été largement adopté par les gestionnaires de l'eau, les décideurs et les politiciens du monde entier.

L'émergence du concept est l'un des résultats de la recherche d'un nouveau paradigme de gestion de l'eau. Confrontée à la pénurie croissante d'eau, à la pollution, au changement climatique et aux pratiques sectorielles fractionnées et isolées de gestion de l'eau, la communauté de l'eau a fourni des principes utiles et noté les liens qu'elle jugeait essentiels pour une gestion plus efficace et durable des ressources en eau. Ces liens et principes ont été placés dans un cadre sociétal avec les objectifs d'efficacité économique, d'équité sociale et de durabilité des écosystèmes. En prévision du Sommet de Rio, les quatre principes de Dublin ont été approuvés par près de 500 experts désignés par les gouvernements de 100 pays qui se sont réunis à la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement à Dublin en janvier 1992 (Hassing *et al.*, 2009).

1.3.2. Principes clés de la GIRE - Les principes de Dublin

L'eau douce est une ressource limitée et vulnérable, essentielle pour soutenir la vie, le développement et l'environnement

- Le développement et la gestion de l'eau devraient être basés sur une approche participative impliquant les utilisateurs, les planificateurs et les décideurs à tous les niveaux.
- Les femmes jouent un rôle central dans la fourniture, la gestion et la protection de l'eau
- L'eau a une valeur économique dans tous ses usages concurrents et devrait être reconnue comme un bien économique (Hassing *et al.*, 2009).

1.3.3. L'Agenda 21, chapitre 18

L'Agenda 21, chapitre 18, adopté au Sommet de la Terre de Rio en 1992, traite en détail de la question de l'eau. Trois objectifs ont été définis et comportent des éléments de qualité dans la gestion de l'eau.

Les trois principaux objectifs de la gestion intégrée des ressources en eau sont :

- Donner aux femmes, aux hommes et aux communautés les moyens de décider de leur niveau d'accès à l'eau potable et aux conditions de vie hygiéniques, ainsi que des types d'activités économiques qu'ils utilisent, et de s'organiser pour les atteindre.
- Produire plus de nourriture et créer des moyens de subsistance plus durables par unité d'eau appliquée (plus de cultures et d'emplois par goutte) et assurer l'accès de tous à la nourriture nécessaire pour maintenir une vie saine et productive.
- Gérer l'utilisation humaine de l'eau de manière à conserver la quantité et la qualité des écosystèmes d'eau douce et terrestres qui fournissent des services aux humains et aux êtres vivants.

Cinq actions principales sont nécessaires pour atteindre ces objectifs :

- Impliquer toutes les parties prenantes dans la gestion intégrée.
- Passer à la tarification intégrale des services d'eau pour tous les usages humains.
- Augmenter le financement public de la recherche et de l'innovation dans l'intérêt public.
- Reconnaître la nécessité d'une coopération en matière de gestion intégrée des ressources en eau dans les bassins fluviaux internationaux.
- Augmenter massivement les investissements dans l'eau. (Conseil Mondial de l'Eau, 2000, p 2-3)

Depuis lors, les principes de Dublin et de Rio ont été adoptés au niveau international et constituent la base du débat sur la gestion des ressources en eau. Puis, en moins de dix ans, plusieurs organisations internationales de l'eau ont été créées : le Conseil de concertation pour l'eau et l'assainissement, le Partenariat mondial pour l'eau, le Réseau international des organismes de bassin, le Conseil mondial de l'eau. L'Office international de l'eau (IOW) et le Secrétariat international de l'eau (ISW) pour n'en citer que quelques-uns. Au cours de la même période, les grandes conférences internationales ont contribué à soutenir le débat sur les questions relatives à l'eau.

Le Premier Forum Mondial de l'Eau organisé à Marrakech en 1997 est un jalon dans la relance du débat international sur l'eau. Suite à ce forum, le CME a initié une tâche internationale innovante, le développement de la Vision Mondiale de l'Eau ; cet exercice a guidé le débat en 1998 et 1999 pour culminer au deuxième Forum mondial de l'eau à La Haye en mars 2000 (Burton, 2003)

1.3.4. Définition de la GIRE

En 2000, le secteur international de l'eau s'est réuni à La Haye à l'occasion du deuxième Forum mondial de l'eau. La vision mondiale de l'eau a été formulée en préparation de cet événement. L'exercice de la Vision Mondiale de l'Eau de 2000 était : «non seulement pour accélérer la mise en œuvre des principes de Dublin, mais aussi pour proposer un ensemble complet de principes pratiques pour la mise en œuvre» (Cosgrove & Rijsberman 2000). Malgré le désir d'être pratique, le glossaire du document Vision décrit la GIRE comme :

"Une philosophie qui soutient que l'eau doit être considérée d'un point de vue holistique, à la fois dans son état naturel et en équilibrant les demandes concurrentes - agricoles, industrielles et environnementales. La gestion des ressources en eau et des services doit refléter l'interaction entre ces différentes demandes et doit donc être coordonnée au sein des secteurs et entre eux. Si les nombreuses exigences transversales sont remplies et s'il peut y avoir une intégration horizontale et verticale dans le cadre de gestion des ressources en eau et des services, un régime plus équitable, efficace et durable émergera. "

Le Partenariat mondial pour l'eau - après avoir observé qu' «il n'existe pas actuellement de définition non ambiguë de la GIRE» - a présenté en 2000 une définition de la GIRE dans une publication composée de deux parties : 1. Qu'est-ce que la GIRE? Et 2. Comment mettre en œuvre la GIRE. Ici, il est fait référence à la brochure GWP sur la GIRE qui donne une version abrégée du document. Il explique en quelques mots pourquoi la gestion de l'eau est essentielle ; quels sont les principaux défis ? Comment nous dépendons tous d'une bonne gestion de l'eau ; quels sont les principes de Dublin et comment ils se traduisent en action ; ce qu'est un environnement propice ; quels sont les rôles institutionnels appropriés et quels sont les instruments de gestion pratiques ; et que le financement de la gestion de l'eau donne des résultats intéressants.

Le Global Water Partnership (2000) a défini la GIRE comme :

« La GIRE est un processus qui favorise le développement et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources connexes, afin de maximiser le bien-être économique et social qui en résulte d'une manière équitable, sans compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux. »

Cette définition est la première définition faisant autorité sur la GIRE. Il convient de noter que la gestion des ressources en eau est définie comme un processus. C'est aussi un processus d'apprentissage (Snellen & Schrevel, 2004).

Cette définition est fortement corrélée avec le concept de développement durable adopté par la Commission des Nations Unies pour le développement durable (CSD), présenté schématiquement à la figure.1.7 ci-dessous.

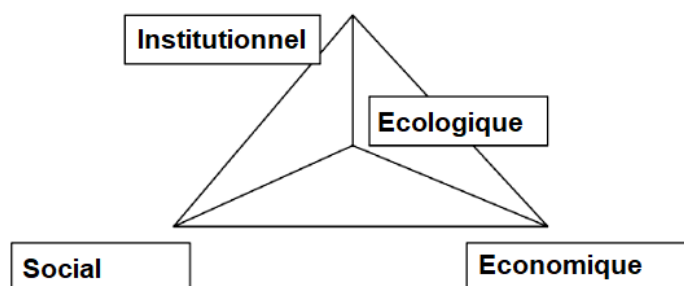


Figure.1.7. Quatre dimensions de la durabilité de la CDD de l'ONU, 1995 [notre traduction]

Cette figure (Fig.1.7) montre que le développement durable, à l'instar de la GIRE, suppose un équilibre des intérêts dans le processus de développement écologique et socio-économique. / (Rodina *et al.*, 2008)

C'est une définition concise mais précise de la GIRE qui exprime le besoin de développement de l'eau pour le développement socio-économique, tout en gardant la santé des écosystèmes. La terre, l'eau et les écosystèmes doivent être gérés comme des complexes biophysiques intégrés, dans l'intérêt du développement humain. Pour ce faire, il faut comprendre les besoins en eau et l'implication des activités anthropiques dans les écosystèmes (Snellen & Schrevel, 2004).

1.3.5. Les piliers de la GIRE

La mise en œuvre d'un processus de GIRE est une question de mise en place des «trois piliers» (Fig.1.7) :

1. évoluer vers un environnement favorable de politiques, stratégies et législations appropriées pour le développement et la gestion durables des ressources en eau
2. mettre en place le cadre institutionnel par lequel les politiques, stratégies et législations peuvent être mises en œuvre
3. mettre en place les instruments de gestion requis par ces institutions pour faire leur travail.

La GIRE n'est donc pas une théorie scientifique qui doit être prouvée ou réfutée par les chercheurs. Il s'agit plutôt d'un ensemble de suggestions de bon sens sur ce qui constitue des aspects importants de la gestion. La GIRE s'est révélée être une approche flexible de la gestion de l'eau qui peut s'adapter à divers contextes locaux et nationaux. Il demande aux décideurs de porter des jugements sur les suggestions, les mesures de réforme, les outils de gestion et les arrangements institutionnels les plus appropriés dans un contexte culturel, social, politique, économique ou environnemental particulier.

L'une des grandes forces de la GIRE est qu'elle a donné à la communauté de l'eau un langage commun applicable sur un large éventail de niveaux allant du local au national et régional. Cela permet d'échanger les connaissances et les leçons apprises à travers les frontières, entre les régions et au niveau local, et de permettre aux décideurs et aux gestionnaires de convenir et de suivre les politiques et les objectifs d'amélioration de la gestion des ressources en eau (Hassing *et al.*, 2009).

1.3.6. Les limites de la GIRE

D'après Jeffrey (2006) en tant qu'ambition, la GIRE cherche à répondre à deux problèmes très compliqués et complexes : développement durable et planification intersectorielle. Et une grande partie de «l'engagement» dont il est question dans la GIRE se situe aux interfaces entre la science, la communauté et la gouvernance. Les processus interfaciaux impliqueront une tentative de rapprochement ou d'intégration des connaissances, de l'expérience et de l'opinion entre les communautés scientifiques, sociétales et de gouvernance. Dans le contexte de la GIRE, des exemples représentatifs incluront la préparation de plans de gestion de bassin, le déploiement de nouvelles technologies et l'allocation / distribution de ressources en eau. Loin d'être simplement des frontières théoriques entre des ensembles d'acteurs de la société, ces interfaces sont caractérisées par des discontinuités significatives.

En ce qui concerne la GIRE, le résumé fournit le message suivant : «Le principal défi de gestion n'est pas une vision de la gestion intégrée des ressources en eau mais une approche pragmatique mais fondée sur des principes». La Banque mondiale semble dire que la gestion des ressources est et que nous devons maintenant mettre en pratique (Snellen & Schrevel, 2004).

Kennedy *et al.*, 2009, dans le livre de l'UNESCO intitulé : « Application de la GIRE dans les bassins les sous-bassins et les aquifères : état de l'art », recommande que des outils pour la GIRE devraient être développés :

- Une échelle appropriée pour la description du problème devrait être développée. Une distinction doit être faite entre les représentations globales (identification et compréhension de toutes les variables et relations) et intégrées (considération des variables clés ou sélectionnées).
- Soutenir le lien entre le développement social et économique et la protection des écosystèmes naturels : Miser sur l'expérience de l'approche systémique en mettant particulièrement l'accent sur les relations de rétroaction entre les sous-systèmes physiques et socio-économiques.
- Impliquer toutes les parties prenantes : promouvoir une participation qui permettra de vérifier les relations de rétroaction et d'aider à élaborer des scénarios de politique pour les analyses. Chaque scénario de politique est une combinaison de variables physiques (climatiques, hydrologiques, hydrauliques) et socio-économiques (opérationnelles, budgétaires, de développement, de gestion).

D'après Snellen & Schrevel (2004) la nouvelle stratégie sectorielle fait référence à un examen par l'Organisation de coopération et de développement économiques, qui "... montre que même les pays les plus avancés sont loin de la pleine application des principes de Dublin dans la pratique"

1.3.7. Capacité institutionnelle vis-à-vis de la GIRE

Lors du 4^{ème} Forum Mondial de l'Eau au Mexique (2006), il a été rapporté que sur 95 pays examinés, 74% avaient des stratégies GIRE en place ou avaient initié un processus pour la formulation de telles stratégies.

Le Centre collaborateur du Programme des Nations Unies pour l'environnement pour l'eau et l'environnement (UCC-Water) a tenté d'établir une image plus détaillée de la mesure dans laquelle les institutions gouvernementales ont adopté la GIRE grâce à une enquête réalisée en 2007 avec le soutien du Programme PNUE GIRE 2005. L'enquête a porté sur cinquante-huit pays d'Afrique, d'Asie centrale, d'Asie du Sud-Est, d'Amérique latine et des Caraïbes. Les répondants étaient généralement de hauts fonctionnaires. L'un des indicateurs utilisés était la capacité institutionnelle à maintenir diverses fonctions essentielles à la GIRE, par exemple la formulation de politiques, l'allocation de l'eau et la gestion de la demande en eau. Le résultat est illustré à la figure.1.8 (Hassing *et al.*, 2009).

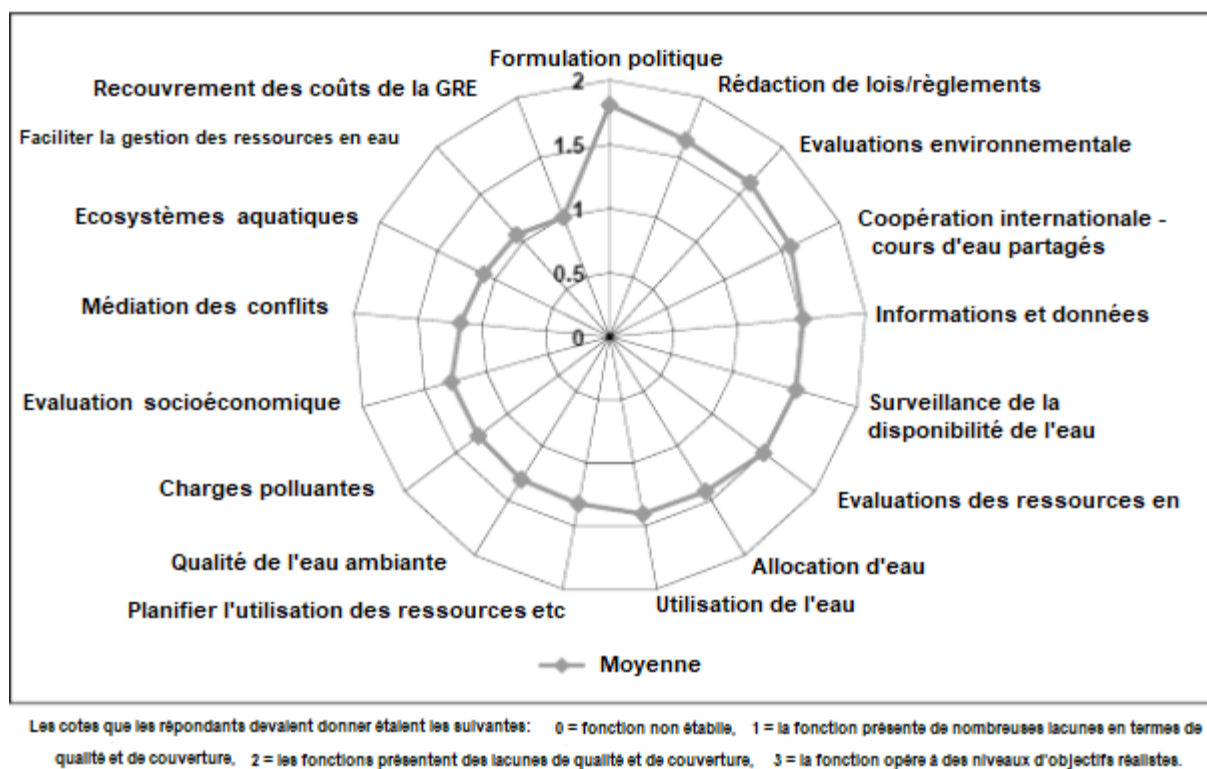


Figure.1.8. capacité institutionnelle pour mener à bien diverses fonctions inspirées de la GIRE [notre traduction] (Hassing *et al*, 2009)

Il ressort de la figure ci-dessus que les pays ont les capacités les mieux développées - les scores les plus élevés en termes de formulation de politiques, de rédaction de lois et de coopération sur les cours d'eau partagés. Le recouvrement pour le coût de la gestion des ressources en eau et la capacité de gestion de la demande en eau figuraient parmi les domaines les moins bien notés. Les résultats de l'enquête ont montré une tendance attendue. L'expérience montre que les pays et les gouvernements qui partent de zéro pour réformer leur secteur de l'eau se concentrent d'abord sur la préparation de politiques, de lois et de réglementations (l'environnement propice). De nouvelles politiques et lois ouvrent la voie à de nouvelles institutions, établissent des rôles institutionnels et développent les capacités nécessaires pour assumer ces rôles. Avec les institutions en place, les nouveaux instruments de gestion et les capacités nécessaires pour réaliser la GIRE peuvent être développés (Hassing *et al.*, 2009).

1.3.8. Expériences internationales avec la GIRE

1.3.8.1. Expérience des Etats-Unis

D'après un rapport de l'USACE analysé par « The American Water Resources Association » les instruments de gestion comprennent (AWRA, 2012) :

(1) l'évaluation de la disponibilité et des besoins en eau ; (2) l'élaboration de plans GIRE qui équilibrent les besoins économiques, sociaux et environnementaux ; (3) la mise en œuvre de mesures d'efficacité de l'eau pour contrôler la demande ; (6) réglementer pour protéger l'approvisionnement en eau et la qualité de l'eau ; (7) mettre en place des outils économiques qui favorisent l'équité sociale et l'efficacité ; et (8) améliorer la connaissance au sein et entre les secteurs et des agences pour gérer l'eau plus efficacement

Les études de cas de ce rapport soutiennent les fondements de la GIRE en tant que processus, et démontrent comment le changement dans ces domaines clés peut faciliter la mise en œuvre de la GIRE.

Alors que plus de recherche est nécessaire pour mieux comprendre comment la GIRE peut être mise en œuvre avec succès dans la pratique, ce rapport explore les expériences locales avec la GIRE pour comprendre son application aux États-Unis.

Ces études de cas ont été sélectionnées en fonction d'un échantillon de commodité. Chacune comprend : (1) des informations générales sur ce qui a motivé les efforts de GIRE, (2) une description du processus de GIRE, (3) une description du résultat, (4) les coûts et avantages, et (5) les informations clés.

Les *deux premières études* soulignent les efforts de l'État en faveur de la planification de la GIRE. La première étude traite de l'expérience de l'Oregon dans l'élaboration d'une stratégie intégrée des ressources en eau à l'échelle de l'État.

La *deuxième étude* montre comment un plan au niveau de l'État peut servir de fondement à la planification régionale intégrée de l'eau et fournit un aperçu du cadre de la Californie pour la mise en œuvre de la GIRE au niveau régional. Ces études pointent vers le besoin de nouveaux outils et d'informations supplémentaires afin de gérer de manière holistique la ressource.

Les *trois études suivantes* démontrent les efforts régionaux de planification intégrée de l'eau et les outils nécessaires pour gérer l'eau de manière holistique :

Premièrement, une discussion sur le succès de la Commission du bassin du Delaware sur la qualité de l'eau et les eaux souterraines, ainsi que la façon dont il prévoit de changer les conditions à l'avenir.

Vient ensuite un aperçu du plan de gestion intégrée des ressources en eau du bassin de la rivière Yakima, qui montre les avantages de la planification au niveau de gouvernance approprié et l'intégration de tous les intérêts dans le processus de planification.

La troisième étude met en évidence la structure de gouvernance unique et les outils techniques utilisés pour faciliter le développement du Plan Régional de l'Eau du Moyen Rio Grande (AWRA, 2012).

Les deux dernières études traitent de la complexité de la gestion des ressources en eau de manière à équilibrer les besoins humains et environnementaux. Ils fournissent des aperçus de l'étude intégrée du bassin hydrographique du fleuve Minnesota, de la qualité de l'eau et de l'écosystème et de l'étude d'impact sur l'approvisionnement en eau de la rivière St. Johns. Ils démontrent le développement de modèles scientifiques complexes pour comprendre les impacts humains de l'utilisation de l'eau sur l'écosystème et faciliter la prise de décision qui aboutit à une gestion plus durable de la ressource.

Collectivement, ces sept études de cas fournissent une base solide pour comprendre comment les praticiens aux États-Unis mettent en œuvre les concepts de la GIRE.

En évaluant ces études de cas et la mesure dans laquelle une approche GIRE est mise en œuvre, il est important de garder à l'esprit que la GIRE nécessite une approche réaliste de l'intégration.

Le défi consiste à trouver un équilibre entre une approche pleinement intégrée (qui risque d'être embourbée dans la complexité) et une approche dans laquelle chaque secteur poursuit aveuglément ses propres intérêts étroitement définis sans considérer les impacts et opportunités plus importants (Comité technique du GWP, 2004, p. 3).

Collectivement, les études de cas soulignent à la fois l'intégration des systèmes physiques et des systèmes humains en mettant l'accent sur la gestion holistique de la ressource et la nécessité de la participation du public et de tous les secteurs d'utilisation de l'eau. Ils montrent également les avantages de la collaboration de plusieurs organismes afin de garantir un approvisionnement durable en eau pour les humains et les écosystèmes, maintenant et dans le futur (AWRA, 2012).

1.3.8.2. Progrès avec la GIRE et le PP dans les pays méditerranéens

Malgré l'exigence du PP (participation du public), les décideurs européens semblent avoir du mal à se conformer à cet aspect de la DCE. Ce lent engagement avec PP pourrait être dû à la croyance, au nom des décideurs politiques, que PP implique renoncer à une partie de son pouvoir de décision, ou à l'absence d'une «culture de participation active» généralisée.

Mais il semble plus plausible que des obstacles importants soient rencontrés dans les contraintes rencontrées par les décideurs politiques. Bien qu'il n'y ait pas d'enquêtes approfondies sur la question, des preuves anecdotiques et des expériences spécifiques soutiennent l'hypothèse que les décideurs n'ont toujours pas les outils et les méthodologies pour engager efficacement les parties prenantes dans la prise de décision, comme le soulignent les efforts de recherche récents, telles que les activités et les ateliers du projet Harmoni-CA et les enquêtes menées dans le cadre du projet NOSTRUM-DSS. Par exemple,

la structure institutionnelle de la gouvernance de l'eau est et reste fortement centralisée dans la plupart des pays méditerranéens - en particulier dans la rive sud.

Malgré la large acceptation des avantages de la participation du public dans les processus de prise de décision, on peut distinguer quatre approches principales de la prise de décision pour la gouvernance de l'eau dans les pays méditerranéens (Sgobbi & Frafiga, 2006).

Les processus interactifs, par lesquels les principaux acteurs prennent une part active aux activités de prise de décision, et une solution de compromis est recherchée. Les acteurs clés sont ceux qui peuvent influencer de manière significative le processus, ou qui sont importants pour déterminer le succès ou l'échec d'une action. L'Algérie, Chypre, l'Espagne et l'Égypte suivent normalement cette route.

En résumé, la participation des acteurs dans la planification et la gestion de l'eau est encore faible dans plusieurs pays, où les ressources en eau sont fortement centralisées - comme en Israël et en Algérie, mais aussi au Liban où un réseau d'utilisateurs de la communauté manque encore (Giupponi *et al.*, 2006)

1.3.9. Statut de mise en œuvre de la GIRE

L'expérience de divers pays a montré que la GIRE est une condition préalable essentielle à la coordination efficace des stratégies de développement de l'eau dans divers secteurs, juridictions politiques et régions géographiques au sein d'un bassin hydrographique. Cependant, les progrès vers la mise en œuvre de la GIRE dans les pays développés et en développement ont varié considérablement. Selon un rapport récent de l'ONU-Eau (2), l'absence de progrès est associée de manière caractéristique à la nécessité de sensibiliser le public à la hiérarchie des juridictions politiques et au chevauchement des institutions de gestion.

Dans les pays en développement, les progrès peuvent être entravés par d'autres obstacles liés à la région, tels que les capacités techniques, la volonté politique et la compréhension des concepts et de la mise en œuvre de la GIRE. Le Rapport de situation a également révélé l'existence d'interprétations diverses entre les pays des processus de planification et de gestion de la GIRE et de leurs cadres.

Ces différences peuvent même exister à l'intérieur d'un même pays ou entre différentes étendues ou sous-bassins d'une même rivière (Khan *et al.*, 2009)

1.3.10. Dimension humaine de la GIRE

La dimension humaine caractérise alors, comment les êtres humains s'intègrent à la GIRE ?

L'eau est caractérisé par les Nations Unies comme un «bien primaire» (La Déclaration des Nations Unies sur les droits de l'homme, l'article 25/1 adoptée par l'Assemblée générale des Nations Unies en 1948 sans une seule voix contre), et en tant que tel, il entretient une relation privilégiée et indispensable avec nos sociétés.

Produits primaires peuvent être définis comme étant les produits dont les êtres humains nécessitent pour leur survie. La disponibilité en eau et la qualité sont des influences importantes sur notre santé et notre bien-être, notre économie, notre environnement et notre vie quotidienne.

Ainsi gestion de l'eau efficace et durable, il faut comprendre les différentes relations entre l'eau (à la fois des matières premières et des ressources naturelles) et les contextes sociaux, économiques, technologiques et environnementales dans lesquelles il est exploité.

Alors que de nouveaux procédés, de technologies, d'outils juridiques et économiques, et des cadres de gestion sont des éléments clés d'un avenir sûr en eau, leur développement et leur application doit être informé par l'examen du rôle de l'eau dans la société.

Dans de nombreux cas, les communautés humaines sont à la fois la cause et la résolution du problème, une source de connaissances et les utilisateurs de ces connaissances. Nos communautés sont de plus en plus socialement diversifiées en fonction de leur composition ethnique, culturelle et religieuse. Les réseaux institutionnels chargés de la création de connaissances et d'exploitation sont de plus en plus spécialisés et nombreux.

Malgré les efforts louables de beaucoup de gens pour promouvoir une plus grande intégration et une participation et une plus grande participation dans le secteur de l'eau, nous sommes toujours confrontés au défi de combler les interfaces et résoudre les tensions entre le général (principes, la justice, la connaissance) et le spécifique (problèmes, les circonstances, les personnes) (Jeffrey, 2006).

1.4. Les systèmes d'aide à la décision (SAD) et la GIRE

De nos jours, on reconnaît la relation entre la prise de décision et les améliorations / détériorations potentielles de la société dans son économie et sa qualité de vie, ainsi que la dégradation / conservation de l'environnement. Les décisions prises en matière de gestion de l'eau affectent l'environnement, l'économie et le bien-être social des populations à l'intérieur et à l'extérieur du bassin ; les utilisateurs d'eau en amont et en aval ; la quantité d'eau, la qualité et sa distribution saisonnière ; le stockage de l'eau dans les réservoirs et les aquifères ; disponibilité des eaux de surface et souterraines ; entre autres aspects. Toute politique proposée aura des conséquences sur l'approvisionnement en eau pour le reste des usagers de l'eau ; il est donc nécessaire de prendre en compte l'environnement et d'inclure les parties prenantes au cours du processus de prise de décision car elles doivent négocier leurs demandes et transiger avec les accords pris (Loucks & van Beek, 2005).

Lors de la planification, de la gestion et du processus de prise de décision, il est utile de connaître les conséquences des décisions à prendre (Georgakakos & Martin, 1996).

Cette information est précieuse pour ceux qui sont chargés de choisir la meilleure décision. Il aide à la compréhension des résultats attendus des décisions prises. Les systèmes d'aide à la décision « SAD », ou Decision Support Systems « DSS » en anglais, sont des modèles mathématiques et computationnels interactifs qui représentent le système naturel dont l'objectif est de quantifier, d'évaluer et de comparer les avantages et l'aggravation de différentes politiques de gestion de l'eau (Labadie & Sullivan, 1986).

Les SAD ne résolvent pas le problème de trouver la «meilleure gestion» par eux-mêmes ; ce sont des outils qui facilitent l'évaluation des différentes politiques de gestion et de leurs conséquences ; Le SAD aide à comprendre les différentes stratégies et leurs résultats. En fin de compte, les décideurs décideront de la gestion de l'eau du système en tenant compte des informations fournies par le SAD. De plus, il ne suffit pas de représenter correctement les systèmes naturels et réglementaires pour administrer l'eau par le biais du SAD ; Les résultats doivent être présentés aux personnes impliquées dans le processus de planification et de gestion, lorsque des solutions sont nécessaires, dans un format adéquat, accessible et compréhensible pour ces personnes et pour la communauté. Le SAD devrait fournir un ensemble de solutions lorsqu'il y a un intérêt pour un problème déterminé ; sinon, les résultats n'auront aucun impact sur la gestion de l'eau (Loucks & Da Costa, 1991).

De plus, les décideurs et les utilisateurs de l'eau devraient avoir confiance dans les résultats du SAD. À cette fin, il est nécessaire d'établir une relation étroite entre le modélisateur, les décideurs et les utilisateurs de l'eau lors de la construction du SAD. La participation, la supervision et la rétroaction des personnes impliquées dans le processus de gestion de l'eau sont nécessaires pour renforcer la confiance dans le SAD et ses résultats. Cet exercice fournit une vision partagée du fonctionnement du système d'eau.

Le SAD peut être un ou plusieurs systèmes, tous intégrés en utilisant une interface qui permet l'interaction entre le (s) utilisateur (s) et le (s) système (s). Le SAD peut être intégré

par les systèmes suivants : a) mesure, par exemple télédétection et mesures in situ ; b) l'information, y compris les systèmes d'information géographique et les bases de données ; c) des modèles, tels que des modèles économiques, hydrologiques, de planification, d'optimisation, holistiques et empiriques ; et d) des analyses, telles que des outils d'évaluation, de performance et de diagnostic (Loucks & van Beek, 2005).

Pour la grande majorité des modèles, il est peu probable que le code source soit disponible. Nous pouvons seulement regarder la sortie, la documentation, exécuter des scénarios, analyser des tendances, mais nous devons finalement faire confiance aux développeurs de modèles en ce sens que le modèle est correctement programmé. Plus récemment, il y a eu une tendance vers l'adoption des principes de l'open source dans la modélisation. Une fois que le modèle est open source, il n'est pas seulement gratuit pour la réutilisation, il signifie aussi que son code est disponible offrant des possibilités illimitées de modification et de mise à niveau (Voinov, 2013).

En raison de l'amélioration de la capacité de calcul informatique au cours des deux dernières décennies, les systèmes de distribution d'eau ont été utilisés plus fréquemment pour représenter les systèmes d'eau et évaluer les politiques alternatives de gestion de l'eau. Les systèmes d'aide à la décision de la gestion des ressources en eau les plus populaires et établis comprennent : WATHNET (Kuczera, 1992), AQUATOOL (Andreu *et al.*, 1996), STELLA (Hamlet *et al.*, 1996c), MIKE BASIN (DHI, 1997), OASIS (Randall *et al.*, 1997), WEAP (SEI, 1997), MISER (Fowler *et al.*, 1999), MODSIM (Labadie *et al.*, 2000), RIVERWARE (Zagona *et al.*, 2001), CALSIM (Draper *et al.*, 2004), RIBASIM (Delft Hydraulics 2004), REALM (Perera *et al.*, 2005), WRAP (Wurbs, 2005), HEC-ResSim (USACE, 2007), WaterWare (Cetinkaya *et al.*, 2008), AQUATOR (Oxford Scientific Software, 2008), et WARGI (Sechi *et al.*, 2009) entre autres, ont été utilisés comme base de SAD dans différents bassins.

D'après Sandoval-Solis (2011) des SAD ont été construits pour plusieurs bassins transfrontaliers; en Amérique pour le fleuve Colorado (Schuster, 1989 ; Gilmore *et al.*, 2000), Rio Grande (Vigerstol, 2002 ; Tate, 2002 ; Brandes, 2004 ; Danner *et al.*, 2006 ; Teasley, 2009), Columbia (Dufournaud, 1982 ; Rogers, 1991) et Red River (Simonovic, 1999); en Asie pour le Mékong (Dufournaud, 1982 ; Baran & Coates, 2000 ; MRC, 2004), Ganges-Brahmaputra (Rogers, 1993 ; Salewicz & Nakayama, 2004), Amu Darya et Syr Darya (Raskin *et al.*, 1992 ; Savoskul *et al.*, 2003 ; Teasley & McKinney, 2011); en Afrique pour le Nil (Rogers, 1969, 1991 et 1993, Georgakakos, 2007), Congo (McCartney, 2007), Zambezi (Salewicz, 1991), Volta (De Condappa *et al.*, 2009) et Okavango (EPSMO-BIOKAVANGO Eflows Team, 2009); en Europe pour le Danube (Salewicz, 1991 ; Mauser & Ludwig, 2002), Rhin (Nieuwkamer, 1995), Guadiana (Sorisi, 2006) et Tagus (Andreu *et al.*, 1996).

Aussi pour différents bassins, par exemple en Espagne pour les rivières Segura (Andreu *et al.*, 1996), Manzanares (Paredes *et al.*, 2010); en Irlande pour le bassin de Moy (Hall & Murphy, 2010), au Pérou pour le Rio Santa (Purkey & Escobar, 2009 ; Read & McKinney, 2010); aux États-Unis pour la partie supérieure de la rivière Chattahoochee (Johnson, 1994), Trinity, San Joaquin, la baie de San Francisco et Delta (Cain *et al.*, 1998),

Sacramento (Purkey *et al.*, 2008 ; Yates *et al.*, 2009), Sierra Nevada (Mehta *et al.*, 2008 ; Viers *et al.*, 2009); au Mexique pour Rio Conchos (Wagner & Vaquero 2002 ; Gomez *et al.* 2005 ; Amato *et al.*, 2006 ; Gastelum *et al.*, 2009), Rio San Juan (Sandoval-Solis, 2005), Rio Lerma (Vargas *et al.*, 2004), Rio Verde (Sandoval-Solis, 2009a), Rio Copalita (Sandoval-Solis, 2009b), pour n'en citer que quelques-uns.

1.4.1. Water Evaluation And Planning” system

Dans le cadre de notre étude, le WEAP (Water Evaluation And Planning System) a été sélectionné sur d'autres modèles de ressources en eau car il s'agit d'un outil logiciel convivial, bien documenté, avec de belles interfaces graphiques (GUI), et se concentre sur la gestion des ressources en eau et le bilan hydrologique.

WEAP se distingue par son approche intégrée de la simulation des systèmes d'eau et par son orientation politique. Fonctionnant sur ces principes de base, WEAP est applicable à plusieurs échelles ; systèmes municipaux et agricoles, bassins versants uniques ou systèmes fluviaux transfrontaliers complexes. Le WEAP n'incorpore pas seulement l'allocation de l'eau mais aussi des modules de qualité de l'eau et de préservation de l'écosystème. Cela rend le modèle approprié pour simuler de nombreux problèmes d'eau douce qui existent dans le monde de nos jours (SEI, 2005).

WEAP a été utilisé pour plusieurs études de demande et / ou d'approvisionnement: la région de la mer d'Aral (Raskin *et al.*, 1992), le bassin supérieur de Chattahoochee en Géorgie -USA (US Army Corps of Engineers, 1994), le bassin des Olifants en Afrique du Sud (Lévite *et al.*, 2003), la vallée de Sacramento - USA (Purkey *et al.*, 2008), le bassin de Zabadani en Syrie (Droubi, A *et al.*, 2008), le bassin d'Amman Zarqa en Jordanie (Al-Omari *et al.*, 2009), Le bassin versant d'Ouémé-Bonou au Bénin (Höllermann *et al.*, 2010), le bassin supérieur du nord d'Ewaso Ng'iro au Kenya (Mutiga *et al.*, 2010), le bassin du lac Tana en Ethiopie (Alemayehu *et al.*, 2010), la vallée centrale de la Californie - États-Unis (Joyce *et al.*, 2011), bassin de l'Okanagan, Colombie-Britannique (Harma, 2012), déséquilibres en Iran, au Maroc et en Arabie saoudite (Petra Hellegers *et al.*, 2013), bassin versant de l'Hérault en France (Collet *et al.*, 2013), la région du lac Victoria en Afrique de l'Ouest (Mehta *et al.*, 2013), la rivière Vit en Bulgarie (Dimova, 2013), l'aquifère de Zeuss Koutine en Tunisie (Hadded *et al.*, 2013) les bassins versants de l'ouest de l'Algérie (Hamlat *et al.*, 2012), le bassin de l'Ebre en Espagne (Milano *et al.*, 2013), le bassin de Langat en Malaisie (Ali, 2014), le bassin du fleuve Han en Corée (Kim *et al.*, 2014) Binhai New Area en Chine (Li *et al.*, 2015),

1.4.1.1. Informations de base sur le WEAP

Le système d'évaluation et de planification de l'eau a suffisamment de flexibilité pour adopter différents niveaux de disponibilité des données avec une interface graphique conviviale (Hoff, 2011). C'est un outil utile pour la gestion des ressources en eau, qui comprend à la fois les problèmes d'approvisionnement et de demande en eau, en plus de la qualité de l'eau et de la préservation de l'écosystème, comme l'exige une approche intégrée de la gestion des bassins versants (SEI, 2007). WEAP est un laboratoire pour l'examen de

stratégies alternatives de développement et de gestion de l'eau en simulant des scénarios et des politiques de l'eau (SEI 2005 ; Mutiga *et al.*, 2010 ; Purkey *et al.*, 2007 ; Raskin *et al.*, 1992 ; SEI, 2008 ; Yates *et al.*, 2005a, b)

Le modèle est semi-théorique, continu, semi-distribué et déterministe. Comme le modèle est semi-théorique, il demande l'étalonnage et la vérification (Abrishamchi *et al.*, 2007). Il utilise également un ensemble d'objets transparents et des procédures de modélisation pour analyser la variabilité et le changement climatique, les conditions des bassins versants, la demande en eau, les besoins des écosystèmes, la réglementation environnementale, les objectifs opérationnels et les infrastructures disponibles. Avec une approche basée sur l'approche des scénarios, tous ces problèmes peuvent être simulés par les gestionnaires de l'eau (Yates *et al.*, 2005).

La mise en œuvre du modèle WEAP nécessite l'introduction d'une base de données volumineuse pour chaque élément du réseau. Les données sur la démographie et l'utilisation de l'eau sont utilisées pour construire des scénarios qui examinent la consommation totale d'eau par site et évoluent avec le temps. Le modèle utilise le concept de préférences de demande et d'approvisionnement prioritaires, qui sont utilisées dans une heuristique de programmation linéaire pour résoudre la distribution d'eau. L'analyse de la demande dans WEAP21 est basée sur une approche d'utilisation finale désagrégée à partir de l'évapotranspiration du module d'hydrologie physique de base, qui détermine les besoins en eau à chaque nœud de demande (Yates *et al.*, 2005a & b).

1.4.1.2. Contexte d'utilisation du WEAP

De nombreuses régions font face à d'énormes défis en matière de gestion de l'eau douce. L'attribution de ressources en eau limitées, la qualité de l'environnement et les politiques d'utilisation durable de l'eau sont des sujets de préoccupation croissante. Les modèles de simulation conventionnels axés sur l'offre ne sont pas toujours adéquats.

Au cours de la dernière décennie, une approche intégrée du développement de l'eau est apparue, qui place les projets d'approvisionnement en eau dans le contexte des questions liées à la demande, ainsi que des problèmes de qualité de l'eau et de préservation des écosystèmes.

Cependant, il est nécessaire de développer une meilleure compréhension de la façon dont le système hydrologique naturel s'est comporté avant le début des manipulations hydrologiques dramatiques qui caractérisent beaucoup de nos systèmes de ressources en eau aujourd'hui (Muttiah & Wurbs, 2002). Ce type d'analyse repose sur l'utilisation d'outils de modélisation hydrologique qui simulent des processus physiques tels que les précipitations ; l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration (Fig.1.9. a).

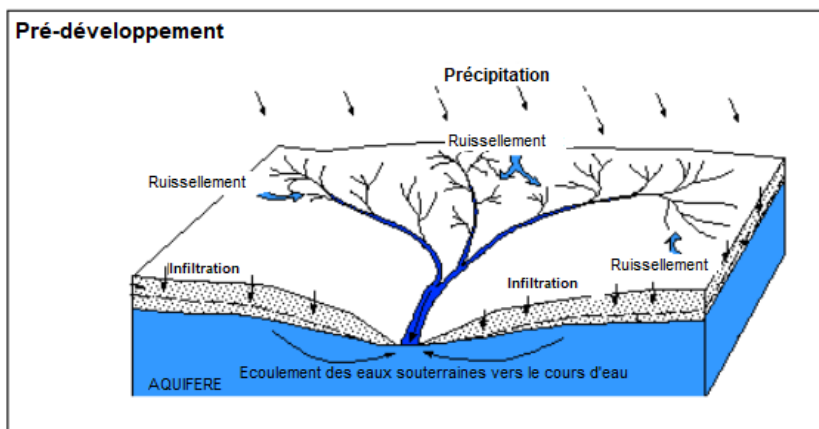
Après la construction de structures hydrauliques telles que les barrages et les dérivations (Fig.1.9.b), des facteurs liés au système de gestion doivent également être pris en compte.

Ces systèmes ont été mis en place pour régir l'allocation de l'eau entre les demandes concurrentes, qu'il s'agisse de la demande d'eau potable agricole ou urbaine ou de la demande non hypothétique de production hydroélectrique ou de protection des écosystèmes (Yate *et al.*, 2005).

Un modèle de ressource en eau est une représentation conceptuelle d'un système d'eau réel qui nous permet d'explorer comment le système pourrait changer en réponse à une gamme d'hypothèses. Parce que les modèles sont conceptuels, ils ne sont pas capables de prédire exactement ce qui se passera sous divers scénarios proposés, mais permettent au modélisateur de comparer les résultats de différents scénarios entre eux. Par exemple, les scénarios peuvent inclure différentes hypothèses concernant la croissance démographique, l'adoption de nouvelles technologies, les changements dans l'économie, la construction d'infrastructures ou la mise en œuvre de nouvelles réglementations environnementales.

Typiquement, un scénario est développé sur la base des hypothèses de référence ou « business as usual » (BAU), ce qui fournit un point de référence par rapport auquel d'autres scénarios peuvent être comparés (Harris, 2007 ; Sakka, 2010).

a)



b)

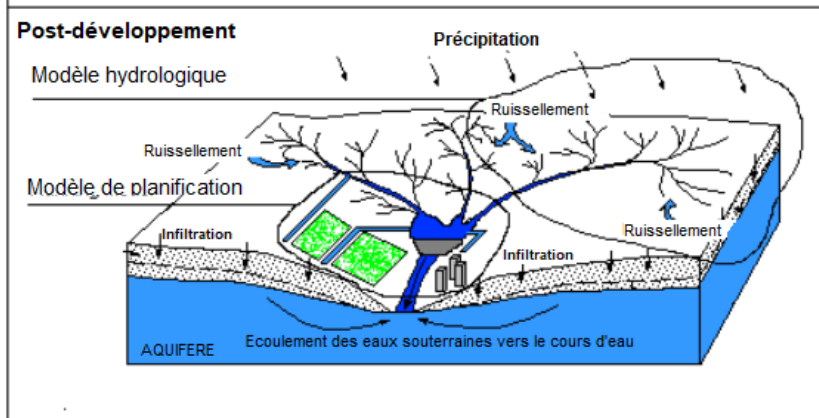


Figure.1.9. Caractérisation du bassin hydrographique (a) pré- et (b) post-développement qui met en évidence les implications de l'infrastructure des ressources en eau sur le cycle hydrologique [notre traduction] (Yates *et al.*, 2005a)

Le système d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP) vise à intégrer ces valeurs dans un outil pratique de planification des ressources en eau. WEAP se distingue par son approche intégrée de la simulation des systèmes d'eau et par son orientation politique. Le WEAP place le côté demande de l'équation - utilisation de l'eau, efficacité des équipements, réutilisation, prix, demande d'énergie hydroélectrique et allocation - sur un pied d'égalité avec l'offre : débit, eaux souterraines, réservoirs et transferts d'eau. WEAP est un laboratoire pour l'examen des stratégies alternatives de développement et de gestion de l'eau (Sakka, 2010).

CHAPITRE 2

~

DESCRIPTION DE LA REGION D'ETUDE

CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DE LA REGION D'ETUDE

Ce chapitre décrit les caractéristiques socioéconomiques du grand bassin du Kébir Rhumel qui est l'un des principaux bassins de la région du Constantinois-Seybouse-Mellègue, dans son contexte socioéconomique d'une part et dans son contexte naturel d'autre part. Ensuite, il aborde la description de la vallée du Rhumel au sens strict, en décrivant une géologie plus détaillée, ensuite en présentant une étude hydroclimatologique et enfin une description hydrogéologique sur la base des études déjà réalisées.

2.1. CARACTERISTIQUES SOCIOECONOMIQUES DU BASSIN DU KEBIR-RHUMEL

2.1.1. Population

La population dans le bassin Kébir Rhumel compte deux millions cinquante-six mille (2.056.000) habitants selon les résultats provisoires du dernier recensement 2008, répartis en quatre-vingt-dix (90) communes, et six (06) wilayas. Dont, cinquante-sept (57) communes sont entièrement incluses dans le bassin et trente-trois (33) partiellement. Sur l'ensemble du bassin, on dénombre 100 agglomérations de plus de 2000 habitants. La seule agglomération de Constantine (496179 habitants) représente vingt-trois pour cent (23%) de la population totale du bassin (ABH-CSM, 2004).

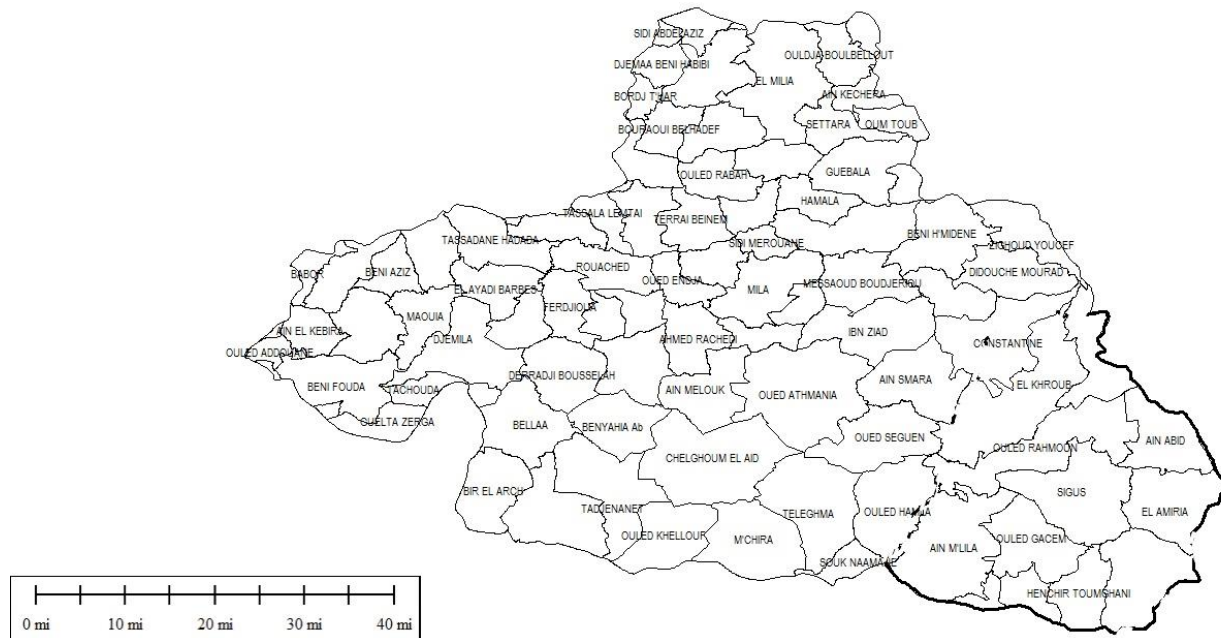


Figure.2.1. Communes et agglomérations du Kébir Rhumel

2.1.2. Agriculture

Céréales et cultures maraichères sont les principales activités des périmètres irrigués. L'irrigation est soit traditionnelle gravitaire, soit moderne (par canaux d'aspersion) selon le type de culture.

D'après Mebarki (2005) les sols irrigables de classe : 1+2+3 sont de 30500 ha et les besoins globaux d'irrigation sont estimés à 239 hm³/an, dans le bassin du Kébir-Rhumel.

2.1.3. Industrie

L'activité industrielle tourne autour des grandes agglomérations (Constantine, Chelghoum-Laid, El Khroub, Hamma Bouziane, Mila et Ain El Kébira).

Le complexe Pelles et Grues de Ain Smara, l'entreprise de détergents (HEA) à Chelghoum Laid, le complexe Moteurs- tracteurs d'El Khroub, la cimenterie de Hamma Bouziane, l'entreprise de céramique et faïence de Mila, la cimenterie et le complexe BCR de Ain El Kébira sont les principales unités industrielles de la région.

Constantine concentre-t-elle, sur la ville et ses périphéries, un tissu industriel aussi dense que varié, dominé par la branche de constructions mécaniques (ABH-CSM, 2004).

2.1.4. Ressources et besoins en eau

2.1.4.1. Ressources superficielles

En ce qui concerne les ressources superficielles, le bassin comporte quatre barrages en exploitation, dont trois barrages se trouvant à Mila et le dernier barrage construit est celui de Boussiaba se trouvant à Jijel - El Milia. Cependant, on dénombre 38 retenues collinaires à travers le bassin d'une capacité de 2,815 hm³.

Il faut noter que seuls 2 sur les 7 barrages en exploitation ont une capacité supérieure à 100 hm³ (ABH-CSM, 2007).

Le plus grand barrage d'Algérie, Beni Haroun en l'occurrence (963 hm³) avec 120 m de hauteur, détient à lui seul près de 37 % de la capacité théorique installée à l'échelle de la région de l'Est.

Avec sa grande station de pompage d'eau brute, dont la puissance est de 180 MW, le barrage de Béni Haroun alimente en eau potable plusieurs régions limitrophes de la wilaya de Mila, notamment les wilayas de Jijel, Constantine, Oum el Bouaghi, Batna et Khenchela. Le barrage fournit également une quantité importante d'eau d'irrigation pour quelques centaines d'hectares d'exploitations agricoles dans les régions voisines.

Tableau.2.1. Capacité des Barrages du Kébir Rhumel et leurs volumes régularisables

sous bassin	dénomination	wilaya	commune	capacité (hm ³)	vol. régul. (hm ³ /an)
1001	Draa Diss	Sétif	Tachouda		
1003	Hammam Grouz	Mila	Oued Athmania	45.0	18.0
1005	Berla	Constantine	Ain Smara	32.0	3.1
1006	Oued Athmania	Mila	Sidi Khelifa		
1007	Beni Haroun	Mila	Grarem Gouga	960.0	435.0
1007	Bouadjoul	Jijel	Khiri Oued Adjoul	8.9	5.5
1007	Boussiaba	Jijel	El Milia	120.0	80.0

2.1.4.2. Ressources souterraines

Concernant les ressources souterraines, il existe 95 puits avec un débit de 335,36 l/s soit 10,56 hm³/an, 451 forages dont 237 forages en exploitation avec un débit de 4271 l/s soit 134,69 hm³/an et 197 sources développant un débit de 1006,67 l/s soit 31,75 hm³/an (ABH-CSM, 2007).

2.1.5. Besoins en eau

Les besoins en eau potable sont de l'ordre de 196,67 hm³/an, avec une consommation de 24,65 hm³/an et un réseau de distribution de 2734 km linéaire.

Concernant la demande en eau industrielle, il existe 89 unités industrielles avec un volume consommé de 8341 m³/j.

En ce qui concerne l'hydraulique agricole, le bassin du Kébir Rhumel ne comprend aucun grand périmètre d'irrigation. Cependant, il englobe 23 aires d'irrigation et 7 périmètres de petites irrigations (ABH- CSM, 2007).

2.1.6. La pollution des eaux

Selon les cahiers de l'ABH-CSM (2009) la vulnérabilité à la pollution est confirmée par les analyses des eaux établies par l'A.N.R.H. Ainsi, les eaux du Rhumel à Constantine sont classées « à pollution excessive », en raison des valeurs exagérées prises par les trois paramètres suivants : DCO (101,8 mg/l), PO₄ (7,2 mg/l) et NH₄ (15,5 mg/l).

Le pourcentage de forages dont la concentration en nitrates est supérieure à 50 mg/l (limite de potabilité) a augmenté de 25 % en 2004 à 42 % en 2007.

En 2007, sur les captages utilisés pour l'AEP et contrôlés, 42 % nécessitent un traitement spécifique de potabilisation (ABH-CSM, 2009)

2.1.7. Les rejets et leurs impacts sur les écoulements d'étiage

Le Kébir-Rhumel déverse un débit de rejet total de 2,12 m³/s (67,1 hm³/an). Le sous bassin du Rhumel-Smendou (Constantine) produit à lui seul 1,10 m³/s, ce qui représente 52 % du total rejeté à l'exutoire.

Le bassin du Kébir-Rhumel déverse dans la mer un volume d'eaux usées industrielles de l'ordre de 100 l/s. Ses effluents les plus importants et les plus nocifs se localisent dans un rayon de 20 km de la ville de Constantine. Il s'agit des rejets (en partie traités) des industries de construction mécanique de Oued Hamimine et d'Ain Smara ainsi que ceux générés par les unités de textiles et de produits laitiers de Constantine, par le complexe tabagique et le dépôt d'hydrocarbures d'El Khroub, par la cimenterie du Hamma, par les unités de matériaux de construction et autres P.M.I. Ils ont pour milieux récepteurs, l'oued Rhumel et son principal affluent, Boumerzoug (Mebarki & Thomas, 1988).

2.2. CARACTERISTIQUES NATURELLES DU GRAND BASSIN KEBIR-RHUMEL

Le bassin du Kébir-Rhumel s'étend sur une superficie de 8811 km² et possède une façade maritime de 7 km sur la méditerranée. L'oued Rhumel prend sa source vers 1160 m dans les marges méridionales du Tell, au Nord-Ouest de Belaa. Il draine, suivant une orientation Sud-Ouest–Nord-Est, les sous-bassins semi-arides des Hautes Plaines (Tadjenanet, Chelghoum Laid) puis franchit le Rocher de Constantine en s'encaissant profondément (200 m de dénivellation) dans des gorges calcaires. Depuis, il s'écoule en direction Nord-Ouest et plus au Nord, aux environs de Sidi Merouane, il conflue avec l'oued Enndja qui draine la partie occidentale du bassin.

L'oued Kébir résultant de la jonction des deux cours d'eau (Rhumel et Enndja), franchit vigoureusement la chaîne numidique, bien exposée aux vents pluvieux en provenance de la Méditerranée. Puis, il traverse les massifs très arrosés de la Petite Kabylie d'El Milia, avant de s'écouler dans une large vallée vers la mer (ABH-CSM, 2004). Le haut Rhumel à Oued Athménia est régularisé par le barrage de Hammam Grouz. Nettement plus à l'aval, à 3 km au Nord de la confluence Endja-Rhumel, l'oued Kébir porte l'imposant barrage de Béni Haroun.

Cependant, il est composé de domaines géologiques très différents : le domaine des plaines plio-quadernaire et des horsts calcaires (Hautes Plaines), le bassin néogène à dominance argileuse de Constantine-Mila, le domaine des nappes « tectoniques » de Djemila (marnes et calcaires-marneux), la dorsale kabyle (calcaires jurassiques) et les massifs gréseux numidiens et enfin le domaine du socle granitique et cristallophyllien de la petite Kabylie d'El Milia (Mebarki, 1982 et 1984).

2.2.1. Chevelu hydrographique

Le bassin du Kébir Rhumel présente un chevelu hydrographique très dense, totalisant 4200 km.

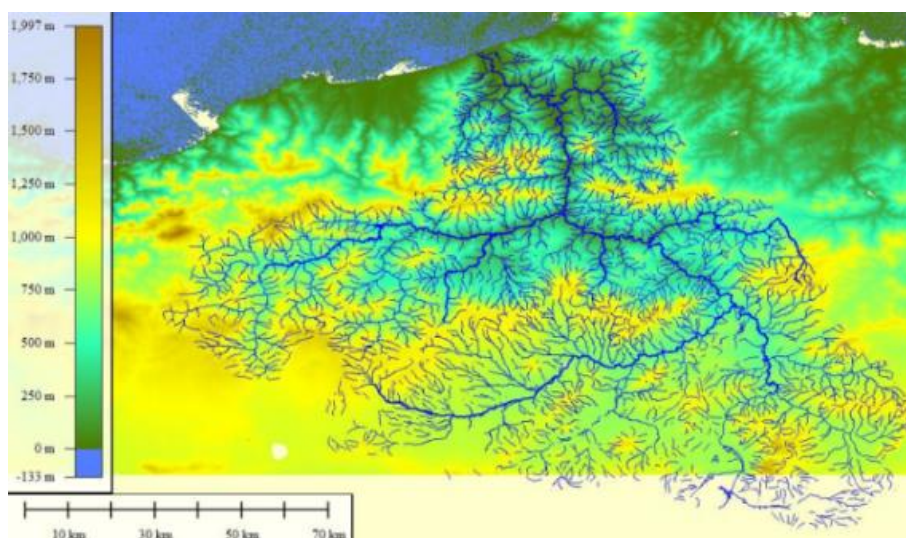


Figure.2.2. Chevelu hydrographique du BV du Kébir-Rhumel (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

2.2.2. Principaux oueds

Oued Rhumel

D'un itinéraire de plus de 23 km, c'est l'oued le plus important du bassin. Il prend naissance dans les hautes plaines sétifiennes (région de Bellaa- Wilaya de Sétif), entaille les gorges de Constantine jusqu'à la confluence de l'oued Endja, ensuite il prend le nom de Oued El Kébir.

Oued Endja

D'un itinéraire de 15 km, il prend naissance dans la confluence de l'oued El Kébir et de l'oued Redjas. Son lit est très intéressant du point de vue hydrogéologique.

Oued El Kébir

Il naît de la confluence des deux oueds, Rhumel et Endja, à près de 56 km de long et se déverse dans la mer méditerranée.

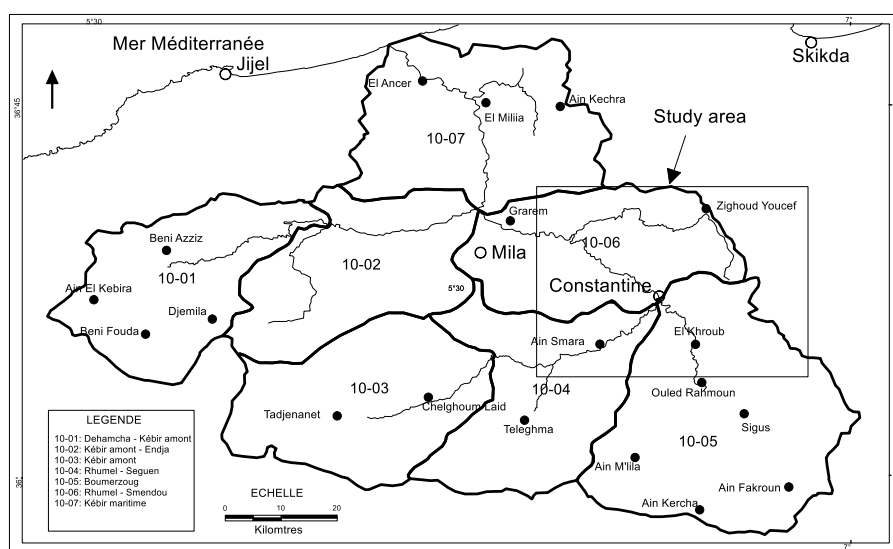


Figure.2.3. Carte des sous bassins du Kébir Rhumel (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

2.2.3. Hydrologie

Les sous-bassins du Rhumel amont, du Rhumel-Seguin et du Boumerzoug se caractérisent par de faibles apports hydrologiques de l'ordre de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, en année moyenne.

Le sous-bassin du Rhumel Smendou se caractérise par des apports annuels de l'ordre de $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour les sous bassins des oueds Dehamcha-El Kébir Amont et El Kébir amont-Endja les apports évoluent de $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'amont jusqu'à $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'aval (ABH-CSM, 2004).

Le sous bassin du Kébir maritime recèle d'importantes ressources ($12 \text{ m}^3/\text{s}$) en raison de l'importance des précipitations et des eaux régulatrices de la nappe alluviale du Bas Kébir (ABH-CSM, 2004).

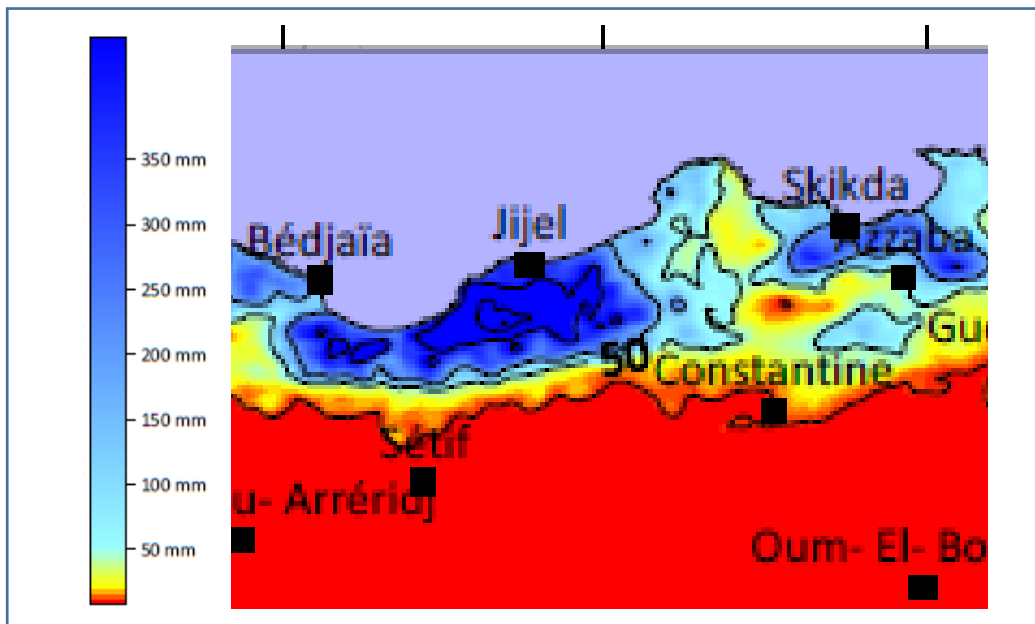


Figure.2.4. Extrait de la carte des écoulements du mois de décembre 2007 (MRE, 2010)

2.2.4. Pluviométrie

La pluviométrie est faible et irrégulière durant l'année, elle est de l'ordre de 213 mm/an, pour la station de Koudiat Tendart. Sur le bassin, la pluviométrie croit du Sud au Nord, les pluies varient en moyenne de 318 mm au Sud du bassin à 1000 mm au Nord (ABH-CSM, 2004).

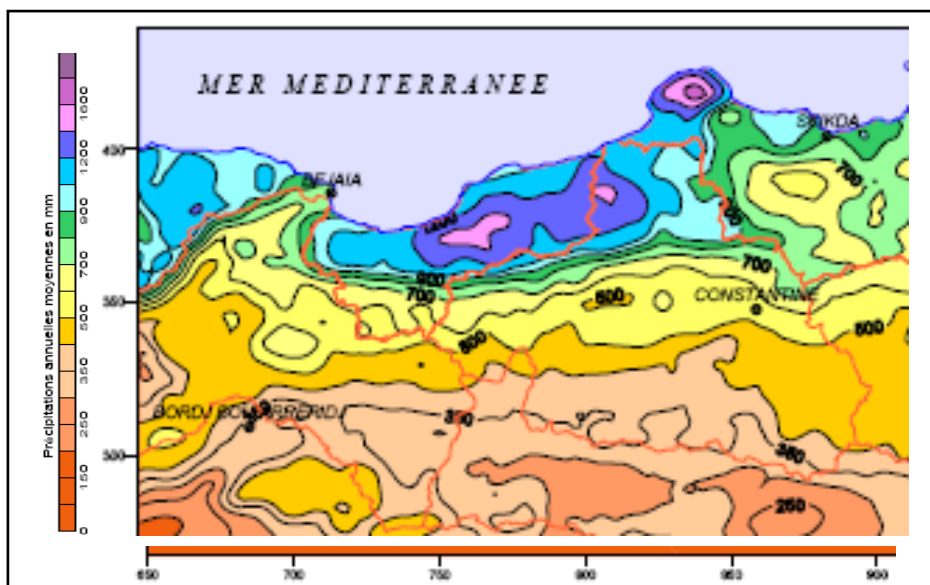


Figure.2.5. Extrait de la carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (Établie d'après A.N.R.H., 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989)

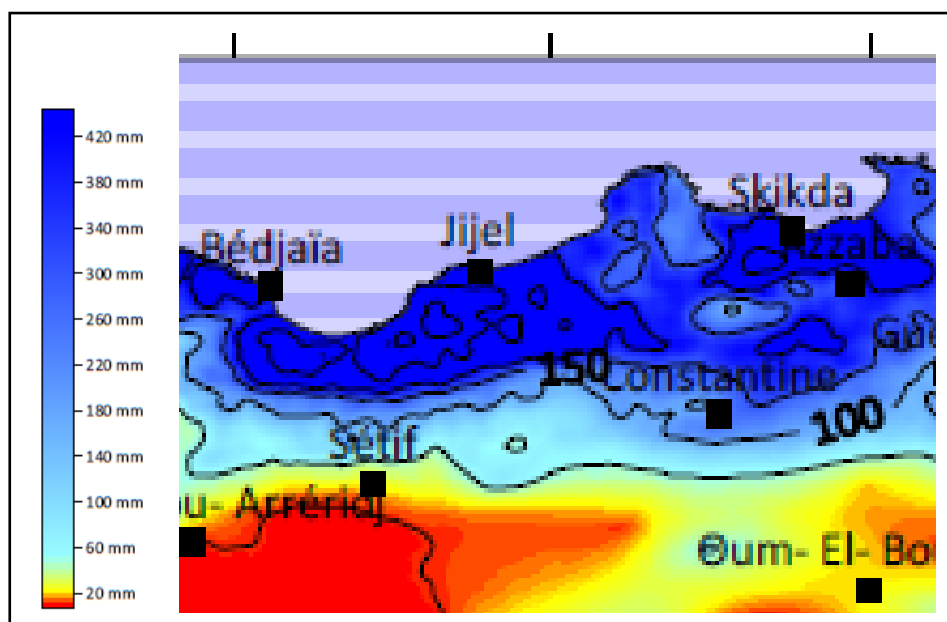


Figure.2.6. Extrait de la carte de précipitations du mois de décembre 2007 (MRE, 2010)

2.2.5. Evapotranspiration

La moyenne annuelle sur la période 1962-1990 est de 1370 mm à Constantine (Selon Thornthwaite). A titre indicatif, elle est de 1470 mm à Sétif et de 2542 mm à Batna (ABH CSM, 2004).

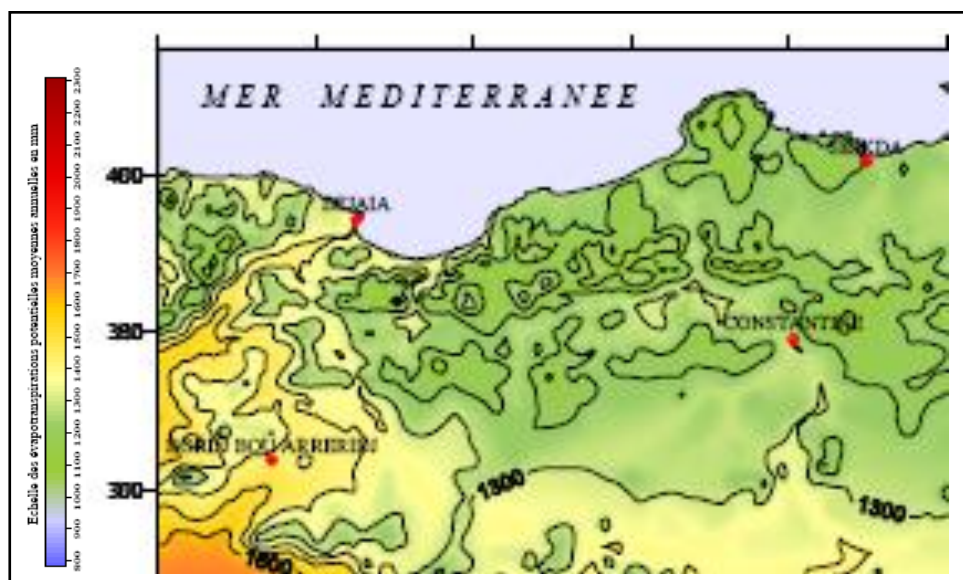


Figure.2.7. Extrait de la carte des zones d'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne de l'Est algérien (ANRH)

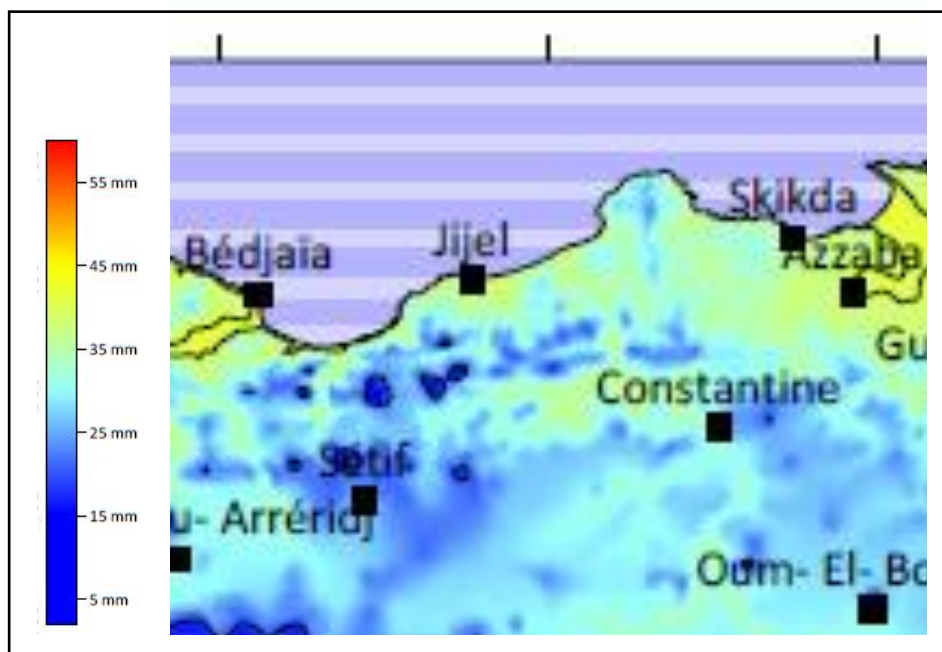


Figure.2.8. Extrait de la carte d'évaporation potentielle moyenne du mois de décembre 2007 (MRE, 2010)

2.2.6. Cadre géologique

2.2.6.1. Géologie régionale

Du point de vue géologique, le bassin de l'Oued Kébir-Rhumel, appartient dans l'ensemble à la chaîne alpine d'Algérie.

Le cadre géologique du nord algérien est d'une extrême complexité. Il se caractérise par des structures en nappe, à vergences sud dominante. On distingue :

1. Les zones internes : correspondant au socle et à la dorsale kabyle.
2. Les zones médianes : correspondant au domaine des flyschs.
3. Les zones externes : qui correspondent aux nappes telliennes.

2.2.6.1.1. Zones internes

Elles correspondent à un ensemble kabyle septentrional qui regroupent des affleurements d'un socle métamorphiques caractérisé par des formations d'âge précambrien (micaschistes, Gneiss, Phyllades ...) le tout recouvert par des roches éruptives et appartenant au socle kabyle et des formations paléozoïques (ensemble sédimentaire). Et d'une frange étroite de formations sédimentaires, secondaires et tertiaires, située à la bordure méridionale de l'ensemble, qui constitue la dorsale kabyle ou la chaîne calcaire (Raoult, 1974).

2.2.6.1.2. Zones médianes (les flyschs)

Elles se caractérisent par des formations de plaines abyssales mises en place par des

courants de turbidité. Ces flyschs sédimentés depuis le crétacé inférieur, jusqu'au début du Miocène constituent de grandes nappes de charriages.

Trois types de nappes de charriages ont été distingués :

- Flyschs massyliens : ce terme a été proposé en 1969 par Raoult pour le flysch schisto-quartzeux ;
- Flyschs mauritaniens : ce terme proposé par Gélard en 1969, étant réservé à la succession du Crétacé inférieur de type « Guerrouche » à gros bancs de grés verdâtres, l'Albien à repère quartzitique, le cénomanien microbréchiq et le Sénonien à calcaires microbréchiq et à conglomérats
- Flyschs numidiens : qui comportent des argiles à la base, d'âge Oligocène Moyen, des grés organisés en bancs décamétriques et des pelites d'âge aquitanien, ainsi que des marnes à silexites d'âge Burdigalien basal.

Les flyschs reposent, avec des modalités structurales variées, sur les zones internes et occupent une position allochtone par rapport aux zones externes.

2.2.6.1.3. Zones externes

Elle présente une grande diversification et occupe une position méridionale dans le bassin des Maghrébides. On y distingue successivement du Nord au Sud, les subdivisions suivantes :

c) Les séries ultra-telliennes (Delga, 1969)

Dont le type est la série du djebel Bousba, (Vila *et al.*, 1968) comportent un crétacé inférieur marneux et micritique clair à Ammonites (Valanginien à Vraconien), un crétacé moyen de même nature à Rotalipores, un sénonien épais analogue, très clair, riches en microfaune Globotruncana et d'Hétérohélicidés, un Eocène à trois termes : marnes sombres à boules jaunes dano-paléocènes, Yprésien-Lutétien inférieur calcaire à silex noirs et cassure grise ou noire, Lutétien supérieur marneux sombre.

d) Les séries telliennes sensu stricto

Selon Vila (1980) elles couvrent tout l'espace qui va des chainons côtiers des Babors (Leikine, Obert et Bellier, 1971) aux premières pentes des monts du Hodna.

Une description globale des séries telliennes S.S peut être proposée en faisant abstraction des discontinuités locales. De bas en haut se succèdent :

- Un lias inférieur moyen carbonaté massif de type plateforme ;
- Un Lias supérieur calcaire à silex ;
- Un Dogger siliceux de faible épaisseur parfois légèrement détritique.
- Un Malm calcaire contenant soit des intercalations carbonatées de type plate-forme dans les séries septentrionales, soit des radiolarites argileuses (Eherman, 1924 ; Duran Delga, 1955).

- Un néocomien-Barrémien marno-pélitique à Ammonites pouvant montrer de notables passées gréseuses.
- Un Aptien-Albien (Albien supérieur exclu) pélitique, argileux et gréseux.
- A partir de l'Albien supérieur, les séries deviennent exclusivement marneuses et marno-calcaires avec localement de fortes épaisseurs jusqu'au Lutétien terminal ou au début du Priabonien.

e) Les séries péni-telliennes et les unités méridionales à nummulites

Le terme péni-tellein a été créé pour désigner une série allochtone du versant Nord du djebel Zaoui, dans le massif du Chettaba, près de Constantine (Marre *et al.*, 1977).

De bas en haut se succèdent :

- Le Lias (?) est carbonaté et massif ;
- Le jurassique moyen-supérieur carbonaté est comparable par sa puissance à celui des formations néritique constantinoises. De bas en haut, on a :
- La présence de niveaux calcaires à silex d'âge jurassique moyen fait penser aux divers niveaux connus dans les séries telliennes des Babors (Leikine, 1971 ; Leikine, Obert & Bellier, 1975 ; Delga, 1955).
- Le crétacé inférieur, pélitico-marneux, riche en micrites et rares niveaux gréseux est typiquement tellien ;
- La barre calcaire albo-cénomaniennne est un faciès original (biosparites à Orbitolines et à débris variés).
- Le cénomanien inférieur conglomératique est connu avec un développement moindre dans la série tellienne de type Djemila du djebel Babor.
- Le cénomanien supérieur à Caprines présente des faciès comparables à ceux du Rocher de Constantine ou du djebel d'Oum Settas.
- Le repère à silex du Turonien basal, daté avec précision au djebel Chettaba (Vila *et al.*, 1978), est un niveau habituel des séries telliennes.
- Le Sénonien inférieur marneux et marno-calcaires à Ostréidés est un faciès bien connu dans les secteurs méridionaux des séries de type Djemila.
- La barre conglomératique campanienne possède des faciès reconnus dans les séries telliennes méridionales de Tadjenanet (Dorozoy, 1960 ; Vila, 1977).
- Le Maestrichtien marneux et marno-calcaire possède un faciès tellien banal.

2.2.7. Cadre hydrogéologique

Mebarki & Thomas (1988) ont divisé le cadre géologique et hydrogéologique du bassin en cinq grands domaines géologiques et hydrogéologiques très différents :

2.2.7.1. Domaine des Hautes-Plaines sud-constantinoises (DI),

Constitué de deux grandes unités lithologiques : les massifs carbonatés du néritique constantinois et les plaines Plio-Quaternaire.

Les massifs de calcaires jurassiques et crétacés (1000 - 1200 m d'épaisseur) émergent en horsts très karstifiés. Au pied de ces massifs, dans la zone d'éboulis, émergent de grosses sources karstiques : Ain Fesguia (90 l/s) à la base du massif du Guerioun, Ain Fourchi (300 l/s) au Sud d'Ain M'lila et à l'Est du djebel Nif Enser, Ain Boumerzoug (400 l/s) au Nord du massif du Fortas.

A noter également la source thermale de Hammam Grouz (110 l/s) qui émerge juste à l'aval de la station de jaugeage de l'Oued Athménia.

Les trop-pleins non captés alimentent l'oued Boumerzoug et l'oued Rhumel qui drainent les différentes plaines quaternaires.

2.2.7.2. Bassin néogène de Constantine-Mila (DII),

D'âge miopliocène et à dominance argileuse, à l'exception de quelques affleurements de calcaires lacustres renfermant des ressources exploitées localement. Par ailleurs, y émergent de nombreux horsts de calcaires néritiques d'âge jurassique-crétacé donnant lieu à des aquifères karstiques hydrothermaux (système de Hamma Bouziane-Constantine).

La station de Guerarem, sur le bas-Rhumel, reçoit les écoulements issus de l'ensemble des domaines DI et DII.

2.2.7.3. Le domaine des « nappes » tectoniques de Djemila (DIII),

À l'ouest de Ferdjioua, en position occidentale par rapport au domaine DII. Elles sont formées d'une alternance de marnes et de calcaires marneux (Jurassique-Crétacé-Eocène). Les sources issues des niveaux calcaires les plus épais ont un débit relativement faible, exceptée la source faiblement thermale de Ain Hammam (21°, 150 l/s).

Les débits de l'oued El Kébir-amont (Oued Enndja) sont contrôlés par la station de Douar Tassadane.

2.2.7.4. Le domaine de la dorsale kabyle et des massifs gréseux numidiens (DIV),

Au Nord de Guerarem. Il est constitué essentiellement de grès numidiens sous lesquels apparaissent des calcaires jurassiques très tectonisés de la dorsale kabyle. Ces calcaires donnent naissance à des émergences à débit non négligeable.

2.2.7.5. Le domaine du socle granitique et cristallophyllien de la petite Kabylie d'El Milia (DV)

Au Sud d'El Milia, la vallée du Kébir s'encaisse dans les formations du socle. Large de 1 à 2 km, cette vallée renferme des graviers et sables alluviaux abondants. La nappe alluviale, en partie exploitée, constitue à l'opposé des formations du socle, la ressource hydraulique la plus importante du secteur.

Avant de rejoindre plus à l'aval la mer Méditerranée, l'oued Kébir est contrôlé par la station d'El Ancer. Son affluent, l'oued Boussiaba, est jaugé par la station d'El Milia, située plus en amont.

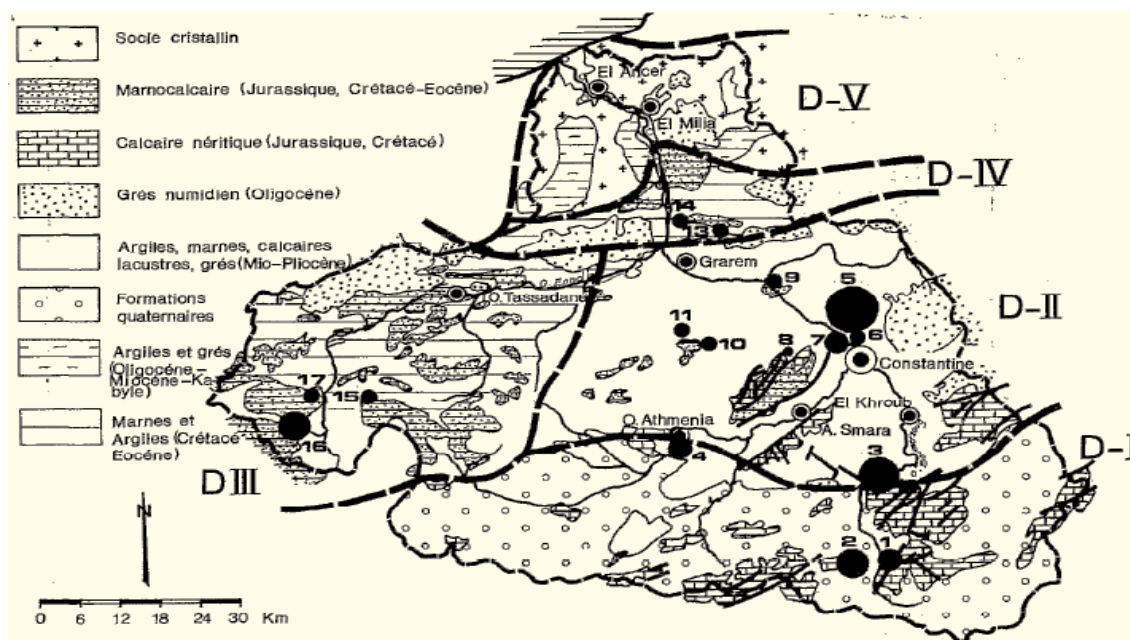


Figure.2.9. Les grands domaines hydrogéologiques du Kébir-Rhumel (Mebarki & Thomas, 1988 ; Mebarki, 2005)

Echanges eaux de surface-eaux souterraines en étiage

Les données hydrométriques journalières observées par 7 stations de jaugeage (Oued Athménia, Ain Smara, El Khroub, Guerarem, Douar Tassadane, El Milia et El Ancer), sur une période commune de six années civiles consécutives (1973-1978), ont suffi pour mettre en évidence un soutien d'origine double des débits d'étiage des oueds par les aquifères karstiques des calcaires néritiques dans la partie supérieure du bassin et par la nappe alluviale dans la partie inférieure (vallée du bas-Kébir).

2.3. CARACTERISTIQUES NATURELLES DU RHUMEL AU SENS STRICT

2.3.1. Caractéristiques géologiques

Les massifs du constantinois appartiennent aux domaines externes de la chaîne des Maghrébides. Les grands traits stratigraphiques des séries néritiques constantinoises sont actuellement bien connus. Il s'agit essentiellement de formations calcaires Jurassico-crétacé et une couverture marno-calcaire d'âge Sénonien supérieur à Eocène avec la présence de lacunes de sédimentation.

2.3.1.1. Mésozoïque

2.3.1.1.1. Trias

Dans la région de Constantine le Trias n'affleure jamais en position stratigraphique normale. Il est rencontré sous trois dispositions différentes :

- Soit, en forme de diapirs ;
- Soit, en forme de lames à la base des unités allochtones ;
- Soit, injecté le long d'accidents tectoniques.

Les affleurements du Trias sont circonscrits ou étendus sur plusieurs centaines de mètres. Il est constitué par des roches essentiellement évaporitiques.

Parmi les affleurements connus dans le Constantinois on peut citer du Nord au Sud

(figure.III.01).

- Les affleurements de Sidi Merouane.
- Les affleurements des massifs du Kheneg et djebel Akhal, au Nord-ouest et à l'Ouest de Constantine.
- Les affleurements de la dépression du Chattaba, djebel Ech-Chebka, Ain El Kebch a l'Ouest de Constantine.

Les affleurements lies aux formations Tertiaires situées au Sud des massifs du Felten et de l'Oum-Settas.

2.3.1.1.2. Jurassique

Il affleure au Nord : djebel Sidi Driss, Toumiettes, au djebel Akhal, la série jurassique est puissante d'environ 700 m, entièrement carbonatée (calcaires oolithiques-dolomies et calcaires à silex).

Elle inclut des lumps, microconglomérats, stratifications entrecroisées et des failles. Ces phénomènes indiqueraient une certaine instabilité lors de la sédimentation de ces dépôts (Benabbas, 2006). Au massif du Chettaba, les formations jurassiques sont dominées par des calcaires et des dolomies.

2.3.1.1.3. Crétacé

a. Crétacé inférieur

Il est représenté dans la région de Constantine essentiellement par des dépôts à dominante marno-calcaires.

Néocomien

Il affleure au djebel Akhal avec une épaisseur totale d'environ 200m, et au massif du Chettaba, Il est représenté par une épaisse série de marnes, de calcaires et marno-calcaires du Valanginien. Cette série contient de nombreuses Ammonites et se caractérise par la présence de surfaces durcies ; la série se termine par des calcaires microlitiques et des niveaux de marnes noires de l'hauterivien (Benabbas, 2006).

Barrémien

Le Barrémien affleure sur toutes les feuilles de la région d'étude. Il est représenté par deux ensembles. Un inférieur carbonaté à faciès micro graveleux à polypiers et rudistes, et un autre supérieur qui se compose de calcaire et de dolomies massifs.

Au djebel Akhal et au massif du Chettaba, il est représenté essentiellement par des calcaires.

Aptien

L'aptien inférieur affleure au djebel Karkara, au djebel Zouaoui est constitué par une ensemble de marnes et de calcaires marneux bio micritiques à graveleux. Par contre l'aptien supérieur au djebel Frikitia est plus carbonaté avec des calcaires polypiers et Orbitolines des niveaux supérieurs se composent de dolomie alternant avec des lumachelles à huîtres, la série se termine par un hard-ground très constant.

Albien

Il affleure au djebel Frikitia avec une épaisseur d'environ une centaine de mètres, et représenté par des marnes et marno-calcaires à la base, et par des conglomérats au sommet, au NW du djebel Chettaba, mais la série albienne au djebel Zouaoui est plutôt marneuse avec une alternance de marno-calcaires et de calcaires marneux. Il est absent au djebel Oum Settas.

Cénomanién

Il est représenté par une épaisse série de calcaire, de marne et de marno calcaire.

Cette formation est remarquable au djebel Salah au Nord de la ville de Constantine (montagne tabulaire de forme triangulaire limité par des failles).

Sur le rocher de Constantine, le Cénomanién comprend à la base des calcaires rubanés organo-détritique ravinés. Au massif du Chettaba, il est représenté par des calcaires à orbitolines.

Dans la région du Khroub et d'El Aria, l'épaisseur du cénoomanien est très variable, elle peut atteindre les 250 m et il est essentiellement calcaireux.

b. Crétacé supérieur

Turonien

Il existe dans le rocher de Constantine, et dans les massifs du Felten, au djebel Oum Settas le Turonien constitué une série d'environ 200 m avec un ensemble inférieur formé de calcaires rubanés avec des niveaux de calcaires massifs à rudistes, et par des calcaires à silex au rocher de Constantine et au massif du Chettaba.

Sénonien

Il est visible dans le massif du Chettaba, djebel Akhal et au massif de l'Oum Settas-Mazela et constitué essentiellement par les marno-calcaires. Au rocher de Constantine, il est représenté par des marnes et des calcaires biomicritiques.

2.3.1.2. Cénozoïque

a. Paléogène

Le paléogène existe dans les monts de Constantine. Il est représenté par une épaisse série de marnes, de calcaires phosphatés et de calcaires à silex.

b. Néogène

Il est représenté essentiellement par le miocène inférieur et situé au Sud de la chaîne numidique. Il est constitué de conglomérats et d'argile rouge.

2.3.1.3. Miopliocène continental

Il s'agit d'une formation détritique qui débute par une série de conglomérats et d'argiles rouges de l'Aquitaniens continental. Les conglomérats sont surmontés par des argiles et des grès dans lesquels s'intercalent souvent des passés gypseuses d'épaisseurs variables. Il est représenté par des dépôts continentaux (coiffait, 1992) (Figure. III.02). Le sommet se termine par des calcaires lacustres plus ou moins travertineux. L'exemple le plus typique est celui de la plate-forme d'Ain-El-Bey.

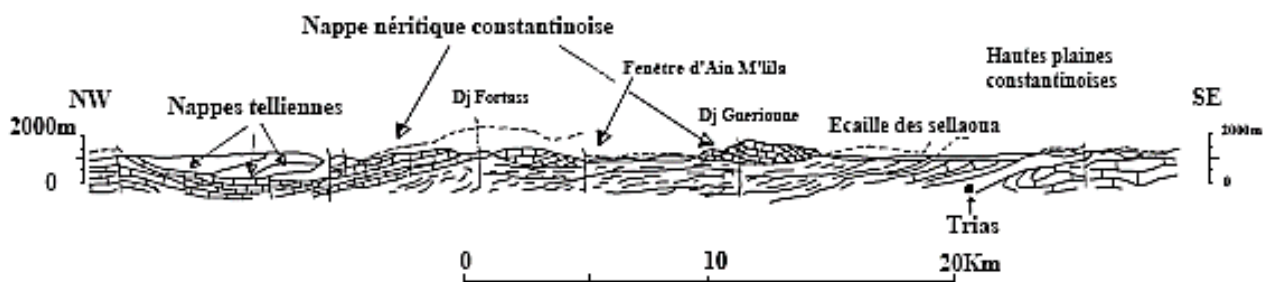


Figure 2.10. Coupe interprétative dans la région de Constantine (d'après la carte géologique de Constantine au 1/200000, SONATRACH, 1977)

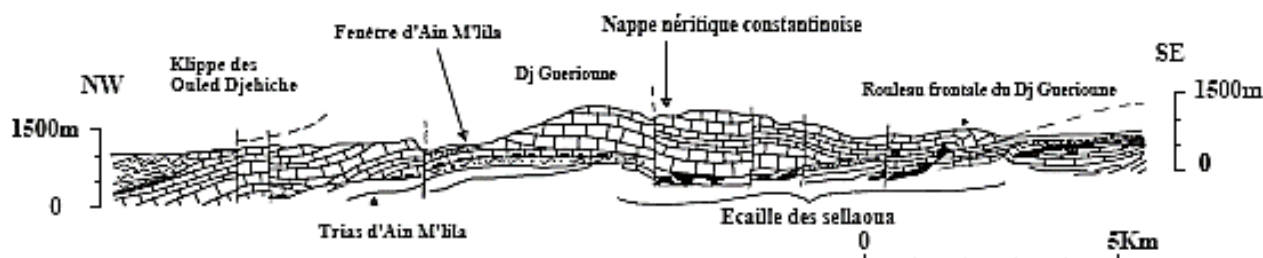


Figure 2.11. Coupe interprétative dans la région d'Ain M'lila (d'après Vila, 1980)

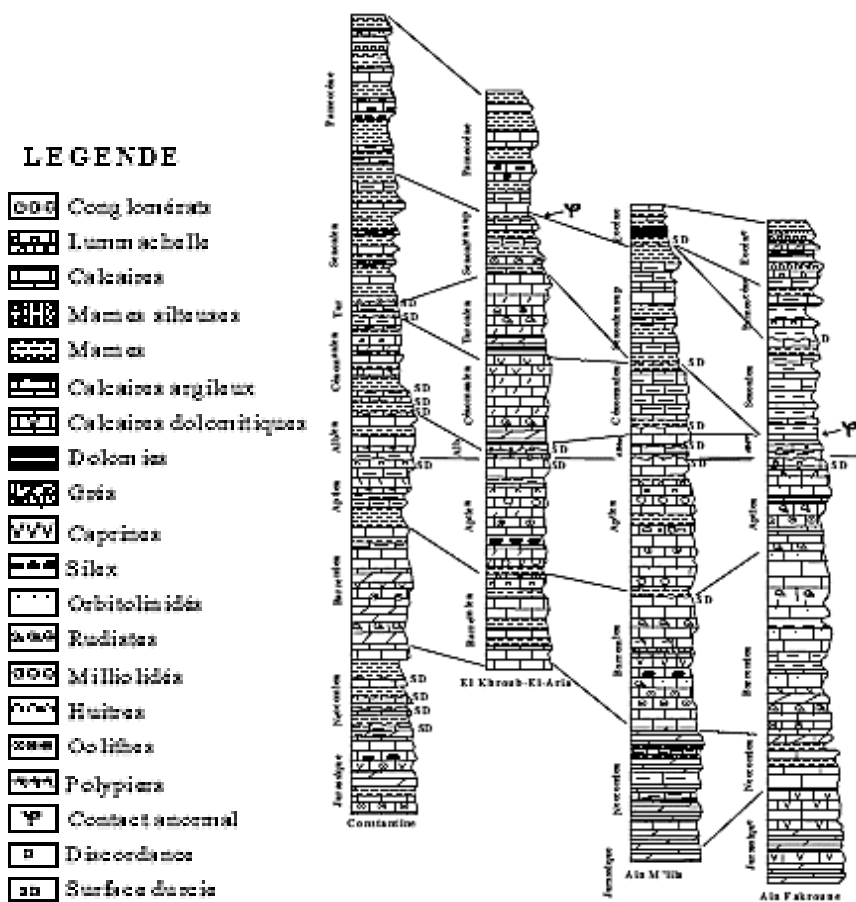


Figure 2.12. Correlation lithostratigraphique de la région de Constantine (Marmi, *et al.*, 2001)

2.3.1.4. Quaternaire

Les alluvions récentes des Oueds correspondent à des limons et graviers et des galets roulés.

Les alluvions anciennes des Oueds se composent de cailloux roulés et de limons. Elles sont parfois encroûtées et proviennent d'anciennes terrasses.

Les éboulis sont surtout développés en bordure des reliefs numidiens et des massifs calcaire et gréseux : djebels Sidi Driss, El Kantour, Toumiettes, Bougrina, Kef Anser, Taya et Ouahch.

Les plateaux sont composés aussi de cailloux roulés, de limons et de graviers. Elles sont souvent cimentées par une croute calcaire.

Les formations de pentes correspondent à des glacis polygéniques qui forment des surfaces très faiblement inclinées, près des plaines recouvertes d'un matériel élastique, avec de vastes placages sur les versants marneux.

Les glacis de Constantine, dans la région d'El Aria, sont constitués exclusivement de blocs du Numidien bien roulés (Derouiche, 2008 ; Belhai & Bougdal 2004).

2.3.2. Caractéristiques hydroclimatologiques

Dans ce volet, les caractéristiques pluviométriques et thermiques ont été exposées, dont l'objectif est de déterminer l'évapotranspiration, le déficit d'écoulement, le ruissellement et l'infiltration. Cette dernière prend part dans l'alimentation des aquifères et le renouvellement des réserves souterraines.

2.3.2.1. Précipitations

Les précipitations constituent un phénomène physique qui décrit le transfert d'eau dans sa phase liquide (pluie) ou solide (neige, grêle...) entre l'atmosphère et le sol. Les précipitations représentent l'élément le plus important du cycle hydrologique.

En hydrologie, les précipitations sont considérées comme étant la totalité de la lame d'eau recueillit par la pluviométrie. Il est connu que le climat de de la région d'étude appartient à l'étage semi-aride, caractérisé par une pluviométrie relativement différenciée, allant de 600 à 700 mm dans la partie nord et de 400 à 450 mm dans la partie sud.

Cependant, les données utilisées ont été fournies par la station d'Ain El Bey, sur une période de 29 ans allant de 1979 à 2008.

Tableau.2.2. Coordonnées de la station d'Ain El Bey

Wilaya	Localité	Coordonnées
Constantine	Ain El Bey	36°9'15''N, 5°40'9''E

2.3.2.1.1. Précipitations moyennes mensuelles

La figure ci-dessous traduit un régime de précipitation bimodal : un premier maximum est de 78,92 mm, observé en décembre et un deuxième observé au mois d'avril avec 60,64 mm.

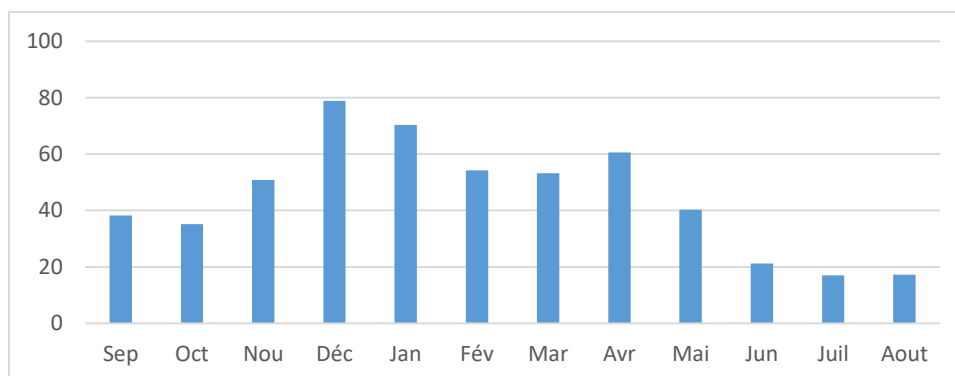


Figure.2.13. Précipitations moyennes mensuelles

On remarque que presque la moitié de la lame reçue dans la région étudiée se manifeste en hiver. Ainsi l'alimentation des cours d'eau et des nappes souterraines par les précipitations est donc considérable en saison hivernale.

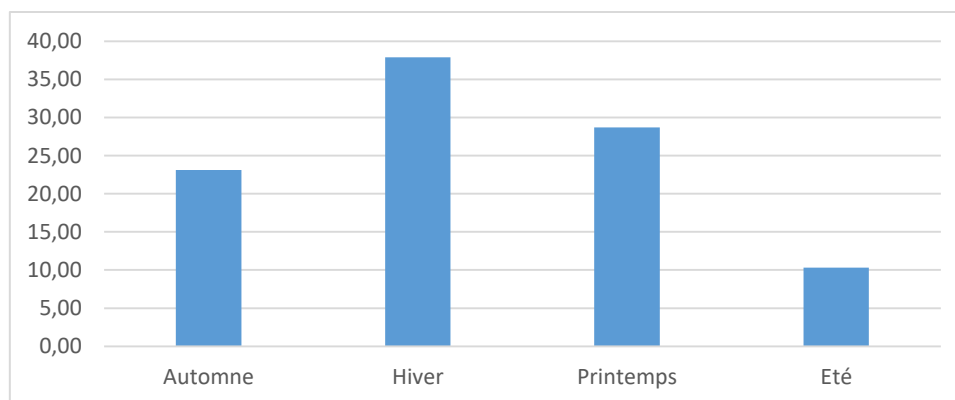


Figure.2.14. Répartition saisonnière des précipitations

2.3.2.1.2. Précipitations moyennes annuelles

En rappelle que l'étude des précipitations moyennes annuelles a été effectuée à partir des données des périodes allant de 1979 à 2008 enregistrées à la station d'Ain El Bey.

Le choix de cette série assez longue de 30 ans, vise à définir le régime pluviométrique en question et d'identifier la nature de la manifestation des années sèches de celles humides.

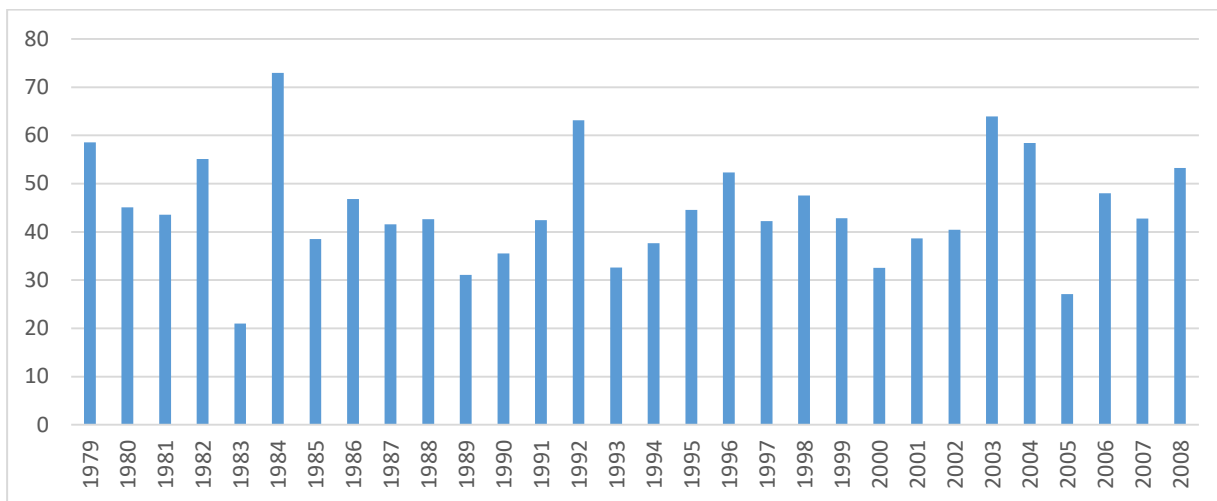


Figure.2.15. Représentation des précipitations moyennes annuelles

L’histogramme des précipitations moyennes annuelles de la période 1979-2008 (Fig.2.15) montre que l’année 1984 est la plus pluvieuse, avec des précipitations de l’ordre de 73 mm, par contre l’année 1983 est la moins pluvieuse avec une valeur de 21 mm.

2.3.2.2. Températures

La température constitue avec les précipitations l’élément majeur qui régit le climat d’une région. Elle joue le rôle d’un facteur qui influe sur le bilan hydrographique du fait de son impact sur le déficit d’écoulement et sur l’évapotranspiration.

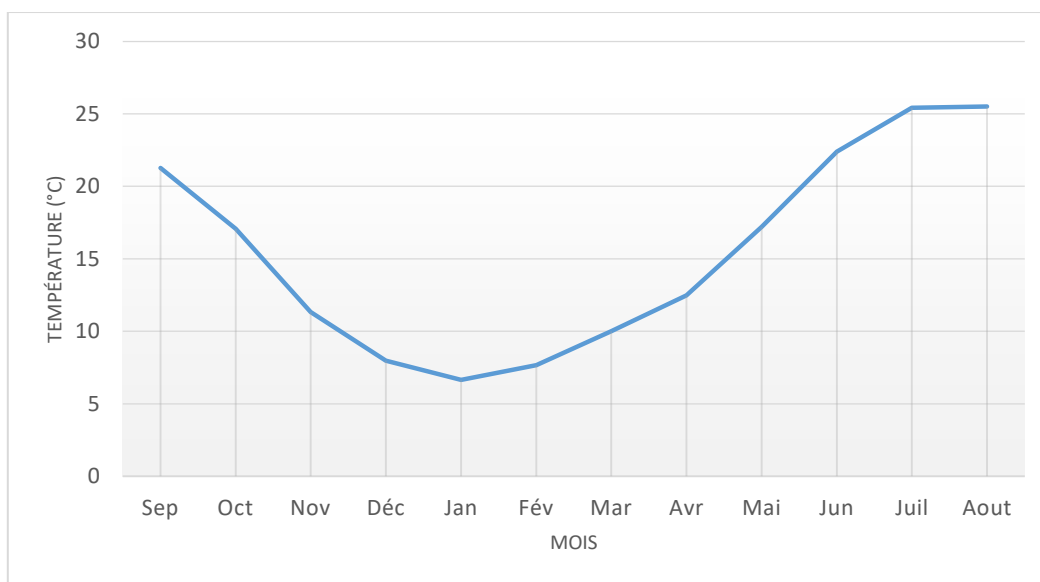


Figure.2.16. Températures moyennes mensuelles

Les températures sont faibles en hiver (décembre, janvier et février) et élevées en été (juin, juillet et aout). Cependant, le mois le plus frais est janvier avec une moyenne de 6,66°C et le mois le plus chaud est aout avec une moyenne de 25,51°C.

2.3.2.3. Relation températures-précipitations

Le diagramme ombrothermique résulte de la combinaison des deux paramètres climatiques principaux, en l'occurrence les précipitations et les températures. Cette relation permet d'établir un graphique ombrothermique sur lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations.

Le diagramme ombrothermique permet de déterminer les mois les plus secs correspondants selon la définition de Gaussen et Bagnouls au mois où les précipitations moyennes sont inférieures ou égales au double de la température moyenne ($P \leq 2T$).

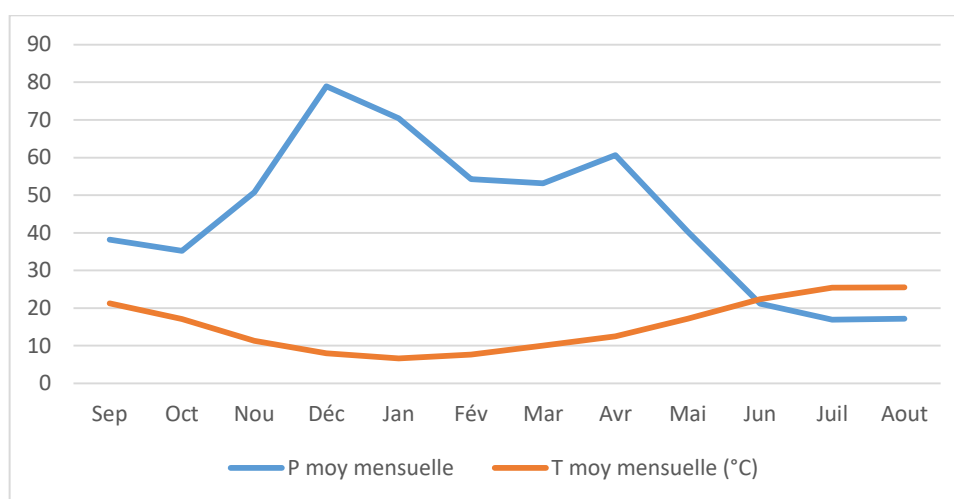


Figure.2.17. Diagramme ombrothermique durant la période 1979-2008

Selon le diagramme ombrothermique (courbe pluviothermique) ci-dessus (Fig.2.17) établis selon la règle de Gaussen ($P=2T$), on remarque que :

-La courbe des précipitations se situe au-dessus de la courbe thermique du mois de septembre à la fin de mai, tandis que du début de juin jusqu'à la fin de septembre la courbe thermique se trouve au-dessus de celle de la pluviométrie.

-La période excédentaire (humide), débute au début du mois de septembre et s'étale jusqu'à la fin du mois de mai et la période déficitaire (sèche), s'étale au début du mois de juin jusqu'à la fin de septembre.

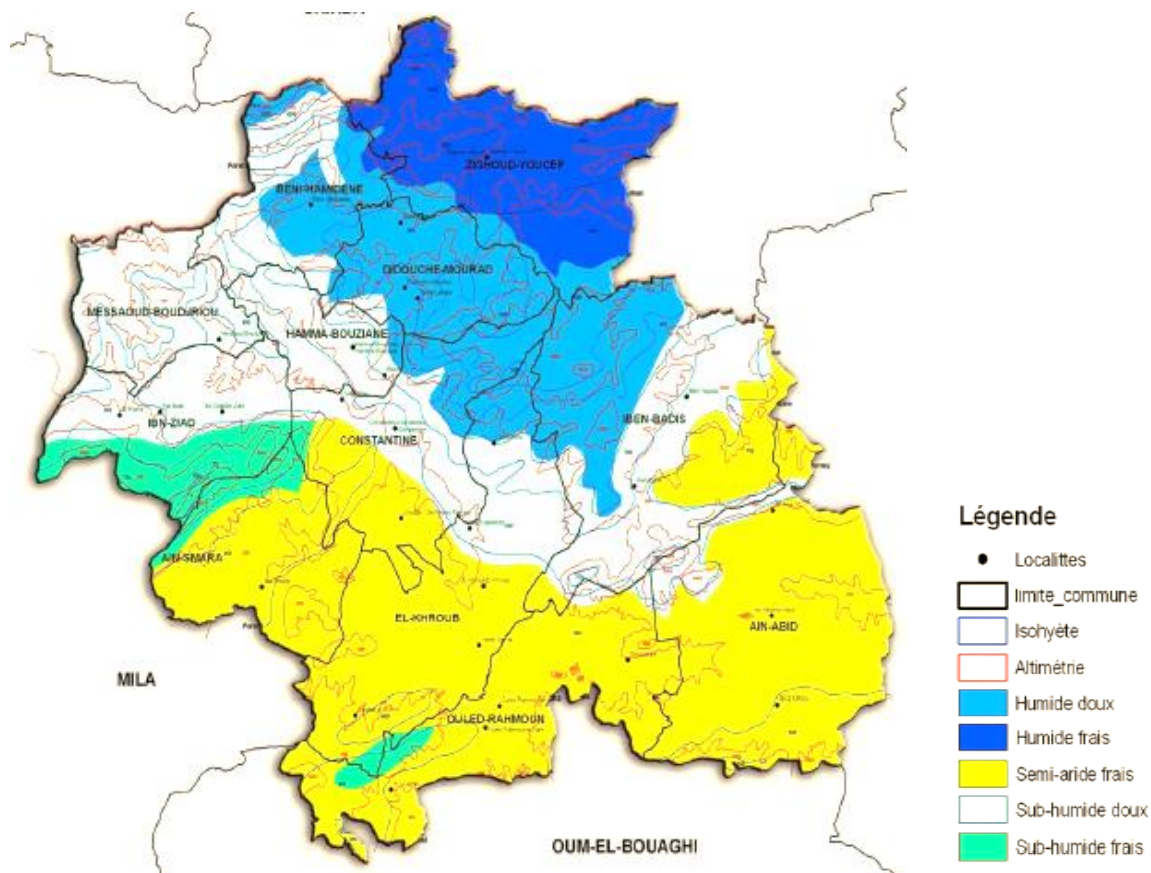


Figure.2.18. Carte climatique de la wilaya de Constantine

2.3.2.4. Le bilan hydrologique

L'établissement du bilan hydrologique selon Thornthwaite est primordial pour l'évaluation des réserves d'eau transmises ou emmagasinées dans une région. Il est exprimé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I + Wa..... (1)$$

Avec :

- P* : Précipitations moyennes annuelles en mm ;
- ETR* : Evapotranspiration réelle en mm ;
- R* : Ruissellement en mm ;
- I* : Infiltration moyenne en mm ;
- Wa* : Variation des réserves (terme souvent négligeable) ;

2.3.2.5. Calcul de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est un transfert d'eau depuis la terre vers l'atmosphère par évaporation des eaux de surface et du sol et par transpiration des végétaux.

2.3.2.5.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

C'est la quantité d'eau nécessaire à la transpiration non ralentie d'un tapis végétal couvrant entièrement et alimenté régulièrement en eau.

La formule générale utilisée pour le calcul de l'ETP selon Thornthwaite est la formule suivante :

$$ETP = 16 (10 T/I)^a$$

$$ETP_C = 16 (10 T/I)^a \cdot k \dots \dots \dots (2)$$

Où :

T : température moyenne mensuelle exprimé en °C ;

K : facteur de correction mensuelle ;

I : indice thermique annuel égale à :

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{avec : } i = (T/5)^{1.514} \quad i : \text{indice thermique mensuel.}$$

$$i=1$$

a : exposant climatique défini ainsi : $a = 0.016(I) + 0.5$

$$ETP_C = ETP \cdot K$$

ETP_C : évaporation potentielle mensuelle corrigée.

D'après les données de la station de Ain El Bey : *I* = 70,79 et *a* = 1,63.

Tableau.2.3. calcul de l'ETP selon Thornthwaite.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Annuel
Précipitations (mm)	38,18	35,19	50,78	78,92	70,40	54,24	53,19	60,64	40,28	21,21	16,96	17,18	537,17
Températures (°C)	21,26	17,07	11,34	07,96	06,66	07,66	10,00	12,49	17,20	22,40	25,43	25,51	15,42
<i>i</i>	8,94	6,41	3,45	2,02	1,54	1,90	2,85	3,99	6,49	9,68	11,73	11,79	70,79
ETP (mm)	96,07	67,17	34,48	19,37	14,48	18,19	28,09	40,37	68,01	104,60	128,64	129,30	748,77
<i>K</i>	1,05	0,91	0,75	0,7	0,73	0,78	1,02	1,15	1,32	1,33	1,33	1,24	-
ETP C (mm)	100,8	61,12	25,86	13,56	10,57	14,18	28,65	46,42	89,77	139,18	171,09	160,33	861,6

2.3.2.5.2. Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Pour estimer l'évapotranspiration réelle, nous utilisons encore une fois la méthode de Thornthwaite.

Lorsque les précipitations moyennes mensuelles (P) sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle ; l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle $ETR=ETP$. Et lorsque le volume des précipitations mensuelles est inférieur à l'ETP, l'ETR le sera aussi égal tant que les réserves en eau du sol seront capables d'équilibrer la balance, au-delà il aura un déficit.

Dans ces calculs, Thornthwaite admet l'utilisation d'une réserve en eau utile (RU) de 100mm. Si malgré l'apport de réserve facilement utilisable est toujours inférieur à l'ETP, à ce moment il existe un déficit agricole (DA).

$$DA= ETP-ETR.....(3)$$

Si la réserve facilement utilisable est remplie, le reste va contribuer ce qu'on appelle Water-surplus (Ws).

Tableau.2.4. Evapotranspiration réelle

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Annuel
P	38,18	35,19	50,78	78,92	70,40	54,24	53,19	60,64	40,28	21,21	16,96	17,18	537,17
ETP corrigée	100,87	61,12	25,86	13,56	10,57	14,18	28,65	46,42	89,77	139,1	171,0	160,3	861,6
P-ETPC	-62,69	-25,93	24,92	65,36	59,83	40,06	24,54	14,22	-49,49	-117,9	-154,1	-143,2	
RFU	0,00	0,00	24,92	90,28	100	100	100	100	50,51	0,00	0,00	0,00	
ETR	38,18	35,19	25,86	13,56	10,57	14,18	28,65	46,42	40,28	21,21	16,96	17,18	308,23
DA	62,89	25,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49,49	117,9	154,1	143,2	464,69
WS	0,00	0,00	24,92	65,36	59,83	40,06	24,54	14,22	0,00	0,00	0,00	0,00	164,67

L'évapotranspiration réelle calculée est de l'ordre de 308,23mm ; d'où 57,38% des précipitations.

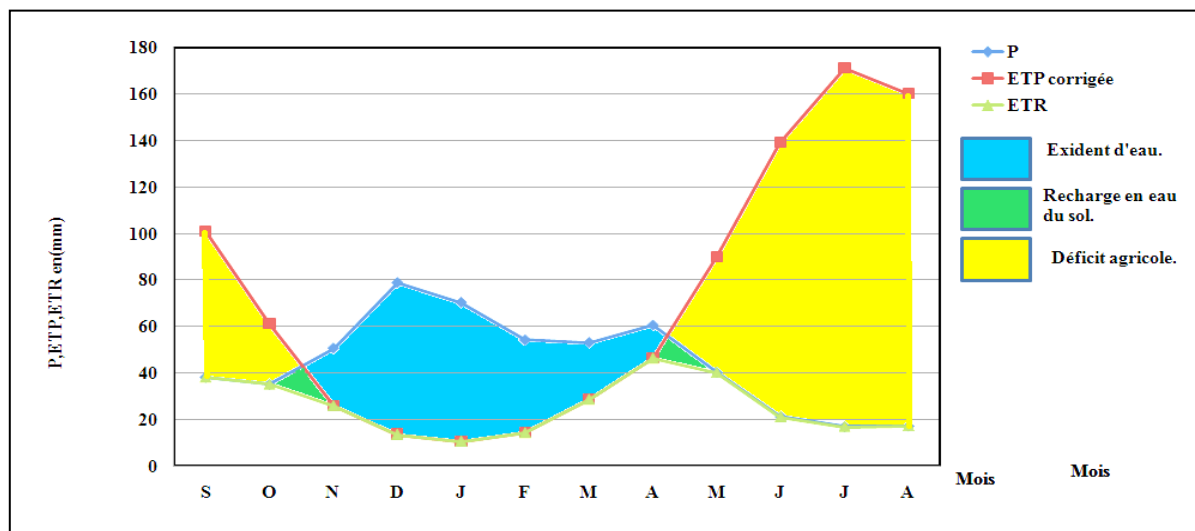


Figure.2.19. Bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite

2.3.2.6. Interprétation du bilan hydrique

Le graphique de la figure.2.19 permet de faire les observations suivantes :

Les hauteurs des précipitations atteignent leur maximum en décembre, là où l'ETP corrigée atteint son minimum.

L'ETP corrigée atteint son maximum en mois de juillet, là où les précipitations atteignent leur minimum. L'allure de la courbe qui représente l'ETP, donne une meilleure symétrie que celle des précipitations, ceci est expliquée par l'homogénéité de L'ETP durant l'année, qui est due au fait qu'elle évolue en fonction de la température suivant une loi normale par contre les précipitations sont hasardeuses et irrégulières d'un mois à un autre, ou d'une année à l'autre.

-le déficit agricole s'étend sur la période sèche de l'année.

-les écoulements deviennent importants à partir de la mi-septembre et s'étalent jusqu'au mois de Mai.

2.3.2.6.1. Exploitation du bilan hydrologique

Pour le calcul des ruissellements, et des infiltrations on utilise :

Evapotranspiration potentielle : $ETP = 861,6 \text{ mm}$.

Précipitations moyennes annuelles $P = 537,17 \text{ mm}$.

Evapotranspiration réelle : $ETR = 308,23 \text{ mm}$.

2.3.2.6.1. a) Ruissellements (R)

La formule de Tixeront-Berkaloff que nous donnons ci-après permet d'évaluer le ruissellement :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2} \dots\dots\dots(4)$$

$$R = \frac{(537,17)^3}{3(861,6)^2} \Rightarrow R = 69,59mm$$

L'application numérique de la formule donne un ruissellement égal à 0,069 m ou encore 69,59 mm, soit environ 57,38 % des précipitations.

2.3.2.6.1. b) Infiltration (I)

$$P = ETR + (R + I) \pm \Delta W$$

Avec :

Δw : lames des variations des réserves de la nappe (mm) (négligeable).

L'application numérique de la formule donne :

$$537,17 = 308,23 + (69,59 + I).$$

$$I = 537,17 - 377,82 \Leftrightarrow I = 159,35mm .$$

$$\Rightarrow I = 1,59 \% \text{ des précipitations.}$$

Pour conclure en ce qui concerne l'hydroclimatologie, la zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride, avec des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 537, 17 mm et des températures moyennes annuelles de l'ordre 15,42 de °C. L'évapotranspiration réelle est de 308,23 mm évaluée par la méthode de Thornthwaite représente de 57,38% des précipitations. Enfin, le déficit agricole est enregistré sur une période allant du mois de mai jusqu' au mois d'octobre.

2.3.3. Caractéristiques hydrogéologiques

D'après le Plan National de l'Eau de 2010, les principaux systèmes aquifères dans la vallée du Rhumel au sens-strict, en allant depuis l'aval vers l'amont sont (Fig.2.20) l'aquifère d'Oued Rhumel et l'aquifère de la région de Constantine (MRE, 2010).



Figure.2.20. Principaux systèmes aquifères dans le bassin du Kébir-Rhumel (MRE, 2010)

2.3.3.1. Aquifère d'Oued Rhumel

L'Oued Rhumel, qui traverse la ville de Constantine, est né de la confluence de plusieurs oueds, (dont l'Oued Tadjenanet), qui convergent vers Oued Athménia. L'Oued Rhumel proprement dit s'étend depuis le barrage de Hammam Grouz (à Oued Athménia), jusqu'au barrage de Beni Haroun, où il est relayé par l'Oued Kébir.

A hauteur de Constantine, la vallée se rétrécit, l'oued est très encaissé, et dessine des gorges dans les formations calcaires. Seule la partie amont de la vallée est donc susceptible de constituer un réservoir plus ou moins intéressant.

L'aquifère est constitué par les dépôts Mio-plio-quadernaire, représentés par des calcaires lacustres, des grès, des conglomérats, des calcaires tendres, des cailloutis, et des alluvions récentes.

Selon Durozoy (1960), les alluvions ne sont développées que dans les lits de l'Oued Rhumel et de ses principaux affluents. Leurs épaisseur est variable, mais ne dépasse pas 20 m.

Les formations du Miopliocène alimentent par contre de nombreuses sources drainées par les oueds. Ces formations sont captées par de nombreux puits entre Tadjenanet et Chelghoum-El-Aid.

D'après la carte des ressources, le volume exploitable à partir du complexe aquifère de la vallée du Rhumel est de l'ordre de 6 hm³/an (MRE, 2010).

2.3.3.2. Aquifère de la région de Constantine

La carte de délimitation des aquifères a identifié un aquifère qu'elle a intitulé « Région de Constantine », qui englobe probablement, aussi bien l'ensemble néritique du bassin du Rhumel, que les formations alluvionnaires et les calcaires lacustres de la région d'El Khroub.

Les calcaires couvrent une grande partie du bassin du Kébir Rhummel, notamment les monts de Constantine, Oued Athménia, Tadjenanet, et Ain M'Lila, et débordent sur le bassin de la Seybouse à Hammam Meskhoutine. La superficie de cet ensemble est de 902.5 km².

L'ensemble néritique constantinois est constitué de grands massifs calcaires ou calcaro-dolomitiques, souvent plissés, et fracturés. Ce sont des massifs carbonatés karstiques, qui ont été mis en place pour l'essentiel durant le Crétacé inférieur. Les faciès perméables délimités par Vila (1980) sont constitués par :

- les dolomies du Jurassique supérieur,
- les calcaires et dolomies du Néocomien,
- les calcaires du Barrémien-Aptien,
- les calcaires Albo-cénomaniens.

Toutes ces formations forment un aquifère karstique, qui a constitué pendant longtemps la seule source d'alimentation en eau potable de la ville de Constantine et des villages environnants.

En plus des formations carbonatées, il existe dans la région de Constantine d'autres aquifères aux ressources certes limitées, mais susceptibles de couvrir des besoins locaux. Parmi ceux-ci on peut citer les formations alluvionnaires du Quaternaire, les calcaires lacustres du Miopliocène, et les grès du Miocène.

Les ressources exploitables de la région de Constantine, évaluées par la carte des ressources en eau, sont de l'ordre de 37.4 hm³/an (MRE, 2010).

3.3. CONCLUSION

Le bassin du Kébir-Rhumel s'étend sur une superficie de 8811 km² et possède une façade maritime de 7 km (sur la méditerranée). L'oued Kébir résultant de la jonction des deux cours d'eau (Rhumel et Enndja), franchit vigoureusement la chaîne numidique, bien exposée aux vents pluvieux en provenance de la Méditerranée. Puis, il traverse les massifs très arrosés de la Petite Kabylie d'El Milia, avant de s'écouler dans une large vallée vers la mer (ABH-CSM, 2004)

La population dans le bassin Kébir Rhumel compte deux millions cinquante-six mille (2.056.000) habitants selon les résultats provisoires du dernier recensement 2008, répartis en quatre-vingt-dix (90) communes, et six (06) wilayas. Cinquante-sept (57) communes sont entièrement incluses dans le bassin et trente-trois (33) partiellement.

Il faut noter que seuls 2 sur les 7 barrages en exploitation ont une capacité supérieure à 100 hm³ (ABH- CSM, 2007).

Les besoins en eau potable sont de l'ordre de 196,67 hm³/an, avec une consommation de 24,65 hm³/an et un réseau de distribution de 2734 km linéaire.

En ce qui concerne l'hydraulique agricole, le bassin du Kébir Rhumel ne comprend aucun grand périmètre d'irrigation. Cependant, il englobe 23 aires d'irrigation et 7 périmètres de petites irrigations (ABH- CSM, 2007).

Cependant, il est composé de domaines géologiques très différents : le domaine des plaines plio-quadernaire et des horsts calcaires (Hautes Plaines), le bassin néogène à dominance argileuse de Constantine-Mila, le domaine des nappes « tectoniques » de Djemila (marnes et calcaires-marneux), la dorsale kabyle (calcaires jurassiques) et les massifs gréseux numidiens et enfin le domaine du socle granitique et cristallophyllien de la petite Kabylie d'El Milia (Mebarki, 1982 et 1984).

Mebarki & Thomas (1988) ont divisé le cadre géologique et hydrogéologique du bassin en cinq grands domaines géologiques et hydrogéologiques très différents (Fig.2.20)

- Domaine des Hautes-Plaines sud-constantinoises (DI),
- Bassin néogène de Constantine-Mila (DII),
- Le domaine des « nappes » tectoniques de Djemila (DIII),

- Le domaine de la dorsale kabyle et des massifs gréseux numidiens (DIV),
- Le domaine du socle granitique et cristallophyllien de la petite Kabyle d'El Milia (DV)

La vallée du Rhumel au sens strict possède des caractéristiques naturelles dans lesquelles les Caractéristiques géologiques révèlent que les massifs du constantinois appartiennent aux domaines externes de la chaîne des Maghrébides. Les grands traits stratigraphiques des séries néritiques constantinoises sont actuellement bien connus. Il s'agit essentiellement de formations calcaires Jurassico-crétacé et une couverture marno-calcaire d'âge Sénonien supérieur à Eocène avec la présence de lacunes de sédimentation.

Concernant l'hydroclimatologie de la vallée du Rhummel, la zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride, avec des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 537,17 mm et des températures moyennes annuelles de l'ordre 15,42 de °C. L'évapotranspiration potentielle est de 25,68 mm et l'évapotranspiration réelle moyenne évaluée par la méthode de Thornthwaite est de 57,38% des précipitations. En enfin, le déficit agricole est enregistré sur une période allant du mois de mai jusqu' au mois d'octobre.

Cependant, les caractéristiques hydrogéologiques sont décrites d'après le MRE (2010) que les principaux systèmes aquifères dans la vallée du Rhumel au sens stricte et en allant depuis l'aval vers l'amont :

- Aquifère d'Oued Rhummel
- Aquifère de la région de Constantine

CHAPITRE 3

~

MODELISATION ET SIMULATION DE LA DEMANDE EN EAU - WILAYA DE CONSTANTINE

CHAPITRE 3 : MODELISATION ET SIMULATION DE LA DEMANDE EN EAU - WILAYA DE CONSTANTINE

Dans la première partie de ce chapitre, un bref aperçu sur la wilaya de Constantine a été présenté. Ensuite un diagnostic sur l'état du système hydraulique des différentes communes de la wilaya en 2010 a été décrit, en vue de montrer le coté réel et très complexe des différentes connexions entre les réseaux d'AEP des différentes communes de Constantine. Cependant, dans la deuxième partie du présent chapitre, qui représente le coté opérationnelle de la thèse, on a présenté une bibliographie complémentaire sur le WEAP21 qui est le SAD utilisé ainsi que sa méthodologie. Ensuite on a abordé la manière avec laquelle on a structuré les données utilisées pour le calibrage du modèle, le choix des hypothèses clés de référence et le choix des hypothèses de chacun des 5 scénarios simulés. Afin d'aboutir au choix du meilleur scénario alternatif de gestion de l'eau de la wilaya de Constantine sur une période de 20 années.

3.1. APERÇU SUR LA ZONE D'ETUDE

Située entre les latitudes $36^{\circ} 22'N$ et $36^{\circ} 31'N$ et entre les longitudes $6^{\circ} 22'E$ et $7^{\circ} 04'E$, la wilaya de Constantine est délimitée par cinq autres wilayas, au nord par Jijel et Skikda, à l'est par Guelma, au sud par Oum El Bouaghi et à l'ouest par Mila (Fig.3.1). Sa superficie est de $2\,197\text{ km}^2$, répartis sur 12 villes.

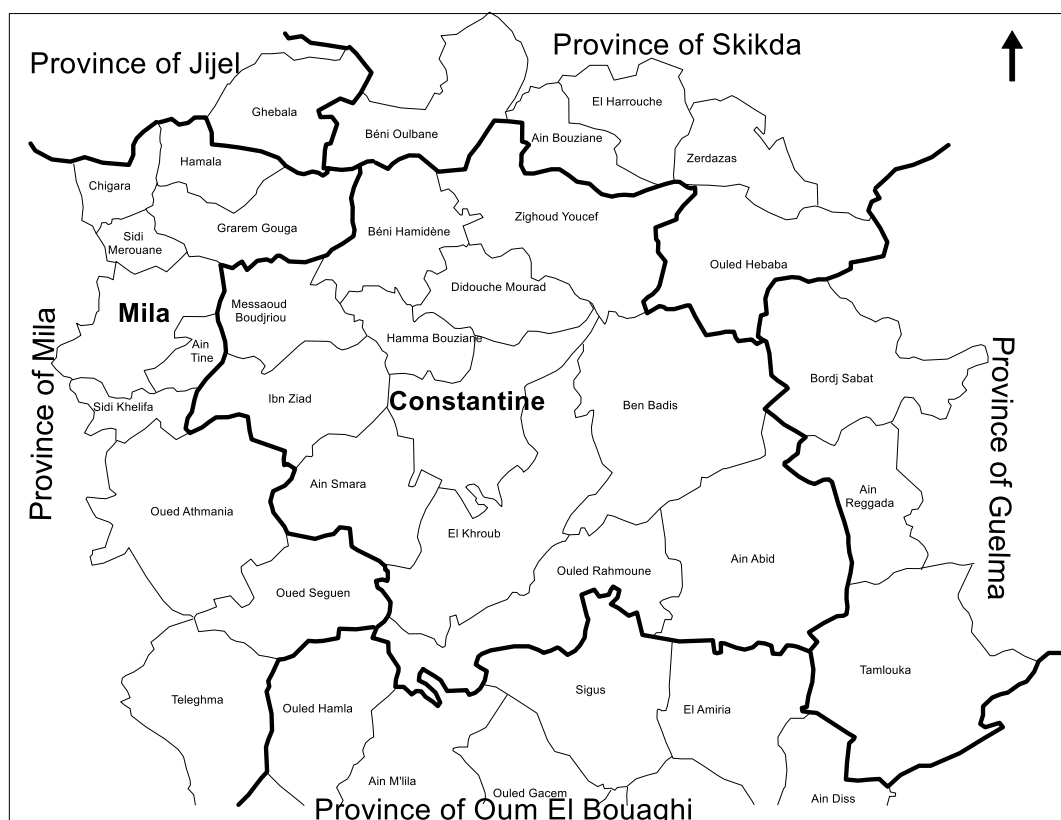


Figure.3.1. Communes de la wilaya de Constantine (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

Avec un climat continental, on enregistre une température allant de 25 ° C à 40 ° C en été et de 12 ° C à 0 ° C en hiver. Les précipitations sont comprises entre 400 et 600 mm par an. Le relief est caractérisé par une zone montagneuse au nord, qui est une extension de la chaîne tellienne, dominée par les massifs de Chettaba, Sidi Driss et Djebel El Ouahch culminant à 1364 m d'altitude. En outre, dans le sud, nous trouvons des séries de dépressions s'étendant de la commune de Ferdjioua (wilaya de Mila) à la commune de Zighoud Youcef (wilaya de Constantine). Dans l'extrême sud de la wilaya, on trouve des hautes plaines, recoupées par les vallées de Boumerzoug et de Rhumel, qui s'étendent sur les villes d'Ain Abid et d'Ouled Rahmoune (Fig.3.1) (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

3.1.1. Géologie

La zone d'étude fait partie de l'avant-pays de la chaîne alpine d'Algérie du nord-est. C'est une zone charnière entre le Nord, le domaine interne allochtone, caractérisé par des nappes de charriage dont la vergence sud est en relation avec une tectonique compressive cénozoïque polyphasique et au domaine parautochtone sud, où sont installées les post-nappes du bassin néogène de Constantine. Les formations géologiques comprennent essentiellement un assemblage carbonaté inférieur, le socle rocheux du Crétacé à l'Éocène et des dépôts continentaux discordants de couverture principalement détritiques Mio-Plio-Quaternaires (Coiffait, 1992 ; Marmi *et al.*, 2006).

3.1.2. Hydrologie

La zone d'étude appartient au bassin versant Kébir-Rhumel (bassin 10 (Figure 01)) d'une superficie de 8815 km², qui reçoit une pluviométrie annuelle moyenne de 582 mm (Mebarki, 2005). Il est drainé par deux oueds principaux : Rhumel et El Kébir. Le bassin Kébir-Rhumel est divisé en sept sous-bassins versants, tandis que les sous-bassins de Boumerzoug, Rhumel-Seguen et Rhumel-Smendou sont inclus dans la wilaya de Constantine (Figure 01). Leurs surfaces sont respectivement de 1832 km², 1150 km² et 1091 km² (Mebarki, 1982).

3.1.3. Population

Selon l'Office national des statistiques (ONS), la population de la wilaya de Constantine était de 938475 habitants en 2008, contre 810941 habitants en 1998 et 662330 en 1987. Avec les communes de Constantine, El Khroub, Hamma Bouziane et Didouche Mourad, qui dépassent 40000 habitants. De son potentiel économique et social, la wilaya de Constantine est parmi les principales wilayas d'Algérie. Sa zone métropolitaine s'étend sur un rayon de 15 à 20 km qui comprend, outre la ville mère de Constantine, la nouvelle ville de Massinissa et Ali Mendjeli. Ainsi que les villes satellites d'El Khroub, d'Ain Smara, de Didouche Mourad, de Hamma Bouziane et de Zighoud Youcef (Hassani, 2009).

3.1.4. Agriculture

La superficie agricole est estimée à 127 400 ha, dont la moitié est consacrée à la culture des céréales, le reste étant consacré aux cultures fourragères, légumineuses, maraîchères et fruitières (ANIREF, 2011). De plus, l'industrie est divisée en quatre secteurs principaux : la transformation des aliments, la construction mécanique, l'industrie manufacturière et les matériaux de construction comme le ciment, les granulats, etc. (Hassani, 2009).

3.2. ETAT HYDRAULIQUE DE LA WILAYA DE CONSTANTINE EN 2010

La gestion des ressources en eau dans la wilaya de Constantine exige un diagnostic, sur l'état des ressources superficielles et souterraines, sur l'alimentation en eau potable de chaque commune, sur l'assainissement et le recyclage, afin d'optimiser et de conserver les ressources disponibles en eau.

3.2.1 Mobilisation des ressources en eau

3.2.1.1. Ressources superficielles

a. Barrages

Pour la mobilisation des ressources superficielles, la wilaya de Constantine dispose actuellement de deux barrages : le barrage de Béni Haroun et le barrage de Hammam Grouz d'une capacité respective de 998 hm³ et 795 hm³ destiné à l'AEP et d'un volume annuel régularisé respectif de 495 hm³/an et de 9,55 hm³/an.

b. Retenus collinaires

Actuellement nous comptant 17 retenues collinaires d'une capacité de 7,973 hm³ qui permet l'irrigation de 401 ha, et d'une superficie irriguée de 718 ha, ces derniers gérés par la coopérative agricole de service spécialisée en irrigation et drainage (CASSID).

3.2.1.2. Ressources souterraines

L'exploitation des aquifères se fait à l'aide de 69 forages. Le volume d'eau exploité destiné à l'AEP, à l'irrigation et à l'industrie est de l'ordre de 3295,1 l/s.

Les zones industrielles sont également desservies par des forages, les puits et les réseaux d'AEP avec un volume consommé de 7196,5 m³/j. Cependant, les besoins du secteur industriel ont atteint 8767 m³/j, soit 24 % des besoins totaux de la wilaya.

3.2.2. Alimentation en eau potable

La wilaya de Constantine a toujours connu une croissance démographique et un essor industriel considérable, Au moment où le secteur hydraulique a accusé certains retards engendrant quelques aspects négatifs durant les années précédentes. Auparavant elle dépendait uniquement des ressources en eau existantes localement qui sont principalement souterraines et souvent soumises aux aléas climatiques et qui ne couvrent pas suffisamment les besoins en eau de la population.

Ce handicap a rendu incontournable le recours à la recherche d'autres ressources en dehors de la wilaya notamment les ressources superficielles.

Accuelements les principales ressources de la wilaya de Constantine sont issues des nappes de Boumerzoug (600 l/s), Hama Bouziane I et II (800 l/s) et récemment le barrage

de Hammam Béni Haroun d'une capacité de 961 hm³.

La distribution se fait à l'aide d'un réseau de conduites à une longueur de 1608,159 mètres linéaires.

La dotation journalière moyenne en eau potable a presque doublé entre 2006 à 2008, passant à 70 l/j/hab, également pour le taux raccordement qui était pour la même période à 79 % et passé à 94 % et le réseau d'AEP s'est développé sur 1500 km.

La capacité totale de stockage est de 27500 m³ répartis comme suit : un réservoir de 2500 m³ à Ain Smara ; un réservoir de 5000 m³ à Ain El bey ; un réservoir de 20000 m³ à El Khroub ;

Les projets en cours : un projet de l'aval du couloir n°3 en cour de lancement ; la construction de deux réservoirs de 50000 m³ à Ain El Bey et Guemas ; La réalisation d'une conduite de 800 mm sur 7000 ml reliant Guemas-Camp.

3.2.3. Situation de l'AEP dans chaque commune

3.2.3.1. Commune de Constantine

Le chef-lieu de la wilaya contient 52 ouvrages de stockage avec une capacité totale de 84300 m³, dont 47 réservoirs avec une capacité de 80500 m³ et 5 châteaux d'eau avec une capacité de 3800 m³ et 10150 puits. Aussi, Il y a la présence de 12 stations de pompes gérées par la SEACO.

3.2.3. 6. Commune d'Ain Abid

La commune d'Ain Abid comporte 17 réservoirs d'une capacité de 4755 m³. Aussi, la présence de 205 puits et 07 stations de pompages.

3.2.3. 7. Commune de Ben Badis

On note l'existence de six réservoirs d'une capacité de 2540 m³, avec 146 puits et quatre stations de pompages.

3.2.3. 8. Commune d'Ain Smara

Cette commune est dotée de sept réservoirs d'une capacité totale de 6640 m³ et la présence de 111 puits.

3.2.3. 9. Commune de Didouche Mourad

Elle comporte 15 ouvrages de stockage d'une capacité totale de 7115 m³ et de 62 puits. La plupart des agglomérations sont alimentées suivant des fréquences et des plages horaires de distribution de 30 % jour.

3.2.3. 10. Commune Zighoud Youcef

Pour l'AEP de 35300 habitants la commune de Zighoud Youcef est dotée de 18 ouvrages de stockages d'une capacité de 4520 m³ et de 55 puits. Cependant, il y a six stations de pompages.

3.2.3. 11. Commune Messaoud Boudjeriou

Cette commune dépend de sept réservoirs d'une capacité totale de 1150 m³ et englobe 73 puits.

3.2.3. 12. Commune de Beni Hamidene

La population de la commune de Béni Hamidene est alimentée en eau potable par 14 ouvrages de stockage d'une capacité totale de 1780 m³ dont 13 réservoirs d'une capacité de 1480 m³, d'un château d'eau de 300 m³ et de 17 puits. La gestion de l'eau est renforcée par sept stations de pompages.

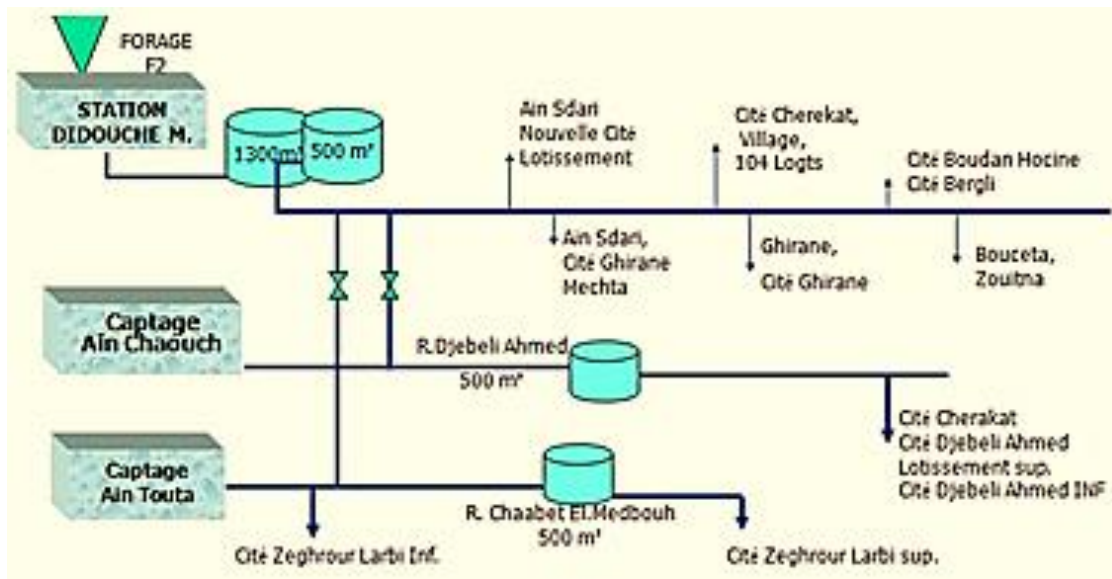


Figure.3.3. Schéma synoptique d’AEP de la commune de Hamma Bouziane

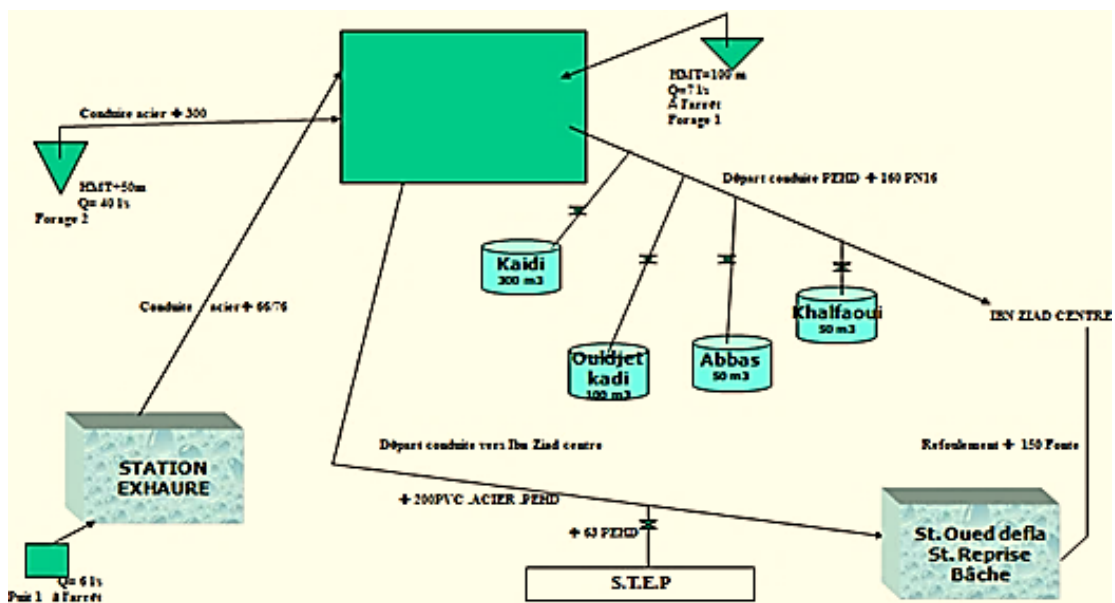


Figure.3.4. Schéma synoptique d’AEP de la commune d’Ibn Ziad

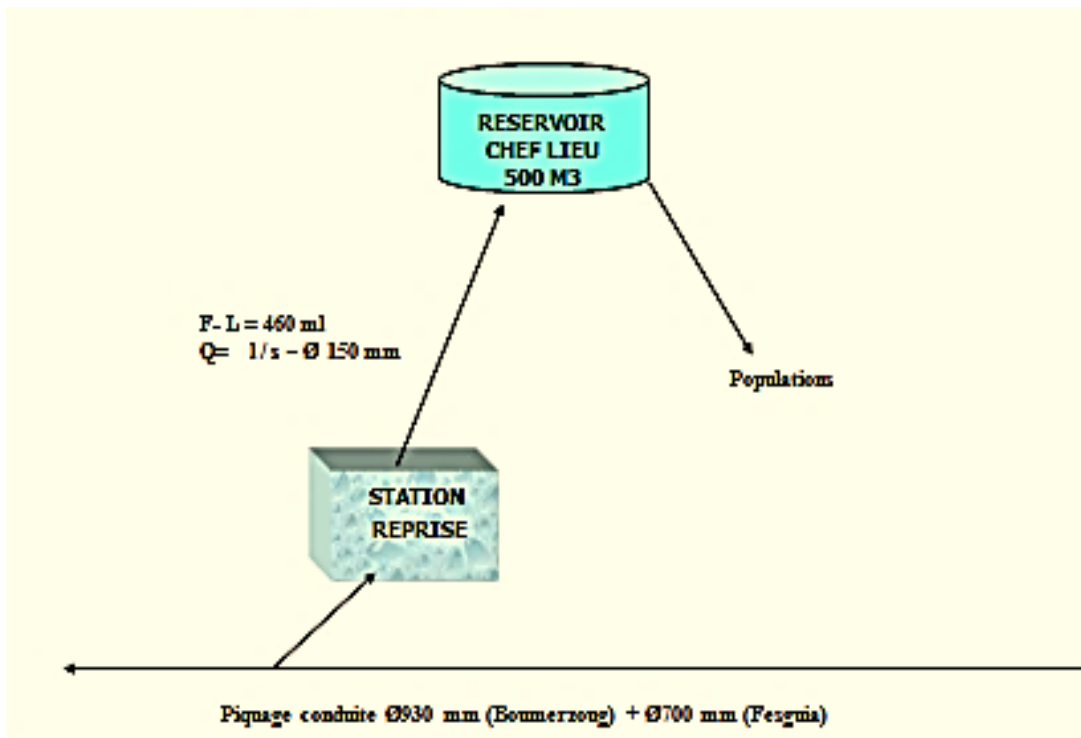


Figure.3.5. Schéma synoptique d’AEP de la commune Ouled Rahmoun

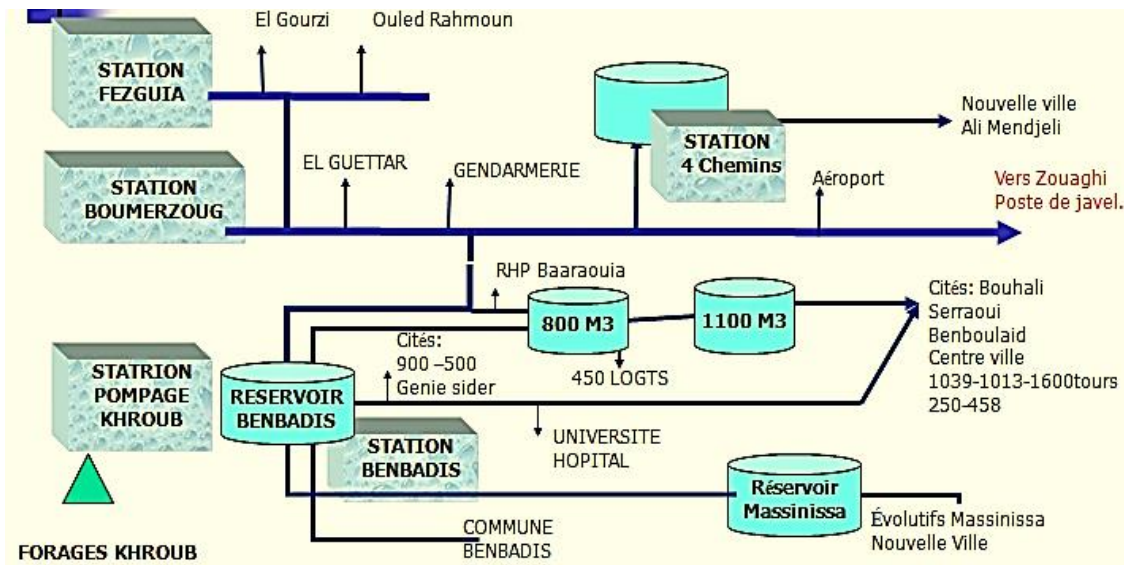


Figure.3.6. Schéma synoptique d’AEP de la commune El Khroub

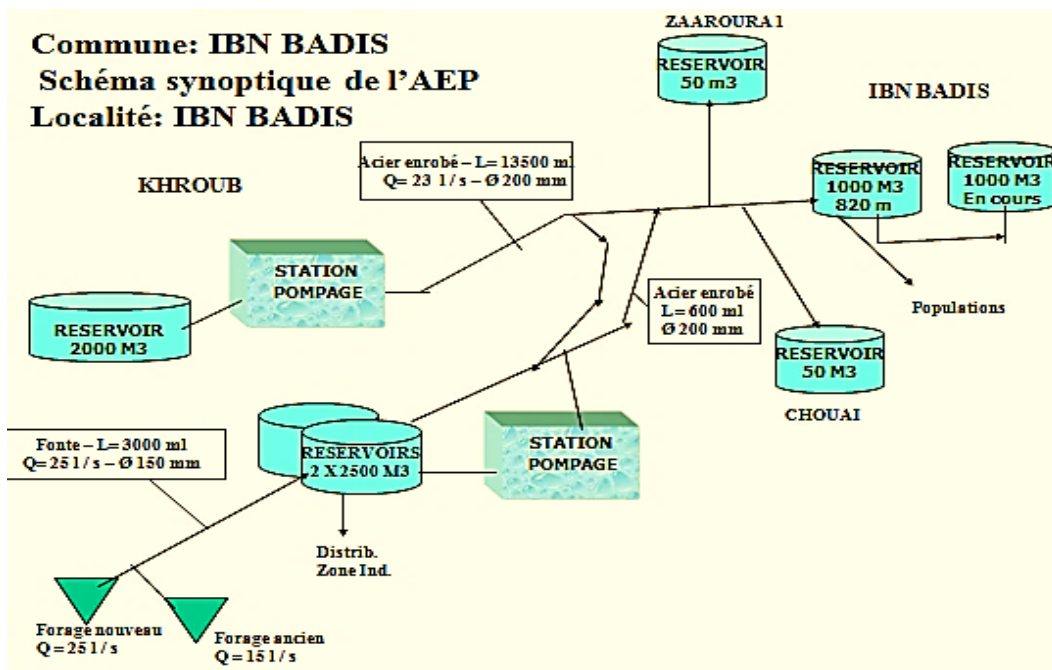


Figure.3.7. Schéma synoptique d'AEP de la commune Ibn Badis

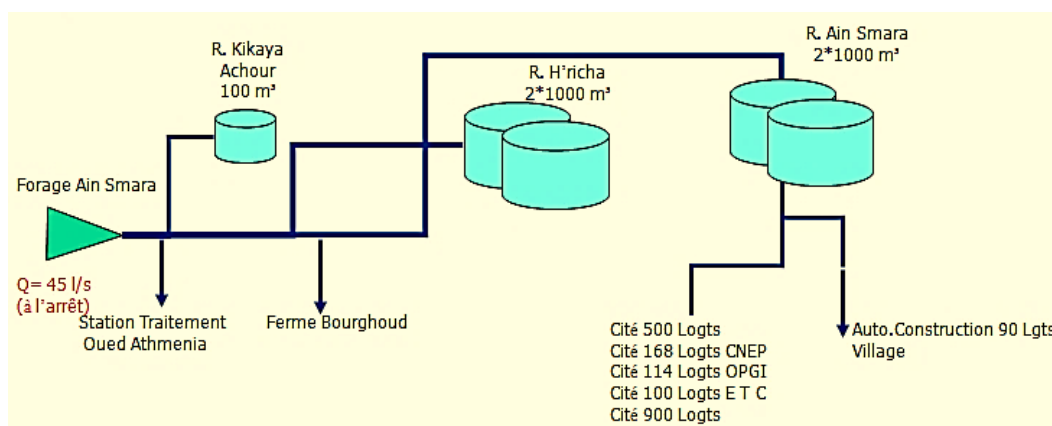


Figure.3.8. Schéma synoptique d'AEP de la commune Ain Smara

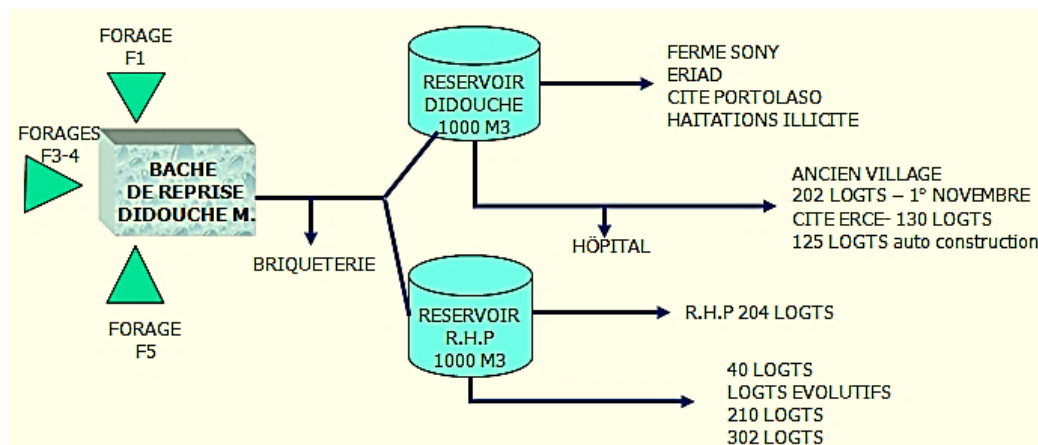


Figure.3.9. Schéma synoptique d'AEP de commune de Didouche Mourad

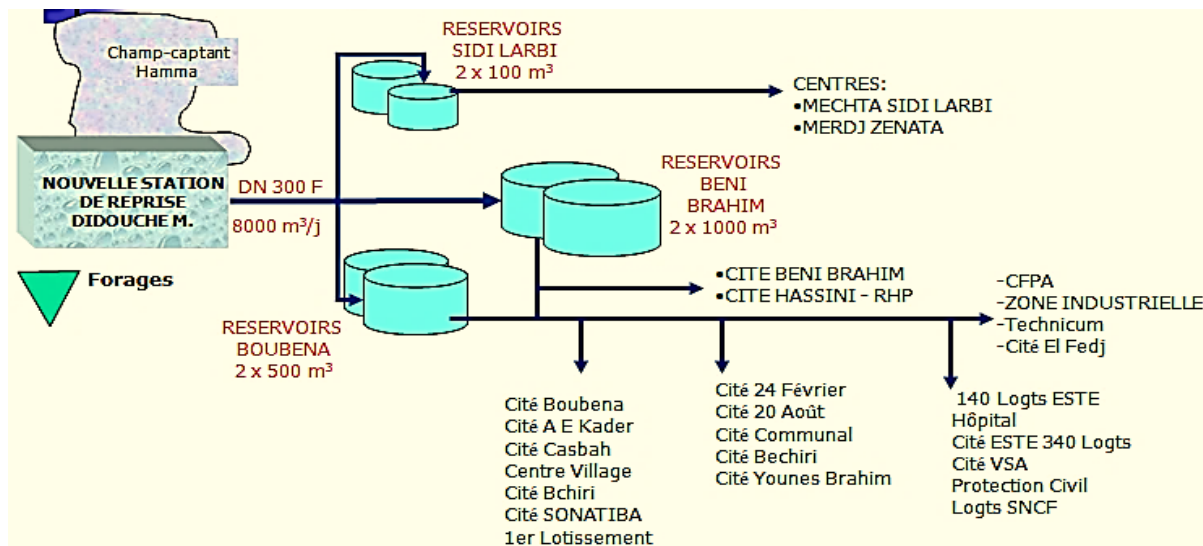


Figure.3.10. Schéma synoptique d'AEP de la commune de Zighoud Youcef

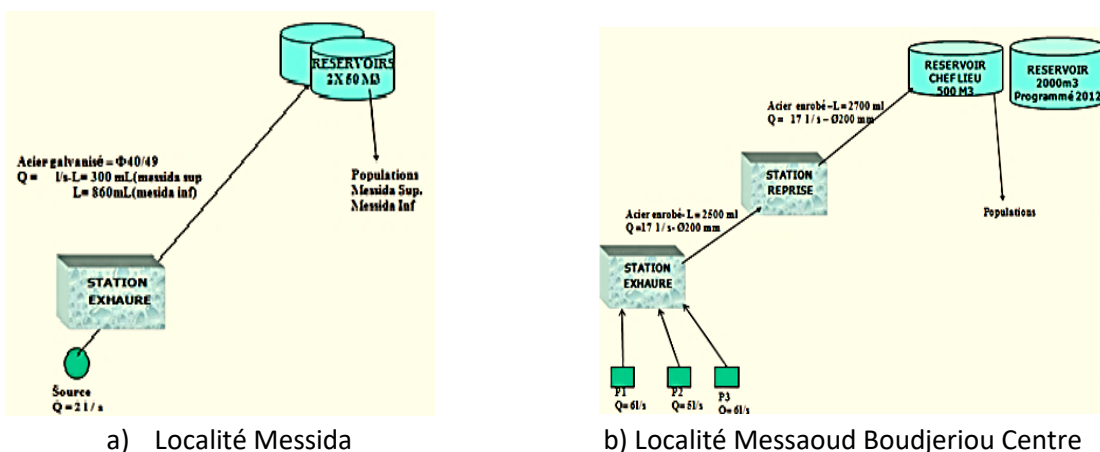


Figure.3.11. Schéma synoptique d'AEP de la commune de Messaoud Boudjeriou

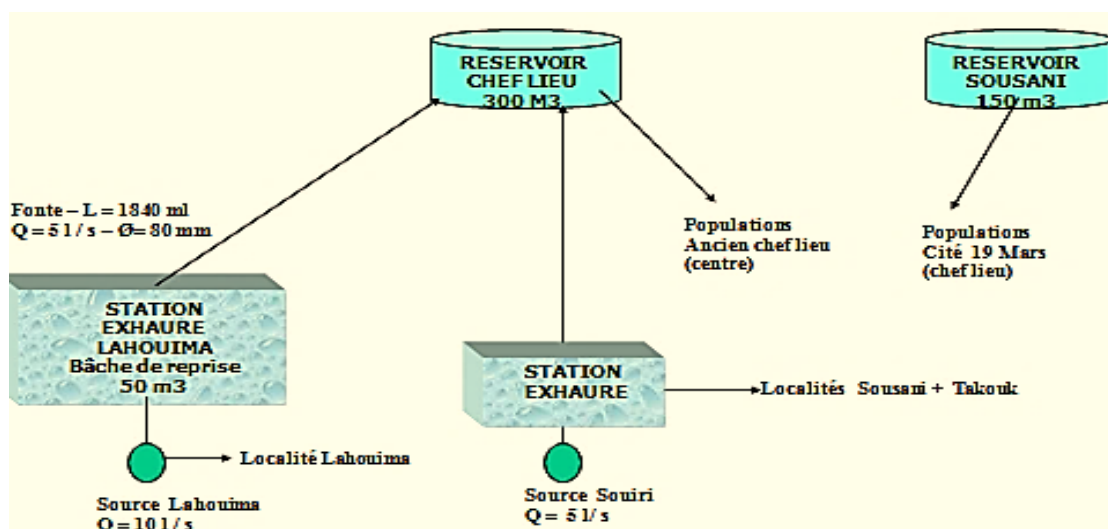


Figure.3.12. Schéma synoptique d'AEP du Chef-lieu de la commune de Beni Hamidene

3.3. MODELISATION DE LA DEMANDE EN EAU DE LA WILAYA DE CONSTANTINE

Les décideurs et les utilisateurs de l'eau devraient avoir confiance dans les résultats du SAD. À cette fin, il est nécessaire d'établir une relation étroite entre le modélisateur, les décideurs et les utilisateurs de l'eau lors de la construction du SAD. La participation, la supervision et la rétroaction des personnes impliquées dans le processus de gestion de l'eau sont nécessaires pour renforcer la confiance dans le SAD et ses résultats.

En raison de l'amélioration de la capacité de calcul informatique au cours des deux dernières décennies, les systèmes de distribution d'eau ont été utilisés plus fréquemment pour représenter les systèmes d'eau et évaluer les politiques alternatives de gestion de l'eau.

Dans le cadre de notre étude, le WEAP (Water Evaluation And Planning System) a été sélectionné sur d'autres modèles de ressources en eau, car il s'agit d'un outil logiciel convivial, bien documenté, avec de belles interfaces graphiques (GUI), et se concentre sur la gestion des ressources en eau et le bilan hydrologique.

3.3.1. Water Evaluation And Planning system

Le logiciel WEAP a été développé par le Stockholm Environment Institute de Boston. C'est un logiciel de modélisation informatique orienté objet, conçu pour simuler les systèmes de ressources en eau et l'analyse des compromis. WEAP (Évaluation et planification de l'eau) est un logiciel unique de planification des ressources en eau qui permet au modélisateur de tenir compte du changement climatique grâce à un module de ruissellement interne qui simule les régimes hydrologiques en fonction des apports climatiques. Cette capacité à inclure le changement climatique dans l'élaboration de futurs scénarios en fait un outil potentiellement puissant pour informer l'élaboration de politiques d'adaptation au changement climatique (Harris, 2007 ; Sakka, 2010).

WEAP stocke les informations caractérisant un système d'eau dans une base de données transparente et facile à utiliser. La caractérisation comprend les modes d'utilisation de l'eau, les pertes, les flux environnementaux, les priorités du côté de la demande, les sources d'approvisionnement, les régimes hydrologiques, le stockage des eaux de surface et souterraines, les coûts et les règles d'allocation. Les rivières, les canaux, les sites de demande, les stations d'épuration et de traitement des eaux usées, les installations de transport et de pompage, les sources d'eau locales, les réservoirs d'eau souterraine et de surface sont rapidement reliés entre eux et peuvent être organisés pour correspondre à des emplacements géographiques réels à l'aide de couches de cartes SIG importées (Lévite *et al.*, 2002 ; Sakka, 2010).

Contrairement aux intrants hydrologiques historiques, WEAP utilise des intrants tels que les précipitations, la température, l'humidité et la vitesse du vent. Ces données peuvent être dérivées de scénarios de changements climatiques globaux et sont utilisées pour calculer la quantité de précipitations qui tombe dans une zone donnée qui finit comme ruissellement dans les cours d'eau, recharge vers les eaux souterraines ou évapotranspiration par la

végétation.

Avec cette capacité, l'utilisateur du WEAP peut construire des scénarios qui supposent, par exemple, des températures plus élevées ou des pluies plus abondantes, ainsi que des hypothèses sur la demande en eau, l'infrastructure et la réglementation environnementale. Ces activités humaines sont les éléments qui peuvent être adaptés à l'avenir en réponse au changement climatique. Par exemple, nous pourrions modéliser un scénario avec une demande d'eau restreinte pour essayer de minimiser la pénurie d'eau prévue ou d'améliorer la qualité de l'eau prévue.

Le WEAP produit des résultats qui démontrent si la demande en eau est satisfaite au cours d'un mois donné, le degré de pénurie d'eau en cas de pénurie, les niveaux de stockage dans les réservoirs pour utilisation future et les mesures de la qualité de l'eau. WEAP évalue également la suffisance des débits environnementaux, le niveau de la capacité de production hydroélectrique et l'évolution de l'humidité du sol, les taux d'évapotranspiration, le volume des eaux de ruissellement et le taux de recharge des eaux souterraines (Harris, 2007 ; Sakka, 2010).

Les applications WEAP impliquent généralement les étapes suivantes (Yates *et al.* 2005) :

- Définition du problème, y compris les délais, les limites spatiales, les composants du système et la configuration.
- Établir les «comptes courants», qui fournissent un aperçu de la demande réelle en eau, des ressources et des fournitures pour le système.
- Construire des scénarios basés sur différents ensembles de tendances futures basés sur les politiques, le développement technologique et d'autres facteurs qui influent sur la demande, l'offre et l'hydrologie.
- L'évaluation des scénarios en ce qui concerne des critères tels que l'adéquation des ressources en eau, les coûts, les bénéfices et les impacts environnementaux. L'analyse WEAP est capable de projeter comment le changement climatique pourrait affecter les ressources en eau afin de comprendre quels types de politiques d'adaptation seraient les plus susceptibles de réduire la vulnérabilité du pays.

Les simulations du modèle WEAP sont construites comme un ensemble de scénarios, où les étapes de simulation peuvent être aussi courtes qu'un jour, hebdomadaires, mensuelles ou même saisonnières avec un horizon allant d'une seule année à plus de 100 ans.

WEAP place l'évaluation des problèmes spécifiques de l'eau dans un cadre global. L'intégration est sur plusieurs dimensions : entre l'offre et la demande, entre la quantité et la qualité de l'eau, et entre les objectifs de développement économique et les contraintes environnementales.

En particulier, les tâches et activités suivantes pourraient être effectuées en utilisant le système WEAP :

- 1- Identifier et évaluer les impacts du changement climatique sur l'eau pour l'agriculture, les loisirs, la production hydroélectrique, l'eau à usage municipal et industriel, la fonction et la santé de l'habitat, la biodiversité, la purification de l'eau ;
- 2- Simule la demande, les débits et le stockage de l'eau et la production de pollution (capacité d'évaluation environnementale). Traitement et décharge ;
- 3- Fournit à travers son interface graphique un moyen simple mais puissant de construction ;
- 4- Visualiser et modifier le système et ses données (gestion de base de données, prévision et analyse.) ;
- 5- Modélisation détaillée de la demande d'approvisionnement (prévision, planification et évaluation) ;
- 6- Évaluer les modèles actuels de développement et de modification des terres (utilisation des terres / couverture des terres et changements démographiques) ;
- 7- Examiner d'autres stratégies de développement et de gestion de l'eau, y compris des stratégies d'adaptation.
- 8- Explorer les aspects physiques, sociaux et institutionnels qui ont un impact sur la gestion des bassins versants, planification intégrée des ressources en eau pouvant avoir une incidence sur les politiques de conservation de l'eau.

3.3.1.2. Analyse du scénario

Les scénarios sont des ensembles alternatifs d'hypothèses telles que différentes politiques d'exploitation, coûts et facteurs influant sur la demande tels que stratégies de gestion de la demande, sources d'approvisionnement alternatives et hypothèses hydrologiques. Les variations de ces données pouvant augmenter ou diminuer à différents niveaux de planification (Yates *et al.*, 2005).

Les scénarios peuvent aborder un large éventail de questions « et si », telles que : Que se passe-t-il si la croissance de la population et les modèles de développement économique changent ? Que faire si les règles d'exploitation du réservoir sont modifiées ? Et si les eaux souterraines sont plus pleinement exploitées ? Et si la conservation de l'eau est introduite ? Et si les exigences de l'écosystème sont resserrées ? Et si de nouvelles sources de pollution de l'eau sont ajoutées ? Et si un programme de recyclage de l'eau est mis en œuvre ? Et si une technique d'irrigation plus efficace est mise en œuvre ? Et si le mélange de cultures agricoles change ?

Et si le changement climatique modifiait l'hydrologie ? Ces scénarios peuvent être visualisés simultanément dans les résultats pour faciliter la comparaison de leurs effets sur le

système d'eau (Yates *et al.*, 2005),

3.3.1.2.1. Capacité de gestion de la demande

WEAP est unique dans sa capacité à représenter les effets de la gestion de la demande sur les systèmes d'eau.

Les besoins en eau peuvent provenir d'un ensemble détaillé d'utilisations finales, ou «services d'eau» dans différents secteurs économiques (SEI, 2005). Par exemple, le secteur agricole pourrait être ventilé selon les types de cultures, les districts d'irrigation et les techniques d'irrigation.

Un secteur urbain pourrait être organisé par comté, ville et district d'eau. La demande industrielle peut être ventilée par sous-secteur industriel et plus loin dans l'eau de procédé et l'eau de refroidissement.

Cette approche place les objectifs de développement - fournissant des biens et services d'utilisation finale - à la base de l'analyse de l'eau, et permet une évaluation des effets des technologies améliorées sur ces utilisations, ainsi que des effets de l'évolution des prix sur les quantités d'eau demandées.

De plus, les priorités d'attribution de l'eau pour des demandes particulières, ou provenant de sources particulières peuvent être spécifiées par l'utilisateur.

3.3.1.2.2. Effets environnementaux

Les analyses de scénarios WEAP peuvent prendre en compte les exigences pour les écosystèmes aquatiques.

Ils peuvent également fournir un résumé de la pression de pollution que les différentes utilisations de l'eau imposent à l'ensemble du système. La pollution est suivie depuis la production jusqu'au traitement et l'écoulement dans les plans d'eau de surface et souterrains. Les concentrations de constituants de la qualité de l'eau sont modélisées dans les rivières.

3.3.1.3. Facilité d'utilisation

Une interface graphique intuitive fournit un moyen simple mais puissant pour construire, visualiser et modifier le système et ses données. Les principales fonctions (chargement des données, calcul et révision des résultats) sont gérées par le biais d'une structure d'écran interactive qui invite l'utilisateur à saisir les erreurs et fournit des indications à l'écran.

Les structures de données extensibles et adaptables du WEAP répondent aux besoins changeants des analystes de l'eau à mesure que de meilleures informations deviennent disponibles et que les problèmes de planification changent.

En outre, WEAP permet aux utilisateurs de développer leur propre ensemble de variables et d'équations pour affiner et / ou adapter l'analyse aux contraintes et conditions locales.

3.3.1.4. Gestion de l'eau urbaine

L'un des points forts du WEAP est qu'il est adaptable à toutes les données disponibles pour décrire un système de ressources en eau. C'est-à-dire qu'il peut utiliser des pas de temps quotidiens, hebdomadaires, mensuels ou annuels pour caractériser les approvisionnements et les demandes en eau du système.

Cette flexibilité signifie qu'elle peut être appliquée à travers une gamme d'échelles spatiales et temporelles. En effet, le WEAP a été utilisé dans le monde entier pour analyser un ensemble varié de problèmes de gestion de l'eau pour les petites communautés et les grands bassins versants gérés.

3.3.1.5. Etapes opérationnelles

1. La définition de l'étude établit le calendrier, la limite spatiale, les composants du système et la configuration. Le modèle peut être exécuté avec n'importe quel pas de temps où le routage n'est pas une considération. Pour la preuve de concept dans le bassin, un pas de temps mensuel est utilisé ;

2. La gestion du système est représentée en termes de sources d'approvisionnement (eaux de surface, eaux souterraines, transfert interbassins et éléments de réutilisation de l'eau) ; installations de retrait, de transport et de traitement des eaux usées ; demandes d'eau ; et la pollution générée par ces activités. L'ensemble de données de référence résume la demande en eau réelle, les charges de pollution, les ressources et les fournitures pour le système au cours de l'année en cours ou d'une autre année de référence.

3. Des scénarios sont élaborés - basés sur des hypothèses concernant le changement climatique, la démographie, les politiques de développement, les coûts et d'autres facteurs qui influent sur la demande, l'offre et l'hydrologie. Les moteurs peuvent changer à des taux variables au cours de l'horizon de planification. L'horizon temporel de ces scénarios peut être défini par l'utilisateur.

4. Les scénarios sont ensuite évalués en fonction des résultats souhaités tels que la suffisance de l'eau, les coûts et les avantages, la compatibilité avec les objectifs environnementaux et la sensibilité à l'incertitude des variables clés.

3.3.1.6. Le module d'hydrologie physique de WEAP

Le modèle WEAP21 comprend un modèle de bilan hydrique à grille irrégulière qui peut tenir compte des processus hydrologiques dans un système de bassin versant et qui peut saisir les effets de propagation et de non-linéarité des prélèvements d'eau pour différents usages. Notre approche est guidée par Beven (2002), qui conteste la tendance vers des systèmes de modélisation basés sur la physique.

La composante hydrologie physique de WEAP a été développée pour tenir compte de deux réalités hydrologiques différentes. La première est la notion que les précipitations dans

les sous bassins versants situés dans les parties amont des bassins versants, avec une topographie complexe, des pentes abruptes et des collines et des vallées abruptes, contribuent aux débits de base des eaux souterraines, avec un délai relativement court. (Winter *et al.*, 1998, Winter 2001, Eckhardt et Ulbrich, 2003 ;

Inversement, les sous-bassins versants situés dans les parties avales des bassins hydrographiques à relief plus plat ont tendance à contribuer aux aquifères alluviaux directement liés au système fluvial auquel ils peuvent contribuer (ruisseaux gagnants) et à partir desquels ils peuvent recevoir des infiltrations sur les conditions hydrologiques. Ces systèmes d'eaux souterraines peuvent également fournir un stockage à partir duquel les utilisateurs peuvent puiser de l'eau pour satisfaire les demandes (Fig.3.13).

Le schéma ci-dessous montre un bassin versant divisé en deux sous-bassins. SB-1 est un bassin versant d'amont, sans interaction surface-eau souterraine et applique le modèle de bilan hydrique à deux «seaux». SB-2 est caractérisé comme étant dans une zone de vallée, où l'hydrologie de surface applique l'équilibre de l'eau de seau unique avec recharge à un aquifère alluvial sous-jacent qui comme interaction eau souterraine-eau de surface (Burness *et al.*, 2004).

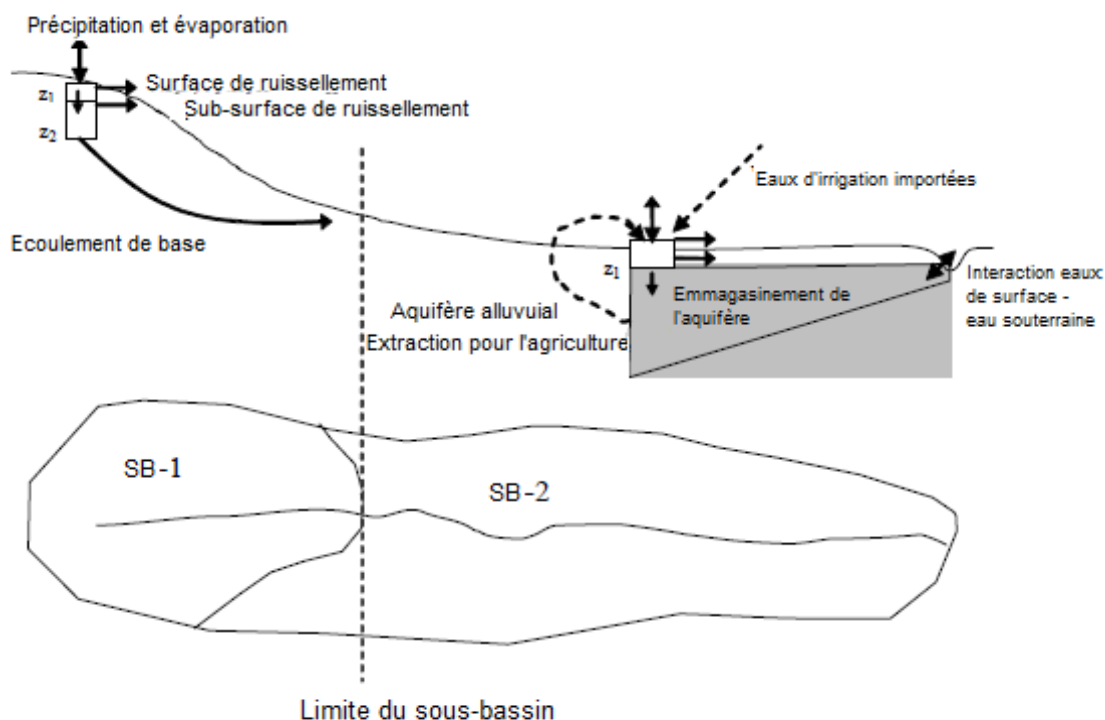


Figure.3.13. Composante hydrologie physique de WEAP21 avec deux réalités hydrologiques différentes [notre traduction] (Yates *et al.*, 2005)

3.3.1.7. Le système de gestion : le module d'attribution

Le point de départ d'une analyse de la gestion de l'eau de WEAP21 est le développement des demandes de bassins versants. Chaque demande se voit attribuer une priorité définie par l'utilisateur, donnée sous la forme d'un entier compris entre 1 (priorité la plus élevée) et 99 (priorité la plus basse). Chaque demande est ensuite liée à ses sources d'approvisionnement disponibles, chaque préférence de source d'approvisionnement étant définie pour chaque site de demande (par exemple, le site préfère-t-il obtenir son eau d'une source d'eau souterraine ou de surface ?). Le réseau offre-demande est construit et une routine d'optimisation alloue les fournitures disponibles à toutes les demandes. Les demandes sont définies par l'utilisateur, mais comprennent généralement la demande municipale et industrielle, les besoins en irrigation de certaines parties du bassin versant et les exigences de débit dans le cours d'eau.

3.3.1.7.1. Demandes d'eau

L'analyse de la demande dans WEAP21 qui n'est pas couverte par le module d'hydrologie physique basé sur l'évapotranspiration est basée sur une approche désagrégée d'utilisation finale qui détermine les besoins en eau à chaque nœud de demande. Les données démographiques et d'utilisation d'eau sont utilisées pour construire des scénarios qui examinent comment la consommation totale et désagrégée de l'eau évolue avec le temps. Ces scénarios de demandes sont calculés dans WEAP21 et appliqués de manière déterministe à l'algorithme d'allocation de programme linéaire (LP). L'analyse de la demande est au cœur de l'analyse intégrée de la planification de l'eau avec WEAP21, car tous les calculs d'approvisionnement et de ressources sont pilotés par la routine d'allocation qui détermine la livraison finale à chaque nœud de demande en fonction des priorités spécifiées par l'utilisateur.

WEAP offre une flexibilité dans la façon dont les données sont structurées et peut aller de structures fortement désagrégées orientées vers l'utilisation finale à des analyses hautement agrégées. Typiquement, un scénario de demande comprend plusieurs secteurs comprenant les ménages, l'industrie, les écosystèmes et l'agriculture, et chacun peut être divisé en différents sous-secteurs. Cependant, si le module d'hydrologie physique est utilisé, les demandes d'arrosage urbain et agricole ne sont pas incluses dans l'analyse désagrégée de la demande, mais proviennent des fluctuations de l'humidité du sol.

La structure des données de la demande peut être adaptée pour répondre à des objectifs spécifiques, en fonction de la disponibilité des données, des types d'analyses que l'utilisateur souhaite effectuer et des préférences de ses unités.

Dans la plupart des cas, les calculs de la demande reposent sur une comptabilisation désagrégée de diverses mesures de l'activité sociale et économique (nombre de ménages, taux d'utilisation de l'eau par ménage, hectares d'agriculture irriguée, activité industrielle et commerciale, taux d'utilisation de l'eau) et sont agrégées et appliquées dans le schéma d'allocation au niveau du site de demande (Yates *et al.*, 2005). Les niveaux d'activité sont

multipliés par les taux d'utilisation de l'eau de chaque activité et chacun peut être projeté individuellement dans le futur en utilisant une variété de techniques, allant de l'application de taux de croissance exponentiels simples et de fonctions d'interpolation à l'utilisation de techniques de modélisation sophistiquées tirant parti des capacités de modélisation intégrées de WEAP21 via une feuille de calcul comme le générateur d'expression.

3.3.1.7.1.1. Priorités de la demande et préférences d'approvisionnement

Un programme linéaire standard (Berkelaar *et al.*, 2004) est utilisé pour résoudre le problème d'allocation d'eau dont l'objectif est de maximiser la satisfaction de la demande, en fonction des priorités d'approvisionnement, des préférences des sites, des bilans massiques et d'autres contraintes. L'ensemble de contraintes est défini de manière itérative à chaque étape temporelle pour considérer séquentiellement le classement des priorités de demande et des préférences d'approvisionnement. L'approche a quelques attributs d'un algorithme de programmation dynamique plus traditionnel, où le modèle est résolu dans l'ordre basé sur la connaissance des valeurs dérivées des variables et des équations précédentes (Loucks *et al.*, 1981 ; Nandalal & Sakthivadivel, 2002).

Les sites de demande individuels, les réservoirs et les exigences de débits d'entrée sont assignés un numéro de priorité unique, qui sont des nombres entiers qui vont de 1 (la plus haute priorité) à 99 (priorité la plus basse). Les entités ayant un rang de priorité 1 sont membres du groupe d'actions 1, celles qui ont un rang de priorité 2 sont membres du groupe d'actions 2, et ainsi de suite. L'ensemble de contraintes LP est écrit pour fournir un pourcentage égal d'eau aux membres de chaque groupe d'équité. Ceci est fait en ajoutant au LP pour chaque site de demande: 1) une variable de couverture en pourcent, qui est le pourcent de la demande totale satisfaite à l'étape de temps donné; 2) une contrainte d'équité qui satisfait également toutes les demandes au sein de chaque groupe d'actions en termes de pourcentage de la demande satisfaite; et 3) une contrainte de couverture qui assure la quantité appropriée d'eau fournie à un site de demande ou la satisfaction d'un besoin de débit d'entrée.

3.3.1.8. Méthodologie

Le programme WEAP sera utilisé pour construire un modèle de GIRE prenant la wilaya de Constantine comme étude de cas. Les points suivants résument les principales étapes à suivre :

1. Préparer les informations requises et toutes les données d'entrée pour le logiciel WEAP afin de développer un modèle de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE)
2. Configurez les données basées sur le SIG en tant qu'entrée pour le modèle.
3. Proposer des scénarios futurs liés à la croissance de la population, à l'évolution de l'offre et de la demande et à d'autres facteurs.
4. Construire le modèle GIRE en utilisant le programme WEAP.

5. Les résultats finaux de la modélisation seront formulés sous forme de figures, de tableaux et de cartes.
6. Effectuez l'étalonnage nécessaire pour les données de sortie issues du modèle WEAP pour le bassin versant.
7. Définissez les commentaires généraux et les recommandations.

3.3.2. CALIBRATION DU MODELE

Nous utilisons les données sur la ressource et la demande en eau de l'année 2007, par commune comme unité de base. D'une part, chaque commune dispose d'un site de demande en eau potable, d'un site de demande en eau agricole, d'un site de demande en eau industrielle. D'un autre côté, nous avons des éléments d'approvisionnement en eau tels que les eaux souterraines extraites des aquifères et les eaux de surface provenant des barrages et des retenues collinaires (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

3.3.2.1. Données utilisées

En vue d'établir la calibration du modèle, les données d'approvisionnement et de la demande en eau ont été utilisées, en se basant sur la plus basse division administrative qui est la commune (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

Selon les données de l'ABH-CSM de l'année 2007, les potentialités totales en eaux superficielles et souterraines de la wilaya de Constantine sont respectivement de 13 millions m^3 / an et de 63 millions m^3 / an. Cependant, les ressources en eau sont extraites des aquifères du Cénomaniens et du Mio Pliocène pour les ressources en eau souterraines, et des barrages et des retenues collinaires pour les ressources en eau de surface (Kiniouar *et al.*, 2017.a) comme le montre la figure ci-dessous :

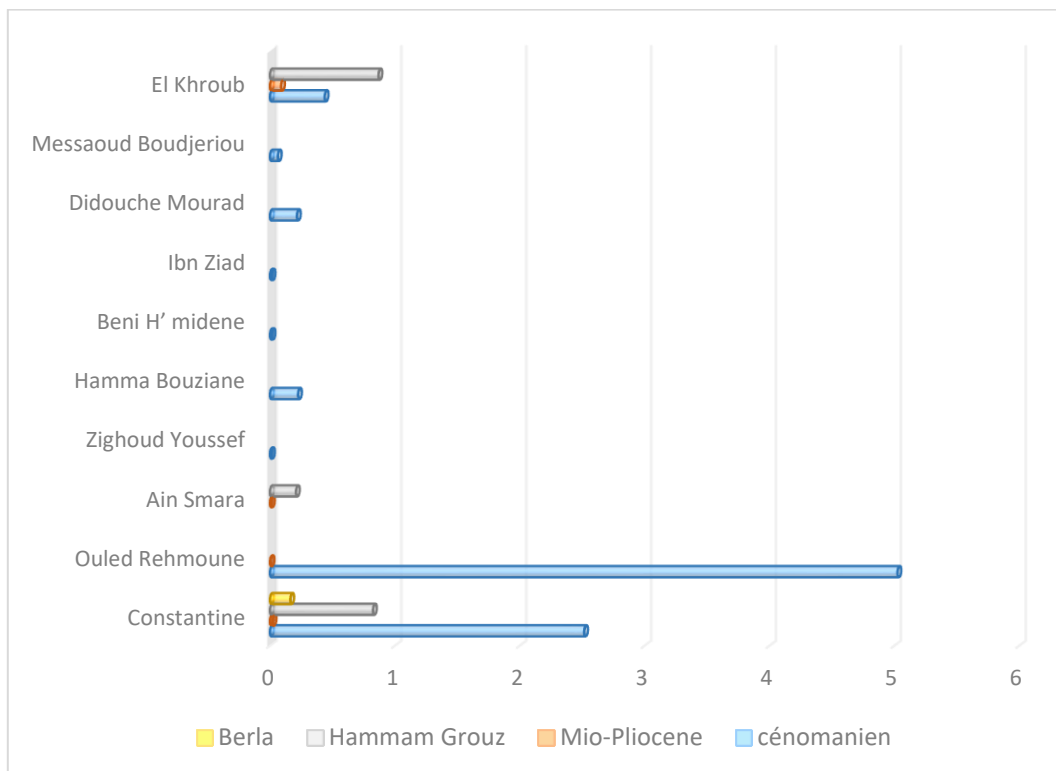


Figure.3.14. Alimentation en eau potable en Mm^3 /mois (ressources souterraines et de surface)

3.3.2.2. Calibrage des sites de ressources

3.3.2.2.1. Ressources souterraines

Dans l'étape de calibrage du modèle, on a réalisé la structuration des données disponibles, comme suit :

3.3.2.2.1.1. Approvisionnement pour l'AEP

En considérant que l'aquifère du Cénomanien fournit la majorité de l'eau potable communale, à l'exception du site de demande de la commune d'Ain Smara. Et l'aquifère du Miopliocène fournit une partie des besoins en eau potable des communes de Constantine, El Khroub, Ouled Rahmoune et Ain Smara (Fig. 3.14. ; Fig.3.15 & Fig.3.16) (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

3.3.2.2.1.2. Approvisionnement pour l'irrigation

Comme précédemment dans le calibrage du modèle, l'aquifère du Cénomanien fournit la majorité des sites de demande en eau pour l'irrigation, à l'exception de ceux des communes d'Ibn Ziad, d'El Khroub, d'Ouled Rahmoune et d'Ain Smara. Et l'aquifère du Miopliocène fournit une partie de la demande en eau d'irrigation des cultures des communes d'Ain Smara et d'El Khroub et fournit la totalité des besoins en eau d'irrigation des cultures de la commune d'Ouled Rahmoune. Cependant, la figure.3.17, présente les débits accordés à chaque commune depuis les deux aquifères cités précédemment (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

3.3.2.2.1.3. Approvisionnement pour l'industrie

D'une part l'aquifère du Cénomaniens alimente pratiquement tous les sites de demande en eau pour l'industrie, en l'occurrence Constantine, Hamma Bouziane, Ain Smara et Didouche Mourad. D'autre part, l'aquifère du Mio-pliocène alimente les communes d'El Khroub et Ouled Rahmoune pour la besoins en eau industrielle (Kiniouar *et al*, 2017.a).

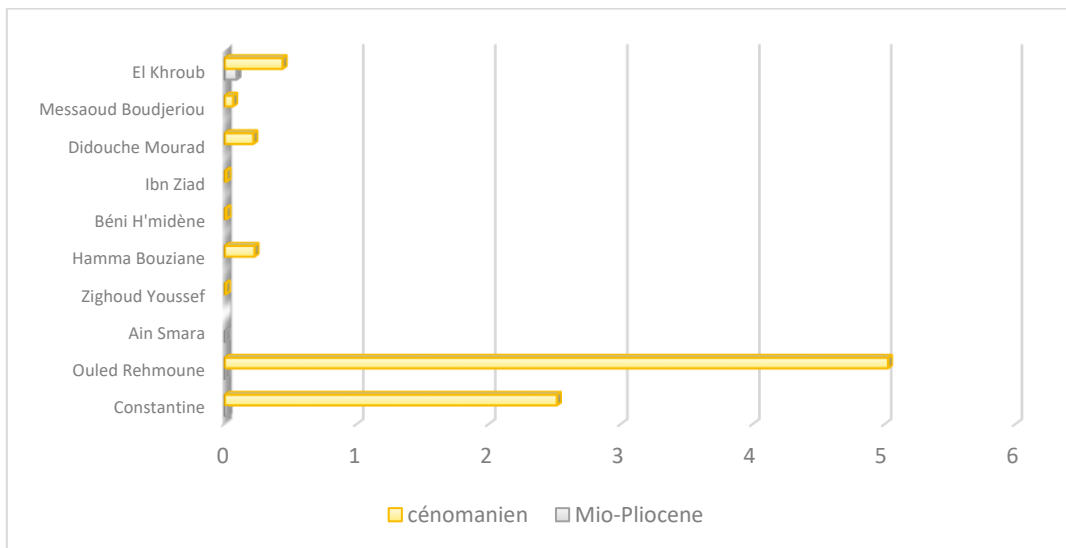


Figure.3.15. Alimentation en eau potable à partir des eaux souterraines en Mm³/ mois

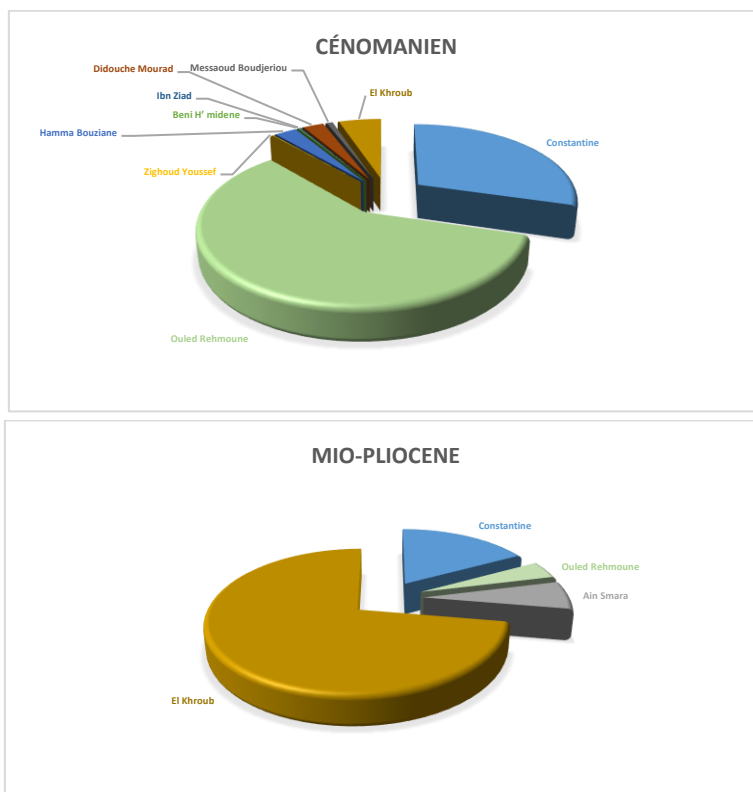


Figure.3.16. Approvisionnement en eau à partir du Miopliocène et du Cénomaniens

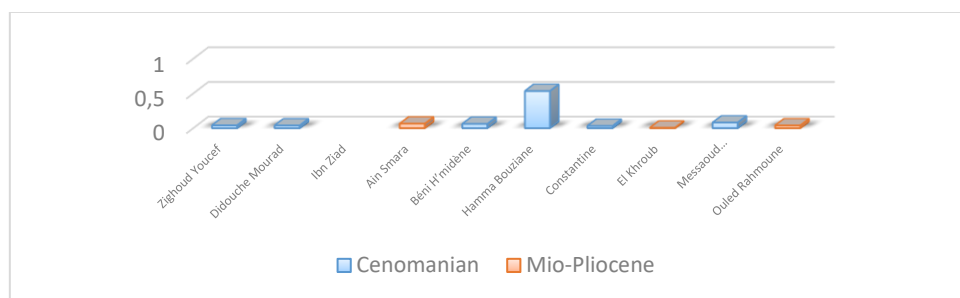


Figure.3.17. Approvisionnement pour l'irrigation à partir des eaux souterraines

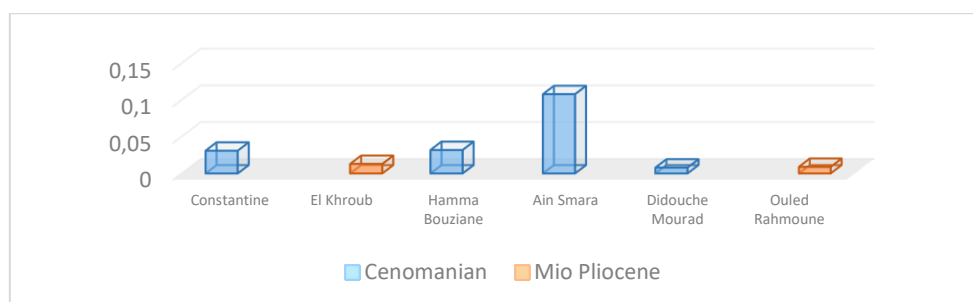


Figure.3.18. Approvisionnement pour l'industrie à partir des eaux souterraines

3.3.2.2.2. Eaux de surface

Les volumes mobilisés d'eau de surface sont nécessaires, en utilisant la capacité de stockage (m^3) et les débits entrants (m^3/s) à partir des retenues, avec la capacité de stockage (m^3), le stockage initial (m^3) et les flux entrants à partir des barrages en (m^3/s).

3.3.2.2.2.1. Barrages

Les communes alimentées en eau potable depuis le barrage de Hammam Grouz sont El Khroub, Constantine et Ain Smara et le barrage de Berla alimente uniquement Constantine.

Le barrage de Hammam Grouz (commune d'El Athménia - wilaya de Mila) répond à la demande en eau potable des communes de Constantine, d'Ain S'mara et des sites industriels de la commune d'El Khroub. Cependant, le barrage de Berla est destiné à assurer une partie de l'eau potable de la commune de Constantine.

Pour le calibrage du modèle trois principaux paramètres des barrages ont été utilisés (Kiniouar *et al.*, 2017.a) :

1. La capacité initiale du barrage de Hammam Grouz qui est de l'ordre de $45000000 m^3$ et celle du barrage de Berla qui est de $1950000 m^3$;
2. Les débits entrants aux barrages sont de $1.41 m^3/s$ à Hammam Grouz et de $0,048 m^3/s$ au barrage de Berla ;
3. La capacité des barrages est de $50000000 m^3$ pour celui de Hammam Grouz et de $2240000 m^3$ pour le barrage de Berla.

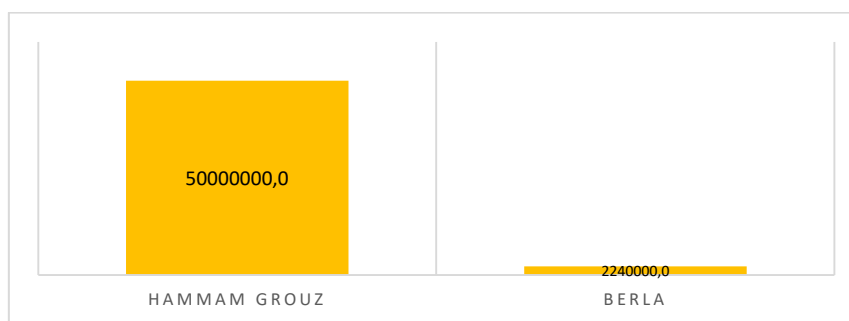
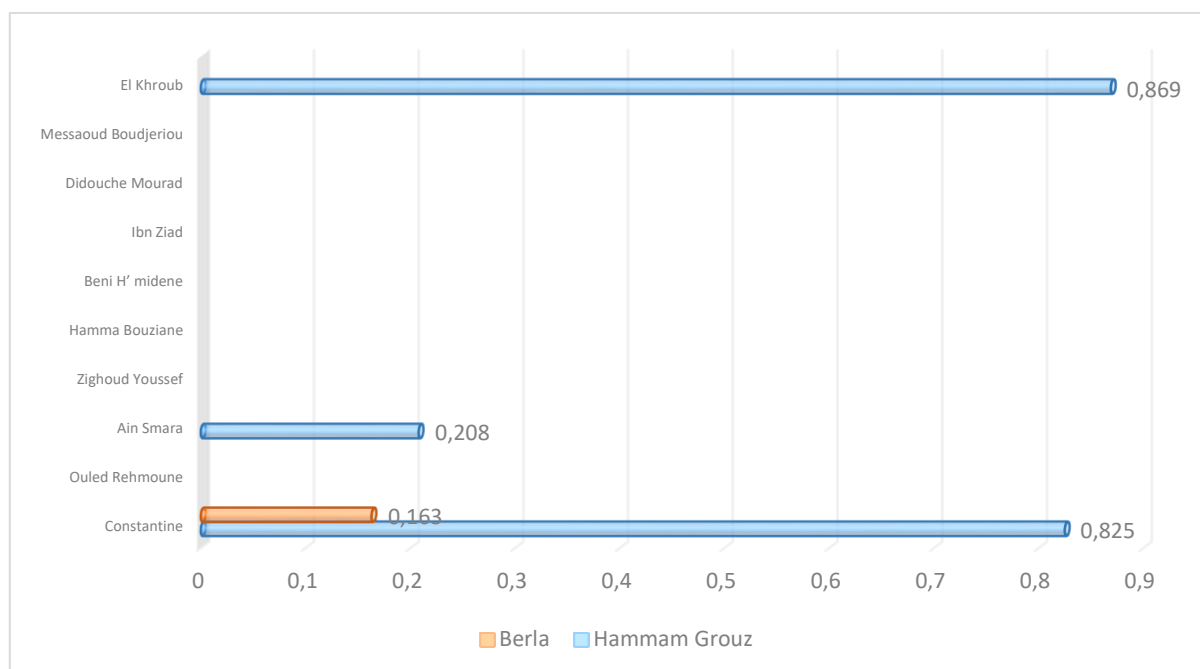


Figure.3.19. Capacité des barrages

3.3.2.2.2. Retenues collinaires

Dans la wilaya de Constantine, on note l'existence de huit retenues collinaires, destinés à irriguer les cultures, dont cinq assurent l'irrigation des cultures de la commune d'El Khroub et les trois autres assurent chacune, l'irrigation des cultures des communes de Didouche Mourad, Ibn Ziad et Ain Smara (ABH-CSM, 2007). A titre indicatif le débit entrant aux retenues est de $0.009 \text{ m}^3/\text{s}$ à la retenue d'El Khroub1, de $0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$ à la retenue d'El Khroub2, de $0.00032 \text{ m}^3/\text{s}$ à El Khroub3, de $0,00056 \text{ m}^3/\text{s}$ à El Khroub4 et de $0,0022 \text{ m}^3/\text{s}$ à El Khroub5 (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

Figure.3.20. Alimentation en eau potable en Mm^3/mois depuis les barrages

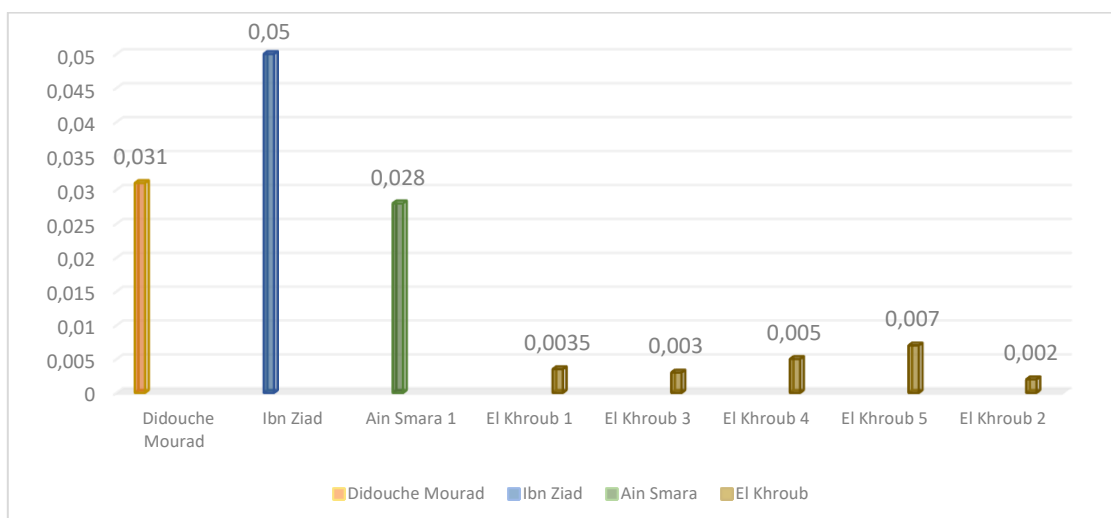


Figure.3.21. Approvisionnement pour l'irrigation à partir des retenues en Mm^3/m

3.3.2.3. Calibrage des sites de demande

Pour caractériser la demande en eau urbaine, agricole et industrielle, nous avons utilisé aussi les données de l'Agence suscitée ainsi que ceux de l'Office National de la Statistique (ONS, 2008) :

3.3.2.3.1. Sites de demande urbains

Croissance démographique et alimentation en eau potable

Les données utilisées (Kiniouar *et al.*, 2017.a) concernent :

- Le nombre d'habitants et les taux d'accroissement de la population par commune (ONS, 2008) ;
- La consommation communale annuelle d'eau en $m^3/habitant$;
- le pourcentage de consommation d'eau par commune ;
- Le pourcentage des niveaux de perte (ABH-CSM, 2007) ;
- La priorité est supposée égale à 1 pour tous les sites de demande ;
- La consommation est supposée à 80 % ;
- Et enfin le pourcentage des fuites variant entre 10 % et 80 %.

3.3.2.3.2. Sites de demande agricoles

La calibration a été faite sur la base des données suivantes (Kiniouar *et al.*, 2017.a):

- La superficie des terres irriguées en hectares par commune ;
- La consommation annuelle d'eau des cultures en m^3/ha par commune ;
- Le pourcentage de consommation d'eau par commune ;
- Et le pourcentage des niveaux de perte (ABH CSM, 2007).

3.3.2.3.3. Sites de demande industriels

D’après Kiniouar *et al.*, (2017.a), la calibration concernent les données suivantes:

- La consommation annuelle d'eau industrielle en m³ par commune ;
- Le pourcentage de consommation d'eau par commune ;
- Et le pourcentage des pertes (ABH CSM, 2007).

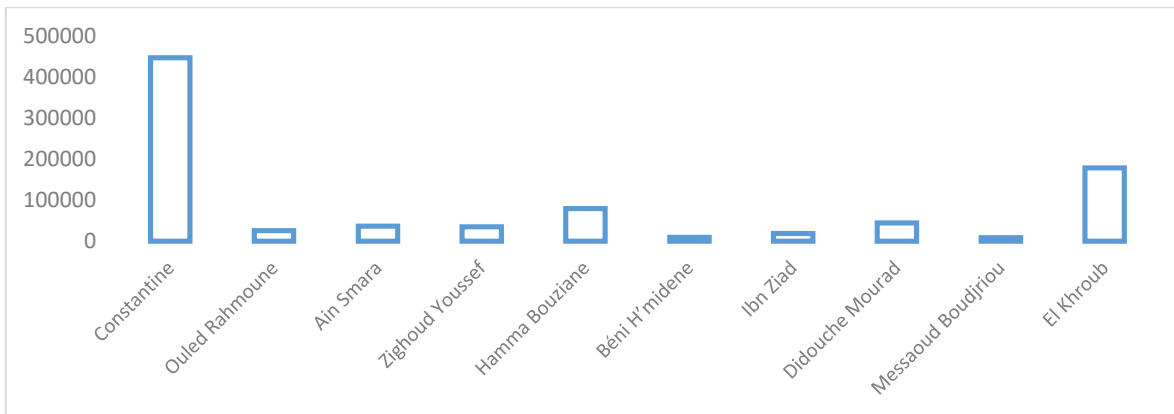


Figure.3.22. Nombre d’habitants par commune (ONS, 2008)

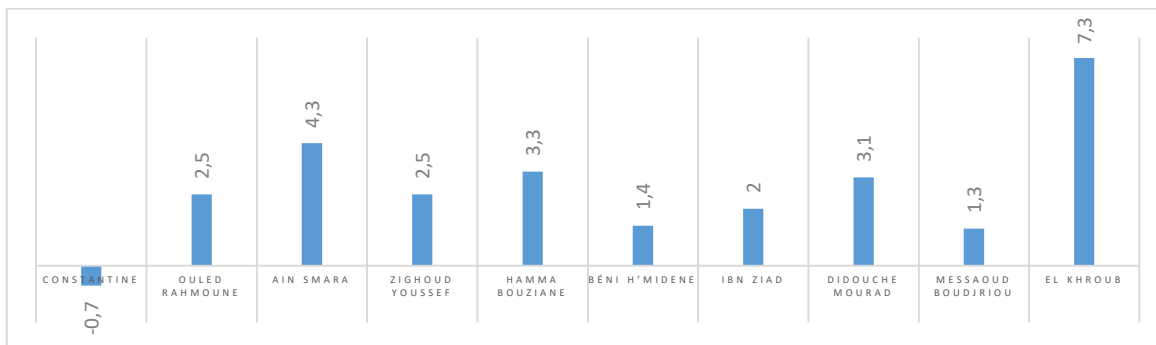


Figure.3.23. Taux d’accroissement de la population

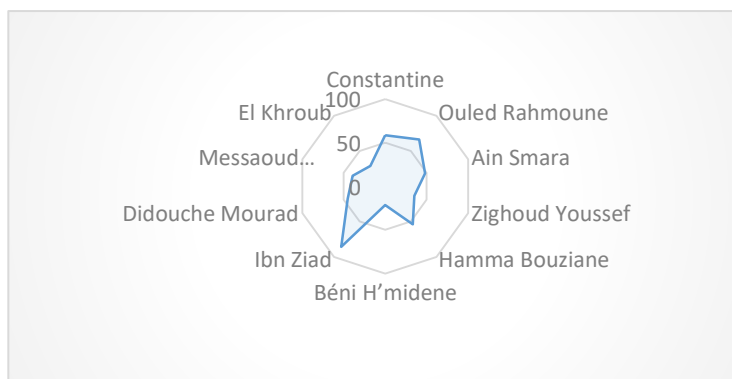


Figure.3.24. Consommation annuelle en m³/cap

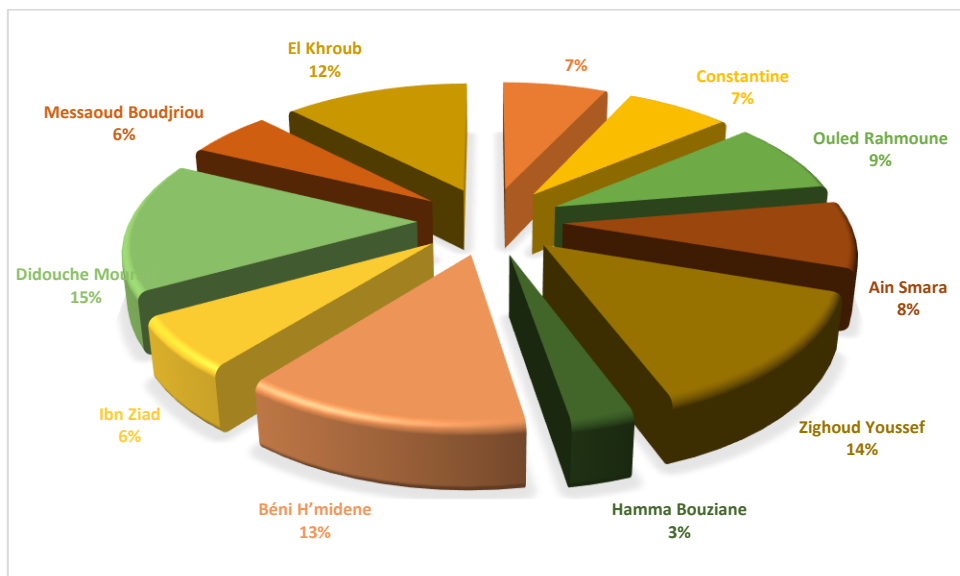


Figure.3.25. Surfaces irriguées en % de la surface totale

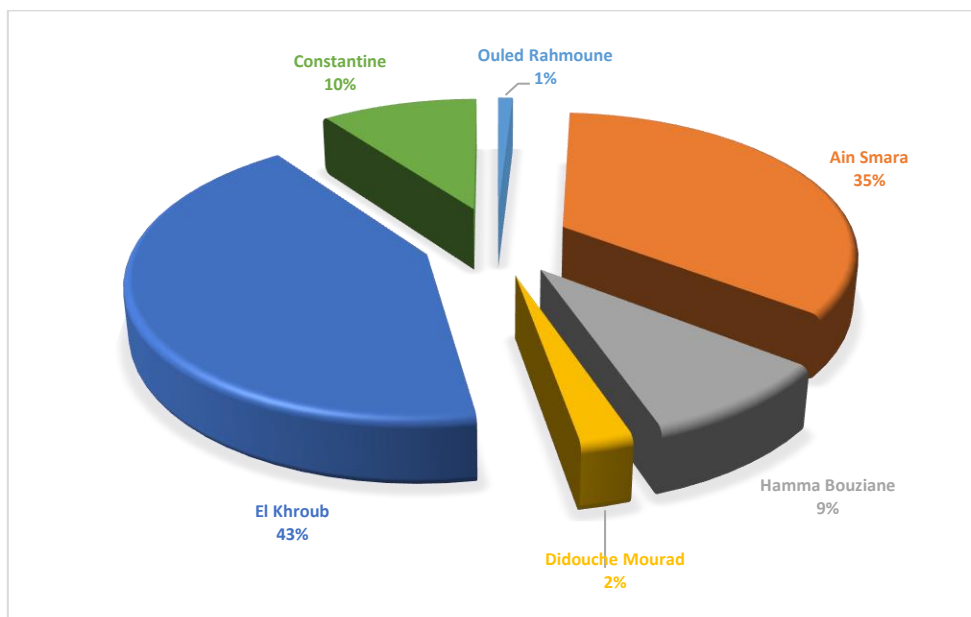


Figure.3.26. Consommation annuelle en eau pour l'industrie

3.3.2.4. Priorités des sites de demande et préférences des sites de ressources

Les « priorités des sites de demande » et les « préférences des sites d'approvisionnement » en eau, sont des éléments importants dans l'assemblage de données.

Nous avons attribué (Kiniouar *et al.*, 2017.a) :

- La priorité 1 aux sites de demande domestique ;
- La priorité 2 aux sites de demande agricole ;
- Et la priorité 3 aux sites de demande industrielle.

Et nous avons utilisé :

AEP

- La préférence 1 pour l'AEP à partir d'un aquifère ;
- La préférence 2 pour l'AEP à partir d'un barrage ;

Agriculture

- La préférence 3 pour l'alimentation des sites agricole à partir d'un aquifère ;
- et la préférence 2 à partir d'un barrage et la préférence 1 à partir d'une retenue ;

Industrie

- Enfin pour l'industrie, le choix de la préférence dépendra du type de produit.

3.3.2.5. Calibrage des liens de transmission

Les liens de transmission entre les réservoirs de ressources en eau et les sites de demande, se caractérisent par des flux mobilisés vers chaque commune (AEP, agriculture et industrie) en millions de m³/an, divisés en pourcentage de variation mensuelle (tableau ci-dessous).

Tableau.3.1 : variation mensuelle (%) des transmissions d'eau entre les nœuds d'offre et de demande

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fèv	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pourcentage	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5

En raison de la carence de données, on a supposé un débit de retour égal à 100 % et les sites de demande d'effluents sont directement liés à l'oued le plus proche (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

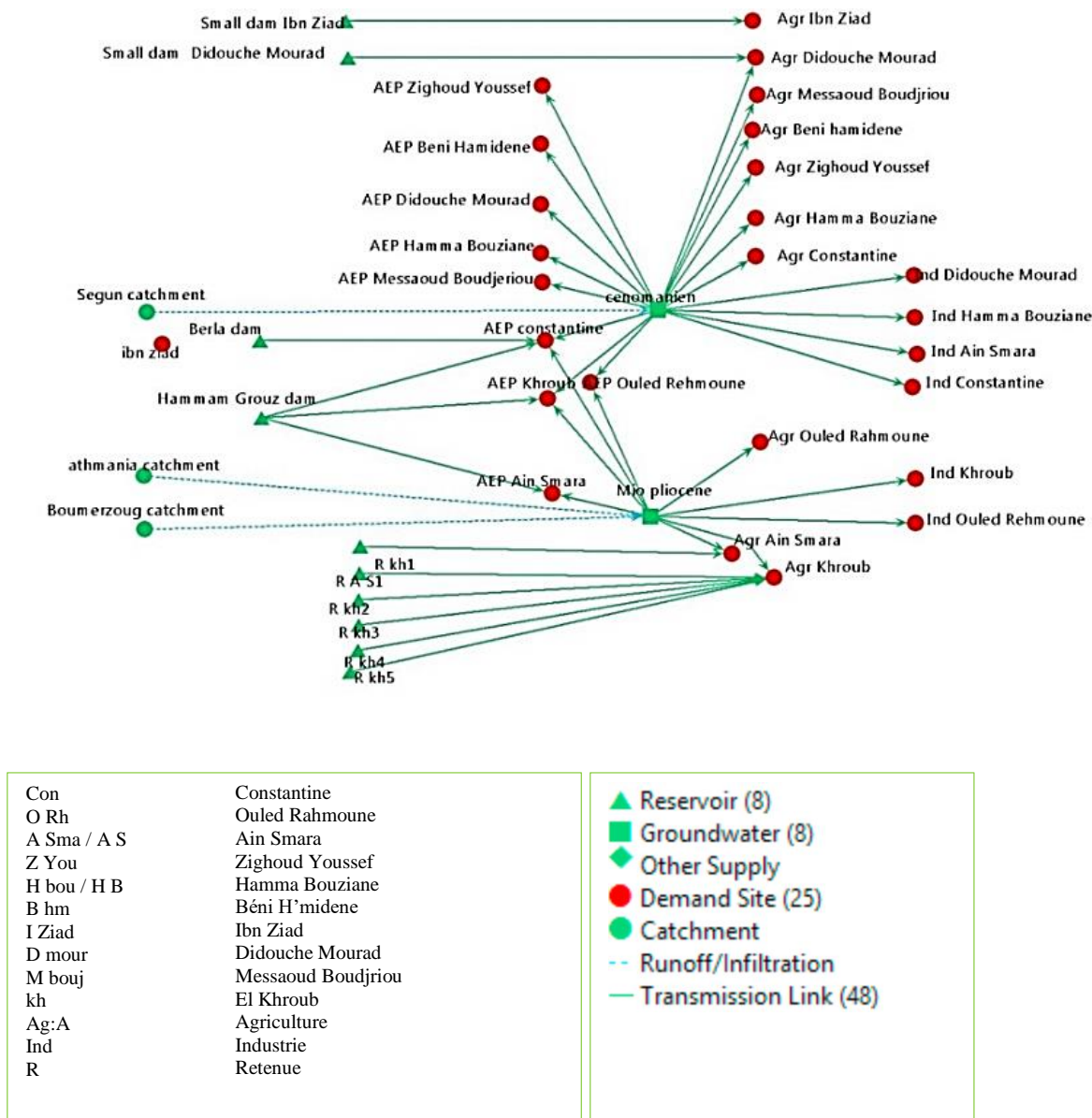


Figure.3.28. Modèle conceptuel simplifié de gestion des ressources en eau de la wilaya de Constantine (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

3.3.3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.3.3.1. Modèle de référence « Comptes courants »

L'année 2007 est choisie comme année de référence pour le modèle des «Comptes courants». Il peut être considéré comme une étape de calibration (paramétrisation) dans le développement d'une application, qui fournit un instantané de la demande réelle en eau, pour le système (Kiniouar *et al.*, 2017.a) (Fig.3.29).

Ensuite, un scénario de référence est établi à partir des comptes courants pour simuler la même évolution du système sans intervention. Cependant, des hypothèses clés peuvent être intégrées dans les comptes courants pour représenter les politiques et les facteurs qui affectent la demande (SEI, 2008).

Le tableau.1.9 en annexes, présente la «demande en eau» pour les comptes courants de l'année 2007. Cependant, l'évolution de la «demande en eau» pour le scénario de référence 2008-2027 sans hypothèses est présentée à la figure.3.31.

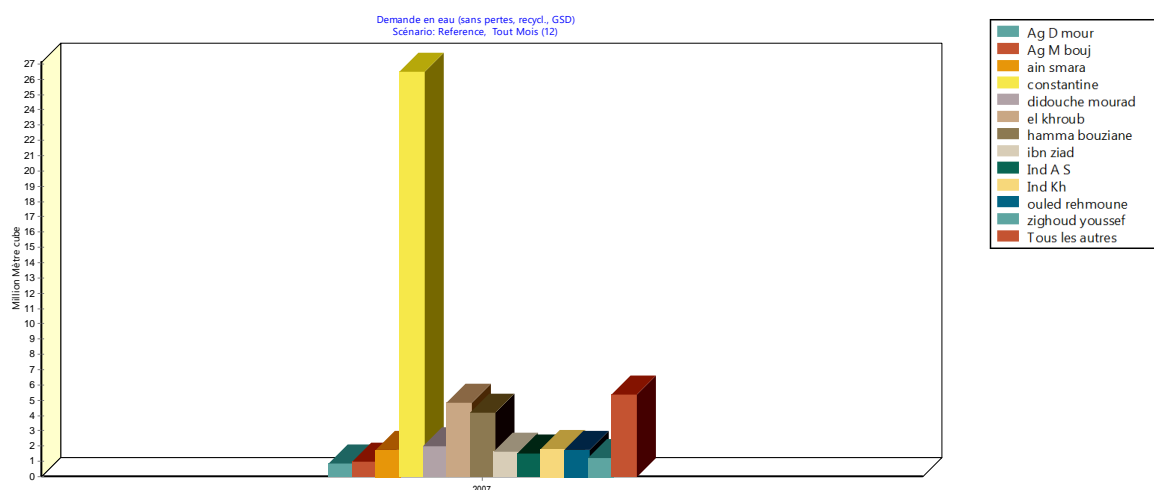


Figure.3.29. Demande en eau - tous les sites
Année des comptes courants 2007

3.3.3.2. Scénario de référence

Dans cette étape, il s'agit de présenter l'évolution de la «demande en eau» pour chaque scénario, avec les changements supposés.

Hypothèses clés de référence

Après avoir cartographié le modèle, il est nécessaire d'avoir une année ou une période de référence pour servir de modèle. Alors comme il a déjà été mentionné l'année 2007 est l'année de référence (année des comptes courants), en raison d'un manque important de données. Ensuite, il est nécessaire de créer les hypothèses clés, qui sont des variables que l'utilisateur WEAP peut définir et servir de clés principales pour l'analyse. Pour cela, nous

avons identifié cinq hypothèses clés utilisées comme données de base du modèle (Kiniouar *et al.*, 2017.a) :

1. Croissance démographique avec un taux de croissance choisi de 2,7%; (moyenne de tous les coefficients de croissance des communes)
2. Augmentation des terres irriguées avec un taux de croissance choisi de 2%;
3. Diminution de la consommation d'eau potable de base avec un taux de diminution choisi de 2%;
4. Diminution de la consommation de cultures irriguées élémentaires avec un taux de diminution sélectionné de 3%;
5. Augmentation de la consommation d'eau industrielle de base avec un taux de croissance choisi de 2%.

Résultat de simulation du scénario BAU

D'une part, une augmentation annuelle de la demande en eau potable pour toutes les communes, notamment là où se trouvent les principales villes comme El Khroub et Hamma Bouziane, qui ont des besoins en eau relativement élevés, pouvant atteindre 19,75 millions de m³ et 7,98 millions de m³ respectivement en 2027. D'autre part, une baisse annuelle est observée à la commune de Constantine avec une demande en eau de 22,98 millions de m³ en 2027 (Fig.3.30 & Fig.3.31).

L'augmentation relativement importante de la demande en eau dans les communes d'El Hamma Bouziane et El Khroub est justifiée par le taux de croissance démographique relativement élevé avec respectivement 7,3% et 3,3%. Cependant, la diminution dans la commune de Constantine est la cause du taux de diminution de la population (-0,7%), en raison du phénomène de migration de la population vers les communes voisines (ANIREF, 2011).

La demande en eau pour l'agriculture et l'industrie, reste constante pendant toute la période de simulation, car il n'y a pas en notre possession des données sur le taux de croissance des zones agricoles et industrielles (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

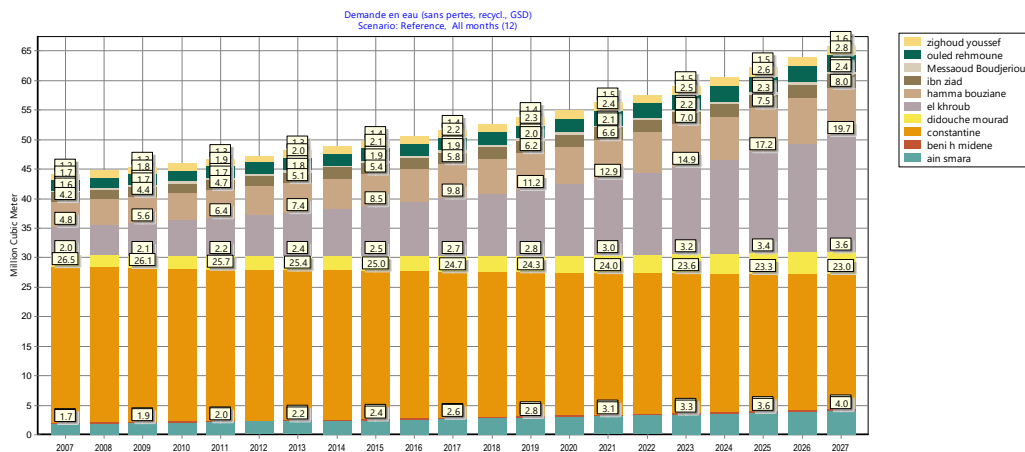


Figure.3.30. Demande en eau potable (AEP seulement) (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

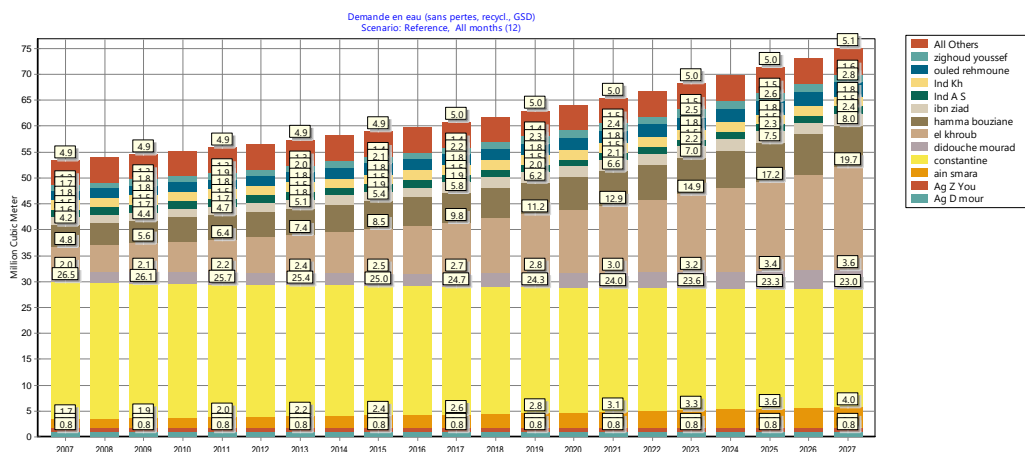


Figure.3.31. Scénario de référence 2008-2027 (Demande en eau totale) (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

3.3.3.3. Simulation des scénarios “Et qu'est-ce qui se passerait si ? ”

Dans WEAP, le scénario typique consiste en trois étapes :

1. Une année de compte courant choisie comme année de référence du modèle ;
2. Un scénario de référence établi à partir des comptes courants et utilisé pour simuler l'évolution probable du système sans modifications ;
3. Un ou plusieurs scénarii pour évaluer les effets des changements socio-économiques, des changements climatiques probables ... etc., pour l'année ou le projet futur (prévision).

Dans cette troisième étape, les scénarii «Et qu'est-ce qui se passerait si ? » peuvent être construits sur les comptes courants et permettent d'explorer l'impact d'hypothèses ou de politiques alternatives sur la disponibilité et l'utilisation futures de l'eau, les effets des changements politiques et / ou technologiques (SEI, 2008).

Hypothèses clés des scénarios “Et qu'est-ce qui se passerait si ? ”

Dans notre cas, l'année de référence (comptes courants) est 2007 et le scénario de référence de 2008 à 2027 est systématiquement calculé sur une période de 20 ans (CN-GWP, 2005). Par la suite, cinq scénarios ont été élaborés pour la période 2008-2027, sur la base des cinq hypothèses clés de référence (Kiniouar *et al.*, 2017.a) :

1. *Hypothèse clé de référence du scénario 1* : croissance de la population (1,3%) (ABH CSM, 2007) ;
2. *Hypothèse clé de référence du scénario 2* : augmentation des terres agricoles (5%) ;
3. *Hypothèse clé de référence du scénario 3* : diminution de la consommation d'eau potable de base (5%) ;
4. *Hypothèse clé de référence du scénario 4* : diminution de la consommation d'eau d'irrigation de base (5%) ;
5. *Hypothèse clé de référence du scénario 5* : augmentation de la consommation d'eau industrielle de base (5%).

Résultat de simulation des cinq scénarios

3.3.3.3.1. Scénario 1 : Croissance démographique

On peut voir sur la figure.3.32 que la demande en eau était de 44,16 millions de m³ en 2007 et atteindra 59,39 millions de m³, avec un taux de croissance démographique de 1,3% (ABH CSM, 2007) dans toutes les communes. Surtout dans la commune de Constantine, la demande en eau relativement plus élevée, passera de 26,45 millions de m³ en 2007 à 35,75 millions de m³ en 2027 (Fig.3.32) (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

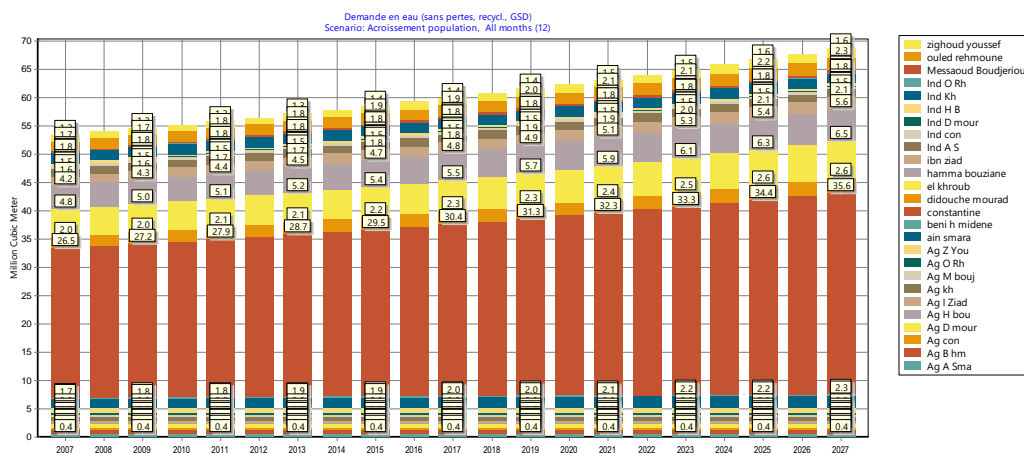


Figure.3.32. Scénario 1 : accroissement de la population (2008-2027) (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

3.3.3.3.2. Scénario 2 : Augmentation de la superficie irriguée des cultures

Avec un taux de croissance des surfaces agricoles, estimé à 5% comme conséquence probable de la mise en place de nouvelles structures de mobilisation, la demande en eau dans la commune de Didouche Mourad passera de 0,82 Mm³ en 2007 à 1,63 Mm³ en 2027. Dans la commune de Zighoud Youssef, la demande en eau des cultures est d'environ 0,76 Mm³ en 2007 et augmentera à 1,50 Mm³ en 2027 (Fig.3.33) (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

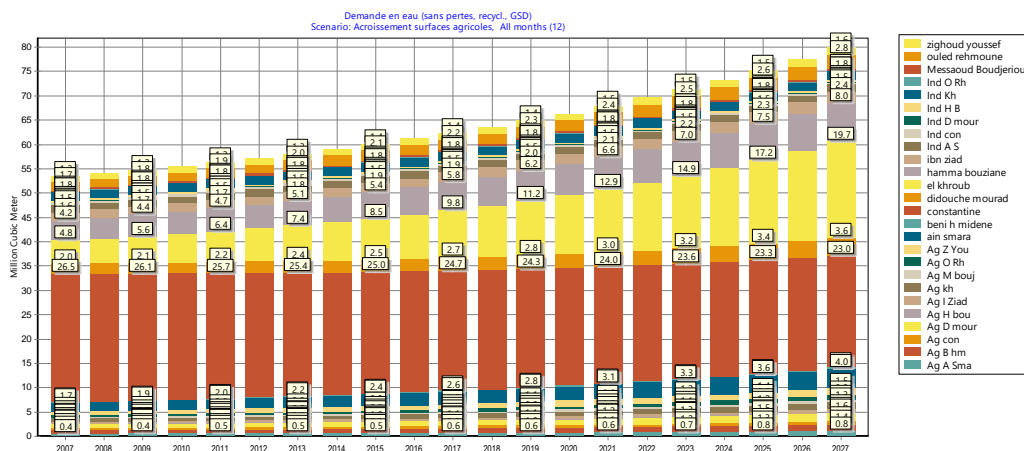


Figure.3.33. Scénario 2 : augmentation de la superficie irriguée (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

3.3.3.3. Scénario 3 : Diminution de la consommation de base d'eau potable

En demandant toujours la question "Et qu'est-ce qui se passerait si ?" et en supposant que nous avons une diminution de la consommation d'eau potable, de l'ordre de 5% au cours de la période de simulation.

Cette diminution est attendue en raison de l'éducation et de la sensibilisation des individus, de l'utilisation appropriée de l'eau et au non gaspillage. En outre, le développement des technologies de l'eau en milieu urbain, la réduction des pertes et des fuites.

La demande en eau est particulièrement importante dans la commune de Constantine en 2007 et diminuera comme le montre la figure 3.34, malgré l'hypothèse de ce scénario. En raison de la migration d'une grande partie de la population dans les communes voisines (ANIREF, 2011). Par contre, à la commune d'El Khroub, la demande accrue est toujours en croissance, malgré la simulation avec un taux de réduction de 5% de la consommation. Car, le taux de croissance réel est relativement élevé, avec 7,3% (Fig.3.34) (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

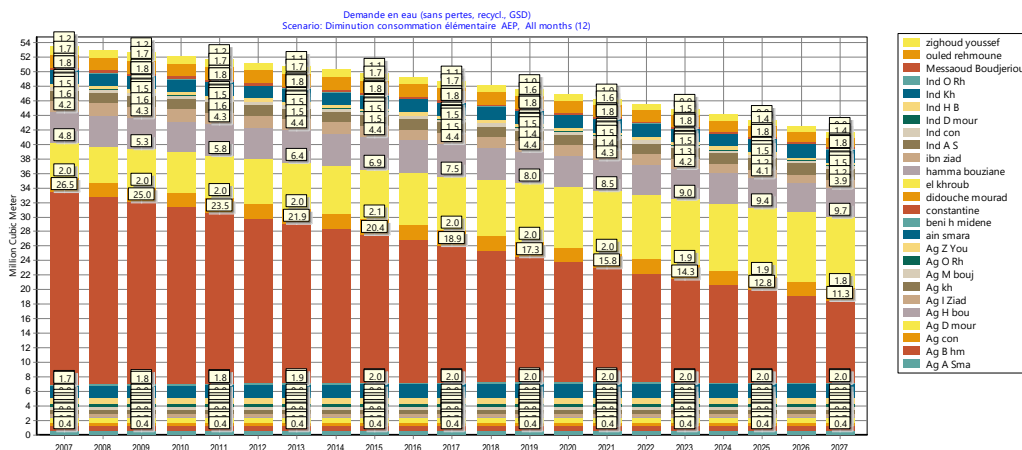


Figure.3.34. Scénario 3 : diminution de la consommation de base d'eau potable (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

3.3.3.3.4. Scénario 4 : Réduction de la consommation élémentaire d'eau d'irrigation

En supposant qu'il y aura une diminution de 5% de la consommation de base de l'eau d'irrigation, suite à la formation des agriculteurs à l'utilisation appropriée et à l'utilisation de nouvelles technologies d'irrigation économiques. Cette réduction de la consommation se traduit par une réduction de la demande totale en eau de 5,62 millions de m³ en 2007 à 1,92 million de m³ en 2027(Fig.3.35) (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

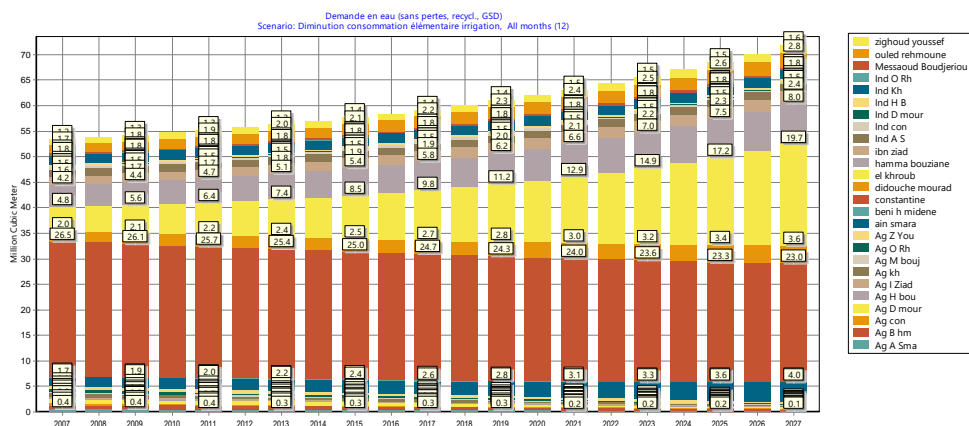


Figure.3.35. Scénario 4 : réduction de la consommation élémentaire d'eau d'irrigation (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

3.3.3.3.5. Scénario 5 : Augmentation de la consommation d'eau pour l'industrie

Enfin, le taux de croissance socio-économique que connaît la wilaya de Constantine permet de supposer une augmentation du taux de consommation d'eau industrielle élémentaire de 5%. Après simulation, on observe une augmentation de plus de 4 millions de m³. Autrement dit, elle va passer de 4,24 millions de m³ en 2007 à 8,37 millions de m³ en 2027. Cependant, la consommation à la commune d'El Khroub, augmentera de 1,81 millions de m³ en 2007 à 3,57 millions de m³ en 2027 et à la commune d'Ain Smara, va passer de 1,46 million de m³ en 2007 à 2,89 millions de m³ en 2027 (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

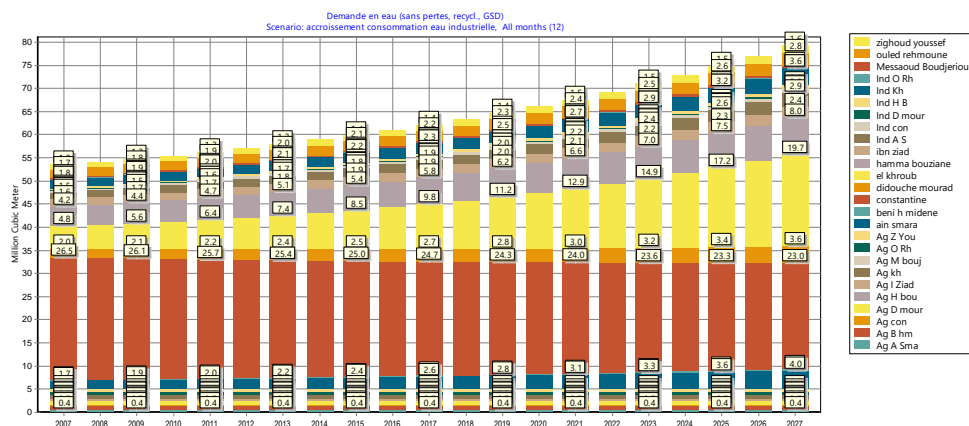
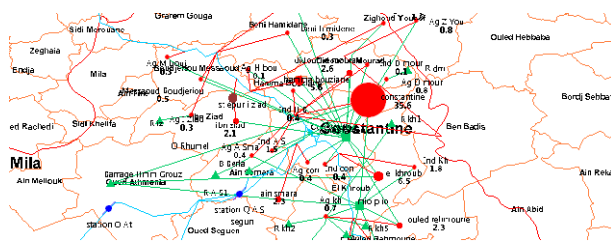
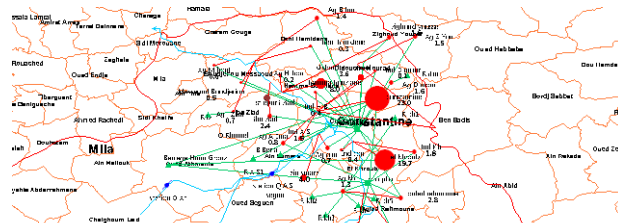


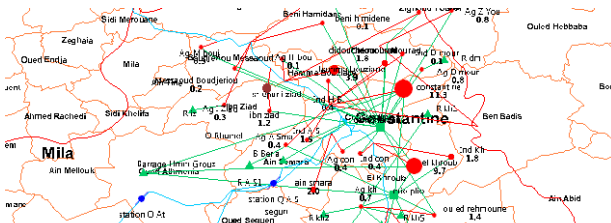
Figure.3.36. Scénario 5 : augmentation de la consommation d'eau pour l'industrie (Kiniouar *et al.*, 2017.a)



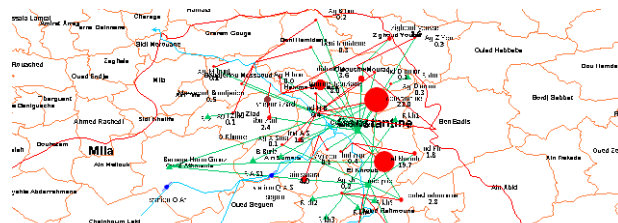
Scénario 1 : accroissement de la population



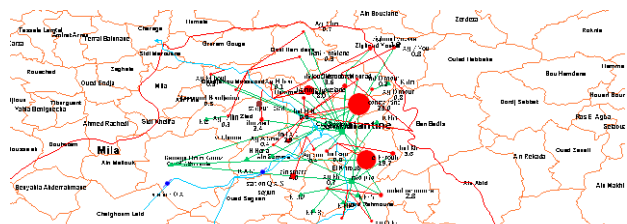
Scénario 2 : augmentation de la superficie irriguée des cultures



Scénario 3 : Diminution de la consommation de base d'eau potable



Scénario 4 : réduction de la consommation élémentaire d'eau d'irrigation



Scénario- 5 : Augmentation de la consommation d'eau pour l'industrie

Figure.3.37. Aperçu de la demande en eau en 2027 pour les cinq scénarios

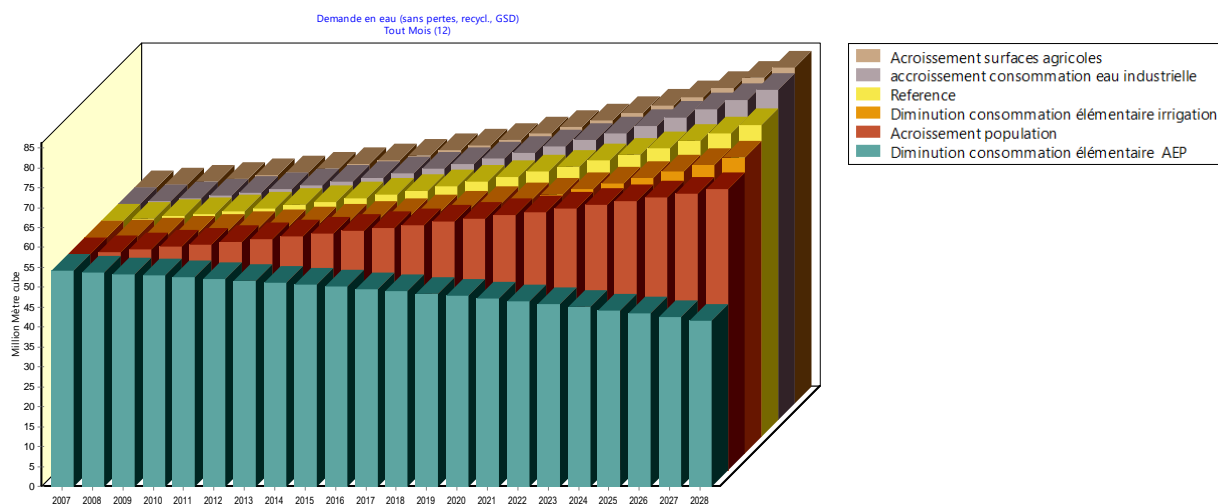


Figure.3.38. Représentation des cinq scénarii (2008-2027) (Kiniouar *et al.*, 2017.a)

3.4. CONCLUSION

Ce modèle est paramétré au niveau de la commune et a permis de constater que quatre scénarii ne sont pas si efficaces pour une gestion rationnelle des ressources d'eau. Sauf pour le cas du scénario 3 (5% de réduction de la consommation d'eau potable) qui réduit la demande en eau potable d'environ 12 Mm³ en 20 ans (2008-2027), car il représente le scénario le plus intéressant pouvant réduire la consommation d'eau (et la demande en eau). Sachant que l'eau potable est le secteur le plus consommateur d'eau dans la wilaya de Constantine.

Cependant, les limites des potentialités d'eau estimées à 76 Mm³ de la wilaya de Constantine (ABH CSM, 2007), seront atteintes en :

- 2028 dans le cas du scénario de référence (scénario tendanciel) ;
- 2026 dans le cas du scénario 5 (augmentation de 5% de la consommation d'eau industrielle de base) ;
- 2026 dans le cas du scénario 2 (taux de croissance de 5% dans les surfaces agricoles) ;
- 2030 dans le cas du scénario 4 (taux de réduction de 5% de la consommation d'eau d'irrigation de base) ;
- 2034 dans le cas du scénario 1 (un taux de croissance démographique de 1,3%) ;

Mais dans tous les cas, il est nécessaire de convertir la politique de l'offre, dans une nouvelle politique de gestion de la demande en eau, en appliquant les règles de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

Cette modélisation ne prend pas en compte les ressources des sous bassin et des capacités de chacun puisque les limites de la wilaya de Constantine chevauchent trois sous bassin : le Boumerzoug, le Kébir amont et le Kébir Smendou. C'est-à-dire qu'il y a possibilité de faire pression sur un ou plusieurs des sous bassin cité précédemment. Et par conséquent, cette gestion ou modélisation ne prend pas en considération les limites topographiques et hydrogéologiques (efficaces) des sous-bassins versants. Cela est contradictoire avec les principes de gestion intégrée des ressources en eau GIRE. Et ce qui va être abordé dans le chapitre suivant en appliquant la modélisation sur le plus haut des sous bassin versant du Kébir Rhumel.

Notons aussi que ce modèle nécessite aussi la validation, mais qui n'a pas été faite pour la seule raison de l'absence de données sur une longue période quelque sois mensuelles ou annuelles. Et cette simulation reste contestable sauf à titre indicatif.

CHAPITRE 4

~

MODELISATION ET SIMULATION DE LA DEMANDE EN EAU - SOUS-BASSIN DU BOUMERZOUG

CHAPITRE 4 : MODELISATION ET SIMULATION DE LA DEMANDE EN EAU - SOUS-BASSIN DU BOUMERZOUG

Ce chapitre présente une étude d'un cas de modélisation de la demande en eau du plus haut sous-bassin du grand bassin du Kébir Rhummel qui est le Boumerzoug, se trouvant dans le sud avec un climat semi-aride et un contexte socioéconomique, qui est le plus développé dans tout le bassin. Dans ce cas l'étude de la demande en eau respecte les limites naturelles du sous bassin et s'adapte plus à la recommandation des principes de la GIRE. Cependant, il faut rappeler que le choix du sous-bassin a été pris aussi selon la disponibilité de données sur la ressource et la demande en eau pour les trois principaux secteurs : l'AEP, l'agriculture et l'industrie. Ensuite on a décrit les données, et les paramètres supposés et utilisées pour le calibrage du modèle, le choix des hypothèses clés de référence et le choix des hypothèses de chacun des 5 scénarios simulés. Afin d'aboutir au choix du meilleur scénario alternatif de gestion de l'eau de du Boumerzoug, sur une période de 30 années. Et pour voir aussi l'équilibre entre la demande et les potentialités des ressources en eau du sous bassin.

4.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude appartient au bassin versant de Kébir-Rhumel d'une superficie de 8815 km², qui reçoit une pluviométrie annuelle moyenne de 582 mm (Mebarki, 2005). Les deux oueds principaux le Rhumel et le Kébir le drainent. Le bassin de Kébir-Rhumel est divisé en sept sous-bassins versants (fig.2.5). Cependant, le bassin versant de Boumerzoug (10-05) avec 1832 km² est le bassin versant intéressé par cette étude.

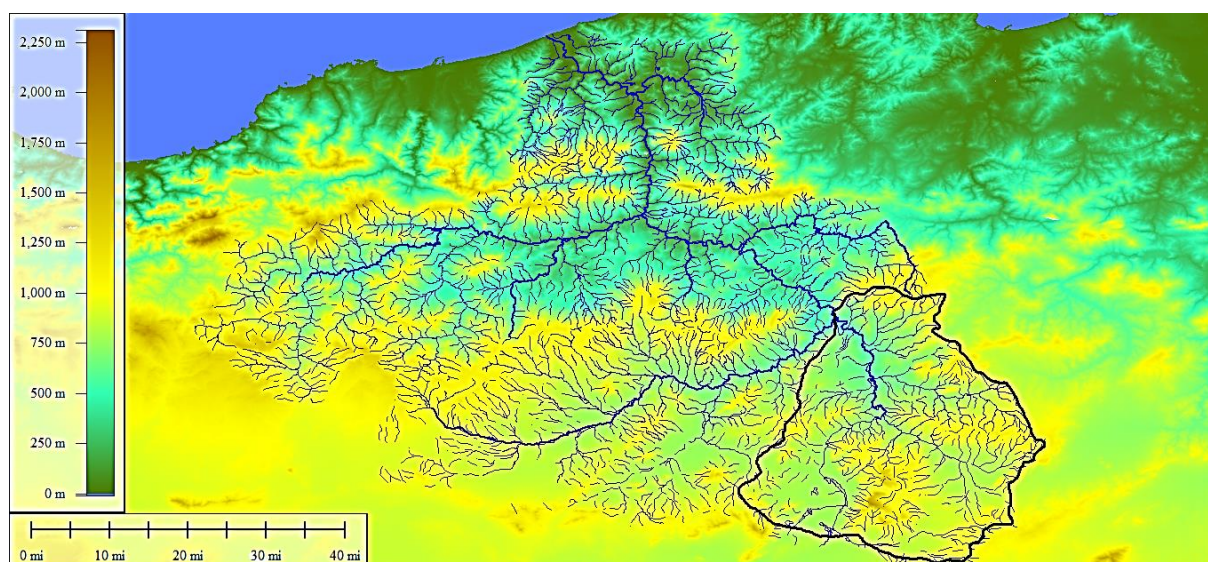


Figure.4.1. MNT du sous-bassin du Boumerzoug dans le grand bassin Kébir-Rhumel (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

Avec un climat semi-aride, il enregistre une température comprise entre 25 ° C et 40 ° C en été et entre 12 ° C et 0 ° C en hiver, et une pluviométrie comprise entre 400 et 600 mm par an. Cependant, le relief est caractérisé par une zone montagneuse au nord, qui est une extension de la chaîne tellienne, dominée par les massifs de Chettaba, Sidi Driss et Djebel El Ouahch culminant à 1364 m d'altitude. Dans l'extrême sud de la wilaya, on trouve des hautes plaines, recoupées par les vallées de Boumerzoug et Rhumel, qui s'étendent sur les villes d'Ain Abid et d'Ouled Rahmoune.

La zone d'étude fait partie de l'avant-pays de la chaîne alpine d'Algérie du nord-est. C'est une zone charnière entre le Nord, le domaine interne allochtone, caractérisé par des nappes de charriage dont la vergence sud, est en relation avec une tectonique compressive cénozoïque polyphasique et au domaine parautochtone sud, où sont installées les post-nappes du bassin néogène de Constantine. Les formations géologiques comprennent essentiellement un assemblage carbonaté inférieur, le socle rocheux du Crétacé à l'Éocène et des dépôts continentaux discordants de couverture principalement détritiques Mio-Plio-Quaternaires (Coiffait, 1992 et Marmi *et al.*, 2006).

Le bassin de Boumerzoug comprend 10 communes : Sigus, El Amiria, Ouled Gacem, Henchir Toumghani, Ain Fakroun, Ain Kercha, Ain M'lila, Constantin, El Khroub, Ouled Rahmoune (Fig.2). Avec les communes de Constantine et d'El Khroub, (Fig.2), qui dépassaient 40000 habitants (Hassani, 2009).

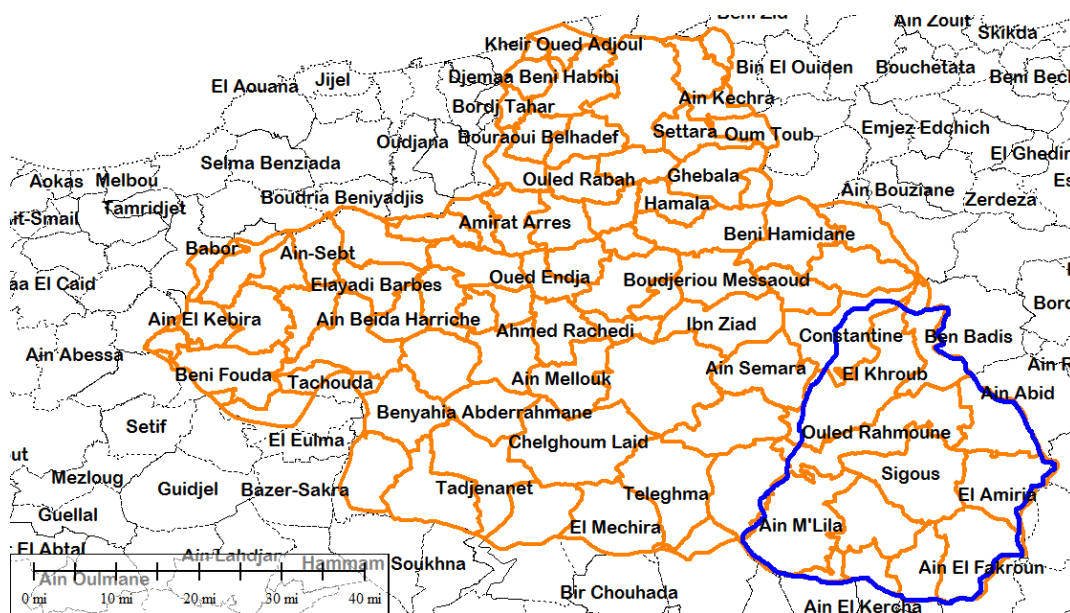


Figure.4.2. Divisions administratives dans le Kébir-Rhumel (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

La zone agricole est consacrée à la culture des céréales ; le reste est consacré aux fourrages, aux légumineuses, aux légumes et aux fruits (ANIREF, 2011).

En outre, l'industrie est divisée en quatre secteurs principaux : la transformation des aliments, la construction mécanique, l'industrie manufacturière et les matériaux de construction tels que le ciment, les granulats, ...etc. (Hassani, 2009).

4.2. AUDIT HYDRAULIQUE DU BASSIN VERSANT DE BOUMERZOUG DE 2006

D'après Bouteraa (2007) la région (Wilaya) de Constantine se caractérise par un faible nombre de communes autour des grandes métropoles de Constantine et principalement il y a Ain Bey et El Khroub. Les ressources en eau proviennent en partie de l'extérieur de la wilaya c'est à dire de Mila à partir de Hammam Grouz, de Guelma à partir de la plaine de Tamlouka et depuis Oum El Bouaghi à partir de la plaine de Fesguia. A cela, la population dépasse 700 000 habitants, dont une grande partie réside en zone urbaine (95%). Cependant, les eaux usées de Constantine menacent le barrage de Beni Haroun, même si une partie d'entre elles transitent par la STEP de 400000 eq. Hab déjà existante.

4.2.1. Ressources mobilisées

Les points de mobilisation en eau sont cités comme suit : Champs captant Boumerzoug, la plaine d'El Khroub, la plaine d'Ain M'lila, la plaine d'Ain Kercha, la plaine de Sigus. Ajoutant aussi les transferts et adductions provenant : du barrage de Hammam Grouz, de la nappe de Hamma Bouziane et du barrage de Berla. Cependant, le bilan annuel moyen tous usages et toutes ressources confondus s'établit à 81,57 hm³ pour le barrage de Hammam Grouz et de 37,84 hm³ pour le barrage de Berla.

4.2.1.1. Situation de l'AEPI

4.2.1.1.1. AEP Constantinois

1. Le barrage Hammam Grouz qui fonctionne à 450 l/s et l'acheminement est gravitaire jusqu'à Constantine. Ce barrage est sous la menace des fuites et de la turbidité de l'eau des forages destinés à Oued Athménia qui sont à l'arrêt ;
2. Le champ captant de Boumerzoug dans la commune d'Ouled Rahmoune avec 8 forages qui totalisent 500 l/s. Cependant, l'ANRH considère qu'on est en surexploitation et elle préconise 400 l/s pour l'ensemble du Champ captant ;
3. le champ captant de Hamma Bouziane avec 5 forages en action sur 6 existants. Notons que l'ANRH considère qu'on est également en surexploitation ;
4. le barrage de Berla dans la commune d'Ain Smara avec 3 Mm³ via 2 stations monobloc développant 50 l/s.

4.2.1.1.2. Commune d'El Khroub

Alimentée depuis 3 forages en plaine du Khroub

4.2.1.1.3. Commune Ouled Rahmoune

Alimentée depuis la conduite d'Ain M'lila (qui alimentait jadis Constantine) qui dessert Ouled Gacem à partir d'un champ captant à Fesguia.

4.2.1.1.4. Commune Ain Abid

Alimentée depuis le forage de Tamlouka (wilaya de Guelma) de 40 l/s.

4.2.1.1.5. Commune de Ben Badis

Elle est alimentée depuis El Khroub avec 500 m³/j pour 20 l/s installée.

4.2.1.1.6. Commune de Sigus

Alimentée depuis un forage de 700 m dans les marno-calcaires de bonne qualité, de débit 25 à 30 l/s (même origine que Fesguia qui alimente El Khroub, mais pas de bilan précis).

4.2.1.1.7. Nappe d'Ain Kercha

Pour Ain Kercha, El Harmlia, Hanchir Toumghani et Ain Fakroune on note le problème de salinité des eaux.

4.2.1.1.8. Communes de Ain M'lila et d'Ouled Gacem

Champ captant de la plaine d'Ain M'lila avec 3 Forages pour Ain M'lila ville. Les forages existent mais les sources ont tari suite à la surexploitation.

4.2.1.2. Situation de l'irrigation

Dans la localité de Fourchi, les forages y étaient abondants (jusqu'à 300 l/s) mais on assiste à un fort rabattement et le débit disponible est de 150 l/s. Même situation de rabattement à Ain M'lila. Cependant, à Ain Kercha, 210 ha ont été récemment équipés ensuite abandonnés et la nappe est épuisée à El Khroub.

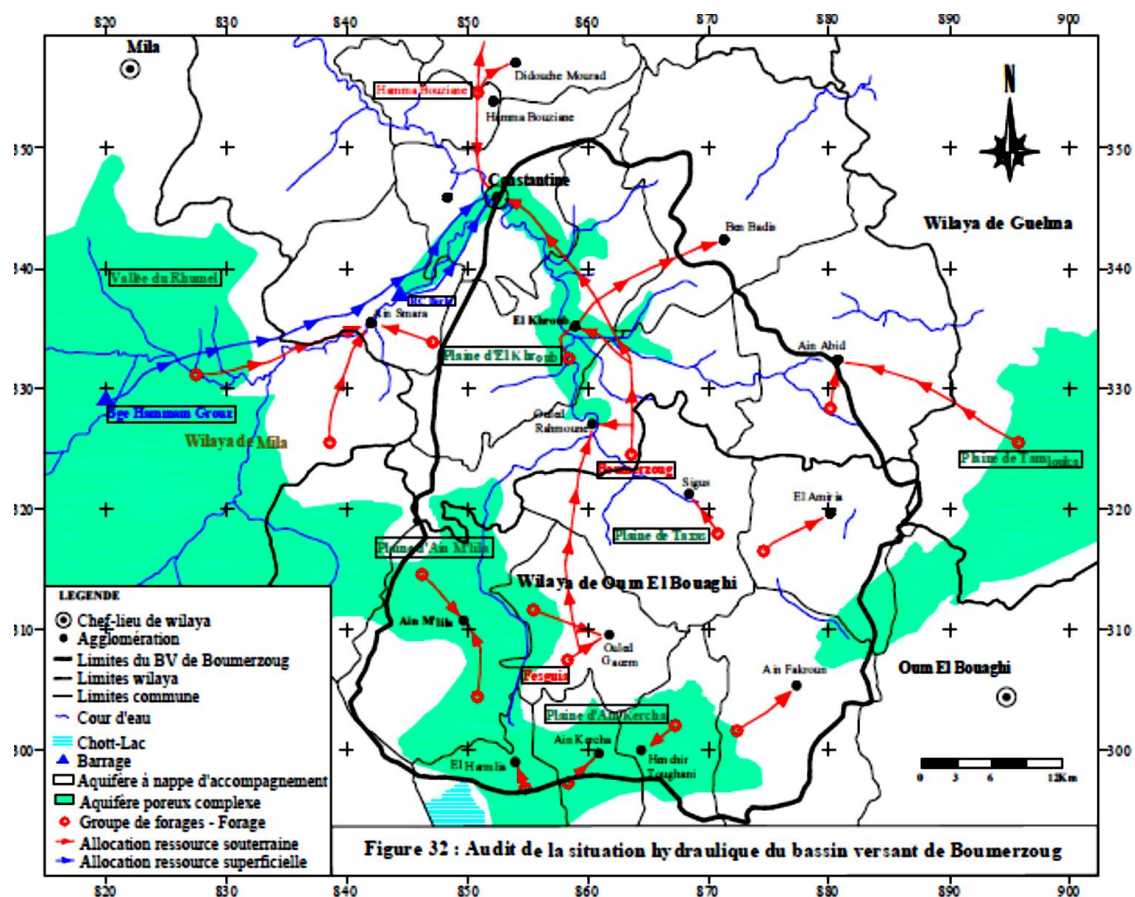


Figure.4.3. Audit de la situation hydraulique du bassin versant de Boumerzoug de l'année 2006 (Bouterraa, 2007)

4.3. MODELISATION DE LA DEMANDE EN EAU DU SOUS-BASSIN DU BOUMERZOUG

Comme il a été déjà réalisé dans le chapitre précédent, le WEAP (Water Evaluation And Planning System) a été sélectionné sur d'autres modèles de ressources en eau car il s'agit d'un outil logiciel convivial, bien documenté, avec de belles interfaces graphiques (GUI), et se concentre sur la gestion des ressources en eau et le bilan hydrologique.

4.3.1. Méthodologie

Le programme WEAP sera utilisé pour construire un modèle GIRE prenant le sous-bassin du Boumerzoug comme deuxième étude de cas.

Les points suivants résument les principales étapes à suivre :

1. Préparer les informations requises et toutes les données d'entrée pour le logiciel WEAP afin de développer un modèle de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE)
2. Configurez les données basées sur le SIG en tant qu'entrée pour le modèle.
3. Proposer des scénarios futurs liés à la croissance de la population, à l'évolution de l'offre et de la demande et à d'autres facteurs.
4. Construire le modèle GIRE en utilisant le programme WEAP.
5. Les résultats finaux de la modélisation seront formulés sous forme de figures, de tableaux et de cartes.
6. Effectuez l'étalonnage nécessaire pour les données de sortie issues du modèle WEAP pour le bassin versant.
7. Définissez les commentaires généraux et les recommandations.

4.3.2. Calibration du modèle

4.3.3. Ensembles de données

D'une part, chaque commune dispose d'un site de demande d'eau potable, d'un site de demande d'eau pour l'agriculture, d'un site de demande d'eau pour l'industrie. D'autre part, nous avons des éléments d'approvisionnement en eau tels que l'eau souterraine extraite des aquifères et l'eau de surface des barrages et des retenues.

Cependant, les ressources en eau sont extraites du Cénomaniens, du Quaternaire, de l'Albien, de l'Aptien, du Miocène, du Pliocène, du Maastrichtien et du Mio Pliocène en ce qui concerne les ressources en eaux souterraines et des barrages de Hammam Grouz et de Berla et des retenues collinaires concernant les ressources en eau superficielle (Fig.4.4) & (Tableaux en annexes).

4.3.4. Calibrage des sites de ressource

4.3.4.1. Ressources souterraines

Dans l'étape de calibrage du modèle, on a réalisé la structuration comme suit :

4.3.4.1.1. Approvisionnement pour l'AEP

Principalement, l'aquifère Cénomaniens alimente le site municipal de demande d'eau potable des communes d'Ain Fakroun, Constantine, El Khroub et Ouled Rahmoune.

L'aquifère du Miopliocène fournit une partie de la demande en eau urbaine des communes de Constantine, d'El Khroub, d'Ouled Rahmoune, d'Ain Fakroun et d'Ouled Gacem.

L'aquifère du Quaternaire fournit la demande en eau urbaine des communes d'Ain M'lila, d'Ain Kercha, d'Ain Fakroun, d'Ouled Gacem, d'El Amiria et de Henchir Toumghani.

L'aquifère de l'Aptien alimente en eau potable Ain M'lila, Ain Fakroun, Sigus, Henchir Toumghani et Ain Kercha (Fig.4.4).

4.3.4.1.2. Approvisionnement pour l'irrigation

Comme précédemment dans le calibrage du modèle, l'aquifère du Miopliocène fournit une partie de la demande en eau d'irrigation de la commune d'El Khroub et fournit la totalité de la demande en eau d'irrigation de la commune d'Ouled Rahmoune.

L'aquifère du Quaternaire alimente une partie de la demande en eau d'irrigation de la commune d'El Khroub et répond à la demande en eau des cultures d'Ain M'lila, d'Ain Kercha, d'Ain Fakroun, d'Ouled Gacem et de Henchir Toumghani.

4.3.4.1.3. Approvisionnement pour l'industrie

L'aquifère du Cénomaniens approvisionne également le site industriel de Constantine (Fig.4.4) & (Tab.2.3 en annexes).

Pour la demande en eau industrielle, l'aquifère du Miopliocène alimente les communes d'El Khroub et Ouled Rahmoune (Fig.4.4) & (Tab.2.3 en annexes).

Enfin, pour la demande en eau industrielle, l'aquifère du Quaternaire alimente la commune d'Ain M'lila (Fig.4.4) & (Tab.23 en annexes).

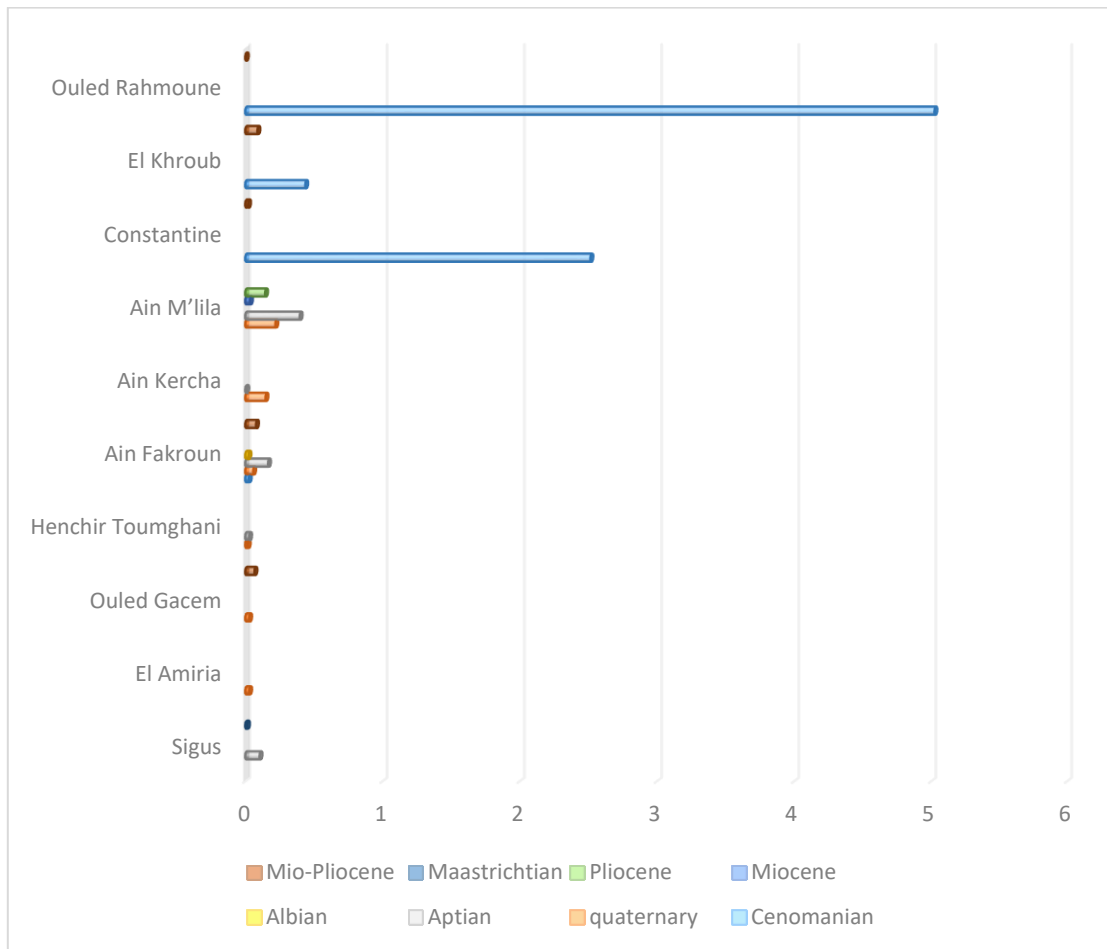


Figure.4.4. Alimentation en eau potable à partir des eaux souterraines en Mm³/ mois

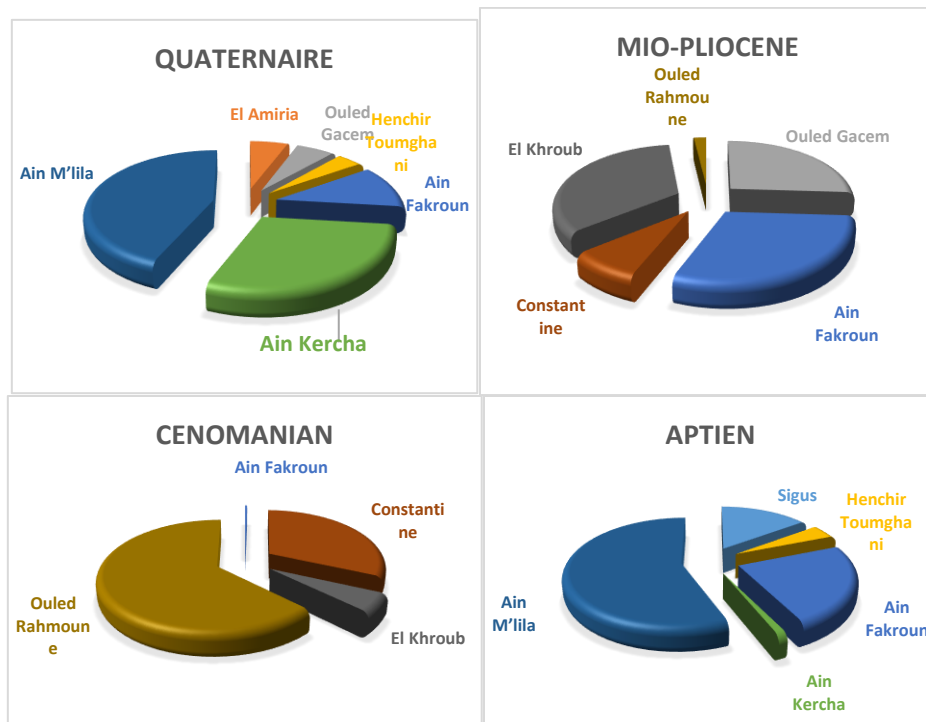


Figure.4.5. Approvisionnement en eau à partir des niveaux aquifères

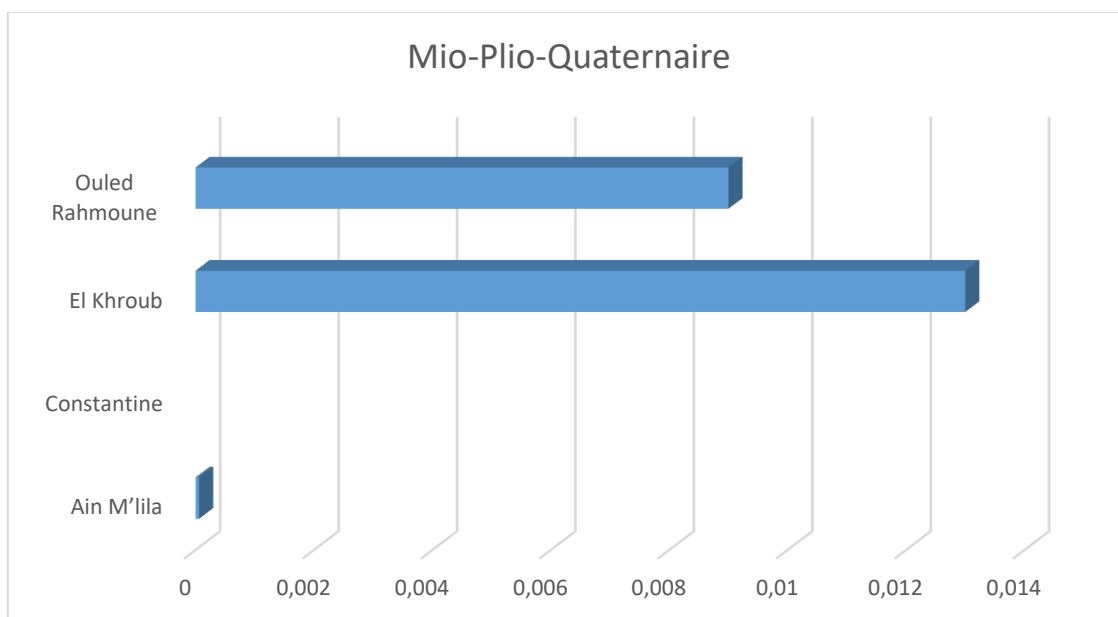


Figure.4.6. Approvisionnement pour l'industrie (eaux souterraines)

4.3.4.2. Eaux de surface

4.3.4.2.1. Barrages

Des volumes d'eau de surface mobilisés sont nécessaires dans la construction du modèle. En utilisant la capacité de stockage en m^3 et les débits entrants en m^3/s des retenues collinaires, avec capacité de stockage en m^3 , stockage initial en m^3 et flux entrant en m^3/s de barrages.

Cependant, le barrage de Hammam Grouz localisé dans la commune d'El Athmania (wilaya de Mila) répond à la demande en eau potable de la commune de Constantine et des sites industriels de la commune d'El Khroub. Et aussi le barrage de Berla visait à assurer une partie de l'eau potable de la commune de Constantine (Fig.3.19.) & (Tab.2.1 en annexes).

Pour le calibrage du modèle trois principaux paramètres des barrages ont été utilisés (Kiniouar *et al.*, 2017.a & b) :

1. La capacité initiale du barrage de Hammam Grouz avec $45000000 m^3$ et celle du barrage de Berla avec $1950000 m^3$;
2. Les débits entrants aux barrages sont de $1.41 m^3/s$ à Hammam Grouz est de $0,048 m^3/s$ au barrage de Berla ;
3. La capacité des barrages est de $50000000 m^3$ pour celui de Hammam Grouz et de $2240000 m^3$ pour Berla.

4.3.4.2.2. Retenues collinaires

Nous notons l'existence de six retenues collinaires, destinées à irriguer les cultures, dont cinq assurent l'irrigation des cultures de la commune d'El Khroub et la retenue de Khanga assure l'irrigation agricole de la commune de Sigus (ABH CSM, 2007) (Fig.4.7.) & (Tab.2.2 en annexes). A titre indicatif le débit entrant aux retenues est de 0.009 m³/s à la retenue d'El Khroub1, de 0.0002 m³/s à la retenue d'El Khroub2, de 0.00032 m³/s à El Khroub3, de 0,00056 m³/s à El Khroub4 et de 0,0022 m³/s à El Khroub5 (Fig.4.7.) (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

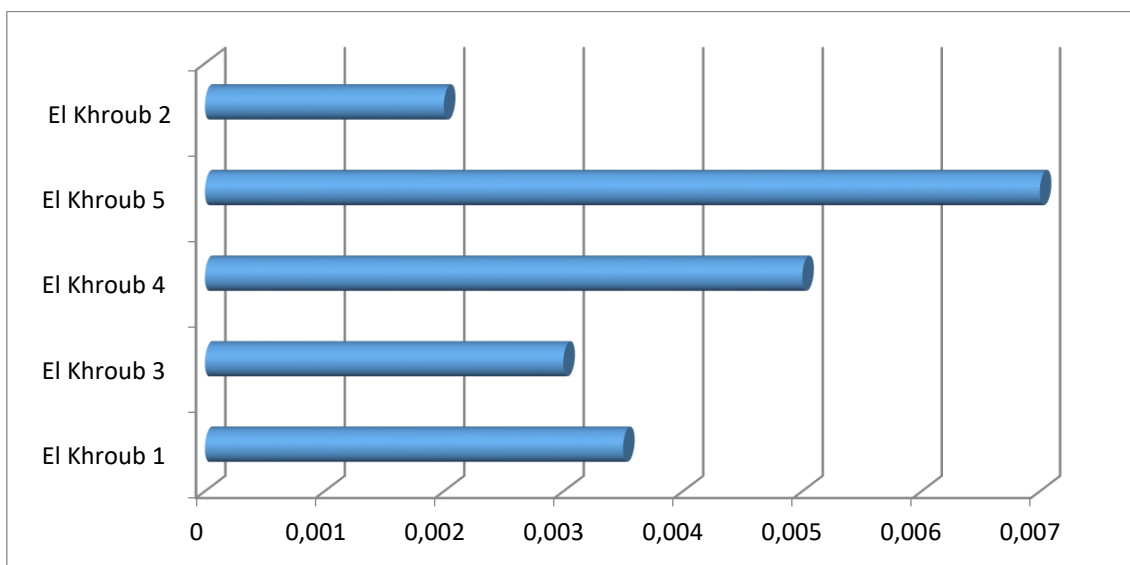


Figure.4.7. Débits entrants aux retenues dans le sous-bassin du Boumerzoug en m³/s

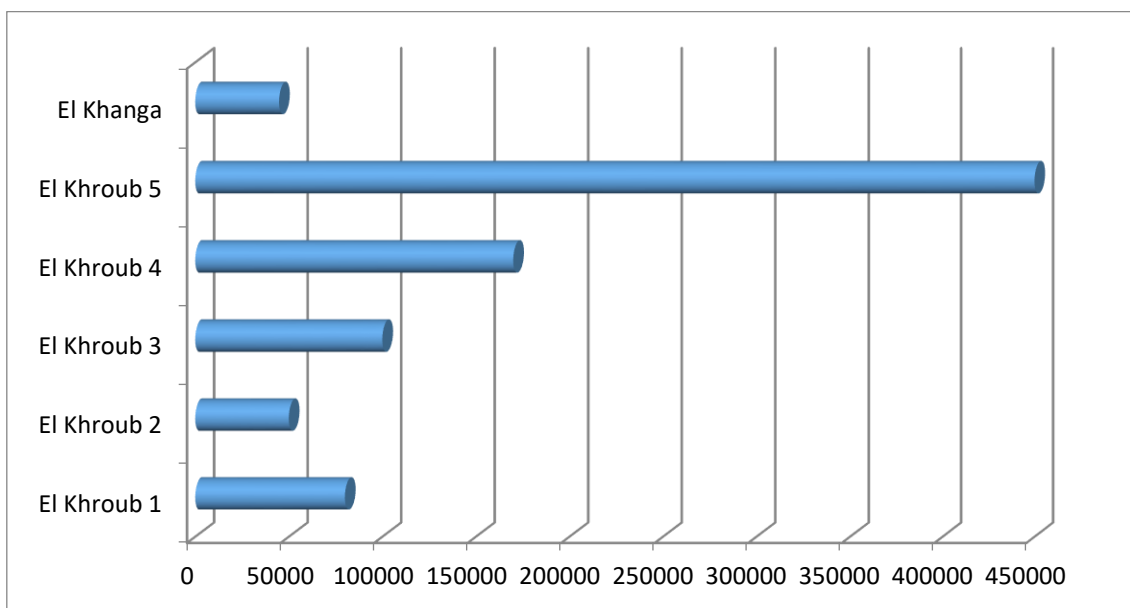


Figure.4.8. Capacité des retenues collinaires dans le sous-bassin du Boumerzoug en m³

4.3.5. Calibrage des sites de demande

Pour caractériser la demande en eau urbaine, agricole et industrielle, nous avons utilisé la même procédure du cas d'étude précédent.

4.3.5.1. Sites de demande urbains

4.3.5.1.1. Croissance démographique et l'alimentation en eau potable

Pour la calibration des sites de demande en eau municipale, nous avons utilisé les paramètres suivants (Fig.4.9, Fig.4.10) & (Tab.2.6 en annexes) :

- Le nombre d'habitants et les taux d'accroissement de la population par commune (ONS, 2008) ;
- La consommation communale annuelle d'eau en m³/habitant ;
- le pourcentage de consommation d'eau par commune ;
- Le pourcentage des niveaux de perte (ABH-CSM, 2007) ;
- La priorité est supposée égale à 1 pour tous les sites de demande ;
- La consommation est supposée à 80 % ;
- Et enfin le pourcentage des fuites variant entre 10 % et 80 % (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

4.3.5.2. Sites de demande agricoles

Pour la calibration des sites de demande en eau agricole, nous avons utilisé les paramètres qui suivent (Fig.4.11) & (Tab.2.7 en annexes) :

- La superficie des terres irriguées en hectares par commune ;
- La consommation annuelle d'eau des cultures en m³/ha par commune ;
- Le pourcentage de consommation d'eau par commune ;
- Et le pourcentage des niveaux de perte supposé à 10 % (ABH CSM, 2007) (Kiniouar *et al.*, 2017.a) ;

4.3.5.3. Sites de demande industriels

Dans ce cas, la calibration nécessite les trois paramètres ci-dessous (Fig.4.12) & (Tab.2.8 en annexes) :

- La consommation annuelle d'eau industrielle en m³ par commune ;
- Le pourcentage de consommation d'eau par commune supposé à 90 % ;
- Et le pourcentage des pertes supposé 10 % (ABH CSM, 2007) (Kiniouar *et al.*, 2017.a).

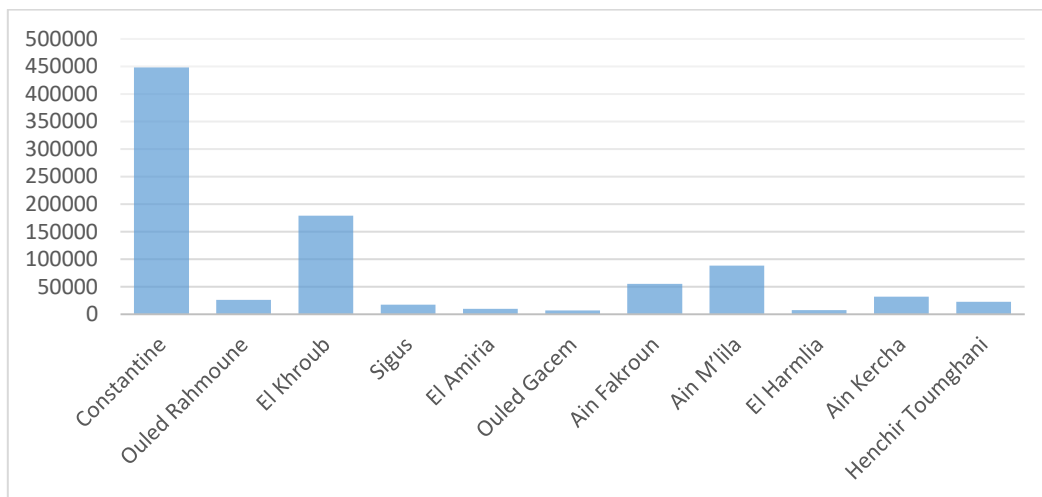


Figure.4.9. Nombre d'habitants par commune (ONS, 2008)

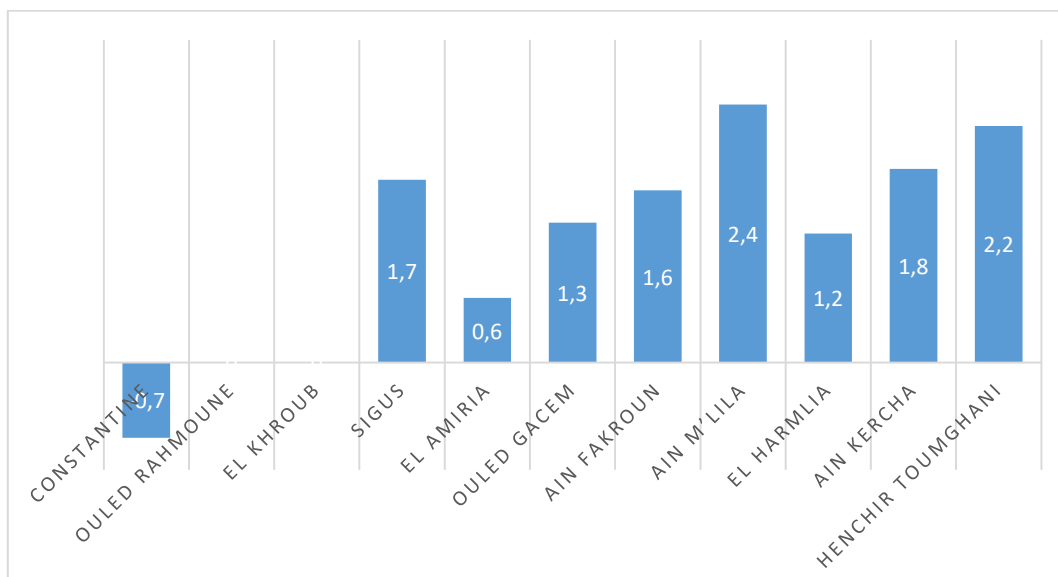


Figure.4.10. Taux d'accroissement de la population

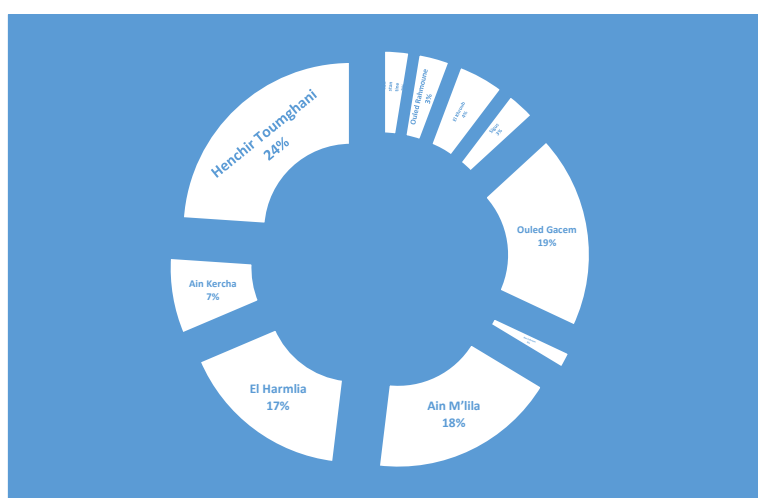


Figure.4.11. Surfaces irriguées en % de la surface totale

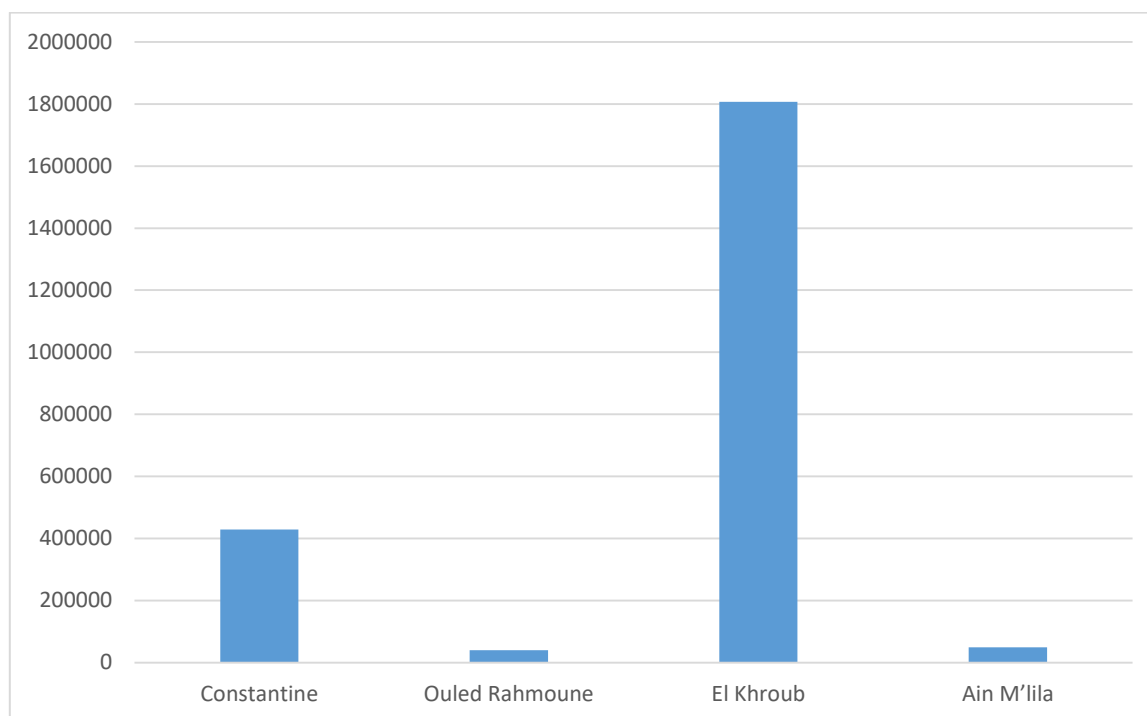


Figure.4.12. Demande en eau industrielle

4.3.5.4. Priorités des sites de demande et préférences des sites de ressources

Les « priorités des sites de demande » et les « préférences des sites d'approvisionnement » en eau, sont des éléments importants dans l'assemblage de données.

Nous avons attribué (Kiniouar *et al.*, 2017.a & b) :

- La priorité 1 aux sites de demande domestique ;
- La priorité 2 aux sites de demande agricole ;
- Et la priorité 3 aux sites de demande industrielle.

Et nous avons utilisé :

AEP

- La préférence 1 pour l'AEP à partir d'un aquifère ;
- La préférence 2 pour l'AEP à partir d'un barrage ;

Agriculture

- La préférence 3 pour l'alimentation des sites agricole à partir d'un aquifère ;
- Et la préférence 2 à partir d'un barrage et la préférence 1 à partir d'une retenue ;

Industrie

- Enfin pour l'industrie, le choix de la préférence dépendra du type de produit.

4.3.5.5. Calibrage des liens de transmission

Les liens de transmission entre les réservoirs de ressources en eau et les sites de demande en eau ont été caractérisés par des flux mobilisés dans chaque commune (AEP, irrigation et industrie) en millions de m³/an, divisé en pourcentage de variation mensuelle (Tab.4.1) (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

Tableau.4.1.Variation mensuelle des transmissions d'eau entre les nœuds de l'offre et de la demande

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fèv	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
%	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5

Enfin, il faut rappeler que les débits de retour étaient de 100% et que les sites de demande d'effluents étaient directement liés à l'oued le plus proche (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

4.3.5.6. Schématisation du modèle conceptuel

De manière générale, pour calibrer le modèle on commence avec un schéma du système fluvial qui peut être placé sur un raster, puis nous saisissons les paramètres avec une série de boîtes de dialogue.

Ces paramètres concernent l'utilisation de l'eau, la perte et la réutilisation de l'eau, la gestion de la demande, les priorités,...etc. Cependant, on peut tout afficher dans les mêmes interfaces utilisateur dans les graphiques et les tableaux et sur le schéma du système fluvial.

Des scénarios décrivant différentes mesures de l'offre et de la demande orientent le système et sont liés aux différents résultats (Voinov, 2013)

Nous créons un schéma du modèle conceptuel des ressources en eau dans la zone d'étude qui est la wilaya de Constantine avec ses communes, en utilisant des SRTM, des rasters et des shapefiles (fichiers de formes) (GADM, 2009). Ces cartes rasters et fichiers de formes serviront à créer des cartes vecteurs (WEAP) afin de visualiser les éléments nécessaires tels que les agglomérations, les oueds, les aquifères, les retenues, les barrages, les industries, les zones agricoles et visualiser les limites administratives comme nous pouvons le montrer sur la figure 4.13 (SEI, 2008).

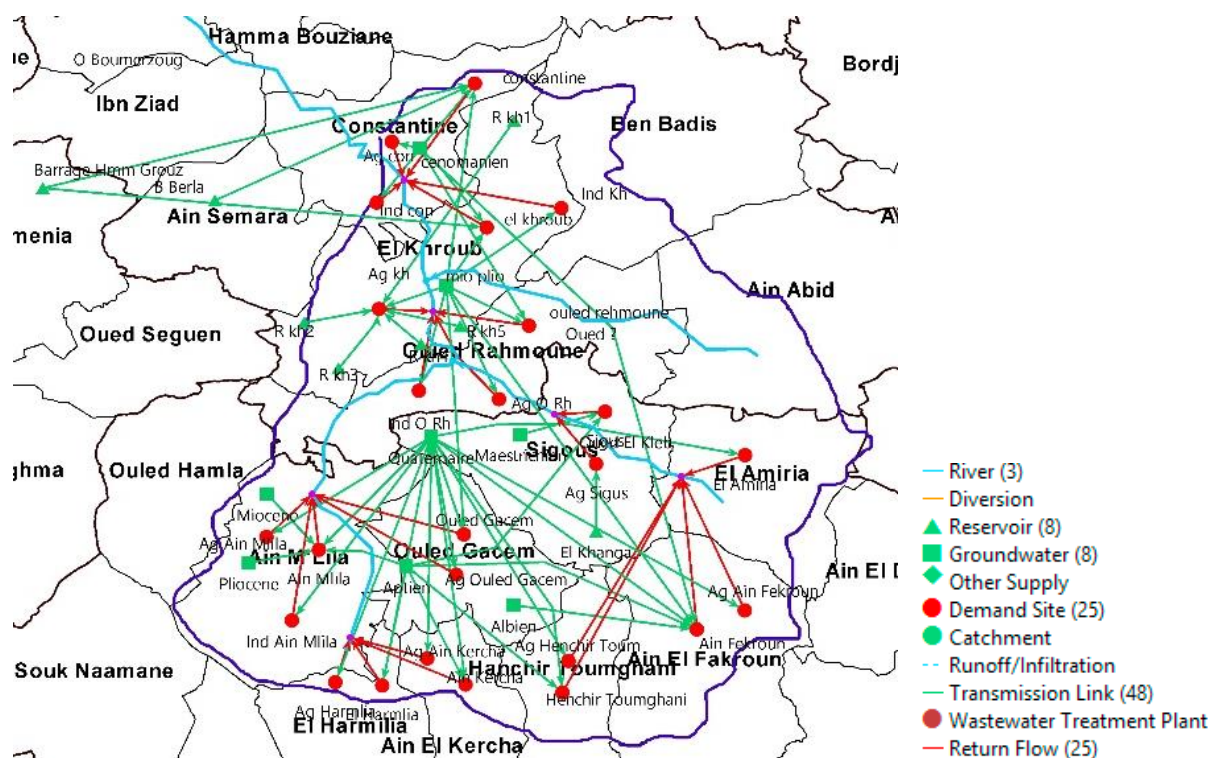


Figure.4.13. Schéma du modèle conceptuel de distribution des ressources en eau du bassin versant de Boumerzoug dans la GUI de WEAP (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

4.3.5.7. Modèle des comptes courants

Le modèle «Comptes courants», peut être considéré comme une étape d'étalonnage dans le développement d'une application, qui donne un aperçu de la demande réelle de l'eau, pour le système (Fig.4.14). Ensuite, un scénario de référence ou «business as usual» (BAU) est établi, à partir des comptes courants pour simuler la même évolution du système sans intervention. Cependant, des hypothèses clés peuvent être intégrées dans les comptes courants pour représenter les politiques, les facteurs qui affectent la demande (SEI, 2008).

La figure 4.14 présente la «demande en eau» pour les comptes courants de l'année 2007. Cependant, l'évolution de la «demande en eau» pour le scénario de référence 2008-2037 sans hypothèses présentée à la Fig.4.15.

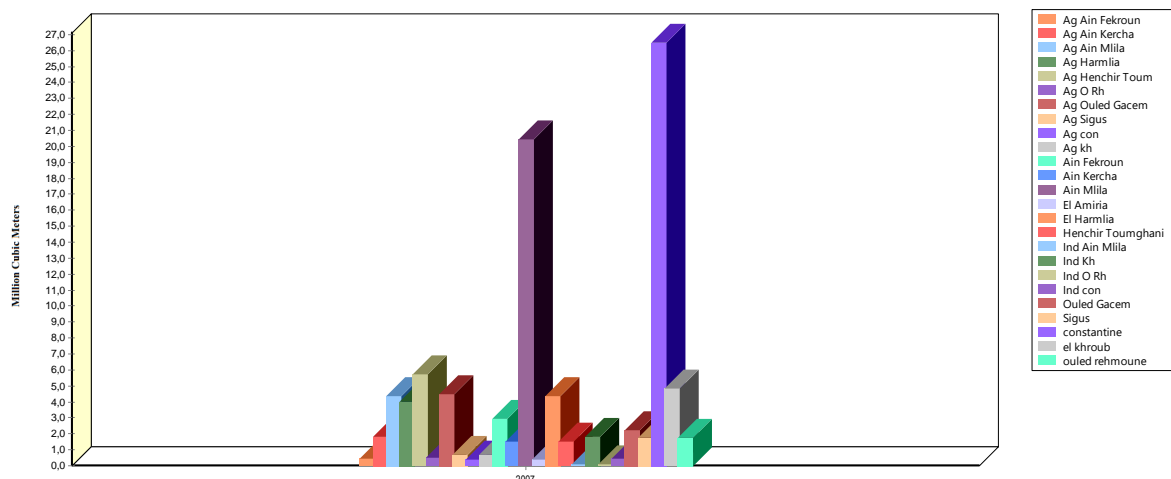


Fig.4.14. Demande en eau pour tous les sites (Année des comptes courants 2007) (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

4.3.5.7.1. Scénario de référence

Hypothèses clés de référence

Dans cette étape, il s'agit de présenter l'évolution de la «demande en eau» pour le scénario BAU. Après avoir cartographié le modèle, il est nécessaire d'avoir une année ou une période de référence pour servir de modèle. Nous rappelons que seulement l'année 2007 est prise comme année de référence (l'année des comptes courants), en raison de la carence actuelle des données. Ensuite, nous devons créer les hypothèses clés, qui sont des variables que l'utilisateur WEAP peut définir et servir de clés principales pour l'analyse. Cependant, nous avons identifié cinq hypothèses clés utilisées comme données de base du modèle (Kiniouar *et al.*, 2017.b) :

1. Croissance démographique avec un taux de croissance choisi de 1,99 % (moyenne de tous les coefficients de croissance des communes (ONS, 2008)) ;
2. Augmentation des terres irriguées avec un taux de croissance choisi de 2% ;
3. Diminution de la consommation d'eau potable de base avec un taux de diminution choisi de -2% ;
4. Diminution de la consommation de cultures irriguées élémentaires avec un taux de diminution sélectionné de -3% ;
5. Augmentation de la consommation d'eau industrielle de base avec un taux de croissance sélectionné de 2%.

Résultat de simulation du scénario BAU

La demande en eau totale dans le sous-bassin versant de Boumerzoug passera de 92,95 Mm³ en 2007 à 154,33 Mm³ en 2037 (Fig.4.15). Cependant, la demande en eau potable passera de 67,8 Mm³ en 2007 à 129,18 Mm³ en 2037.

Cependant, d'une part, une augmentation annuelle de la demande en eau potable pour toutes les communes, en particulier là où se trouvent les principales villes telles qu'El Khroub et Ain M'lila, qui ont des besoins en eau relativement élevés, pouvant atteindre respectivement 39,95 Mm³ et 41,52 Mm³ en 2037. En revanche, une diminution annuelle observée à la commune de Constantine avec une demande en eau de 21,42 Mm³ en 2037 (Fig.4.15) (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

L'augmentation relativement importante de la demande en eau dans les communes d'Ain M'lila et El Khroub est justifiée par la population relativement élevée et le taux de croissance démographique élevé, respectivement de 2,4% et 7,3%. Cependant, la diminution dans la commune de Constantine est la cause du taux de diminution de la population (-0,7%), en raison du phénomène de migration de la population vers les communes voisines (ANIREF, 2011) (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

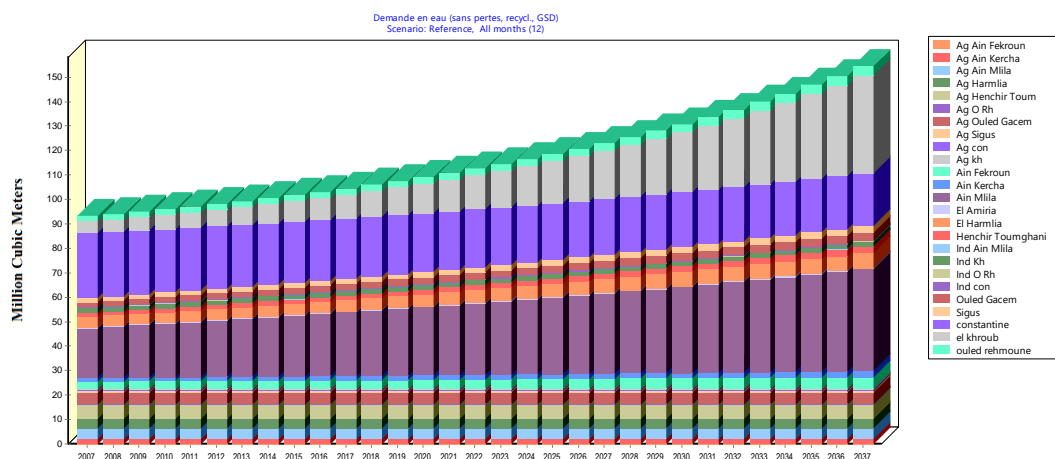


Fig.4.15. Toutes les demandes de sites de demande d'eau (Scénario de référence) (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

4.3.5.7.2. Scénarios “Et qu'est-ce qui se passerait si ? ”

Comme expliquer précédemment, le scénario type avec dans le WEAP comprend trois étapes : (1) Une année des comptes courants choisie comme année de référence du modèle ; (2) Un scénario de référence établi à partir des comptes courants et utilisé pour simuler l'évolution probable du système sans modifications et (3) Un ou plusieurs scénarii pour évaluer les effets des changements socio-économiques, des changements climatiques probables ... etc., pour l'année ou le projet futur (prévision).

Cependant, dans cette troisième étape, les scénarii “Et qu'est-ce qui se passerait si ? ” peuvent être construits sur les comptes courants et permettent d'explorer l'impact d'hypothèses ou de politiques alternatives sur la disponibilité et l'utilisation future de l'eau, les effets des changements politiques et/ou technologiques.

Hypothèses Clés des Scenarios “Et qu'est-ce qui se passerait si ? ”

Rappelons que l'année de référence est 2007 et le scénario de référence de 2008 à 2037 est calculé sur une période de 30 ans. Par la suite, cinq scénarios ont été élaborés pour la période 2008-2037, sur la base des cinq hypothèses clés (Kiniouar *et al.*, 2017.b) :

- Hypothèse clé du scénario 1 : croissance démographique (1,77% en 2010, 1,94% en 2015, 1,41% en 2025 et 1,10% en 2030) (MRE, 2010) ;
- Hypothèse clé du scénario 2 : augmentation des terres agricoles (5%) ;
- Hypothèse clé du scénario 3 : diminution de la consommation d'eau potable de base (-5%) ;
- Hypothèse clé du scénario 4 : diminution de la consommation d'eau d'irrigation de base (-5%) ;
- Hypothèse clé du scénario 5 : augmentation de la consommation d'eau industrielle de base (5%).

Résultat de simulation des cinq scénarios

4.3.5.7.2.1. Scénario 1 : Croissance démographique

En utilisant les taux de croissance démographique suivants (MRE, 2010) : 1,77% en 2010, 1,94% en 2015, 1,41% en 2025 et 1,10% en 2030, durant la période de simulation, la demande en eau totale dans le sous-bassin du Boumerzoug augmentera de 92,94 Mm³ en 2007 à 177,86 Mm³ en 2037. Cependant, la demande en eau potable est relativement élevée dans les communes de Constantine et celle d'Ain M'lila (Fig.4.16).

Dans la commune de Constantine, la demande en eau potable qui est relativement la plus élevée, passera de 26,45 Mm³ en 2007 à 59,58 Mm³ en 2037 et celle d'Ain M'lila passera de 20,38 Mm³ en 2007 à 45,91 Mm³ en 2037 (Fig.4.16) (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

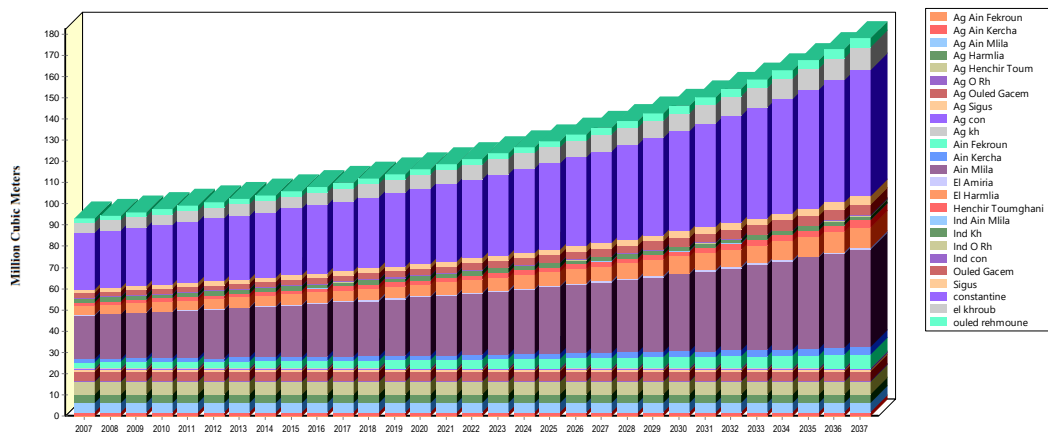


Figure.4.16. Scenariol : accroissement de la population (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

4.3.5.7.2.2. Scénario 2 : Augmentation de la superficie des terres irriguées

Avec un taux de croissance supposé de 5% des surfaces agricoles, comme conséquence probable de mise en place de nouvelles structures de mobilisation, la demande en eau totale dans le sous-bassin versant du Boumerzoug passera de 92,95 Mm³ en 2007 à 220,30 Mm³ en 2037 (Fig.4.17).

Cependant, la demande en eau agricole passera de 22,82 Mm³ en 2007 à 88,79 Mm³ en 2037 (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

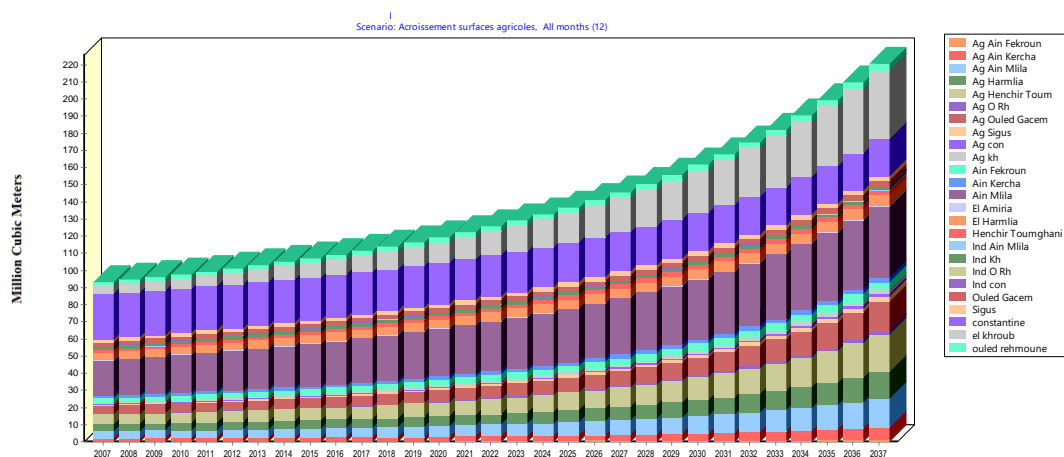


Figure.4.17. Scénario 2 : Augmentation de la superficie des terres irriguées (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

4.3.5.7.2.3. Scénario 3 : Diminution de la consommation de base d'eau potable

En posant la question “et qu'est-ce qui se passerait si nous avons une diminution de la consommation d'eau potable de -5% durant les années à venir, la demande en eau totale dans le sous-bassin versant de Boumerzoug passera de 92,95 Mm³ en 2007 à 55,91 Mm³ en 2037 (Fig.4.18). Cependant, la demande en eau potable passera de 67,8 Mm³ en 2007 à 30,76 Mm³ en 2037(Kiniouar *et al.*, 2017.b). Cette diminution est prévisible s'il y aura une politique d'éducation et de sensibilisation à l'utilisation rationnelle de l'eau et en luttant contre le gaspillage. En outre, le développement des technologies de l'eau en milieu urbain, la réduction des pertes et des fuites.

Cependant, la demande accrue en eau potable à la commune d'El Khroub est relativement importante, malgré la simulation avec un taux de réduction de -5% de la consommation justifiée par le taux de croissance de la population relativement élevé, qui est de 7,3%. Par contre, la demande en eau relativement élevée dans la commune de Constantine en 2007 diminue de manière relativement significative est justifié par taux de d'accroissement démographique négatif qui est de l'ordre de -0,7% (ONS, 2008). Ce dernier dû à la migration d'une grande partie de la population vers les communes voisines (ANIREF, 2011).

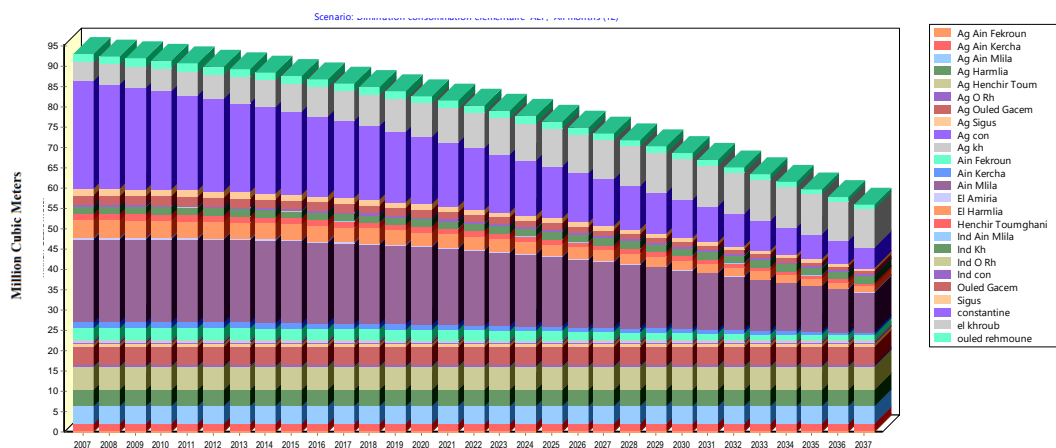


Figure.4.18. Scénario 3 : Diminution de la consommation d'eau potable élémentaire (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

4.3.5.7.2.4. Scénario 4 : Réduction de la consommation élémentaire en eau d'irrigation

En supposant qu'il y aura une diminution de -5% de la consommation de base de l'eau d'irrigation, suite à une politique rationnelle concrétisée par la formation des agriculteurs aux nouvelles techniques d'irrigation économique, et à la lutte contre le gaspillage. La demande totale en eau dans le sous-bassin versant de Bouverzoug passera de 92,95 Mm³ en 2007 à 137,07 Mm³ en 2037 (Fig. 4.19). Cependant, nous observons une réduction de la demande en eau d'irrigation de 22,82 Mm³ en 2007 à 2,57 Mm³ en 2037. Ainsi, nous avons une économie de 20 Mm³ en 30 ans (Fig.4.19) (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

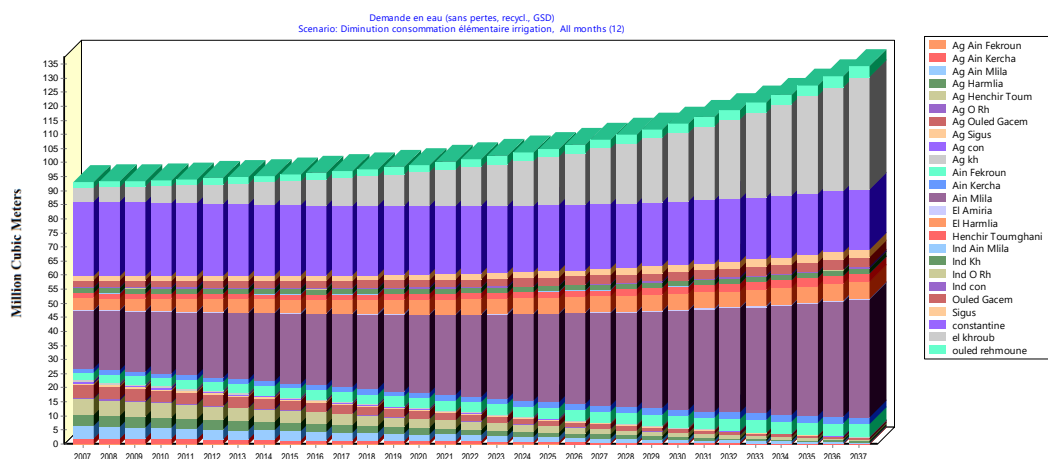


Figure.4.19. Scénario 4 : Réduction de la consommation d'eau d'irrigation élémentaire (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

4.3.5.7.2.5. Scénario 5 : Augmentation de la consommation d'eau pour l'industrie

Enfin, le taux de croissance socio-économique que connaît la région de Constantine, nous permet d'utiliser la question "Et qu'est-ce qui se passerait si ?" la consommation d'eau industrielle élémentaire de 5% durant les 30 années à venir.

Les résultats de simulation montrent que la demande en eau totale dans le sous-bassin du Boumerzoug passera de 92,95 Mm³ en 2007 à 161,05 Mm³ en 2037 (Fig.4.20). Cependant, nous observons une augmentation de la demande en eau pour l'industrie de 2,33 Mm³ en 2007 à 9,05 Mm³ en 2037 (Fig.4.20). Principalement, El Khroub allait de 1,81 Mm³ en 2007 à 7,03 Mm³ en 2037 (Fig.4.20) (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

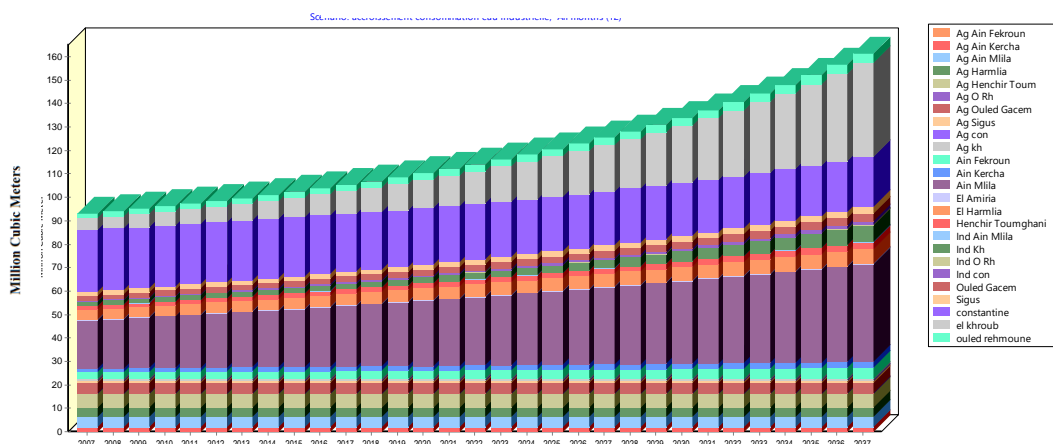


Figure.4.20. Scénario 5 : Augmentation de la consommation d'eau pour l'industrie (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

3.5.8. Discussion

Le modèle développé dans cette étude est paramétré au niveau le plus bas. Tout en rassemblant les communes du sous bassin du Boumerzoug qui est le sous-bassin supérieur du bassin méditerranéen de Kébir-Rhumel.

Pour cela, la demande en eau pour le scénario de référence a été paramétrée avec cinq hypothèses clés utilisées comme données de base :

- Taux de croissance de la population de 1,99% (moyenne de tous les coefficients de croissance démographique des communes) ;
- Augmentation du taux de croissance des terres irriguées de 2% ;
- Diminution de la consommation d'eau potable de base de -2% ;
- Diminution de la consommation élémentaire des eaux d'irrigation de -3% ;
- Augmentation de la consommation de base des eaux industrielles de 2%.

La demande totale en eau dans le sous-bassin versant de Boumerzoug passera de 92,95 Mm³ en 2007 à 154,33 Mm³ en 2037 dans le cas du scénario de référence. Cependant, la demande en eau potable passera de 67,8 Mm³ en 2007 à 129,18 Mm³ en 2037, justifiée par la croissance démographique (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

D'une part, nous observons une augmentation annuelle de la demande en eau potable pour toutes les communes, en particulier là où se trouvent les principales villes comme El Khroub et Ain M'lila, qui ont des besoins en eau relativement élevés pouvant atteindre 39,95 Mm³ et 41,52 Mm³ respectivement en 2037. D'autre part, une diminution annuelle observée à la commune de Constantine avec une demande en eau de 21,42 Mm³ en 2037. L'augmentation relativement importante de la demande en eau potable dans les communes d'Ain M'lila et d'El Khroub est justifiée par la population relativement élevée de 88441 et 179033 habitants (ONS, 2008) avec un taux de croissance démographique de 2,4% et 7,3% respectivement. Cependant, la diminution dans la commune de Constantine est la cause du taux négatif de croissance démographique égale à -0,7%, en raison du phénomène de migration de la population vers les communes voisines (ANIREF, 2011) (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

En ce qui concerne le scénario "Et qu'est-ce qui se passerait si ?" la diminution de la consommation d'eau potable est de l'ordre de -5% sur la période de simulation. La demande en eau dans la commune de Constantine diminue au lieu d'augmenter. La cause est l'importante migration de la population vers les communes voisines (ANIREF, 2011) (Kiniouar *et al.*, 2017.b). Pour rappel, la diminution est supposée due à l'éducation et la sensibilisation des individus, à l'utilisation rationnelle de l'eau. En outre, le développement des technologies de l'eau en milieu urbain, la réduction des pertes et des fuites.

Par contre, la forte demande est toujours croissante à la commune d'El Khroub, malgré la simulation avec un taux négatif de la consommation qui est de -5%. Car, le taux de croissance démographique réel est relativement élevé, avec 7,3% (ONS, 2008) (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

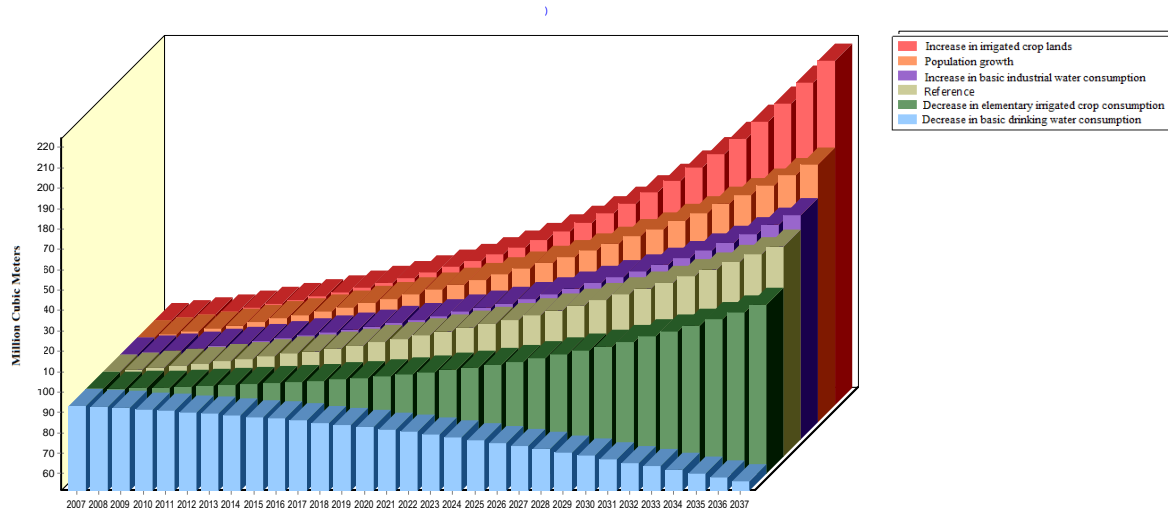


Figure.4.21. Représentation des cinq scénarii (2008-2037) (Kiniouar *et al.*, 2017.b)

4.4. CONCLUSION

Dans le sous bassin du Boumerzoug avec une superficie de 1832 Km² et une population de 940810 habitants (2008), les besoins en eau sont estimés à près de 63,67 millions de m³ par an.

En matière d'approvisionnement en eau potable, les dotations en eau présentées par habitant dans le sous bassin de Boumerzoug sont globalement bien supérieures à la moyenne nationale (150 l/j/hab), elles seraient en moyenne de l'ordre de 159,38 l/j/hab, mais elles sont très inégales dans quelques régions, où dans le centre et l'Ouest du sous bassin, les dotations dépassent les 200 l/j/hab.

Cependant, le volume réellement produit pour couvrir ces besoins en eau domestiques est de l'ordre de 41,28 Millions de m³ par an, soit un taux de satisfaction de près de 78 %. Les besoins en eau d'irrigation dans le sous bassin de Boumerzoug sont toujours vers l'augmentation avec l'accroissement des surfaces agricoles. Le tissu industriel est concentré

surtout dans les grandes villes où se trouve le grand consommateur d'eau industrielle, dont les besoins des grandes zones industrielles sont de plus 178178,4 m³ par an.

Pour une gestion rationnelle des ressources en eau, le cas de scénario avec réduction de la consommation d'eau potable de 5% permettra d'économiser environ 37 Mm³ en 30 ans (2007-2037). Ce scénario représente le scénario le plus intéressant pouvant réduire la consommation d'eau (et la demande en eau) sachant que l'eau potable est le secteur qui consomme le plus d'eau dans la zone d'étude. Au contraire, dans le cas du scénario 2 (croissance des surfaces agricoles), la demande en eau dans le sous-bassin versant augmentera d'environ 127 Mm³ en 2037 et représente donc le mauvais scénario.

Dans les études futures, nous devrions estimer les critères de performance pour tester la performance du modèle et développer un modèle qui puisse prendre en compte l'aspect hydrologique dans différentes conditions climatiques, en plus de l'aspect de la gestion de l'eau.

Cependant, dans ce bassin très pauvre en données, cette étude présente simplement l'utilisation intéressante du modèle WEAP en tant que DSS avec son interface graphique conviviale et sa capacité à traiter de nombreux problèmes d'eau (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La vallée du Rhumel au sens strict possède des caractéristiques naturelles dans lesquelles les caractéristiques géologiques révèlent que les massifs du constantinois appartiennent aux domaines externes de la chaîne des Maghrébides. Les grands traits stratigraphiques des séries néritiques s'agit essentiellement de formations calcaires Jurassico-crétacé et une couverture marno-calcaire d'âge Sénonien supérieur à Eocène avec la présence de lacunes de sédimentation.

La vallée du Rhummel est caractérisée par un climat semi-aride, avec des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 537,17 mm et des températures moyennes annuelles de l'ordre 15,42 de °C. L'évapotranspiration réelle est de 308,23 mm évaluée par la méthode de Thornthwaite représente de 57,38% des précipitations.

Cependant, les caractéristiques hydrogéologiques sont décrites d'après le MRE (2010) que les principaux systèmes aquifères dans la vallée du Rhumel au sens stricte et en allant depuis l'aval vers l'amont : Aquifère d'Oued Rhummel et l'aquifère de la région de Constantine.

Lors de la planification, de la gestion et du processus de prise de décision, il est utile de connaître les conséquences des décisions à prendre (Georgakakos & Martin, 1996). Les systèmes d'aide à la décision « SAD », ou en anglais Decision Support Systems « DSS », sont des modèles mathématiques et computationnels interactifs qui représentent le système naturel dont l'objectif est de quantifier, d'évaluer et de comparer les avantages et l'aggravation de différentes politiques de gestion de l'eau (Labadie & Sullivan, 1986).

Dans le cadre de notre étude, le WEAP (Water Evaluation And Planning System) a été sélectionné sur d'autres modèles de ressources en eau car il s'agit d'un outil logiciel convivial, bien documenté, avec de belles interfaces graphiques (GUI), et se concentre sur la gestion des ressources en eau et le bilan hydrologique. WEAP se distingue par son approche intégrée de la simulation des systèmes d'eau et par son orientation politique. Fonctionnant sur ces principes de base, WEAP est applicable à plusieurs échelles ; systèmes municipaux et agricoles, bassins versants uniques ou systèmes fluviaux transfrontaliers complexes.

Le modèle est construit grâce aux données des ressources et des demandes en eau de l'ABH-CSM de 2007. Le calibrage du modèle, le choix des hypothèses clés de référence et le choix des hypothèses de chacun des 5 scénarios simulés a été réalisé afin d'aboutir au choix du meilleur scénario alternatif de gestion de l'eau de la wilaya de Constantine sur une période de 20 années (2008-2027). Ce modèle a permis de constater que ces quatre scénarios ne sont pas si efficaces pour une gestion rationnelle des ressources d'eau. Sauf le scénario 3 (5% de réduction de la consommation d'eau potable) qui réduit la demande en eau potable d'environ 12 Mm³ en 20 ans (2008-2027), car il représente le scénario le plus intéressant pouvant réduire la consommation d'eau (et la demande en eau) de la wilaya de Constantine. Sachant que l'eau potable est le secteur le plus consommateur d'eau.

Cependant, les limites des potentialités d'eau estimées à 76 Mm³ de la wilaya de Constantine (ABH CSM, 2007), seront atteintes en :

- 2028 dans le cas du scénario de référence (scénario tendanciel) ;
- 2026 dans le cas du scénario 5 (augmentation de 5% de la consommation d'eau industrielle de base) ;
- 2026 dans le cas du scénario 2 (taux de croissance de 5% dans les surfaces agricoles) ;
- 2030 dans le cas du scénario 4 (taux de réduction de 5% de la consommation d'eau d'irrigation de base) ;
- 2034 dans le cas du scénario 1 (un taux de croissance démographique de 1,3%) ;

Cette modélisation ne prend pas en compte les ressources des sous bassin et des capacités de chacun puisque les limites de la wilaya de Constantine chevauchent trois sous bassin : le Boumerzoug, le Kébir amont et le Kébir Smendou. C'est-à-dire qu'il y a possibilité de faire pression sur un ou plusieurs des sous bassin cité précédemment et par conséquent cette gestion ou modélisation ne prend pas en considération les limites des sous-bassins versants et hydrogéologiques et semble en contradiction avec les principes de la GIRE. Et ce qui est abordé dans le chapitre suivant en appliquant la modélisation sur le plus haut des sous bassin versant du Kébir Rhumel qui est le Boumerzoug.

La seconde partie opérationnelle, c'est à dire le deuxième cas d'étude du sous bassin du Boumerzoug, un deuxième modèle a été construit grâce aux mêmes données suscitées. Cependant, le calibrage du modèle, le choix des hypothèses clés de référence et le choix des

hypothèses de chacun des 5 scénarios simulés a été réalisé afin d'aboutir au choix du meilleur scénario alternatif de gestion de l'eau sur une période de 30 années (2008-2037).

Les résultats ont montré que le cas de scénario 3 avec réduction de la consommation d'eau potable à un taux de 5% permettra d'économiser environ 37 Mm³ en 30 ans (2007-2037).

Ce scénario représente le scénario le plus intéressant pouvant réduire la consommation d'eau (et la demande en eau) sachant que l'eau potable est le secteur le plus consommateur d'eau dans la zone d'étude. Au contraire, dans le cas du scénario avec le taux de croissance des surfaces agricoles, la demande en eau dans le sous-bassin versant augmentera d'environ 127 Mm³ en 2037 et représente le scénario le plus défavorable.

Notons aussi que ces modèles nécessitent la validation mais que nous n'avons pas pu réaliser, en raison de l'absence de données sur une longue période (mensuelles ou annuelles). Et cette simulation peut être utilisée à titre indicatif.

Dans les études futures, nous devrions estimer les critères de performance pour tester la performance du modèle et développer un modèle qui puisse prendre en compte l'aspect hydrologique dans différentes conditions climatiques, en plus de l'aspect de la gestion de l'eau (Kiniouar *et al.*, 2017.b).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abrishamchi, A., Alizadeh, A. & Tajrishy, M., (2007). "Water resources management scenario analysis in the Karkheh river basin, Iran using the WEAP model," *Hydrol. Sci. Technol.* 23(1-4) :1-12
- Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière (ANIREF), (2011). "Monographie de la wilaya de Constantine," Rapport de l'Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière
- Agence du bassin hydrographique Constantinois- Seybousse- Mellegue., (2004). Cahiers de l'A.B.H.- C.S.M. n°08.
- Agence du Bassin Hydrographique - Constantinois- Seybousse- Mellegue, 2007. "Collecte et actualisation des bases de données sur l'eau et du fonds documentaire," bassin du Kébir-Rhumel, mission I et II. Rapport provisoire.
- Agence du Bassin Hydrographique - Constantinois- Seybousse- Mellegue, (2009). "Qualité des eaux souterraines dans les bassins du Kébir-Rhumel, de la Seybousse et de la Medjerda-Mellegue 2004-2007," Les Cahiers de l'Agence. p13.
- Alemayehu, T., McCartney, M. & Kebede, S., (2010). "The water resource implications of planned development in the Lake Tana catchment, Ethiopia," *Ecohydrology & Hydrobiology*, Vol. 10 No. 2-4, 211-222
- Ali, M. F., Saadon, A., Abd Rahman & N. F. Khalid, K., (2014). "An Assessment of Water Demand in Malaysia Using Water Evaluation and Planning System," *Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference 2013*.
- Al-Omari, A., Al-Quraan, S., Al-Salihi, A. & Abdulla, F., (2010). "A Water Management Support System for Amman Zarqa Basin in Jordan," *Water Resour Manage* (2010) 24:3591-3613
- Amato, C., McKinney, D.C., Ingol-Blanco, E. & Teasley, R.L., (2006). "WEAP Hydrology Model Applied : The Rio Conchos Basin," CRWR Online Report 06-12, Rio Grande Project, Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin.
- Andreu, J., Capilla, J. & Snachis, E., (1996). "AQUATOOL, a generalized decision support system for water-resources planning and operational management," *Journal of Hydrology*, Vol.177, 269-291 pp.
- Aris, Y., (1994). "Etude tectonique et micro tectonique des séries jurassique à plio-quadernaire du Constantinois central (Algérie nord-orientale) caractérisation des différentes phases de déformations," Doctorat d'université Nancy I, 215p.
- Assaf, H., van Beek, E., Borden, C., Gijssbers, P., Jolma, A., Kaden, S., Kaltofen M., Labadie, J.W., Loucks, D.P., Quinn, N.W.T., Sieber, J., Sulis, A., Werik, W.J. & Wood, D.M., (2008). "Generic simulation models for facilitating stakeholder involvement in water resources planning and management. A comparison, evaluation, and identification of future needs," In: *Environmental Modelling, Software and Decision Support (3): The State of the Art and New Perspective*, Jakeman, Voinov, Rizzoli & Chen (Ed.), 229-246, Elsevier
- American Water Resources Association (AWRA), (2012). "Case Studies in Integrated Water Resources Management: From Local Stewardship to National Vision," American

- Water Resources Association Policy Committee, Middleburg, VA.
- Baran, E. & Coates, D., (2000). "Hydro-biological models for water management in the Mekong River" Hydrologic and Environmental Modeling in the Mekong Basin. pp 328-334.
- Belhai, D. & Bougdal, R., (2004). "Le glissement de Constantine," Etudes géologique et géotechnique.
- Benabbas, C., (2006). "Evolution mio-plio-Quaternaire des bassins continentaux de l'Algérie nord orientale : Apport de la Photogéologie et Analyse Morpho-structurale," Thèse. Docte. Etat. Université. Mentouri. Constantine. 256 p
- Berkelaar, M. Eikland, K., Notebaert, P. (2004). Ip_solve, a Mixed-Integer Linear Programming system. V. 4.0.1.11. GNU LPL.
- Beven, K. (2002). Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modeling system." Hydrologic Processes 16: 189-206.
- Boularak, M., (2003). "Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin du Boumerzoug. Vulnérabilité des eaux souterraines et impact de pollution sur la région d'El Khroub," Thèse magister en hydrogéologie. Université de Mentouri – Constantine. 157p.
- Bouterraa, W., (2007). "Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de Boumerzoug (Kébir -Rhumel) perspectives et développement durable," Mémoire de Magister, université Badji Mokhtar de Annaba, 168 p.
- Brandes Company, R.J., (2004). "Water Availability Modeling for the Río Grande Basin : Water Availability Assessment," Final Report." Texas Commission on Environmental Quality, Austin, TX.
- Brundtland, G., Khalid, M., Agnelli, S., Al-Athel, S., Chidzero, B., Fadika, L., Hauff, V., Lang, I., Shijun, M., Morino de Botero, M., Singh, M., Okita S., & Others, (1987). "Our Common Future" ('Brundtland report'). Oxford Paperback Reference. Oxford University Press, USA.
- Burness, S., Chermak, J., Brookshire D. (2004). Water management in a mountain front recharge aquifer. Water Resources Research 40: 2160.
- Burton, J., (2003). "Integrated water resources management on a basin level : a training manual. UNESCO. ISBN : 9292200038, 9789292200039, 240 pages.
- Cai, X., Wallington, K., Shafiee-Jood, M. & Marston, L., (2018). "Understanding and managing the food-energy-water nexus – opportunities for water resources Research. Advances in Water Resources. Elsevier
- Cain, J.R., Dugger, A., Fullerton, D., Purkey, D.R., Sunding, D., & Thomas, G.A., (1998). "An Environmentally Optimal Alternative for the Bay-Delta: A Response to the CALFED Program ". Report of the Natural Heritage Institute.
- Cetinkaya, C.P., Fistikoglu, O., Fedra, K. & Harmancioglu, N.B., (2008). "Optimization methods applied for sustainable management of water-scarce basins," Journal of Hydroinformatics. 10, 69-95.
- Coiffait, P.E., (1992). "Un bassin post-nappes dans son cadre structural: l'exemple du bassin de Constantine (Algérie nord Orientale)," Thèse Ès Sciences, Université H. Poincaré, Nancy I, France, 502 p.
- Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V., Dezetter, A. & Servat E., (2013). "Integrated modelling to assess long-term water supply capacity of a meso-scale Mediterranean

- catchment,” *Science of the Total Environment*. 461–462: 528–540.
- Commission on Sustainable Development (CSD) survey on the status of IWRM planning. GWP presented its findings at the CSD-16 meeting in May 2008.
- Conférence de haut niveau sur l’eau pour l’agriculture et l’énergie en Afrique: “les défis du changement climatique,” Sirte, Jamahiriya arabe libyenne, 15-17 décembre 2008; Rapport d’investissement par pays.
- Cosgrove, W.J. & Rijsberman, F., (2000). “World Water Vision, Making Water Everybody's Business,” World Water Council, Earthscan, 108 p.
- CN & GWP., (2005) “Plans de gestion intégrée des ressources en eau,” Training Manual and Operational Guide. Cap-Net and Global Water Partnership.
- Dagorne, A., (2005) “Eau profane, eau profanée, eau sacrée. Spiritualité et développement durable,” Université de la Mer Symposium.
- Danner, C.L., McKinney, D.C., Teasley, R.L., & Sandoval-Solis, S., (2006). “Documentation and Testing of the WEAP Model for the Rio Grande/Bravo Basin,” CRWR Online Report 06-08. University of Texas at Austin. Updated February 2008
- De Condappa, D., Chaponniere, A., & Lemoalle, J., (2009). “A Decision-Support Tool for Water Allocation in the Volta Basin,” *Water International*, 34 (2009), pp. 7187, doi: 10.1080/02508060802677861.
- Delft Hydraulics, (2004). “RIBASIM: River basin simulation program operating manual and description,” Netherlands, Delft,
- Derouiche, A., (2008). “Contribution de la géophysique et de la photo-interprétation à l’étude de l’instabilité de terrains dans la région de Constantine,” Magistère en géologie. Université Mentouri de Constantine
- DHI – Danish Hydraulic Institute, (1997). “MIKE-Basin: operating manual and description,” Denmark, Hørsholm.
- DHW, (2012). “Annuaire hydrique de la Wilaya de Constantine,”
- Dimovaa, G., Tzanova, E., Ninovb, P., Ribarova, I. & Kossidac, M., (2014). “Complementary use of the WEAP model to underpin the development of SEEAW physical water use and supply tables,” *Procedia Engineering* 70 (2014) 563 – 572
- Draper, A. J., Munevar, A., Arora, S. K., Reyes, E., Parker, N.L., Chung, F. I. & Peterson, L. E. (2004). “CalSim: Generalized model for reservoir system analysis,” *Journal of Water Resources Planning and Management*. 130(6), 480-489.
- Droubi, A., Al-Sibai, M., Abdallah, A., Zahra, S., Obeissi, M., Wolfer, J., Huber, M., Hennings, V. & Schelkes, K., (2008). “A Decision Support System (DSS) for Water Resources Management, – Design and Results from a Pilot Study in Syria,” *Environmental Science and Engineering*. pp 199-225.
- Dufournaud, C., (1982). “On the mutually beneficial cooperative scheme: Dynamic change in the payoff Matrix of international river basin schemes.” *Water Resources Research*, 18(4), 764-772
- Durand-Delga M., (1955). “Etude géologique de l’Ouest de la chaîne numidique,” Thèse Paris. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 2ème Série, stratigr. , descriptions régionales, N°24, 533 p. Alger.
- Durand-Delga M., (1969). “Mise au point sur la structure de Nord-est de la Berbérie,” Bull. Serv. Géol. Algérie

- Durozoy, G.A.L., (1960). "Étude géologique de la région de Châteaudun du Rhumel, Algérie," Fac. Sci. Univ. Alger, Année 1958 N° 2. Service de la Carte géologique de l'Algérie
- Eckhardt, K. Ulbrich, U. (2003). "Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range." *Journal of Hydrology* 284, No. 1-4: 244-52.
- EPSMO – BOKAVANGO, (2009). "Environmental Protection and Sustainable Management of the Okavango River Basin – Biodiversity in the Okavango Delta," E-flows Team. Hydrology report: Data and Models." Report 05-2009. EPSMO/BOKAVANGO Okavango Basin Environmental Flow Assessment Project, OKACOM, Maun, Botswana.
- Fowler, M.R., Cook, S.C. & Lumbers, J.P., (1999). "Practical experience in the successful implementation of optimisation systems for water supply management," *Computing and Control for the Water Industry*, Tynemarch Ltd., Exeter, UK, 1999.
- GADM, (2009) "Geographic database of global administrative areas," Version 1.0. 2009.
- Gastelum, J.R., Valdes, J.B. & Stewart, S., (2009). "A decision support system to improve water resources management in the Conchos Basin," *Water Resources Manage*, 23:1519-1548.
- Georgakakos, A. P., & Martin, Q. W., Editors, (1996) "An International Review of Decision Support Systems in River Basin Operation," in *Proceedings of the Fifth Water Resources Operations Management Workshop-* (sponsored by American Society of Civil Engineers, Arlington, VA, 347p.
- Georgakakos, A.P, (2007). "Decision Support Systems for Integrated Water Resources Management with an Application to the Nile Basin," in *Topics on System Analysis and Integrated Water Resources Management* by Castelletti, A. & Soncini-Sessa, R. Elsevier
- Gilmore, A., Magee, T., Fulp, T., & Strzepek, K., (2000). "Multiobjective Optimization of the Colorado River," *Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management*, ASCE New York, NY.
- Giupponi, C., Mysiak, J. & Crimi, J., (2006). "Participatory Approach in Decision Making Processes for Water Resources Management in the Mediterranean Basin," *Climate Change and Sustainable Development*.
- Global Water Partnership, (2000). "Towards Water Security: A Framework for Action," *Global Water Partnership: Stockholm, Sweden*
- Gomez, J.F., Mejia, R. & Gutierrez, A., (2005). "Estudio de modelos distribuidos para la simulación del escurrimiento en cuencas. Aplicación a la Cuenca Del Rio Conchos, afluente Del Rio Bravo: Informe Final," *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua. Proyecto SEMARNAT-2002-C01-0569.A3*
- Grillot, J.C., Blavoux, B., Rakotondrainibe, J.H., Raunet, M. & Randrianarisoa, N., (1987) "A propos des aquifères d'altérites sur les hauts plateaux cristallophylliens de Madagascar," *C. R. Acad. Sci., Paris* 305, série II, 1471-1476.
- Hadded, R., Nouiri, I., Alshihabi, O., Maßmann, J., Huber, M., Laghouane, A., Yahiaoui, H. & Tarhouni, J., (2013). "A Decision Support System to Manage the Groundwater of the Zeuss Koutine Aquifer Using the WEAP-MODFLOW," *Framework. Arab J*

- Geosci (2013) 6:2225–2236
- Hall, J. & Murphy, C., (2010). "Vulnerability Analysis of Future Public Water Supply Under Changing Climate Conditions: A Study of the Moy Catchment, Western Ireland," *Water Resources Management*, Volume 24, Number 13, 3527-3545
- Hamlat, A., Errih, M. & Guidoum, A., (2012). "Simulation of water resources management scenarios in western Algeria watersheds using WEAP model," *Arab J. Geosci.* DOI 10.1007/s12517-012-0539-0
- Hamlet *et al.*, (1996). "Basic STELLA II: user's manual for the ACT-ACF shared vision models," Mobil District, Mobil, Al., USACE.
- Harris, S., 2007. "Beyond Building Models: Using WEAP to inform climate change adaptation policy in Guatemala," Paper submitted in partial fulfillment of the course requirements for the Master of Public Policy degree. Goldman School of Public Policy University of California, Berkeley
- Harma, K.J., Johnson, M.S. & Cohen, S.J., (2013). "Future Water Supply and Demand in the Okanagan Basin, British Columbia: A Scenario-Based Analysis of Multiple, Interacting Stressors," *Water Resour. Manage.* (2013) 27:1981–2000
- Hassani, I., (2009). "Processus de métropolisation et étalement urbain, quelles conséquences sur la ville de Constantine," *Sci & Tech*, No 29, 79-86.
- Hassing, J., Ipsen, N., Clausen, T.J., Larsen, H. & Lindgaard-Jørgensen, P., (2009). "Integrated water resources management in action," *The United Nations world water assessment program dialogue paper*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Hefny, M., (2006), "Actualizing water ethics in the regional context of the arab world," In: Dura G., Kambourova V., Simeonova F. (eds) *Management of Intentional and Accidental Water Pollution*. NATO Security through Science Series. Springer, Dordrecht
- Hellegers, P., Immerzeel, W. & Droogers, P., (2013). "Economic concepts to address future water supply–demand imbalances in Iran, Morocco and Saudi Arabia," *Journal of Hydrology*. 502, 62-67.
- Hoff, H., Bonzi, C., Joyce, B. & Tielbörger, K., (2011). "A Water Resource Planning Tool for the Jordan River Basin," *Water*. 3, 718-736.
- Höllermann, B., Giertz, S. & Diekkrüger, B., (2010). "Benin 2025—Balancing Future Water Availability and Demand Using the WEAP 'Water Evaluation and Planning' System," *Water Resour Manage.* 24: 3939–3959.
- Howard, K.W.F., (2011). "Implications of climate change on water security in the Mediterranean region," In: Baba, A., et al. (eds.) (2011). *Climate Change and its Effects on Water Resources*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security 3, 9-16.
- Jalala, S., (2005). "Characterizing the multi-criteria parameters of integrated water management model in the semi-arid Mediterranean region: application to Gaza Strip as a case study," PhD Univ. Sciences and Technology of Lille (France), 2005, 1-244
- Jeffrey, P., (2006). "The human dimensions of IWRM: interfaces between knowledge and ambitions," In: Hlavinek P, Kukharchyk T, Marsalek J, Mahrikova I (Eds) *Integrated urban water resources management—NATO security through science series*. Springer,

- Dordrecht, pp 11–18
- Johnson, W.V., (1994). “Accounting for Water Supply and Demand: An Application of Computer Program WEAP to the Upper Chattahoochee River Basin, Georgia,” Training Document No. 34, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers
- Johnson, W., Williams, Q. & Kirshen, P., (1995). “WEAP : A Comprehensive and Integrated Model of Supply And Demand,” in Proceedings of the Georgia Water Resources Conference-1995, edited by Katherine J. Hatcher (Vison Institute of Government, The University of Georgia, Athens, GA, pp. 291–293.
- Jones, J.A.A. & Van der Walt, I.J. (2004). “Challenges for water sustainability in Africa,” *GeoJournal*. 61. 105-109. 10.1007/s10708-004-2860-y.
- Joyce, B. A., Mehta, V. K., Purkey, D. R., Dale, L. L. & Hanemann, M., (2009). “Modifying agricultural water management to adapt to climate change in California’s Central Valley,” *Water Resour. Manage.* 23:3165–3189.
- Kennedy, K., Simonovic, S., Guibert, A.T., Doria, M.D.F. & Martin, J.L., (2009). “IWRM Implementation in Basins, Sub-Basins and Aquifers: State of the Art Review,” by for UNESCO-IHP.
- Kerdoun, A., (1998). “Enjeux et défis de l’environnement au Maghreb: quelle politique de protection?” In *Annuaire de l’Afrique du Nord*, 1996, édition 1998, 15 p
- Khan, S., Sonoda, T., Okamine, N., MLIT; Hiroki, K., Okazumi, T., Moriyasu, K., Okada, T., JWA; Ota, S., Yoshioka, T., Ochii, Y., Takano, K., CTI Engineering; Toyama, M., Fujiwara, N., Yoneyama, K. & Sagara, J. (2009). “IWRM guidelines at river basin level, part 1: principles,” 2009 - unesdoc.
- Kherraz, K., (1994). “Situation du secteur hydraulique. Constat et Perspectives,” Colloque Journées sur l’eau.3-4 mai 1994. Constantine.
- Kim, S., Kim, B. K., Jun, H., & Kim, H. S., (2014). “Assessment of future water resources and water scarcity considering the factors of climate change and social–environmental change in Han River basin, Korea,” *Stockholm Environ. Res. Risk Assess.* Vol 28, Issue 8, pp 1999–2014.
- Kiniouar, H., Hani, A. & Younsi, A. (2017.a) “Assessing long-term water demand of Constantine province in Kébir–Rhumel Mediterranean catchment,” *AIP Conference Proceedings*, vol 1814, No. 1
- Kiniouar, H., Hani, A. & Kapelan, Z. (2017.b) “Water Demand Assessment of the Upper Semi-arid Sub-catchment of a Mediterranean Basin,” *Energy Procedia* 119 (2017) 870–882
- Koudstaal, R., Rijsberman, F.R., & Savenije, H., (1991). “Water and Sustainable Development,” *International Conference on Water and the Environment (ICWE)*. In: *Keynote Papers by ICWE Secretariat, c/o World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.*
- Kuczera, G., (1992). “Water-Supply Headworks Simulation Using Network Linear-Programming,” *Advances in Engineering Software*. 14 (1), 55-60.
- Labadie, J. W. & Baldo, M. L., (2000). “MODSIM: Decision Support System for River Basin Management: Documentation and User Manual,” Dept. of Civil Engr., Colo. State Univ., Ft. Collins, Colo.

- Labadie, J. W. & Sullivan, C. H., (1986). "Computerized Decision Support Systems for Water Managers," *J. Water Resour. Plan. And Manag. ASCE*. Vol. 112, No. 3 : pp. 299-307.
- Leikine, M., (1971). "Etude géologique des Babors occidentaux (Algérie)," Thèse en Sciences naturelles. Université Pierre et Marie Curie (Paris), 536 p.
- Leikine, M., Obert, D. & Bellier, J.P, (1975). "Intégration des Babors aux nappes telliennes, existence d'un métamorphisme ante-nappe," *Bulletin de la Société Géologique de France*, vS7-XVII n5 (197512): 764-772
- Lévite, H., Sally, H. & Cour, J., (2003). "Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model," *Physics and Chemistry of the Earth*. 28: 779–786.
- Li, X., Zhao, Y., Shi, C., Sha, J., Wang, Z. L. & Wang, Y., (2015). "Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China," *Ocean and Coastal Management*. 106: 97-109.
- Loon, A.V., Lasage, R., Mathijssen, H. & Droogers, P., (2007). "Water Management Support Methodologies: State of the Art," *WatManSup Research Report No 1. FutureWater*.
- Loucks, D.P., (1992). "Water resource systems models: Their role in planning," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(3), 214-223
- Loucks, D.P. & da Costa, J.R., (1990). "Proceeding of the NATO Advanced Research Workshop on Computer-Aided Support Systems for Water Resources, Research and Management," September 24-28, Ericeira, Portugal. 407-428; 1991. In the series analytic: Decision support systems: Water resources planning / edited by D.P
- Loucks, D., Stedinger, J. Haith, D. (1981). *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc.
- Loucks, D. P. & Van Beek, E., (2005). "Water Resource Systems Planning and Management: Methods, Models and Applications", UNESCO Press, Paris, Book
- Maass, A., Hufschmidt, M., Dorfman, R., Thomas, H., Marglin, S. & Fair, G., (1962). "Design of Water-Resources Systems," Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Marmi, R., CHADI M., INES M., (2001). "Synthèse stratigraphique du Constantinois," Communication au 1er Séminaire sur la Géologie du Grand Constantinois 06-07 Novembre, Constantine. In Benabbas, C., (2006). "Evolution mio-plio-quadernaire des bassins continentaux de l'Algérie nord orientale : Apport de la photogéologie et analyse morphostructurale," Thèse de Doctorat d'Etat EN Géologie. Université Mentouri –Constantine.
- Marmi, R. & Guiraud, R., (2006). "End Cretaceous to recent polyphased compressive tectonics along the "Môle Constantinois" and foreland (NE Algeria)," *J. African Earth. Sci.* Vol. 45, No 1, 123-136.
- Marre, A., Quinif Y., Lahondère J.C. & Vila J.M., (1977). "Observations sur le relief karstique du Djebel Zouaoui (Constantine, Algérie)," *Rev. Méditerranée*, No 2, p. 45 - 54, 3 fig., Marseille.
- Mausser, W. & Ludwig, R., (2002). "GLOWA Danube: A research concept to develop integrative techniques, scenarios and strategies regarding global changes of the water cycle," in *Climate Change: Implications for the Hydrological Cycle and for water*

- Management. Beniston, M. (ed.) 171-188
- McCartney, M.P., (2007). "Decision Support System for large dam planning and operation in Africa," Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 47p. (IWMI Working Paper 119)
- McIntosh, B.S., Alexandrov, G., Matthews, K., Mysiak, J. & Van Ittersum, M., (2011). "Preface: Thematic issue on the assessment and evaluation of environmental models and software," *J. Envir. Model. Soft.* ; 26(3): 245–246.
- Mebarki, A., (1982). "Le bassin du Kébir- Rhumel (Algérie). Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau," 3rd cycle PhD Thesis, University of Nancy II, 304 p.
- Mebarki, A. & Thomas, T., (1988). "Analyse des relations entre écoulements superficiels et souterrains à partir des hydrogrammes des cours d'eau: Application au bassin du Kébir-Rhumel dans le Constantinois (Algérie)," *Hydrol. Continent.* ml. 3, No 2, 89-103.
- Mebarki, A., & Bencheikh-Lehocine. M., (1997). "Sources et charges de pollution dans le bassin du Kébir-Rhumel (Algérie orientale) - élément d'étude pour la protection des ressources en eau, Rhumel," *Revu. Institut Science de la Terre. Constantine*, No 5, p, 33-52.
- Mebarki, A., (2000). "Etiages, rejets et protection des ressources en eau des bassins méditerranéens de l'Algérie orientale," *Géocarrefour*, 2000, 75-4 pp. 399-416
- Mebarki, A., (2005). "Hydrologie des bassins de l'Est Algérien. Ressource en eau, aménagement et environnement," PhD Thesis, University of Constantine, 360 p.
- Mehta, V., Purkey, D., Young, C., Joyce, B., & Yates, D., (2008). "Application of the Water Evaluation and Planning (WEAP) System for Integrated Hydrologic and Scenario-based Water Resources Systems Modeling in the Western Sierra Nevada," American Geophysical Union, Fall Meeting.
- Mehta, V. K., Aslam, O., Dale, L., Miller, N. & Purkey, D. R., (2013). "Scenario-based water resources planning for utilities in the Lake Victoria region," *Physics and Chemistry of the Earth.* 61–62: 22–31.
- Menani, M.R., 1991. "Étude hydrogéologique de la plaine d'El Madher (Algérie orientale): géologie, climatologie, hydrogéologie et modélisation des écoulements souterrains de l'aquifère mio-plio-quadernaire," Thèse Doct. Univ. Nancy I, 409 p.
- Milano, M., Ruelland, D., Dezetter, A., Fabre, J., Ardoin-Bardin, S. & Servat, E., (2013). "Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin," *Journal of Hydrology.* 2013. 500:114–126.
- Ministère des ressources en eau (2010). "Implementation of the study of updating the national water plan. Mission 2: resources and demands. Component 4: domestic water demand. Volume 1. Report of the Algerian National Water Plan.
- Mutiga, J. K., Mavengano, S. T., Zhongbo, S., Woldai, T. & Becht, R., (2010). "Water allocation as a planning tool to minimize water use conflicts in the upper Ewaso Ng'iro north basin, Kenya," *Water Resour. Manag.* 24 (14):3939–3959.
- Mutin, G., (2000). "L'eau dans le monde arabe: enjeux et conflits," Ed. Ellipses, Paris.
- Muttiah, R.S & Wurbs, R.A., (2002). "Modeling the Impacts of Climate Change on Water Supply Reliabilities," *Water International.* Vol. 27, no. 3, pp. 407-419.

- Mwanza, D.D., (2003). "Water for sustainable development in Africa," *Environment, Development and Sustainability*, 5: 95–115.
- Nandalal, K., Sakthivadivel R. (2002). Planning and management of a complex water resource system: case of Samanalawewa and Udawalawe reservoirs in the Wlawe river. *Sri Lanka* 57, No. 3: 207-21.
- Nieuwkamer, R.L.J., (1995). "Decision Support for River Management," Technische Universiteit Twente.
- Office National de Statistique, ONS, (2008). "Data from the General Census of Population and Housing," National Statistics Office.
- Oxford Scientific Software, (2008). "A Guide to Aquator, 1. Application, Version 3.0." Oxford Scientific Software," Oxford, UK.
- Paredes, J., Andreu, J., & Solera, A., (2010). "A decision support system for water quality issues in the Manzanares River (Madrid, Spain)," *J. Science of the Total Environment*, 408 2576-2589
- Perera, B.J.C., James, B. & Kularathna, M.D.U., (2005) "Computer software tool REALM for sustainable water allocation and management," *Journal of Environmental Management*. 77(4), 291-300.
- Plan Bleu, (2009). "Environnement et Développement en Méditerranée," Report of "Les Notes du Plan Bleu", No 11.
- Plan Bleu, (2010). "Gestion des ressources en eau: les limites d'une politique de l'offre," Report of: les Notes d'Analyse du CIHEAM, No. 58, Plan Bleu,
- Puri, S. & Aureli, A. & Stephan, R.M., (2008) "Shared Groundwater Resources: Global Significance for Social and Environmental Sustainability," *Overexploitation and Contamination of Shared Groundwater Resources*, C.J.G. Darnault, ed. Springer Science.
- Purkey, D., Huber-Lee, A., Yates, D. & Hanemann, M., (2007). "Integrating a climate change assessment tool into stakeholder-driven water management decision-making processes in California," *Water. Res. Manag.* Vol. 21, 315-329.
- Purkey, D., Joyce, B., Vicuna, S., Hanemann, M., Dale, L., Yates, D., & Dracup, J., (2008). "Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley," *Climatic Change*, (87) 2008, pp 109-122, doi: 10.1007/s10584-007-9375-8.
- Purkey, D. & Escobar, M., (2009). "Climate Change, Glaciers, and Water Management in the Rio Santa Watershed, Peru," American Geophysical Union, Fall Meeting.
- Randall, D., Cleland, L., Kuehne, C.S., Link, G.W. & Sheer, D.P., (1997). "Water supply planning simulation model using mixed-integer linear programming "engine"," *Journal of Water Resources Planning and Management- Asce*. 123(2), 116-124.
- Raskin, P., Hansen, E. & Zhu, Z. & Stavisky, D., (1992). "Simulation of water supply and demand in the Aral Sea region," *Water Int.* 17(2):55–67.
- Read, L.K. & McKinney, D.C., (2010). "Addressing water availability and climate change issues in the Cordillera Blanca, Peru through technical analysis and community building strategies," CRWR Online Report 2010-09. University of Texas at Austin.
- Rogers, P., (1969). "A game theory approach to the problem of international river basins,"

- Water Resources Research, 5(4), 749-760.
- Rogers, P., (1991). "International River Basins: Pervasive Unidirectional Externalities," Italy: Universita di Siena
- Rogers, P., (1993). "The value of Cooperation in resolving international river basin disputes," Natural Resources Forum, 15, 117-131
- Rodina, E., Masyutenko, A. & Krivoruchko, S., (2008). "Integrated water resources management of transboundary Chu and Talas river basins," In: Moerlins J.E., Leitman, S.F., Khankhasayev, M.K. & Makhmudov, E.J. (Eds.): Transboundary Water Resources: A Foundation for Regional Stability in Central Asia: 123-129. Springer, Berlin.
- Sahnoune, F., Belhamel, M., Zelmat, M., Kerbachi, R., (2013). "Climate Change in Algeria: Vulnerability and strategy of mitigation and adaptation," Energy Procedia: 36: 1286-1294.
- Salewicz, K.A., (1991). "Development of a support system for managing large international rivers," Terminal Report for the Project No. FP/5202-81-06(2764). International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria
- Sakka, M., 2010. "Application and comparison of two analytical tools of decision support for the management of resources in a river basin in Tunisia," PhD thesis, Tuscia university of Viterbo, Italy
- Salewicz, K.A. & Nakayama, M., (2009). "Development of a web-based decision support system (DSS) for managing large international rivers," Journal Global Environmental Change, Vol. 14, 25-37
- Sandoval-Solis, S., (2005). "Surface Water Availability Model for the San Juan Basin," MS Thesis. Instituto Politécnico Nacional. Mexico City, Mexico.
- Sandoval-Solis, S., (2009.a). "Integrated water resources management for the Rio Verde basin," Research Project. Instituto Politécnico Nacional. Mexico City, Mexico.
- Sandoval-Solis, S., (2009.b). "Water management model for the Rio Copalita," Flagship project. Instituto Politécnico Nacional. Mexico City, Mexico.
- Sandoval-Solis, S., (2011). "Water Planning and Management for Large Scale River Basins. Case of Study: Rio Grande/Rio Bravo Transboundary Basin," Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, TX.
- Savoskul, O.S., Chevнина, E.V., Perziger, F.I., Vasilina, L.Y., Baburin, V.L., Danshin, A.I., Matyakubov, B., & Murakaev, R.R., (2003). "Water, Climate, Food, and Environment in the Syr Darya Basin," contribution to the ADAPT Project (Adaptation strategies to changing environments). Edited by O.S. Savoskul
- Schuster, R.J., (1989). "The Colorado River Simulation System," Hydraulic Engineering," ASCE, New York, NY, M. Ports, Ed, 473-478.
- Sechi, G. M. & Sulis, A. (2009). "Water System Management through a Mixed Optimization-Simulation Approach," Journal of Water Resources Planning and Management-Asce. 135(3), 160-170.
- SEI, (1997). "WEAP: User Guide for Version 97.0," Stockholm Environment Institute and Tellus Institute, Boston.
- SEI, (2005). "WEAP: user's guide for WEAP21," Stockholm Environment Institute, Boston
- SEI, (2007). "WEAP: user's guide for WEAP21," Stockholm Environment Institute, Boston

- SEI, (2008). "WEAP: système d'évaluation et de planification des ressources en eau," Tutorial: a stand-alone modules collection to help learn WEAP software. Tellus Institute, Boston
- Sgobbi, A. & Fraviga, G., (2006). "Governance and Water Management: Progress and Tools in Mediterranean Countries," The Fondazione Eni Enrico Mattei Note di Lavoro Series Index: <http://www.feem.it/Feem/Pub/Publications/WPapers/default.htm>
- Simonovic, S.P., (1992). "Reservoir Systems Analysis: Closing Gap between Theory and Practice," *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 118, 262-280.
- Simonovic, S.P., (1999). "Decision Support System for Flood Management in the Red River basin," *Canadian Water Resources Journal*, Vol. 24, No. 3, 203-223
- "Singapore Springer Proceedings", 2014, Part VIII, Edited by R. Hassan et al. (Institute of Infrastructure Engineering and Sustainability Management (IIESM), Universiti Teknologi, MARA, 2013), pp. 743-755.
- Snellen, W.B. & Schrevel, A., (2004). "IWRM: for sustainable use of water 50 years of international experience with the concept of integrated water management," FAO/Netherlands Conference on Water for Food and Ecosystems.
- Sorisi, C., (2006). "Public Participation and Institutional Analysis Assessing the Role of System Dynamic Models in the Case Study of the Upper Guadiana Basin in Spain," MS thesis, University of Oxford, UK.
- Sulis, M., Paniconi, C., Marrocu, M., Huard, D. & Chaumont, D., (2012). "Hydrologic response to multimodel climate output using a physically based model of groundwater/surface water interactions," *Water Resour. Res.*, 48 (12): W12510.
- Tate, E., Dhlamini, S., & Meigh, J., (2002). "Southern Africa FRIEND phase 2. Water resources and climate change on Swaziland: a grid based modeling approach," CEII, Wallingford
- Teasley, R.L., (2009). "Evaluating water resource management in transboundary river basins using cooperative game theory: the Rio Grande/Bravo basin," Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, TX
- Teasley, R.L. & McKinney, D.C., (2011). "Calculating the benefits of transboundary river basin cooperation: The Syr Darya Basin," *Journal of Water Resources Planning and Management*. Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000141
- Tortajada, C. (Ed.), (2016). "Increasing Resilience to Climate Variability and Change: The Role of Infrastructure and Governance in the Context of Adaptation," Springer, Singapore (2016)
- Tortajada, C., Kastner, M.J., Buurman, J. & Biswas, A.K., (2017). "The California drought: Coping responses and resilience building," *J Environmental Science & Policy*. Vol. 78, 97-113
- UNDAF, (2002-2006). "Plan Cadre des Nations Unies pour la Coopération au Développement - Algérie,"
- United States Army Corps of Engineers (wr), (1994). "Accounting for Water Supply and Demand: an Application of Computer Program WEAP to the Upper Chattahoochee River Basin, Georgia," US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Training Document No. 34, Davis, CA.

- United States Army Corps of Engineers (USACE), (2007). "HEC-ResSim Reservoir System Simulation," Version 3.0. User's manual.
- Vargas, S., Mollard, E., Romero, R., & Murillo, D., (2004). "Evaluación Social de los escenarios de manejo Del agua superficial en la Cuenca Lerma-Chapala: Informe Final," Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua, Proyecto CPO322
- Viers, J.H., Epke, G., Yarnell, S. & Mount, J., (2010). "Characterization of the Unregulated Spring Snowmelt Recession in the Sierra Nevada, California, and Potential Changes with Regional Climate Warming," American Geophysical Union, Fall Meeting.
- Vigerstol, K., (2002). "Drought Management in Mexico's Rio Bravo Basin," MS thesis, University of Washington, Seattle, WA
- Vila J M., (1977). "Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille N° 74, El Aria avec notice explicative détaillée (levés de S. Guellal)," Serv. Carte Géol. Algérie. SONATRACH.
- Vila. J-M., (1978). "Définition de la nappe Néritique Constantinoise, Elément structural Majeur de la Chaîne Alpine d'Algérie Orientale," Extrait du Bulletin de la société géologique P79-94.
- Vila J M., (1980). "La chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens," Thèse de Doctorat, Paris VI, 663p
- Voinov, A.A. (2013). "Software," Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier Inc. 2013.
- Voute, C., (1967). "Essai de synthèse de l'histoire géologique des environs d'Ain Fakroun, Ain Babouche, et des régions limitrophes," Publ. Serv. Géol. de l'Algérie, n°36, 2 tomes, 3 fig., 41 pl., (1967), p. 255.
- Wagner, A.I. & Vaquero, J.E., (2002). "Modelo dinámico para el análisis de escenarios prospectivos en la Cuenca del Río Conchos," Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua (IMTA). Jiutepec, Morelos, México.
- Winter, T. (2001). Ground water and surface water: the linkage tightens, but challenges remain." *Hydrologic Processes* 15, No. 18: 3605-06.
- Winter, T., Harvey, J., Franke, O.L., Alley. W. (1998). *Groundwater and Surface Water, A single resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, Colorado: USGA.
- Wurbs, R., (2005). "Water Rights Analysis Package (WRAP): modeling system reference manual," Texas A&M, College Station TX.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D. & Huber-Lee, A. (2005). "WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model: Part 1: Model Characteristic," *Water. Int.* Vol. 30, No 4, 487–500.
- Yates, D., Purkey, D., Galbraith, H., Huber-Lee, A. & Sieber, J., (2005). "WEAP a demand, priority and preference driven water planning model: Part 2, Evaluating freshwater," *Ecosyst. Services. Water. Int.* Vol. 30, No. 4. pp. 501-512.
- Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A., Galbraith, H., West, J., Herrod-Julius, S., Young, C., Joyce, B., & Rayej, M., (2009). "Climate Driven Water Resources Model of the Sacramento Basin, California," *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, (2009) 135, pp. 303-313, doi: 10.1061/ (ASCE) 07339496(2009)135:5(303).
- Younsi, A., Mania, J., Lhadi, E. K. & Mudry, J., (2001). "Incidences de pluies

- exceptionnelles sur un aquifère libre côtier en zone semi-aride (Chaouia, Maroc),” *J. Sci. Water*, Vol. 14, No 2, 115-130.
- Zagona, E. A., Terrance, J.F., Morgan, H. G. & Shane, R. M., (1998). “RiverWare : A General River and Reservoir Modeling Environment,” in *Proceedings of First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference-1998*, volume II, section 5, edited by the Subcommittee on Hydrology of the Interagency Advisory Committee on Water Data, Reston, VN, pp. 113-120.
- Zella, L. & Smadhi, D., (2006). “Gestion de l’eau dans les oasis algériennes,” *Larhyss journal*, ISSN 1112-3680, No. 5, pp.149-156.

ANNEXES

1. Structuration des données du modèle de la Wilaya de Constantine

Tableau.1.1. Approvisionnement en eau potable en Mm³/mois

Municipalities		Constantine	Ouled Rahmoune	Ain Smara	Zigboud Youcef	Hamma Bouziane	Béni H'midène	Ibn Ziad	Didouche Mourad	Messaoud Boudjeriou	El Khroub
Aquifers	Cenomanian	2.516	5.025		0.009	0.225	0.013	0.013	0.216	0.063	0.438
	Mio-Pliocene	0.021	0.005	0.008							0.089
Dams	Hammam Grouz	0.825		0.208							0.869
	Berla	0.163									

Tableau.1.2. Approvisionnement en eau pour l'irrigation en Mm³/mois

Municipalities		Zigboud Youcef	Didouche Mourad	Ibn Ziad	Ain Smara	Béni H'midène	Hamma Bouziane	Constantine	El Khroub	Messaoud. Boudjeriou	Ouled Rahmoune
Aquifers	Cenomanian	0.04	0.037			0.06	0.534	0.031		0.08	
	Mio-Pliocene				0.064				0.005		0.038
Small dams	Didouche Mourad		0.031								
	Ibn Ziad			0.05							
	Ain S'mara 1				0.028						
	El Khroub 1								0.0035		
	El Khroub 3								0.003		
	El Khroub 4								0.005		
	El Khroub 5								0.007		
	El Khroub 2								0.002		

Tableau.1.3. Approvisionnement en eau pour l'industrie en Mm³/mois

Municipalities		Constantine	El Khroub	Hamma Bouziane	Ain S'mara	Didouche Mourad	Ouled Rahmoune
Aquifers	Cenomanian	0.031		0.032	0.108	0.008	
	Mio- Pliocene		0.013				0.009

Tableau.1.4. Paramètres des barrages

Dams	Storage (m ³)	Initial Storage (m ³)	Inflow (m ³ /s)
Hammam Grouz	50000000	45000000	1.41
Berla	2240000	1950000	0.048

Tableau.1.5. Paramètres de calibrage du modèle des retenues collinaires

Small Dams	Abbreviation in Schematic	Storage (m ³)	Inflow (m ³ /s)
Ain S'mara 1	R A S1	269000	No data
El Khroub 1	R kh1	80000	0.009
El Khroub 2	R kh2	50000	0.0002
El Khroub 3	R kh3	100000	0.00032
El Khroub 4	R kh4	170000	0.00056
El Khroub 5	R kh5	450000	0.0022
Didouche Mourad	R dm	290000	No data
Ibn Ziad	R iz	360000	No data

Tableau.1.6. Paramètres de calibrage du modèle pour l'AEP (priorité 1)

Municipalities	Population cap (ONS, 2008)	Growth rate % (ONS, 2008)	Annual Water Consumption m ³ /cap (ABH CSM, 2007)	Consumption % (ABH CSM, 2007)	Loss Level % (ABH CSM, 2007)	Loss Level %
Constantine	448374	-0.7	58.578	80.57	23	92.32
Ouled Rahmoune	26132	2.5	66.355	80	80	77.91
Ain S'mara	36998	4.3	48.138	80	20	58.66
Zighoud Youssef	35248	2.5	35.179	80	15	69.01
Hamma Bouziane	79952	3.3	53.870	80.01	14	86.21
Béni H'midène	9397	1.4	21.496	80	20	78.74
Ibn Ziad	18861	2.0	85.785	80	12	81.55
Didouche Mourad	44951	3.1	45.160	80	18	45.01
M. Boudjeriou	9050	1.3	39.227	80	10	50.70
El Khroub	179033	7.3	28.922	79.97	14	98.70

Tableau.1.7. Paramètres de calibrage du modèle pour l'irrigation (priorité 2)

Municipalities	Schematic Abbreviation	Agricultural Area ha (ABH CSM, 2007)	Annual Water Consumption m ³ /ha (ABH CSM, 2007)	Loss Level % (Supposed)
Constantine	Ag con	93	4000	10
Ouled Rahmoune	Ag O Rh	114	4000	10
Ain S'mara	Ag A Sma	106	4000	10
Zighoud Youssef	Ag Z You	190	4000	10
Hamma Bouziane	Ag H bou	40	2900	10
Béni H'midène	Ag B hm	179	4000	10
Ibn Ziad	Ag I Ziad	83	4000	10
Didouche Mourad	Ag D mour	206	4000	10
Messaoud Boudjeriou	Ag M bouj	74	4000	10
El Khroub	Ag kh	165	4000	10

Tableau.1.8. Paramètres de calibrage du modèle pour l'industrie (priorité 3)

Municipalities	Schematic abbreviation	Annual water consumption m ³ (ABH CSM, 2007)	Consumption %	Loss level % (Supposed)
Constantine	Ind con	428692.5	90	10
Ouled Rahmoune	Ind O Rh	40150	90	10
Ain S'mara	Ind A S	1464015	90	10
Hamma Bouziane	Ind H B	390550	90	10
Didouche Mourad	Ind D mour	104390	90	10
El Khroub	Ind kh	1807480	90	10

Tableau.1.9. « Comptes courants » pour tous les sites de demande (année 2007)

All water demand sites	Demand in Hm ³
Crop of Didouche Mourad (Ag D mour)	0.82
Crop of Messaoud Boudjeriou (Ag M bouj)	0.96
Ain S'mara	1.71
Constantine	26.45
Didouche Mourad	1.97
El Khroub	4.83
Hamma Bouziane	4.17
Ibn Ziad	1.59
Ain S'mara Industry (Ind A S)	1.46
El Khroub Industry (Ind Kh)	1.81
Ouled Rahmoune	1.69
Zighoud Youssef	1.21
All the others	5.35
Sum	54.01

1. Structuration des données du modèle du sous-bassin du Boumerzoug

Tableau.2.1. Approvisionnement en eau potable en Mm³/mois

Municipalities		Sigus	El Amiria	Ouled Gacem	Henchir Toumghani	Ain Fakroun	Ain Kercha	Ain M'lila	Constantine	El Khroub	Ouled Rahmoune
Aquifers	Cenomanian quaternary		0,029	0,029	0,019	0,026 0,058	0,148	0,220	2,516	0,438	5,025
	Aptian	0,105			0,029	0,167	0,008	0,397			
	Albian					0,024					
	Miocene							0,035			
	Pliocene							0,145			
	Maastrichtian	0,013									
	Mio-Pliocene			0,068		0,079			0,021	0,089	0,005
Small dams	El Khroub 1									0,0035	
	El Khroub 3									0,003	
	El Khroub 4									0,005	
	El Khroub 5									0,007	
	El Khroub 2									0,002	
dams	Hammam Grouz								0,825	0,869	
	Berla								0,163		

Tableau.2.2. Approvisionnement en eau pour l'irrigation en Mm³/mois

Municipalities		Sigus	Ouled Gacem	Henchir Toumghani	Ain Fakroun	Ain Kercha	Ain M'lila	Constantine	El Khroub	Ouled Rahmoune
Aquifers	Cenomanian							0,031		
	Mio- Pliocene								0,005	0,038
	Quaternary		0,013	0,013	0,013	0,013	0,013			
Small dams	El Khroub 1								0,0035	
	El Khroub 3								0,003	
	El Khroub 4								0,005	
	El Khroub 5								0,007	
	El Khroub 2								0,002	
	El Khanga	0,013								

Tableau.2.3. Approvisionnement en eau pour l'industrie en Mm³/mois

Municipalities		Ain M'lila	Constantine	El Khroub	Ouled Rahmoune
Aquifers	Cenomanian		0,031		
	Mio-Pliocene			0,013	0,009
	Quaternary	0,00006			

Tableau.2.4. Paramètres des barrages

Dams	Storage (m ³)	Initial Storage (m ³)	Inflow (m ³ /s)
Hammam Grouz	50000000	45000000	1.41
Berla	2240000	1950000	0.048

Tableau.2.5. Paramètres de calibrage du modèle des retenues collinaires

Small Dams	Abbreviation in Schematic	Storage (m ³)	Inflow (m ³ /s)
El Khroub 1	R kh1	80000	0.009
El Khroub 2	R kh2	50000	0.0002
El Khroub 3	R kh3	100000	0.00032
El Khroub 4	R kh4	170000	0.00056
El Khroub 5	R kh5	450000	0.0022
El Khanga	El Khanga	44800	No data

Tableau.2.6. Paramètres de calibrage du modèle pour l'AEP (priorité 1)

Municipalities	Population cap (ONS, 2008)	Growth rate % (ONS, 2008)	Annual Water Consumption m ³ /cap (ABH CSM, 2007)	Consumption % (ABH CSM, 2007)	Loss Level % (ABH CSM, 2007)
Constantine	448374	-0.7	58.578	80.57	23
Ouled Rahmoune	26132	2.5	66.355	80	80
El Khroub	179033	7.3	28.922	79.97	14
Sigus	17598	1,7	98	99,78	10
El Amiria	10416	0,6	33	99,78	10
Ouled Gacem	7107	1,3	315,05	99,78	10
Ain Fakroun	55282	1,6	53	99,78	15
Ain M'lila	88441	2,4	236	99,78	12
El Harmlia	8036	1,2	545	99,78	13
Ain Kercha	32377	1,8	47	99,78	15
Henchir Toumghani	23159	2,2	66	99,78	15

Tableau.2.7. Paramètres de calibrage du modèle pour l'irrigation (priorité 2)

Municipalities	Schematic Abbreviation	Agricultural Area ha (ABH CSM, 2007)	Annual Water Consumption m ³ /ha (ABH CSM, 2007)	Loss Level % (Supposed)
Constantine	Ag con	93	4000	10
Ouled Rahmoune	Ag O Rh	114	4000	10
El Khroub	Ag kh	165	4000	10
Sigus	Ag Sigus	103	6597	10
Ouled Gacem	Ag Ouled Gacem	678	6597	10
Ain Fekroun	AG Ain Fekroun	60	6597	10
Ain M'lila	Ag Ain Mlila	659	6597	10
El Harmlia	Ag Harmlia	601,5	6597	10
Ain Kercha	Ag Ain Kercha	269	6597	10
Henchir Toumghani	Ag Henchir Toum	863	6597	10

Tableau.2.8. Paramètres de calibrage du modèle pour l'industrie (priorité 3)

Municipalities	Schematic abbreviation	Annual water consumption m ³ (ABH CSM, 2007)	Consumption %	Loss level % (Supposed)
Constantine	Ind con	428692.5	90	10
Ouled Rahmoune	Ind O Rh	40150	90	10
El Khroub	Ind kh	1807480	90	10
Ain M'lila	Ind Ain Mlila	48960	90	10

Tableau.2.9. « Comptes courants » pour tous les sites de demande (année 2007)

	All water demand sites	Demand in Hm3
Water for crop	Crop of Ain Fekroun (Ag Ain Fekroun)	0,396
	Crop of Ain (Ag Ain Kercha)	1,775
	Crop of Ain M'lila (Ag Ain Mlila)	4,347
	Crop of El Harmlia (Ag Harmlia)	3,968
	Crop of Henchir Toumghani (Ag Henchir Toum)	5,693
	Crop of Ouled Rehmoune (Ag O Rh)	0,456
	Crop of Ouled Gacem (Ag Ouled Gacem)	4,473
	Crop of Sigus (Ag Sigus)	0,679
	Crop of Constantine (Ag con)	0,372
	Crop of El Khroub (Ag kh)	0,660
Drinking water	Ain Fekroun	2,884
	Ain Kercha	1,495
	Ain M'lila	20,383
	Boumerzoug	0,000
	El Amiria	0,342
	El Harmlia	4,328
	Henchir Toumghani	1,496
	Ain M'lila industry (Ind Ain Mlila)	0,049
	Ouled Gacem	2,210
	Sigus	1,696
	Constantine	26,450
	El Khroub	4,826
Ouled Rehmoune	1,692	
Water for industry	El Khroub industry (Ind Kh)	1,807
	industry (Ind O Rh)	0,040
	industry (Ind con)	0,429
Sum		92,945