

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى جيجل

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences de la Terre et de
l'Univers



كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم : علوم الارض و الكون

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique**
En Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière: Géologie

Option : Hydrogéologie

Thème

**Modélisation du transport des nitrates au sein
de l'aquifère alluvionnaire de la Soummam
(Béjaia, Nord Est Algérien)**

Membres de Jury

Président: Mr. Souhil Mahdid
Examineur: Dr. Hocine Kiniouar
Encadrant : Dr. Farés Kessasra

présenté par
-Rahma Kihal
-Ahlem Bechibchi

Année Universitaire 2021-2022

Numéro d'ordre (bibliothèque) :.....

Remerciements

Tout d'abord Louange à Allah qui nous a aidés.

*Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à notre directeur de mémoire, monsieur **Farés Kessasra**. Nous lui présentons nos vifs remerciements pour sa disponibilité et ses conseils pertinents qui ont aidé de façon très significative à l'amélioration de ce mémoire.*

*Nous désirons aussi remercier les doctorantes **Dounyazad, Zineb et Amal** pour leurs conseils et pour avoir eu la patience de répondre à nos innombrables questions.*

*À nos enseignants, nous présentons nos remerciements, nos respects et nos gratitude en particulier monsieur **A.E Derouiche** et monsieur **S. Mehdid***

Nous remercions aussi les membres de jurys qu'ils pu se libérer de leurs obligations pour avoir accepté de juger notre mémoire en tant que président et examinateur.

Enfin, tenant à remercier tout ce qu'ont contribué de près et de loin à la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Rahma et Ahlem

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À ma chère mère Nora

À mes chers Ishak, Raja, et Sarah

Rahma

Dédicace

Avant tous je dis « ALHAMDYOU LI ALLAH »

Mon soutien moral

Et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours

Sacrifié pour me voir réussir, qu'Allah lui garde la santé

Mon père.

*A la bougie qui a éclairé mon chemin depuis ma naissance, à celle dont
j'ai le premier mot,*

La Source de ma vie ma Mère.

Un remerciement spécial à mes chères sœurs : houda, ilhem

Un remerciement spécial à mes chers frères : haroun, hichem

A mon binôme Rahma.

À ma meilleure amie Sara.

A ceux qui pas sur les lignes mais dans le cœur

Ahlem

Résumé

La pollution par les nitrates des eaux souterraines est un cas de pollution diffuse d'origine agricole qui prend de l'ampleur dans les bassins-versant anthropisés. La nappe des alluvions de la basse vallée de la Soummam qui s'étend de Sidi Aich à l'embouchure à Bejaia est confrontée à ce problème, une forte pollution anthropique est remarquée.

Ce projet vise à coupler la modélisation hydrodynamique de la nappe avec celle du transport des nitrates. En effet, La première est axée sur l'étude et la simulation du fonctionnement hydrodynamique de la nappe en deux régimes, permanent qui consiste à caler le niveau piézométrique calculé avec celui mesuré, et en transitoire simulant des scénarios basés sur un plan de gestion accomplis sur trois scénarios 2019, sur lequel un autre calage du niveau piézométrique calculé avec celui mesuré en 2019, ensuite en 2030, et en 2040. Le second modèle a pour objectif de suivre le comportement des nitrates au sein de la nappe de la basse vallée de la Soummam en deux régimes également, l'un permanent qui consiste à caler les concentrations calculées par le modèle avec celles mesurées en 2019, l'approche est complétée par deux scénarios simulés en 2030 et 2040.

Cette étude permettra d'alimenter la réflexion sur la gestion de la ressource en eau et constituera une étape dans l'élaboration d'un schéma directeur de gestion de cette ressource sur l'ensemble de la vallée.

Mots clés : Modèle hydrodynamique, Modèle de transport, nitrates, aquifère alluvial, vallée de la Soummam.

Abstract

Nitrate pollution of ground water is a case of diffuse pollution from agricultural sources that is gaining momentum in anthropized watersheds. The alluvial aquifer of the lower Soummam valley that extends from Sidi Aich to the mouth of Bejaia is facing this problem, strong anthropogenic pollution is noticed.

This project aims to couple the hydrodynamic modeling of the aquifer with that of nitrate transport. Indeed, the first focuses on the study and simulation of the hydrodynamic functioning of the aquifer in two regimes, permanent which consists in setting the piezometric level calculated with that measured, and transient simulating scenarios based on a management plan accomplished on three scenarios in 2019, on which another calibration of the piezometric level calculated with that measured in 2019, then in 2030, and 2040. The second model aims to follow the behavior of nitrates within the groundwater of the lower Soummam valley in two regimes as well, one permanent which consists in calibrating the concentrations calculated by the model with those measured in 2019, the approach is completed by two simulated scenarios in 2030 and 2040.

This study will provide food for thought on the management of water resources and will be a step in the development of a master plan for the management of this resource throughout the valley.

Keywords: Hydrodynamic model, Transport model, nitrates, alluvial aquifer, Soummam Valley.

ملخص

تلوث المياه الجوفية بعنصر النترات احد أنواع التلوثات الأكثر انتشارا دات مصدر زراعي . الطبقة الجوفية لأسفل واد الصومام التي تمتد من سيدي عيش الى المصب ببجاية تعاني من وجود النترات في الماء اين نلاحظ تلوث بيئي دو مصدر بشري.

في خضم هذا العمل نهدف إلى دمج النموذج الهيدروديناميكي للمياه الجوفية مع نموذج تنقل النترات. فبالتالي, الأول يركز على دراسة محاكاة الأداء الهيدروديناميكي من منسوب المياه الجوفية في نظامين, دائم والذي يتكون من ضبط مستوى المياه الجوفية المحسوب مع المستوى المقاس, ومحاكاة سيناريوهات بناءً على استراتيجية إدارة تم إنجازها في ثلاثة سيناريوهات لعام 2019, حيث تم حساب معايرة أخرى لمستوى المياه الجوفية مع تلك التي تم قياسها في عام 2019, ثم في عام 2030, وفي عام 2040. في حين يهدف النموذج الثاني إلى مراقبة سلوك النترات داخل طبقة المياه الجوفية لوادي الصومام السفلي في نظامين أيضا, واحد دائم, ويتكون من مطابقة التركيزات التي يحسبها النموذج مع تلك التي تم قياسها في عام 2019, يتم تتبع السلوك المستقبلي من خلال سيناريوهين تمت محاكتهما في خلال المدة ما بين 2019-2030 و 2030-2040

هاته الدراسة تمكنا من تنمية الوعي في إدارة الموارد المائية و التي ستكون خطوة فعالة في تصميم مخطط لإدارة الاستهلاك في منطقة واد الصومام ككل

كلمات المفتاحية : نموذج هيدروديناميكي, نموذج النقل, النترات, طبقة المياه الجوفية, وادي الصومام.

Sommaire

Résumé

Abstract

Remerciements

Problématique de l'étude

Partie I – description du milieu physique de la basse vallée de la Soummam

I.1.contexte géographique de la zone d'étude.....	3
I.2. Réseau hydrographique.....	4
I.3.Couverture végétale.....	5
I.4. Contexte économique.....	5
I.4.1.Démographie et population.....	5
I.4.2.Activités industrielles.....	6
I.4.3.Agriculture.....	7
I.4.4.Besoin en eau.....	10
I.5. Climat de la zone d'étude.....	11
I.5.1.Caractéristiques climatiques de la zone d'étude.....	11
I.5.1.1.Précipitations.....	11
I.5.1.2.Température.....	12
I.5.2.Estimation du bilan hydrogéologique.....	13
I.5.2.1.Evapotranspiration potentielle (ETP)	13
I.5.2.2. Bilan hydrologique.....	14
I.5.2.3. Ruissellement.....	15
I.5.2.4. Infiltration	15
I.6.contexte géologique et hydrogéologique.....	16
I.6.1.cadre géologique.....	16
I.6.2.hydrogéologie de la zone.....	18
I.6.3.la piézométrie de la nappe alluviale.....	19
I.7.La chimie des eaux.....	20
I.7.1. paramètres physique.....	20
I.7.2. Paramètres chimiques.....	22
I.7.3.Les composés azotés.....	23
I.7.3.1 Nitrates (No3).....	23
I.7.3.2.Nitrites (No2).....	23

I.7.3.3.Ammonium (Nh4).....	23
Conclusion.....	24
Parties II – Matériels et méthodes	
II.1. introduction.....	26
II.2. Modèle de la basse vallée de la Soummam.....	26
II.2.1.présentation de PMWIN et MT3D.....	27
II.2.1.1. concentration initiale.....	27
II.2.1.2.River.....	28
II.2.3.3.concentration Observations	29
II.3. Stratégie des simulations.....	30
II.3.1. Modèle hydrodynamique.....	30
II.3.2. Modèle du transport des nitrates.....	31
II.2.2.1.Cartographie des nitrates en 2019.....	31
Partie III – Résultats et Discussion	
III.1.Modèle hydrodynamique.....	33
III.1.1.Régime permanent.....	33
III.1.2.Régime transitoire	34
III.1.3. Bilan de nappe.....	41
III.2.Modélisation hydrogéochimique.....	44
III.2.1.Calage en régime permanent.....	44
III.2.2.Régime transitoire.....	46
III.2.2.1. Calage en régime transitoire	46
III.2.3. Exploitation par scénario.....	47
III.5.Modèle d'évolution.....	50
Conclusion	50
Conclusion générale et recommandations	51
Références bibliographiques	
Annexe	

Liste des figures

-Figure 1 : Bassin versant de la Soummam	3
-Figure 2 : Localisation de la basse vallée de la Soummam.....	4
-Figure 3 : Chevelu hydrographique du sous bassin versant de la Soummam (1/200 000°).....	5
-Figure 4 : Principaux filières de l'industrie à la vallée de la Soummam.....	6
-Figure 5 : Les quantités des pesticides livrés en L et en Kg (DSA ,2018).....	10
-Figure 6. Variation mensuelle des précipitations à la station de Bejaia Aéroport.....	12
-Figure 7. Variation mensuelle des températures à la station de Bejaia Aéroport (1996-2019).....	13
-Figure 8 : Evolution mensuelle du bilan hydrique à la station de Bejaia Aéroport (1996-2019).....	15
-Figure 9 : Carte géologique de la basse vallée de la Soummam et ses massifs environnants.....	16
-Figure 10 : Coupe géologique transversale de la basse vallée de la Soummam (Kessasra, 2015).....	20
-Figure 11 : Carte piézométrique de la basse vallée de la Soummam, Mars 2011.....	21
-Figure 12 : Conditions aux limites de la basse vallée de la Soummam (Kessasra, 2015).....	27
-Figure 13 : Concentrations initiales en NO ³⁺ en régime permanent	29
-Figure 14 : Concentrations mesurées en NO ³⁺ dans les eaux de surface.....	29
-Figure 15 : Répartition spatiale des nitrates dans la basse vallée de la Soummam.....	32
-Figure 16 : piézométrie des hautes eaux de la basse vallée de la Soummam (Kessasra, 2011).....	33
-Figure 17 : Comparaison entre niveaux piézométriques calculés et mesurés en régime Permanent.....	34
-Figure 18 :L'évolution des rabattements des trois scénarios.....	35
-Figure19 : visualisation 2D Modflow du scénario 2011-2019.....	36
-Figure 20 : Perméabilité modifiée en 2019.....	37
-Figure 21 : Comparaison du NP piézométrique calculé et mesuré du 2019.....	39
-Figure 22 : Comparaison du niveau piézométrique calculé et mesuré de scénario 2et 3	40
-Figure 24 : Diagrammes de dispersion et droites de corrélation des scénarios 1 et 2 des Simulations des Nitrates.....	48
-Figure 25 : Diagrammes de dispersion et droites de corrélation en permanent et scénario 3 des Simulations des Nitrates.....	41
-Figure 26 : Diagrammes de dispersion et droites de corrélation des scénarios 1 et 2des simulations des Nitrates.....	49
-Figure 27 : Diagrammes de dispersion et droites de corrélation en permanent et scénario 3 des simulations des Nitrates.....	49

Liste des tableaux

-Tableau 1. Les principales structures industrielles ayant les grandes quantités de déchets	7
-Tableau 2.L'occupation des sols par commune dans la basse vallée de la Soummam	8
-Tableau 3. Quantités livrées et utilisée par filière et par commune.....	9
-Tableau 4.Les Type culturels et les engrais utilisés DSA 2017-2018.....	10
-Tableau 5.Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations à la station de Bejaia Aéroport (1996 - 2019).....	11
-Tableau 6.Les valeurs moyennes mensuelles des températures (1996-2019	12
-Tableau 7.Bilan hydrologique à la station de Bejaia Aéroport (1996 2019.....	15
-Tableau 8.Variation de l'infiltration à la station de Bejaia Aéroport dans les périodes (1996- 2019)....	16
-Tableau 9. Variations des paramètres physiques des eaux souterraines de la zone.....	22
-Tableau 10. Variation des concentrations des composés azotés entre une campagne de (Kessasra, Mars2013) et (Kerouaz, Abd Ellouche, 2019).....	24
-Tableau 11. Volume d'eau pompé dans les trois périodes des simulations.....	34
-Tableau 12. Le nombre de forage en fonction des classes de rabattements enregistrées dans les trois scénarios simulés dans la basse vallée de la Soummam	36
-Tableau 13. Calage du niveau piézométrique en premier scénario.....	38
-Tableau 14.Bilan de la nappe issue des 3 périodes des simulations en régime transitoire	41
-Tableau 15. Teneurs calculées et mesurées issues du calage de NO3 en régime Permanent	45
-Tableau 16. Variations des concentrations mesurées et calculées et recalage en Simulation1.....	46
-Tableau 17. Évolution des concentrations simulées aux périodes.....	49

Abréviations

- AEP** : Alimentation en Eau Potable.
- CGG** : Compagne Générale de la Géologie.
- Déficit** : Déficit agricole.
- DSA** : la Direction des Services Agricoles.
- EAC** : Exploitation Agricole Collective.
- ETP** : Evapotranspiration Potentiel.
- ETR** : Evapotranspiration Réel.
- Fig** : figure.
- Hab** : Habitant.
- Ha** : Hectare.
- I** : Infiltration.
- Mg/l** : milligramme par litre.
- Mm**: millimètre.
- NO²⁺**: Nitrites.
- NO³⁺**: Nitrates.
- NH⁴⁺**: Ammonium.
- OD** : Oxygène Dissous.
- OMS** : L'Organisation mondiale de la santé.
- P** : Pluviométrie.
- Ql** : Quintal.
- R** : Ruissellement.
- T** : Température.
- t** : Tonne
- Tab** : Tableau.
- µS.cm⁻¹** : Micro-séismens par centimètre.

Introduction

Selon le plan bleu sous l'égide du programme des nations unies pour l'environnement, les régions méditerranéennes, et notamment l'Algérie, seront confrontées à l'horizon 2050 à une forte diminution et à une importante pollution de la ressource en eau (déjà observable depuis les années 90), liées à la fois au changement climatique et à la pression anthropique : agriculture, industrialisation, urbanisation, tourisme...etc. (Madani, 2011).

Notre projet de fin d'étude est focalisé sur la vallée de la Soummam qui réside au cœur des préoccupations majeures de l'Algérie du fait qu'elle est une véritable artère dynamique (Kessasra, 2015). L'aquifère des alluvions de la basse vallée de la Soummam compris entre Sidi Aich et Bejaia draine une région fortement urbanisée (400 hab. /km²), largement industrialisée et dont l'agriculture y est largement pratiquée. Générant un volume de rejets d'eaux usées important, environ 41200 m³/j, il y est déversé dans la plupart des cas sans traitement préalable, ajoutons à cela, les usages agricoles incontrôlés, les réserves d'eau de la vallée sont confrontées à une détérioration de leur qualité. En revanche, l'exploitation non-contrôlée de la nappe en l'absence d'un véritable plan de gestion de la ressource en eau dans la vallée entraîne des rabattements importants, et menacent le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère. Dans ce contexte, la modélisation numérique pourrait être utile dans la gestion et la préservation de la ressource en eau.

En effet, plusieurs études de modélisation ont été réalisées dans la vallée en adoptant diverses approches de recherche, de celle du diagnostic de l'état de la ressource en eau à l'approche basée sur la modélisation hydrodynamique et la modélisation hydrogéochimique (Bennabi, 1985, Kessasra, 2006, Semar et al, 2009, Kessasra et al, 2014, Kessasra, 2015, Lamari, 2015, Chetibi et Seraoui, 2015, Kessasra et al, 2017, Kessasra et al, 2021).

Ce projet a pour objectif d'étudier et de simuler le comportement hydrodynamique de l'aquifère appuyé par la simulation du transport d'un polluant, en l'occurrence, les nitrates au sein de la zone saturée dudit aquifère. La période de simulation s'articule autour de trois scénarios s'étalant de 2011 à 2040.

Problématique d'étude

Nous avons choisi de structurer notre manuscrit en trois principales parties, en l'occurrence :

Partie 1 : description du milieu physique

Présente la description et la présentation du milieu physique de la zone d'étude, à savoir, la géologie, l'hydrologie, la climatologie, l'hydrogéologie et la qualité des eaux souterraines de la nappe des alluvions de la basse Soummam.

Partie 2 : matériel et méthodes

Il s'agit d'une présentation des logiciels utilisés dans ce travail, ainsi que les deux modèles précédemment établis par les auteurs précités, hydrodynamique et hydrogéochimique, en montrant leurs structures, période de simulation, les résultats obtenus et la démarche à suivre dans ce projet.

Partie 3 : résultats et discussion

Elle est consacrée à la modélisation hydrodynamique des écoulements des eaux souterraines sur une période s'étalant de 2011 à 2040 et la simulation du devenir et du transport des nitrates dans la nappe jusqu'à 2040 également.

Et enfin une Conclusion et recommandations.

Partie I

Description du milieu physique

I.1. contexte géographique de la zone d'étude

Le bassin versant de la Soummam est localisé au Nord-Est de l'Algérie à environ 230 Km à l'Est d'Alger. Après le Cheliff et la Tafna, la Soummam est le troisième fleuve d'Algérie, formée de la confluence de l'Oued Sahel qui descend des montagnes du Djurdjura et du plateau de Bouira, et du Boussellam qui descend du plateau Sétifien (Figure 1). Oued Soummam draine un bassin versant d'une superficie totale de 9125 km². Il se jette dans la mer Méditerranée à Bejaia (Mouni, 2004).

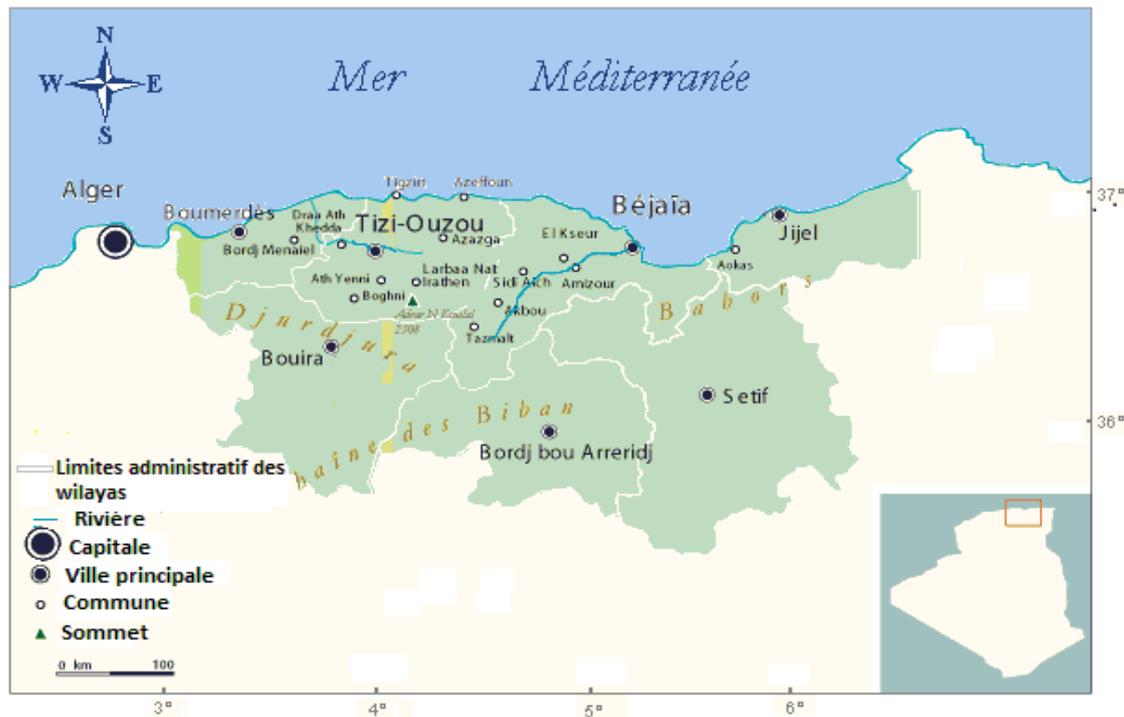


Fig. 1. Bassin versant de la Soummam (Abd Ellouche, Kerouaz, 2019).

Notre étude se focalise sur la basse vallée de la Soummam (Figure 2), qui est comprise entre Sidi Aich au sud-ouest et Béjaia au nord-est. Elle est limitée au nord par les chaînes du Djurdjura, au sud par les contreforts du Hodna, à l'ouest par le plateau de Bouira, et à l'est par la chaîne des Babors et la Méditerranée. La basse vallée de la Soummam s'étend sur une longueur d'environ 35 km et sa largeur est comprise entre 700 m et 2 km.

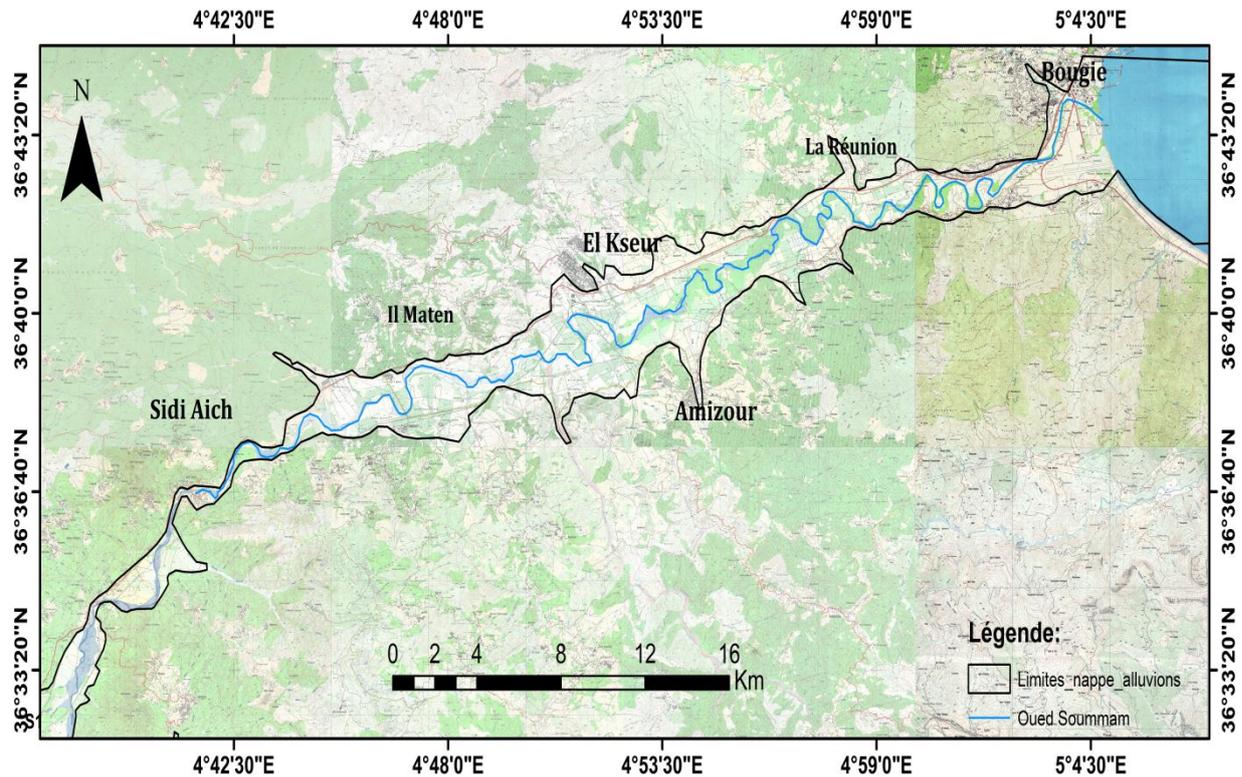


Fig.2. Localisation de la basse vallée de la Soummam (Abd Ellouche, Kerouaz, 2019)

I.2. Réseau hydrographique

Le bassin versant de la Soummam est composé de trois sous-bassins versants qui sont (Figure 3):

- Sous bassin de Boussellam: s'étend dans la partie sud-est du bassin de la Soummam sur environ 4309 km², prend sa source au Djebel Meghris situé au nord de Sétif jusqu'à sa confluence avec le Sahel à Akbou.

- Sous bassin de Sahel : formé à la confluence de deux oueds, Eddous et le Zaine s'étend de Sour El-Ghozlane (Bouira) à Akbou sur une superficie de 3755 km².

- Sous bassin de la Soummam : s'étend de la confluence de Boussellam et Sahel à Akbou jusqu'à la mer méditerranée et couvre une superficie de 1101 km².

Les principaux affluents qui composent le réseau hydrographique de la basse vallée de la Soummam sont Oued Remila, Oued El Kseur et Oued Ghir sur la rive gauche et Oued Amassine et Oued Amizour sur la rive droite.

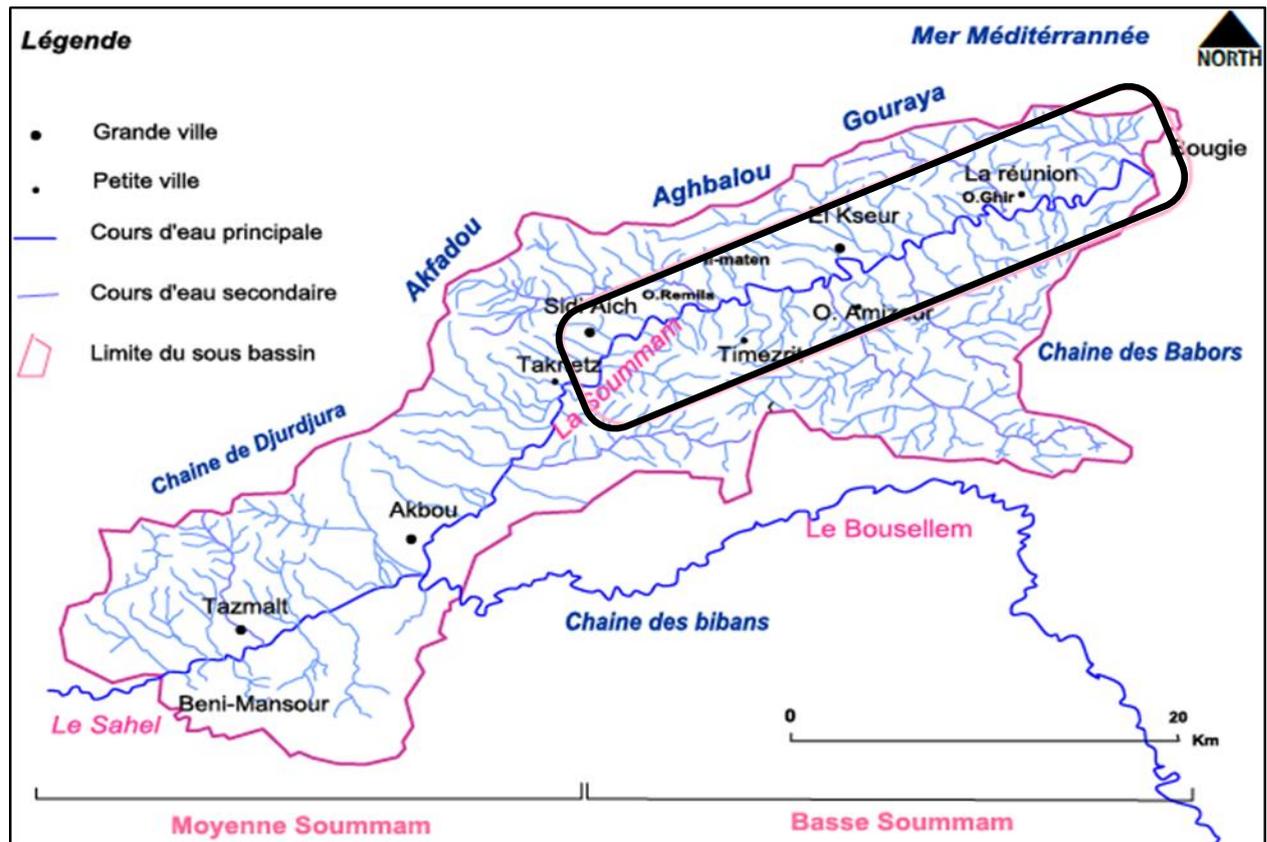


Fig.3. Chevelu hydrographique du sous bassin versant de la Soummam (1/200 000e.)(Kessasra, 2015)

I.3.Couvertures végétale

Selon le rapport de Ramsar, 2009 La basse vallée de la Soummam représente une richesse remarquable de la flore. La végétation appartient dans son ensemble à l'étage bioclimatique de végétation méditerranéenne humide. Dans les régions défrichées et cultivées on y trouve des figuiers, oliviers et céréales. Dans la vallée, les alluvions quaternaires donnent lieu à des cultures de vignes, d'agrumes et de primeurs qui font la richesse de la région et qui nécessitent une quantité appréciable d'eau d'irrigation.

I.4. Contexte socio-économique

I.4.1. démographie et population

L'empreinte humaine est omniprésente par les activités agricoles, la multiplication des zones d'habitation et industrielles sur les versants et en plaine. Selon les statistiques de 2018, Les agglomérations les plus importantes sont : Bejaia avec 217 199habitants, El Kseur 50 520hab, Amizour 40 531 hab, Timizert29068 hab, Sidi Aich 38 512 hab et oued Ghir 22 902hab, (DDS-Béjaia, 2018). A la périphérie de ces agglomérations s'est développée de vastes zones agricoles et industrielles.

I.4.2 activité industrielle

Le tissu industriel est densément représenté dont la quasi-totalité des unités industrielles est implantée le long du couloir de la vallée au pied des versants et même au bord de l'oued Soummam (Ramsar, 2009), réparties principalement sur six filières (figure 4). Les statistiques des rejets solides quantifiés à 2370.414 t, les rejets liquides quantifiés à 1701.60 m³. Pendant que les rejets de Forme Pâteuse sont évalués à 11681,1 t.

L'ensemble des rejets urbains et industriels se jette directement dans la Soummam sans traitement préalable avec d'énormes quantités de déchets de différentes désignations, ce qui n'est pas sans effet sur la qualité des ressources en eau de toute la vallée (Tableau 1).

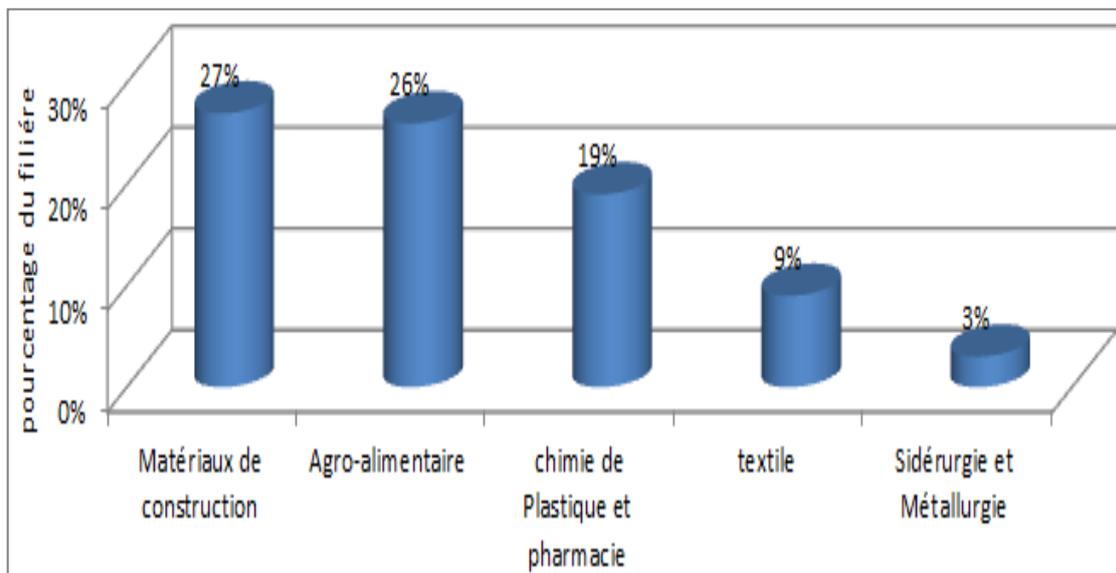


Fig.4. principales filières de l'industrie à la vallée de la Soummam. (ABHS, 2000).

Tab.1. Les principales structures industrielles ayant les grandes quantités de déchets (Déclaration des déchets spéciaux et spéciaux dangereux - exercice 2017).

Dénomination de la structure	Localisation	Désignation du déchet	Quantité du déchet
SPA CO.G.B LABELLE- BP	406 route des Aurès- Bejaia	Mucilage	560 t/an
		Boue de la STEP	1080 t/an
		Terre décolorante usée	600 t/an
SPA FAGECO du GROUPE ENMTP- ZI	route des Aurès BP 90- Bejaia	Déchets ferreux	20 t/an
SARL SICAM Bouton Industrie-ZI	route des concessions BP 94- Bejaia liberté 06000.	Bobine en acier	45 t/an
		Laiton	
SARL PRO QUIMICOS	Taghzout Commune d'el flaye	Produits primes	8853,55 t/an
EPE SPA Briqueterie SOMACOB	Remila- Fenaia	Huiles moteurs de boîtes à vitesse et lubrifiants	1900 l/an
		huiles hydrauliques usagées	400 l/an
		Filtres à l'huile	60 unités
		Transformateur à askarel	01 unité
EPE/SPA SOMACOB Unité Menuiserie Générale	RN 26 Tazmalt	Sciure, coupeaux et chutes de bois	55 t/an
Entreprise Portuaire de Bejaia SPA-13	avenue des frères Amrani- Bejaia	Huiles usagées des ateliers maintenances+ eaux de cale engins flottant	121,623 t
		Batteries usagées	0,984 t
		Filtres, chiffons des ateliers de la maintenance	0,700 t
		Déchets de soins	0,01 t

I.4.3.L'agriculture

L'agriculture occupe une partie importante à Bejaia, elle est pratiquée essentiellement à la basse vallée de la Soummam sur une superficie qui s'étale à 13369.72 ha et caractérisée par une large variété culturale. Le tableau 2 montre la variété des cultures occupant la superficie de la basse vallée de la Soummam dont les oliviers représentent 37.58 % et les fourrages à 27.06 % de la superficie totale occupée.

Tab.2. L'occupation des sols par commune dans la basse vallée de la Soummam (DSA CAMP : 2017-2018)

Superficie (ha)	Céréale	légumes secs	Fourrages	agrumes	culture maraichère	vignes tables	oliviers	figuiers	culture industrielle
Communes									
Bejaia	18	4,50	58	27	40	0,5	88,45	0	0
Amizour	375	30	1775	386,5	160	197	2401	244,5	10
Fenaia Ilmaten	324	5	596,88	93,1	19	1	1258	470	1
Sidi Aich	0	0	15	6	18	0	168,1	5	0
El Kseur	610	5	680	334,5	58	24	951,1	87,56	1
Oued Ghir	415	1	494	174,5	86,63	30	158,5	32,5	0
Total des Exploitations (ha)	1742	45.5	3618.88	1021.6	381.63	683.4	5025.15	839.56	12

Par ailleurs, les exploitants agricoles locaux manipulent des produits phytosanitaires et des engrais pour l'amélioration du rendement des cultures, à savoir:

-Engrais : Selon les données de la campagne agricole de 2017-2018 fournies par la direction des services agricoles de Bejaia, les NPK représentent 47.16% de la quantité livrée avec 7939.7 kg, suivis par les urées de type engrais simple qui représentent 33.56% avec 5650 kg. Ces fertilisants sont les principaux nutriments requis par les plantes. Le tableau 3 montre les quantités des engrais livrées dans la basse Soummam.

Tab. 3. Quantités livrées et utilisée par filière et par commune (DSA ,2017).

Produits		Bejaia	Sidi Aich	El Kseur	Oued Ghir	Amizour	Fenia II-Maten	Total	%
Engrais Minéraux simples Azotés (N) 6139,9 Kg	Urée	26	0	1 603,20	2 400	1 177	443,8	5 650	33.56
	Sulfazote 26 %	-	-	428	-	40	22	490	2.91
Engrais Minéraux simples Phosphatés (P) 915 Kg	TSP	-	-	57	350	-	70	477	2.83
	SSP	-	-	-	250	188	-	915	5.43
Engrais Minéraux Composés 9301,7 kg	PK	-	-	444,5	850	-	67,5	1362	8.09
	NPK	45	-	1 486,70	1 500	4 312	596	7 939,7	47.16

Les engrais sont destinés aux divers types culturaux, le tableau 4 résume les principaux types employés dans la basse vallée et la quantité de chaque type d'engrais consommé. En effet, la Céréaliculture est la plus consommatrice des cultures et dont la quantité totale des différents types d'engrais est de 3042 ql. Les engrais minéraux simples azotés (urées) sont les plus consommés par tous les types culturaux pratiqués dans la vallée avec une quantité de 5648.5ql.

Tab.4.type cultural et engrais utilisés DSA 2017-2018.

Produits		Unité	Céréales	Fourrages	Maraichage (hors PDT)	Raisin	Agrumes	Noyaux-pépins	Oléiculture	TOTAL
Engrais Minérale simple Azoté (N)	Urée	QI	2 025,5	81	441	30	2 657,8	347,7	66	5 648,5
	Sulfazote 26 %	-	362,5	-	-	-	96	-	31,5	490,0
Engrais Minérale simple Phosphaté (P)	TSP	-	210	-	-	-	-	-	-	210,0
	SSP	-	348	10,0	-	-	75	5,0	-	438,0
Engrais Minérale Composé	PK	-	96	-	-	-	1 233	-	33	1 362,0
	NPK	QI	1 652	-	887,9	-	4 655,8	315,0	239	7 749,7

- **produits phytosanitaires** : les produits phytosanitaires sont livrés dans l'ensemble de la plaine avec ses deux états solide et liquide dans des quantités évaluées respectivement à 725 kg et 2970,1 L. La grande partie est destinée à Amizour avec 1925 l de forme liquide et 568 kg de forme solide. Ces grands volumes utilisés dans la basse vallée de la Soummam sont justifiés par la multiplication des domaines agricoles cultivant massivement les fougères, les agrumes, les céréales, les maraichages, les oléicultures...etc. Ces variétés demandent les divers types de produits phytosanitaires. La figure 5 montre que les pesticides les plus utilisées sont les fongicides avec 33% en liquide et 25% en forme solide, les nématicides représentant 31% en liquide et 39 % en solide et enfin les herbicides avec 31% en liquide et 13% en solide.

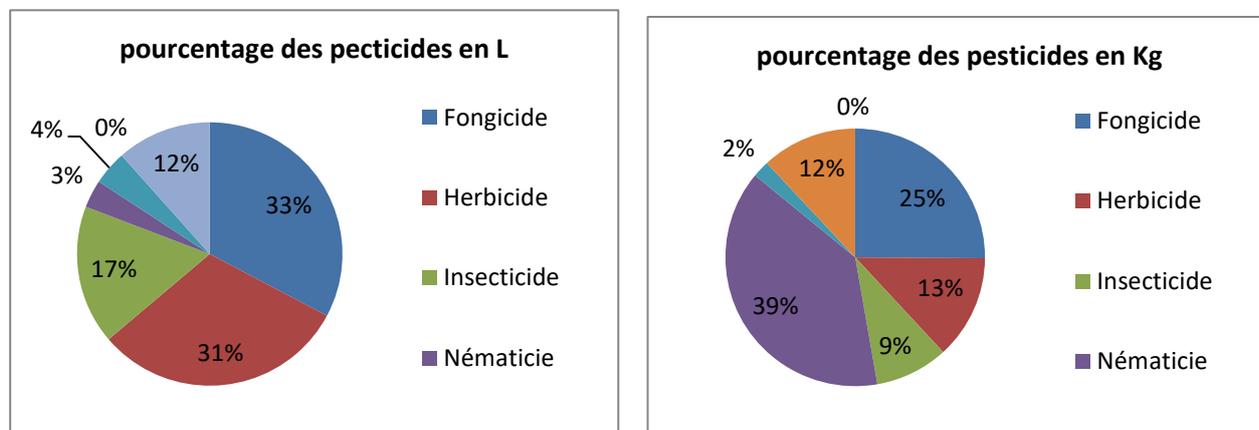


Fig.5. Les quantités des pesticides livrés en L et en Kg (DSA, 2018)

I.4.4. besoin en eau

L'évaluation des besoins en eau potable est une démarche nécessaire pour la bonne gestion des ressources en eau. Il s'agit d'estimer la quantité qu'une population a besoin pour toutes ses activités comme les ménages, commerces, industries et l'agriculture.

Selon Plan National de l'eau réactualisé en 2010, la consommation moyenne des eaux est répartie à 76% pour le ménage, 17% pour l'administration, 4% pour l'industrie et le tourisme et 3 % pour le commerce et l'artisanat.

Le PNE de 2010 a établi une série de prévisions sur l'état des besoins et de la demande en eau potable sur 35 communes de Bejaia relevant du bassin versant de la Soummam. Les prévisions s'étalent de 2010 à 2030 sur un pas de temps de 5 ans. D'une part, les besoins progressent exponentiellement en fonction de la croissance démographique en expansion continue. Ces besoins en AEP sont de 29.4 Mm³ en 2010 et évoluent à 52.6 Mm³ en 2030. D'autre part, la demande est de 60.4 Mm³/an en 2010, elle observe une baisse en 2015 de l'ordre de 2132999 m³ et une relative stabilisation en 2020. Elle repart aussitôt à la hausse en 2025 en suivant l'évolution des besoins. Elle atteint en 2030 les 72.2 Mm³ (Kessasra, 2015).

I.5. Climat de la zone d'étude

Le climat du bassin versant de la Soummam est à dominance méditerranéenne au Nord et Aux conditions continentales à tendance aride au Sud. Il présente de forts contrastes Saisonniers dus à une grande variabilité des précipitations et des températures (Kessasra, 2015).

La connaissance des facteurs climatiques s'avère nécessaire pour mieux Comprendre les phénomènes des écoulements superficiels. Les données des facteurs climatiques précipitation et température, utilisées dans cette étude ont été recueillie à l'Office National de la Météorologie, station de Bejaia Aéroport (Abdellouche et Kerouaz, 2019) et s'étendent sur une période allant de 1996 à 2019.

I.5.1. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude

I.5.1.1. Précipitations

La zone d'étude fait partie des régions les mieux arrosées d'Algérie. Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations sont représentées dans le tableau 5.

Tab.5. Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations à la station de Bejaia

Aéroport (1996 - 2019).

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total
P (mm)	59.38	69.07	95.63	100.9	108.8	113.8	78.06	56.40	44.75	21.7	10.63	14.47	773,4

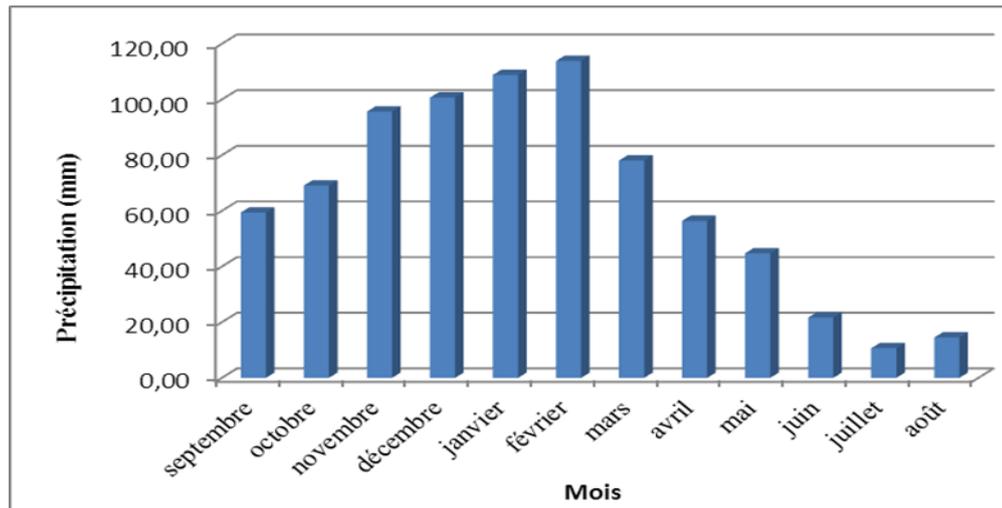


Fig. 6. Variation mensuelle des précipitations à la station de Bejaia Aéroport (1996-2019).

Il en ressort que la pluviométrie moyenne varie entre 113.85 mm et 10.63 mm enregistrée respectivement au mois de Février et de juillet. Les résultats obtenus nous renseignent sur la période de recharge de la nappe. La saison hivernale est la plus arrosée, donc le réservoir aquifère est bien alimenté. Par contre, l'été qui est relativement sec, l'intense évaporation diminue le stockage de la nappe et par conséquent l'augmentation de la concentration de certains éléments chimiques dans l'eau.

I.5.1.2. Température

La température influe sur le bilan hydrologique du fait qu'elle conditionne l'évaporation et l'évapotranspiration. Le tableau 6 présente les températures moyennes mensuelles au niveau de la station de Béjaia Aéroport sur une période allant de 1996 à 2019.

Tab. 6. Les valeurs moyennes mensuelles des températures (1996-2019).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jun	Jui	Aout	moyenne
T (C°)	23.5	20.3	15.7	12.4	11.4	11.5	13.7	15.8	18.7	22.4	25.1	25.9	18.03

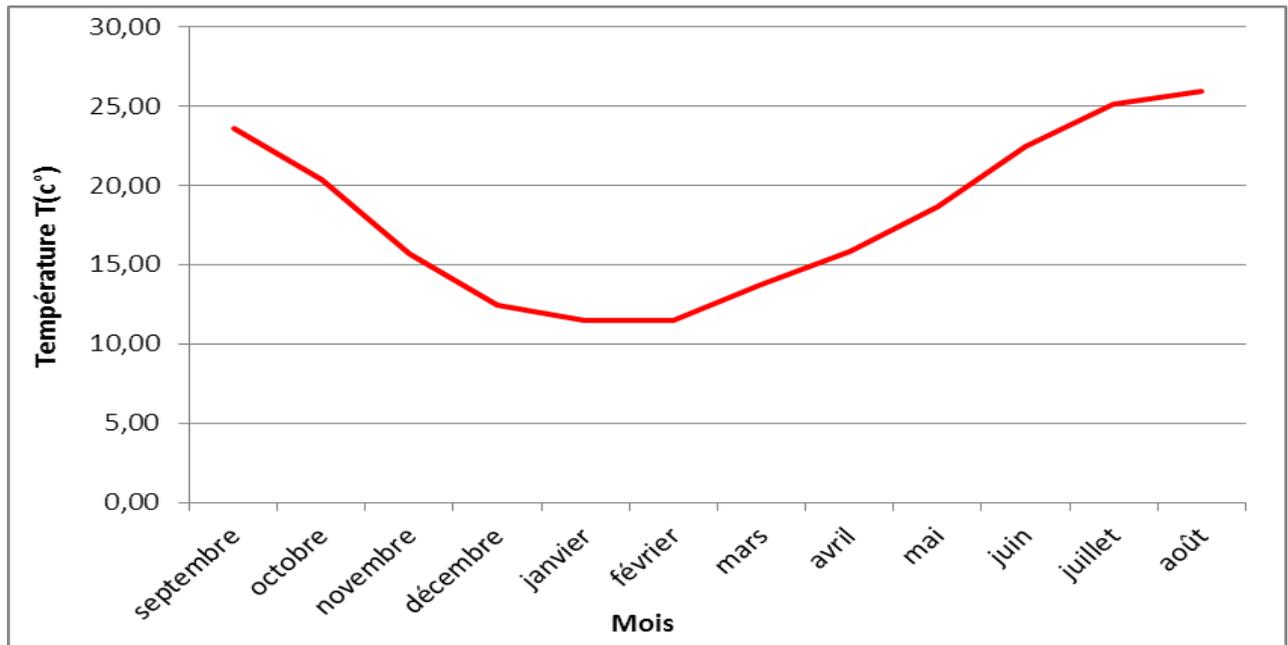


Figure 7. Variation mensuelle des températures à la station de Bejaia Aéroport 1996-2019.

Il en ressort que les températures moyennes mensuelles enregistrent un maximum au mois d'Aout de 25.9 C° et un minimum au mois de Janvier de 11.4 C°.

I.5.2. Estimation du bilan hydrogéologique

Il s'agit de l'évaluation des composantes suivantes : évapotranspiration réelle (ETR), ruissellement (R) et l'infiltration (I) de sous-sol on utilisant les données météorologiques, la méthode de Thornthwaite a été adoptée.

I.5.2.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

La corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'ETP établi par Thornthwaite permet de déterminer le pouvoir évaporant pour chaque mois en se basant sur la formule suivante :

ETP = $16 (10 T / I)^a$ Si $0 \leq T < 26,5^\circ\text{C}$, Sachant que :

ETPc : Evapotranspiration potentielle mensuelle corrigé (mm) **avec** (°C) : Température moyenne mensuelle

I : Somme des indices thermiques i : $I = \sum i$ où $i = (T/5)^{1,514}$ **I** = 90.93

a : Exposant climatique : $a = 1.6 (I/100) + 0.5$ **a** = 1.95

K : Coefficient d'ajustement, facteur correctif mensuel en fonction de la latitude et d'altitude.

L'ETP maximale est calculée à 147.7 mm au mois de juillet et même en mois de juin, Aout et Septembre, elles sont calculées à plus de 109 mm. Cela produit des déficits agricoles surtout que la vallée abrite plusieurs domaines agricoles à Amizour et El Kseur où l'humidité permanente du sol est exigée pour certaines cultures. Cependant, durant les mois d'Octobre à Avril l'évapotranspiration est plus basse, elle est comprise entre 55 et 77 mm.

I.5.2.2. Bilan hydrologique

Le bilan hydrique selon Thornthwaite est basé sur la réserve d'eau facilement utilisable (RFU)

$$P = ETR + R + I$$

P : pluviométrie moyenne annuelle (mm).

R : ruissellement moyen annuel de surface en (mm).

I : infiltration moyenne annuelle (mm).

ETR : évapotranspiration réelle (mm).

Déficit : Déficit agricole (mm).

Excédent : le surplus d'eau (mm).

-Les cas possibles sont les suivants :

- $P > ETP \rightarrow ETR = ETP$, la quantité $(P - ETP)$ alimente la RFU jusqu'au maximum.

- $P < ETP \rightarrow ETR = P$ + toute une partie de la RFU jusqu'à égaliser la valeur de l'ETP.

-Si malgré l'apport de la RFU, L'ETR est toujours inférieure à l'ETP ($ETP < ETR$), il existe un déficit agricole $Da = ETP - ETR$

- $P = ETR$: les précipitations sont justes suffisantes pour alimenter le sol. Il n'y aura de **Wa** pour alimenter la RFU. Pour notre cas on prend le RFU maximum égale à 100mm.

Tab.7. Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite à la station de Bejaia-Aéroport (1996-2019).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Année
P	59,38	69,07	95,63	100,68	108,81	113,85	78,06	56,40	44,75	21,67	10,63	14,47	339,83
ETPc	109,01	77,63	42,30	26,65	23,73	23,11	39,20	55,15	82,73	118,01	147,74	147,15	892,41
ETR (mm)	59,4	69,1	42,3	25,7	23,7	23,11	39,2	55,1	82,7	83,7	10,6	14,5	529,11
RFU	0	0	53,33	100	100	100	100	100	62,02	0	0	0	615,35
Excédent	0	0	0	27,36	85,08	90,74	38,86	1,25	0	0	0	0	243,29
Déficit agricole	49,63	8,56	0	0	0	0	0	0	0	34,32	137,11	132,68	362,3

**Fig.8.** Evolution mensuelle du bilan hydrique selon Thornthwaite pour la Station de Bejaia Aéroport 1996-2019

I.5.2.3. Ruissellement

Le ruissellement (R) peut être calculé par deux méthodes :

-Formule de Tixeron-Berkaloff modifiée par Romantchouk (1974) :

$$\text{Si : } P > 600 \text{ mm} \quad \mathbf{R = P^3 / 3} \quad (1)$$

-Formule de Tixeron-Berkaloff :

$$\text{Si : } P < 600 \text{ mm.} \quad \mathbf{R = P^3 / 3. (ETP)} \quad (2)$$

Avec : **R** : Ruissellement annuelle (mm).

P : Précipitations annuelles (mm).

ETP : évapotranspiration potentielle (mm).

Les précipitations enregistrées dans la région de Bejaia dépassant 600 mm, elle sont quantifiées à 773,4 mm, donc la formule utilisée Est celle de Tixeront (1), et le Ruissellement est estimé à 154.20mm, soit 19.9 % du volume des précipitations tombées dans la région.

I.5.2.4. Infiltration

La quantité d'eau qui s'infiltré dans le sous-sol et alimente le sol Aquifère souterrain a été estimée par la formule suivante :

$$\mathbf{P = ETR + R + I} \quad \text{Où} \quad \mathbf{I = P - (ETR + R)}$$

Avec :

P : précipitation (mm)

ETR : déficit d'écoulement ou (D) en (mm)

R : ruissellement (mm)

I : infiltration (mm)

Tab.8. Variation de l'infiltration à la station de Bejaia Aéroport dans les périodes (1996- 2019)

P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
773.40	529,67	154.20	89.53

Une fois la recharge dépasse la RFU, le surplus d'eau s'écoulera vers la nappe sous forme d'infiltration, cette dernière a été estimée dans la basse vallée de la Soummam à 89.53 mm, soit 11.5 % du volume des précipitations tombées dans la région. L'infiltration est donc propice au renouvellement des stocks d'eau de l'aquifère.

I.6. contexte géologique et hydrogéologique

I.6.1. cadre géologique

Les régions littorales de l'Algérie orientales sont placées dans l'érogène alpin périméditerranéen, La vallée de la Soummam à Bejaia constitue une limite méridionale du Tell Algérien, siège de charriage important datant de l'Oligocène et du Miocène.

Le bassin est formé par des dépôts alluvionnaires anciens et actuels (figure 9) sur le lit majeur de l'oued Soummam, un substrat siliceux sur tout le versant exposé au nord et un substrat calcaire dominant la majeure partie du versant exposé au sud, avec une zone marno-argileuse du Miocène et Pliocène s'étendant d'El Kseur à Sidi Aich. A la périphérie de ce bassin, on note des ensembles pétrographiques ; siliceux pour le massif d'Akfadou et du Djurdjura, calcaire pour le Gouraya et la chaîne des Babors. (Mouali, 2009).

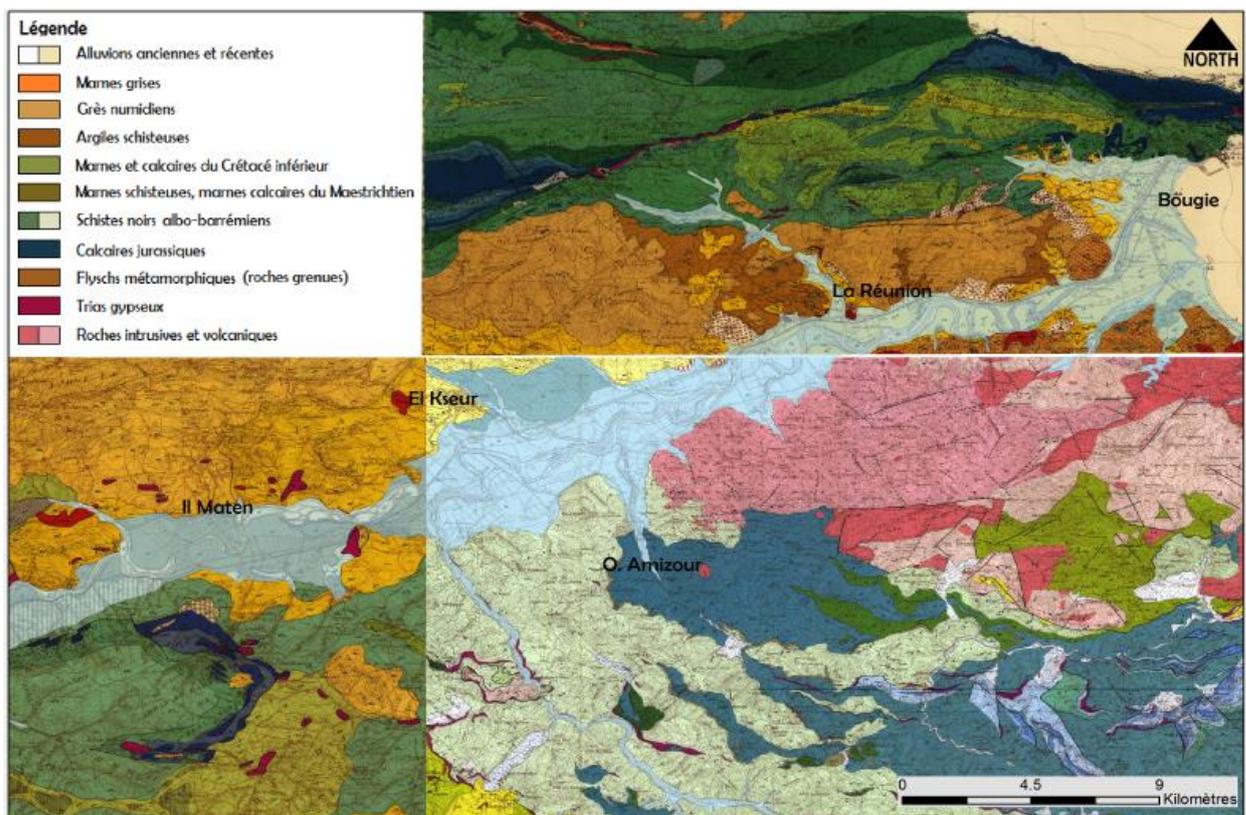


Fig.9. Carte géologique de la basse vallée de la Soummam et ses massifs environnants, Arc GIS (1/50 000e). (Kessasra, 2015)

La série stratigraphique des formations affleurant en partant de la plus ancienne, est la suivante :

-Des formations triasiques : représentées par un faciès tellien de formations gypso-salines à argiles versicolores cargneules et dolomies. Il constitue généralement des pointements locaux dans la région de Sidi Aich et Il-Maten (Saou, 2012).

-des formations jurassiques : comprend un Lias, qui à la base est constitué de calcaires marneux, au-dessus desquels se montrent des calcaires durs renfermant des parties siliceuses sous forme de brèches (Kessasra, 2006). Et un jurassique moyen (Dalloni, 1939). Supérieur (ficheur, 1891), comprend à la base des grès rouges et poudingues, au-dessus desquels viennent des schistes et des grès micacés. Le terme de passage du jurassique au crétacé (Néocomien) est formé de calcaires marneux et de marnes à débris noduleux.

-des formations tertiaires : comprenant plusieurs étages on cite :

-Le Pliocène : affleure comme formations marines marneuses et faciès continental formé de brèches de pente recimentées, passant sous des argiles bleuâtres, et de poudingues, qui apparaissent dans l'oued Srir à l'Ouest de Bejaia ,et en rive droite de la Soummam près du village d'Ighil ou Berouak (CGG, 1970) .

-le Miocène : qui est très répandu sur la rive gauche de la vallée, oued Ghir et Sidi Aich sous forme brèches, sables et grès surmontés d'argiles bleues, marnes gréseuses, et conglomérats.

- L'Oligocène (Nummulitique) supérieur : apparu au nord de Sidi-Aich et El-Kseur et présente un faciès flysch c'est à dire une alternance de grès quartzeux et Marnes schisteuse avec à la base des bancs de grès grossiers lenticulaires.

- Le Crétacé : montre une diversification de faciès :

-En rive Gauche de la Soummam un Faciès marno-schisteux avec de nombreuses lentilles de conglomérat mais également des marno-calcaires lenticulaires et des faciès de flysches grésos-quartziteux en fin de la série.

-En rive droite sont essentiellement des schistes noirs avec parfois de minces intercalations de grès fin quartzeux.

- Des alluvions quaternaires : elles occupent le fond de la cuvette creusée par la Soummam ,sont généralement sur les bordures, des éboulis de pente particulièrement développés

en rive droite aux abords de Sidi-Aich et au centre des alluvions, constituées de galets, graviers et sables avec des intercalations argileuses. (Saou, 2009).

I.6.2. hydrogéologie de la vallée

Les cartes géologiques de Bejaia nous ont permis de constater que la région se situe dans un contexte favorable à la formation de nappes d'eaux souterraines. La prospection géophysique (Compagne de la Géophysique Générale, 1970) et les différents sondages effectués dans la plaine alluviale ont montré la présence, sous les alluvions, d'une formation grossière constituée de galets, de graviers et de sable attribuée au Miocène. Ces deux formations seraient en contact hydraulique et parfois séparées par un niveau argileux (Clinckx, 1971).

La zone étudiée est constituée de formations aquifères composées de sables, graviers, galets, et limons. Ces derniers, peu épais en surface dans la partie amont Sidi Aich (figure 10), Les éléments grossiers sont essentiellement calcaireux et gréseux. Avec une épaisseur maximum de 40m. Les alluvions du centre sont constituées de galets, graviers et sables avec des intercalations argileuses.

L'alimentation de la nappe alluviale de la basse Soummam se fait en grande partie par les précipitations efficaces et par les eaux superficielles provenant du réseau hydrographique du bassin où les eaux souterraines de la Moyenne Soummam au verrou hydraulique entre Takrietz et Sidi Aich rejoindront l'oued à Sidi Aich. A cet égard, les échanges oued-nappe sont tout aussi importants et les axes d'alimentation latérale provenant des massifs environnants (Il-Maten, Timizert, El Kseur, Amizour, Tala Hamza) ont été identifiés à partir de la carte piézométrique établie en mars 2011 (Kessasra, 2015).

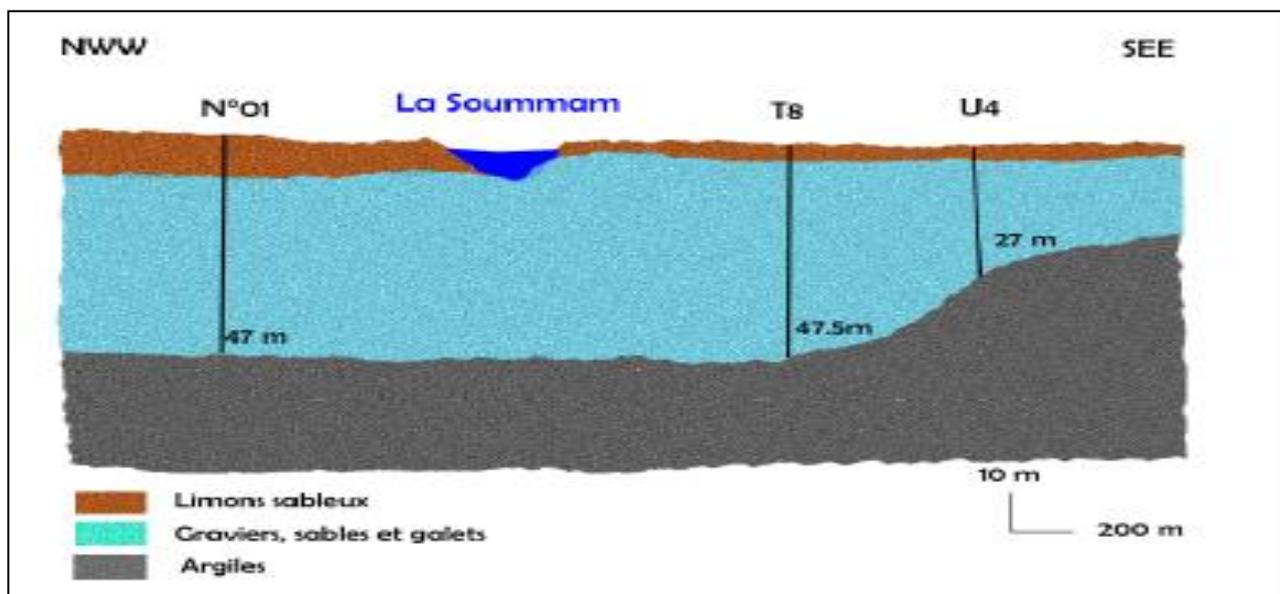


Fig.10. coupe géologique transversale de la basse vallée de la Soummam (Kessasra, 2015).

I.6.3. piézométrie de la nappe alluviale

Pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique de la basse vallée, une carte piézométrique de la période des hautes eaux (figure 11) a été établie en mars 2011. On peut y dégager deux principales directions d'écoulement souterrain (Clinckx, 1971, Kessasra, 2015):

- Suivant la direction longitudinale, l'écoulement de la nappe se fait du Sud-Ouest au Nord-Est conformément au sens d'écoulement des eaux superficielles. Il caractérise la circulation principale des eaux du remplissage alluvial.

- Suivant la direction transversale à l'axe de la vallée, l'écoulement de la nappe se fait des cônes de déjection, des bordures vers le centre de la plaine suivant deux sens d'écoulement : nord-sud et sud-nord, ces deux directions de circulation traduisent les apports latéraux à partir des versants qui bordent la nappe du remplissage alluvial.

De ce fait on peut ressortir deux modes d'alimentation de la nappe :

- Une alimentation provenant des versants marquant les frontières naturelles du système souterrain, lorsque les isopièzes sont parallèles à la limite physique. Une alimentation continue étendue sur un axe de quelques dizaines de kilomètres sur les deux rives. Il en existe cinq, à l'instar de l'axe El Kseur-La Réunion (20 km) limité au Nord par les versants sud de Dj Arbalou.

- D'autre part, une alimentation ponctuelle et réduite localisée au droit des cônes de déjection des principaux affluents de la basse Soummam.

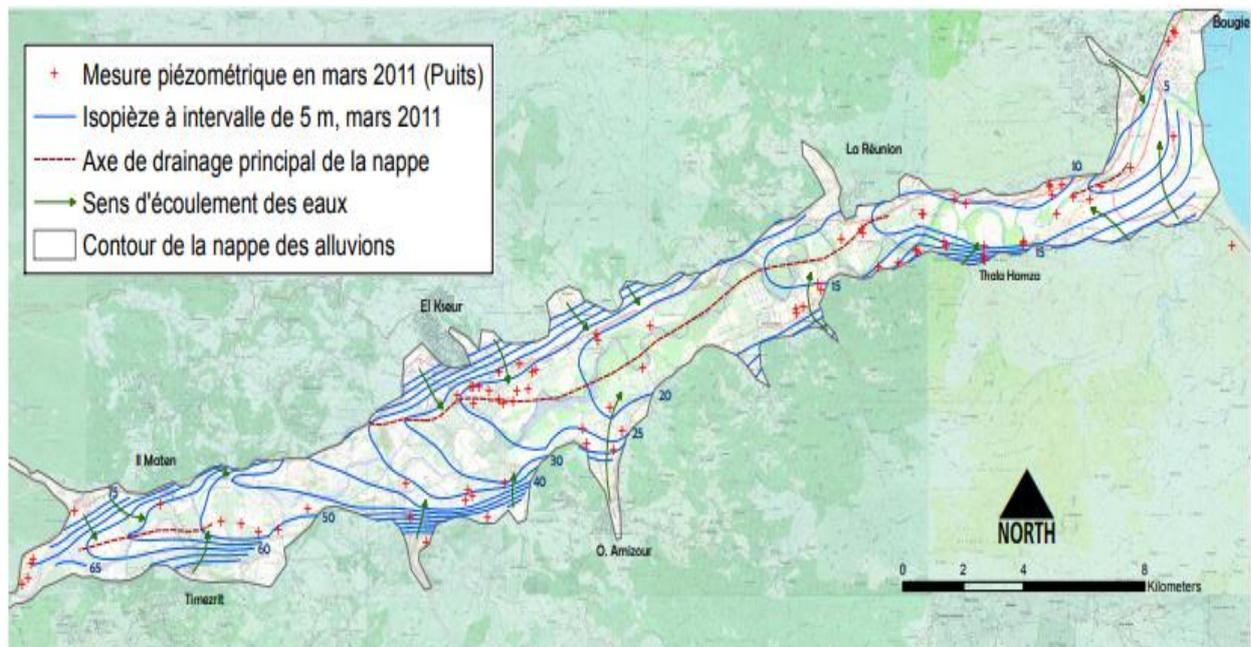


Fig.11. carte piézométrique de la basse vallée de la Soummam en période des hautes eaux, Mars 2011 (Kessasra, 2015).

I.7. Chimie des eaux

La qualité des eaux dépend de sa composition physico-chimique, une eau est considérée propre et de bonne qualité lorsque ses paramètres physico-chimiques conviennent aux normes de potabilité des eaux. Les résultats obtenus par Kerouaz, Abdellouche en 2019 sont présentés dans le tableau 9.

I.7.1. paramètres physiques

-Température : Les températures enregistrées oscillent entre 15.8 et 22.4 C° dans les eaux souterraines et conformes aux normes de l'OMS. En effet la minimale de 15.8C° est enregistrée durant la période des hautes eaux.

-potentiel hydrogène pH : les mesures du pH oscillent entre 8.04 à l'embouchure et 9.09 à Sidi Aich, elles montrent que ces eaux possèdent généralement un pH qui est conforme avec l'intervalle adopté selon les normes OMS qui définit $9 \leq \text{pH} \leq 6.5$. Toutefois, il faut signaler que le pH de ces eaux demeure légèrement alcalin, cette faible variation peut être attribuée à l'effet tampon des ions bicarbonatés contenus dans les marnes et calcaires du Crétacé bordant l'oued essentiellement à Sidi Aich et Fenia II-Maten. (Abdellouche et Kerouaz, 2019).

-conductivité électrique : Les valeurs à la basse vallée oscillent entre 363 et 5300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mesurées respectivement à Tala Hamza et Remila. Selon la norme fixée par OMS, la conductivité ne doit pas dépasser 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20 C° pour les eaux souterraines. Les teneurs élevées sont expliquées par une forte minéralisation des eaux. En effet la conductivité baisse

depuis l'amont vers l'aval sauf une brusque hausse constatée à l'embouchure expliquée par la contribution des effluents bruts rejetés dans le milieu récepteur sans traitement préalable.

-oxygène dissous : L'oxygène dissous mesuré dans la nappe varie de 2.69 mg/l à 16.53 mg/l enregistré respectivement à Tala Hamza et Béjaia. Globalement la valeur 2.69 mg/L indique une eau fortement polluée mais de manière réversible (Kessasra, 2015). Ces eaux souterraines présentent une consommation de l'oxygène dissous par les matières oxydables qui provient des rejets urbaines. Des teneurs supérieures à la teneur naturelle de saturation en oxygène comme 16.76 mg/l enregistrée à Bejaia. La nature des formations géologiques est à l'origine des variations en OD. Les fortes concentrations reflètent un horizon perméable et les faibles teneurs un niveau peu perméable à imperméable. Toutefois, ces tendances ne sont pas relevées dans la nappe. En effet, la nappe dans l'axe El Kseur-Oued Ghir est recouverte de limons d'une épaisseur moyenne de 20 m, conjugué à la présence de passées argileuses donc une faible perméabilité constatée (Kessasra, 2015).

Tab.9. variation des paramètres physiques des eaux souterraine de la basse vallée de la Soummam (Kerouaz et Abdellouche, 2019).

paramètre	valeur	Norme fixée par OMS
Température C°	Min : 15.8Max : 22.4	25
Conductivité électrique $\mu\delta/\text{Cm}$	Min : 363Max : 5300	1200
Potentiel hydrogène pH	Min : 8.04Max : 9.09	$9 \leq \text{pH} \leq 6.5$
Oxygène dissous O ₂ mg/L	Min : 2.69Max : 16.73	≥ 7

1.7.2. Paramètres chimiques

Beyragued et Boudiaf en 2016 ; dans leurs étude sur la qualité physicochimique des eaux de la basse vallée de la Soummam ont trouvé que les eaux souterraines sont caractérisées par deux faciès chimiques : Chloruré sodique et potassique et Bicarbonaté calcique et magnésien. En effet, la moyenne des chlorures est de 1306 mg/l, l'axe de Bejaia a enregistré 3960.2 mg/l comme valeur maximale, plus on rapproche de l'embouchure plus les teneurs enregistrées augmentent, confirmant la source de salinité (la mer). Selon l'OMS, Il n'y a pas de ligne directrice fixe, mais on peut noter un goût à partir de 250 mg/l.

Des fortes concentrations en bicarbonate de l'ordre de 1000 mg/l, la moyenne est de 811.9 mg/l. HCO₃ dans l'eau souterraine provient essentiellement de la dissolution des roches

carbonatées (calcaires, dolomies). De plus des fortes concentrations en sulfates sont enregistrées au nord et à l'ouest de la basse vallée de la Soummam avec respectivement 480 mg/l et 520 mg/l. Ces teneurs dépassent largement la norme tolérable par l'OMS de 250 mg/l. Les fortes concentrations sont déterminées à Sidi Aich et El Kseur, justifiées par la pollution agricole due à l'utilisation des engrais, mais aussi la mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques (gypse et pyrite).

L'analyse montre la présence du calcium avec un minimum de 155.3 mg/l à Tala Hamza et un maximum de 549 mg/l au centre de la basse vallée entre Sidi Aich et El Kseur. La moyenne des teneurs est de 260,5 mg/l. La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à une origine naturelle : la dissolution des roches évaporitiques. Mais aussi le calcium provient également des eaux résiduelles industrielles rejetées dans le milieu naturel (Rodier, 1996). La concentration moyenne du magnésium est de 87.2 mg/l, les teneurs oscillent entre 45.4 mg/l et 197.5 mg/l enregistrées respectivement à Tala Hamza et l'embouchure. En général, les résultats obtenus ne dépassent pas la norme fixée par l'OMS qui est de 150 mg/l sauf que certaines forges à l'aval. De même le Sodium est enregistré avec des concentrations qui varient de 200 mg/l à 1800 mg/l à Oued Ghir et El Kseur. La moyenne est de 846 mg/l indiquant une source de pollution agricole (Engrais NPK). La répartition du potassium est faible, la valeur maximale est enregistrée à Sidi Aich et à El Kseur de 20 mg/l pendant que la moyenne des teneurs est de 12.2 mg/l, malgré l'utilisation des engrais NPK, sa concentration dans les eaux demeure faible. Cela peut être expliqué du fait que le potassium est facilement adsorbé et recombinaison dans les sols donc il ne se déplace pas dans l'eau.

I.7.3. Composés azotés

Pour comprendre le comportement et le processus de transformation des composés azotés, une étude comparative entre les concentrations obtenues en 2013 par Kessasra et celle de 2019 par Kerouaz et Abdellouche a été menée, les résultats sont présentés dans le tableau 10.

I.7.3.1. Nitrates (NO_3), Les valeurs obtenues par Kessasra en 2013 oscillent entre 8 et 245.2 mg/l enregistrés respectivement aux puits Djamaa à Mellala et 7 villages à Timizert. Kerouaz et Abdellouche en 2019 ont trouvés une valeur minimale de 3.92 au puits Djamaa et une teneur maximale de 131.5 mg/l au puits 7 village. Entre l'année de 2013 et 2019, les concentrations sont très variables, comme au puits Remila mesuré à 45.62 en 2013 et a diminué à 18.09 mg/l en 2019. En effet la majorité les teneurs ont dépassés les concentrations admissibles par l'OMS de 50 mg/l. elles sont justifiées par l'utilisation des engrais et fertilisants azotés et les effluents des rejets urbains et industriels.

I.7.3.2.Nitrites (No²), Kessasra en 2013 a trouvé les teneurs en nitrites entre 0.02 à 2.07 mg/l enregistrées respectivement au puits Djamaa et Cevital à Mellala. Kerouaz et Abdellouche ont trouvé la concentration maximale au puits Remila à Sidi Aich avec 2.11mg/l. ces teneurs ont dépassé la norme fixée par l’OMS à 0.2 mg/l. ces concentrations proviennent d'une oxydation incomplète de l'ammonium qui apparait dans les rejets urbains des grandes communes entourant la vallée.

I.7.3.3.Ammonium (NH⁴), Les concentrations en 2013 varient entre 0.021 et 0.173 mg/l, la majorité des puits présente des concentrations nulles. Les teneurs en ion d’ammonium sont conformes à la norme fixée par l’OMS à 0.1 mg/l à l’exception de Cevital qui a enregistré 0.173 mg/l en 2013 et 0.120 mg/l en 2019

Tab.10.variation des concentrations des composés azotés entre mars 2013 et mars 2019

puits	NO3 (mg/l)		NO2 (mg/l)		NH4 (mg/l)	
	2013	2019	2013	2019	2013	2019
Remila sidi Aich	45.62	18.09	0.06	2.11	0	0
7villages Timizert	245.4	131.5	0.03	0.002	0	0
HAYANI	nd	5.19	nd	0.008	nd	0
MOULAY	nd		nd		nd	0
RAMDANI	75.3	4.70	0.84	0.024	0.021	0
DJAMAA	8.40	3.92	0.02	0	nd	0
CEVITAL	0	4.24	2.07	0.03	0.173	0.120
AMZEL	nd	81.79	nd	0	nd	0
EAC5	nd	78.72	nd	0	nd	0
EAC3	nd	59	0.11	0	0.062	0
SAIDJ	37.7	14.71	0.04	0	0	0
MENDI	17.7	14.84	0.03	0.01	0	0
SUISSI	8	5.14	nd	0.094	nd	0

Conclusion

Notre zone d'étude comprise entre Sidi Aich et Bejaia s'étend sur une longueur d'environ 35 km. Caractérisée par un réseau hydrographique assez dense, elle jouit d'un climat méditerranéen chaud et sec en été et froid et humide en hiver, ses précipitations sont estimées à 773.4mm en moyenne, et une température moyenne de 18.03C°. La vallée de la Soummam est caractérisée par une complexité géologique, des alluvions anciennes et actuelles constituant des formations aquifères de sables, graviers, galets, et limons. La composition chimique des eaux souterraines présente une minéralisation plus ou moins forte, acquise en grande partie par la dissolution chimique naturelle des carbonates, des gypses triasiques ainsi que par des activités anthropiques essentiellement l'agriculture, l'industrie et les rejets urbains non traités

Partie II

Matériel et méthodes

II.1.Introduction

La pollution des eaux souterraines par des substances organiques et minérales a été mise en évidence sur de nombreux sites. Les comportements de ces substances dans les milieux souterrains sont très complexes à étudier et les modèles numériques sont utilisées pour mieux comprendre leur déplacement, et éventuellement, prédire l'évolution de la pollution (Atteia, 2011). Un modèle est donc un outil désigné pour représenter une version simplifiée de la réalité (Dassargues, 1995), basé sur des approximations de la réalité, il ne représente pas donc la réalité. L'interprétation se fait en prenant en considération ces approximations. Le métier du modélisateur est de simplifier cette réalité, représenter les processus en forme simple, simplifier la répartition spatiale et permettre l'analyse en intervalles de temps (Kessasra, 2015). Bear en 1993 avait simplifié les objectifs d'une modélisation hydrogéologique en trois éléments :

- mieux comprendre le fonctionnement du système.
- fournir des informations nécessaires à la mise en œuvre d'un dispositif de mesures (pompages, traçages, etc.).
- réaliser des prédictions sur le comportement du système considère en réponse à des sollicitations.

Un modèle de transport de solutés décrit le mouvement des solutés dissous dans l'eau souterraine. Ces solutés dissous peuvent inclure des ions majeurs (Calcium ou sulfate), des métaux lourds (fer, cuivre, cadmium) et des constituants biologiques organiques miscibles (BTEX, LEPH). Dans le contexte d'évaluation environnementale, "les solutés" sont aussi mentionnés comme polluants ou contaminants (Wels, 2012). Le transport de solutés dans l'eau souterraine est contrôlé par des processus physiques et de transport de masses géochimique (Domenico et Schwartz, 1990). Tous les solutés sont influencés par les mêmes processus physiques de transport, à savoir l'advection et la dispersion. Au contraire, les paramètres de transport géochimique dépendent dans le soluté de l'intérêt aussi bien que des conditions géochimiques dans l'aquifère.

II.2. Modèle de la basse vallée de la Soummam

Kessasra en 2015, a mis en œuvre un modèle de simulation des eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam. Il a été actualisé à plusieurs reprises (Chetibi et Seraoui, 2015, Kessasra et al, 2021). Le modèle est limité verticalement par un substratum constitué de calcaire, de grés et de grés schisteux affleurant sur la rive droite de la vallée, il est considéré comme une limite peu perméable à imperméable et est retenu, de ce fait, comme étant une limite à flux nul. En surface, la nappe est généralement libre et sa recharge est exprimée par un taux d'infiltration. Il s'agit

d'une condition de débit répartie uniformément sur la surface du toit de la nappe libre. Une limite à potentiel imposé est appliquée généralement aux mailles-rivières et sur la frange littorale de la plaine de Bejaia, qui s'étend sur une longueur de 10 km. Cela suppose que le niveau de l'eau y demeure constant tout au long des simulations. La charge hydraulique est indépendante des conditions de circulation dans la nappe (De Marsily, 1981). Les échanges oued-nappe sont loin d'être négligeables surtout lorsqu'il s'agit d'une nappe alluviale dans un milieu poreux au sein duquel se trouve la vallée de la Soummam. Il en est de même sur les bordures de la nappe, où l'alimentation latérale aux axes de Remila, Timizert, El Kseur-Oued Ghir, Amizour-Aguellal et Tala Hamza ont été définis comme le montre la Figure 12. Les conditions aux limites définies dans ce modèle sont des conditions à flux non-nul.

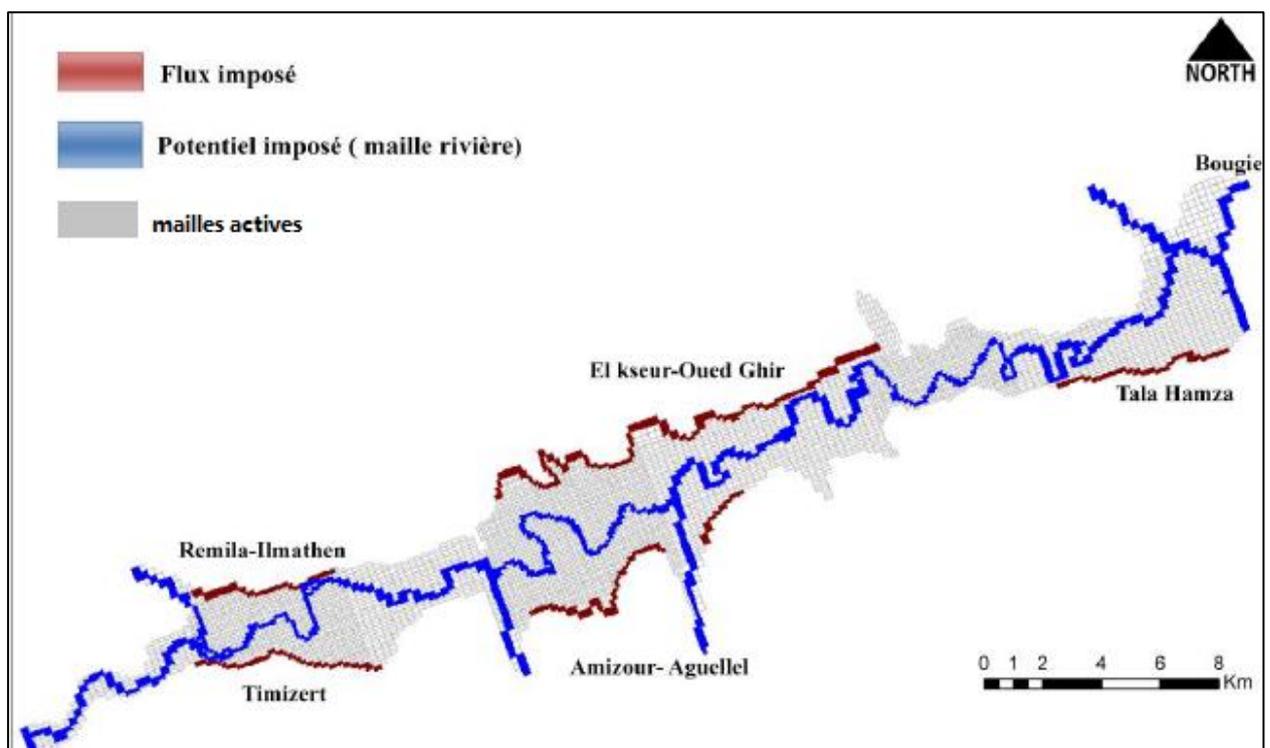


Fig.12. Conditions aux limites de la basse vallée de la Soummam (Kessasra, 2015).

La piézométrie mesurée en mars 2011 est introduite dans le modèle, elle permet d'initialiser les calculs du niveau piézométrique, et servira comme valeur de référence dans le processus de calage. La perméabilité de la basse vallée de la Soummam est comprise entre 0.05 m/s à Remila et 5×10^{-5} m/s à Béjaia et Tala Hamza. 05 zones de perméabilité ont été définies, à savoir :

- Zone 1** : zone à très forte perméabilité dont la moyenne et de l'ordre de 9×10^{-2} m/s. il s'agit d'une zone étendue allant d'El Kseur à Oued Ghir et englobant la région d'Amizour ;
- **Zone 2** : zone à forte perméabilité avec, en moyenne, un ordre de grandeur estimé à 6.5×10^{-2} m/s ; elle s'étend sur la région d'Aguellal.

- **Zone 3** : sa perméabilité est considérée aussi comme étant forte, elle est de l'ordre de 5×10^{-3} m/s et s'étale de Sidi Aich à Il Maten.

- **Zone 4** : zone à perméabilité moyenne avec $1,7 \times 10^{-4}$ m/s autour du Village de Mardj Oumène.

- **Zone 5** : zone à faible perméabilité dont la moyenne est indiquée à 5×10^{-5} m/s, elle s'étend d'Oued Ghir à l'embouchure passant par la région de Tala Hamza.

II.2.1. Présentation des logiciels PMWIN et MT3D

Ces mesures analytiques peuvent être simulées par des outils numériques, nous avons choisi le MT3D, qui est un module intégré dans le code PMWIN (Modflow). C'est un modèle de transport de soluté, qui a été établi par Zheng en 1980 et amélioré à plusieurs reprises, dont les principales fonctions d'entrées principales sont les suivantes :

Initial concentration

Les concentrations initiales des nitrates sont considérées comme un paramètre d'entrée primordial pour le modèle géochimique. L'introduction de ces teneurs mesurées dans le MT3D consiste à réaliser une spatialisation des nitrates couvrant la nappe. La configuration du zonage consiste à attribuer à chaque zone une moyenne de concentration pour des ouvrages d'eau analysés ayant des concentrations assez proches. Cependant, si les valeurs mesurées sont assez disparates, elles en seront isolées

Un zonage en teneurs initiales a été appliqué sur la nappe comme présenté dans la figure 13 à l'exception des puits RAMDANI et EAC qui présentent de très fortes teneurs. Pour cela, nous avons opté pour les isoler, chacun, dans une zone séparée. La nappe est, dès lors, alimentée par les flux de nitrates calculés sur chaque maille de la surface modélisée. (Chetibi et Seraoui, 2015).

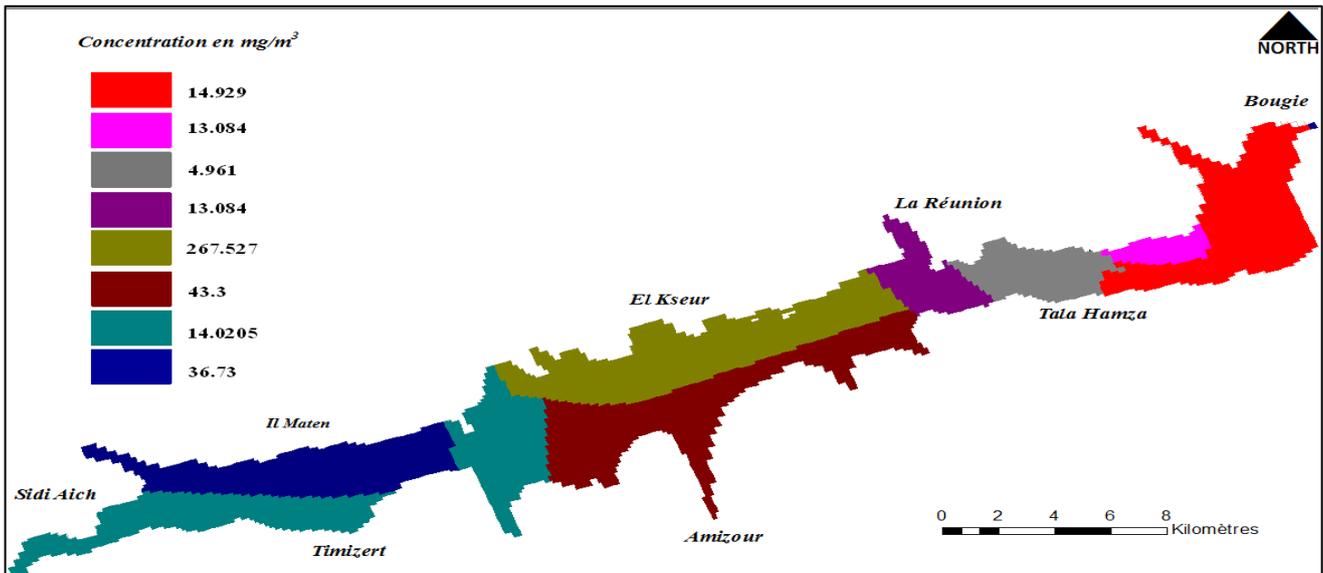


Fig.13. Concentrations initiales en NO_3 en régime permanent dans la nappe de la basse vallée de la Soummam (Chetibi, Seraoui, 2015).

-Rivière

Suite à un manque de mesures en Nitrates des eaux de pluie (recharge), nous étions contraints de considérer que les concentrations en NO_3 sont nulles. En revanche, les concentrations en nitrates dans les eaux superficielles ont été prises en compte et appliquées sous forme de 3 zones (Figure 12), le modèle géochimique de la nappe ainsi construit est en interaction directe avec les eaux superficielles (Chetibi et Seraoui, 2015). En effet, les données disponibles ont permis d'attribuer des valeurs moyennes à chacune des zones comme le montre la figure 14.

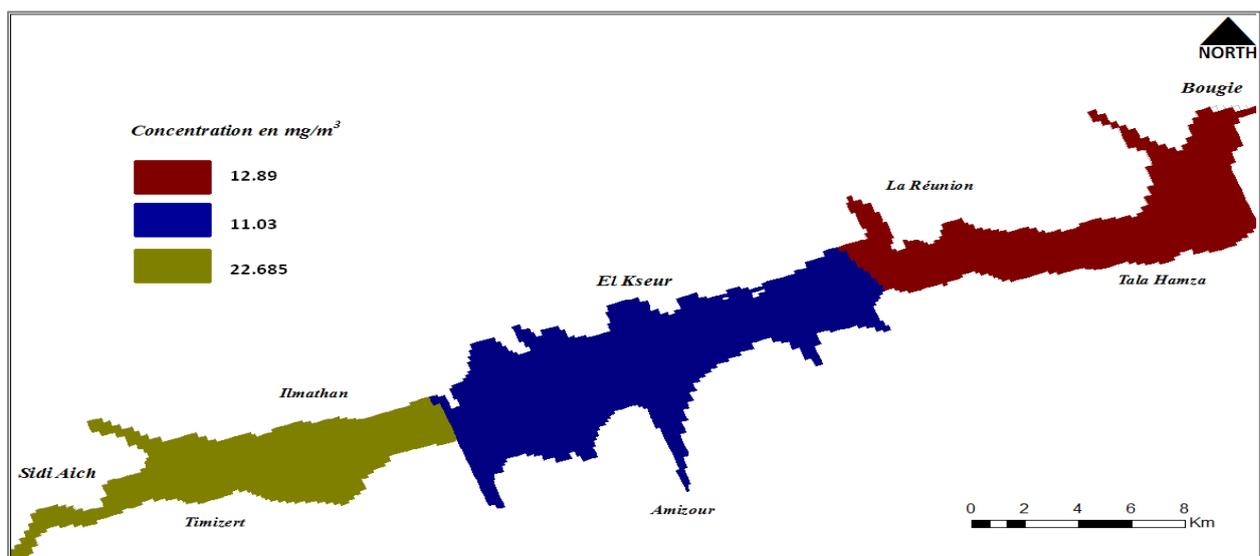


Fig.14. Concentrations mesurées en NO_3 dans les eaux de surface (Chetibi, Seraoui, 2015).

-concentration Observations :

Les forages d'observations des concentrations en nitrates ont été spécifiés dans cette boîte de dialogue. Les mesurées de 2013 ont été introduites dans le modèle en vue de permettre de calculer les teneurs. Ils sont au nombre de 15 forages réparties de Sidi Aich à Bejaia. La répartition spatiale des ouvrages témoins est indiquée sur la carte insérée dans la figure 14.

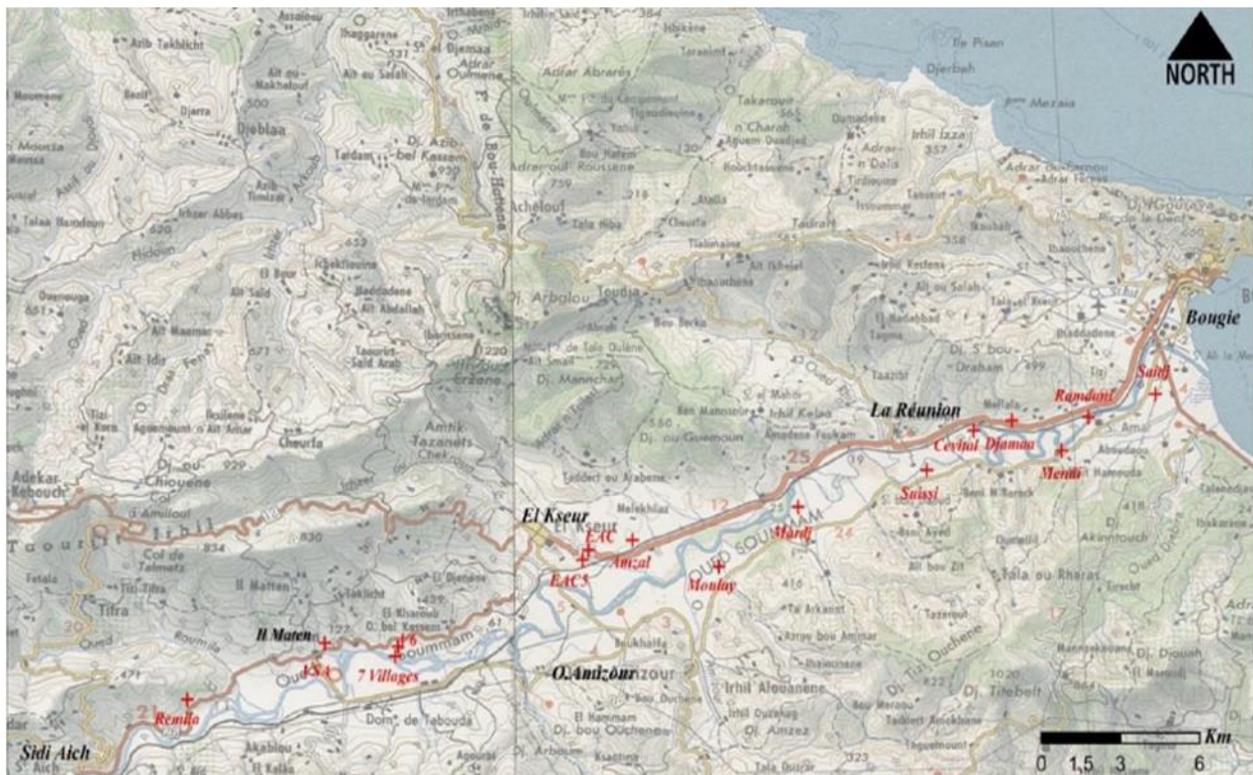


Fig.15. Répartition spatiale des ouvrages témoins dans la basse vallée de la Soummam (chettibi , Seraoui, 2015).

II.3.Stratégie des simulations

II.3.1. Modèle hydrodynamique

Faisant suite aux travaux antérieurs dans la basse vallée de la Soummam, trois scénarios hydrodynamiques ont été établis dans la présente étude comme suit :

-Scénario 1 (2011-2019) : dont un calage a été achevé à partir des niveaux piézométriques mesurés en mars 2019. L'objectif du re-calage est d'évaluer la pertinence de l'ancien modèle de 2015 dans ses prévisions en recalant les niveaux piézométriques calculés sur ceux mesurés à cette période dans le cas des forages présentant de grands écarts. Le calage a été entrepris à partir d'un ajustement de deux paramètres clés, à savoir, les perméabilités et les pompages. II

permettra de décrire la réaction de la nappe face à un pompage sur une période de 8 ans et avec un pompage de l'ordre de 45.8 Mm³/an.

-Scénario 2 (2019-2030) : il s'agit d'une simulation prédictive qui s'étale jusqu'en 2030 avec un débit de pompage en nette baisse, évalué à 40.19 Mm³/an.

-Scénario 3 (2030-2040) : il s'agit d'une simulation prédictive jusqu'en 2040 avec un débit de pompage en nette croissance, soit le double simulé par rapport au scénario précédent, il se table à 90.16 Mm³/an.

II.3.2. Modèle du transport des nitrates

Ce modèle vise à modéliser le comportement des nitrates au sein d'un milieu souterrain dans la zone saturée de l'aquifère des alluvions, associé aux fluctuations de son niveau piézométrique. Le but est d'améliorer le modèle établi dans la nappe de la Soummam, mettre en évidence l'évolution et la prédiction numérique de ce polluant au sein de la nappe (Chetibi et Seraoui, 2015). Un calage des concentrations initiales a été entrepris en régime permanent, en utilisant des conditions moyennes de la nappe. Suivi d'un re-calage des concentrations calculées en nitrates comparées à celles mesurées en mars 2019. Cette étape permettra de tester la robustesse du modèle des nitrates établi en 2015 et de simuler l'évolution numérique des concentrations sur une base de plus en plus fiable. En effet, l'évolution des teneurs en NO₃ et son transport dans la nappe mioplio-quaternaire de la basse vallée de la Soummam a été simulée sur une période de 29 ans. Le modèle a été donc exploité sur 3 scénarios, le premier scénario qui va de 2011 à 2019, le deuxième scénario qui s'étend de 2019-2030 et le dernier qui va de 2030 à 2040. Les issues du modèle en régime transitoire apporteront des réponses sur le degré de vulnérabilité de la nappe de la Soummam face aux pollutions en nitrates.

II.3.2.1. Cartographie des nitrates en 2019

Une étude portant sur la qualité des eaux souterraines et la cartographie des nitrates dans les eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam a été menée (Kerouaz et Abdellouche, 2019) Les échantillons ont été prélevés dans 13 puits situés le long de la basse vallée, entre Sidi Aich et Bejaia à l'embouchure. Les résultats obtenus présentés dans la figure 16, montrent une variabilité des concentrations tout au long de la zone d'étude, ce qui confirme l'instabilité et la grande hétérogénéité des teneurs ions NO₃ dans les eaux souterraines. Ces teneurs oscillent entre 3.9 et 131.5 mg/l, mesurées respectivement dans les puits Djemaa et 7 villages, et d'une moyenne de 27.86 mg/l. La carte d'iso-teneurs montre 3 trois zones de concentrations distinctes, à savoir ;

-zone hautement concentrée : située entre Fenaia II Maten et El Kseur, les concentrations sont assez fortes avec une moyenne de 89.74 mg/l. Les teneurs varient de 59 à 131.5 mg/l et ont été mesurées respectivement à EAC3 et 7Villages. Elle proviennent essentiellement des rejets d'eau domestiques et activités agricoles de la région.

-zone moyennement concentrée : elle est comprise entre Aguellal et Amizour principalement sur la rive droite de la Soummam avec une moyenne de 13.58 mg/l. Les concentrations varient de 5.2 à 21.9 mg/l mesurés respectivement aux puits Hayani et Moulay.

-zone faiblement concentrée : elle est comprise entre Tala Hamza et Bougie avec une moyenne de 7.80 mg/l. Les nitrates dans cette partie de la nappe oscillent entre 3.9 et 14.8mg/l mesurés respectivement aux puits Djamaa à Mellala et Mendi à Tahanount, mais aussi à la zone de Sidi Aich le puits Remila a enregistré 15.09 mg/l.

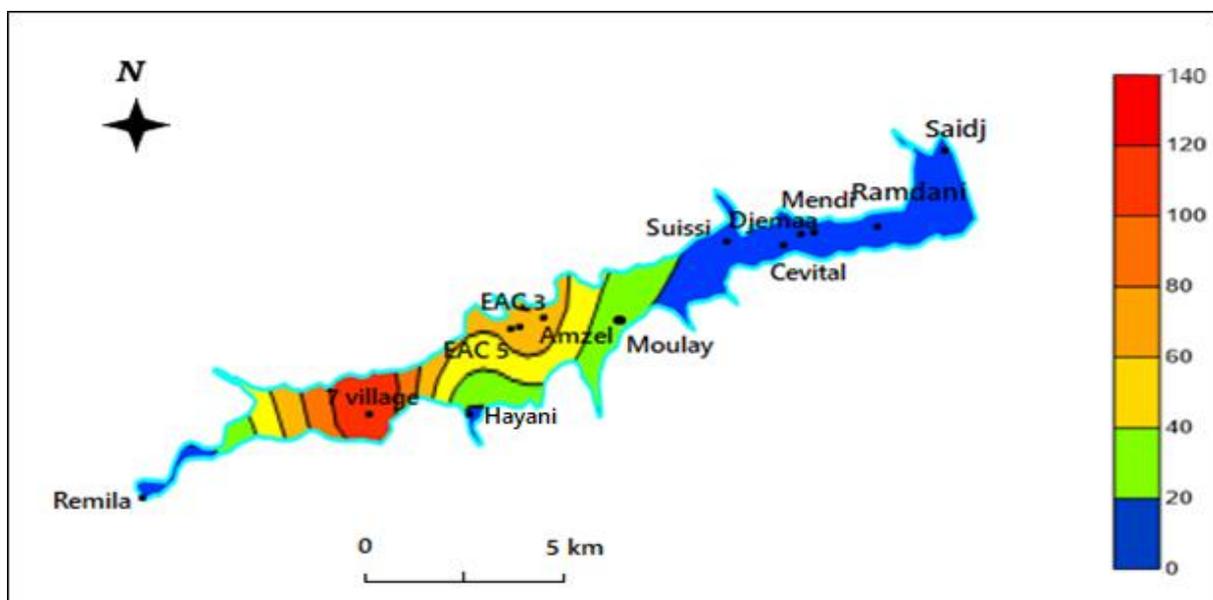


Fig.16. Répartition spatiale des nitrates dans les eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam, mars 2019.

À partir de cette carte, le calage des nitrates calculés en 2019 devraient être réalisés en comparaison avec les nitrates mesurés dans la nappe afin d'ajuster notre modèle de transport des nitrates dans la nappe des alluvions de la basse Soummam.

Partie III

Résultats et Discussion

III. Résultats et Discussion

III.1. Modèle hydrodynamique

III.1.1. Régime permanent

La piézométrie en régime permanent de la nappe des alluvions de la basse Soummam a été établie à partir des données issues de la campagne piézométrique de mars 2011 (Kessasra, 2015) (figure 17). elle représente l'état stationnaire de la nappe.

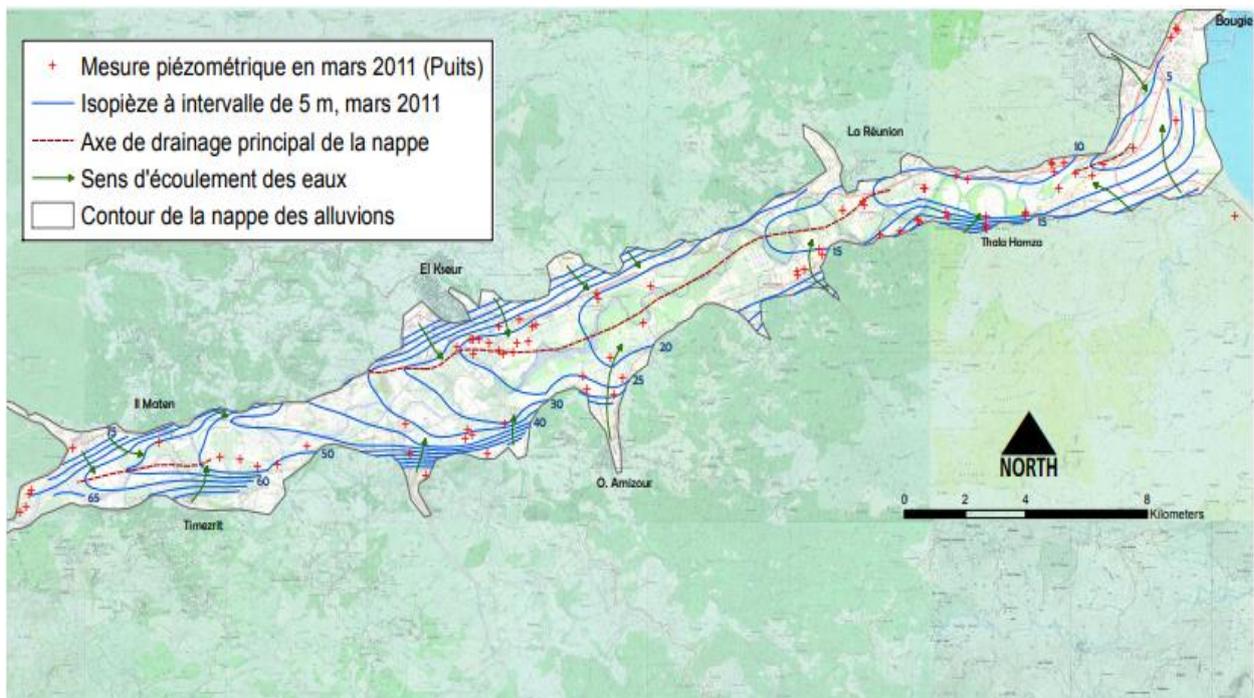


Fig.17. carte piézométrique de la basse vallée de la Soummam en hautes eaux, mars 2011 (Kessasra, 2011).

En effet, les niveaux piézométriques en régime permanent ont été calés afin de rapprocher ceux mesurés à ceux calculés, comme le montre la figure 17. Un recalage en régime transitoire est entrepris dans notre travail à partir des mesures réalisées en 2019 sur sept puits et forages. Deux forages parmi les sept ne répondent pas aux différents essais de calage que nous avons entrepris, il s'agit de REMILA. Pendant que le reste des forages testés a été parfaitement calé et dont l'écart entre le niveau piézométrique calculé et celui mesuré ne dépasse pas 3.8 m.

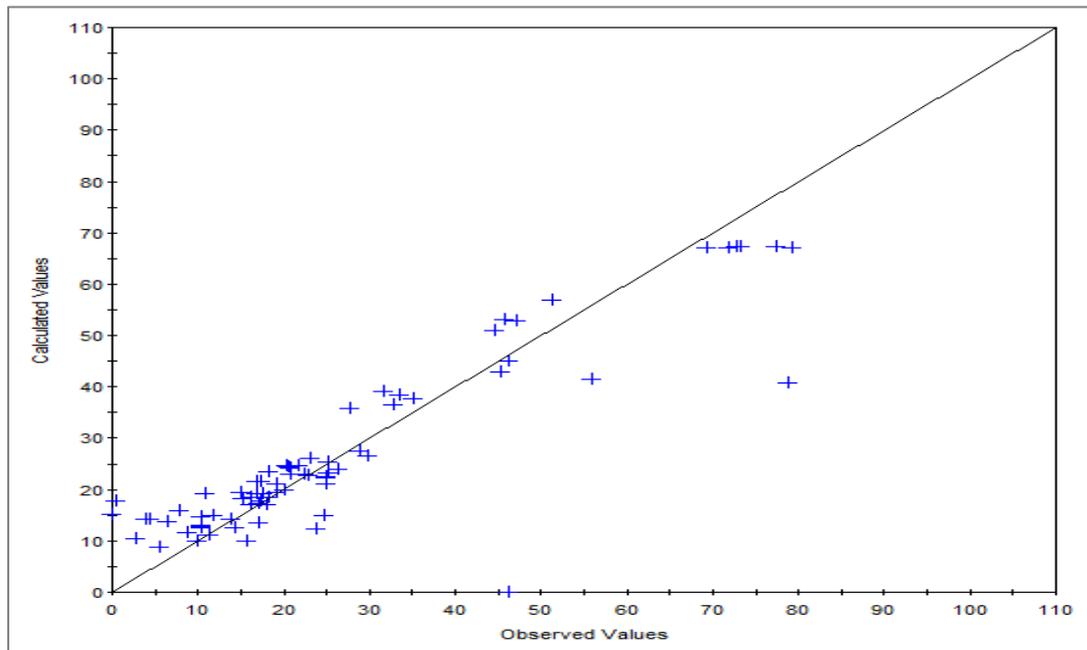


Fig.18. Comparaison entre niveaux piézométriques calculés et mesurés en régime permanent.

III.1.2. Régime transitoire

Les simulations numériques dans les différents scénarios en vue de l'exploitation du modèle hydrodynamique (tableau 11) sont basées sur la demande en eau des différents secteurs d'activité à des périodes bien définies. Les simulations sont nécessaires pour estimer les rabattements optimums lors du pompage dans l'aquifère. En se basant sur 103 points d'observation situés de Sidi-Aich à Béjaia, cela permettra de suivre la réaction de la nappe face au pompage. L'évolution des rabattements des trois scénarios est présentée dans la figure 18.

Tab.11. volume d'eau pompé par chaque scénario en Mm^3/an .

simulations	Période 2011-2019	Période 2019-2030	Période 2030-2040
débit pompé Mm^3/an	45.8 Mm^3/an	40.19 Mm^3/an	90,16 Mm^3/an

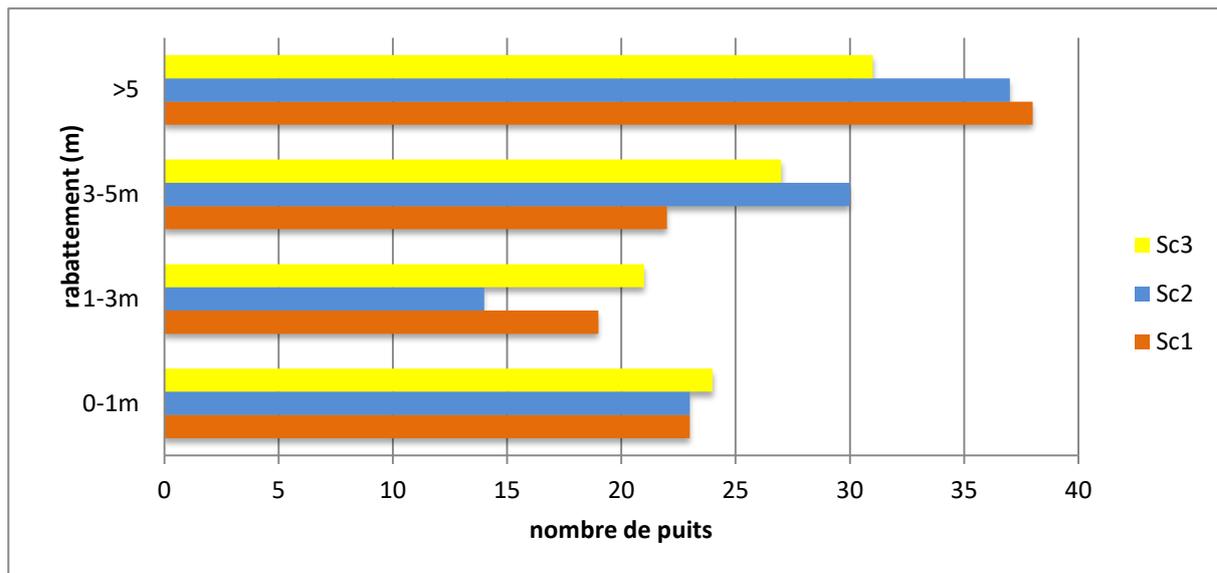


Fig.19. l'évolution des rabattements des trois scénarios.

Lors des simulations, on a remarqué l'assèchement d'une dizaine de mailles de la nappe étudiée au niveau de la zone région comprise entre El Kseur et Oued Ghir, la figure 20 montre la zone qui a été influencée par les rabattements. En effet, l'assèchement de la nappe est expliqué par le pompage intensif et est liée également à la durée de la période de simulation. Comme notre étude a pour but de définir un plan de gestion à la nappe, les puits pompés ont été soit déplacés et répartis sur la nappe en se référant aux conditions hydrogéologiques de la nappe, soit réduits dans leur volume de pompage pour que la nappe puisse retrouver son niveau initial et éviter le dénoyage des mailles simulées.

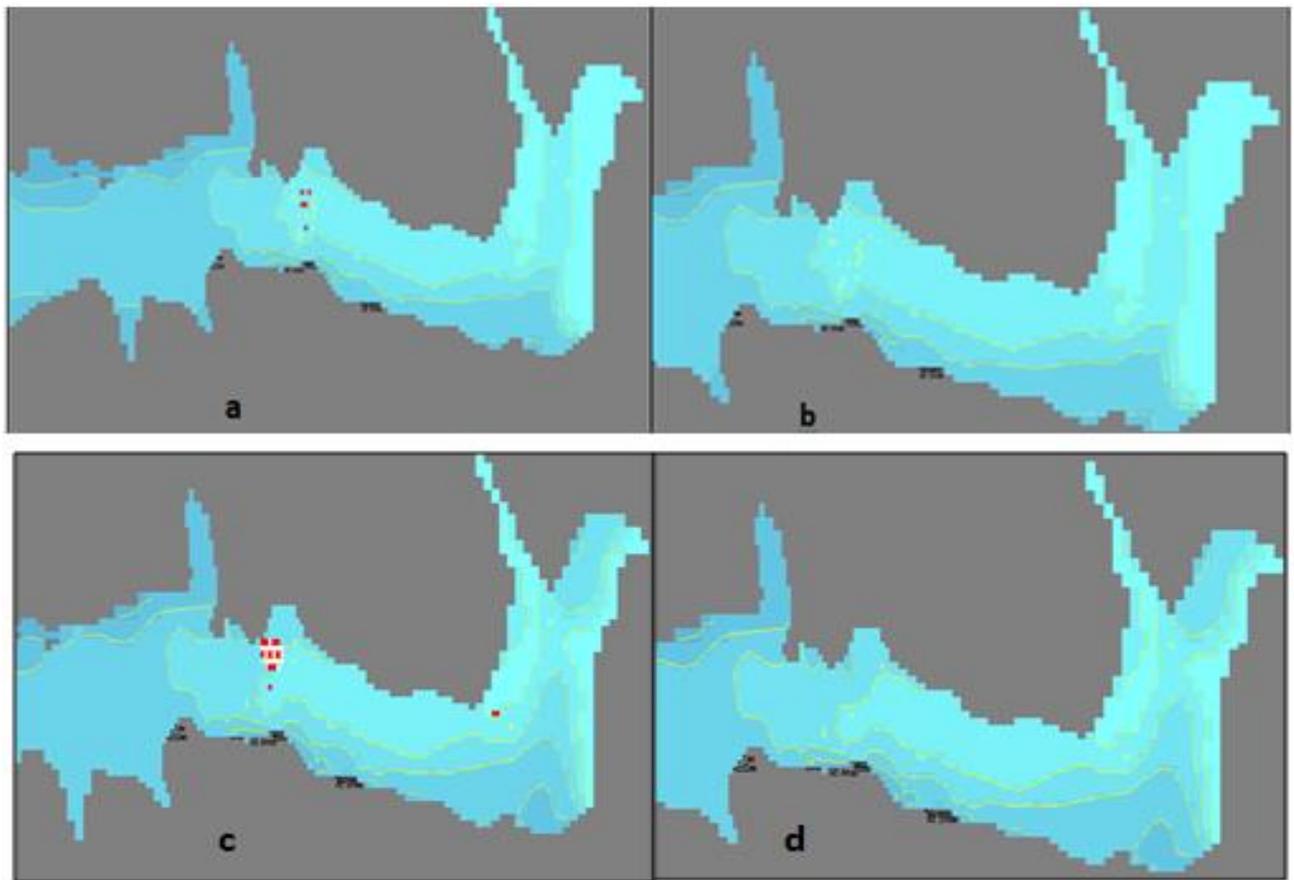


Fig.20. visualisation 2D Modflow du scénario 2011-2019, assèchement de la nappe.

Tab.12. le nombre de forage en fonction des classes de rabattements enregistrées dans les trois scénarios simulés dans la basse vallée de la Soummam.

Rabattements(m)	Scénario 1 2011-2019	Scénario 2 2019-2030	Scénario 3 2030-2040
0-1m	23	23	24
1-3m	19	14	21
3-5m	22	30	27
>5	38	37	31

Scénario 1 (2011-2019)

Ce scénario présente l'effet du pompage sur la nappe, ces pompages sont issus des différents besoins des trois secteurs (AEP, irrigation et AEI) pendant huit ans. Afin d'améliorer la robustesse du modèle hydrodynamique, un calage a été entrepris sur la base des niveaux piézométriques mesurés dans 7 puits en mars 2019. A cet effet, nous avons tenté d'apporter des ajustements successifs aux champs des perméabilités adoptées précédemment (tableau 12) pour

que les niveaux piézométriques calculés en mars 2019 se rapprochent de ceux mesurés dans la même année.

Nous avons procédé par modifier les champs de perméabilité des puits EAC1, EAC5 localisés à EL- Kseur sur la base des caractéristiques lithologiques des zones concernées. Par ailleurs, les puits Remila à Sidi Aich et Saidj à Bejaia ne répondent pas à l'opération d'ajustement de la perméabilité. Comme le niveau piézométrique calculé se montre supérieur à celui mesuré au puits Saidj, nous avons choisi de simuler des pompages situés à Saidj près de Béjaia afin de permettre au niveau piézométrique du Puits concerné de baisser. Mais aussi de supprimer le pompage de Remila situé à l'amont de la plaine près de Sidi Aich afin de permettre au niveau piézométrique de monter et de se rapprocher de ceux mesurés en 2019, tout en veillant à maintenir le débit pompé à $45.8 \text{ Mm}^3/\text{an}$.

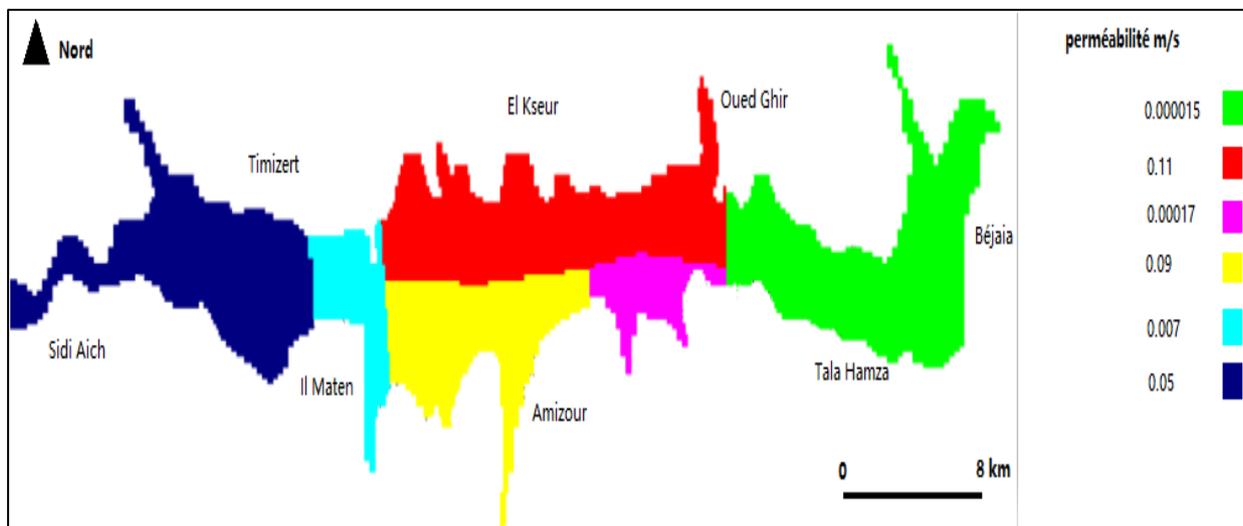


Fig.21 perméabilité modifiée après calage en 2019.

Le tableau 13 montre le résultat des ajustements des champs des perméabilités sur le niveau piézométrique des sept puits mesurés. On observe que six puits sur sept ont été parfaitement calés dont les écarts entre le niveau mesuré et celui calculé oscillent entre 0.01 m et 3.88 m, pendant que le forage Remila ne répond pas à nos tentatives et reste invariant.

Tab.13. Calage du niveau piézométrique en premier scénario, les niveaux sont exprimés en mètres.

puits	NP calculé	NP mesuré	écart avant	NP calé	écart après
REMILA	67.12	77.4	10,28	67,12	10,28
EAC5	24,73	20,6	4,13	24,48	3,88
EAC1	23.66	22,35	1,35	22,97	0,62
AMZEL	23.46	24.3	0,84	0,84	0,84
DJAMAA	8.91	8.90	0,01	0,01	0,01
RAMDANI	9.08	11,35	2,27	11,13	0,22
SAIDJ	9.13	2.85	6,28	3,99	1,14

A l'issue de nos simulations, 23 forages ayant un rabattement n'excédant pas 1 m constituent un cluster ou un regroupement (MESS 1, MESS 2, MESS 3, MESS 4 et les EAC 1 EAC 2 EAC 3 EAC4 et Maurice) localisés essentiellement à El Kseur. Cela signifie que le volume d'eau pompé n'influence pas l'état hydrodynamique de la nappe, en raison des bonnes caractéristiques hydrodynamiques et géométriques de la zone, connue par sa forte perméabilité dont la moyenne est de 9×10^{-2} m/s, et l'épaisseur de la nappe établie à 40 m. Ce qui permet la réalimentation rapide de la nappe et donc de permettre de réduire le rabattement.

19 forages ayant un rabattement compris entre 1 à 3 m, dont HOCINI 1, HOCINI 2, ASEUR, SAIDANI1, BOSS, DJAMAA1, DJAMAA 2, RAMDANI 1, et RAMEDANI 2, situés à Oued Ghir. Et AYAD 1, AYAD 2, AMZEM 1, AMZEL 2, ROUMILI, EAC6 et EAC 7 localisés à EL Kseur. ce rabattement est tout à fait normal comme les deux régions, Oued Ghir et El Kseur sont caractérisés par leurs bonnes perméabilités mais la densité du pompage a relativement creusé le rabattement jusqu'à atteindre 3m.

22 forages ont eu un rabattement compris entre 3 et 5 m à l'exception du forage JUCTAR à Tala Hamza connue par sa très faible perméabilité de 5×10^{-5} m/s. tous les autres forages sont localisés à Oued Ghir, dont R5, TAHA1, TAHA2, KARIAA, CHENDOUH, et BENE. Ce rabattement est plus prononcé en raison des caractéristiques lithologiques et structurales de la nappe. Cette partie de la nappe est semi-captive, recouverte d'une couche de limon d'environ 10 à 15 m d'épaisseur, les perméabilités sont moins intéressantes (5×10^{-5} m/s) que dans le reste de la nappe et les pompages dans la région ont un effet plus grand sur les rabattements de la nappe; En effet, des forages à 200 m³/j ont été simulés pour reproduire les rabattements provoqués par le champ captant de Cevital, la région est classée comme une zone surexploitée.

En dernier, les rabattements le plus forts dépassant 5m restitués par le modèle dans les forages regroupés dans deux régions de différentes zones de perméabilités et d'épaisseurs aquifères. La première zone est de Sidi Aich à Il Maten dont les forages implantés sont : REMILA, OMILI, W3, 7 VILLAGES, U4, P.RAISIN, HAYANI, BOUABAS, CARRIERE, G4, ATHMANI et VALFLORA. La zone est caractérisée par une perméabilité considérée comme étant bonne de l'ordre de 5×10^{-3} m/s, et malgré le faible pompage dans la région, le rabattement est le plus fort. On peut justifier le cas par la faible recharge oscillant entre $1.5065 \cdot 10^{-09}$ à $5.85 \cdot 10^{-09}$ m/s La seconde zone est celle de Tala Hamza, dont les puits ayant un rabattement de plus de 5 m sont HAMDAOUI, G4, REBAHI, KLILOUA BOUDJOU, ALOUI, et MAZAOUI. Le niveau piézométrique mesuré est supérieur au calculé, cela dû à la faible perméabilité de la zone ainsi qu'au pompage intensif. La zone est la plus influencée dans la basse vallée de la Soummam.

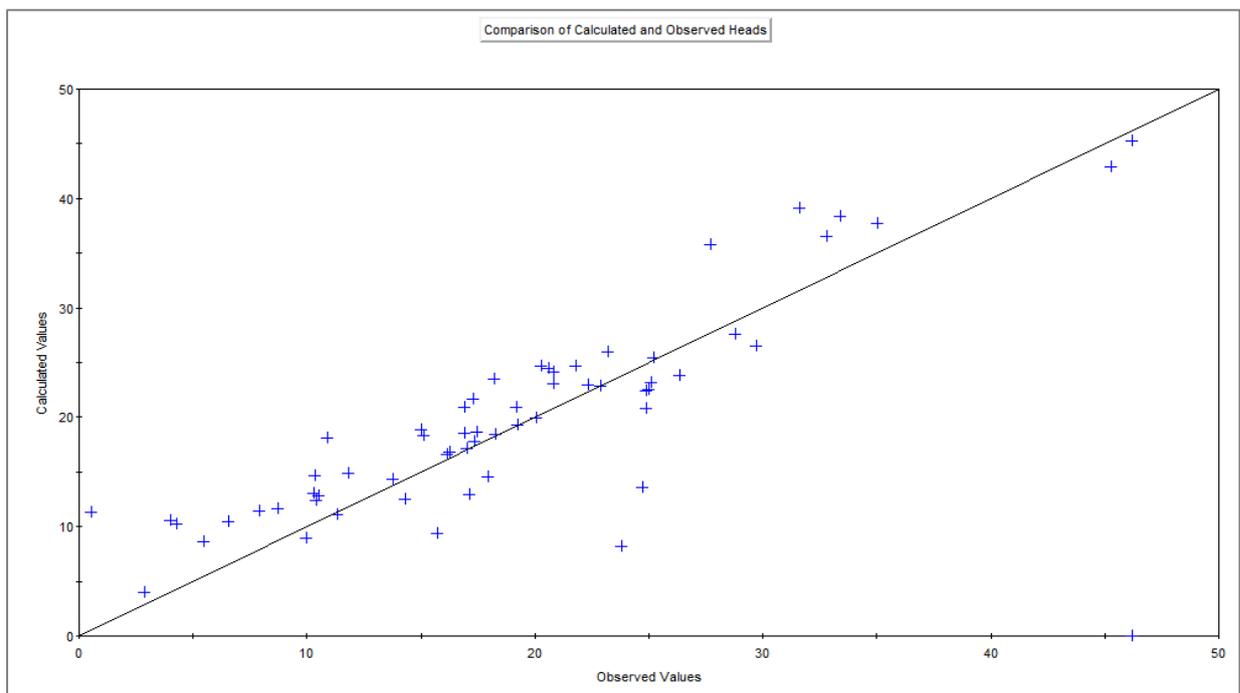


Fig.22. comparaison du NP piézométrique calculé et mesuré du 2019.

Scénario 2 (2019-2030)

La période de simulation s'étend de 2019 jusqu'à 2030, elle correspond à un volume de pompage de 40.19 Mm³/an. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 23. La comparaison entre les rabattements entre les scénarios 1 et 2 montre une évolution des rabattements, certains puits comme JUCTAR et R5 ayant eu un rabattement entre 1 et 3m dans le

précédent scénario, enregistrent ici un rabattement plus conséquent calculé à 5m. Ce scénario est caractérisé par une baisse significative des niveaux piézométriques, bien que les volumes pompés aient été systématiquement réduits, c'est le résultat d'un pompage régulier de 11 ans.

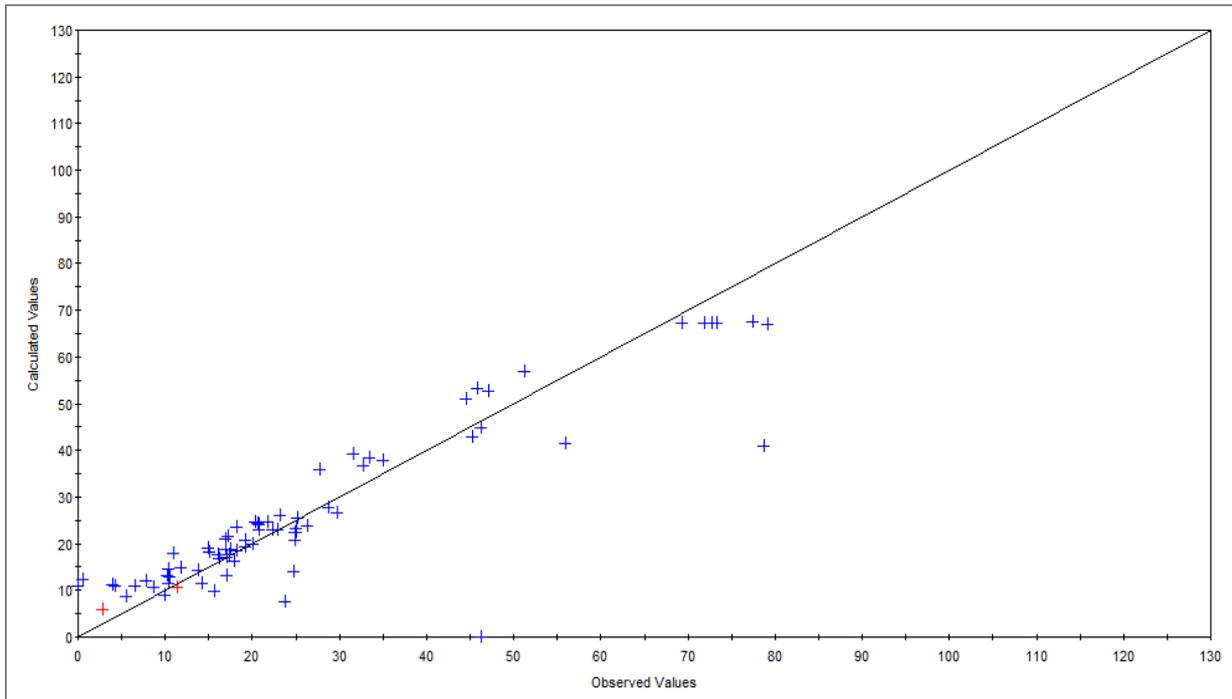


Fig.23. comparaison du niveau piézométrique calculé et mesuré de scénario 2.

Scénario 3 (2030-2040) :

La dernière période de simulation est basée sur une augmentation des volumes pompés, le débit pompé en 2040 est le double de celui pompé en 2020, soit 90.16 Mm³/an. Il en résulte que les niveaux piézométriques ont été considérablement rabattus, les plus actifs sont SAIDJ, REBAHI, AEROPORT et R5 avec un rabattement de 1 m en moyenne. Le pompage intensif peut expliquer la diminution des niveaux piézométriques calculés, plus la perméabilité est faible à Tala Hamza à l'embouchure. Mais malgré le débit doublé, les forages ayant le rabattement de 5 m et plus ont diminués, cela revient à la période de simulation, les entrées de la rivière pendant 10 ans sont assez importants, ce qui permet à la nappe de se réalimenter.

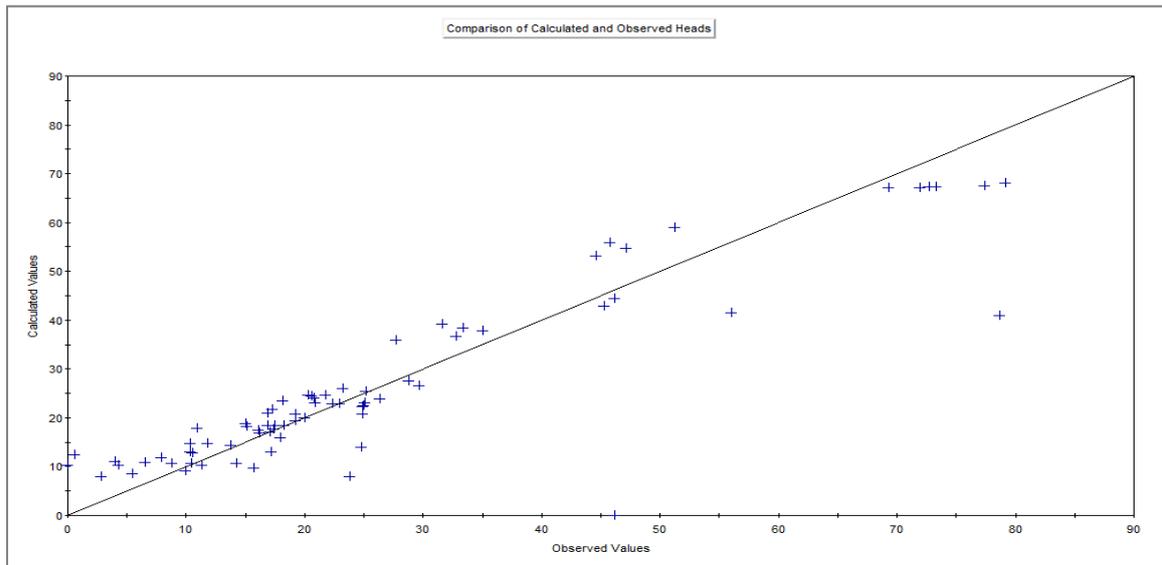


Fig.24. comparaison du niveau piézométrique calculé et le mesuré scénario 3.

III.1.3. Bilan de nappe

Le bilan des eaux souterraines est la confrontation des quantités d'eau qui, au cours d'une période donnée, rentrent dans une nappe et des quantités d'eau qui en sortent (Schoeller, 1967). Le système d'eau souterraine est en équilibre à long terme. Le volume d'eau qui recharge le système est approximativement égal à la quantité d'eau sortant ou déversant du système hydrogéologique. Les activités humaines modifient le système d'écoulement naturel, en pompant les eaux souterraines un déséquilibre dans le système est induit. En effet, le bilan de l'aquifère de la basse Soummam restitué par le modèle hydrodynamique à la fin de chaque période simulation est représenté dans le tableau 15.

Tab.14. Bilan de nappe issue des 3 périodes de simulations en régime transitoire

	Terme de flux	entrée m ³ /s	sortie m ³ /s	Entrée-sortie m ³ /s
période 1 2011- 2019	stockage	4.5125020E-04	9.2152271E-03	-8.7640025E-03
	Niveau constant	8.4992804E+02	1.4025577E+03	-5.5262964E+02
	puits	0.0000000E+00	1.4783190E+00	-1.4783190E+00
	recharge	3.0285400E-01	0.0000000E+00	3.0285451E-01
	Échange avec la rivière	2.9529436E+02	9.5483075E+02	-6.5953638E+02
	Échange avec les limites d'alimentation	1.2190259E+03	5.6453407E+00	1.2133752E+03
	total	2364,551975	2364,528274	0,023701
période 2 2019-2030	stockage	5.3907571E-02	6.4564664E-02	-1.0657093E-02
	Niveau constant	3.0551625E+03	6.5775049E+03	-3.5223423E+03
	puits	0.0000000E+00	1.5573970E+00	-1.5573970E+00
	recharge	3.0396600E-01	0.0000000E+00	3.0396602E-01
	Échange avec la rivière	2.1950392E+03	1.6672121E+03	5.2782715E+02
	Échange avec les limites d'alimentation	3.0009182E+03	5.1777206E+00	2.9957405E+03
	total	8251,477774	8251,6682	0,41092
période 3 2030-2040	stockage	5.18560939E-02	8.1426912E-02	-3,03E-02
	Niveau constant	1.1583528E+03	1.5130737E+03	3,55E+02
	puits	0.0000000E+00	2.8393520E+00	-2.8393521E+00
	recharge	3.5072050E-01	0.0000000E+00	3.5072049E-01
	Échange avec la rivière	2.9214880E+02	1.2114133E+03	-9,19E+02
	Échange avec les limites d'alimentation	1.2816353E+03	5.1664588E+00	1.2764698E+03
	total	2732,53944	2732,57396	-0,03452

-Période 1 (2011-2019), Le bilan d'eau montre que le flux entrant par les limites d'alimentation latérales est le terme le plus important, il a été quantifié à 12190.2m³/s, représentant 51.5% du volume d'eau total entrant. Ensuite les échanges avec la rivière ont été quantifiés à 2195.29 m³/s, soit 12.49 % du volume total entrant, il faut dire que le volume d'eau constant quantifié à 849.9 m³/s représente 0.4 % du volume total entrant. Les autres flux sont considérés comme négligeables.

En termes de flux sortant le niveau constant est le plus important quantifié à 1402.55 m³/s soit 79.74% du volume total sortant suivi par l'eau issue de l'alimentation latérale quantifiée à 5.1m³/s. les autres flux sortant sont considérés comme négligeables.

l'alimentation est donc basée sur ce type de flux représentés par deux axes en amont à Sidi Aich dont la perméabilité est de 0.05 m/s et le niveau piézométrique varie entre 77 m à 55 m , et trois autres en aval dont la perméabilité de l'axe de El Kseur est 0.0005 m/s et le niveau varie de 37 ,5 m à 12 m, à Amizour, K est de 0.065 m/s de même le niveau varie de 45 m à 21 m, le dernier est à Tala Hamza avec une perméabilité de 0.00005 m/s et le niveau est à 21m.La différence entre le flux entrant et le flux sortant est de 0.023 m³/s environ donc le bilan de la première simulation 2011-2019 est en équilibre.

-Période 2 (2019-2030), en terme de flux entrant, le niveau constant est plus important, il est quantifié à 3055.16 m³/s, soit 37.02% du volume total entrant, L'eau arrivant par les limites latérales est quantifiée à 3000.9 m³/s soit 36.36% de volume total entrant. De même les échanges avec la rivière sont importants, ils sont quantifié à 2195 m³/s soit 26.60 % du volume total entrant. En termes de flux sortant le volume d'eau constant est le plus important quantifié à 6577.50 m³/s, le volume d'eau sortant par les limites d'alimentation latérales est quantifié à 5.177 m³/s soit 0.06 % du volume total sortant. Les autres sont considérés négligeables. La différence entre le flux entrant et le flux sortant est de 0.47 m³/s environ donc le bilan de la deuxième simulation est en équilibre.

-Période 3 (2030-2040), montre que le flux entrant par les limites d'alimentation latérales est le plus important quantifié à 1281.63 m³/s soit 46.9%, ensuite le niveau constant qui a été quantifié à 1158.35 m³/s soit 42.39 % et les échanges avec la rivière quantifiés à 292.14 m³/s soit 10.69% du volume total entrant. De leur côté, les flux sortants sont représentés par le niveau constant quantifié à 1513.07 m³/s soit 55.37 % de volume total, suivi du volume d'échange entre l'oued et la nappe quantifié à 1211.413m³/s soit 44.33% de volume total. Les autres flux ont de faibles volumes il s'agit de la recharge, du pompage, de l'alimentation latérale et du stockage qui sont considérés comme négligeables. La différence entre le flux entrant et le flux sortant est de -0.034 m³/s donc le bilan de la troisième simulation est en déséquilibre.

III.2. Modélisation du transport des nitrates

L'ensemble des analyses des teneurs en nitrates a été effectué en 2013 et concernent 13 points, répartis en puits et forages. Situés tout le long de la basse vallée de la Soummam de Sidi Aich à Bejaia et présentant de fréquentes sources en nitrates, principalement anthropiques (Agriculture, élevage et eaux usées).

III.2.1. Calage en régime permanent

Le calage des nitrates en régime permanent est une étape nécessaire avant toute simulation. La phase du calage a été achevée à l'aide d'une série d'ajustements, nécessaire pour pouvoir valider le modèle dans les conditions stationnaires et avant toute exploitation dans des conditions hydrodynamiques et hydrochimiques différentes. Ces ajustements ont été appliqués sur les concentrations initiales des nitrates mesurées en février 2013 et la configuration des zones de concentration. Elle a permis de réduire significativement les écarts entre les concentrations observées et celles simulées. (Chettibi et Seraoui, 2015)

Tout d'abord les résultats des analyses obtenus montrent que la majorité des puits enregistrent des concentrations dépassant la norme fixée par L'OMS 50 mg/l. Les puits concernés sont :

- Le puits EAC1 qui se trouve à El Kseur, destiné exclusivement à l'irrigation et à l'élevage. Les pluies tombées en février 2013 ont favorisé l'infiltration de l'azote dans la nappe ce qui justifie sa forte concentration en nitrates, équivalente à 267.52 mg/l. En mars 2013, cette concentration baisse jusqu'à 54 mg/l sous l'effet de la mobilisation des nitrates ou de la dilution des eaux de la nappe au niveau de ce puits. En avril 2013, la teneur a augmenté jusqu'à 110 mg/l suite à l'amendement des sols. (Chettibi et Seraoui, 2015)

-Le puits Ramdani qui se trouve dans une zone marécageuse caractérisée par la culture de petits potagers domestiques. La forte concentration enregistrée en février 2013 (142.1 mg/l) D'après notre enquête de terrain, elle est due essentiellement à l'application du fumier issu de poulaillers en novembre 2013. Sa brusque chute enregistrée en mars 2013 (75 mg/l) est le résultat, soit d'une forte mobilisation des nitrates, soit d'une dilution des eaux de la nappe par les eaux de pluie et les flux d'eau arrivant par les bordures latérales ou par les deux voies. Il faudrait signaler que la nappe est considérée comme semi-captive, mais la géochimie indique que les infiltrations directes des pluies sont envisageables avec un temps de retard. Cette concentration rehausse à nouveau en avril 2013 (111 mg/l) résultat d'un traitement localisé des sols par du fumier. (Chettibi, Seraoui, 2015).

-Le forage des 7 villages est implanté dans le domaine Abane Ramdane où la culture des agrumes y est très répandue. La concentration a augmenté de 17.72 mg/l en février 2013 à 245

mg/l en mars 2013. Cela provient de l'effet du lessivage des sols riches en engrais chimiques qu'utilisent massivement les agriculteurs locaux. (Chettibi, Seraoui, 2015).

Le résultat du calage en régime permanent des concentrations calculées avec les concentrations mesurées en 2013 sont consignées dans le tableau 1. Le calage est jugé optimal dans la majorité des puits simulés dont les écarts oscillent entre 0.01 mg/l au puits Moulay et 29.76 mg/l au puits Ramdani, cependant, quatre puits ont observé un écart assez important dépassant 100 mg/l. Pour ce faire, il a été procédé par isoler ces quatre puits concentrés dans des polygones individuels où l'écart a été sensiblement réduit. Ceci afin de pouvoir simuler le devenir des nitrates sur un calage plus fiable.

Tab.15. Teneurs calculées et mesurées issues du calage de NO₃ en régime permanent, mars 2013 exprimés en mg/l.

puits	concentration calculée (2013)	concentration mesurée(2013)	Ecart	concentration calculée après le calage
REMILA	835,95	15,09	820,86	15,09
VSA	835,9501	31,7	804,25	31,7
EAC1	477,6	110,3	367,3	110,3
EAC5	477,6	41,2	436,4	41,2
SUISSI	13,084	31	17,916	31
RAMDANI	142	112,24	29,76	112,24
MENDI	14,92	11,1	3,82	11,1
CEVITAL	4,96	0,9	4,06	0,9
SAIDJ	16,34	17,3	0,96	17,3
NO4	13,08	5,79	7,29	5,79
MOULAY	45,39	45,4	0,01	45,39
DJAMAA	4,96	12,4	7,44	12,4
7 VILLAGES	66,11	59,5	6,61	59,5

III.3.Régime transitoire :

Le régime transitoire est l'ensemble des simulations des teneurs en nitrates en fonction des prévisions de pompage entamées en hydrodynamique. Il s'agit de suivre l'évolution des concentrations déjà calées en régime stationnaire sur une période de 21 ans. 03 scénarios ont été établis, permettant de suivre le panache de pollution affectant la nappe aquifère et d'évaluer l'impact des activités agricoles et industriels sur les concentrations en nitrates des eaux souterraines de l'aquifère.

III.3.1. Calage en régime transitoire :

En comparant les concentrations calculées par le modèle en 2019 avec celles mesurées dans la nappe en mars 2019, des variations importantes ont été observées. De ce fait, un recalage s'impose pour pouvoir simuler le polluant jusqu'à l'horizon 2040. En effet, ce calage est basé sur la carte de répartition d'iso-teneurs des nitrates établie dans les eaux souterraines en mars 2019, les résultats sont présentés dans le tableau 16.

Tab.16. variations des concentrations mesurées et calculées et recalage en simulation en mars 2019

puits	concentration calculée en mars 2019 mg/l	concentration mesurée en mars 2019 mg/l	concentration calculée après calage mg/l	Ecart mg/l
REMILA	10	15,09	15	0,9
VSA	90,	31,7	31	0,7
EAC1	70	110,3	108,99	1,31
EAC5	70	41,2	41	0,2
SUISSI	10	31	31	0
RAMDANI	10	112,4	112,2	0,2
MENDI	10	11,1	11,1	0
CEVITAL	19.02	0,9	19.02	18.12
SAIDJ	10	17,3	17,31	0,01
NO4	9,99	5,79	5,1	0,68
MOULAY	29,99	45,4	45,39	0,01
DJAMAA	10	12,4	12,4	0
7 VILLAGES	130	59,5	59,49	0,01

Les concentrations calculées ont été considérablement rapprochées des nitrates mesurés dans tous les puits où l'écart a été mesuré entre 0 au niveau des puits Suissi, Djamaa et Mendi et 1.31 mg/l au niveau du puits EAC1 à El Kseur. Ces écarts sont largement satisfaisants pour pouvoir continuer à simuler le polluant jusqu'à 2040. Cependant, le forage Cevital où sa concentration calculée est de 19.02 mg/l contre la teneur mesurée de 0.9 mg/l reste le seul forage non calé.

En effet, après plusieurs essais de calage, la teneur calculée est restituée à 18.12 mg/l mais demeure très éloignée de celle mesurée en mars 2019. Une fois le modèle calé, il se révèle utile pour évaluer l'impact de la croissance des prélèvements d'eau et du pompage sur le transport et le devenir des nitrates dans la zone saturée.

III.4. Exploitation du modèle des nitrates par scénarios :

L'évolution des concentrations simulées dans les trois scénarios est consignée dans le tableau 17.

Tab.17. évolution des concentrations simulées aux périodes.

puits	Permanent en 2013 mg/l	Scénario 1 2011-2019 mg/l	Scénario 2 2019-2030 mg/l	Scénario 2030-2040 mg/l
REMILA	15,09	15,09	15,09	15,09
VSA	31,7	31	31,9	31,9
EAC1	110,3	108,99	110,3	106,5
EAC5	41,2	41	41,2	41,23
SUISSI	31	31	31	30,99
RAMDANI	112,24	112,2	112,24	112,23
MENDI	11,1	11,1	12,4	12,4
CEVITAL	0,9	18.46	4,961	4,961
SAIDJ	17,3	17,31	14,929	15,9
NO4	5,79	5,1	13,08	13,08
MOULAY	45,39	45,39	45,38989	45,38958
DJAMAA	12,4	12,4	12,4	12,4
7 VILLAGES	59,49	59,49	59,49	59,49

-Scénario 1 : 2011-2019, Après 8 ans de simulation depuis l'état référence en 2011, La majorité des puits n'a pas montré d'amples variations dans leurs teneurs simulées. En effet, 5 forages sur 13 présentent une baisse comprise entre 0.01 et 1.82mg/l. il s'agit de EAC1 à El Kseur avec 1.31 mg/l, 1 mg/l au puits Djamaa et Suissi, 0.7mg/l au forage VSA, NO4 avec 0.69 mg/l, et EAC5 de 0.2 mg/l. Saidj est le seul puits qui a enregistré une légère augmentation dans sa teneur simulée de 0.01 mg/l, ainsi que le forage Cevital qui a augmenté de 17.56 mg/l. Les forages Remila, Moulay, et Ramdani restent invariants avec respectivement 15.09 mg/l, 45.39 mg/l, 112.3 et 17.31 mg/l.

En général, toutes les concentrations simulées sont conformes à la norme de l'OMS fixée à 50mg/l sauf les 3puits qui ont dépassé le seuil de potabilité. Il s'agit d'EAC 1 à El Kseur avec 108.48 mg/l, en comparant sa concentration avec celle mesurée en 2013et quantifiée à 110.3 mg/l, une petite diminution est donc remarquée. De même le puits Ramdani avec 112.2 mg/l et le puits des 7 villages avec une teneur de 59.49 mg/l.

-Scénario 2 : 2019-2030, On dénote une hausse des concentrations calculées dans plusieurs ouvrages, à savoir, le forageNO4 de 7.29 mg/l, VSA de 0.2 mg/l, le puits Suissi de 1 mg/l, Mendi de 1.03 mg/l, Cevital a diminué depuis le scenario 1 calculée à 18.46 mg/l pour chuter à 4.9 mg/l. En revanche, des puits qui marquent une diminution, à savoir le forage Saidj de 3.01 mg/l. Enfin, le reste des puits demeure invariant comme Remila, EAC 1, EAC 5, Moulay, Ramdani, Djamaa et 7villages.

-Scénario 3 :2030-2040, 2 forages sur 13 ont marqué une diminution il s'agit des puits EAC 1avec une réduction de ses nitrates de l'ordre de 3.8 mg/l, et Saidj de 1.4 mg/l. cependant, 3 forages ont enregistré une augmentation, Mendi de 1.3 mg/l, Cevital de 4.001 mg/l et NO4 de 7.29 mg/l. le reste des forages est resté invariant.

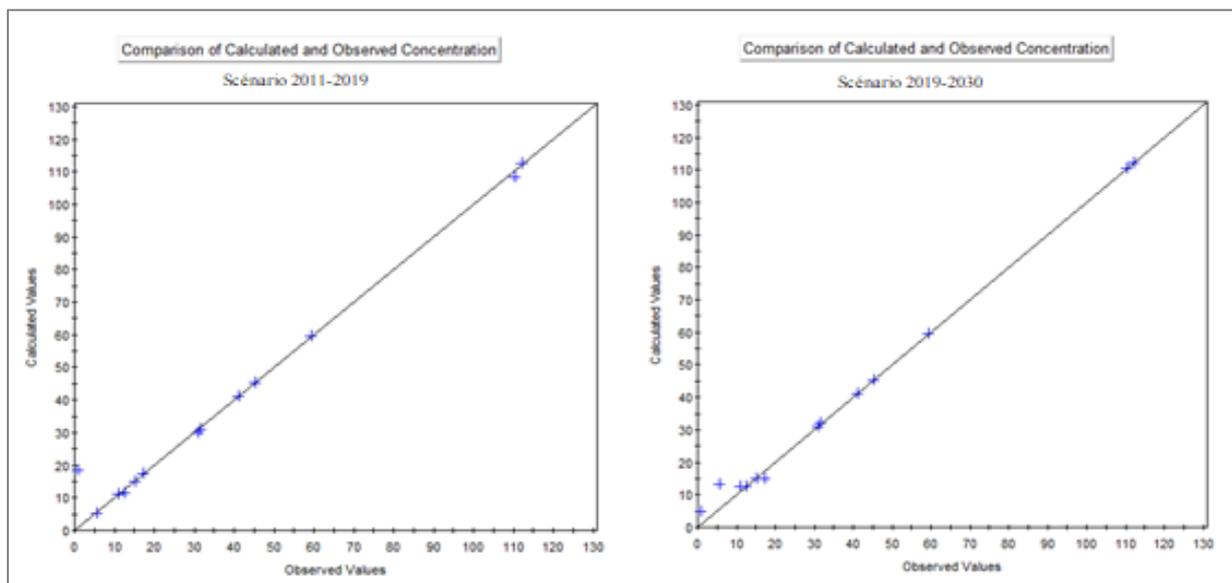


Fig.24.Diagrammes de dispersion et droites de corrélation des scénarios 1 et 2des simulations des Nitrates.

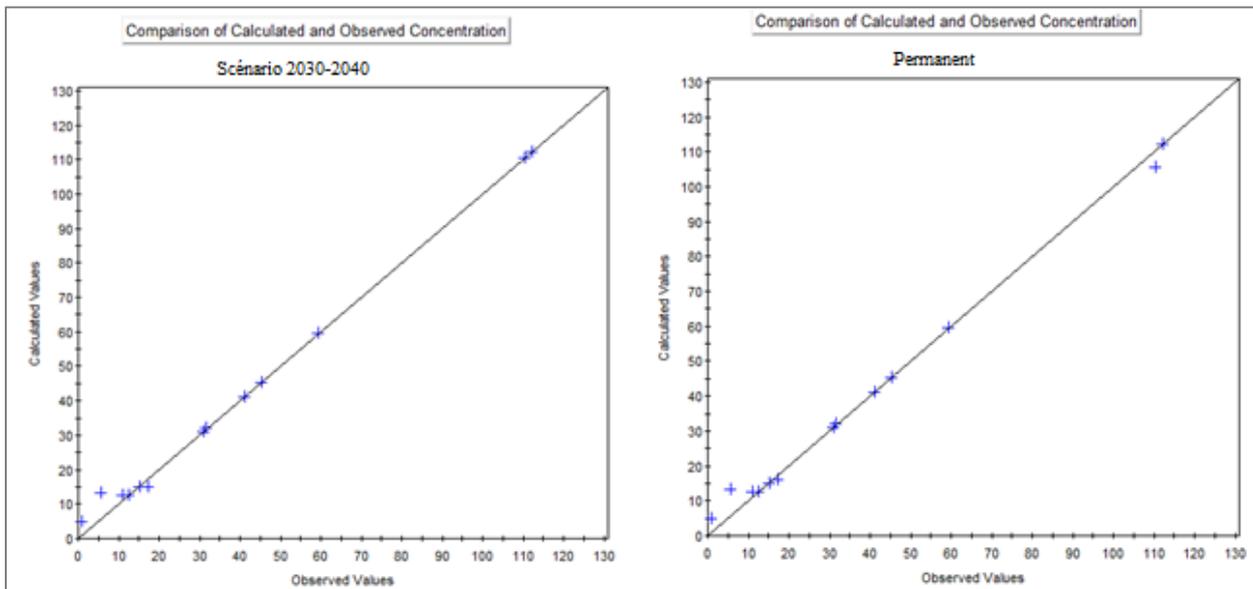


Fig.25. Diagrammes de dispersion et droites de corrélation en permanent et scénario 3 des simulations des Nitrates.

III.5. Modèle d'évolution des nitrates:

Il est important de signaler qu'en régime permanent 3 forages analysés sur 13 présentent des anomalies géochimiques supérieures à la norme fixée par l'OMS qui sont d'amont en aval : les forages des 7 villages, EAC 1 et Ramdani. Le suivi de l'évolution des concentrations en nitrates, dans les conditions d'exploitation de la nappe, nous permet de faire ressortir :

-Puits des 7 villages : implanté près de Fenaia Il Maten sur la rive droite, les scénarios établis montrent des concentrations invariantes, toutes les simulations enregistrent une valeur de 59.49 mg/l. Il peut s'agir d'une instabilité numérique du modèle, vu que le forage se situe dans un endroit où les rabattements de la nappe sont importants.

- EAC 1 : implanté à El Kseur, le premier scénario a montré une baisse entre NO₃ mesuré à 110.3mg/l et la teneur calculée à 108.48mg/l, pendant que le deuxième scénario a marqué un retour à 110.3 mg/l. il réagit inversement à l'effet de pompage en 2030 où le volume pompé durant cette période a diminué de 45.8 Mm³/an à 40.19 Mm³/an. Nous admettons que lorsque le pompage augmente, les cônes de dépression se forment dans la nappe et se caractériseraient par de fortes concentrations. Quant au troisième scénario, il a marqué une baisse de 3.8 mg/l, malgré l'augmentation du volume d'eau pompé à 80.38Mm³/an.

-Ramdani : situé à l'embouchure, il est resté invariant durant les trois périodes de simulation à 12.24 mg/l comme ce fut le cas pour celui des 7 villages.

Conclusion

Les issues de nos simulations hydrodynamiques ont montré que les deux zones représentées par Amizour et Tala Hamza sont les zones les plus sensibles au pompage, l'effet induit est remarquable avec des rabattements frôlant 12 m au forage près de l'aéroport d Bėjaia. Au centre de la nappe, la région d'El Kseur est moins sensible dont le rabattement ne dépasse pas 2 m environ. Dans la partie amont, la zone possède de bonnes caractéristiques hydrodynamiques, la perméabilité est de 0.05 m/s joue un rôle déterminant dans le renouvellement de stock de l'aquifère et la disponibilité des eaux, les rabattements ne dépassent pas 1 m. Les issues du modèle de transport des nitrates mettent en évidence les sites les plus touchés. Les résultats des simulations de 2011 à 2040 montrent une faible variabilité des nitrates simulés, dont le seul forage témoin qui montre une évolution importante est celui de Cevital avec un écart entre la concentration mesurée et la calculée de 18.12 mg/l. en effet les autres puits marquent des variations moins importantes dont l'écart ne dépasse pas 3.8 mg/l enregistré à El Kseur.

Conclusion Générale

La présente étude a porté sur la modélisation hydrodynamique et la simulation du transport des nitrates au sein de la nappe alluviale de la basse vallée de la Soummam. La zone d'étude est comprise entre Sidi Aich et l'embouchure à Bejaia. Elle s'étend sur une superficie de 716.3 Km² et jouit d'un climat méditerranéen avec un hiver pluvieux dont la pluviométrie moyenne est de 773.4 mm, et un été sec et chaud, la température moyenne est de 18° C.

La basse vallée de la Soummam est placée dans l'érogène alpin périméditerranéen constituant une limite méridionale du Tell Algérien, siège de charriage important datant de l'Oligocène et du Miocène. Elle se caractérise par un réseau hydrographique dense, composé de plusieurs affluents dont Oued Remila et Oued El Kseur sont les plus importants.

La vallée est réputée pour sa vocation agricole et une dense activité industrielle. La composition chimique des eaux souterraines présente une minéralisation plus ou moins forte résultant en grande partie de la dissolution chimique naturelle des carbonates, des gypses triasiques ainsi que par des activités anthropiques telles que l'utilisation excessive des engrais en agriculture et les rejets domestiques et industriels non traités, ce qui accélérera la contamination azotée de ses ressources en eau en particulier en nitrates et nitrites.

Les issues de nos simulations hydrodynamiques ont montré que les deux zones représentées par Amizour et Tala Hamza sont les zones les plus sensibles au pompage. Au centre de la nappe, la région d'El Kseur est moins sensible. Dans la partie amont, la zone possède de bonnes caractéristiques hydrodynamiques, la perméabilité est de 0.05 m/s qui joue un rôle déterminant dans le renouvellement de stock de l'aquifère et la disponibilité des eaux.

Les issues du modèle de transport des nitrates met en évidence les sites les plus touchés. Les résultats des simulations s'étendant de 2011 à 2040 montrent une faible variabilité des nitrates simulés, dont le seul forage témoin qui montre une évolution importante est celui de Cevital. En effet les autres puits marquent des variations moins importantes qui ne dépassent pas 3.8 mg/l depuis le teneur de référence et enregistrée à El Kseur.

Recommandations de la recherche

A l'issue de ce travail, quelques recommandations sont proposées afin de pouvoir continuer à améliorer nos connaissances sur la plaine du mio-plio-quadernaire de la vallée de la Soummam, il serait question de :

- Intégrer des modèles agronomes dans nos modèles de transport, afin de mettre en évidence les interactions qui existent entre le sol, la plante et l'eau;
- Intégrer le facteur de biodégradation dans nos modèles qualitatifs surtout pour le suivi des nitrates.

Références bibliographiques

-Abdellouche El & Kerouaz M, (2015).*Problèmes liés à la présence des composés azotés et Phosphatés dans les eaux de surface et souterraines de la basse vallée de la Soummam .Mémoire De Master, Univ. Jijel, 90p.*

-Abboudi A , Tabyaoui H , El Hamichi F, Benaabidate L, Lahrach A & (2014).*Etude de la qualité physico-chimique et contamination métallique des Eaux de surface du bassin versant de Guigou, Maroc .European Scientific Journal August 2014Édition vol.10, 23 ISSN : 1857-7881.*

-Agence de Bassin., Algérois-Hodna-Soummam (2000).*Présentation générale du bassin de la Soummam sur le plan administratif, géologique et hydrologique (mission I), Potentialités et Mobilisations en eau (mission II, septembre 2001), Confrontation ressources-besoins (mission III, janvier), Etat de pollution dans le bassin (mission IV).*

-Atteia O, (2011).*Modélisation du devenir des composés organiques dans les aquifères.*

-Banas D,Lata, J.Ch. *Support de cours, les nitrates, Paris Sud Orsay.*

-Beyragued A, Boudiaf A, (2016). *Contribution à la connaissance de la qualité des Eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam Bejaia. Univ. Mohamed Boudiaf M'sila.*

-Bear J, Beljin M.S, Ross R.R. (1992). *Fundamentals of Ground -Water Modelling, Ground Water Issue, EPA /540/S-92/005.2-11pp.*

-Bouakkaz R, Zentout W, (2020).*Impact des activités agricoles sur l'environnement ; cas de la plaine alluviale d'oued Nil (Jijel N_E Algérien). Mémoire Master, Univ Jijel.*

-CGG. Compagnie Générale de Géophysique (1969-1970). *Étude hydrogéologique par prospection électrique et sismique dans la vallée de la Soummam, Alger. 56 p.*

-Clinckx C, (1971).*Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de la basse Soummam, Sidi-Aiche – Bejaia, N°74.HYG.02.RS, D.E.M.R.H Algérie.80p.*

-Domenico P.A & Schwartz, F.W. (1990).*Physical and Chemical Hydrogeology .John Wiley and Sons, New York, 824 p.*

-Dassargues A, (1995).*Modèle mathématique en hydrogéologie, Programme Tempus : Sciences de l'eau et de l'environnement. 125p.*

-DDS. *Inventaire des décharges et dépotoirs Sauvage, Bejaia 2018.*

-Déclaration des déchets spéciaux et spéciaux dangereux - exercice 2017.

-DSA.CAMP. *Ministère de l'Agriculture du Développement Rural et de la Pêche. Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information, Evaluation trimestrielle, Campagne Agricole 2017-2018 de Bejaia (16. Superficies irriguées).*

-Ficheur A, (1891).*I. Stratigraphie, descriptions régionales 2emeI série, n0 01 : la Kabylie du Djurdjura Alger. 407 p.*

-Kessasra F, (2006).*Etude hydrogéologique sous l'aspect de la modélisation mathématique en vue d'une gestion rationnelle des écoulements souterrains de la vallée de la Soummam. Thèse de Magister, Université Houari Boumediene.167p.*

-Kessasra F, (2015).*Modélisation hydrogéologique des écoulements des eaux souterraines et De surface de la nappe des alluvions de la vallée de la Soummam (Nord-Est Algérie) Impacts Sur l'environnement et les écosystèmes.*

-Kessasra F, MesbahM ,Khaled-khoudja S , Seraoui S, Chetibi N.H, (2016). *Suivi Modélisation hydrogéochimique et simulations des concentrations en chlorures dans la nappe Des alluvions de la basse vallée de la Soummam (Sidi Aich-Bejaia) en Algérie. Notes et Mémoires du service géologique du Maroc, Rabat.*

-Kessasra F 1, 2, 3, Mesbah M3, khemissa Z2, Bouab N2, khaled-Khodja S1, Lamari H3, (2017).*Combined hydrogeological and nitrate modeling to manage water resources of the Middle Soummam Aquifer, Northeast of Algeria.*

-MENEROUD, J.P. ET ROGNON, P. (1970).*carte géologique de la vallée de la Soummam.*

-Mouni L,Merab & D,Arkoub H,Moussace K, (2009).*Etude et caractérisation physicochimique des eaux de l'oued Soummam (Algérie). Revue Sécheresse, 20: 360-366.*

-Mouni L, (2004).*Etude et caractérisation physico-chimique des rejets dans l'oued Soummam. Mémoire de magistère en Génie chimique, université de Bejaia.*

-Olivier A, (2011).*Modélisation du devenir des composés organiques dans les aquifères. Paris.*

-ORBAN P, (2008) .*Solute transport modeling at the groundwater body scale: nitrates trends Assessment in the Geer basin (Belgium). Thèse de doctorat, Université de Liège. 207p.*

-Plan National de l'Eau, (2010).*Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau (PNE), mission 2, volet 4, tome 1, rapport final.*

-Ramsar, (2009).*Fiche descriptive Ramsar, Algérie vallée de l'oued Soummam.14p.*

-Rodier J, (1996).*Analyse des eaux naturelles et des eaux résiduaires et eaux de mer, 8 ème Édition Dunod, 1384 p, Paris.*

-Saou R, Zaïm M.E & Alitouch K, (2009). *Modelling and Design of a Low Speed Flux Reversal Machine, Vol. 36 No. 09. P 18-23.*

-SAOU A, (2012).*Hydrogéochimie des eaux de la vallée de la basse Soummam Bejaia Algérie. Thèse de Doctorat en Hydraulique générale, Université A.Mira-Bejaia.*

- Seraoui S & Chetibi N.H. (2015) .*Modélisation hydrodynamique et géochimique des Écoulements d'eaux souterrains de la basse vallée de la Soummam (Sidi Aich- Bejaia) : tests*

De sensibilité hydrodynamique, suivi et prévisions des concentrations en nitrates et chlorures.

-Schoeller H, (1967).*Méthodes pour obtenir le bilan des eaux souterraines, méthodes appliquées en France, Grande Bretagne, Hollande et Espagne. Article scientifique, 87-107*

-Wels Ch.Mackie D, Scibek J, (2012).*Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities British Columbia Ministry of Environment, Water Protection and sustainable Branch. p 289.*



Annexe

Tableau 1 : précipitation (mm) 1996-2019 station de Bejaia-Aéroport.

pluie	sept	Oct	Nov	Déc	jan	Fév	mars	avril	mai	juin	juillet	août	annuelle
1996-1997	38	47	95	54	50	25	16	50	11	22	2	21	431
1997-1998	58	222	108	93	16	80	61	95	160	3	0	10	906
1998-1999	46	81	185	128	126	120	52	30	15	1	1	3	788
1999-2000	48	24	93	227	73	75	56	27	54	5	1	Néant	683
2000-2001	13	77	31	66	212	68	9	66	37	Néant	Néant	12	591
2001-2002	47	30	104	71	69	104	58	18	24	Néant	107	28	660
2002-2012	69,81	72,18	118,81	145,45	115,54	105,36	77,36	76,36	42,09	11,36	11,18	16,27	861,77
2012-2013	333,76	83,56	106,43	57,15	89,9	323,4	74,94	198,4	7,36	95,51	1,02	2,03	1373,46
2013-2014	44,68	34,79	182,88	52,31	130,8	179,8	78,23	46,23	83,56	3,05	10,92	69,86	917,11
2014-2015	6,1	76,21	9,15	262,89	84,56	56,64	138,17	17,27	10,16	66,8	0,76	1,27	729,98
2015-2016	20,58	41,65	51,56	0	135,12	155,4	70,86	3,05	19,3	1,78	0	10,16	509,46
2016-2017	39,12	21,59	43,19	41,14	101,09	110	199,39	49,27	55,62	19,06	0	0	679,47
2017-2018	19,03	33,8	164,59	189,76	266,72	51,81	6,35	75,95	0,51	10,15	3,05	0	821,72
2018-2019	48,21	122,19	46,23	21,84	53,61	139,5	195,58	37,1	106,92	21,34	0,25	14,48	807,25
1996-2019	59,377	69,069	95,631	100,681	108,81	113,85	78,06	56,42	44,75	21,67	10,62	14,46	773,4

Tableau 2 : Température (C°) 1996-2019 station de Bejaia-Aéroport.

température	sept	oct	nov	déc	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juillet	août
1996-1997	21,4	16,2	15,9	14,2	13,1	12,8	12,3	15,4	19,8	23,2	24,1	25,6
1997-1998	23,9	20,1	16,3	13,2	12,2	12,5	12,3	15,8	18	22,3	24,3	25
1998-1999	23,5	17,8	14,6	11	11,1	9,6	13,6	15	19,7	22,9	24,8	27
1999-2000	24,5	22,1	14,6	11,9	9	11,7	13,4	16,5	19,5	21,7	25,5	26
2000-2001	23,4	18,9	16,2	13,9	12,9	11,3	16,9	15,3	17,7	23,2	24,7	25,7
2001-2002	23,2	22,6	14,7	10,7	10,7	11,6	14	15,4	18,4	22	24,2	24,6
2002-2012	22,8	20,3	15,5	12,3	10,1	11,4	13,5	15,9	18,7	22	25,4	26,4
2012-2013	23	20,5	16,7	12,3	10,6	7,8	13,3	15,9	18,9	24,1	26	27,1
2013-2014	23,3	22,5	14,7	11,9	11,4	10	14,8	15,8	17,5	20,6	24,6	24,8
2014-2015	25,3	21,2	18,1	12,5	13,1	13,1	12,6	16,5	18,1	22,2	24,2	25,7
2015-2016	23,9	20,7	15,4	12,7	11,1	10,9	13,1	16,3	19,6	22,3	26,4	26,7
2016-2017	23,7	22,3	17	13,6	13,2	13,8	13,1	16,1	18,5	22,3	25,2	25,2
2017-2018	23,3	19,4	14,7	11,6	9,9	13,3	14,5	15,9	19,8	24	26,4	27,7
2018-2019	24,9	20	15,4	12,3	12,3	10,7	14,4	16,3	17,6	21,9	25,8	26
1996-2019	23,578	20,328	15,7	12,435	11,478	11,464	13,7	15,864	18,7	22,478	25,114	25,964

Tableau 3 : Bilan hydrologique de la station de Bejaia-Aéroport (1996-2019).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Année
P	59,38	69,07	95,63	100,68	108,81	113,85	78,06	56,40	44,75	21,67	10,63	14,47	339,83
ETPc	109,01	77,63	42,30	26,65	23,73	23,11	39,20	55,15	82,73	118,01	147,74	147,15	892,41
ETR (mm)	59,4	69,1	42,3	25,7	23,7	23,11	39,2	55,1	82,7	83,7	10,6	14,5	529,11
RFU	0	0	53,33	100	100	100	100	100	62,02	0	0	0	615,35
Excédent	0	0	0	27,36	85,08	90,74	38,86	1,25	0	0	0	0	243,29
Déficit agricole	49,63	8,56	0	0	0	0	0	0	0	34,32	137,11	132,68	362,3

Tableau 4 : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques et biologiques des différentes stations, (Kerouaz, Abd Ellouche, 2019).

Paramètres	T (°C)	pH	CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	O² dissous mg/l⁻¹	NH⁴⁺ mg/l	NO²⁻ mg/l	NO³⁻ mg/l	PO₄³⁻ mg/l
Puits saidj à Bejaia	19,2	8,63	1570	16,73	0	0	14.71	0
puits ramdani à Irza	15,8	8,25	1400	16,53	0	0.024	4.70	0
Puits djemaa à Mellala	17,5	9,09	1830	5,59	0	0	3.92	0
Forage Cevital 1 à La réunion	19,1	8,55	2340	15,84	0.120	0,03	4.24	0
Puits Ferme amzal à El kseur	19,7	8,85	1850	15,44	0	0	81.79	0
Puits Remila à Sidi Aich	20,9	8,35	5300	5,52	0	2.11	18.09	0
Forage 7village à ilmaten	22,4	8,25	2110	6,53	0	0,002	131.5	0
Forage Hayani M.A	22	8,3	2820	14,3	0	0,008	5.19	0
Puits EAC3 à El Kseur	21,2	8,3	2670	7,55	0	0	59	0
Puits EAC5 à El Kseur	20,9	8,57	1980	65,4	0	0	78.72	0
Puits Moullay à Amizour	18	8,04	1440	10,16	0	0.018	21.97	0
Puits Suissi à Tala Hamza	16,7	8,88	3630	2,69	0	0.094	5.14	0
Puits Mendi à Tahanount	19,7	8,31	8100	3,59	0	0.01	14.84	0

Tableau 5 : tableau des simulations du niveau piézométrique des trois périodes.

Forages	NP calculé période2011-2019 (m)	NP calculé période 2019-2030(m)	NP calculé période 2030-2040(m)
REMILA	67.13412	67.12984	67.13375
HAMDAOUI	67.25845	67.24731	67.25831
REMILA	67.44966	67.4435	67.44944
OUABBA	67.16886	67.15834	67.16773
BOUDJOU	67.25212	67.24193	67.25098
OUMLIL	68.05866	67.053	68.05865
W3	53.28541	50.95518	53.20641
U4	54.76047	52.74704	54.75252
U4	54.76047	52.74704	54.75252
7	55.82803	53.13518	55.80903
OAS	45.30426	44.79533	44.36903
P.RAISIN	40.86047	40.95517	40.95478
HAYANI	42.90155	42.87582	42.87564
AMIZOUR1	37.76602	37.81603	37.81569
ALOUI	39.13011	39.22029	39.21906
ALOUI	39.13011	39.22029	39.21906
MOZAIA	38.35733	38.43252	38.43096
MOZAIA	38.35733	38.43252	38.43096
BOUABAS	36.5116	36.58633	36.58471
ATHMANI	41.41303	41.48126	41.48026
VALFLORA	35.79586	35.846	35.84383
ISAHLIEN	26.51297	26.52887	26.52055
MOUS	24.69147	24.60175	24.57397
MOUS	24.69147	24.60175	24.57397
ZI.AM	27.61018	27.60258	27.60228
ZI.AM	27.61018	27.60258	27.60228
OUNOUGH1	25.42446	25.42799	25.42757
CARRIÈRE	21.68136	21.68521	21.68451
G4	17.72975	17.73195	17.73189
MARDJ	18.74237	18.9306	18.73686
MARDJ	18.74237	18.9306	18.73686
DEFFORT	18.48253	18.64026	18.46559
IBEZ	18.52483	18.65593	18.48881
BOULKARI	58.94732	56.98075	58.94738
EAC	25.97194	25.97316	25.97115
EAC	25.97194	25.97316	25.97115
EAC1	22.98075	22.98051	22.97957
EAC	-	22.98051	22.97957
MAURICE1	24.64899	24.64817	24.64406
EAC5	24.49546	24.4944	24.49031
EAC	24.15294	24.4944	24.49031
EAC	23.49866	24.15088	24.14649
EAC	23.49866	23.49697	23.49336
EAC	23.06531	23.49697	23.49336
EAC	23.06531	23.06612	23.06362
EAC	22.84124	23.06612	23.06362
EAC	22.84124	22.84111	22.8387
EAC	-	22.84111	22.8387
AYAD	23.84795	23.84257	23.83709
AYAD	23.84795	23.84257	23.83709
AMZAL	22.53068	22.52627	22.5228
ROUMILI	22.40081	22.39588	22.39229
AMZAL2	23.17939	23.17363	23.16874
MESS	19.95832	19.95411	19.95058
MESS	19.95832	19.95411	19.95058

MESS1	19.33531	19.33203	19.32937
MESS1	19.33531	19.33203	19.32937
DAS	18.46022	18.46032	18.46013
DAS	18.46022	18.46032	18.46013
ABREUVOI	14.8348	14.83573	14.83531
BEN	14.70316	14.70402	14.70363
BEN	14.70316	14.70402	14.70363
SAIDANI	14.32734	14.32771	14.3274
CEVITAL	6.173864	10.96393	8.807789
R5	8.081305	10.93844	9.246727
R5	8.081305	10.93844	9.246727
MELLALA	9.305708	9.709799	9.755793
DJAMAA	8.93968	8.980217	9.100198
DJAMAA	8.93968	8.980217	9.100198
REBAHI	8.556445	7.59915	7.943788
REBAHI	8.556445	7.59915	7.943788
CHENDOUH	10.10752	10.55427	10.74762
RAMDANI1	10.31728	11.40031	10.64737
RAMDANI2	10.36671	11.54092	10.64264
RAMDANI3	9.938429	10.5879	10.34335
AZZ1	16.81538	16.82559	16.79376
AZZ1	16.81538	16.82559	16.79376
AZZ2	17.13516	17.1596	17.09969
AZZ2	17.13516	17.1596	17.09969
BOSS	18.31561	18.31596	18.31054
AIT	20.76823	20.99374	20.95591
KLIOUA	14.09439	14.0659	13.90773
KLIOUA	14.09439	14.0659	13.90773
SAIDANI	13.10815	13.04813	13.00705
ABBA	16.08967	17.75561	17.50965
ABBA	16.08967	17.75561	17.50965
HOCINI	14.05841	16.20233	15.88271
HOCINI	14.05841	16.20233	15.88271
MANSEUR	20.68528	20.8417	20.84781
AIT	20.42773	20.736	20.7503
AIT	20.42773	20.736	20.7503
SAIDANI	16.95986	17.96822	17.80045
MENDI	12.80039	12.83581	12.81971
MENDI	12.80039	12.83581	12.81971
TAHA1	12.98666	13.0453	13.01877
TAHA1	12.98666	13.0453	13.01877
TAHA2	8.545635	8.600308	8.597905
JUCTAR	10.5684	12.03654	11.82019
SIMAF	9.821207	11.13259	11.01481
KARIAA	9.889831	10.97024	10.76735
KARIAA	9.889831	10.97024	10.76735
SAIDJ	5.889248	5.811539	7.915488
AÉROPORT	9.209915	12.19574	12.3899

Tableau 6 : les simulations des nitrates en trois périodes.

puits	concentration après le calage mg/l	Scénario 2011- 2019 Mg/l	Scénario2019- 2030 Mg/l	Scénario 2030- 2040 Mg/l
REMILA	15,09	15,09	15,09	15,09
VSA	31,7	31	31,9	31,9
EAC1	110,3	108,48	110,3	106,5
EAC5	41,2	41	41,2	41,23
SUISSI	31	30	31	30,99
RAMDANI	112,24	112,2	112,24	112,23
MENDI	11,1	11,1	12,4	12,4
CEVITAL	0,9	18,46	4,961	4,961
SAIDJ	17,3	17,31	14,929	15,9
NO4	5,79	5,1	13,08	13,08
MOULAY	45,39	45,39	45,38989	45,38958
DJAMAA	12,4	11,4	12,4	12,4
7 VILLAGES	59,5	59,49	59,49	59,49