

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohammed Seddik Benyahia- de Jijel
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

جيجل - جامعة محمد الصديق بن يحي
كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم علوم الارض و الكون

Thèse

Présentée par

Dounyazad BENABBES

Pour l'obtention de

Doctorat en 3ème cycle LMD

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Thème

Modélisation des écoulements d'eau souterraine et du transport des nitrates dans l'aquifère des alluvions de la Basse vallée de la Soummam (Sidi-Aich-Béjaïa, Nord-Est algérien)

Soutenu publiquement le 16 avril 2024, devant le jury composé de :

Président :	Azzedine BOUZENOUNE	Professeur	Université de Jijel
Rapporteur :	Farès KESSASRA	Professeur	Université de Jijel
Examineurs :	Abdelhamid HAOUCHINE	Professeur	USTHB
	Tarek DRIAS	Professeur	Université de Batna 2
	Mohamed LARID	Professeur	Université de Mostaganem
	Abderezak Krika	MCA	Université de Jijel

ملخص

يعتبر وادي الصومام من أهم الوديان في شمال الجزائر، حيث يستنزف منطقة خصبة غنية بالتربة و الموارد المائية. تتكون طبقة المياه الجوفية من الترسبات الحالية و الحصى و الرمال تنتمي إلى الحقبة الزمنية الميوسيني البليوسين الرباعي، ويتراوح سمكها بين 40 و62 مترا في جزئها الأسفل بين سيدي عيش وبجاية، وتتميز بخصائص هيدروجيولوجية جيدة.

يهدف هذا العمل إلى متابعة تطورات المستويات القياسية لطبقة المياه الجوفية و تتبع محتواها من المركبات النتروجينية من أجل تقييم تأثير الأنشطة البشرية على المياه السطحية والمياه الجوفية، و كذلك نمذجة تدفقات المياه الجوفية المدعومة بمحاكات انتشار النترات.

في الفصل الأول: تم القيام بخمس خرجات ميدانية للقياس وأخذ العينات بهدف جمع قياسات ميدانية جديدة و تحديث قاعدة بيانات الوادي. من أجل فهم الأداء الهيدروديناميكي الحالي لطبقة المياه الجوفية، تم رسم خريطتين قياسيتين في عام 2021 خلال الفصل الممطر و الفصل الجاف، و رصد و رسم خريطة النترات لتقييم تأثير الأنشطة البشرية على جودة المياه.

في الفصل الثاني: تم استخدام هذه الخرائط لنمذجة تدفقات المياه الجوفية. في الواقع يتم تحديث النموذج الهيدروجيولوجي لوادي الصومام الأسفل، من أجل تحديد احتياطات المياه و توازنها و وضع سيناريوهات تنبؤية.

في الفصل الثالث: نستكمل نمذجة تدفقات المياه الجوفية بنمذجة نقل النترات و التنبؤ بمصيرها داخل المنطقة المملوءة من طبقة المياه الجوفية التي تمت دراستها حتى عام 2050، و تتيح هذه النمذجة المقترنة زيادة إثراء خطة إدارة الموارد المائية في وادي الصومام، بما في ذلك توفير المياه ونوعية هذه الموارد.

الكلمات المفتاحية: الهيدروجيولوجيا ؛ مركبات النتروجين ؛ النمذجة الهيدروديناميكية ؛ نمذجة نقل النترات ؛ وادي

الصومام السفلي ؛ الجزائر

Abstract

The Soummam valley is considered one of the most important valleys in northern Algeria. Mio-Plio-Quaternary aquifer is composed of current alluvium, gravel and sand, the aquifer thickness varies between 25 and 62 m in its lower part between Sidi Aich and Bejaïa, it has good hydrogeological characteristics. This thesis aims to follow the evolution of the piezometric levels of the alluvial aquifer, to monitor its nitrogen content in order to assess the effect of anthropogenic activities on surface water and groundwater and to model its groundwater flows supported by nitrate transport simulations. In a first approach, five measuring and sampling companions were completed in order to collect new field measurements and update the valley database. In order to understand the current hydrodynamic functioning of the alluvial aquifer, two piezometric maps were made in 2021 during the high and low waters, and nitrate monitoring and mapping to assess the impact of human activities on water quality. In a second approach, this multithematic mapping will be used to model groundwater flows, indeed, the hydrogeological model of the lower Soummam valley is updated in order to quantify water reserves and its water balance and to establish predictive scenarios. This approach is complemented by modelling the transport of nitrates and predictions of their fate within the saturated zone of the aquifer studied until 2050. This coupled modelling makes it possible to further enrich the water resources management plan of the Soummam Valley including the availability of water and the quality of these resources.

Keywords: hydrogeology; nitrogen compounds; hydrodynamic modelling; nitrate transport modelling; lower Soummam valley; Algeria.

Résumé

La vallée de la Soummam est considérée comme l'une des plus importantes vallées du Nord de l'Algérie. Son aquifère du Mio-Plio-Quaternaire est composé d'alluvions actuelles, de graviers et de sables, son épaisseur varie entre 25 et 62 m dans sa partie basse comprise entre Sidi Aich et Béjaïa, il présente de bonnes caractéristiques hydrogéologiques. La thèse a pour objectif de suivre l'évolution des niveaux piézométriques de la nappe alluviale, ses teneurs en composés azotés afin d'évaluer l'effet des activités anthropiques sur les eaux de surface et des eaux souterraines et de modéliser ses écoulements d'eau souterraine appuyés par les simulations du transport des nitrates. Dans une première approche, cinq campagnes de mesure et d'échantillonnage ont été accomplies afin de collecter de nouvelles mesures de terrain et d'actualiser la base de données de la vallée. Afin de comprendre l'actuel fonctionnement hydrodynamique de la nappe des alluvions, deux cartes piézométriques ont été réalisées en 2021 durant les hautes et basses eaux, ainsi qu'un suivi et une cartographie des nitrates afin d'évaluer l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux. Dans une seconde approche, cette cartographie multithématique servira à modéliser les écoulements d'eau souterraine, en effet, le modèle hydrogéologique de la basse vallée de la Soummam est actualisé afin de quantifier les réserves d'eau et son bilan d'eau et d'établir des scénarios prévisionnels. Cette approche est complétée par la modélisation du transport des nitrates et des prévisions sur leur devenir au sein de la zone saturée de l'aquifère étudié jusqu'à l'horizon 2050. Cette modélisation couplée permet d'enrichir davantage le plan de gestion des ressources en eau de la vallée de la Soummam incluant la disponibilité de l'eau et la qualité de ces ressources.

Mots-clés : hydrogéologie ; composés azotés ; modélisation hydrodynamique ; modélisation du transport des nitrates ; basse vallée de la Soummam ; Algérie

Remerciements

Je suis profondément reconnaissant envers DIEU, tout-puissant, qui m'a soutenu et donné la force nécessaire pour mener à bien cette tâche.

Merci à mon directeur de thèse le Professeur KESSASRA Farès qui m'a confié ce travail et qui m'accompagne. Je vous suis reconnaissante de m'avoir formé et orienté, merci profondément pour vos conseils ainsi que pour votre gentillesse.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Je remercie tout particulièrement Messieurs les membres du jury :

Le professeur Azzedine BOUZENOUNE, à l'Université de Jijel, le professeur Abdelhamid HAOUCHINE, à l'USTHB, le professeur Tarek DRIAS, à l'Université de Batna 2, le professeur Mohamed LARID, à l'Université de Mostaganem et le MCA Abderezzak Krika, à l'Université de Jijel

Je tiens à remercier Thomas Reimann, enseignant à l'université de technologie de Dresde, pour son accueil, son soutien et ses conseils précieux tout au long de mon stage.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers les membres du laboratoire de recherche Génie Géologique, université de Jijel. Merci aux ingénieurs des laboratoires de la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie à l'université de Jijel de m'avoir aidé à réaliser les analyses chimiques, je remercie aussi tout le service de l'Office National de la météorologie à la station de Béjaïa Aéroport pour leurs aides. Je suis extrêmement reconnaissante envers tous les agriculteurs de Béjaïa.

Je suis reconnaissante envers tous mes amis qui ont été là pour m'encourager et me soutenir tout au long de la réalisation de cette thèse.

Je tiens à remercier chaleureusement tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce travail, que ce soit directement ou indirectement, par leur amitié et leur sympathie.

Et pour finir, un grand merci à ma famille : mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs, de m'avoir soutenu et d'avoir toujours cru en moi, et d'avoir fourni les matières premières nécessaires au maintien de mon intégrité morale et physique.

Et à la fin, je tiens à remercier chaleureusement mon mari pour ses encouragements et son soutien infaillible.

Table des matières

ملخص	II
Abstract	III
Résumé	IV
Remerciements	V
Table des matières	VI
Liste des tableaux	X
Liste des figures	XII
Liste des abréviations	XIV
Introduction générale et méthodologie de recherche	1
Partie I : Présentation et caractérisation de la vallée de la basse Soummam	
I. Introduction	5
II. Contexte géographique	5
III. Contexte géologique	7
IV. Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère	11
IV.1. Caractérisation de l'aquifère	11
IV.1.1. Formations perméables	11
IV.1.2. Formations imperméables	11
IV.2. Caractéristiques géométriques de l'aquifère	11
IV.3. Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère	13
V. Etude hydro-climatique	18
V.1. Précipitations et températures moyennes mensuelles	18
V.2. Estimation du bilan hydrologique	19
V.2.1. L'évapotranspiration potentielle corrigée (ETPc)	19
V.2.2. Bilan hydrique	20
V.3. Caractéristiques hydrologiques	22
VI. Etude socio-économique de la vallée	22
VI.1. Evolution démographique et besoins en eau potable	22
VI.2. Activités agricoles et besoins en eau d'irrigation	24

VI.2.1. La répartition des terres agricoles	25
VI.2.2. L'occupation des terres agricoles	22
VI.2.3. Engrais et produits phytosanitaires dans la vallée	27
VI.2.4. Calendrier cultural	30
VI.2.5. Eau d'irrigation	31
VI.3. Activités industrielles et besoins en AEI	33
VI.4. Déchets solides et rejets liquides	34
VI.4.1. Déchets et rejets domestiques	34
VI.4.2. Déchets agricoles	35
VI.4.3. Déchets industriels	35
VII. Conclusion	37

Partie II : Etude hydrogéologique et hydrogéochimique

I. Introduction	39
II. Matériels et méthodes	41
II.1. Normes de potabilité des eaux	45
III. Résultats et discussion	47
III.1. Piézométrie de l'aquifère	47
III.2. Caractérisation hydrogéochimique des eaux de surface et des eaux souterraines	50
III.2.1. Géochimie des eaux de surface	50
III.2.1.1. Température	50
III.2.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)	50
III.2.1.3. Conductivité électrique (CE)	51
III.2.1.4. Oxygène dissous (OD)	52
III.2.1.5. Nitrates (NO_3^-)	53
III.2.1.6. Nitrites (NO_2^-)	53
III.2.1.7. Ammonium (NH_4^+)	54
III.2.1.8. Phosphates (PO_4^{+2})	55
III.2.2. Géochimie des eaux souterraines	58
III.2.2.1. Température	58
III.2.2.2. Potentiel d'hydrogène (pH)	58
III.2.2.3. Conductivité électrique (CE)	59
III.2.2.4. Oxygène dissous (OD)	60

III.2.2.5. Nitrates (NO_3^-)	61
III.2.2.6. Nitrites (NO_2^-)	64
III.2.2.7. Ammonium (NH_4^+)	65
III.2.2.8. Phosphates (PO_4^{+2})	66
III.2.2.9. Processus de nitrification et dénitrification	67
III.3. Evolution spatio-temporelle des nitrates dans l'aquifère de la basse Soummam	68
IV. Conclusion	73

Partie III : Mise à jour du modèle des écoulements de la vallée de la basse Soummam

I. Introduction	74
II. Matériels et méthodes	75
II.1. Conception du modèle hydrogéologique de la vallée de la basse Soummam	75
II.1.1. Paramètres géométriques de la nappe	75
II.1.1.1. La discrétisation du modèle de la vallée de la basse Soummam	75
II.1.1.2. L'épaisseur de l'aquifère	76
II.1.1.3. Les conditions aux limites	77
II.1.1.4. Recharge de la nappe	78
II.1.1.5. Paramètre hydrodynamique	79
II.2. Calage et validation du modèle hydrodynamique en régime permanent	82
II.3. Simulation hydrogéologique en régime transitoire	83
III. Résultats et discussion	86
III.1. Résultats du calage du modèle	86
III.2. Simulation hydrodynamique	91
III.2.1. Suivi des fluctuations des niveaux piézométriques	91
III.2.2. Analyse des issues du modèle hydrogéologique	94
III.2.3. Bilan d'eau de la nappe	95
IV. Conclusion	97

Partie IV : Modèle de transport des nitrates de la vallée de la basse Soummam

I. Introduction	98
II. Matériels et méthode	99

II.1. Modélisation du transport des nitrates	99
II.2. Calage en régime permanent	102
II.3. Simulation du transport des nitrates en régime transitoire	102
III. Résultats et discussion	103
III.1. Processus de calage et de validation	103
III.2. Simulation du transport des nitrates	104
III.3. Modèle d'évolution des nitrates	106
III.4. Les incertitudes de modèle hydrodynamique et du transport des nitrates	109
IV. Conclusion	110
Conclusion générale et perspective de recherche	111
Références bibliographiques	
Références bibliographiques	116-124

Liste des tableaux

Tableau 1	Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles corrigées calculées par la méthode de Thornthwaite à la station de Béjaïa Aéroport (1996-2019)	21
Tableau 2	Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite à la station de Béjaïa Aéroport (1996-2019)	21
Tableau 3	Les affluents de la rivière avec leurs superficies et position (Site 1)	22
Tableau 4	Répartition de la population et de la demande en eau potable de la vallée de la basse Soummam par commune (PNE, 2010)	24
Tableau 5	Nombre et superficie des exploitations selon le statut juridique de la terre	26
Tableau 6	Les différents types d'engrais	27
Tableau 7	Quantité des engrais utilisée pour les fourrages en quintal	28
Tableau 8	Quantité des engrais utilisée pour les agrumes en quintal	28
Tableau 9	Calendrier agricole	32
Tableau 10	Répartition de la superficie irriguée et le volume demandé en eau pour l'irrigation (PNE,2010)	33
Tableau 11	Evaluation des besoins en eau industrielle (PNE,2010)	34
Tableau 12	Les décharges publiques sauvages et volume d'eaux usées domestiques (CENEAP,2012)	35
Tableau 13	Les normes des eaux d'irrigation et de potabilité des eaux	46
Tableau 14	Valeurs des températures en °C dans les eaux de surface	50
Tableau 15	Valeurs du potentiel d'hydrogène dans les eaux de surface	51
Tableau 16	Valeurs des conductivités électriques en $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans les eaux de surface	52
Tableau 17	Valeurs de l'oxygène dissous en mg/L dans les eaux de surface	53
Tableau 18	Valeurs des nitrates en mg/L dans les eaux de surface	53
Tableau 19	Valeurs des nitrites en mg/L dans les eaux de surface	54
Tableau 20	Valeurs de l'ammonium en mg/L dans les eaux de surface	54
Tableau 21	Valeurs des ortho-phosphates en mg/L dans les eaux de surface	55
Tableau 22	Paramètres des conditions aux limites appliqués au modèle de la vallée de la basse Soummam, en Mars 2011. C : Conductance hydraulique (m^2/s), H : niveau piézométrie (m)	77
Tableau 23	Période de stress utilisée dans le modèle de la vallée de la basse Soummam pour la période simulée 2020-2050	83
Tableau 24	Temps de simulation et débit de pompage dans les forages	84

Tableau 25	Niveaux piézométriques simulés en 2011-2021 et comparés aux niveaux piézométriques mesurés en 2021	88
Tableau 26	Bilan hydrique de chaque scénario simulé en régime transitoire ; les données sont exprimées en m ³ /s	96
Tableau 27	Temps de simulation et débit de pompage dans les forages	103
Tableau 28	Différents scénarios de concentrations de nitrates en régime transitoire	105- 106

Liste des figures

Figure 1	Situation géographique du bassin versant et de la vallée de la basse Soummam	6
Figure 2	Esquisse géologique de la zone d'étude établie à partir des cartes géologiques : Bougie, Oued Amizour et Sidi Aich (1/50000) (Kessasra, 2015)	10
Figure 3	Coupes géologiques transversales (Kessasra et al., 2021)	15
Figure 4	Logs stratigraphiques creusés dans la vallée de la basse Soummam	16-18
Figure 5	Variation des précipitations et des températures moyennes mensuelles à la station de Béjaïa (1996-2019)	19
Figure 6	Répartition de la SAU par commune	25
Figure 7	Répartition des terres agricoles dans la vallée de la basse Soummam	26
Figure 8	Les quantités des pesticides solides en Kg et liquides en L	29
Figure 9	Comparaison entre les campagnes 1997-1998 et 2017-2018	29
Figure 10	(A) Décharges publiques sauvages déposées dans les berges de la rivière et les eaux usées domestiques déversées dans l'Oued (B) Dépôts de fumier à l'air libre (C) eaux usées industrielles	36
Figure 11	Positionnement des points de prélèvement des eaux de surface et des eaux souterraines (les cinq compagnes)	42
Figure 12	Echantillonnage sur terrain.	43
Figure 13	Matériels utilisés	44
Figure 14	Dosage des sels nutritifs au laboratoire	45
Figure 15	Carte piézométrique de la vallée de la basse Soummam à partir des niveaux mesurés en mai 2021	48
Figure 16	Carte piézométrique de la vallée de la basse Soummam à partir des niveaux mesurés en octobre 2021	49
Figure 17	Variation spatio-temporelle des composés azotés et de l'oxygène dissous dans les eaux de surface	57
Figure 18	Valeurs des températures dans les eaux souterraines	58
Figure 19	Valeurs de potentiel d'hydrogène dans les eaux souterraines	59
Figure 20	Valeurs de la conductivité électrique dans les eaux souterraines	60
Figure 21	Valeurs de l'oxygène dissous dans les eaux souterraines	61
Figure 22	Valeurs des nitrates dans les eaux souterraines	64
Figure 23	Valeurs des nitrites dans les eaux souterraines	65

Figure 24	Valeurs de l'ammonium dans les eaux souterraines	66
Figure 25	Valeurs des ortho-phosphates dans les eaux souterraines	66
Figure 26	Répartition spatiale des nitrates en mai 2021 dans la vallée de la basse Soummam	71
Figure 27	Répartition spatiale des nitrates en Octobre 2021 dans la vallée de la basse Soummam	75
Figure 28	Discrétisation de la nappe de la vallée de la basse Soummam	76
Figure 29	Répartition des altitudes du toit (Top of layer) et du mur (Bottom of layer) de la couche aquifère de la vallée de la basse Soummam	78
Figure 30	Les conditions aux limites et la conductance de la rivière appliquée au modèle de la vallée de la basse Soummam	79
Figure 31	Répartition de la recharge de l'aquifère de la vallée de la basse Soummam	80
Figure 32	Carte piézométrique de la vallée de la basse Soummam réalisée à partir des mesures de la campagne de terrain des hautes eaux : Mars 2011 (1/25 000) (Kessasra, 2015)	82
Figure 33	Répartition de la perméabilité initiale (avant calage) de l'aquifère de la vallée de la basse Soummam	82
Figure 34	Le volume pompé des eaux souterraines dans les trois scénarios (S1 :2011-2021) (S2 : 2021-2030) (S3 :2030-2050)	85
Figure 35	Répartition de la perméabilité après calage de l'aquifère de la vallée de la basse Soummam	87
Figure 36	Niveaux piézométriques callés en régime permanent en mars 2011 (Kessasra et al., 2021)	89
Figure 37	Diagramme de dispersion du modèle en régime permanent	90
Figure 38	Mailles pompées et dénoyées pendant le troisième scénario 2030-2050	93
Figure 39	Concentrations initiales des nitrates dans l'aquifère des alluvions de la vallée de la basse Soummam (mg/L)	100
Figure 40	Concentrations initiales des nitrates dans la rivière et l'eau de recharge	101
Figure 41	Diagramme de dispersion représentant les concentrations des nitrates observées par rapport à la concentration calculées en régime permanent	104

Liste des abréviations

APFA :	Accession à la propriété foncière agricole
CET :	Centre d'enfouissement technique
CH₄N₂O :	Urée
DSA :	Direction des services agricoles
EA :	Exploitation agricole
EAC :	Exploitation agricole collective
EAI :	Exploitation agricole industrielle
GHB :	General head boundary
KOH :	Potasse
MT3D :	Modèle de transport trois dimensions
MT3DMS :	Modèle de transport trois dimensions multi-espèce
(NH₄)₂SO₄ :	Sulfate d'ammonium
NK :	Azote-Potassium
NO₂⁻ :	Nitrites
NO₃⁻ :	Nitrate
NP :	Azote-Phosphore
NPK :	Azote-Phosphore-Potassium
OMS :	Organisation mondiale de la santé
PK :	Phosphore-Potassium
PO₄⁻³ :	Ortho-phosphates
SSP :	Superphosphore simple
STEP :	Stations de traitement et d'épuration des eaux

Introduction générale et méthodologie de recherche

Introduction générale

Les besoins en eau augmentent en raison du développement industriel, de l'urbanisation rapide, de l'expansion des surfaces agricoles irriguées, de l'augmentation des besoins alimentaires, de l'évolution des modes de consommation et du changement climatique (Kessasra, 2015). Cependant, les ressources en eau disponibles sont continuellement menacées par la contamination par les substances chimiques. Ces dernières sont largement utilisées par l'homme et représentent l'un des problèmes majeurs qui affecte les nappes superficielles et peu-profondes. Ces substances sont révélées solubles, mobiles et persistantes dans les eaux souterraines, mais aussi toxiques pour l'environnement ou la santé humaine (Wakida et Lerner, 2005). Ils présentent un risque encore inconnu, et le risque d'exposition chronique à un mélange de produits dans n'importe quel compartiment environnemental a été jusqu'à présent difficile à caractériser (Kim et al. 2011 ; Musolff et al. 2010). Le temps de résidence des contaminants dans les nappes phréatiques peut varier de semaines à des décennies, selon les propriétés physicochimiques du composé et les conditions environnementales (Chapman et Parker, 2005 ; Freitas et al. 2015 ; Moeck et al. 2017a).

Globalement, la qualité des eaux souterraines dépend de différents facteurs tels que les formations géologiques qu'elles traversent, le type de sol, la perméabilité du sol, la profondeur de la nappe phréatique, la recharge et la solubilité des matériaux rocheux dans le système aquifère (Hussain et al. 2010).

Parmi les divers polluants (organiques et inorganiques) qui peuvent affecter la qualité des eaux souterraines, le nitrate (NO_3) est considéré comme le principal et le plus préoccupant depuis 1970 (Townsend, 2003). La pollution des aquifères par le NO_3 est devenue un problème fréquent et grave, en particulier dans les plaines alluviales où ils proviennent principalement des activités agricoles qui répandent habituellement des engrais sur leur territoire (Rufino et al, 2019 ; Mastrocicco, 2011).

Afin d'étudier la disponibilité de l'eau souterraine et l'évolution de sa qualité, la modélisation numérique est l'approche appropriée. Elle permet de suivre l'évolution des niveaux piézométriques et la variation spatio-temporelle des teneurs en éléments indésirables solubles dans l'eau. La modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine est utilisée fréquemment par les hydrogéologues pour représenter la dynamique de l'écoulement des aquifères, le transport des polluants et son impact sur la quantité et la qualité de la ressource en fonction du temps de simulation et du pompage (Larose-Charrette, 2000). Les

modèles mathématiques utilisés pour résoudre les problèmes d'écoulement et de transport en milieu poreux sont issus principalement des lois physiques régissant ces phénomènes. Ces lois physiques sont pour l'écoulement la loi de Darcy, l'équation de continuité et l'équation de diffusivité, et pour le transport de masse, l'équation de convection-dispersion (Chabani et al, 2009). Plusieurs modèles sont disponibles pour simuler les processus hydrogéologiques à l'échelle des bassins versants. Certains de ces modèles comprennent également des méthodes pour simuler le cycle de l'azote dans les sols et la lixiviation de l'azote, le transport vers la nappe passant de la zone racinaire par percolation de l'eau à travers la zone non-saturée et la migration et le piégeage dans la zone saturée (Golmohammadi et al. 2014).

L'Algérie est l'un des pays qui a connu une pression accrue sur la ressource en eau et devrait connaître une pénurie d'eau durable dans les zones arides à semi-arides. Dans le Nord du pays, les ressources en eau renouvelables englobent les bassins tributaires de la Méditerranée et les bassins fermés des Hauts-Plaines (Kessasra, 2015). Le bassin versant de la Soummam en fait partie, c'est un bassin méditerranéen qui occupe une superficie de 9200 km². Les potentialités en eau du bassin sont estimées à 302,6 Million m³/an. Il est constitué par trois principales unités hydrogéologiques avec des ressources renouvelables estimées à 195,9 Million m³/an dans les plaines sétifiennes qui sont la plus productives, la nappe de la vallée de la Soummam avec 108,4 Mm³/an et le plateau d'Elasnam avec 1,3 Million m³/an. Les besoins en eaux en 2020 sont estimés à 38,80 Million m³/an en Alimentation en eau potable, 27,865 Million m³/an pour l'irrigation et 6,123 Million m³/an pour l'industrie (PNE, 2010). Le développement économique de la plaine de la basse vallée de la Soummam est essentiellement basé sur l'agriculture, qui nécessite une mobilisation de plus en plus importante des ressources en eaux locales. Cependant, ces eaux souterraines et ces eaux de surface sont menacées car elles sont confrontées à une baisse de leur quantité et un déclin de leur qualité en raison de la multiplication des activités anthropiques.

L'aquifère alluvial de la basse vallée de la Soummam est, depuis des années, contaminé par les composés azotés et principalement par les nitrates. Les concentrations des nitrates sont assez élevées et dépassent largement les normes OMS et Algériennes. Elles ont atteint 126,1 mg/L en 2003 (Mouni et al, 2009), 86,2 mg/L en 2011 et 111,2 mg/L en 2013 (Kessasra, 2015).

Afin protéger les ressources en eaux de la vallée de la basse Soummam, incluant ses eaux de surfaces et ses eaux souterraines, à moyen et à long termes, il est nécessaire d'étudier leur

fonctionnement, d'identifier leurs caractéristiques hydrodynamiques (Perméabilité, Porosité, Transmissivité et Coefficient d'emménagement.....etc.), et de mettre en lumière les mécanismes du transport des polluants au sein de la nappe alluviale. En effet, le modèle hydrodynamique de la basse vallée de la Soummam a été implémenté en 2006 par Kessasra, il a pour objectif de contrôler les niveaux d'eau, de prévoir le comportement de l'aquifère et d'évaluer les échanges rivière-aquifère en fonction du temps de simulation et la hausse des volumes d'eau pompés (Kessasra, 2006). Le modèle a subi une première amélioration en 2015 sur la base de nouvelles données récoltées et mesurées sur terrain. Son calage en régime permanent ensuite les simulations numériques entreprises en régime transitoire ont été achevés (Kessasra, 2015). Une autre amélioration a été entreprise en 2021, le modèle hydrogéologique actualisé a été ensuite couplé avec un modèle de transport des chlorures au sein de la nappe de la basse vallée de la Soummam (Kessasra et al. 2021).

Cette thèse, qui rentre dans le cadre d'un projet de recherche intitulé "*Evaluation de l'impact de l'anthropisation de la vallée de la Soummam sur l'eau et le sol* », a pour but de démontrer comment des approches de modélisation couplée pourraient contribuer à la gestion des ressources en eau dans des bassins versants et des vallées fortement anthropisées comme la basse vallée de la Soummam, à l'aide d'un modèle hydrogéologique existant (Kessasra et al. 2014 ; Kessasra, 2015 ; Kessasra et al. 2021). Nous explorons de nouvelles données afin de mettre à jour le modèle des écoulements d'eau souterraine et améliorer sa performance de prévisions, suivi de nouvelles simulations sous différentes conditions et contraintes qu'elles soient naturelles ou anthropiques. En effet, trois scénarios hydrodynamiques ont été mis en œuvre entre 2021 et 2050, sur lesquels nous avons construit trois autres scénarios de transport des composés azotés en l'occurrence les nitrates. Ces simulations pourraient fournir de nouvelles orientations sur la disponibilité des ressources en eau souterraines dans la vallée et le transport des polluants azotés présents dans l'aquifère et d'apporter des solutions alternatives pour la protection des eaux souterraines.

Pour atteindre ces objectifs, ce travail de recherche a démarré en 2019 par des missions de collecte des données auprès des administrations concernées qui sont la direction des services agricoles de Béjaïa, la direction des ressources en eau de Béjaïa, la direction de l'environnement de Béjaïa et l'Office Nationale de Météorologie (ONM) à la station de Béjaïa Aéroport. Plusieurs campagnes de mesure et d'échantillonnage ont suivi. Entamées en Mai 2019 et ont duré trois années de suivi de terrain. Deux campagnes d'échantillonnage et des enquêtes avec les agriculteurs ont été réalisées en 2019, une seule campagne en Octobre

2020 en raison de la pandémie du Covid, et deux campagnes de mesure des niveaux d'eau et d'échantillonnage des eaux souterraines et des eaux de surface en Mai et Octobre 2021.

Dans le cadre de ce projet, nous explorons globalement les effets des pratiques agricoles et les activités anthropiques sur les ressources en eau de la basse vallée de la Soummam. Nous nous intéresserons en particulier à l'étude et au suivi des différents composés azotés présents dans l'eau, comme les nitrates, les nitrites et l'ammonium, conformément au plan de thèse établi ci-dessous :

L'introduction générale et méthodologie de recherche.

Partie I concerne à étudier la caractérisation de l'aquifère des alluvions de la vallée de la basse Soummam.

Partie II concerne à étudier l'hydrodynamique et le suivi des composés azotés présents dans l'eau de surface et l'eau souterraine.

Partie III porte sur la mise à jour et l'actualisation du modèle des écoulements d'eau souterraine de la vallée de la basse Soummam.

Partie IV présente des issues du modèle de transport des nitrates au sein de la nappe de la vallée de la basse Soummam.

La conclusion et perspectives de recherche.

Première partie
Présentation et
caractérisation de la vallée
de la basse Soummam

I. Introduction

La caractérisation de la vallée de la basse Soummam est une nécessité pour une bonne étude hydrogéochimique et pour créer une bonne base des données pour la modélisation hydrodynamique et du transport des nitrates.

II. Contexte géographique

Le bassin versant de la Soummam est situé dans la partie centrale du Nord de l'Algérie, à 150 km à l'Est d'Alger. Il est limité au Nord par les monts de Djurdjura, au Sud par les monts de Hodna et le plateau sétifien, à l'ouest par le plateau de Bouira et à l'est par la Méditerranée. Sa superficie est de 9125 km², il est subdivisé en trois sous-bassins : la Soummam, le Sahel et le Boussellem. Le bassin versant est limité par des reliefs élevés avec une altitude maximale de 2308m au pic de Lalla Khadidja, cela favoriserait un écoulement assez rapide des eaux et un temps de contact assez court. Ce bassin a un système fluvial assez dense, la longueur de la rivière principale est de 226 Km (Fig.1).

La vallée de la Soummam fait partie du bassin versant de la Soummam, qui apparaît comme une bande sinueuse orientée du Sud-Ouest vers le Nord-Est, puis se jette dans la mer Méditerranée à Béjaïa (Kessasra, 2015). Dans notre étude, nous nous intéressons à la vallée de la basse Soummam, comprise entre Sidi Aich et l'embouchure (Fig.1). Cette vallée est limitée au nord par les chaînes de montagnes du Djurdjura et ses contreforts qui s'étendent jusqu'à la mer ; au sud par la chaîne des Babors ; à l'ouest par la vallée de la moyenne Soummam ; et à l'Est par la Méditerranée. La vallée de la basse Soummam est longue de 35 Km et large de 2 Km ; le fond de vallée est tapissé par une couverture alluviale. La vallée est réputée pour sa grande activité agricole et industrielle. Sa population atteint 796 020 habitants (PNE, 2010), généralement concentrée au niveau des communes qui longent la vallée comme Sidi Aich, El Kseur et Amizour.

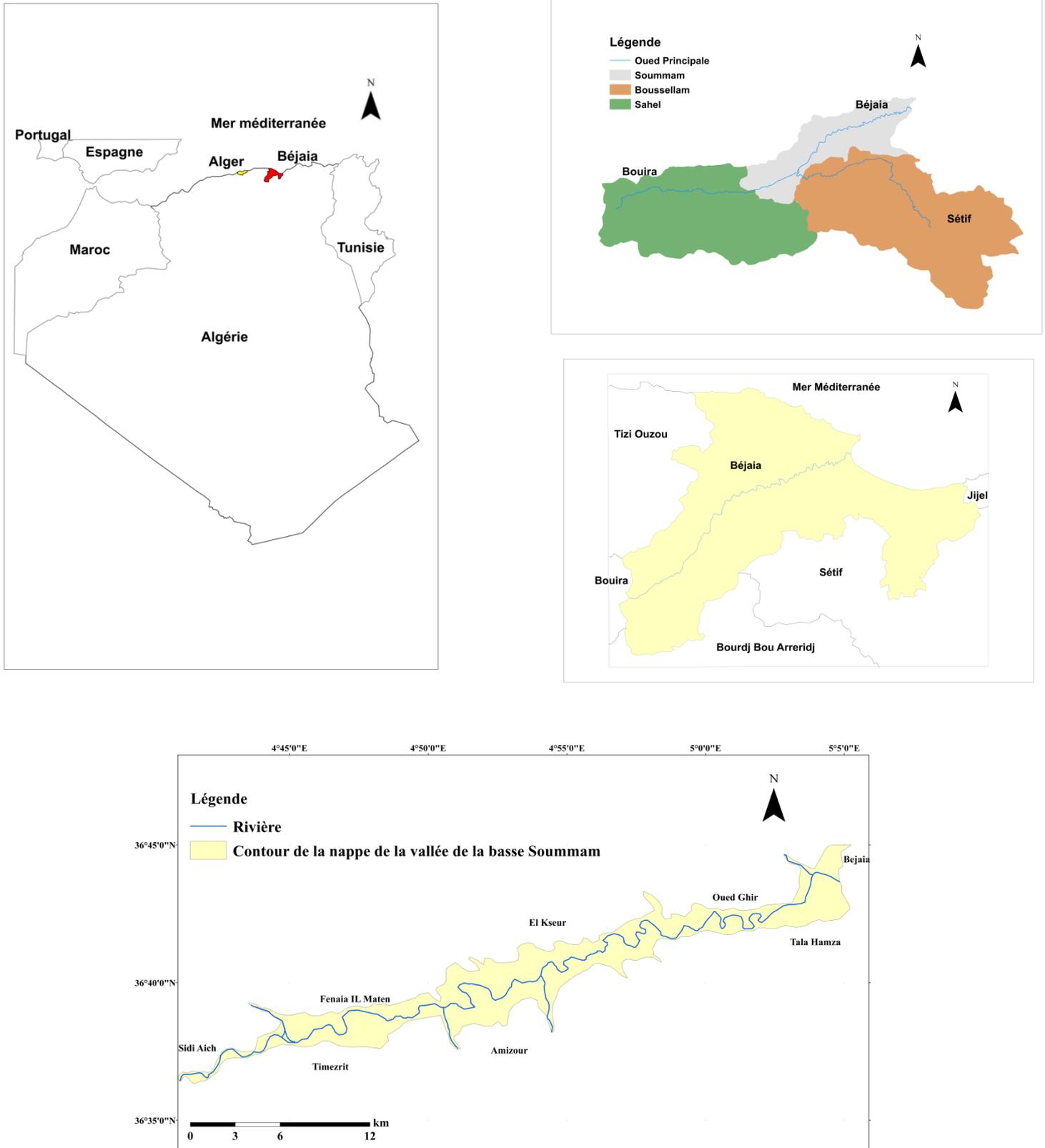


Fig.1. Situation géographique du bassin versant et la vallée de la basse Soummam

III. Contexte géologique

Basé sur les travaux géologiques des affleurements dans les massifs bordant les deux rives de la vallée de la basse Soummam et qui sont réalisés par Bétier (1936), Bétier et al.(1951), Meneroud et Rognon, (1970), les faciès géologiques affleurant autour de la vallée sont présentés du plus ancien au plus récent comme suit (Fig.2) :

- Des affleurements triasiques très localisés à Sidi Aich et Fenaïa Ilmaten, présentés par un faciès gypso-salin avec des marnes versicolores, cargneules et dolomites.
- Des affleurements jurassiques dans les monts d'Arbalou, de Toudja et de Gouraya. Ils comprennent une base liasique constituée de calcaires marneux, au-dessus desquels se trouvent des calcaires durs contenant des parties siliceuses sous forme de brèches. Un jurassique moyen et supérieur (Ficheur, 1891) qui contiennent à la base du grès rouge et pilé au-dessus duquel se trouvent des schistes et des grès micacés (le faciès du Cap Carbon et l'Arbalou).
- Le Crétacé (Néocomien) est composé de calcaires marneux et de marnes avec des débris nodulaires. L'anticlinal jurassique de Djebel Arbalou et le synclinal de Gouraya, dont la lithologie est marquée par la présence de masses calcaires et dolomitiques fracturées, qui sont susceptibles de constituer d'intéressants réservoirs aquifères.
- Au Sud de l'arête Gouraya-Arbalou et au Nord d'Oued Ghir apparaît le parautochtone crétacé qui comprend une alternance de grès et d'argile, une alternance de microconglomérats et de niveaux décimétriques de marnes surmontés de bancs de brèches.
- Les plus importants affleurements du Numidien, d'âge oligo-miocène (Nummulitique sur la Fig.2), se trouvent au Nord de la vallée de la Soummam. Les affleurements les plus septentrionaux sont les plus vastes et le plus éloignés de la vallée de la Soummam, ils longent le littoral à l'Ouest de la ville de Béjaïa. Les deux affleurements les plus méridionaux sont plus proches de la vallée et les plus susceptibles d'avoir des échanges avec les aquifères étudiés; ils se trouvent de part d'autre de l'Oued Ghir (Fig.2). Ces formations numidiennes, essentiellement gréseuses, affleurant sous forme de "klippes" ou de "nappes de charriage", constituent les plus hautes unités de l'édifice structural. Pour les affleurements méridionaux, ces formations reposent principalement sur les formations à dominance marneuse du Crétacé.
- Le Miocène est représenté par des formations sédimentaires et des roches magmatiques. Les formations sédimentaires, essentiellement détritiques constituées par des argiles, des

grès et des conglomérats, affleurent notamment sur la rive nord de la vallée de la Soummam. Elles forment une bande orientée sensiblement NE-SW parallèlement à la vallée, depuis Fenaïa Ilmaten à l'Ouest jusqu'à la commune de Oued Ghir sur environ une vingtaine de kilomètre à vol d'oiseau (Fig.2). Les roches magmatiques affleurent principalement dans le complexe magmatique d'Oued Amizour, situé sur la rive sud de la vallée de la Soummam depuis Oued Amizour à l'Ouest jusqu'au littoral de Tichy. Ces roches magmatiques forment une bande orientée sensiblement E-W et s'étendant sur une vingtaine de kilomètres (Fig.2). Dans ce complexe il est distingué des roches plutoniques et des roches volcaniques (Semroud, 1981). Ces dernières, les plus fréquentes, sont représentées par des laves et des pyroclastites. Les roches plutoniques consistent en des roches intrusives principalement constituées par des granodiorites, des diorites quartziques et des microgranites. Les formations du Miocène possèdent un degré de fracturation très élevé qui favoriserait la circulation des eaux et offre la possibilité à la circulation et à l'accumulation de l'eau.

- Les formations pliocènes ou mio-pliocènes affleurent essentiellement le long de la vallée de la Soummam (Fig.2). Deux types sont classiquement distingués des formations marines et des formations continentales. Le Pliocène marin se trouve notamment dans la partie basse d'Oued Ghir, il est constitué par des marnes bleues, de grès rouges et de gypses triasiques resédimentés (Leikine, 1971). Le Pliocène continental affleure près de Béjaïa, il est constitué des brèches consolidées à très gros éléments de calcaires jurassiques démantelés.
- Le Quaternaire constitué par un dépôt alluvial récent et ancien avec une brèche et des marnes bleues. Il s'est principalement déposé le long de la vallée de la Soummam.

On note la présence d'un verrou géologique à Sidi Aich- Takrizt qui est constitué par des formations imperméables et sépare la plaine de la moyenne Soummam de celle de la basse Soummam.

En somme, on constate que les formations, essentiellement détritiques, du Mio-Plio-Quaternaire, constituent l'aquifère de la vallée de la basse Soummam. Cette vallée présente une grande dissymétrie entre les deux rives, la rive gauche est plus extensive que la rive droite. Elle est caractérisée par un remplissage alluvial sous forme des terrasses divisées en quatre parties :

- La première terrasse présente une grande extension sur la rive gauche de l'oued, elle occupe la majeure partie de la plaine alluviale. Elle est constituée par des niveaux argileux, de galets, de graviers et d'argiles graveleuses.
- La deuxième terrasse est formée de niveaux assez continus sur la rive gauche avec des épaisseurs supérieures à 10m, elle est pratiquement absente sur la rive droite. On y trouve des niveaux de graviers argileux, galets et sables.
- La troisième terrasse est constituée par des graviers, des galets, des sables argileux et parfois de graviers argileux à la base. Elle est sous forme des lambeaux dissymétriques et discontinus sur les deux rives.
- La quatrième terrasse occupe le lit d'inondation de l'oued. Elle présente les alluvions actuelles avec des galets (Bennabi, 1985).

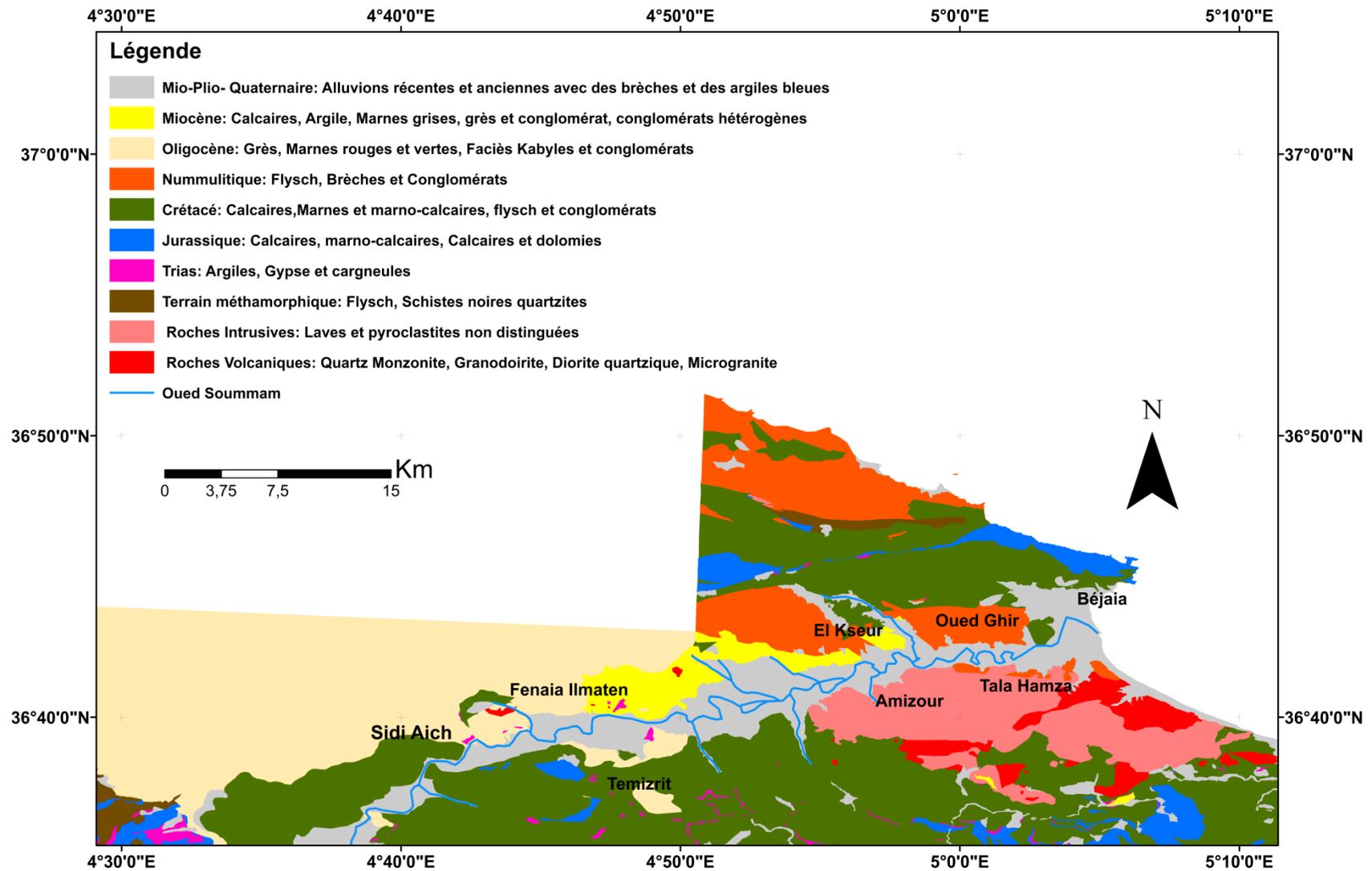


Fig.2. Esquisse géologique de la zone d'étude établie à partir des cartes géologiques au 1/50 000e : Béjaïa (Feuille n°26), Oued Amizour (Feuille n°47) et Sidi Aich (Feuille n°46) in Kessasra, 2015 modifié.

IV. Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère

1) Caractérisation de l'aquifère

Basé sur leurs caractéristiques hydrogéologiques, l'aquifère de la vallée de la basse Soummam est constitué par deux types de formations.

1. Formations perméables

- **Formations perméables alluvionnaires** : Ces formations possèdent un intérêt hydrogéologique majeur qui consiste à faciliter l'infiltration des eaux météoriques et leurs circulations souterraines. Ces formations constituent la nappe superficielle de la vallée de la basse Soummam qui sont essentiellement :

- Des alluvions actuelles constituées de dépôts limoneux qui se trouvent dans les cônes torrentiels.
- Des alluvions récentes présentées par les dépôts limoneux qui forment les basses terrasses et les alluvions marécageuses.
- Des alluvions anciennes sont des dépôts caillouteux ou limoneux de terrasses des oueds.
- Des éboulis non consolidés formés de grès numidiens et de calcaires liasiques.

- **Formations semi-perméables en milieu fracturé** : leur perméabilité est conditionnée par leurs degrés d'altération et de fracturation qui permet la circulation des eaux, il s'agit des grès numidiens qui sont des grès sableux souvent ferrugineux déposés sous forme des bancs épais réguliers.

2. Formations imperméables

Le substratum de l'aquifère est constitué de marnes, d'argiles, ce sont essentiellement des Marnes argileuses avec des plaquettes gréseuses à foraminifères.

2) Caractéristiques géométriques de l'aquifère

La prospection géophysique (CGG, 1970) complétée par l'examen litho-stratigraphique de certains logs de forages ont identifié deux unités hydrogéologiques ; l'une composée d'alluvions quaternaires d'une épaisseur peu profonde de 40 m, formée de galets, de gravier, de sable et parfois d'un remblai argileux et l'autre formation est plus profonde d'âge Miocène, composée de galets, de gravier, de grès et de sable caractérisée par des grains plus grossiers. Ces deux unités sont supposées et forment un seul aquifère en raison de leurs transmissivités identiques. Cet aquifère est entre 25 et 62 m de profondeur (Clinckx, 1973 ;

AHS, 2003 ; ANRH, 2004), reposant sur un substratum constitué de marne et de grès. L'aquifère est considéré comme une nappe libre (Fig.3) de Sidi Aich à Oued Ghir qui devient semi-captive de Oued Ghir à Béjaïa en raison de la présence d'une couche argileuse et limoneuse qui surmonte l'aquifère (Kessasra et al. 2021).

La coupe « A » a été exécutée entre Sidi Aich et Aguellal dans la région de Timezrit, elle est orientée NWW-SEE. Elle montre une couche mince limono-sableuse à la surface de l'aquifère qui surmonte une épaisse couche de 27 à 47 m d'épaisseur constituée par des graviers, des sables et des galets, cette dernière s'amenuise en allant vers le SEE.

Les deux coupes « C et D » ont été réalisées au Sud d'El Kseur, l'une est orientée SWW-NEE et l'autre NNW-SSE. Ces coupes montrent que l'épaisseur de l'aquifère varie entre 25 et 43 m. L'aquifère est surmonté par une couche limoneuse, argilo-sableuse et silteuse dans le SSE. Déposé sur un substratum argileux plastique et argilo-marneux, l'aquifère est constitué par des graviers, sables et galets et des dépôts graviers argileux avec la présence des poches argileuses dans le SSE.

La coupe « B » au SE d'El Kseur orientée NNW-SSE montre que l'aquifère est surmonté par une couche limoneuse, argilo-sableuse. Reposant sur un substratum imperméable argilo-marneux, l'épaisseur de l'aquifère est comprise entre 40 et 65 m ; il est constitué par des graviers et galets avec des poches argilo-limoneuses et parfois sableuses.

L'examen des logs stratigraphiques (ANRH, 2004) a apporté plus d'informations sur la géométrie de l'aquifère (Fig.4). En effet, à Amizour au niveau du log K3, il a été identifié un substratum constitué d'argiles marrons et grises du Miocène (Clincks, 1973), surmonté par deux couches du Quaternaire. La plus ancienne a une épaisseur de 23m composée de gravier et galets considérée comme aquifère et la plus récente est de 26 m composée de marne grise très sableuse. Au KL3 profond de 50 m; le Miocène constitué par les argiles plastiques grises-bleues est surmonté par une alternance de graviers, galets et limons. La couche la plus ancienne de 17 m est composée de graviers et galets considérée comme aquifère est suivie par les limons fins gris et beiges de 20m d'épaisseur, une couche de 4m de petits graviers argileux et 4m de limons beiges.

Trois logs stratigraphiques ont été réalisés à Ilmaten : le premier T8 profond de 49m, la couche la plus ancienne du miocène est composée d'argiles grises surmontée par une épaisse couche de 44 m du mio-plio-quaternaire constituée par des sables, galets et graviers considérée comme une couche aquifère ; à la surface une couche épaisse de 5m est constituée

de limons beiges. Le deuxième log appelé V4 est profond de 36m; le substratum est constitué d'argiles grises du Miocène surmonté par deux couches de graviers et galets séparées par une fine couche de 7m de gravier et sable du quaternaire considérée comme aquifère, des limons beiges sont déposés à la surface avec 2m d'épaisseur. Enfin, le troisième log U4 montre les mêmes formations que le premier et le deuxième, le substratum est composé d'argiles beiges du miocène surmonté par graviers, galets et sable de quaternaire épais de 24m et considérée comme aquifère et à la surface se trouve une fine couche de limons sableux beiges.

Le log N3 localisé à O. Ghir est profond de 51m, le Miocène est présenté par une mince couche d'argile grise qui constitue le substratum. Ce dernier est surmonté par deux couches d'âge quaternaire. L'une présente l'aquifères épais de 12m et constitué de graviers et galets et l'autre composée d'argiles grises et marrons sur 37m d'épaisseur, ce qui confirme l'aspect semi-captif de la nappe dans cette portion aval.

Le log stratigraphique du sondage localisé à Tala Hamza, profond de 149 m, montre une diversité dans les formations. Le substratum du mio-pliocène présente quatre formations, la plus ancienne est constituée de grés fins à ciment calcaire, suivie par des fragments non roulés de grés gris foncé ou brun, surmonté de sables fins jaunâtre argileux et des argiles grises à microfaune néogène (ANRH,2004). Le Quaternaire est présenté par quatre formations, 13m d' argiles grises avec gravier et 17m des gros galets quartzite et roche éruptive dans des argiles sableuses suivie par 37m d'argiles sableuses grises avec gravier siliceux au sommet et de petits galets gréseux surmonté par 13m d'argiles sableuses brunes claires avec petit gravier siliceux considérée comme aquifère.

Enfin le log stratigraphique A1 à Béjaïa, profond de 72m montre le mio-pliocène constitué de plusieurs passages de marnes avec des sables grises légèrement marneux considéré comme le substratum, suivie par la couche aquifère du Quaternaire avec des alternances des sables et marnes grises sableuses.

3) Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère

D'après les résultats des essais de pompage, les valeurs de la transmissivité marquent une variabilité importante qui indique une forte hétérogénéité spatiale. En effet, elle est due à l'existence de plusieurs lentilles d'argile dans la matrice composée essentiellement d'alluvions et de galets. Les transmissivités dans l'aquifère de la Soummam varient entre

10^{-4} et $0,45 \text{ m}^2/\text{s}$, elles augmentent des terrains de bordure vers l'axe de l'oued dans le sens d'écoulement des eaux.

Les basses terrasses sont caractérisées par une transmissivité comprise entre 0,03 et $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ et une perméabilité variant entre $1,6 \cdot 10^{-3}$ et $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, leur coefficient d'emménagement oscille entre 0,1 et 0,14 %. En outre, les anciennes terrasses ont des propriétés différentes des basses terrasses ; leur transmissivité varie entre $3 \cdot 10^{-3}$ et $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, leur perméabilité est comprise entre 10^{-4} et $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ et leur coefficient d'emménagement est de 0,02 et 1 %.

Dans la zone des basses terrasses où le remplissage alluvionnaire à granulométrie grossière (graviers et galets) est assez important, les valeurs de la transmissivité sont plus fortes allant jusqu'à $11,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Par contre, les faibles valeurs sont de l'ordre de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ près des versants et $3,47 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ au niveau des cônes de déjection en bordure de la nappe. Elles sont dues aux remplissages argileux et marno-argileux. Elles diminuent d'amont en aval entre Oued Ghir et l'embouchure en raison de la présence d'une couverture limoneuse qui rend la nappe semi-captive. Elle est mesurée $8,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ au droit du forage N3 près d'Oued Ghir (Kessasra, 2015).

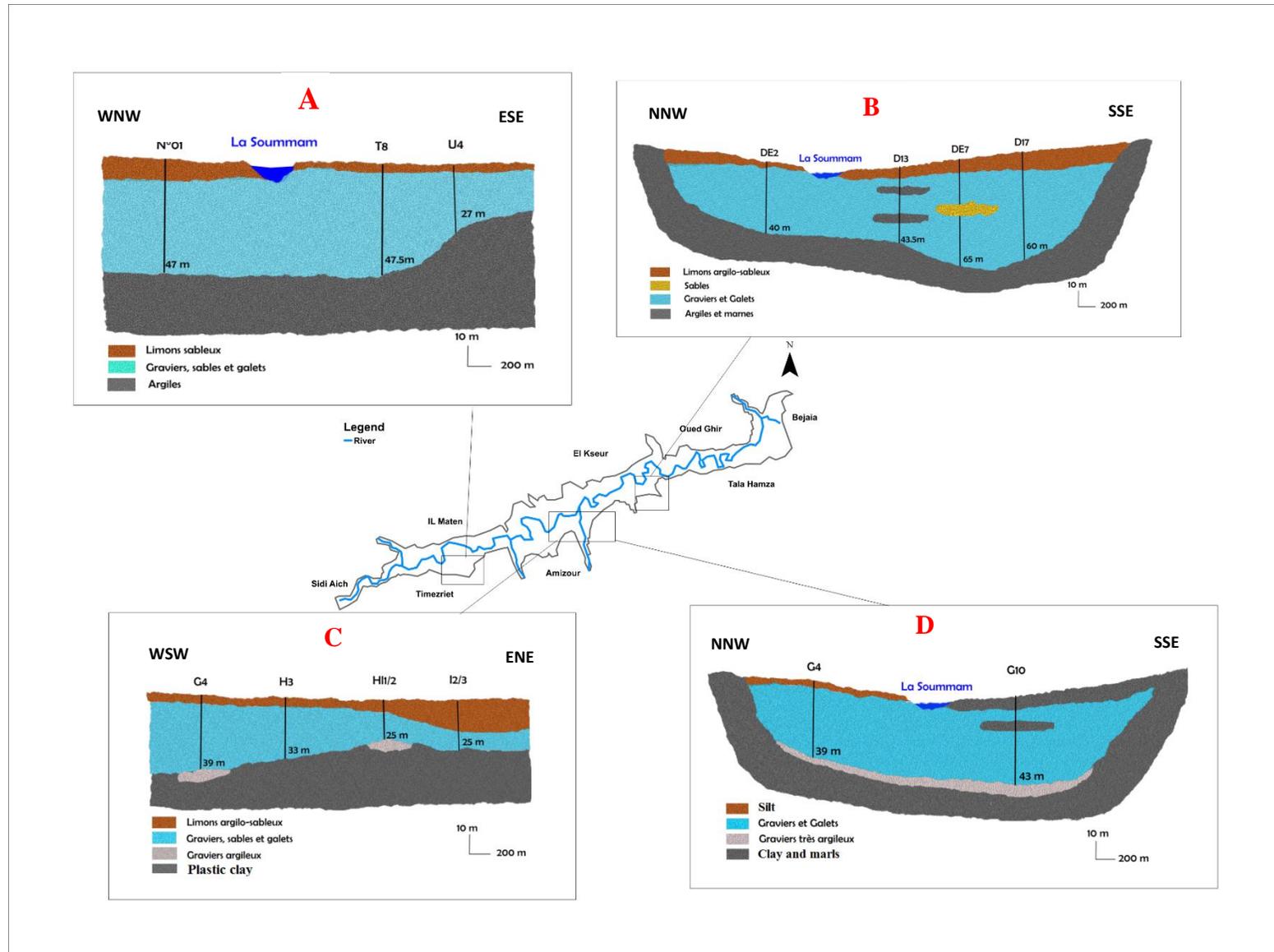
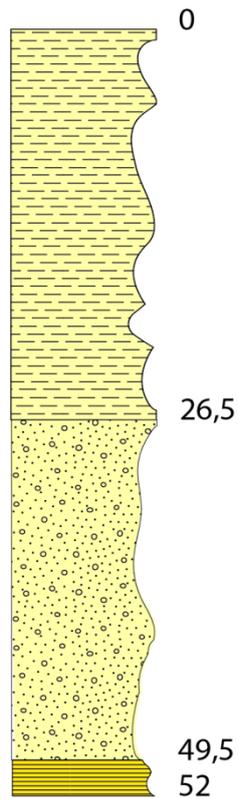
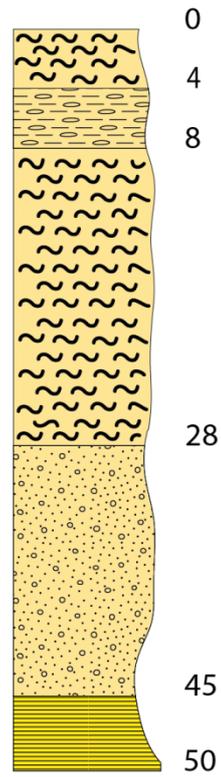


Fig. 3. Coupes géologiques transversales (Kessasra et al. 2021)

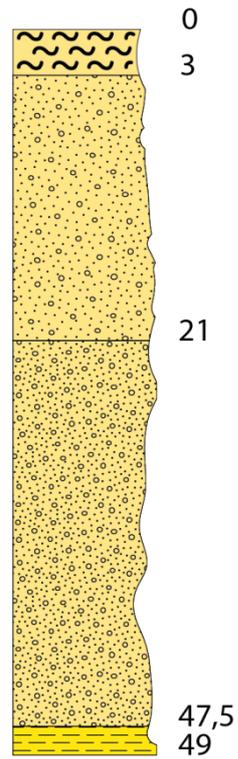
**O.Amizour
K3**



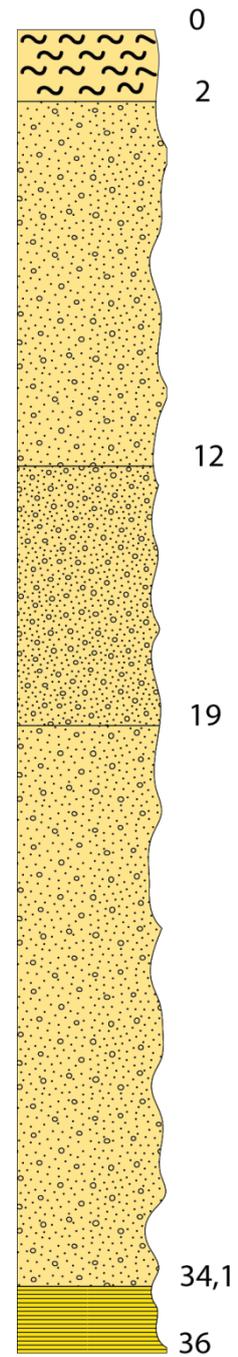
**O.Amizour
KL3**



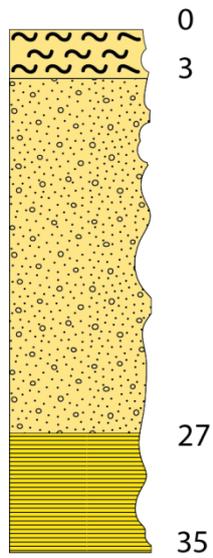
**Fenaia Ilmaten
T8**



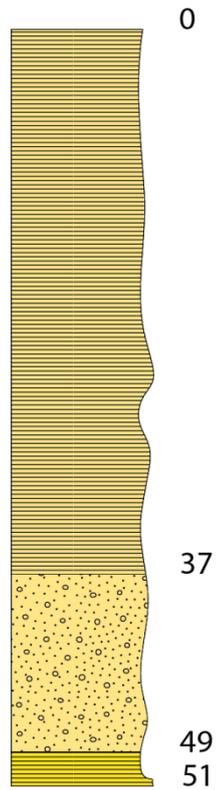
**Fenaia Ilmaten
V4**



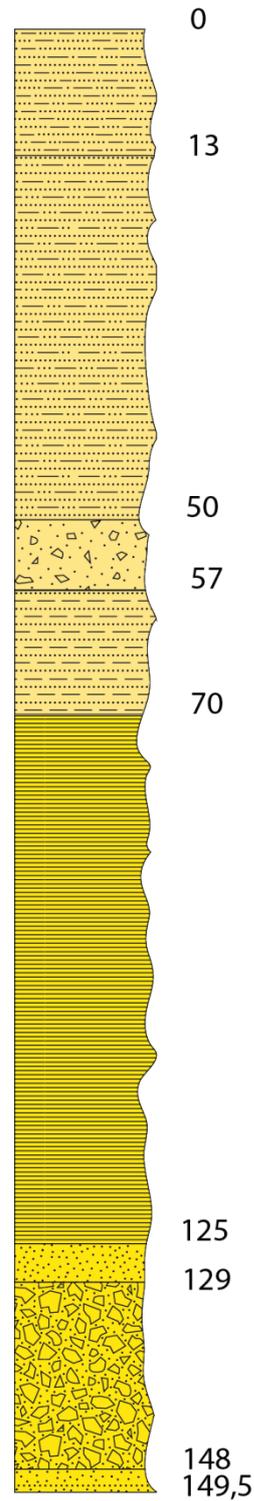
**Fenaia Ilmaten
U4**



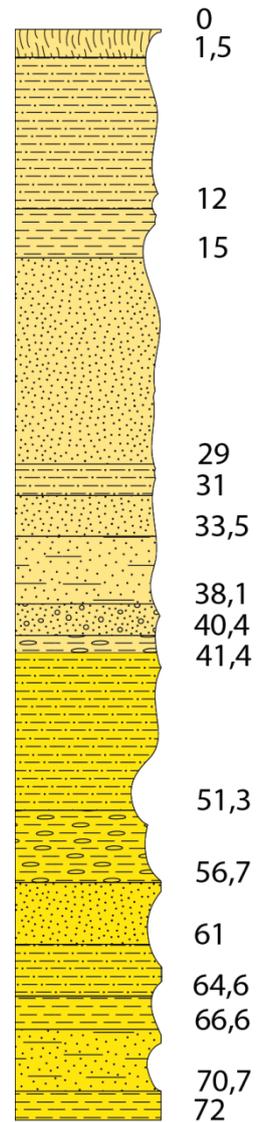
**Oued Ghir
N3**



Tala Hamza



**Béjaïa
A1**



Légende

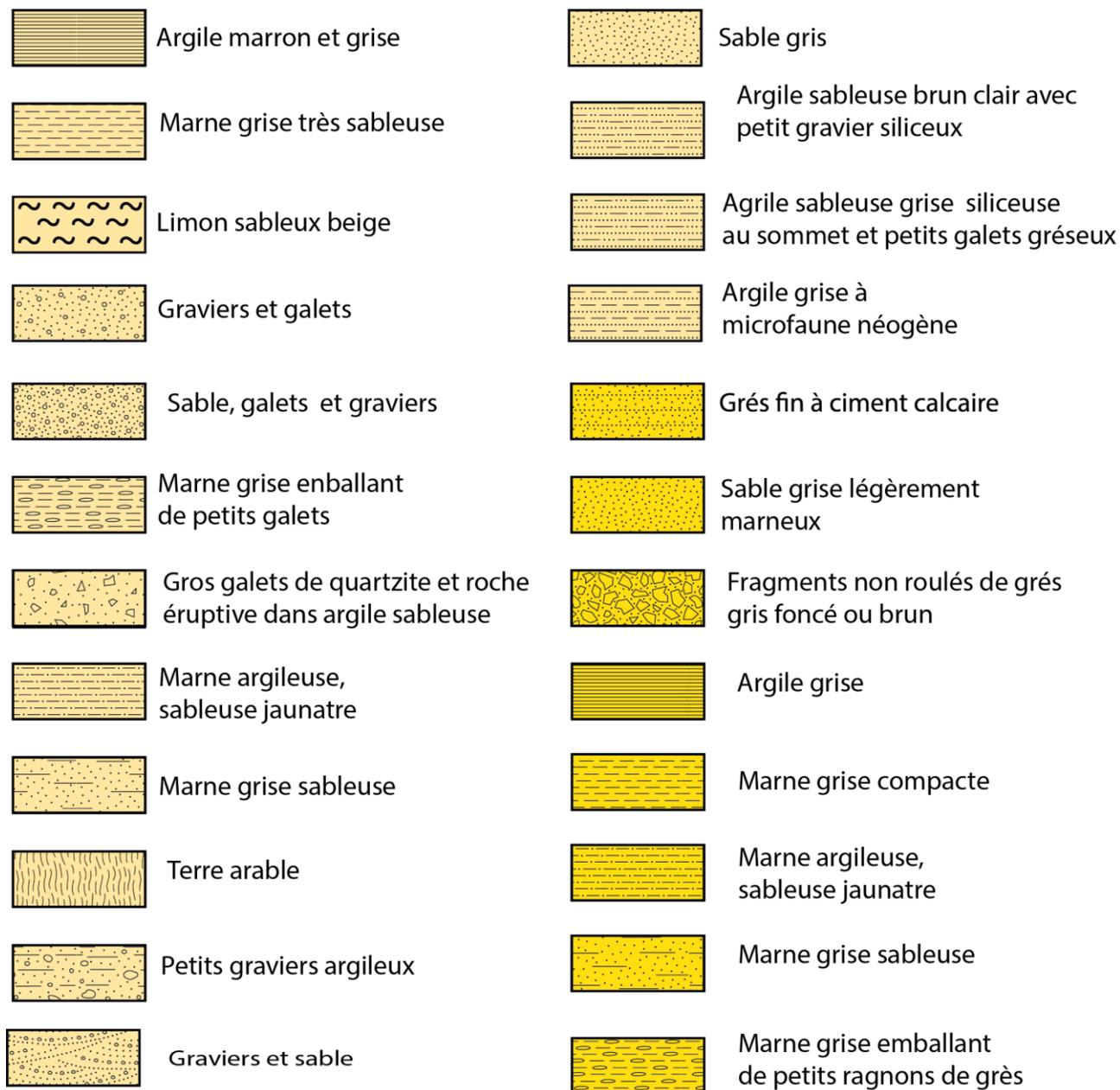


Fig.4. Colonnes lithostratigraphiques des sondages creusés dans la vallée de la basse Soummam (ANRH,2004)

V. Etude hydro-climatologique

Les conditions climatiques (précipitations, température, évapotranspiration) jouent un rôle principal dans le comportement hydrologique des cours d'eaux. Cette étude permettra de quantifier les ressources en eau de surface et de déterminer la part de l'eau qui s'infiltré pour constituer les réserves d'eau souterraine.

1) Précipitations et températures moyennes mensuelles

Les données météorologiques ont été recueillies auprès de l'Office National de la Météorologie (ONM de Béjaïa, 2021) à la station de Béjaïa Aéroport, et s'étalent sur une période allant de 1996 à 2019. La vallée de la basse Soummam est caractérisée par un climat méditerranéen, il présente une forte variation saisonnière des précipitations et des températures. Les précipitations moyennes mensuelles totalisent 773,40 mm/an, elles varient entre 10,63 mm au mois de Juillet et 113,85 mm au mois de Février. Quant à la température moyenne maximale, elle est mesurée au mois d'Août à 25,96°C et la température minimale est à 11,46°C au mois de Février (Fig.5).

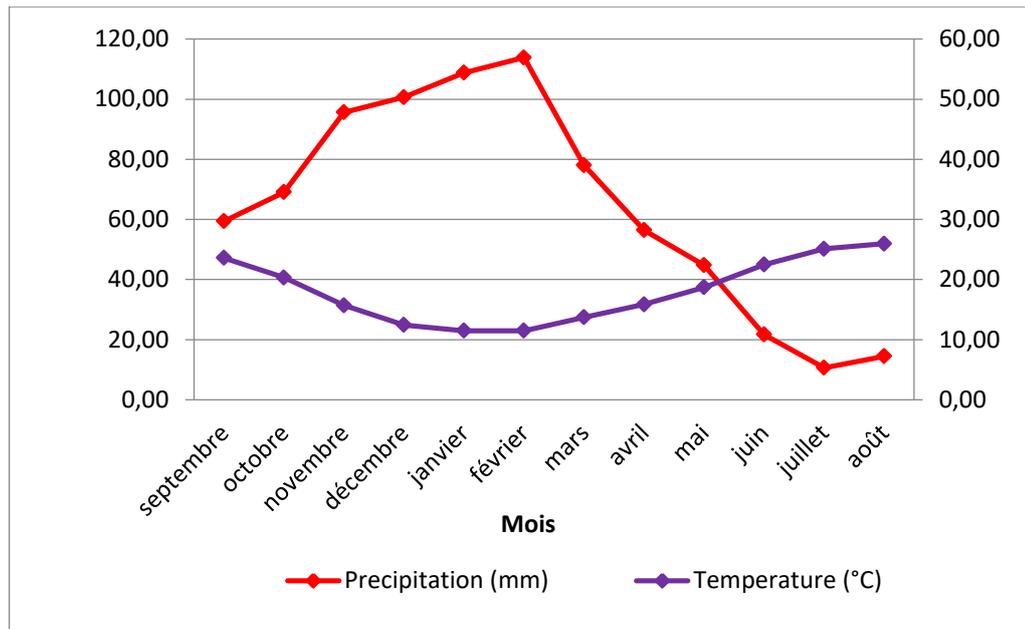


Fig.5. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussens à la station de Béjaïa (1996-2019)
(ONM de Béjaïa, 2021)

2) Estimation de bilan hydrologique

1. L'évapotranspiration potentielle corrigée (ETP_C) :

On utilise la méthode de C.W Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle corrigée (ETP_C). Selon cette méthode, l'estimation de l'ETP_C s'effectue à l'aide d'une formule empirique permettant de calculer le pouvoir évaporant (en mm) pour chaque mois (Tab.1).

$$ETP_C = 16 \left(10 \frac{T}{T_p}\right)^a K$$

Avec :

- ETP : évapotranspiration potentielle annuelle en mm,
- T : température moyenne mensuelle en °C,

- I : somme des indices thermiques mensuels i : $I = 81,90$; $i = (T/5)1,514$
- K : facteur de correction mensuel, fonction de la durée de la journée,
- a : exposant climatique : $a = 0,016 I + 0,5$; donc $a = 1,810$.

D'après les résultats illustrés dans le Tableau 1, les valeurs moyennes mensuelles de l'ETP_C varient en fonction de la température. La valeur maximale est enregistrée en Juillet avec une moyenne mensuelle de 147,76 mm et la valeur minimale est calculée en Février à 23,1 mm.

2. Bilan hydrique :

- Le bilan hydrique selon Thornthwaite est le suivant :

$$P = ETR + R + I$$

D'après les résultats du bilan hydrique (Tableau 2), les valeurs moyennes mensuelles de l'ETR à la station de Béjaïa varient en concordance avec les températures et les précipitations. La valeur maximale de l'ETR est enregistrée en Juin avec une moyenne mensuelle de 83,72 mm. Par contre, l'ETR minimale apparait en Juillet à 10,63 mm. En effet, la valeur maximale du déficit agricole est enregistrée en Juillet à 137,13 mm lorsque l'ETR et les précipitations enregistrent des valeurs minimales. Les précipitations moyennes annuelles se divisent essentiellement en évapotranspiration réelle, ruissellement et infiltration. L'ETR consomme la plus grande quantité des précipitations avec 68,52 % de la pluie, puis le ruissellement avec presque 20 % et l'infiltration avec 11 %. Ces pourcentages indiquent que la pluie alimente plus les cours d'eaux de la zone d'étude. Par contre l'alimentation de la nappe se fait par infiltration directe de la pluie (11 % de la pluie tombée) et latéralement à partir des massifs carbonatés fissurés qui entourent la vallée.

Tableau 1. Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles corrigées calculées par la méthode de Thornthwaite à la station de Bejaia Aéroport (1996-2019)

	SEPT	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOUT	Total
T(°C)	23,58	20,33	15,7	12,44	11,48	11,46	13,7	15,86	18,7	22,48	25,11	25,96	/
P(mm)	59,38	69,07	95,63	100,68	108,81	113,85	78,06	56,4	44,75	21,67	10,63	14,47	773,40
K	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	/
I	10,47	8,36	5,65	3,97	3,52	3,51	4,6	5,74	7,37	9,74	11,51	12,11	/
I	86,55	/											
A	1,88	/											
ETP_c (mm)	108,97	77,6	42,27	26,61	23,7	23,1	39,16	55,14	82,7	117,96	147,76	147,17	892,13

Tableau 2. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite à la station de Béjaïa Aéroport (1996-2019)

	SEPT	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOUT	Total
T(°C)	23,58	20,33	15,7	12,44	11,48	11,46	13,7	15,86	18,7	22,48	25,11	25,96	/
P(mm)	59,38	69,07	95,63	100,68	108,81	113,85	78,06	56,4	44,75	21,67	10,63	14,47	773,40
ETP_c (mm)	108,97	77,6	42,27	26,61	23,7	23,1	39,16	55,14	82,7	117,96	147,76	147,17	892,13
ETR (mm)	59,38	69,07	42,27	26,61	23,7	23,1	39,16	55,14	82,7	83,72	10,63	14,47	529,95
RFU (mm)	0	0	100	100	100	100	100	100	62,05	0	0	0	/
DA (mm)	49,59	8,53	0	0	0	0	0	0	0	34,22	137,13	132,71	362,13
EX (mm)	0	0	0	27,7	85,11	90,75	38,9	1,26	0	0	0	0	/
R (mm)	154,20												
I (mm)	89,25												

3) Caractéristiques hydrologiques

Le bassin versant de la Soummam est caractérisé par un réseau hydrographique important constitué par neuf oueds avec des longueurs variant entre 23 et 226 km (AHS, 2003) dont le collecteur principal est l'oued Soummam. Le réseau hydrographique du bassin versant est caractérisé par une forte densité à cause de la tectonique qui favorise des pentes élevées dans les massifs de Djurdjura, des Bibans et des Babors jouant le principal apport d'alimentation d'oued Soummam (Kessasra, 2015).

Le débit moyen de l'oued Soummam est estimé à 25 m³/s. L'oued Soummam déverse un apport d'eau de 788 Million m³/an dans la mer Méditerranée. Le débit maximal enregistré durant la période de crue de 1970 était de 115,9 m³/s et le débit d'étiage baisse à 0,6 m³/s durant Juillet et Août. Les affluents de la rive gauche sont plus arrosés en pluies et en neige, avec un apport total moyen de 68106 m³/an, et les affluents de la rive droite déversent un apport total moyen de 25106 m³/an. Les affluents de la rive gauche permettent de canaliser un écoulement de surface plus important que celui des versants drainés par les affluents de la rive droite (Zouggaghe, 2009). Dans la vallée de la basse Soummam, cinq affluents (Tableau 3) rejoignent oued Soummam sur ses deux rives : Sur la rive droite, la superficie des sous bassins-versants d'oued Amassine et d'oued Amizour sont respectivement de 195 et 55 Km². Sur la rive gauche, les superficies des sous bassins-versants d'oued Remila, El-Kseur et oued Ghir sont respectivement de 100, 55, 50 Km² (Site 1).

Tableau 3. Les affluents de la rivière avec leurs superficies et position (Site 1)

Affluents	Superficie du BV (km ²)	Position par rapport à l'oued
Oued Remila	100	Rive gauche
Oued El-Kseur	55	Rive gauche
Oued Ghir	50	Rive gauche
Oued Amassine	195	Rive droite
Oued Amizour	55	Rive droite

VI. Etude socio-économique de la vallée

1) Evolution démographique et besoins en eau potable

Le Plan National de l'Eau réactualisé en 2010 a établi une série de prévisions sur l'évaluation démographique et de la demande en eau potable. Les prévisions s'étalent de 2010 à 2030 sur un pas de temps de 5 ans. La demande en eau progresse exponentiellement en fonction de la croissance démographique. La population des communes qui longent la vallée de la basse Soummam atteint 291132 hab en 2010 (Tableau 4), elle augmente jusqu'à 344455 hab en 2020 et 383401 hab en

2030. Elle est répartie sur une superficie de 463,31 Km². Par conséquent, une hausse de la demande en eau potable est enregistrée à 32,63 Hm³/an en 2010, par contre elle diminue de 6,94Hm³/an en 2020 pour s'établir à 29,6 Hm³/an, et augmente jusqu'à 36,53 Hm³/an en 2030 (PNE, 2010).

La demande en AEP varie d'une commune à une autre en fonction de l'évolution démographique. Le plus grand nombre des habitants se localise dans la commune de Béjaïa qui engendre une demande élevée en AEP. Elle atteint 24,14 Hm³/an en 2010, elle diminue en 2020 à 20,59 Hm³/an puis elle augmentera à 25,83 Hm³/an en 2030. En 2020, la diminution est justifiée par la présence de la station de dessalement de Djebira qui va diminuer l'exploitation de la nappe. La commune de Fenaïa Ilmaten présente la plus faible demande en AEP, la demande en eau potable passe de 722637,75 m³/an en 2010 à 826545,23 m³/an en 2020 et à 985819,78 m³/an en 2030. La demande en AEP enregistrée dans la commune de Tala Hamza en 2010 à 891648,66 m³/an, qui atteint 916370,51 m³/an en 2020 et 1081123,92 m³/an en 2030.

La demande en eau potable dans les quatre communes : Oued Ghir, El Kseur, Amizour, Sidi Aich augmente progressivement dans le temps et en fonction de la population. Dans la commune d'Oued Ghir, elle passe de 1177901,45 m³/an en 2010 à 1198606,55 m³/an en 2020 et à 1417956,56 m³/an en 2030. La commune d'El Kseur se manifeste par une demande en eau potable de 2025996,28 m³/an en 2010 qui passe à 2151018 m³/an en 2020 et à 2579024,1 m³/an en 2030. Dans les deux communes d'Amizour et de Sidi Aich, la demande en eau augmente respectivement à 20000 m³/an en 2020 et entre 20000 à 50000 m³/an en 2030.

Tableau 4. Répartition de la population et de la demande en eau potable de la vallée de la basse Soummam par commune (PNE, 2010)

Commune	Superficie (Km ²)	2010		2020		2030	
		Population	Demande en AEP (m ³ /an)	Population	Demande en AEP (m ³ /an)	Population	Demande en AEP (m ³ /an)
Béjaïa	120,77	183733	24,124250	213269	20591116,19	233315	25834945,6
Tala Hamza	37,65	11505	891648,66	14076	916370,51	16261	1081123,92
Oued Ghir	47,91	14791	1177901,45	18029	1198606,55	20719	1417956,56
El Kseur	93,96	24532	2025996,28	29466	2151018	33035	2579024,1
Fenaïa Ilmaten	45,56	10368	722637,75	13073	826545,23	15451	985819,78
Amizour	109,57	31853	2549607,95	39071	2748963,45	44677	3278530,01
Sidi Aich	7,89	14350	1138340,85	17471	1160041,7	19943	1357832,21
Total	463,31	291132	32630382,99	344455	29592662	383401	36535232,18

2) Activités agricoles et besoins en eau d'irrigation

1. La répartition des terres agricoles :

La vallée de la basse Soummam occupe une superficie de 42 000 hectares répartie sur 6 principales communes : Sidi Aich, Fenaïa Ilmaten, El Kseur, Amizour, Oued Ghir et Béjaïa. Selon la direction des services agricoles de Béjaïa ; pendant la campagne agricole 2017-2018 la superficie agricole totale (SAT) couvre 49,52 % de la superficie totale de la basse vallée, environ 20 000 hectares. Cette superficie inclut 11,78 % des terres improductives et une superficie agricole utilisable (SAU) 18478 ha soit 88,22 % de la SAT. Cette dernière varie d'une commune à une autre comme le montre la Figure ci-dessous (Fig.6). En effet, Les terres forestières couvrant environ une surface de 18144 hectares soit 42,90 % de la surface totale de la basse vallée (DSA, 2018).

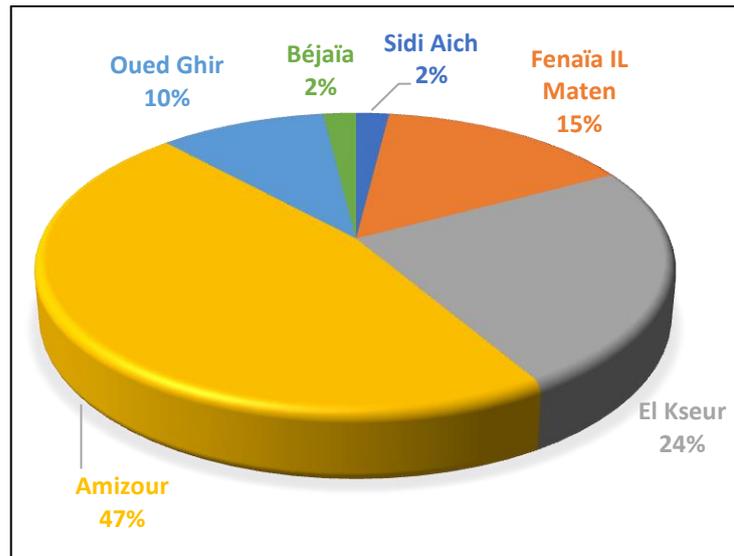


Fig.6. Répartition de la SAU par commune (DSA, 2018)

2. L'occupation des terres agricoles :

La superficie agricole utilisable représentant 43,69 % de la superficie totale de la vallée de la basse Soummam, elle dépasse 18 000 hectares. Elle est répartie selon le type cultural comme le montre la Fig.7 :

- L'Oléiculture couvre 5025,28 hectares, soit 38,84 % ;
- Culture des fourrages couvre 3618,88 hectares soit 27,97 % ;
- Culture des céréales couvre 1742 hectares soit 13,46 % ;
- Culture des agrumes couvre 1021,6 hectares soit 7,90 % ;
- Culture des figuiers couvre 839,06 hectares soit 6,49 % ;
- Culture maraichère couvre 381,63 hectares soit 2,95 % ;
- Les vignes de table couvrent 252,5 hectares soit 1,95 % ;
- Les légumes secs couvrent 45,5 hectares soit 0,35 % ;
- Culture industrielle couvre 12 hectares soit 0,06 % ;

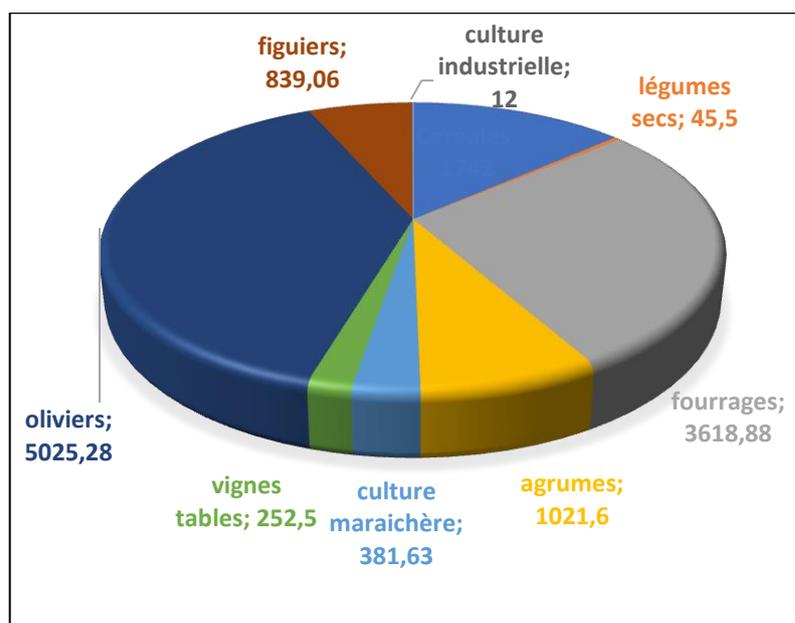


Fig.7. Répartition des terres agricoles dans la vallée de la basse Soummam(DSA, 2018)

Le tableau 5 présente la répartition des terres selon leur statut juridique. Deux statuts sont les plus dominants : EA Privées couvrent 10258 hectares soit 73,37 % de la SAU et les Concessions ou exploitation agricole collective (EAC) et exploitation agricole individuelle (EAI) qui occupent 3435 hectares dans la vallée soit 24,56 %.

Tableau 5. Nombre et superficie des exploitations selon le statut juridique de la terre (DSA, 2018)

Statut juridique	Nombre d'exploitation	SAU
Concessions : exploitation agricole collective (EAC) et exploitation agricole individuelle (EAI)	626	3435 ou 24,56 %
EAC en cours de transformation	2	57 ou 0,40 %
EAI en cours de transformation	8	50 ou 0,35 %
EAI (Arches, communales)	-	-
EA Privées	3053	10258 ou 73,37 %
Programme mise en valeur par la concession	-	-
Programme mise en valeur APFA	-	-
Exploitations issues des programmes des forêts	2	11 ou 0,078 %
Fermes pilotes	1	155 ou 1,10 %
Stations expérimentales	1	15 ou 0,107 %
Eleveurs sans terre	291	-
Autres exploitations	-	-

3. Engrais et produits phytosanitaires dans la vallée :

- Engrais chimiques : Le tableau 6 montre les différents types d'engrais utilisés par les agriculteurs dans la vallée de la basse Soummam.

Tableau 6. Les différents types d'engrais (DSA, 2018)

Engrais Organiques	Fiente de volaille
	Autres1
Engrais Minéraux Simples Azotés « N »	Urée $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$
	Sulfazote 26 %
	Sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
	Azofert N 21 %
	Autres2
Engrais Minéraux Simples Phosphatés « P »	Superphosphore triple (TSP)
	Superphosphore simple (SSP)
	Autres3
Engrais Potassiques « K »	Potasse KOH
	Autres3
Engrais Minéraux composés	NP
	NK
	PK
	NPK

Selon les données de la campagne agricole de 2017-2018 fournies par la direction des services agricoles, l'engrais le plus appliqué dans la région est l'urée (Engrais Minéraux simples azotés (N)). Les quantités d'engrais varient en fonction de type cultural, le type cultural qui consomme la plus grande quantité d'engrais est la céréaliculture. Ainsi, la commune d'Amizour est la plus dominante du point de vue d'utilisation des engrais et Sidi Aich est la commune où la quantité consommée est nulle.

Pour les oléicultures, les agriculteurs utilisent le NPK (23 qx/ha), l'urée, sulfazote 26 %, PK et TSP. Pour les cultures fourragères pratiquées dans les trois communes : Fenaïa Ilmaten, El Kseur et Amizour ; les quantités sont présentées dans le tableau 7. Dans la commune de Fenaïa Ilmaten, l'engrais le plus utilisé est le SSP avec une quantité de 42 qx/ha, puis le NPK avec 23 qx/ha et l'urée avec 16 qx/ha. Les agriculteurs d'El Kseur et Amizour utilisent l'urée avec des quantités respectivement de 10 et 85 quintaux.

Tableau 7. *Quantité des engrais utilisée pour les fourrages en qx/ha (DSA, 2018)*

Fenaïa Ilmaten			El Kseur	Amizour
Urée	NPK	SSP	Urée	Urée
16	23	42	10	85

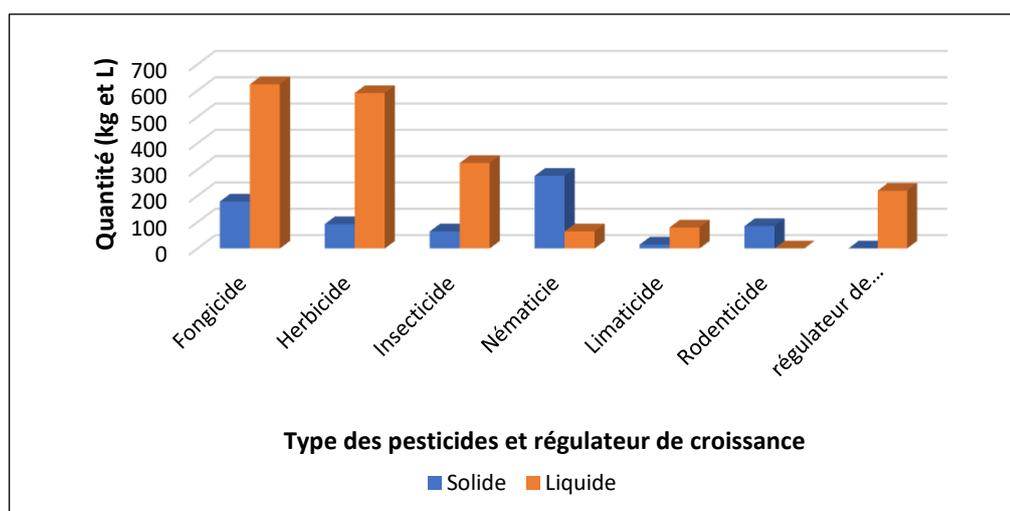
Pour la céréaliculture, les engrais les plus utilisés sont l'urée (2025,5 qx/ha) puis le NPK (1662 qx/ha), TSP, sulfazote 26%, SSP et PK ; pour des raisons de disponibilité sur le marché et le prix. Pour les Agrumes, l'engrais le plus utilisé est le NPK avec une quantité de 4675,8 qx/ha, puis l'urée avec 1649,5 qx/ha et le PK avec 1233 qx/ha, et le sulfazote et le SSP avec respectivement 82 et 75 qx/ha, comme illustrés le tableau 8.

Tableau 8. *Quantité des engrais utilisée pour les agrumes en qx/ha (DSA, 2018)*

Urée	Surfazote 26%	SSP	NPK	PK
1649,5	82	75	4675,8	1233

- Les produits phytosanitaires (les pesticides) :

Les pesticides peuvent être classés en fonction de leur cible principale : les herbicides, les fongicides et les insecticides. A ces trois principaux groupes se rajoutent : les acaricides (pour la lutte contre les acariens, et qui sont souvent intégrés aux insecticides), les rodenticides (contre les petits rongeurs), les nématicides (contre les vers et nématodes), les limaticides (contre les limaces) et les régulateurs de croissance. Ces produits phytosanitaires se trouvent à l'état solide et l'état liquide, la Figure 7 comporte les quantités de ces produits utilisés dans la basse vallée.

**Fig.8.** Les quantités des pesticides et régulateur de croissance solides en Kg et liquides en L (DSA, 2018)

Les produits les plus utilisés sont les herbicides à l'état liquide et les fongicides solides. Les céréales sont les plus fertilisées. Si l'on compare entre la quantité des pesticides de la campagne agricole de 2017-2018 et celle de 1997-1998 (Fig.9), on note des produits dont la quantité a augmenté tels que les fongicides avec 40,71 % de hausse, les herbicides à 89 % et les herbicides à l'état solide à 8,60 %. Une baisse sur les autres produits tels que les fongicides à 89,82 %, les nématicides à 55,48 % et les insecticides solides à 89,65 %. La figure suivante montre la différence entre les deux campagnes.

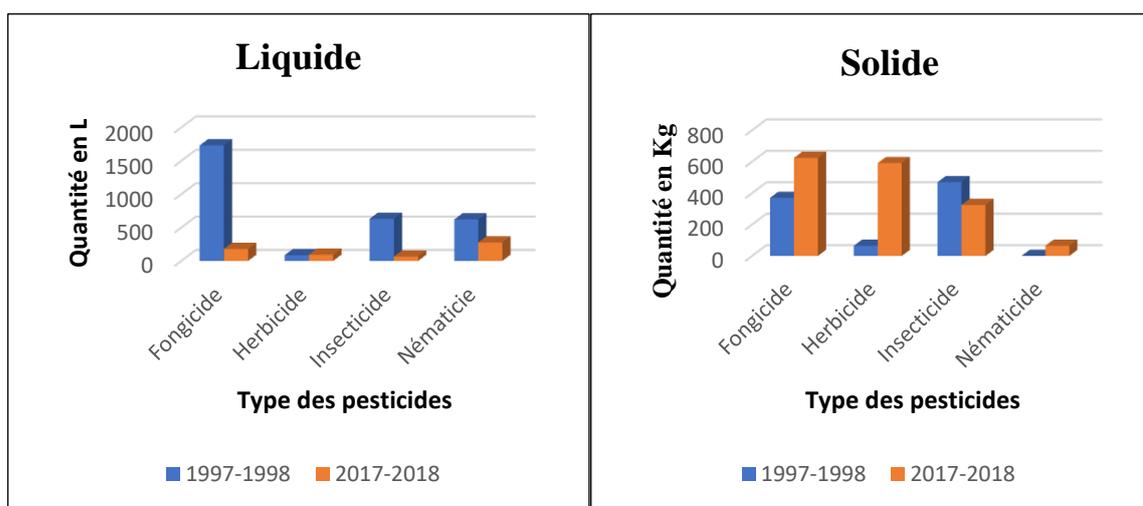


Fig.9. La comparaison entre les campagnes 1997-1998 et 2017-2018(DSA, 2018)

4. Calendrier cultural :

Les activités agricoles sont variables en fonction du type cultural. Les calendriers agricoles ont pour but d'organiser ces activités et d'obtenir un bon rendement. Comme notre étude se focalise sur la pollution des composés azotés, la source principale étant l'utilisation d'engrais sur les terres agricoles, le calendrier agricole est indispensable pour comprendre l'occupation des sols dans la basse vallée. L'épandage des engrais diffère d'un mois à un autre et se fait en fonction du type cultural. En effet, sur la base des données de la DSA et l'enquête que nous avons menée sur terrain en 2019, un calendrier cultural a été établi. Il se présente comme suit :

- Céréales : la culture des céréales commence par le labourage de sols durant les mois de Septembre à Novembre avec l'épandage des engrais de Septembre jusqu'à Décembre (Tableau 9). La phase de plantation se déroule pendant les mois de Novembre et Décembre. Une autre fois l'épandage des engrais le mois de Janvier et Février avec le début de pulvérisation en pesticides au mois de Février qui continuera jusqu'à la fin de Mars. De Juin à Août, c'est la période de la récolte. Enfin, le traitement des sols reprend en Juillet.

- Agrumes : la culture commence en Juin, pendant ce mois-ci la première étape est le traitement du sol, ensuite l'application d'engrais puis la plantation et l'irrigation, la dernière étape est la pulvérisation en pesticides. Le traitement du sol, l'épandage des engrais et l'irrigation se poursuivent pendant trois mois. D'Août à Octobre, l'épandage d'engrais est de retour. En Octobre, l'irrigation et l'épandage des engrais se poursuivent, la récolte commence d'Octobre à Mai avec une application différente, par exemple l'épandage est utilisé de Novembre à Mai, mais il ne s'applique pas en Janvier et l'épandage d'engrais en Février et Mars. De Mars à Avril, on revient à la plantation, au labourage en Avril et Mai et à l'irrigation en Mai.

- Olives : l'oléiculture commence en mois d'Avril par le labourage des sols et l'irrigation, En Mai, les agriculteurs continuent l'irrigation pendant les 3 mois suivants et commencent la pulvérisation en pesticides qui se prolonge jusqu'au mois d'Août, et l'épandage des engrais qui dure 5 mois de Juin à l'Octobre. Une autre fois ils passent au labourage des sols les mois de Juillet, Septembre et Octobre. De Novembre à Mars, ces cinq mois sont réservés à la récolte et la plantation avec pulvérisation en pesticides en Février et labourage en Mars.

- Fourrage : En Octobre, les agriculteurs entament l'épandage d'engrais. De Novembre à Décembre, ils commencent le labourage et la pulvérisation en pesticides s'étale de Décembre à Mars. Le mois de Mars est le mois de la plantation. Enfin en Août, les agricultures commencent la récolte puis le labourage.

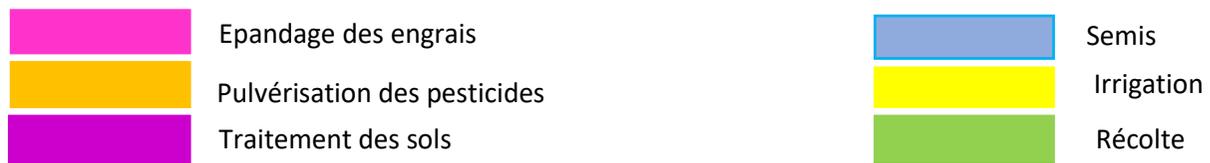
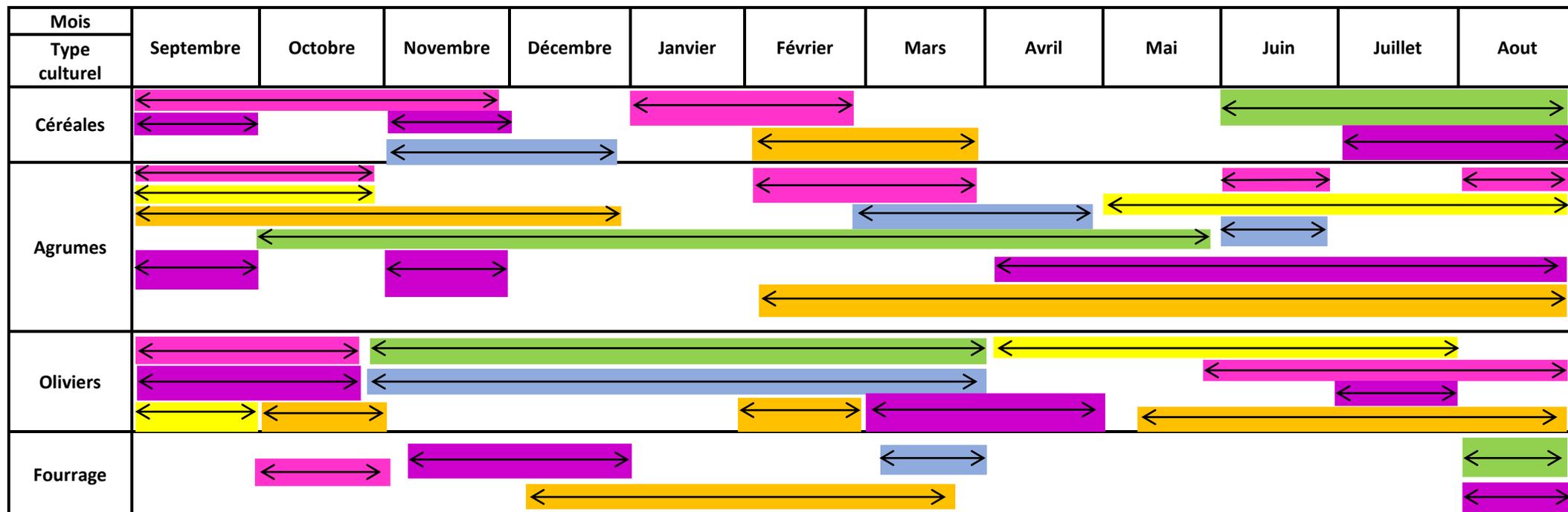
L'agriculture des céréales et des fourrages est traitée dans la même période : labourage ; l'épandage des engrais et la pulvérisation en pesticides de Septembre à Mars, mais la plantation des céréales à lieu en Novembre et Décembre, et la plantation de fourrage en Mars. La récolte de céréales s'effectue de Juin à Août et le fourrage en Août. En revanche, le traitement des agrumes et de l'oléiculture (labourage, l'épandage des engrais et la pulvérisation en pesticides) commence en Avril pour les olives et après deux mois pour les agrumes ; la plantation d'agrumes dure trois mois : Mars; Avril et Juin, mais pour l'olive quatre mois sont nécessaires : Novembre, Décembre, Janvier et Mars. La récolte dure huit mois pour les agrumes d'Octobre à Mai et de cinq mois pour les olives de Novembre à Mars.

5. Eau d'irrigation :

La superficie irriguée varie d'une commune à une autre (Tableau 10), elle couvre 526,61 Ha de la SAU. La commune d'Amizour présente la plus grande superficie avec ses 209,8 Ha suivie par la commune d'El Kseur avec une superficie irriguée 80,42 Ha, ensuite la commune de Fenaïa Ilmaten avec 61,22 Ha. Les superficies irriguées d'Oued Ghir et Tala Hamza sont respectivement de 46,02 et 41,46 Ha. En revanche, la commune de Béjaïa ne possède pas de superficie irriguée et la plus petite se trouve dans la commune de Sidi Aich avec seulement 6,69 Ha.

Par ailleurs, la demande en eau pour l'irrigation diminue de 10,43 Million m³/an en 2010 à 7,82 Million m³/an en 2020 en passant à 5,20 Million m³/an en 2030. La demande en eau diminue en 2020 et 2030 principalement à l'amont de la vallée et sur la rive gauche en aval. Dans la commune de Sidi Aich, le volume demandé diminue de 0,087 Million m³/an en 2010 à 0,054 Million m³/an en 2020 et 0,02 Million m³/an en 2030. Le volume demandé dans la commune d'Amizour est de 3,295 Million m³/an en 2010, il diminue à 2,779 Million m³/an en 2020 et à 2,262 Million m³/an en 2030. Dans la commune de Fenaïa Ilmaten, le volume d'eau destiné à l'irrigation est estimé à 1,280 Million m³/an, il baisse à 0,792 Million m³/an en 2020 et à 0,303 Million m³/an en 2030. Le volume demandé est de 3,374 Million m³/an en 2010, il diminue à 1,754 Million m³/an en 2020 et à 0,133 Million m³/an en 2030 dans la commune d'El Kseur. Le volume d'eau diminue de 0,1 Million m³/an chaque 10 ans dans la commune de Tala Hamza. Il est estimé à 0,673 Million m³/an en 2010 et diminuera à 0,579 et à 0,486 Million m³/an respectivement en 2020 et 2030. Cette diminution est liée aux plusieurs facteurs tels que le changement du type cultural et la diminution des superficies irriguées.

Tableau 9. Calendrier Culturel (DSA, 2018)



Sur la rive gauche en aval, la demande en eau pour l'irrigation augmente en 2020 et 2030 dans les deux communes de Béjaïa et Oued Ghir. Dans la commune de Béjaïa, le volume demandé en 2010 est de 0,315 Million m³/an, passant à 0,372 Million m³/an en 2020 et 0,429 Million m³/an en 2030. Le volume demandé dans la commune d'Oued Ghir atteint 1,409 Million m³/an en 2010 et augmente à 1,490 Million m³/an en 2020 et 1,572 Million m³/an en 2030. L'augmentation est liée au changement climatique et à l'expansion de la superficie irriguée.

Tableau 10. Répartition de la superficie irriguée et le volume demandé en eau pour l'irrigation (PNE,2010)

Communes	Superficie irriguée en 2010 (Ha)	2010	2020	2030
		Volume demandé (Million m ³ /an)	Volume demandé (Million m ³ /an)	Volume demandé (Million m ³ /an)
Béjaïa	0	0,315	0,372	0,429
Tala Hamza	41,46	0,673	0,579	0,486
Oued Ghir	46,02	1,409	1,490	1,572
El Kseur	80,42	3,374	1,754	0,133
Fenaïa Ilmaten	61,22	1,280	0,792	0,303
Amizour	290,8	3,295	2,779	2,262
Sidi Aich	6,69	0,087	0,054	0,020
Total	526,61	10,433	7,82	5,205

3) Activités industrielles et besoins en AEI

Quant à l'industrie, elle est bien présente dans la vallée. Les principales unités industrielles au nombre de 105 sont concentrées en grande partie dans la commune de Béjaïa qui englobe quatre zones industrielles (Ihaddaden, zone urbaine, zone rurale et enceinte du port), la commune d'Oued Ghir, El Kseur (zone industrielle, zone d'activité en milieu rural), Fenaïa Ilmaten (milieu rural), Amizour (zone d'activité, zone industrielle et zone urbaine). La vallée est le siège de plusieurs filières industrielles telles que l'industrie agro-alimentaire ; les matériaux de construction ; la chimie plastique et la pharmacie ; l'industrie du textile ; l'industrie métallique ; le stockage et la distribution des carburants (PNE, 2010). Les prévisions des besoins en eau industrielle (Tableau 11) augmentent de 4,717 Million m³/an en 2010 à 6,123 Million m³/an en 2020, une autre hausse en 2030 pour atteindre 7,977 Million m³/an cela est expliqué par le développement industriel dans la willaya de Béjaïa.

Tableau 11. Besoins en eau industrielle (PNE, 2010)

	2010	2020	2030
Besoins (Million m ³ /an)	4,717	6,123	7,977

4) Déchets solides et rejets liquides

1. Déchets et rejets domestiques :

Les communes de Béjaïa, El Kseur, Amizour et Sidi Aich englobent une population de 291132 habitants en 2010, les projections tablent sur 383401 habitants en 2030. Par conséquent, l'absence d'un centre d'enfouissement technique (CET) et des stations de traitement et d'épuration des eaux (STEP) contribuent à détériorer la qualité de l'eau le long de la vallée. En effet, le volume d'eaux usées augmente de 137766 m³/j en 2010 à 181615 m³/j en 2020 (PNE, 2010) et les décharges publiques sauvages se multiplient à Béjaïa près de la mer dont la quantité est évaluée à 101859 Kg/j de déchets (Tableau 12). Des quantités de déchets évaluées à 23087 Kg/j ; 17209 Kg/j ; 8316 Kg/j ; 8190 Kg/j et 6508 Kg/j se jettent dans la rivière respectivement au niveau d'Amizour ; El Kseur ; Fenaïa Ilmaten; Sidi Aich et Tala Hamza (Fig.10-A) ; et une quantité de 10075 Kg/j est déversée dans la forêt d'Oued Ghir (CENEAP, 2012).

L'eau usée urbaine est déversée sans traitement préalable dans l'oued avec des volumes importants dans les différentes communes. Le volume total est estimé à 4160072,2 m³/an. Dans les communes de Béjaïa et Tala Hamza, le volume d'eau usée déversé est à 2797263,4 m³/an, suivie par les deux communes d'El Kseur et Fenaïa Ilmaten avec un volume qui atteint 764483,2 m³/an et la commune d'Amizour avec 291531,2 m³/an. Le volume le plus faible est enregistré dans la commune de Timezrit avec 19943,6 m³/an. Dans les communes d'Oued Ghir et de Sidi Aich, le volume d'eaux usées déversé est respectivement mesuré à 161323,4 et 125527,4 m³/an (CENEAP, 2012).

Tableau 12. Les décharges publiques sauvages et volume d'eaux usées domestiques (CENEAP, 2012)

Commune	Décharges publiques sauvages		Eaux usées domestiques
	Quantités (Kg/d)	Localisation	Volume (m ³ /an)
Béjaïa	101859	Près de la mer	2797263,4
Tala Hamza	6508	À la berge d'oued	
Amizour	23087	À la berge d'oued	291531,2
El Kseur	17209	À la berge d'oued	764483,2
Fenaïa Ilmaten	8316	À la berge d'oued	
Sidi Aich	8190	À la berge d'oued	125527,4
Timezriet	/	/	19943,6
Oued Ghir	10075	Forêt	161323,4
Totale	175244	/	4160072,2

2. Déchets agricoles :

Lors de notre enquête sur le terrain en 2021, il a été noté que la plaine de la Soummam est caractérisée par une activité agricole intense et un élevage du bétail et de la volaille. Des dépôts de fumier sont déposés à l'air libre ce qui contribuera à contaminer la nappe aquifère essentiellement en composés azotés (Fig.10-B). D'autant plus que la nappe n'est profonde que de 15 m à El Kseur à titre d'exemple. En outre, la présence de dépôts de pesticides expirés dans la commune d'Oued Ghir avec des quantités de 1343,85 Kg et 6876,8 L de produits phytosanitaires et 285 L de désinfectant à Béjaïa a été relevé d'après la direction de l'environnement en 2015.

3. Déchets et rejets industriels :

Les unités industrielles déversent des eaux usées dans la rivière avec un volume de 5136,32 m³/j (Fig.10-C) et un flux de matière organique dont la quantité est estimée à 3048,675 Kg/j (Direction de l'environnement, 2007).



Fig.10. (A) Décharges publiques sauvages déposées dans les berges de la rivière et les eaux usées domestiques déversées dans l'Oued (B) Dépôts de fumier à l'air libre (C) eaux usées industrielles

VII. Conclusion

L'analyse du milieu physique a pour objectif de mettre en évidence l'influence des facteurs naturels ou anthropiques sur la quantité des eaux de surfaces et souterraines et sa qualité physico-chimique. La vallée de la basse Soummam est située dans la partie centrale du nord Algérie, elle est limitée au Nord par la chaîne de montagnes du Djurdjura ; au Sud par la chaîne des Babors; à l'Ouest par la vallée de la moyenne Soummam et à l'Est par la Méditerranée. La géologie des massifs bordant les deux rives de la vallée de la basse Soummam est caractérisée par une variété des affleurements tels que les formations triasiques gypso-salin et les formations carbonatés.

L'aquifère de la vallée de la basse Soummam est constitué par des formations détritiques du Mio-Plio-Quaternaire. Les formations perméables qui sont des alluvions et des éboulis non consolidés et des formations imperméables sont constituées de marnes et d'argiles. Les transmissivités dans l'aquifère de la Soummam varient entre 10^{-4} et $0,45 \text{ m}^2/\text{s}$, elles augmentent des terrains de bordure vers l'axe de l'oued dans le sens d'écoulement des eaux.

La vallée de la basse Soummam est caractérisée par un climat méditerranéen, Les précipitations moyennes mensuelles varient entre 10,63 mm au mois de Juillet et 113,85 mm au mois de Février et la température moyenne maximale est mesurée au mois d'Août à $25,96^\circ\text{C}$. Les précipitations alimentent plus les cours d'eaux de la vallée de la basse vallée. Le débit moyen de l'oued Soummam est estimé à $25 \text{ m}^3/\text{s}$.

La population des communes qui longent la vallée de la basse Soummam augmente jusqu'à 383401 hab en 2030 engendre une hausse de la demande en eau potable qui est enregistrée à $36,53 \text{ Hm}^3/\text{an}$ en 2030 (PNE, 2010).

Dans le domaine de l'agriculture, la commune d'Amizour est la plus dominante du point de vue d'utilisation des engrais et Sidi Aich est la commune où la quantité consommée est nulle. L'engrais le plus appliqué dans la vallée de la basse Soummam est l'urée (Engrais Minéraux simples azotés (N)) et le type cultural qui consomme la plus grande quantité d'engrais est la céréaliculture. Ainsi, Les céréales sont les plus fertilisés. Les herbicides sont les pesticides plus utilisés à l'état liquide et les fongicides à l'état solides.

La superficie irriguée couvre 526,61 Ha de la SAU. Les prévisions des besoins en eau d'irrigation diminuent de $10,43 \text{ Million m}^3/\text{an}$ en 2010 à $7,82 \text{ Million m}^3/\text{an}$ en 2020 en passant à $5,20 \text{ Million m}^3/\text{an}$ en 2030.

La vallée de la basse Soummam est caractérisée par une activité industrielle assez importante telles que l'industrie agro-alimentaire ; les matériaux de construction ; la chimie plastique et la pharmacie ; l'industrie du textile ; l'industrie métallique ; le stockage et la distribution des carburants (PNE, 2010). La demande en eau industrielle augmentera en 2030 pour atteindre 7,977 Million m³/an cela est expliqué par le développement industriel dans la willaya de Béjaïa.

Ces activités engendrent des volumes importants des rejets liquides et des déchets solides, telles que les eaux usées domestiques qui atteignent 181615 m³/j en 2020 (PNE,2010) et la quantité des décharges publiques sauvages est évaluée à 101859 Kg/j de déchets. Des déchets agricoles sont déposés à l'air libre et des dépôts de pesticides expirés dans la commune d'Oued Ghir et Béjaïa. De plus les unités industrielles déversent des eaux usées et des flux de matière organique dans la rivière (Direction de l'environnement, 2007).

Deuxième partie
Etude hydrogéologique et
hydrogéochimique

I. Introduction

Les ressources en eau dans la plupart des cas sont affectées par la pollution, il existe plusieurs types de polluants qui semblent prédominant dans les eaux souterraines, comme les métaux lourds ; les composés azotés ; les engrais ; les pesticides et d'autres produits chimiques et organiques (Sener et Davraz, 2012). Les eaux souterraines dans les zones agricoles intensives sont confrontées à une menace de pollution, le développement et l'évolution de l'agriculture contribuent à la remise en question de la qualité de l'eau (Richard, 2018). La pollution de l'eau par les nitrates est très préoccupante, car elle peut avoir un impact négatif sur l'approvisionnement en eau et sur les écosystèmes riverains et côtiers (Mallya, 2021). Le développement agricole entraîne souvent une pollution rapide des eaux souterraines par les formes chimiques de l'azote, en particulier les nitrates, en raison de leur solubilité élevée et de leur faible affinité pour l'échange d'ions. Ils sont le résultat du cycle de l'azote et sont des nutriments essentiels pour les plantes. Les nitrates et les pesticides sont les contaminants non ponctuels les plus courants détectés dans les aquifères alluviales peu profonds (Bartzas et al. 2015).

Plusieurs études sur l'eau ont abouti à des résultats pertinents. Partha Pratim Adhikary et al. en 2010 évaluent la pollution des eaux souterraines à l'ouest de Delhi, en Inde. L'étude montre que les concentrations de nitrate oscillant entre 157,5 mg/L et 1923,2 mg/L dépassent largement la norme de l'OMS (50 mg/L). EL Bouqdaoui et al (2009) travaillent à la modélisation de la pollution par les nitrates provenant de l'aquifère de Berrechid au Maroc, avec des nitrates atteignant 67 mg/L en 1993 et 175 mg/L en 2004, qui sont bien au-dessus de la limite de potabilité autorisée recommandée par le Maroc, ou 50 mg/L. En Grèce, plusieurs recherches ont été menées dans le bassin d'Anthemountas, Nerantzis Kazakis et al (2020) ont constaté que la concentration des nitrates varie entre 10 mg/L et 162 mg/L et dans le centre de la Grèce, dans le bassin de Thessalie, atteignant 83,6 mg/L dans les forages et 299 mg/L dans les sources (Stamatis, 2011). La concentration de nitrate oscille entre 5 mg/L et 71 mg/L dans la partie nord d'Achaïa (Angelopoulos, 2009). Plusieurs études ont porté sur l'impact des nitrates sur la dégradation de la qualité des eaux souterraines dans différentes régions d'Italie, Bencini et al (1993) travaillent sur la qualité des eaux souterraines et leur relation avec la pollution des aquifères, la plaine du Valdarno moyen en Toscane a montré des concentrations des nitrates oscillant entre 0 et 153,1 mg/L. Dans la partie nord de la plaine de Campidano, au centre-ouest de la Sardaigne, les nitrates varient de 0,3 mg/L à 215,8 mg/L (Pittalis, 2018). En Tunisie, Troudi et al. (2020) ont analysé un échantillon d'eau souterraine de la plaine de Guenniche, en Mai 2016. Leurs résultats montrent que les teneurs en nitrate varient de 1,9 mg/L à 421,01 mg/L. Dans l'aquifère peu profond de Sidi Bouzid, les concentrations des nitrates varient

entre 4 et 80 mg/L (Jmal, 2017). Hamed et al. (2013) ont observé que les nitrates des oasis Sidi Aïch-Gafsa varient entre 0 et 447,3 mg/L.

En Algérie, les effluents urbains et industriels, trop souvent rejetés dans le milieu récepteur sans traitement approprié, sont parmi les sources de dégradation de la qualité de l'eau aux cotés des intrants chimiques utilisés dans l'agriculture intensive. La plaine alluviale de Mitija est plus vulnérable à la contamination par le nitrate parce qu'elle a observé 145 mg/L (Zamiche, 2018). Les eaux souterraines présentent des concentrations élevées de nitrates dans la plaine de Tebessa, qui peuvent atteindre 120 mg/L. La contamination résulte principalement de l'épandage d'engrais et de déchets qui sont rejetés dans la plaine sans traitement et en raison de l'utilisation des eaux usées pour irriguer les cultures (Rouabhia, 2010 ; Baazi, 2020). Dans la haute vallée de Tadjenanet-Chelghoum Laid, les nitrates demeurent le principal polluant dans les eaux souterraines, et leurs concentrations élevées atteignent 486,41 mg/L (Khedidja, 2012). Dans le nord-ouest le bassin de la plaine de Ghriss montre jusqu'à 99 mg/L (Bekkoussa et al. 2018) et dans haute Cheliff, les nitrates oscillent entre 8 et 190 mg/L (Touhari et al. 2014).

Dans la vallée de Soummam, qui a fait l'objet de plusieurs études, Mouni en 2009 indique que les niveaux de nutriments en 2003 sont élevés par rapport aux normes admises. Les nitrites varient entre 0,19 et 1,85 mg/L, les nitrates entre 21,4 et 126,1 mg/L et l'ammonium entre 0,05 et 1,75 mg/L (Mouni, 2009). Kessasra en 2015 a confirmé la forte contamination de l'ensemble de l'écosystème aquatique de la vallée, en incluant la rivière et les eaux souterraines. Ses résultats indiquent des concentrations de nitrate qui dépassent les normes, dans le forage des 7 villages avec 59,5 mg/L et le puits Mendi avec 86,2 mg/L en 2011. Au cours de la campagne de 2013, d'autres puits ont été analysés avec des niveaux supérieurs à la norme, comme Ramdani près de Béjaïa avec 111,2 mg/L et EAC1 près d'El Kseur avec 110,3 mg/L.

L'objectif de cette partie est d'actualiser l'état piézométrique de la nappe alluviale de la vallée de la basse Soummam et l'état de pollution en composés azotés et phosphatés des eaux que ce soit les eaux de l'oued principal et les eaux souterraines de sa nappe alluviale associée. En effet, il s'agit d'étudier : (a) les fluctuations du niveau piézométrique au sein de l'aquifère du Mio-plio-quaternaire durant deux saisons hydrologiques, à savoir les hautes eaux en Mai et les basses eaux en Octobre 2021, (b) l'évaluation de la pollution des eaux de surface et les eaux souterraines par les composés azotés et phosphatés par un suivi spatio-temporel de la distribution et la cartographie des nitrates. En effet, le suivi a été assuré durant cinq campagnes, entre 2019 et 2021, sur deux périodes hydrologiques distinctes pour chaque année. Ainsi, un suivi de la variation spatio-temporelle des paramètres physiques, des nitrates, des nitrites, de l'ammonium et des Phosphates a été également étudié afin de relever d'éventuels liens entre ces différents paramètres.

II. Matériels et méthodes

Afin de caractériser l'écoulement des eaux souterraines et d'étudier l'ampleur de la pollution des eaux par les composés azotés et phosphatés dans la vallée de la basse Soummam, nous avons entrepris plusieurs campagnes piézométriques et d'échantillonnage. Nous avons sélectionné quatre stations de prélèvement d'eaux de surface et trente-trois points de mesure du niveau piézométrique et d'échantillonnages d'eaux souterraines (Fig.11 et 12) captant la nappe alluviale comme indiqué dans la Fig.11. Les échantillons d'eau ont été prélevés durant cinq campagnes, deux en hautes eaux (Mai 2019 et Mai 2021) et trois en basses eaux (Septembre 2019, Octobre 2020 et Octobre 2021).

Le travail de terrain a été divisé en deux parties ; la première partie consiste à mesurer la profondeur du niveau d'eau à l'aide d'une sonde piézométrique. Et la deuxième partie consiste à prélever les échantillons d'eaux de surface et d'eaux souterraines et de mesurer les paramètres physiques in situ : potentiel Hydrogène (pH), Température (T), Conductivité électrique (CE) à l'aide d'un multi-paramètre (Consort-C561) avec une précision d'analyse de 0,2 % ± 1 digit pour le pH, 1 % de F.S.de plage de conductivité électrique et 0,5 °C de température. Et l'Oxygène dissous (OD) à l'aide d'un oxymètre (WATERPROOF CYBERSCAN DO 300) avec une précision relative de $\pm 1,5$ % de la pleine échelle. Pour la conservation et le transport de l'eau au laboratoire nous avons utilisé une glaisière (Fig.13).

Le dosage des sels nutritifs : les nitrates (NO_3^-), les nitrites (NO_2^-), l'ammonium (NH_4^+), les phosphates (PO_4^{3-}) sont basés sur la méthode des analyses chimiques décrite par Rodier (2009). Il a été entrepris au laboratoire de Génie Géologique et au laboratoire d'écotoxicologie de l'université de Jijel. Les nitrates et les Phosphates sont analysés par spectrométrie d'absorption moléculaire. Les nitrites sont analysés par la méthode de réactif de Zambelli. Pour l'ammonium, nous avons suivi la méthode au bleu d'indophénol et ils sont détectés par spectrophotométrie (VWR- UV1600PC) (Fig.14). La cartographie piézométrique a été établie sous l'environnement SIG en utilisant les deux logiciels SURFER 11 et ArcGIS 10.4.

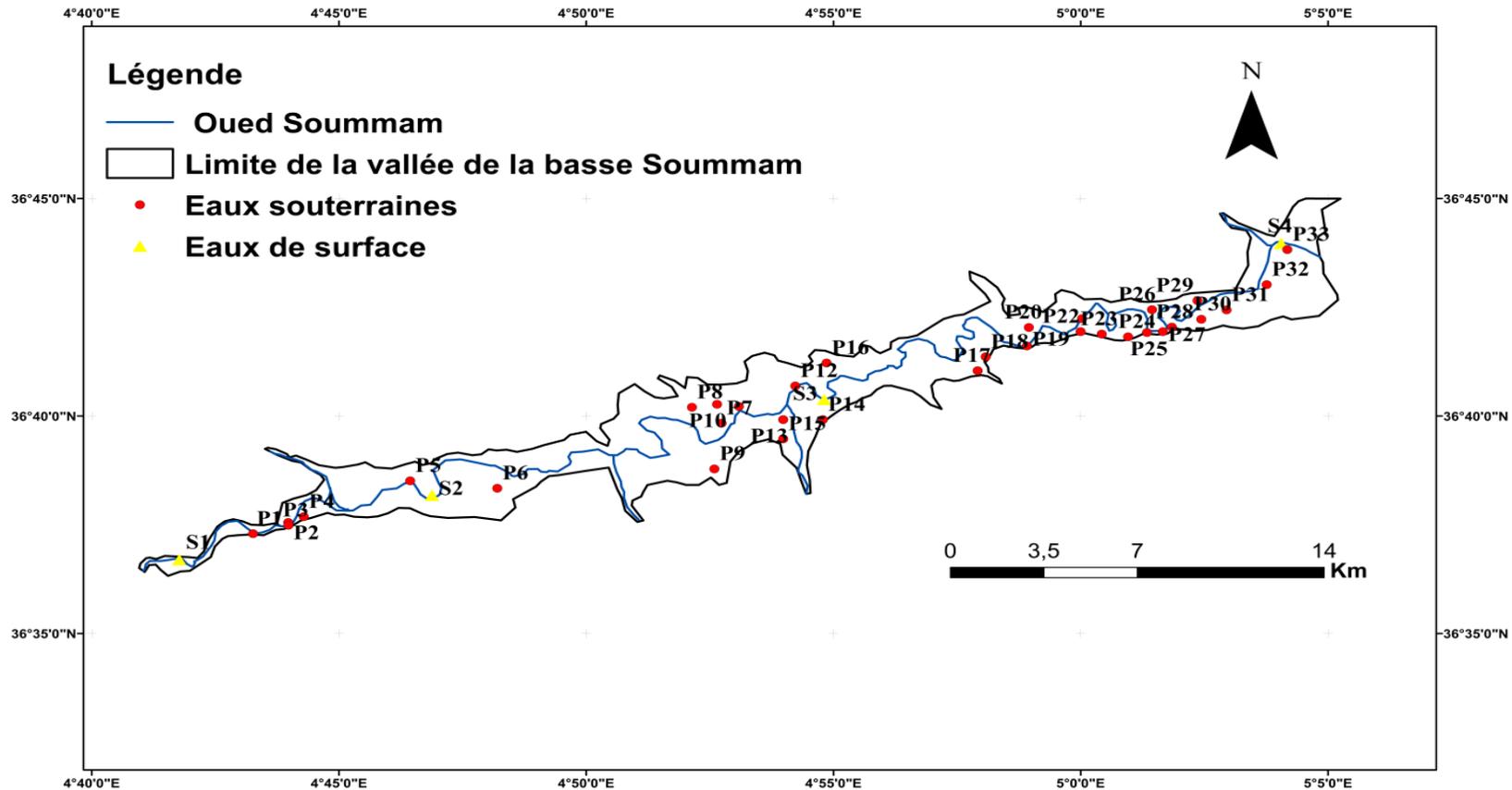


Fig.11. Localisation des points de prélèvement des eaux de surface et des eaux souterraines pendant les cinq compagnes

S1 : Sidi Aich, S2 : Fenaïa Ilmaten, S3 : Amizour, S4 : Béjaïa P1: Fetissan 1, P2: Remila, P3: Fetissan 2, P4: Fetissan 3, P5: O. A. Kader, P6: 7villages, P7: EAC 4, P8 : EAC 5, P9 : Pépinière, P10 : F. Amzal 1, P11 : F. Amzal 2, P12 : D. Massaoudi, P13 : F. Moustache, P14 : Hakim, P15 : M. Ahcen, P16 : O. Ghir, P17 : V. Ibezghiden, P18 : F. Azzoug, P19 : Souissi, P20 : L'abreuvoir, P21 : Cevital, P22 : S. Salem, P23 : Hocini, P24 : T. Hamza 4, P25 : T. Hamza 3, P26 : Djamaa, P27 : T. Hamza 2, P28 : Mendi, P29 : Ramdani, P30 : T. Hamza 1, P31 : SIMAF, P32 : Saidj, P33 : Mouzhaoui.

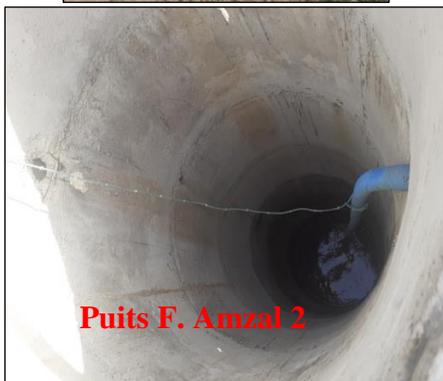
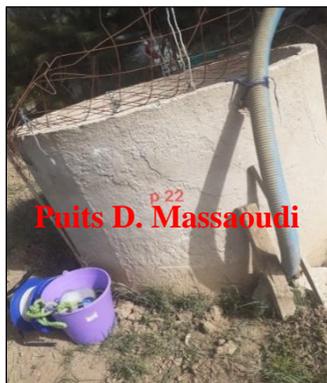
Eaux de surface



Filtration



Puits



Forages



Fig.12. Echantillonnage sur terrain

Multi-paramètre



Oxymètre



Glacière



Fig.13. Matériels utilisés

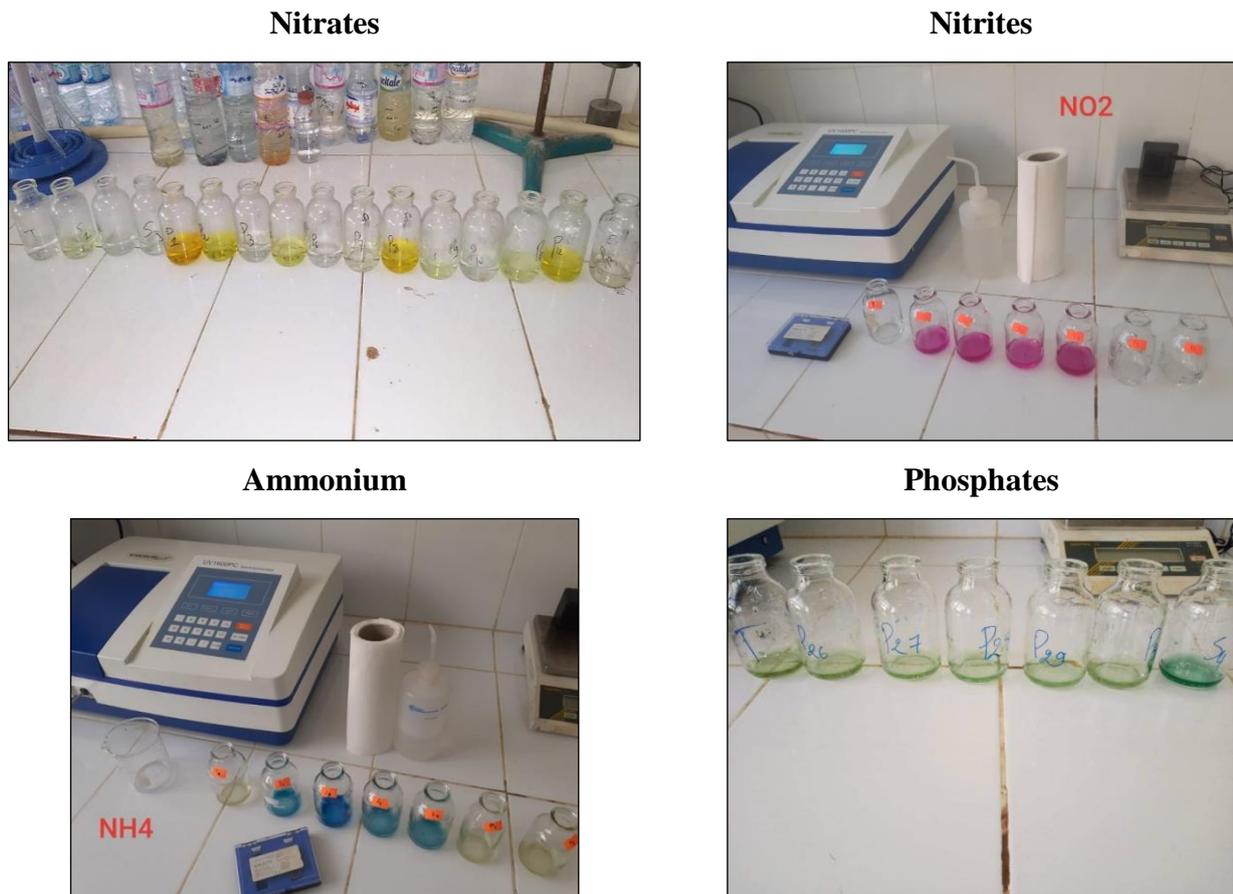


Fig.14. Dosage des composés azotés et les phosphates au laboratoire

1) Normes de potabilité des eaux

La pollution des eaux de surface a été évaluée selon la norme algérienne des eaux d'irrigation en 2011 et modifiée en 2012 (Journal Officiel de la République Algérienne 2012). Quant aux eaux souterraines, elles ont été évaluées selon les Normes fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 2017 et les Normes algériennes de 2011 (Journal Officiel de la République Algérienne 2011) résumées dans le tableau 13. Ainsi, la température est limitée à 25° pour les eaux de surface et les eaux souterraines ; les eaux de surface sont utilisées pour l'irrigation et les eaux souterraines sont utilisées pour l'approvisionnement en eau potable (AEP), l'industrie et l'irrigation. Le potentiel d'hydrogène (pH) diffère selon qu'elle soit eau de surface avec un intervalle de 6,5-8,5 ou eau souterraine avec un intervalle de 6,5-9,5. La norme algérienne pour les eaux souterraines et les eaux de surface est fixée à une limite de 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C pour la conductivité électrique, mais elle n'est pas fixée par l'OMS. Pour l'oxygène dissous, la norme algérienne pour les eaux de surface et l'OMS pour les eaux souterraines n'est pas indiquée, mais la norme algérienne est fixée à 5 mg/L pour les eaux souterraines.

Les trois normes sont convenues sur la limite de 50 mg/L pour les concentrations de nitrate. Pour les eaux souterraines, l’OMS et la norme algérienne ont fixé respectivement à 3 et 0,2 mg/L la valeur maximale admissible des nitrites, la limite de concentration d’ammonium pour les eaux de surface est fixée à 4 mg/L dans la norme algérienne, 2012 et pour les eaux souterraines est fixé à 0,5 mg/L dans l’OMS et la norme algérienne. Pour les Phosphates, la norme algérienne a fixé une limite de 10 mg /L et 5 mg/L pour les eaux de surface et les eaux souterraines respectivement.

Tableau 13. Les normes des eaux d'irrigation et de potabilité des eaux

	Eaux de surface	Eaux souterraines	
	Normes algériennes, 2012	OMS, 2017	Normes algériennes, 2011
Température (°C)	25	25	25
Potentiel d'hydrogène (pH)	6,5-8,5	--	6,5-9,5
Conductivité électrique (µS/cm)	2800 à 20°C	--	2800 à 20°C
Oxygène dissous (mg/L)	--	--	5
Nitrates (mg/L)	50	50	50
Nitrites (mg/L)	--	3	0,2
Ammonium (mg/L)	4	0,5	0,5
Phosphates (mg/L)	10	--	5

III. Résultats et discussions

1. Piézométrie de l'aquifère

Avant d'interpréter les deux cartes piézométriques établies en hautes et en basses eaux ; on doit prendre en considération trois points essentiels, à savoir :

- Le nombre de puits mesurés n'est pas assez suffisant pour établir une carte piézométrique, car plusieurs contraintes de terrain ont été rencontrées telles que : la forte pente, l'accès aux ouvrages, les travaux de la pénétrante de Béjaïa vers l'autoroute traversant la zone d'étude.

- A cause du changement climatique et du pompage irrégulier et excessif, des puits sont asséchés sur de grandes aires de la nappe ainsi que des puits qui ont été trouvés fermés.

- La présence de puits et forages en exploitation fait que les mesures du niveau statique de la nappe étudiée sont parfois influencées par les cônes de rabattement des puits voisins.

L'allure générale des cartes piézométriques établies en Mai et Octobre 2021 (Fig.15 et 16) est préservée comparativement à celle établie par Kessasra en Mars et Septembre 2011. Les niveaux piézométriques sont décroissants du SW au NE. En Mai 2021, les niveaux d'eau passent de 62 m en amont à Sidi Aich et descendent jusqu'à 4 m en aval à Béjaïa près de la mer. Les mêmes niveaux sont mesurés en basses eaux (Octobre 2021) avec quelques changements au milieu de la nappe, dans la partie entre Amizour et El Kseur, les courbes de niveaux deviennent de plus en plus serrées. En revanche, elles deviennent plus espacées dans la partie comprise entre Oued Ghir et Tala Hamza. Le sens d'écoulement se fait vers le centre de la nappe, et l'axe d'écoulement principal prend la direction SW-NE parallèle à l'écoulement de l'oued Soummam. L'allure des isopièzes permet de distinguer deux zones :

- ✓ La 1^{ère} zone est localisée entre Sidi Aich au SW et Fenaïa Ilmaten, illustre des isopièzes serrées indiquant une vitesse d'écoulement rapide donc un fort gradient hydraulique calculé à 10 %. Dans cette zone les isopièzes sont parallèles à la limite géologique de la vallée de la basse Soummam ce qui indique la présence d'un axe d'alimentation de quelques dizaines de kilomètres.

- ✓ La 2^{ème} zone : entre Fenaïa Ilmaten et Béjaïa, les isopièzes sont plus espacés ce qui engendre un gradient hydraulique qui ne dépasse pas les 4 % donc une vitesse d'écoulement assez faible. À l'exception du nord de Tala Hamza où les isopièzes sont suffisamment serrés, le gradient hydraulique atteindra 12 %. Quatre axes d'alimentation latérale de la nappe sont mis en évidence :

- Le 1^{ier} est localisé entre les deux oueds Amassine et Amizour sur la rive droite.
- Le 2^{ème} sur la rive gauche dont l'axe d'alimentation entre Fenaïa Ilmaten et El Kseur à partir des reliefs karstiques de la chaîne calcaire de Djurdjura.
- Le 3^{ème} entre El Kseur et Oued Ghir, l'alimentation latérale se fait à travers les versants calcaires de Djebel Arbalou.

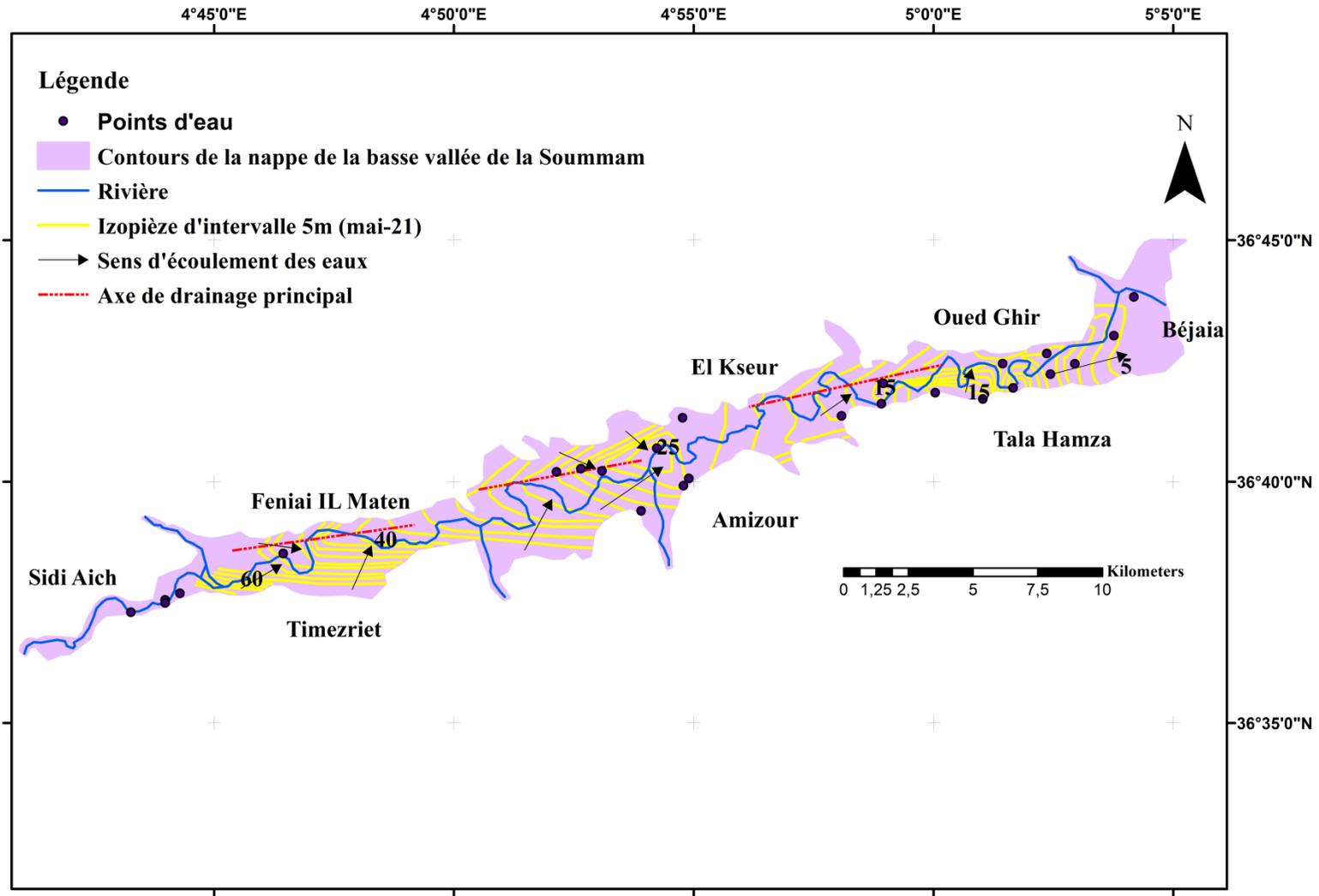


Fig.15. Carte piézométrique de la vallée de la basse Soummam à partir des niveaux mesurés en Mai 2021

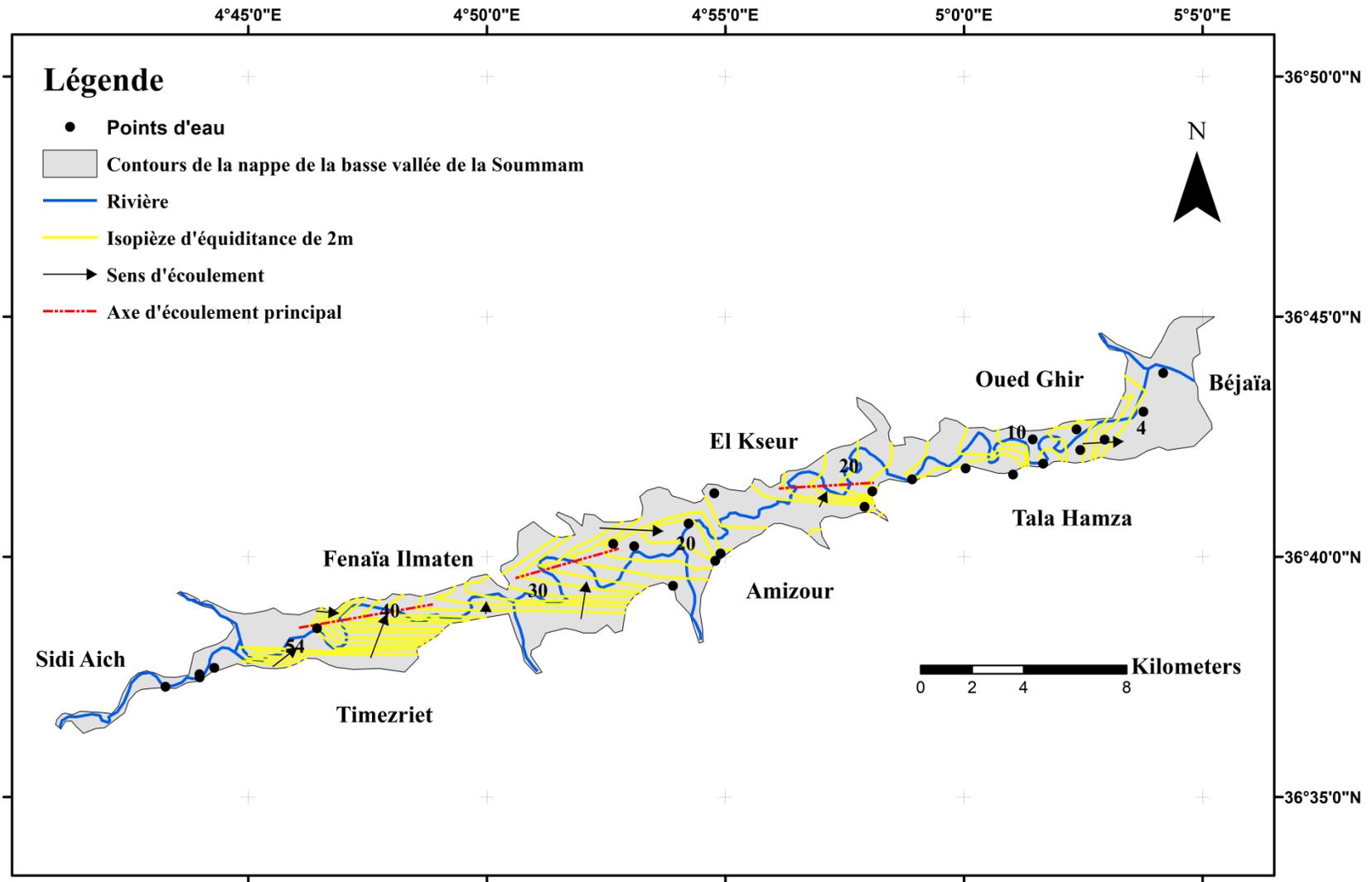


Fig.16. Carte piézométrique de la vallée de la basse Soummam à partir des niveaux mesurés en Octobre 2021

- Le 4^{ème} au Sud El Kseur, sur la rive droite où les isopièzes sont parallèles à la limite géologique de la nappe, l'alimentation se fait à travers les massifs carbonatés et fracturés des Babors.

2. Caractérisation hydrogéochimique des eaux de surface et des eaux souterraines

1. Géochimie des eaux de surface

1) Température (T)

La température de l'eau est influencée par la température saisonnière (Chapman et al. 1996). La variation de la température influence sur la solubilité des éléments chimique et l'activité bactérienne (Rodier, 2009). La température de l'eau de surface de la vallée de la basse Soummam varie entre 10,8°C à Sidi Aich en Octobre 2020 et 30,8°C à Amizour en Septembre 2019 (Tableau.14). Toutes les valeurs se trouvent dans la limite préconisée par la norme algérienne pour l'eau d'irrigation 2012 qui est de 25°C, exceptée pour la deuxième campagne Septembre 2019 où les valeurs de température dépassent la norme algérienne aux stations Fenaïa Ilmaten et Amizour. Elles sont mesurées respectivement à 28 et 30,8°C. Celles sont en lien direct avec la température de l'air ambiante. La température de l'eau de l'oued Soummam en Mai et Octobre 2019 suit la variation saisonnière de la température de l'air. En période de crue les températures baissent contrairement à la période d'étiage où elles augmentent. En effet, l'eau de la vallée présente donc une bonne aptitude aux usages essentiellement à l'irrigation vis-à-vis de ce paramètre.

Tableau 14. Valeurs des températures en °C dans les eaux de surface

	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2012
Sidi Aich	20	25,2	10,8	23,8	11,3	25
Fenaïa Ilmaten	21,7	28	19,1	23,4	15,3	
Amizour	22,7	30,8	20,7	21,3	21,5	
Béjaïa	17,2	20,8	16,1	17,8	16,7	

2) Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH ne peut pas être utilisé individuellement pour caractériser les eaux des cours d'eau puisqu'il est sujet à des variations journalières, liées aux activités biologiques (Neal et al. 2000a in Kessasra 2015). Plusieurs paramètres tels que la température et les phénomènes biologiques (photosynthèse et dégradation de la matière organique) reflètent sur les valeurs de pH. Le pH augmente lorsque la température augmente et la solubilité du CO₂ diminue en même temps. A l'inverse la solubilité du

CO₂ augmente lorsque la température diminue, ce qui conduit à une baisse du pH (Liechti et al. 2004).

Néanmoins, toutes les valeurs mesurées (Tableau.15) sont localisées dans l'intervalle fixé par la norme algérienne 2012 entre 6,5 et 8,5. Sauf à Amizour en Mai 2021, le pH mesuré à 8,9 dépasse légèrement la norme algérienne et en dessous de la norme à Sidi Aich avec 6,66. Toutefois, il faut signaler que le pH des eaux de surface de la vallée de la basse Soummam demeure légèrement acide en Septembre 2019. Cette faible acidité est probablement liée à un apport d'effluents d'eau urbaine et industrielle chargée de polluants de diverses sources. Durant les autres campagnes, une légère alcalinité a été observée, cette faible variation peut être attribuée à l'effet tampon des ions bicarbonates.

Tableau 15. Valeurs de potentiel d'hydrogène dans les eaux de surface

	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2012
Sidi Aich	8,53	6,66	7,78	8,36	8,22	6,5-8,5
Fenaïa Ilmaten	8,34	6,72	7,81	7,73	8,31	
Amizour	7,96	6,74	7,82	8,9	8,2	
Béjaïa	7,58	6,72	8,01	8,3	7,82	

3) Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est un indice important de la minéralisation des eaux qui reflète la teneur en minéraux dissous (Rodier, 2009). Les valeurs mesurées de la CE sont comprises entre 5100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à Sidi Aich et 11590 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ au Fenaïa Ilmaten mesurées respectivement en Octobre 2010 et en Septembre 2019 (Tableau.16). On remarque que toutes les valeurs de la CE sont en dessus de la limite fixée par la norme algérienne en 2012 à 2800 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

On constate que ces fortes minéralisations dues d'abord à la minéralisation naturelle en raison de la présence de formations carbonatées dans les massifs qui entourent la Soummam ensuite aux rejets urbains (4160072,2 m³/an) et industriels (5136,32 m³/j) qui déversent dans l'oued sans traitement préalable peuvent être à l'origine de ces concentrations en sels minéraux. Par ailleurs, comme les eaux de la Soummam sont destinées en grande partie à l'irrigation, ces fortes minéralisations peuvent compromettre les rendements agricoles à long terme, par effet d'accumulation des sels dans les agrosols de la vallée.

Tableau 16. Valeurs des conductivités électriques en $\mu S.cm^{-1}$ dans les eaux de surface

	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2012
Sidi Aich	10090	11147,5	5100	8200	6300	2800 à 20°C
Fenaïa Ilmaten	9980	11590	11100	7900	6700	
Amizour	8710	11050	11200	8160	8090	
Béjaïa	7530	9700	5200	5900	7900	

4) Oxygène dissous (OD)

L'oxygène dissous dans l'eau est un élément fondamental qui intervient dans la majorité des processus biologiques ; végétaux et animaux l'utilisent pour la respiration. L'oxygène participe également aux dégradations biochimiques et chimiques (Habiche, 2002). Plus la concentration en OD est proche de la saturation, plus l'aptitude de l'oued à absorber la pollution est grande :

- Une valeur inférieure à 1 mg/L indique un état proche de l'anaérobie. Une faible teneur en OD provoque une augmentation de la solubilité des éléments toxiques qui se libèrent des sédiments.
- Une valeur de 1 à 2 mg/L indique un oued fortement pollué mais de manière réversible ;
- Une teneur de 4 à 6 mg/L caractérise une eau de bonne qualité ;
- Des teneurs supérieures à la teneur naturelle de saturation en oxygène 7 mg/L indiquent une activité photosynthétique intense (IBGE, 2005).

Les résultats obtenus (Tableau.17) montrent que la teneur en OD oscille entre 3,21 mg/L en octobre 2021 et 7,88 mg/L en Septembre 2019 à la station Amizour. On note qu'en Octobre 2020 et Mai 2021 les valeurs de l'OD n'ont pas été mesurées car l'appareil était en panne. Les valeurs mesurées à la station de Sidi Aich en Septembre 2019 et en Octobre 2021 aux stations Sidi Aich, Amizour et Béjaïa montrent que l'eau est de bonne qualité vis-à-vis de ce paramètre. Par contre, au niveau des stations de Fenaïa Ilmaten, Amizour et Béjaïa en Septembre 2019 et à la station Fenaïa Ilmaten en Octobre 2021, les valeurs de l'OD dépassent 7 mg/L, ce qui indique la présence d'une activité photosynthétique intense.

Tableau 17. Valeurs de l'oxygène dissous en mg/L dans les eaux de surface

	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2012
Sidi Aich	6,46	6,96	ND	ND	6,22	/
Fenaïa Ilmaten	6,1	7,16	ND	ND	7,5	
Amizour	5,19	7,88	ND	ND	3,21	
Béjaïa	5,69	7,33	ND	ND	3,71	

ND : non disponible.

5) Nitrates (NO₃⁻)

Les nitrates représentent la forme la plus oxydée de l'azote et la plus stable, mais il peut être réduit en nitrite, modérément réactif, par action microbienne (Kemoukh, 2007). Ils se caractérisent par sa forte solubilité dans l'eau et mobilité dans le sol, pénètre dans la nappe phréatique lorsque sa quantité dépasse ce que les plantes peuvent utiliser. En générale, la présence des nitrates est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques (Rodier, 2009).

Dans les cinq compagnes d'échantillonnage entreprises dans la vallée, de faibles concentrations en nitrates (Tableau.18) ont été obtenues dans les eaux de surface, elles sont inférieures à la limite fixée à 50 mg/L par les normes algériennes 2012 dont un maximum de 19,73 mg/L à Béjaïa en Septembre 2019 et un minimum de 0 mg/L dans les trois stations de Fenaïa Ilmaten et Amizour en Octobre 2020 et Fenaïa Ilmaten en Mai 2021. En effet, l'eau de la vallée de la basse Soummam présente donc une bonne aptitude à l'irrigation vis-à-vis de ce paramètre.

Tableau 18. Valeurs des nitrates en mg/L dans les eaux de surface

	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2012
Sidi Aich	7,09	0,67	13,08	0,09	10,56	50
Fenaïa Ilmaten	10,23	2,02	0	0	3,65	
Amizour	18,39	7,89	0	8,21	1,22	
Béjaïa	11,80	19,73	13,62	4,56	1,44	

6) Nitrites (NO₂⁻)

Les nitrites sont la forme la moins stable dans le cycle de l'azote. Ils sont issus de la dénitrification des nitrates ou bien de la nitrification de l'ammonium. Leurs origines sont liées à l'agriculture ou aux rejets urbains et industriels. Ils sont considérés comme un élément toxique (Aissaoui, 2018). Les résultats (Tableau.19) des concentrations de l'ion nitrite indiquées dans le tableau ci-dessous sont compris entre 0,01 et 3,02 mg/L à Amizour respectivement en Octobre 2021 et Mai 2019. La concentration maximale marquée à Amizour est expliquée par l'accumulation des rejets domestiques. En conséquence, l'excès en ion nitrite dans les eaux superficielles de l'oued provient d'une oxydation

incomplète de l'ammonium qui apparait essentiellement dans les rejets urbains des grandes communes longeant la vallée. Les volumes des rejets liquides passent de 137 766 m³/j en 2010 à 181 615 m³/j selon la projection de 2020 (PNE, 2010).

Tableau 19. Valeurs des nitrites en mg/L dans les eaux de surface

	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2012
Sidi Aich	0,93	0,52	0,05	0,10	0,37	/
Fenaïa Ilmaten	1,98	0,13	0,02	0,03	0,05	
Amizour	3,02	0,20	0,03	0,30	0,01	
Béjaïa	0,99	1,31	0,03	0,10	0,03	

7) Ammonium (NH₄⁺)

L'ammonium est souvent présent dans les eaux polluées à cause de la biodégradation des protéines des acides aminés de l'urée. La présence d'ammonium est un signal d'une pollution récente, il est graduellement transféré en premier stade en nitrites, puis en nitrates en dernier stade. L'ammonium est la forme d'azote la plus toxique et la présence d'ammonium en quantité importante est l'indice d'une contamination par des rejets d'origine humaine ou industrielle (OFEV, 2010).

Les résultats obtenus (Tableau.20) montrent que les concentrations en ammonium varient entre 0 mg/L à Amizour en Mai 2019 et 4,18 mg/L en Octobre 2021 à Sidi Aich. Une hausse en concentration en Mai 2019 à la station de Béjaïa et en Septembre 2019 à la station de Fenaïa Ilmaten. Une forte contamination est remarquable en 2021. Un apport des eaux polluées d'origine domestique et industrielle peut en être la cause. Un volume d'eau usée projeté à 181615 m³/j en 2020, cela justifierait les fortes concentrations de l'ion ammonium.

Tableau 20. Valeurs de l'ammonium en mg/L dans les eaux de surface

	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2012
Sidi Aich	1	0,87	0,85	2,07	4,18	4
Fenaïa Ilmaten	0,56	3,57	0,06	3,16	3,63	
Amizour	0	0,09	1,30	1,32	3,65	
Béjaïa	3,66	1,48	0,07	4,12	2,99	

8) Phosphates (PO₄⁺²)

Les fortes concentrations en phosphates indiquent un enrichissement agricole, ainsi que des apports directs des activités industrielles. Le phosphate est un élément principal responsable du

phénomène d'eutrophisation des eaux de surface. Nos analyses montrent (Tableau.21) des traces négligeables des phosphates inférieures à 0,25 mg/L de phosphate dans les eaux de la basse vallée. Les valeurs de phosphates sont inférieures à la norme algérienne. Ces faibles teneurs en Phosphates sont liées probablement aux rejets urbains.

Tableau 21. Valeurs des Phosphates en mg/L dans les eaux de surface

	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2012
Sidi Aich	0,02	0,06	0,04	0,058	0,25	10
Fenaïa Ilmaten	0,01	0,10	0,11	0,056	0,04	
Amizour	0,04	0,08	0,19	0,040	0,06	
Béjaïa	0,09	0,1	0,22	0,052	0,19	

Il faut signaler que d'après l'enquête de terrain menée en Septembre 2019, l'oued Soummam recevait un apport important d'eaux polluées qui provoque la hausse des paramètres physiques et des composés azotés et phosphatés. En se basant sur les résultats des analyses des eaux de surface (Fig.17), il en ressort que les processus de nitrification et dénitrification dominant. En effet :

En Mai 2021, une nitrification partielle de l'ion NH_4^+ dans les trois stations Sidi Aich, Fenaïa Ilmaten et Béjaïa où les valeurs sont mesurées respectivement à 1 ; 0,56 et 3,66 mg/L. Ainsi, les nitrates sont mesurés respectivement à 7,09 ; 10,23 et 11,80 mg/L. D'autre part, une nitrification totale est observée à Amizour avec des teneurs quasiment nulles en NH_4^+ et les nitrates de l'ordre de 18,39 mg/L en présence de l'oxygène dissous dans l'eau dont les concentrations varient entre 5,19 et 6,46 mg/L.

En Septembre 2019, les concentrations en composés azotés montrent une dénitrification partielle des nitrates dans les deux stations Sidi Aich et Fenaïa Ilmaten. Ainsi, les teneurs en nitrates et nitrites sont mesurées respectivement de 0,67 ; 0,52 et 2,02 ; 0,13 mg/L et les concentrations en ammonium sont de l'ordre de 0,87 et 3,57 mg/L. D'autre part, une nitrification partielle de l'ion d'ammonium dans les stations Amizour et Béjaïa et les nitrates sont mesurées respectivement à 7,89 et 19,73 mg/L, les nitrites à 0,2 ; 1,31 mg/L et l'ammonium à 0,09 ; 1,48 mg/L.

En Octobre 2020, Une nitrification partielle dans les deux stations Sidi Aich et Béjaïa en Octobre 2020 exprimée par des valeurs de nitrates, de nitrites et d'ammonium respectivement de 13,08 ; 0,05 ; 0,85 et 13,62 ; 0,03 ; 0,07 mg/L. Cependant, une dénitrification totale dans les stations Fenaïa Ilmaten et Amizour en Octobre 2020 avec des teneurs en nitrites et ammonium respectivement de l'ordre de 0,02 ; 0,06 et 0,03 ; 1,3 mg/L.

En Mai 2021, Une nitrification partielle dans les deux stations Amizour et Béjaïa en Mai 2021 enregistrée par des concentrations des nitrates, des nitrites et d'ammonium mesurées respectivement à 8,2 ; 10,3 ; 1,32 et 4,56 ; 0,1 ; 4,12 mg/L. Une dénitrification totale dans la station de Fenaïa Ilmaten en Mai 2021 avec des concentrations des nitrites et d'ammonium respectivement de l'ordre de 0,03 et 3,16 mg/L. En revanche, une dénitrification partielle est remarquée en Mai 2021 dans la station Sidi Aich exprimée par des teneurs en nitrates, nitrites et ammonium mesurées respectivement à 0,09 ; 0,1 ; 2,07 mg/L.

En Octobre 2021, une nitrification partielle est présente dans la station de Sidi Aich où les valeurs des nitrates, nitrites et ammonium sont mesurées respectivement à 10,56 ; 0,37 ; 4,18 mg/L. En revanche une dénitrification partielle dans le reste des stations. Dans la station de Fenaïa Ilmaten, les teneurs en composés azotés sont mesurées à 3,65 ; 0,05 ; 3,63 mg/L respectivement en nitrates, nitrites et ammonium. Les valeurs des nitrates, nitrites et ammonium dans les deux dernières stations d'Amizour et Béjaïa sont respectivement mesurées à 1,22 ; 0,01 ; 3,65 et 1,44 ; 0,03 ; 2,99 mg/L.

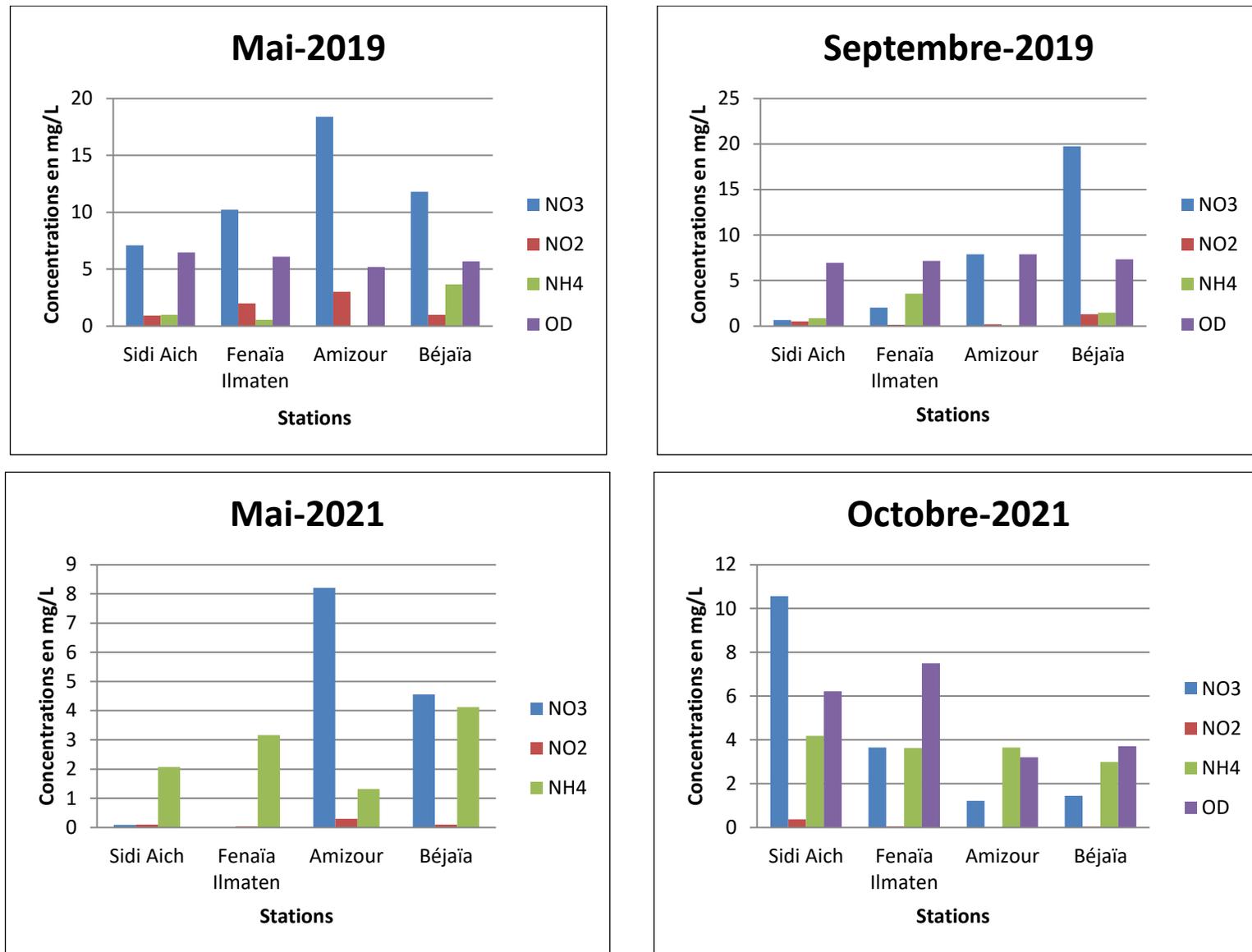


Fig.17. Variation spatio-temporelle des composés azotés et de l'oxygène dissous dans les eaux de surface

2. Géochimie des eaux souterraines

1) Température (T)

Les valeurs de la température des eaux souterraines pendant les cinq campagnes (Mai et Septembre 2019, Octobre 2020, Mai et Octobre 2021) oscillent entre 8,2°C en Octobre 2020 (Fig.18) et 37,3°C en Septembre 2019. Toutes ces valeurs sont en-dessous de la limite préconisée par les normes algériennes et OMS fixées à 25°C sauf dans six puits en Septembre 2019. Il s'agit de Remila, 7villages, EAC5, M. Ahcen, Souissi, Mendi avec des valeurs respectivement de 26 ; 37,3 ; 29,7 ; 29,9 ; 27,8 et 27°C. Ces valeurs sont influencées par la température de l'air saisonnière. Il faut noter que l'augmentation de la température influence la composition chimique et l'activité bactérienne de l'eau. Il a été noté plusieurs puits retrouvés asséchés à partir de la 2^{ème} campagne. Il s'agit de EAC4 en Septembre 2019, Octobre 2020, Mai et Octobre 2021 ; EAC5 en Octobre 2020 et 2021 et la F. Moustache en Octobre 2020.

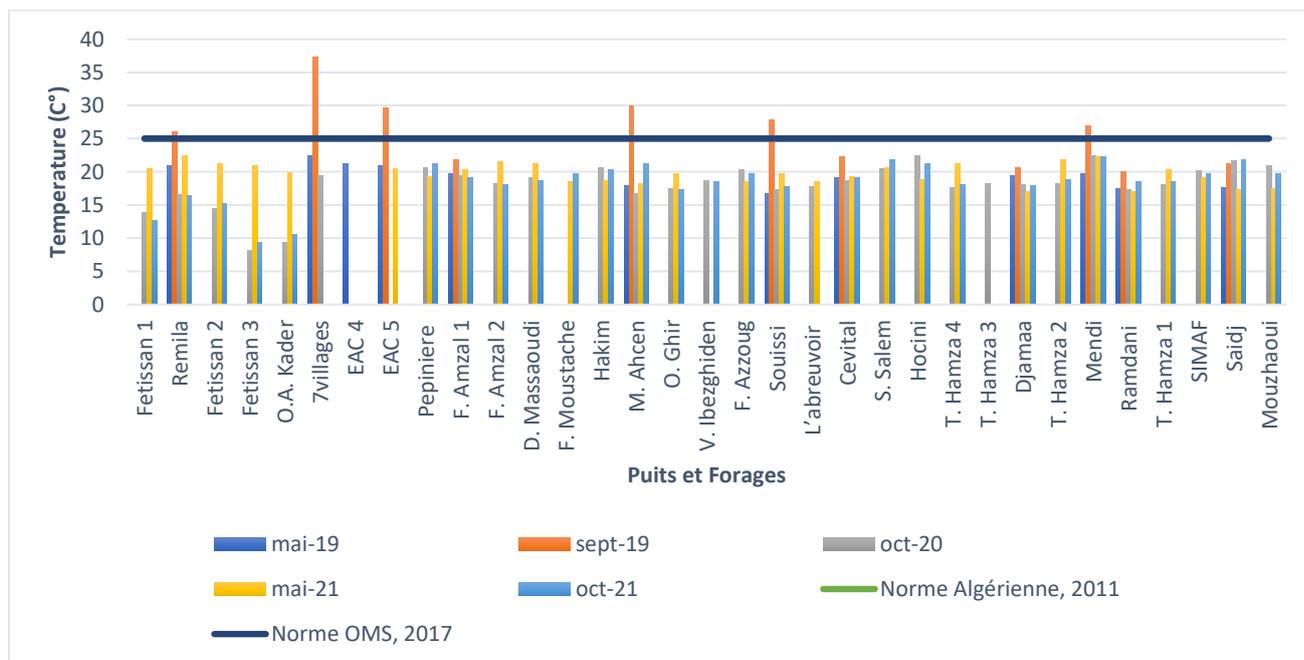


Fig.18. Valeurs des températures dans les eaux souterraines

2) Potentiel d'hydrogène (pH)

Les eaux souterraines de la vallée de la basse Soummam se caractérisent par un pH neutre à basique. Ses valeurs varient entre 6,67 au 7villages en Septembre 2019 (Fig.19) et 9,09 à Djamaa en Mai 2019, elles sont conformes à l'intervalle sélectionné par la norme algérienne (6,5 - 9,5). Ce caractère basique est obtenu suite à la dissolution des formations carbonatées des deux zones d'alimentation de la vallée à savoir le massif de Djurdjura composé de calcaire et de dolomie qui alimente la partie de la nappe des alluvions sur sa rive gauche et le massif des Bibans bordant la vallée étudiée sur la rive droite composé de calcaires et de marno-calcaires du Crétacé.

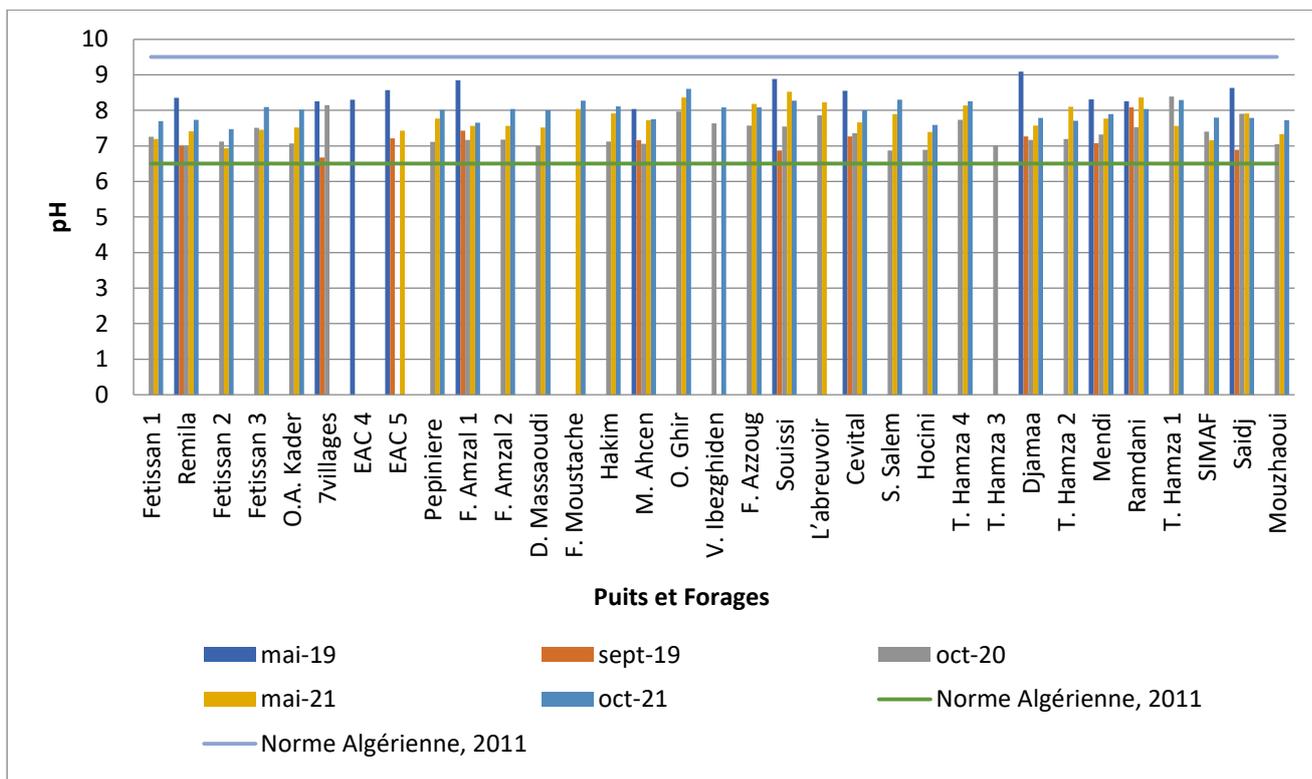


Fig.19. Valeurs de potentiel d'hydrogène dans les eaux souterraines

3) Conductivité électrique (CE)

D'après l'histogramme des variations de la conductivité électrique ci-dessous (Fig.20), on remarque une grande variabilité dans les valeurs de la CE. Ces valeurs oscillent entre $7600 \mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C au puits Remila en Octobre 2020 et $422,45 \mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C au puits Souissi en Septembre 2019. La majorité des puits et forages dépasse la limite fixée à $2800 \mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C par la norme Algérienne sauf les puits localisés dans la partie aval. On peut constater que ces puits se manifestent par des valeurs assez élevées présentant une forte minéralisation due à la présence du faciès gypso-salin et les formations carbonatées des massifs qui entourent la vallée de la Soummam, de plus un taux de pollution suffisamment élevé. Certains puits sont positionnés à proximité de l'oued Soummam tels que SIMAF, il est admis qu'il existe un échange oued-nappe et un enrichissement de la nappe en sels provenant de l'oued. Ce dernier est analysé entre 5100 à $11200 \mu\text{S.cm}^{-1}$.

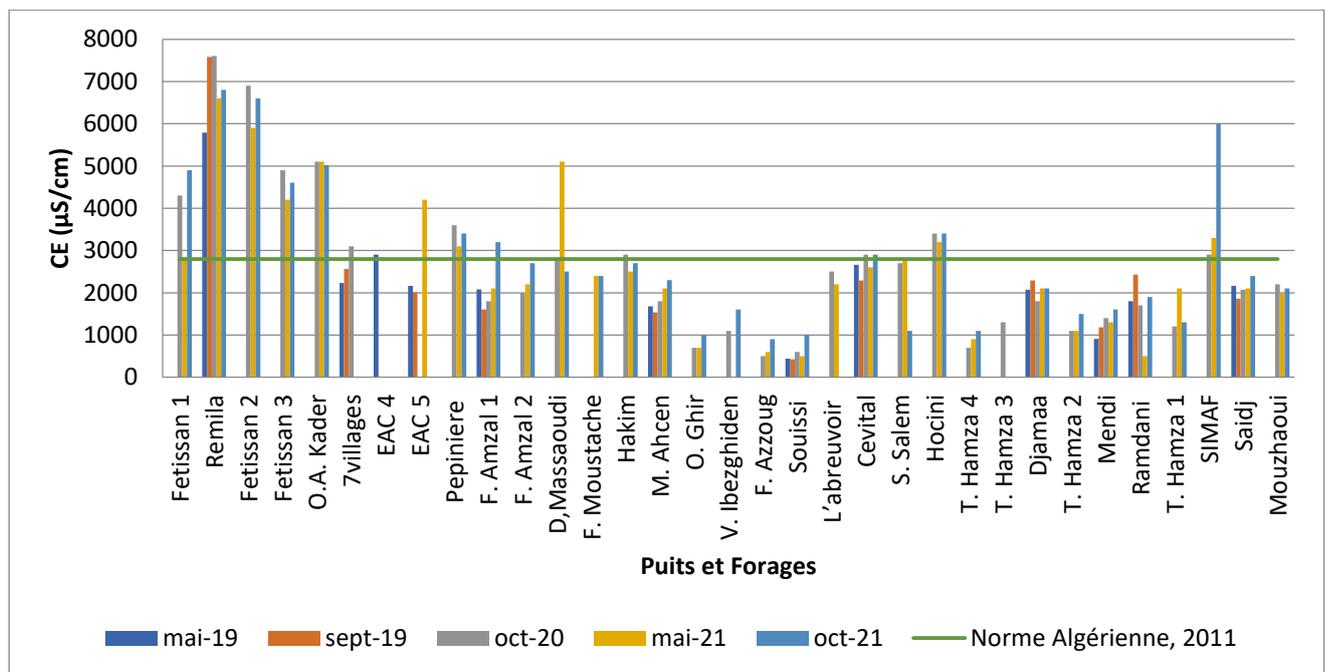


Fig.20. Valeurs de la conductivité électrique dans les eaux souterraines

4) Oxygène dissous (OD)

Les concentrations de l'oxygène dissous marquent une grande variabilité (Fig.21), variant entre 2,69 mg/L au puits Souissi en Mai 2019 et 9,15 mg/L enregistrée au niveau du puits SIMAF en Octobre 2021. Ces eaux souterraines sont relativement chargées en matières oxydables, par conséquent, les eaux de la nappe sont de bonne qualité. En revanche, comparées aux normes algériennes qu'elles fixent à 5 mg/L, la moitié des puits présente des concentrations inférieures à celles recommandées pour la l'eau potable. De plus le puits Souissi se manifeste par des valeurs inférieures à la norme algérienne durant les trois campagnes. En outre, nous n'avons pas mesuré les valeurs de l'oxygène dissous en Octobre 2020 et en Mai 2021 car l'oxymètre est tombé en panne.

Par ailleurs, plusieurs paramètres contrôlant la concentration en OD dans les eaux souterraines ont été vérifiés dans la vallée de la Soummam, à savoir :

- La nature des formations géologiques (Kessasra, 2015) : les horizons perméables présentent de fortes concentrations et les cas contraires sont également confirmés, en particulier, dû à la présence d'une couverture limoneuse dans l'axe El Kseur-Oued Ghir d'épaisseur moyenne de 20 m. Par exemple la teneur en OD en Mai 2019 mesurée à 8,52 mg/L dans le puits Ferme Amzal 1 où la nappe est libre. En outre, dans le puits Tala Hamza 1 en Octobre 2021 où la nappe est semi-captive, la teneur en OD a été mesurée à seulement 2,71 mg/L.

- La profondeur du niveau d'eau (la pression atmosphérique) peut influencer la teneur en OD. A titre d'exemple la profondeur de l'eau mesurée en Octobre 2021 aux puits SIMAF et Mouzhaoui

respectivement à 2,04 et 0,5 m ont vu leur teneur en OD augmenter considérablement. Ils ont été mesurés respectivement à 9,15 et 8,83 mg/L.

- Le gradient hydraulique et la vitesse d'écoulement dans la zone saturée ont été vérifiés également. En effet, les teneurs en OD dans les trois puits F. Amzal 2 ; D. Massaoudi et Souissi mesurées respectivement à 2,3 ; 3,2 et 2,65 mg/L correspondent à des gradients hydrauliques équivalents à 4 %. Au contraire, dans les puits Fetissan 3 et O.A. Kader où le gradient hydraulique est de 10 %, l'eau se renouvelle plus rapidement, la teneur en OD mesurée respectivement à 6,21 et 8,87 mg/L.

- La température de l'eau : la saturation en OD diminue lorsque la température et l'altitude augmentent (Site 2). Cela apparaît dans le puits Remila en Mai 2019 dont la température est mesurée à 20,9°C et la teneur en OD à 5,52 mg/L, elle diminue à 4,1 mg/L lorsque la température en Septembre 2019 est mesurée à 26°C.

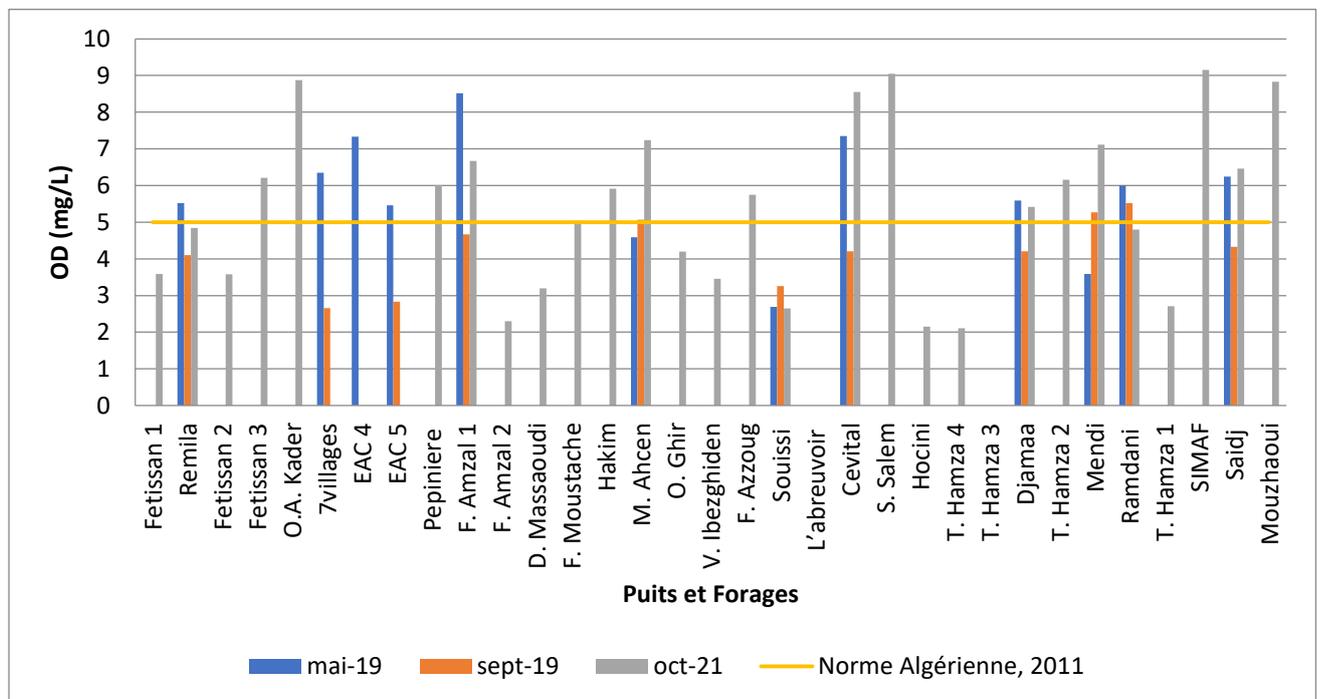


Fig.21. Valeurs de l'oxygène dissous dans les eaux souterraines

5) Nitrates (NO_3^-)

Les eaux souterraines de la basse vallée sont caractérisées par une grande fluctuation dans les teneurs en nitrates (Fig.22) pendant les cinq campagnes. Les fluctuations oscillent entre 291,59 mg/L au puits fetissan 3 en octobre 2020 et 0 mg/L dans 21 puits. Un tiers des puits a des teneurs en nitrates dépassant les normes Algériennes de 2011 et OMS fixées à 50 mg/L.

- En Mai 2019 : La concentration maximale est enregistrée dans le forage 7villages à 130,83 mg/L, elle est influencée par le milieu environnant caractérisé par une activité agricole assez intense. L'on signale que ce forage alimente en eau potable plusieurs villages de la région. Des valeurs élevées ont été analysées respectivement de 58,73 ; 78,33 ; 81,39 mg/L dans les trois puits EAC4, EAC5 et Ferme Amzal 1 localisés dans les domaines agricoles que compte la région comme le Domaine Aifa, le Domaine Salhi et le Domaine Massaoudi compris entre Fenaïa Ilmaten et Oued Ghir.
- En Septembre 2019 : Les concentrations en nitrates se trouvent en dessous de la norme algérienne. On peut justifier ces faibles concentrations par le faible taux d'infiltration des pluies calculé à 89,25 mm et représentent 11 % des précipitations ainsi que les faibles fréquences d'utilisation des engrais comme il est mentionné dans le calendrier agricole. En effet, on dénote l'absence d'épandage d'engrais pendant les mois de Juillet et Août dans l'agriculture des fourrages, des céréales et les agrumes, ce qui pourrait contribuer à la baisse des ions nitrates dans l'eau souterraine.
- En Octobre 2020 : Les teneurs élevées en nitrates en Octobre 2020 enregistré dans quatre puits Fetissan 3, O.A. Kader, F. Amzal 1 et Hakim et le forage Pépinière, respectivement à 291,59 ; 66,35 ; 117,51 ; 67,15 et 123,59 mg/L dépassent largement la norme algérienne, 2011 et OMS, 2017. L'origine de ces teneurs élevées en nitrates est l'épandage d'engrais pendant cette période. Il ressort dans le calendrier agricole que l'épandage des engrais a débuté en Juin jusqu'à Octobre 2020 pour les oliviers ; en Septembre 2020 pour les céréales et les agrumes et en Octobre 2020 pour les fourrages. D'autant plus, les précipitations augmentent en Septembre 2020 à 64,2 mm (Site3), ce qui provoque le lessivage des terres agricoles, le transfert des polluants azotés et la contamination de la nappe, sachant que la profondeur de la nappe est de 6 m à cet endroit.
- En Mai 2021 : Cette campagne est caractérisée par une pollution en nitrates assez élevée. Elle atteint 9 puits et forages : Fetissan 3, EAC5, Pépinière, F. Amzal 1, F. Moustach, Hakim, T. Hamza 4, Saidj et Mouzhaoui avec des valeurs respectivement de 219,6 ; 76,49 ; 129,97 ; 96,59 ; 86,49 ; 132,04 ; 82,37 ; 195,82 ; 63,39 mg/L et dépassant largement la norme de 50 mg/L. Cette pollution importante est due à l'accumulation du lessivage des engrais de l'année écoulée (Octobre 2020) dont les précipitations atteindraient 113,85 mm en Février 2021 et l'épandage d'engrais qui continue jusqu'à Mars.
- En Octobre 2021 : Les concentrations en nitrates restent élevées presque dans les mêmes puits et forages analysés précédemment. Un maximum de 145,93 mg/L dans le forage nommé Pépinière, le puits Hakim avec 119,72 mg/L, le puits Saidj avec 119,17 mg/L, le puits Fetissan 3 avec 107,59 mg/L, le puits Mouzhaoui avec 84,44 mg/L et le puits F. Amzal 1 avec 57,47 mg/L. Le puits Fetissan 3 marque de fortes concentrations dans les trois campagnes. Ces puits sont localisés dans une zone

d'élevage. Les puits EAC5, Pépinière, F. Amzal 1, F. Moustache, Hakim se localisent dans les domaines agricoles que compte la région comme le Domaine Aifa, le Domaine Salhi et le Domaine Massaoudi compris entre Fenaïa Ilmaten et Oued Ghir.

La contamination des eaux souterraines par les nitrates dépend de :

- La disponibilité de l'azote soluble provient essentiellement d'intrants chimiques introduites dans le sol de la région. En effet, dans ces domaines les activités agricoles sont pratiquées à grande échelle, connues par l'usage intensif des produits fertilisants organiques et inorganiques. En effet, 16366,2 kg d'engrais minéraux composés et les produits phytosanitaires en deux formes : liquide avec une quantité de 1905,1 L et sous forme solide avec 713 Kg. Ces produits sont répartis en fongicides, herbicides et insecticides livrés dans les communes agricoles de Sidi Aich, EL Kseur, Fenaïa Ilmaten, Amizour, Oued Ghir et Béjaïa. Ces intrants chimiques sont destinés à être dispersés sur environ 5810 ha de superficie irriguée. (DSA, 2018). On y applique deux catégories d'engrais, des engrais minéraux simples et des engrais azotés composés. Les premiers sont de type azoté (N) comme l'Urée ((NH_2)₂CO), le Sulfazote 26 %, le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3), le Sulfate d'ammonium ((NH_4)₂SO₄), l'Azofert N 21 %, de type phosphaté comme le TSP (superphosphate triple), le SSP (superphosphate simple) et le phosphate d'ammonium ((NH_4)₂HPO₄) et enfin de type potassique (K) comme le Potasse K₂O. En outre, les seconds sont essentiellement composés de NPK, NP, NK et PK. Ils peuvent directement contenir l'ion NO_3^+ ou peuvent être constitués de l'ion NH_4^+ qui se transformera progressivement en NO_3^+ .

- Le type de sol et sa perméabilité : en amont la teneur en nitrates mesurée respectivement à 291,59 et 66,35 mg/L à Fetissan 3 et O.A. Kader. Dans cet endroit, l'aquifère est caractérisé par un remplissage de gravier, sable et galets à perméabilité très bonne mesurée à 10^{-2} m/s, ce qui faciliterait le transfert et la dispersion des solutés. Par contre, à l'aval où la perméabilité est assez faible, d'environ 10^{-5} m/s, l'aquifère rempli de graviers et galets avec des poches argilo-limoneuses et parfois sableuses, les teneurs en nitrates sont mesurées uniquement à 26,55 et 18,51 mg/L respectivement à Saidj et Mouzhaoui.

- L'épaisseur de la zone non-saturée autrement dit du niveau d'eau dans la nappe. De plus, la source majeure des nitrates dans la vallée est apportée sous forme d'engrais, les nitrates en excès vont être entraînés en profondeur par l'eau de pluie qui s'infiltré graduellement dans le sol en traversant sa zone racinaire et sa zone non-saturée pour ensuite atteindre la nappe qui n'est profonde que de 1 à 15 m. En effet, la profondeur de la zone non saturée est mesurée à 2,18 m au niveau de puits Tala Hamza 4 et la concentration des nitrates est de 82,37 mg/L. au contraire, au niveau de puits Tala Hamza 2, la concentration des nitrates est mesurée à 1,07 mg/L là où la profondeur de la zone non saturée est mesurée à 12,5 m.

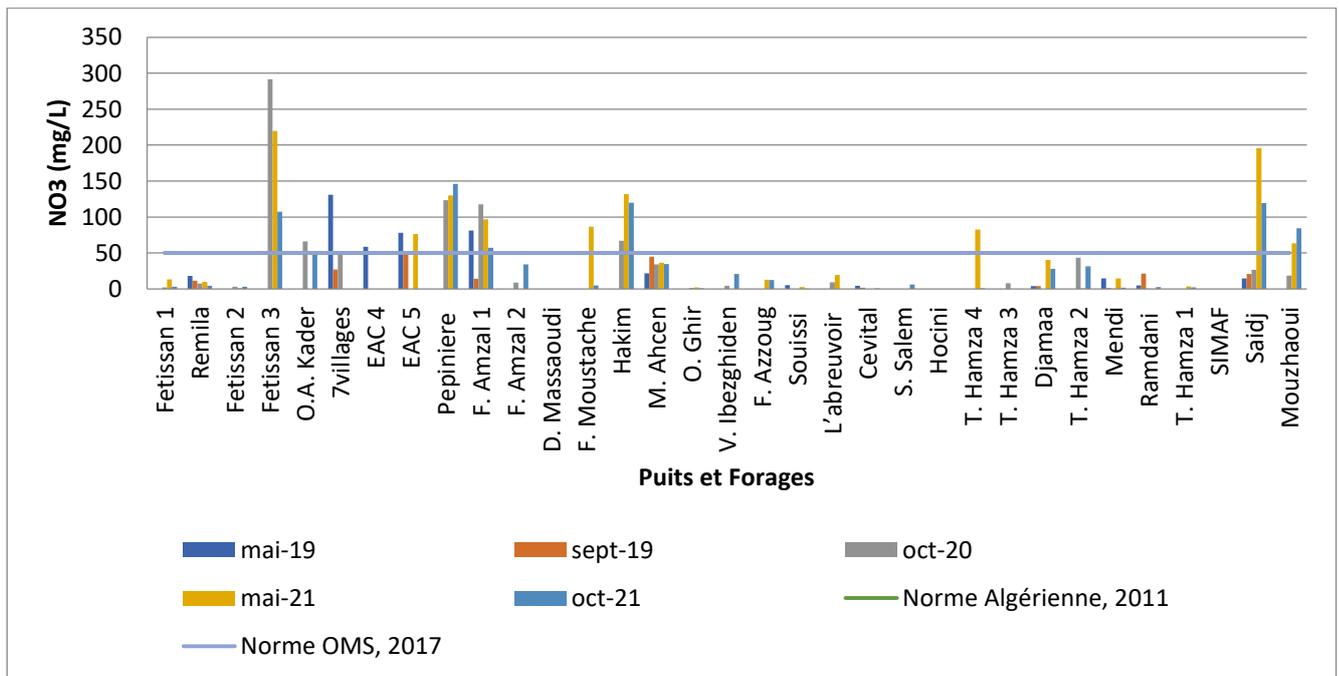


Fig.22. Valeurs des nitrates dans les eaux souterraines

6) Nitrites (NO_2^-)

Les résultats du dosage de l'ion nitrite obtenus dans les eaux de la nappe (Fig.23) sont compris entre 0 au niveau de plusieurs puits durant les cinq campagnes à 2,11 mg/L au niveau du puits Remila en Mai 2019. Cependant toutes ces teneurs demeurent conformes à la norme OMS fixée à 3 mg/L. Par contre des valeurs dépassant la norme algérienne fixée à 0,2 mg/L dans 5 puits en l'occurrence Remila en Mai 2019 avec 2,1 mg/L ; et en Mai 2021 les puits Hakim, Souissi, Hocini, T. Hamza 1 avec des concentrations respectivement de l'ordre de 0,53 ; 0,26 ; 0,24 et 0,27 mg/L. La concentration élevée dans le puits Remila peut être justifiée par la dénitrification du NO_3 ou bien à la nitrification de NH_4^+ lorsque l'oxygène dissous est mesuré uniquement à 5,25 mg/L.

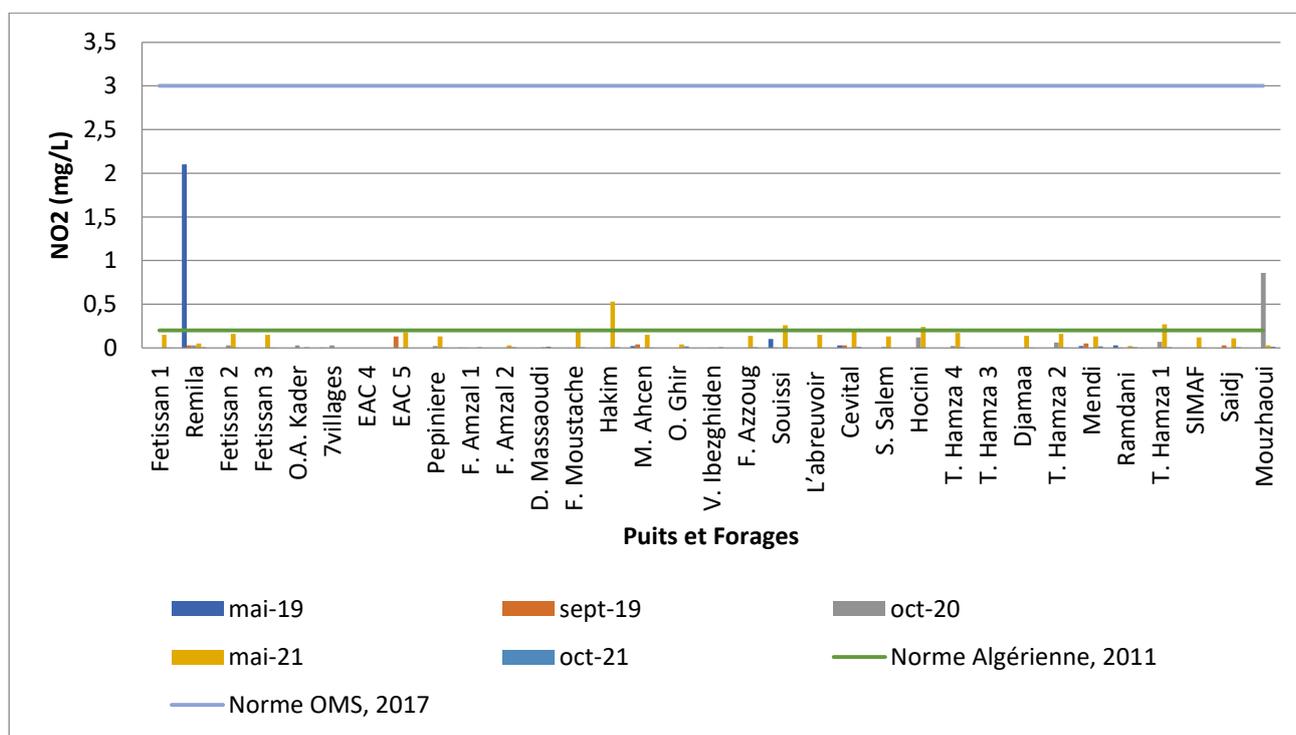


Fig.23. Valeurs des nitrites dans les eaux souterraines

7) Ammonium (NH_4^+)

La moitié des puits présente des valeurs nulles (Fig.24), Les concentrations en ammonium sont comprises entre 0 et 2,03 mg/L en Octobre 2021. La totalité des puits et forages présente de faibles concentrations sauf neuf puits qui dépassent les normes algériennes et OMS fixées à 0,5 mg/L. L'apparition de l'ammonium indique généralement des conditions de milieu réductrices et généralement pauvres en oxygène. Il est nettement très inférieur à la norme. Comparées aux fortes concentrations en nitrates dans les puits analysés et la présence de l'oxygène dissous, la nitrification de l'ammonium est amplifiée d'où son absence totale dans les eaux de la nappe. Les concentrations en ammonium sont généralement faibles dans les eaux souterraines. Le forage Cevital en septembre 2019 dépasse largement les normes Algériennes 2011 et OMS 2017 fixées à 0,5 mg/L. Une dénitrification complète des nitrates en ammonium au niveau du forage en milieu réducteur ($\text{OD}=4,21$ mg/L). En Mai et Octobre 2021, une dénitrification remarquable dans 4 puits qui présentent des concentrations dépassant les normes requises. Ce sont respectivement les puits F. Amzal 2 ; D. Massoudi ; Cevital et Hocini avec des teneurs en ammonium respectivement de 0,69 ; 0,53 ; 0,74 et 1,02 mg/L. Et les puits F. Amzal 2 ; D. Massoudi ; Cevital ; Hocini et Djamaa avec des teneurs en ammonium respectivement de 0,92 ; 1,65 ; 0,95 et 2,03 mg/L.

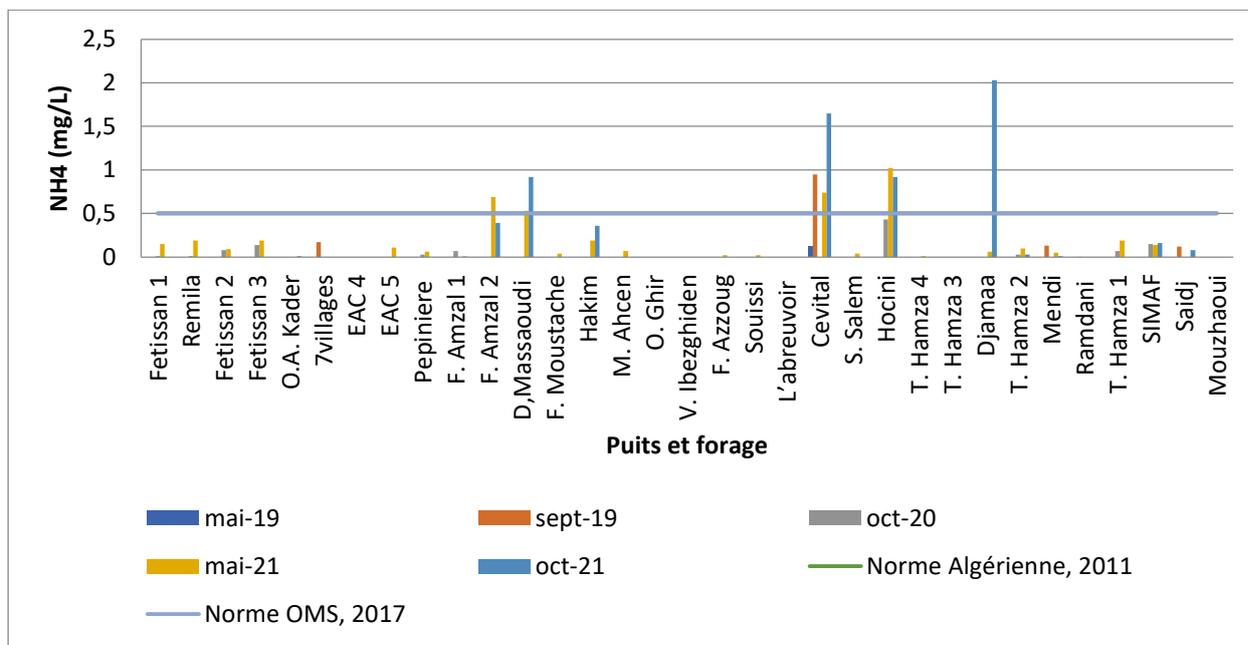


Fig.24. Valeurs de l’ammonium dans les eaux souterraines

8) Phosphates (PO₄⁻³)

Les teneurs en Phosphates sont très faibles dans les cinq compagnes (Fig.25) ne dépassant pas 1 mg/L. elles se trouvent en dessous de la norme algérienne de 2011 fixée à 5 mg/L. La présence des Phosphates même à de faibles concentrations est liée à l’utilisation d’engrais minéraux simples phosphatés de type TSP et SSP avec des quantités respectivement de 477 et 439 quintaux dans les communes de : Fenaïa Ilmaten, El Kseur, Oued Ghir et Amizour (DSA, 2018).

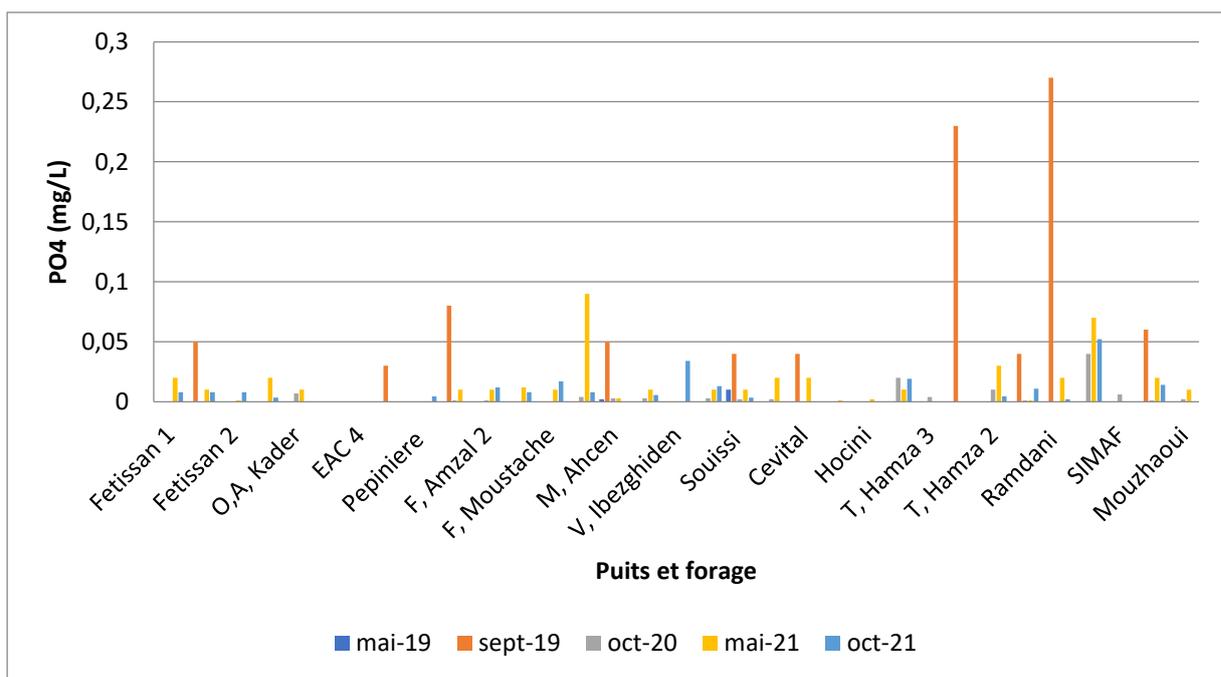


Fig.25. Valeurs des Phosphates dans les eaux souterraines

9) Processus de nitrification et dénitrification

La nitrification et la dénitrification sont deux processus qui contrôlent la variabilité des composés azotés dans l'eau. Le processus de nitrification est prédominant dans l'aquifère de la vallée de la basse Soummam qui présente un milieu oxygéné et montre des concentrations élevées en nitrates avec des faibles teneurs en nitrites et en ammonium. En effet :

➤ En Mai 2019, une quasi-totale nitrification est relevée dans les puits EAC4, EAC5, Djamaa, Saidj avec des concentrations en nitrates mesurées respectivement à 58,73 ; 78,33 ; 3,94 ; 14,67 mg/L. Les puits 7 villages, F. Amzal 1 et M. Ahcen montrent une nitrification avec des concentrations en nitrates mesurées respectivement à 130,83 ; 81,38 ; et 21,89 mg/L ; et des nitrites mesurés respectivement à 0,004 ; 0,0008 et 0,02 mg/L ainsi que des concentrations nulles en ammonium.

➤ En Septembre 2019, une nitrification s'est produite dans les puits : 7 villages avec des concentrations en nitrates, en nitrites et en ammonium mesurées respectivement à 27,09 ; 0 ; 0,17 mg/L, le puits EAC5 présente des concentrations en nitrates, en nitrites et en ammonium mesurées respectivement à 48,43 ; 0,13 ; 0 mg/L. Des teneurs en nitrates, en nitrites et en ammonium sont mesurées dans le puit M. Ahcen respectivement à 45,04 ; 0,04 ; 0 mg/L. Dans le puits Ramdani, des valeurs en nitrates, en nitrites et en ammonium mesurées respectivement à 21,26 ; 0,0008 et 0,002 mg/L. Des concentrations en nitrates, en nitrites et en ammonium mesurées respectivement dans le puits Saidj 21,08 ; 0,03 et 0,12 mg/L.

➤ En Octobre 2020, une nitrification est présente dans la majorité des puits et forages : Fetissan 3 ; O.A. Kader ; 7villages ; Pépinière ; F. Amzal 1 ; Hakim et T. Hamza 2 dont les concentrations en nitrates mesurées respectivement à 291,59 ; 66,35 ; 48,58 ; 123,59 ; 117,51 ; 67,15 et 43,6 mg/L et les concentrations en nitrites et en ammonium extrêmement faibles. Une nitrification totale avec des concentrations nulles en nitrites et ammonium et des teneurs en nitrates mesurées à 9,01 ; 34,36 ; 1,43 ; 9,51 ; 8,07 ; 0,39 ; 0,08 et 26,55 mg/L respectivement dans les puits F. Amzal 2 ; M. Ahcen ; O. Ghir ; L'abreuvoir ; T. Hamza 3 ; Mendi ; Ramdani et Saidj.

➤ En Mai 2021, le puits F. Amzal 1 enregistre une nitrification totale avec une concentration élevée en nitrates mesurée à 96,59 mg/L. Une nitrification est remarquée dans les puits et les forages Fetissan 3 ; EAC 5 ; Pépinière ; F. Moustache ; Hakim ; M. Ahcen ; T. Hamza 4 ; Djamaa ; Saidj et Mouzhaoui dont les concentrations en nitrates mesurées à 219,6 ; 76,49 ; 129,97 ; 86,49 ; 132,04 ; 36,43 ; 82,37 ; 40,6 ; 195,82 et 63,39 mg/L et les concentrations en nitrites et ammonium ne dépassant pas 0,6 mg/L.

➤ En Octobre 2021, le puits S. Salam enregistre une nitrification totale avec une concentration faible en nitrates mesurée à 6,09 mg/L et des concentrations nulles en nitrites et

ammonium. Une nitrification est remarquée dans les puits et les forages Fetissan 3 ; O.A. Kader ; Pépinière ; F. Amzal 1 ; F. Amzal 2 ; Hakim ; M. Ahcen ; V. Ibezghiden ; Djamaa ; T. Hamza 2 ; Saidj et Mouzhaoui dont les concentrations en nitrates mesurées à 107,59 ; 49,48 ; 145,93 ; 57,47 ; 34,05 ; 119,72 ; 34,78 ; 20,97 ; 27,96 ; 31,57 ; 119,27 et 84,44 mg/L.

En revanche, quelques puits et forages démontrent plutôt un processus de dénitrification, le forage Cevital en Septembre 2019 montre des concentrations en nitrates, en nitrites et en ammonium respectivement de 1,83 ; 0,02 et 0,95 mg/L et en Mai 2021 de 0 ; 0,19 et 0,74 mg/L. Le forage Hocini présente des concentrations en nitrates de 0 mg/L pendant les trois campagnes d'Octobre 2020, Mai et Octobre 2021, et des concentrations respectivement de 0,12 ; 0,24 ; 0 mg/L en nitrites et de 0,43 ; 1,02 ; 0,92 mg/L en ammonium. Les cinq puits SIMAF, D. Massaoudi, T. Hamza 1, F. Amzal 2 et S. Salem montrent un bon exemple de processus de la dénitrification comme suit :

➤ Le puits SIMAF présente des concentrations nulles en nitrates en Octobre 2020, Mai et Octobre 2021 et des teneurs en nitrites et en ammonium respectivement de l'ordre de 0 ; 0,19 ; 0,004 mg/L et de 0,15 ; 0,14 ; 0,16 mg/L en Octobre 2020, Mai et Octobre 2021.

➤ Le puits D. Massaoudi montre en Mai et Octobre 2021 des teneurs nulles en nitrates, de 0,007 et 0,014 mg/L en nitrites et de 0,53 et 0,92 mg/L en ammonium.

➤ Le puits T. Hamza 1 en Octobre 2020 montre des concentrations en nitrates, nitrites et ammonium respectivement de 0 ; 0,07 ; 0,07 mg/L.

➤ Les deux puits F. Amzal 2 et S. Salem en Mai 2021 présentent respectivement des concentrations nulles en nitrates, des teneurs en nitrites de 0,03 ; 0,13 mg/L et en ammonium de 0,69 et 0,04 mg/L.

3. Evolution spatio-temporelle des nitrates dans l'aquifère de la basse Soummam

▪ En Mai 2021

La distribution spatiale des nitrates dans les eaux souterraines en hautes eaux (Mai 2021) illustrée dans la Figure 26 montre que l'aquifère de la basse vallée de Soummam représente des concentrations inférieures à la limite préconisée par la norme algérienne de 2011 et de l'OMS de 2017 dans certains endroits et supérieures dans d'autres endroits. Deux zones distinctes ont été identifiées :

✓ Une zone de faibles concentrations en nitrates couvrant une surface importante (65%). A Sidi Aich où la concentration de l'ordre de 20 mg/L, localisée dans l'extension du verrou géologique qui sépare la moyenne et la basse Soummam. Une autre étendue entre Fenaïa Ilmaten et Timezriet avec une moyenne de 30 mg/L et d'El Kseur à T. Hamza avec des concentrations comprises entre 0 et 40

mg/L ; il s'agit de la zone semi-captive où l'épaisseur de la couverture imperméable dépasse 20 m, cela engendre de faibles infiltrations et réduit considérablement la contamination de surface.

✓ Une zone où les concentrations sont plus élevées (60 et 220 mg/L) est observée dans les trois sous-zones suivantes :

- Dans la sous-zone localisée entre Sidi Aich et Fenaïa Ilmaten avec des concentrations comprises dans l'intervalle 60-220 mg/L, près de la commune de Sidi Aich. A Sidi Aich, la population est de 14350 habitants en 2010 et projetée à 17471 habitants en 2020 et le volume des eaux usées atteindra 125527,4 m³/an.

- Dans la sous-zone étendue entre Fenaïa Ilmaten et Amizour. Les concentrations en nitrates oscillent entre 60 et 150 mg/L ; il s'agit de la zone la plus cultivée ayant utilisé plus d'engrais dans la vallée. Ils sont de l'ordre de 5717 quintaux localisés principalement dans les domaines des frères Mekhlouf et les domaines des frères Massaoudi, domaines Laifa Youcef, domaines Roufa Massaoudi et les domaines Beghiche qui se localisent entre Fenaïa Ilmaten et O. Ghir.

- A Béjaïa avec une moyenne d'environ 140 mg/L, près des grandes municipalités urbaines dont la population est de 183733 habitants en 2010 et projetée à 2882036 habitants en 2020. Par conséquent, les flux d'eau usées urbaines et industrielles sont évacués en partie dans la rivière (Agence de bassin Algérios-Hodna-Soummam, 2001).

- En Octobre 2021

La répartition spatiale des nitrates en basses eaux (Octobre 2021) illustré dans la Figure 27 montre que les teneurs en nitrates maintiennent la même distribution et tendance de Mai 2021 dominée par des faibles concentrations dans la plus grande superficie et plus fortes dans le reste de la nappe, comme suit :

- A Sidi Aich dont les concentrations sont inférieures à 40 mg/L où se situe le verrou géologique qui sépare la moyenne et la basse Soummam.
- Dans la zone étendue d'El Kseur jusqu'à Tala Hamza dont les concentrations sont comprises entre 0 et 40 mg/L ; où les infiltrations sont faibles du fait de la présence de la couverture imperméable.

La deuxième zone qui présente de fortes teneurs en nitrates se localise :

- Dans la zone étendue entre Timezriet et Amizour avec des concentrations qui oscillent entre 40 et 150 mg/L. Il s'agit de la zone la plus cultivée ayant utilisé plus d'engrais dans la vallée de l'ordre de 5717 quintaux.
- Et à Béjaïa avec une moyenne de l'ordre de 90 mg/L, près des grandes municipalités urbaines dont les eaux usées sont évaluées à 2797263,4 m³/an.

Les concentrations des nitrates ont baissé dans la majorité des puits, tel qu'au puits Fetissan 3, la concentration passe de 912,6 mg/L en Mai 2021 à 107,59 mg/L en Octobre 2021. Au puits F. Amzal 1, elle passe de 96,59 mg/L en Mai 2021 à 57,47 mg/L en Octobre 2021, elle est mesurée à 82,37 mg/L en Mai 2021 et à 0,9 mg/L en Octobre 2021 au niveau de puits Tala Hamza 4. Au puits Mendi, la concentration est mesurée en Mai 2021 à 14,67 mg/L et en Octobre 2021 à 1,75 mg/L.

Cependant, les concentrations des nitrates ont augmenté dans d'autres puits tels que le puits O.A. Kader où la concentration est de 0 mg/L en Mai 2021, elle passe à 49,48 mg/L en Octobre 2021. De même dans le puits Sidi Salem, la concentration s'augmente de 0 mg/L en Mai 2021 à 6,09 mg/L en Octobre 2021 et elle passe de 1,07 mg/L en Mai 2021 à 31,57 mg/L en Octobre 2021 au niveau de puits T. Hamza 2.

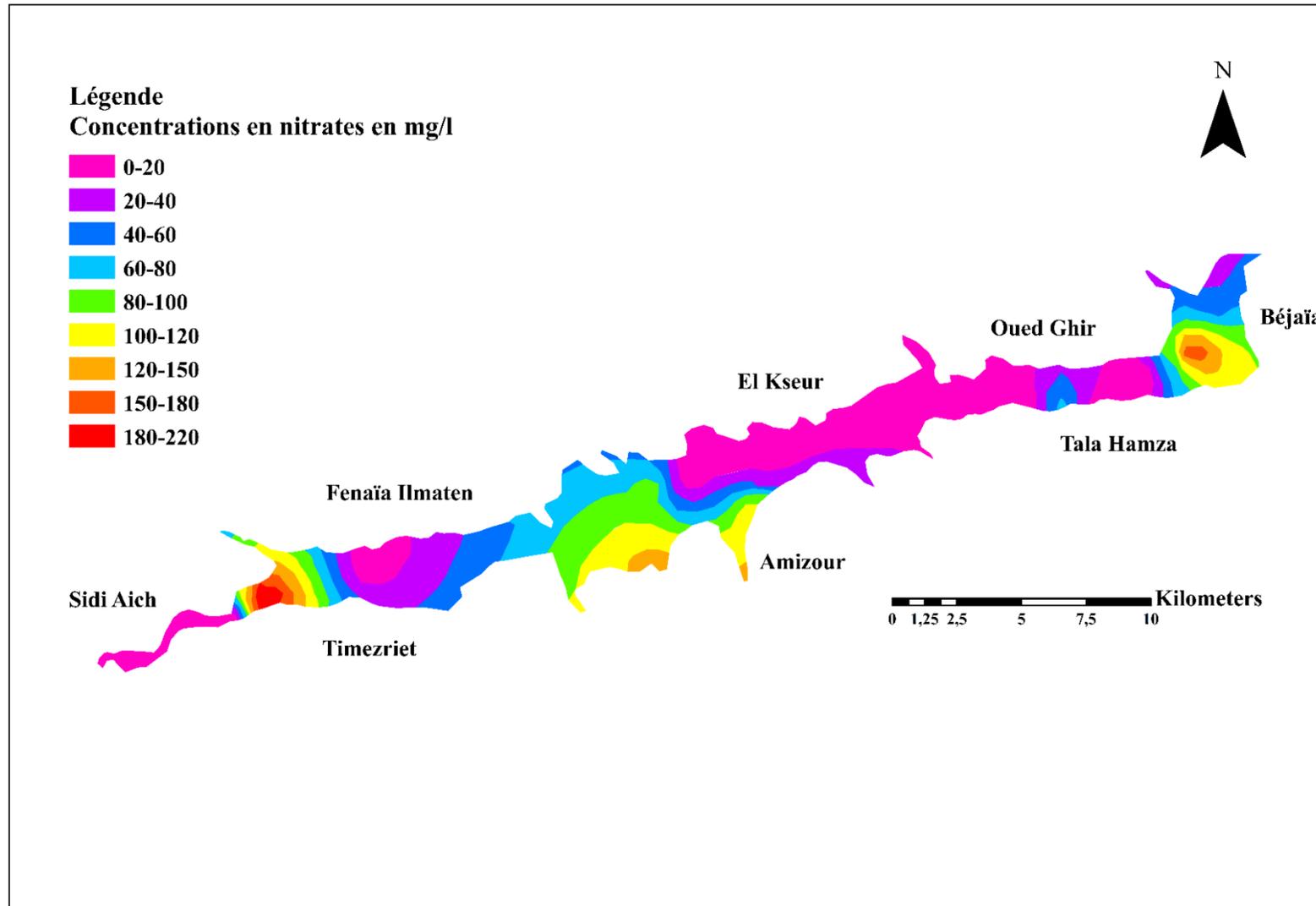


Fig.26. Répartition spatiale des nitrates en mai 2021 dans la vallée de la basse Soummam

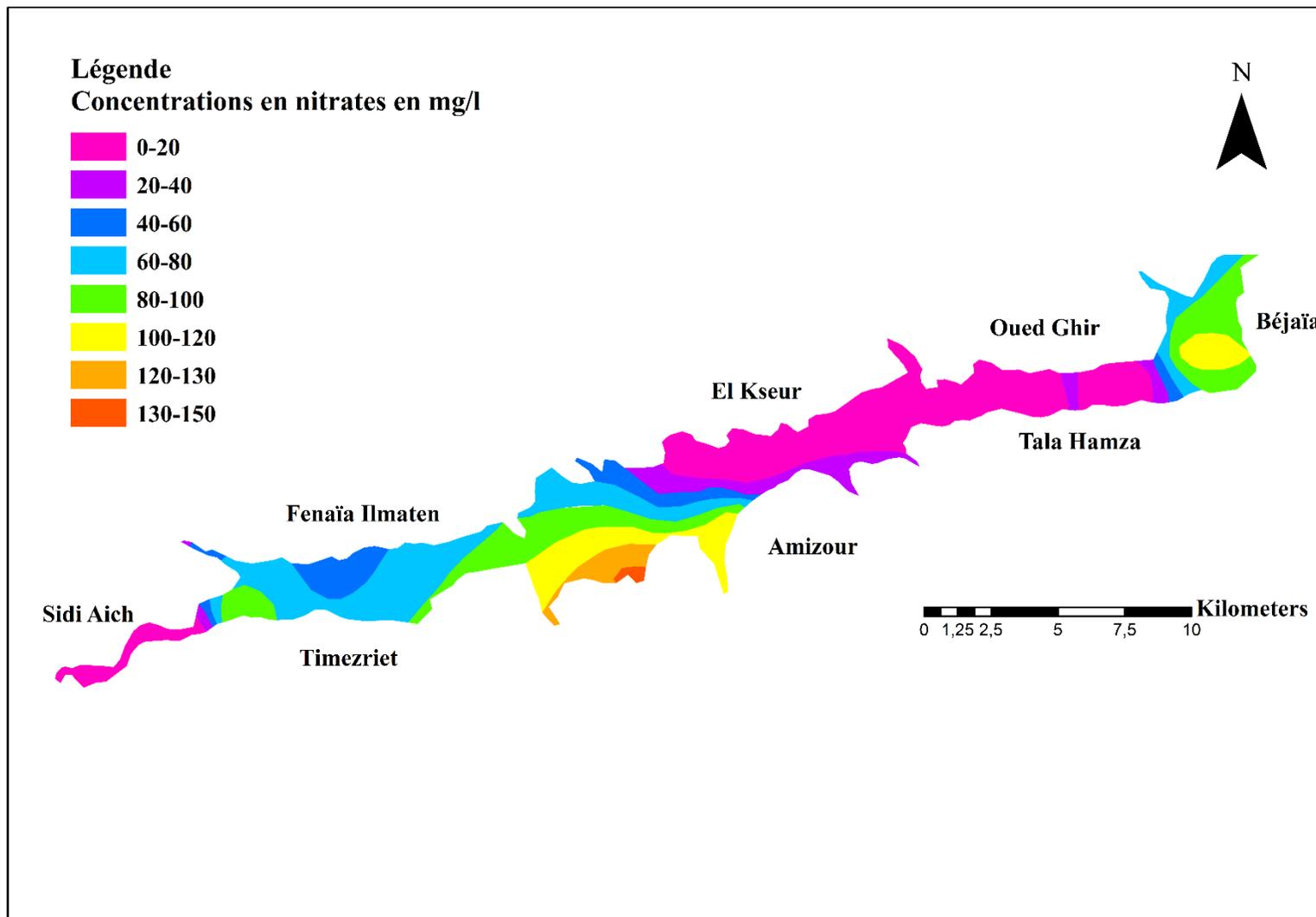


Fig.27. Répartition spatiale des concentrations en nitrates en octobre 2021 dans la vallée de la basse Soummam

IV. Conclusion

L'étude hydrogéologique montre que l'aquifère est alimenté par les massifs entourant la vallée tels que les massifs de Djurdjura et les Babor. L'allure générale des cartes piézométriques montre que l'axe d'écoulement principal est orienté du SW au NE parallèle à l'écoulement de l'oued Soummam. Le niveau piézométrique conserve les mêmes tendances en hautes et basses eaux. Les eaux de la basse Soummam sont sujettes à une contamination relativement importante suite à une forte pression anthropique sur l'écosystème. Une grande variation dans les paramètres physiques et composés analysés a été remarquée entre les hautes eaux et les basses eaux. Cependant, la température des eaux de la vallée de la basse Soummam suit le cycle saisonnier. Le pH est influencé essentiellement par les ions bicarbonates qui offre l'aspect basique aux eaux. La CE est très élevée comparée aux normes Algériennes et OMS, elle indique une forte minéralisation des eaux. Les sources de ces fortes teneurs sont expliquées par les formations géologiques triasiques, les formations carbonatées qui entourent la vallée et le volume d'eaux usées que produit les villes jalonnant le cours de l'oued, certaines ne sont pas équipés de STEP. Les teneurs en OD présentent des fluctuations irrégulières en hautes et basses eaux. Les concentrations en sels nutritifs sont dues à des activités anthropiques telles que l'utilisation d'engrais, les rejets de polluants organiques et les rejets domestiques.

Les nitrates sont très variables d'un point à un autre et d'une saison à une autre. Elles dépassent la norme dans plusieurs puits et forages localisés dans les grandes villes populaires et les grandes surfaces agricoles. Les nitrites, l'ammonium et les Phosphates présentent des faibles concentrations.

La détérioration de la qualité de l'eau dans la basse vallée de Soummam résulte de l'absence des stations d'épuration, de la multiplication des décharges publiques et de l'utilisation incontrôlée des engrais dans les terres agricoles. L'attractivité économique de la vallée est un élément amplificateur du problème de pollution.

Troisième partie

Mise à jour du modèle des écoulements de la vallée de la basse Soummam

I. Introduction

La modélisation hydrodynamique des aquifères est d'un apport précieux quant au suivi de l'évolution de leurs niveaux piézométriques. Elle est un support de gestion des ressources en eaux capable de simuler le niveau d'eau souterraine à long terme. Le calage du modèle peut être effectué à l'aide de deux méthodes l'une est un calage manuel qui est nommé essais et erreurs (trial-and-error) et l'autre par simulation-optimisation automatique. Dans les deux approches, la validation du modèle doit être évaluée subjectivement au moyen d'une évaluation graphique des résultats et/ou mesuré objectivement au moyen de mesures statistiques du modèle (Boyle et al. 2000 ; Eckhardta et Arnoldb, 2001). La comparaison graphique des résultats mesurés et simulés est l'une des méthodes d'évaluation des modèles hydrogéologiques les plus fondamentales (Legates et McCabe, 1999 ; Krause et al. 2005 ; Moriasi et al. 2007).

Plusieurs modèles numériques ont été implémentés dans l'aquifère de la vallée de la Soummam. Lerolles qui a tenté pour la première fois en 1975 de simuler l'écoulement des eaux souterraines d'une portion d'aquifère à Oued Ghir. Kessasra a établi en 2006 un modèle hydrogéologique en régimes permanent et transitoire comprenant trois scénarios de pompage (Kessasra, 2006). L'objectif est de contrôler les niveaux d'eau, de prévoir le comportement de l'aquifère et d'évaluer les échanges rivière-aquifère en fonction de la hausse des volumes d'eau pompés. En 2015, ce modèle a été mis à jour avec de nouvelles données de terrain, calé et simulé en régime permanent et ensuite à l'aide de trois autres scénarios d'exploitation, des prévisions ont été générées. L'étude conclut que les apports d'eau provenant principalement de l'infiltration directe des eaux météoriques représentent 84 % dans le la vallée de la basse Soummam (Kessasra, 2015). Enfin, en 2021, les écoulements d'eaux souterraines associés au transport des chlorures ont été simulés montrant que les apports d'eau à partir des limites latérales représentent jusqu'à 54,4 % (Kessasra et al.2021).

Dans le cadre d'une gestion fiable des ressources en eau et d'une mise en place d'une stratégie efficace face à la crise actuelle de l'eau en Algérie, cette partie vise à mieux comprendre le comportement et le fonctionnement de l'aquifère de la vallée de la basse Soummam en utilisant la simulation numérique. Elle est basée sur la modélisation hydrogéologique couplée à la modélisation du transport des nitrates. L'objectif est d'évaluer la disponibilité de la ressource en eaux souterraines jusqu'à l'horizon 2050 en utilisant la modélisation hydrogéologique basée sur les niveaux piézométriques simulés de 2011 à 2021. Tout d'abord, la mise à jour du modèle hydrodynamique de Kessasra, 2015 s'impose par un calage sous les conditions d'un écoulement permanent du modèle hydrodynamique durant la période des hautes eaux en Mai 2021. Puis, une simulation en régime transitoire à travers trois scénarios réalisés sur la base des projections du plan national de l'eau

(PNE, 2010). En effet, les volumes d'eau pompée sont estimés à 45,8 Mm³/an en 2020, passant à 49,19 Mm³/an en 2030, et enfin, le troisième scénario qui inclut un volume fictif d'eau pompée d'environ 98,38 Mm³/an en 2050. Le but est de suivre l'évolution des niveaux piézométriques jusqu'à 2050 dans 25 puits suivis et mesurés sur terrain.

II. Matériels et méthodes

Le modèle d'écoulement des eaux souterraines de l'aquifère alluvial de la basse vallée de Soummam a été mis en œuvre en utilisant le Processing Modflow pour Windows 8 (PMWIN8) conçu par Wen-Hsing Chiang et Wolfgang Kinzelbach. En utilisant des données géologiques, géophysiques, hydrogéologiques, climatologiques et hydrogéochimiques durant le processus de paramétrisation numérique, le modèle conceptuel admis consiste en un système monocouche, un aquifère alluvial libre sur un substratum imperméable constitué par des marnes argileuses.

1) Conception du modèle hydrogéologique de la vallée de la basse Soummam

1. Paramètres géométriques de la nappe

1) La discrétisation du modèle de la vallée de la basse Soummam :

La zone modélisée (Fig.28) a été discrétisée en utilisant deux formes de mailles : des mailles rectangulaires (200*100 m) et des mailles carrées (100*100 m). Leur répartition tient compte des gradients hydrauliques. Lorsque le gradient hydraulique de la région est élevé, les mailles sont de facto affinées. A cet égard, les grandes mailles sont affinées en des mailles carrées de plus petite taille (100*100 m) au niveau des trois régions, à savoir : Fenaïa Ilmaten, Amizour et d'El Kseur. Cette configuration géométrique permet au modèle de mieux restituer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, en particulier dans les régions où l'hétérogénéité du milieu souterrain prévaut.

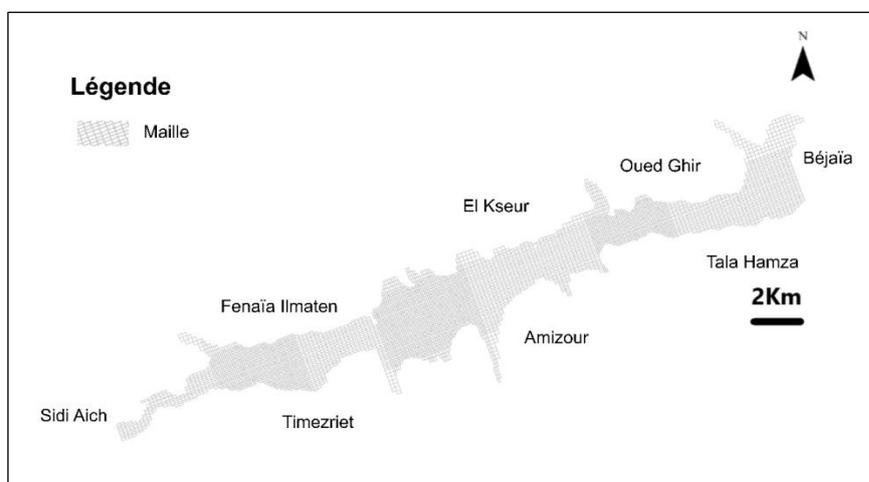


Fig.28. Discrétisation de la nappe de la vallée de la basse Soummam

2) L'épaisseur de l'aquifère :

L'élévation du toit des alluvions de la vallée de la basse Soummam (Top) est comprise entre 60 m amsl (Above Mean Sea Level, au-dessus du niveau moyen de la mer) au Sud-Ouest près de Sidi Aich et -5 m amsl au Nord-Est près de Béjaïa. L'élévation du mur des alluvions ou du substratum imperméable (Bottom) est comprise entre 35 m amsl au Sud-Ouest et -10 m amsl au Nord-Est (Fig.29). De ce fait, l'épaisseur de l'aquifère est calculée automatiquement par PMWIN. Elle est à 20 m à Sidi Aich et entre 15 et 30 m à Fenaïa Ilmaten, elle atteint 60 m dans la zone étendue entre Amizour et El Kseur qui est considérée comme la partie aquifère la plus productive. Cependant, elle ne dépasse pas 10 m à Béjaïa.

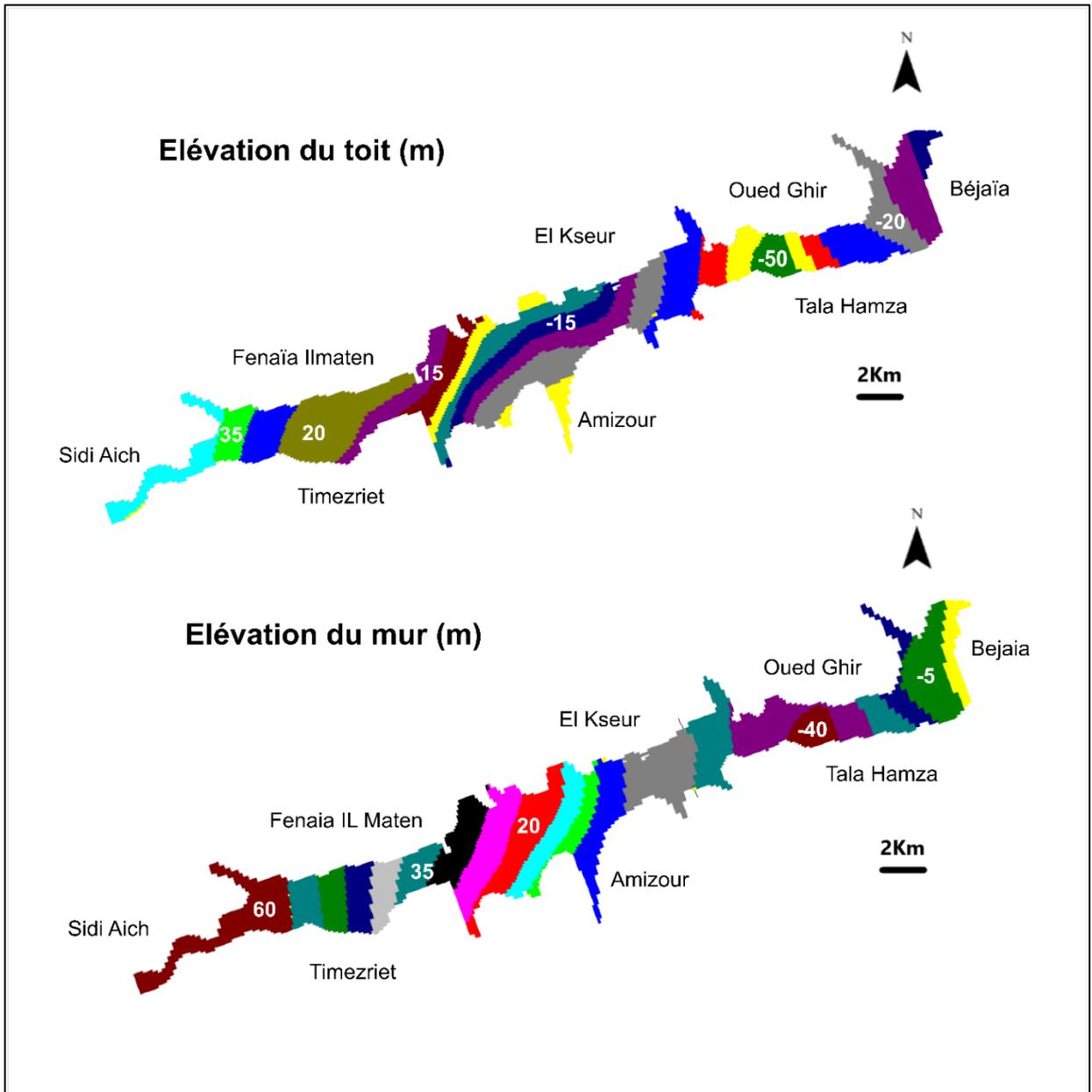


Fig.29. Répartition des altitudes du toit (Top of layer) et du mur (Bottom of layer) de la couche aquifère de la vallée de la basse Soummam

3) Les conditions aux limites :

Les conditions aux limites de l'aquifère modélisé (Fig.30 et Tableau.22) ont été identifiées comme suit :

- Une limite à flux nul est appliquée au substratum imperméable.
- Une limite à flux imposé est attribuée à la fois à :
 - La limite amont de l'aquifère à Sidi Aich, considérée comme une entrée du système aquifère modélisé.
 - Le long du littoral méditerranéen à Béjaïa considéré comme une sortie du système aquifère.
 - Les limites latérales perméables de l'aquifère en l'occurrence les versants nord (Aghbalou et Gouraya) et sud (Biban et Babors). Elle est introduite à l'aide de "General Head Boundary". En effet, le premier axe a été localisé entre Remila et Fenaïa Ilmaten sur la rive gauche, il est caractérisé par une conductance estimée à 0,05 m²/s et un niveau piézométrique estimé entre 50 et 70 m avec un débit d'eau en Mars 2011 estimé à 0,56 m³/s. Le deuxième est situé entre El Kseur et Oued Ghir sur la rive gauche, la conductance de l'axe varie entre 0,00005 et 0,05 m²/s, le niveau piézométrique entre 12 et 40,5 m et le débit d'eau calculé à 0,137 m³/s. le troisième axe est à Timezrit sur la rive droite, il est caractérisé par une conductance estimée à 0,05 m²/s, un niveau piézométrique compris entre 55 et 70 m et un débit estimé à 0,56 m³/s. Le quatrième axe est situé entre Aguellal et Amizour sur la rive droite, il est caractérisé par une conductance variante entre 0,0022 et 0,09 m²/s et un niveau piézométrique entre 21 et 45 m avec un débit de 0,1 m³/s. Le dernier axe est localisé entre Tala Hamza et le littoral sur la rive droite de la vallée, la conductance est fixée à 0,00005 m²/s, et un niveau piézométrique compris entre 21 et 22 m et un débit de 0,0003 m³/s.
 - L'infiltration directe des eaux météoriques.

Tableau 22. Paramètres des conditions aux limites appliquées au modèle de la vallée de la basse Soummam, en Mars 2011. *C* : Conductance hydraulique des formations (m²/s), *H* : niveau piézométrique (m), *Q* : débit d'eau entrant (m³/s)

N°	Conditions aux limites	C (m ² /s)	H (m)	Q (m ³ /s)
1	Remila-II Maten	0,05	50–70	0,56
2	El Kseur-Oued Ghir	0,00005–0,05	12–40.5	0,137
3	Timezrit	0,05	55–70	0,56
4	Aguellal-Amizour	0,0022–0,09	21–45	0,1
5	Tala Hamza-Littoral	0,00005	21–22	0,0003

- Une limite à potentiel imposé a été appliquée pour caractériser les échanges rivière-aquifère. Ces échanges ont été simulés à l'aide de "MODFLOW River" qui permet de quantifier les

échanges entre l'oued Soummam et son aquifère alluvial. La conductance de lit d'oued Soummam est très variable, elle reflète l'hétérogénéité des dépôts fluviaux. Elle est mesurée entre 0,6 et 21,6 m²/s, on constate qu'il y a une relation proportionnelle entre la conductance du lit et l'échange nappe-oued.

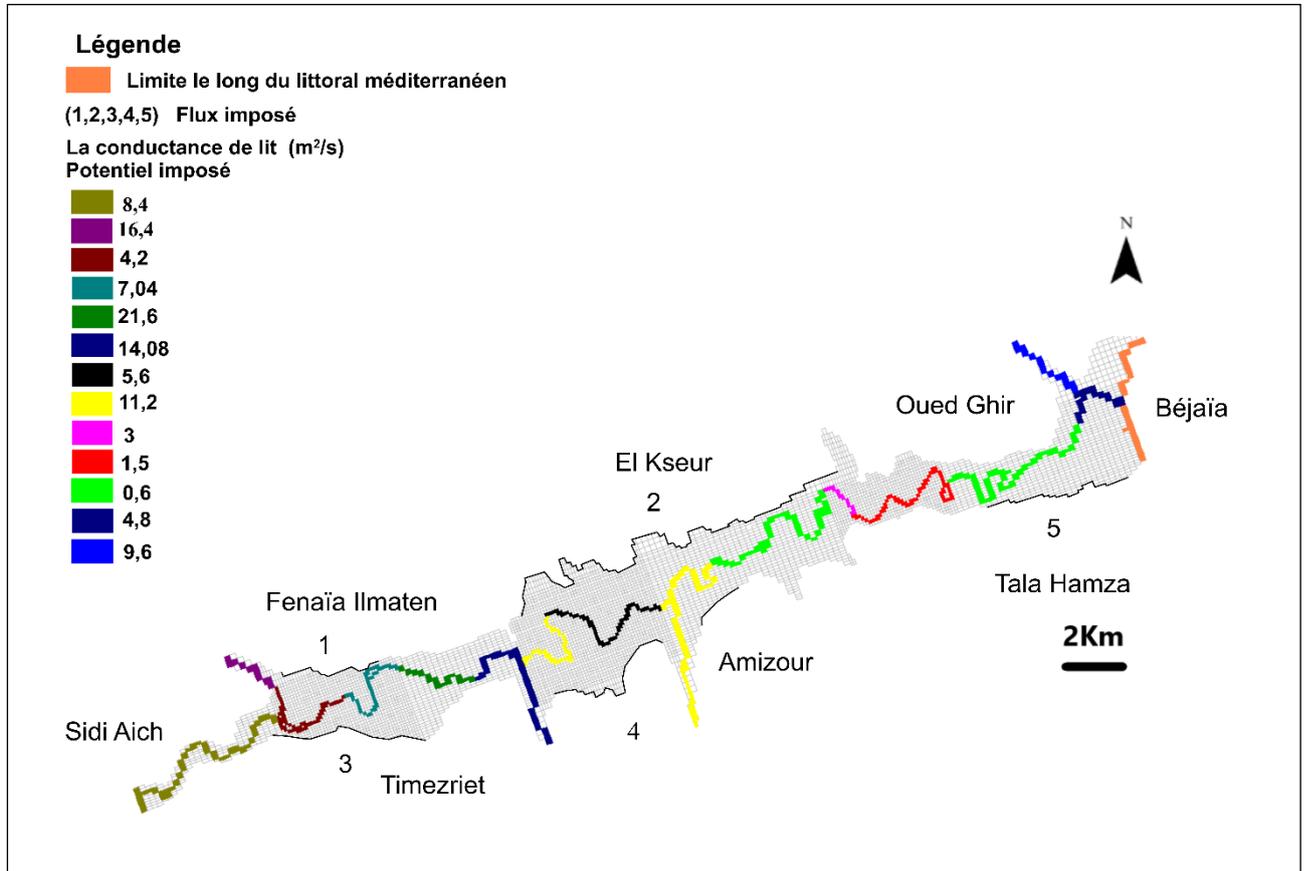


Fig.30. Les conditions aux limites et la conductance de la rivière appliquées au modèle de la vallée de la basse Soummam

4) Recharge de la nappe :

La recharge a été attribuée à l'aquifère comme une infiltration directe sur deux zones distinctes, à savoir, la première zone étendue entre Sidi Aich et El Kseur où la recharge a été calculée à $1,5 \cdot 10^{-9}$ m/s, et la seconde étendue d'El Kseur à Béjaïa avec $1,77 \cdot 10^{-9}$ m/s (Fig. 31) où les précipitations sont les plus abondantes. Il faut noter que la recharge a été estimée en utilisant le bilan hydrique de Thornthwaite dans la période 1996-2019.

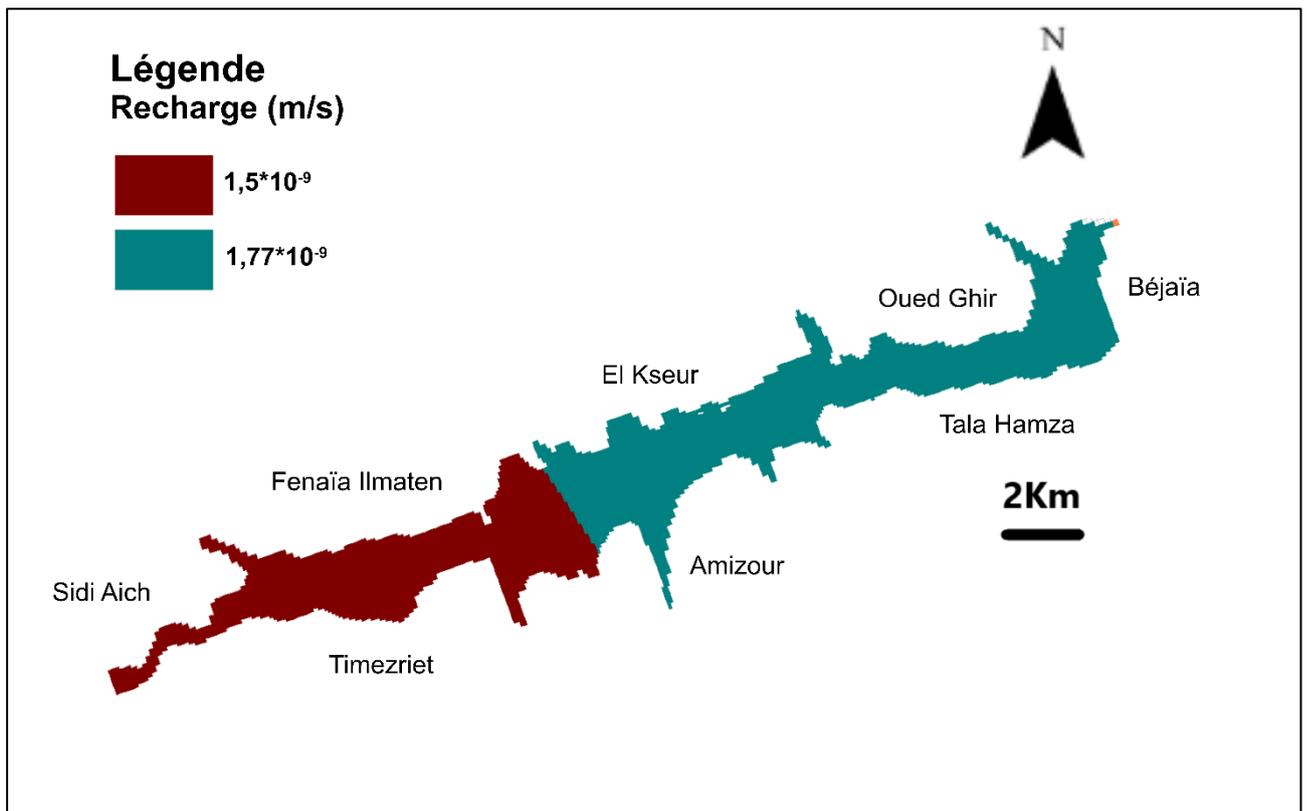


Fig.31. Répartition de la recharge de l'aquifère de la vallée de la basse Soummam

5) Paramètres hydrodynamiques :

a) Niveaux piézométriques mesurés

La carte piézométrique établie par Kessasra en Mars 2011 (Fig.32), montre que le sens d'écoulement se fait vers le centre de la nappe, et l'axe d'écoulement principal prend la direction SW-NE parallèle à l'écoulement de l'oued Soummam. Les niveaux piézométriques sont décroissants du SW au NE passant de 65 m en amont à Sidi Aich et descendant jusqu'à 5 m en aval à Béjaïa près de la mer. Les courbes de niveaux sont de plus en plus serrées près des rives qu'au centre de la plaine. Cette carte a été introduite dans MODFLOW à l'aide de "Initial & Prescribed Hydraulic Heads".

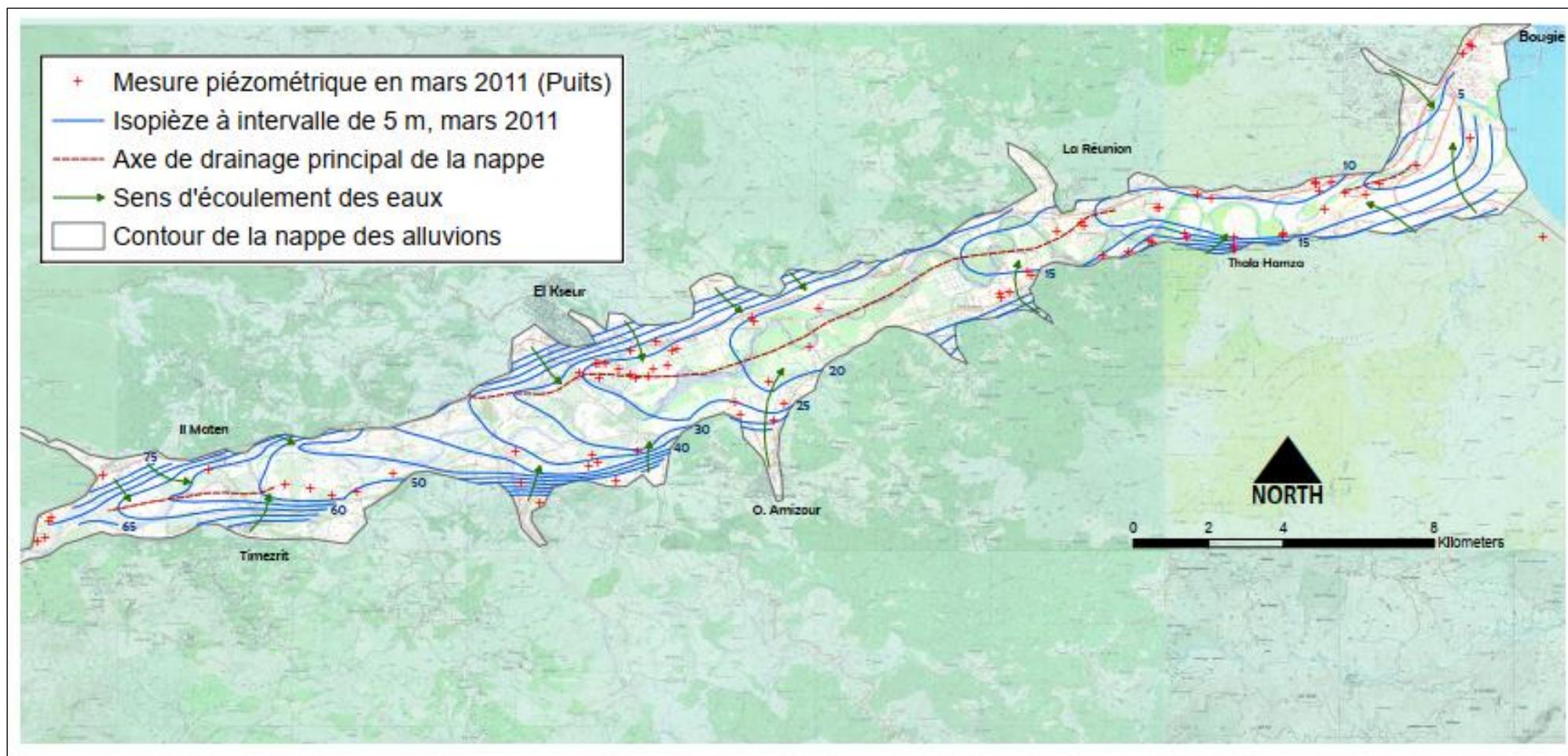


Fig.32. Carte piézométrique de la vallée de la basse Soummam réalisée à partir des mesures de la campagne de terrain des hautes eaux : Mars 2011 (1/25 000) (Kessasra, 2015)

b) Perméabilités initiales

La perméabilité, la porosité efficace et le ‘‘specific yield’’, paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle hydrodynamique ont été introduits. Il faut souligner que la vallée de la basse Soummam présente une forte hétérogénéité dans ses facies géologiques. En effet le verrou hydraulique à l'amont de la vallée à Sidi Aich est composé de marnes et d'argiles très peu perméables et une couverture limoneuse puissante qui recouvre l'aquifère des alluvions au Sud d'Oued Ghir vers l'aval de la plaine. Dans cette région, les alluvions sous recouvrement imperméable se voient assigner de très faibles valeurs de perméabilité (Kessasra, 2015). Partout ailleurs, les formations mio-plio-quadernaires présentent de bonnes perméabilités. La carte de distribution des perméabilités de l'aquifère des alluvions a été établie sur la base de 16 valeurs ponctuelles, elle est composée de cinq champs des perméabilités initiales. L'interpolation a été accomplie sur Surfer puis la carte transférée vers MODFLOW.

Dû au recouvrement de limons rendant l'aquifère semi-confiné dans la partie nord-est allant d'Oued Ghir à Béjaïa passant par Tala Hamza, une faible valeur de perméabilité de $5 \cdot 10^{-5}$ m/s (Fig.32) a été assignée. Une perméabilité modérée dont la moyenne est de l'ordre de $1,7 \cdot 10^{-4}$ m/s a été attribuée à Ibourassen près d'Amizour. Cependant, la perméabilité devient de plus en plus élevée entre El Kseur et à Amizour et la partie entre Sidi Aich et Fenaïa Ilmaten qui présente une forte perméabilité, en moyenne, estimée à $9 \cdot 10^{-2}$ m/s et $5 \cdot 10^{-2}$ m/s. Enfin, la région d'Aguellal montre une perméabilité moyenne de l'ordre de $7 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Quant à la porosité effective utilisée dans le modèle, elle a été fixée à 0,25. Le ‘‘specific yield’’ a été estimé à 0,26 dans la zone étendue entre Sidi Aich et O. Ghir et 0,1 entre O. Ghir et Béjaïa.

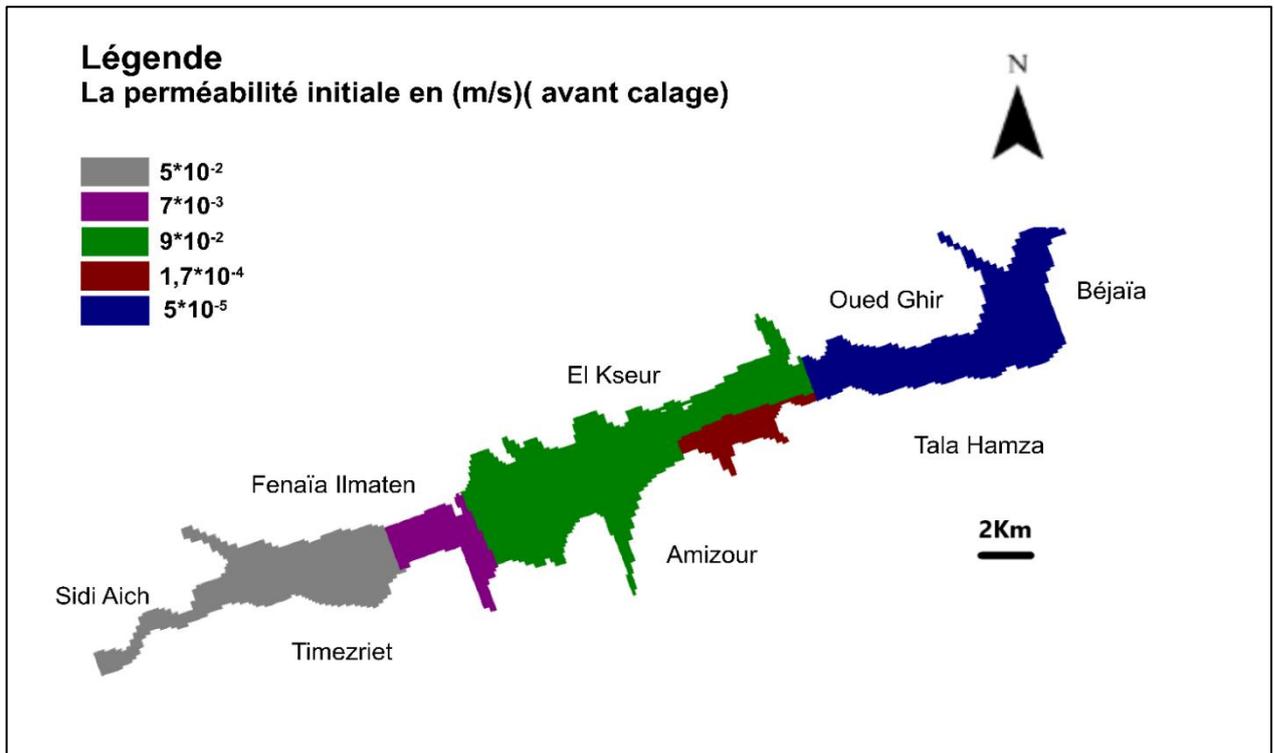


Fig. 33. Répartition de la perméabilité initiale (avant calage) de l’aquifère de la vallée de la basse Soummam

2) Calage et validation du modèle hydrodynamique en régime permanent

La carte piézométrique établie en Mars 2011 (Kessasra, 2015) est considérée comme une piézométrie de référence utilisée dans le processus de calage en régime permanent. Le calage est réalisé entre les niveaux piézométriques mesurés et les niveaux piézométriques calculés à l’aide de la méthode d’essai et erreur. Il s’agit de modifier séparément les valeurs initiales des niveaux piézométriques et de la perméabilité afin de réduire numériquement la différence entre les niveaux piézométriques observés et ceux calculés.

Il faut savoir qu’une première simulation a été achevée entre 2011 et 2021 sur 3650 jours en régime transitoire (Tableau.23). Puis une étape de recalage a été effectuée en 2021 sur 31 jours. Elle se base sur le calage des niveaux piézométriques restitués par le modèle en 2021 sur ceux qui ont été mesurés et actualisés pendant la campagne piézométrique que nous avons réalisée en Mai 2021. L’objectif de ce recalage est d’améliorer la première période de simulation entre 2011 et 2021 et d’ajuster les niveaux simulés aux niveaux mesurés pour les prochains scénarios. En effet, la phase de contrôle a été réalisée sur vingt-cinq puits mesurés et suivis sur terrain en 2021.

Cependant, le processus de validation est basé sur deux méthodes, la méthode cartographique qui consiste à générer la carte piézométrique montrant les niveaux piézométriques mesurés que

superposent les niveaux calculés. On prend en considération l’allure des isopièzes afin d’améliorer leur superposition et la méthode statistique basée sur le diagramme de dispersion et le coefficient de corrélation générés après chaque étape de calage.

Tableau 23. Période de stress utilisée dans le modèle de la basse vallée de Soummam pour la période simulée 2020-2050

Période de stress	Date	Période (jour)	Condition aux limites
1	Mars 2011	31	Régime permanent
2	2011-2021	3650	Régime transitoire
3	Mai 2021	31	Régime permanent (Recalage)
4	2011-2021	3650	Régime transitoire après recalage
5	2021-2030	3285	Régime transitoire
6	2030-2050	3650	Régime transitoire

3) Simulations hydrogéologiques en régime transitoire

Les simulations prévisionnistes ont été établies sur la base de deux principaux facteurs : le temps de simulation et les volumes de pompage des eaux souterraines. Le temps de simulation est variable d’un scénario à un autre, il est exprimé en seconde sur MODFLOW. Dans le premier et troisième scénario, nous avons simulé sur une période de 3650 jours et dans le deuxième scénario sur une période de 3 285 jours.

Le volume des pompages d'eau a été calculé pour chaque scénario en fonction des projections établies par le Plan national de l’eau (PNE, 2010). Des simulations ont été effectuées selon trois scénarios et des volumes d’eaux pompées divisé en cinq catégories résumées dans le tableau 24, comme suit :

- Scénario 1 : (2011-2021) il a été simulé afin d’évaluer la variation des niveaux piézométriques jusqu’à 2021. Le volume prélevé a été estimé à 45,8 Mm³/an, il s’agit des besoins en eau potable évalués à 29,31 Million m³/an, soit 63,99 % du volume total, de l’irrigation à 13,43 Mm³/an soit 29,32 % du volume total et des besoins en eau industrielle à 3,06 Million m³/an soit 6,68 % du volume total. Le plan d'exploitation et de gestion de la nappe établi se décline en 400 forages pompés et simulés dans ce scénario où chaque forage extrait 200 m³/jour de l’aquifère. Complété par 200 forages pompés avec un volume de 100 m³/jour, 50 forages avec 50 m³/jour, 100 forages avec 25 m³/jour et enfin 50 forages implantés pour pomper 15 m³/jour (Fig.34). La répartition de ces forages est minutieusement étudiée afin d’épargner à la nappe de forts rabattements ponctuels ou des dénoyages régionaux symptomatiques.

- Scénario 2 : (2021-2030) il a été simulé afin d'évaluer la variation des niveaux piézométriques à l'horizon 2030 ; le volume prélevé a été estimé à 49,19 Million m³/an, il s'agit de 34,49 Million m³/an attribué à l'approvisionnement en eau potable soit 70,11 % du volume total, 10,71 Million m³/an pour l'irrigation soit 21,77 % du volume total et 3,99 Mm³/an pour l'approvisionnement en eau industrielle soit 8,11 % du volume total. Dans ce scénario, 500 forages pompés ont été simulés où chaque forage extrait 200 m³/jour de l'aquifère. Complété par 250 forages pompés avec un volume de 100 m³/jour, 50 forages avec 50 m³/jour, 100 forages avec 25 m³/jour et enfin 50 forages implantés pour pomper 15 m³/jour (Fig.34).

- Scénario 3 : (2030-2050) en raison d'un manque de données sur l'eau dans la vallée, nous avons décidé de multiplier par deux le volume d'eau pompé et simulé en 2030, il serait donc établi à 98,38 Million m³/an en 2050. 1000 forages pompés ont été simulés dans ce scénario où chaque forage extrait 200 m³/jour de l'aquifère. Complété par 500 forages pompés d'un volume de 200 m³/jour, 100 forages de 50 m³/jour, 200 forages de 25 m³/jour et enfin 100 forages implantés pour pomper 15 m³/jour (Fig.34).

Tableau 24. Temps de simulation et débit de pompage dans les forages

Période simulé	Total (Mm ³ /an)	Le volume pompé (Mm ³ /an)	Le volume pompé (m ³ /jour)					
			200	100	50	25	15	Total
2011-2021	45,8	Eau potable : 29,31	400	200	50	100	50	800
		Irrigation : 13,43						
		Eau destinée à l'industrie : 3,06						
2021-2030	49,19	Eau potable : 34,49	500	250	50	100	50	950
		Irrigation : 10,71						
		Eau destinée à l'industrie : 3,99						
2030-2050	98,38	Eau potable : 68,98	1000	500	100	200	100	1900
		Irrigation : 21,42						
		Eau destinée à l'industrie : 7,98						

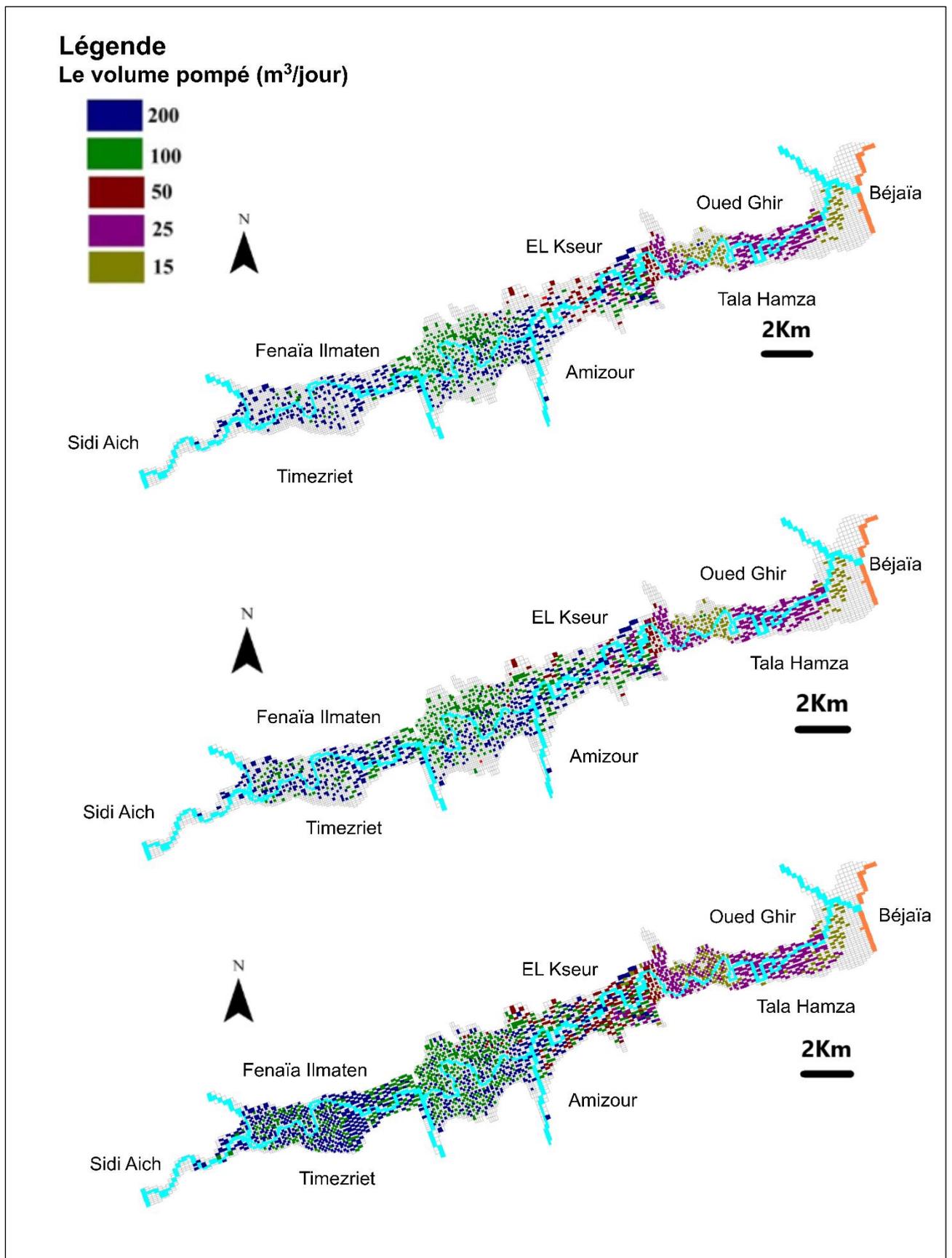


Fig.34. Le volume pompé des eaux souterraines dans les trois scénarios (S1 :2011-2021)

(S2 : 2021-2030) (S3 :2030-2050)

III. Résultats et discussion

1) Résultats du calage du modèle

Sur la base de vingt-cinq puits mesurés en Mai 2021, la performance du modèle calibré est validée lorsque la différence entre les niveaux piézométriques calculés et mesurés s'est sensiblement réduite. En effet, les niveaux piézométriques initiaux et les perméabilités ont été progressivement modifiés afin d'aboutir à un modèle optimal en régime permanent. Il a été noté qu'un recalage des paramètres hydrodynamiques a été effectué. Il est basé sur la comparaison entre les niveaux piézométriques simulés de 2011 à 2021 en période des hautes eaux et les niveaux piézométriques mesurés en Mai 2021. (Tableau.25).

Ce recalage ou réajustement a été nécessaire pour la mise à jour du modèle en 2021. Tous les puits simulés ont été suffisamment calés, à l'exception de quatre puits qui ont montré une hausse de leurs niveaux piézométriques calculés à savoir SIMAF avec un écart de 8,91 m et Mouzhaoui avec 8,62 m de hausse. Ces deux puits ont montré une différence significative qui n'a quasiment pas changé au cours du processus de calage. Cela est probablement dû à l'effet de la bande côtière. Une diminution à T. Hamza 1 de 6,5 m et une augmentation à T. Hamza 2 de l'ordre de 13,9 m. Elles sont dues à l'effet des frontières. Ces quatre puits sont localisés dans la zone caractérisée par un manque de données hydrodynamiques et une faible perméabilité de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5}$ m/s et, par conséquent, une sorte d'instabilité numérique est générée.

Pour se faire, les niveaux piézométriques initiaux injectés dans MODFLOW ont été augmentés de 1 à 5 m sur la zone étendue entre Sidi Aich et Fenaïa Ilmaten. Cependant, ils ont été diminués d'environ 7 m dans la zone étendue entre Amizour et El Kseur et de 3 m à Oued Ghir.

En outre, les valeurs des perméabilités ont été sensiblement réduites dans toute la zone d'étude, à l'exception d'Amizour où elles sont restées constantes. Cette région comprend trois puits avec une assez faible différence (moins de 1 m) entre les niveaux piézométriques calculés et ceux mesurés. Une hétérogénéité élevée pourrait être à l'origine d'une sous-estimation de la perméabilité (Kessasra et al. 2017) ; par conséquent, chaque zone a subi un ajustement progressif et minutieux de sa valeur initiale (Fig.35) comme suit :

- Zone étendue entre Sidi Aich et Aguellal comprenant 5 puits mesurés sur 25 puits, la perméabilité a été graduellement réduite de $5 \cdot 10^{-2}$ à $1,09 \cdot 10^{-2}$ m/s.
- Zone située entre Aguellal et Amizour, la perméabilité a été réduite de $7 \cdot 10^{-3}$ à $6,2 \cdot 10^{-3}$ m/s.
- Zone El Kseur comprenant 6 puits, La perméabilité a été réduite de $9 \cdot 10^{-2}$ à $8 \cdot 10^{-2}$ m/s.
- Zone d'Ibourassen située l'aval de la vallée et comprenant deux puits, la perméabilité a été réduite de $1,7 \cdot 10^{-4}$ à $1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

- Enfin, dans la zone entre O. Ghir et Béjaïa qui comprend 9 puits, la perméabilité est passée de $5 \cdot 10^{-5}$ à $9,9 \cdot 10^{-5}$ m/s.

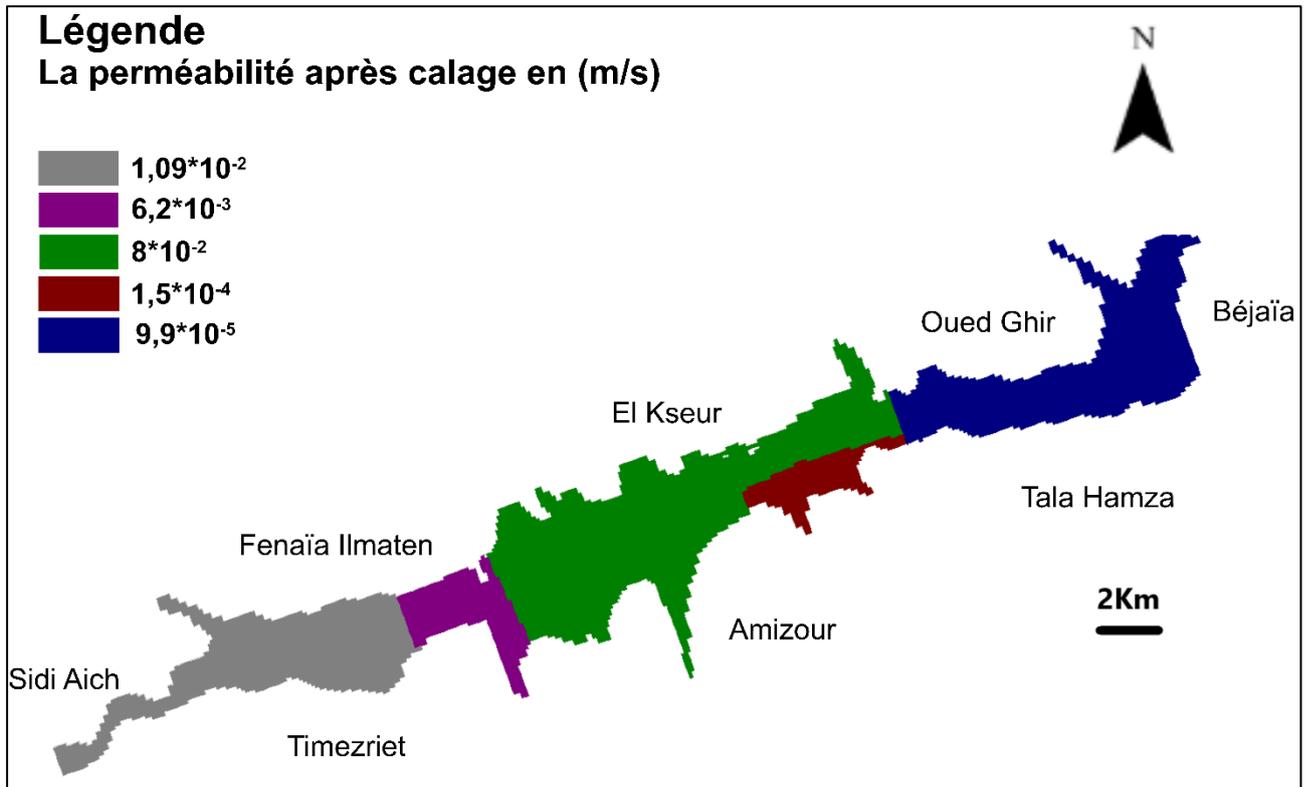


Fig.35. Répartition des champs de perméabilité ajustés après calage du modèle de l’aquifère de la vallée de la basse Soummam

Le tableau 25 et la Figure 36 montrent que les niveaux piézométriques simulés en 2021 (Kessasra, 2015) sont globalement conformes aux niveaux piézométriques mesurés en Mai 2021.

Les résultats indiquent que le calage du modèle présente une bonne corrélation et est désormais plus fiable pour la phase de prédiction des niveaux piézométriques dans les prochains scénarios. vingt des vingt-cinq puits simulés illustrent une bonne corrélation entre les niveaux piézométriques observés et ceux calculés (Fig.37) avec un coefficient de corrélation R^2 calculé à 0,96. Le diagramme de dispersion présente un groupe de points correctement structurés autour de la ligne de régression.

Tableau 25. Niveaux piézométriques simulés en 2011-2021 et comparés aux niveaux piézométriques mesurés en 2021

Puits et forage	Niveau piézométrique simulé en 2011-2021 (m)	Niveau piézométrique mesuré 2021 (m)	Différence entre simulé et mesuré PL (m)	Niveau piézométriques calculés après calage (m)	Différence entre calculé et mesuré PL (m)
Fetissan 1	75,29	77,5	2,21	76,16	1,34
Remila	69,57	73,53	3,96	69,77	3,76
Fetissan 2	76,45	75,44	-1,01	77,45	-2,01
Fetissan 3	74,26	72,43	-1,83	74,95	-2,52
O.A. Kader	44,90	43,93	-0,97	43,28	0,65
EAC 5	28,06	27,35	-0,71	28,51	-1,16
F. Amzal 1	26,42	22,82	-3,6	26,63	-3,81
F. Amzal 2	23	22,7	-0,3	23,61	-0,91
D. Massaoudi	12,58	17,08	4,5	12,30	4,78
F. Moustache	26,99	27,83	0,84	27,32	0,51
Hakim	20,48	23,27	2,79	20,09	3,18
M. Ahcen	20,88	20,83	-0,05	19,85	0,98
O. Ghir	21,24	24,58	3,34	20,54	4,04
F. Azzoug	13,02	15,35	2,33	13,60	1,75
Souissi	10,39	10,86	0,47	10,75	0,11
L'abreuvoir	8,88	11,22	2,34	9,76	1,46
S. Salem	19,81	21,88	2,07	19,23	2,65
T. Hamza 4	20,40	19,17	-1,23	18,63	0,54
Djamaa	6,74	9,6	2,86	7,12	2,48
T. Hamza 2	15,76	0,5	-15,26	14,42	-13,92
Ramdani	6,63	12,4	5,77	7,11	5,29
T. Hamza 1	13,29	19,49	6,2	12,96	6,53
SIMAF	8,95	4,32	-4,63	13,23	-8,91
Saidj	3,76	2,55	-1,21	5,33	-2,78
Mouzhaoui	1,87	0,76	-1,11	9,38	-8,62

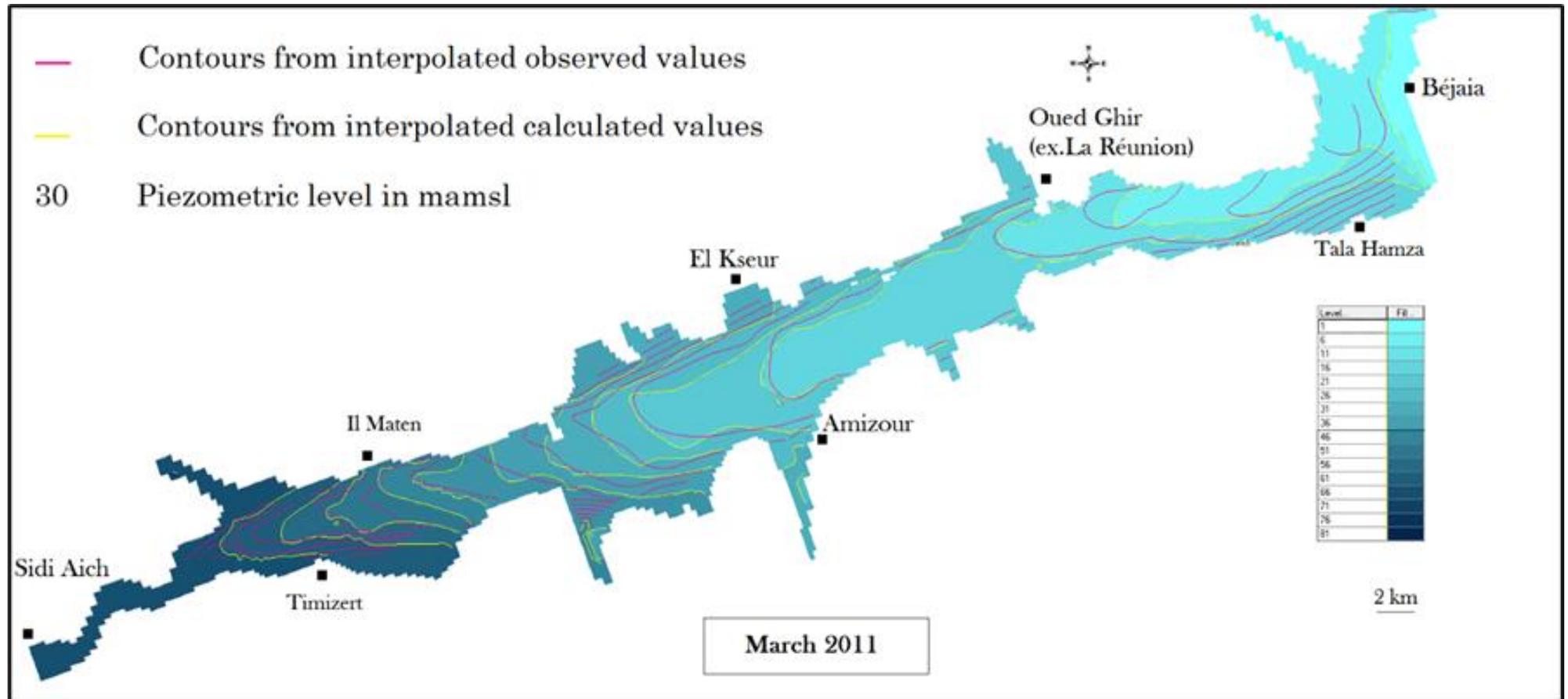


Fig.36. Niveaux piézométriques calés en régime permanent en mars 2011 (Kessasra et al. 2021)

En effet, trois catégories de puits ont été distinguées :

✓ Catégorie A dans laquelle la différence entre les niveaux piézométriques mesurés et calculés ne dépasse pas 5 m, elle est composée de vingt puits représentant environ 80 % des puits simulés. Le recalage a été jugé satisfaisant avec une bonne corrélation. Ces puits sont localisés majoritairement dans des zones à perméabilité forte à moyenne.

✓ Catégorie B est constituée de quatre puits : Mouzhaoui, SIMAF, T. Hamza 1 et Ramdani dans lesquels la différence entre les niveaux piézométriques mesurés et calculés est comprise entre 5 et 10 m, elle représente 16 % des puits simulés. Ces puits sont localisés principalement à la sortie du système aquifère.

✓ Catégorie C est représentée par un seul puits de T. Hamza 2 avec une différence dépassant les 10 m localisé près de l’oued.

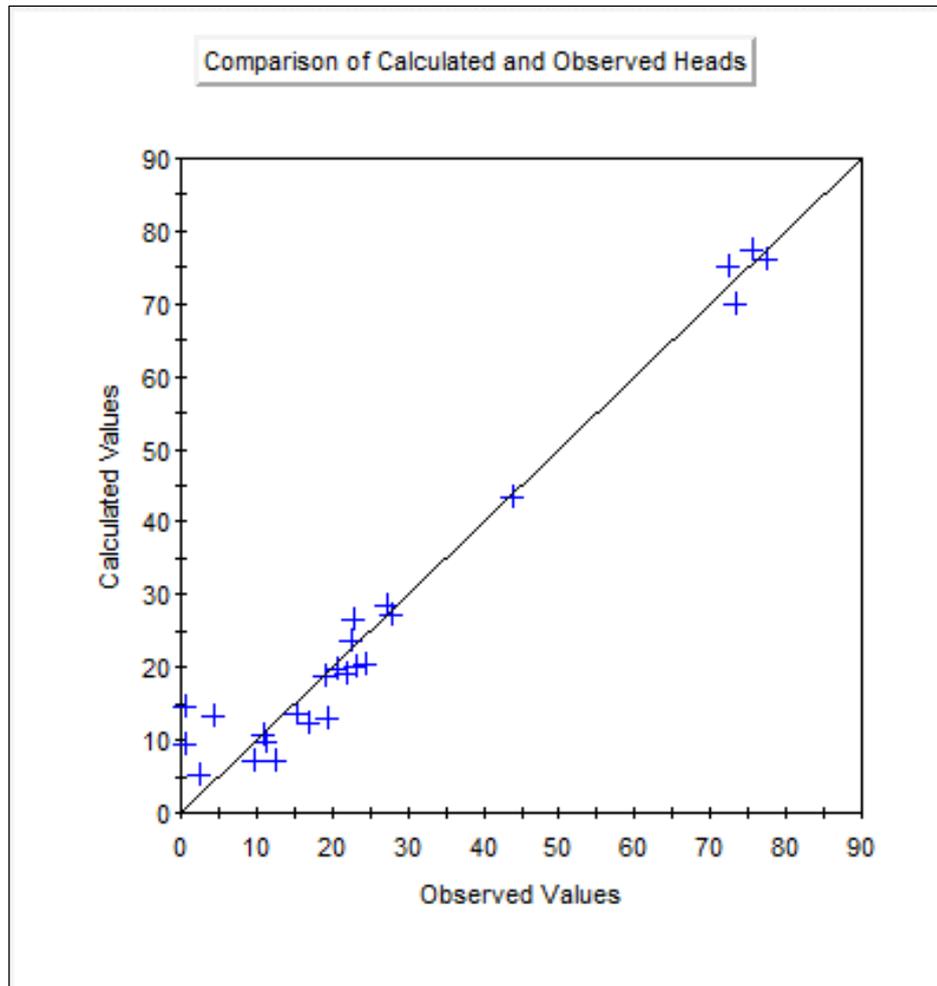


Fig.37. Diagramme de dispersion du modèle en régime permanent

Les résultats du modèle ont été examinés puits par puits. Il en ressort qu'à Sidi Aich à l'amont du système aquifère ; le puits Fetissan 1 présente un faible écart entre les niveaux piézométriques simulés et ceux mesurés, calculé à 1,34 m. dans la même région le puits Remila présente un écart plus important calculé à 3,76 m. On peut justifier cela par l'instabilité numérique des calculs à l'entrée du modèle. A Fenaïa Ilmaten, le puits O.A. Kader présente un écart réduit de 0,65 m. Dans la zone El Kseur, le puits EAC 5 présente un écart calculé à 1,16 m et le puits O. Ghir présente un écart important à cause de son emplacement près de l'oued, il a été calculé à 4,04 m. Dans la région d'Amizour sur la rive droite, le puits F. Moustach présente un faible écart de 0,51 m, tandis que le puits Hakim montre une différence de 3,18 m. En effet, le puits Hakim est localisé près de la limite géologique de la nappe, d'où l'instabilité numérique due à l'effet de bordure. A Oued Ghir, le puits Abrevoir montre une différence de 1,46 m et le puits Ramdani présente un écart important de 5,29 m près de l'Oued. A Tala Hamza, le puits Tala Hamza 4 présente un écart assez réduit de 0,54 m, alors que le puits Tala Hamza 1 illustre une différence de 6,53 m à cause de son emplacement à la sortie du système. Les puits localisés à Béjaïa présentent des écarts plus remarquables dépassent 8 m à cause de leurs positionnements à la sortie de système, la zone aval est numériquement instable.

2) Simulations hydrodynamiques

1. Suivi des fluctuations des niveaux piézométriques

Trois scénarios ont été menés dans des conditions d'écoulement transitoire en 2021 ; 2030 et 2050. L'objectif est d'évaluer la réaction de l'aquifère sur trois périodes distinctes. Ces dernières se différencient par une augmentation progressive du volume total des pompages imposés à la nappe. Suite à une gestion parcimonieuse de nos pompages en optant pour un meilleur emplacement des forages simulés tout en évitant le dénoyage des mailles pompées, la nappe a été épargnée des forts rabattements et dénoyages respectivement en 2021 ; 2030 et 2050, les issues se présentent comme suit :

✚ Scénario 1 (2011-2021) : les niveaux piézométriques calculés sont inférieurs à ceux observés dans 13 puits qui présentent une diminution de 1 m, suite au pompage imposé. D'amont en aval, à Sidi Aich, le puits Fetissan 1 présente une diminution calculée à 0,04 m. Dans la région d'Amizour, le puits F. Amzal 1 et F. Azzoug avec une différence respectivement de 0,01 et 0,45 m. A Tala Hamza, des écarts compris entre de 0,02 et 0,16 m ont été observés aux puits Souissi, S. Salem, T. Hamza 4, T. Hamza 2 et T. Hamza 1. A Béjaïa, les puits Saidj, Mouzhaoui, SIMAF, Ramdani et Djamaa présentent une différence comprise entre 0,19 et 1,05 m. Par ailleurs, les niveaux piézométriques calculés sont similaires à ceux observés dans 10 puits : A Sidi Aich, les puits Fetissan 3 et Remila. A Fenaïa Ilmaten, un seul

puits O.A. Kader, les puits EAC5, D. Massaoudi, F. Moustache à Amizour, F. Amzal 2 et Oued Ghir à El Kseur. Leurs niveaux piézométriques sont restés constants malgré les différents pompages entrepris. Cependant, les niveaux piézométriques calculés sont légèrement supérieurs à ceux observés. Une légère augmentation a été observée dans 2 puits uniquement en l'occurrence Hakim et M. Ahcen sur 25 puits suivis dans ce scénario avec une différence assez négligeable estimée à 0,03 m.

✚ Scénario 2 (2021-2030) : les niveaux piézométriques calculés sont inférieurs à ceux observés dans 12 puits. Le niveau piézométrique au puits Ferme Amzal 1 à El Kseur ne bouge quasiment pas, avec uniquement 0,01 m de différence. A Tala Hamza, les puits F. Azzoug, Souissi, S. Salem, T. Hamza 4, T. Hamza 2 et T. Hamza 1 présentent une diminution calculée respectivement à 0,36 ; 0,02 ; 0,09 ; 0,08 ; 0,01 et 0,08 m. Les puits Djamaa et Ramdani à Oued Ghir présentent une différence calculée entre 0,15 et 0,1 m. Et à Béjaïa, les puits SIMAF, Saidj et Mouzhaoui présentent une diminution calculée respectivement à 0,28 ; 0,21 et 0,32 m. En revanche, les niveaux piézométriques calculés sont similaires aux valeurs observées sur 13 puits : Les puits Fetissan 1, Remila, Fetissan 2 et Fetissan 3 à Sidi Aich ; O. A. Kader à Fenaïa Ilmaten ; EAC 5, D. Massaoudi, F. Moustache, Hakim et M. Ahcen à Amizour, O. Ghir et F. Amzal 2 à El Kseur, L'abreuvoir à Béjaïa.

✚ Scénario 3 (2030-2050) : les niveaux piézométriques calculés sont généralement inférieurs à ceux observés. Le niveau piézométrique dans 13 puits a diminué de 0,36 m par rapport à leur niveau initial. A Sidi Aich, le puits Fetissan 2 présente une différence calculée à 0,01 m. Les puits F. Amzal 1 à El Kseur avec une différence de 0,01 m. A Tala Hamza, les puits F. Azzoug, Souissi, S. Salem, T. Hamza 4, T. Hamza 2 et T. Hamza 1 présentent une différence calculée comprise entre 0,01 et 0,34 m. Les puits, Djamaa et Ramdani à Oued Ghir présentent une différence calculée respectivement à 0,12 et 0,36 m. les puits SIMAF, Saidj et Mouzhaoui à Béjaïa présentent une diminution calculée respectivement à 0,29 ; 0,14 et 0,29 m. Cependant, les niveaux piézométriques calculés restent inchangés comparativement à ceux observés dans 12 puits : les puits Remila, Fetissan 2 et Fetissan 3 ; le puits O. A. Kader à Fenaïa Ilmaten, les puits EAC 5, D. Massaoudi, F. Moustache, Hakim et M. Ahcen à Amizour, le puits F. Amzal 2 et O. Ghir à El Kseur, le puits L'abreuvoir à Oued Ghir.

Il est à noter que durant ce dernier scénario, deux mailles asséchées apparaissent sur la limite nord du modèle au niveau d'Oued Ghir (Fig.38). Les niveaux piézométriques dans cet endroit oscillent entre 12 et 7 m. Pour y remédier, nous avons déplacé les mailles pompées qui entourent ces deux mailles asséchées à l'amont de la vallée où les niveaux piézométriques dépassent 50 m et les perméabilités plus intéressantes.

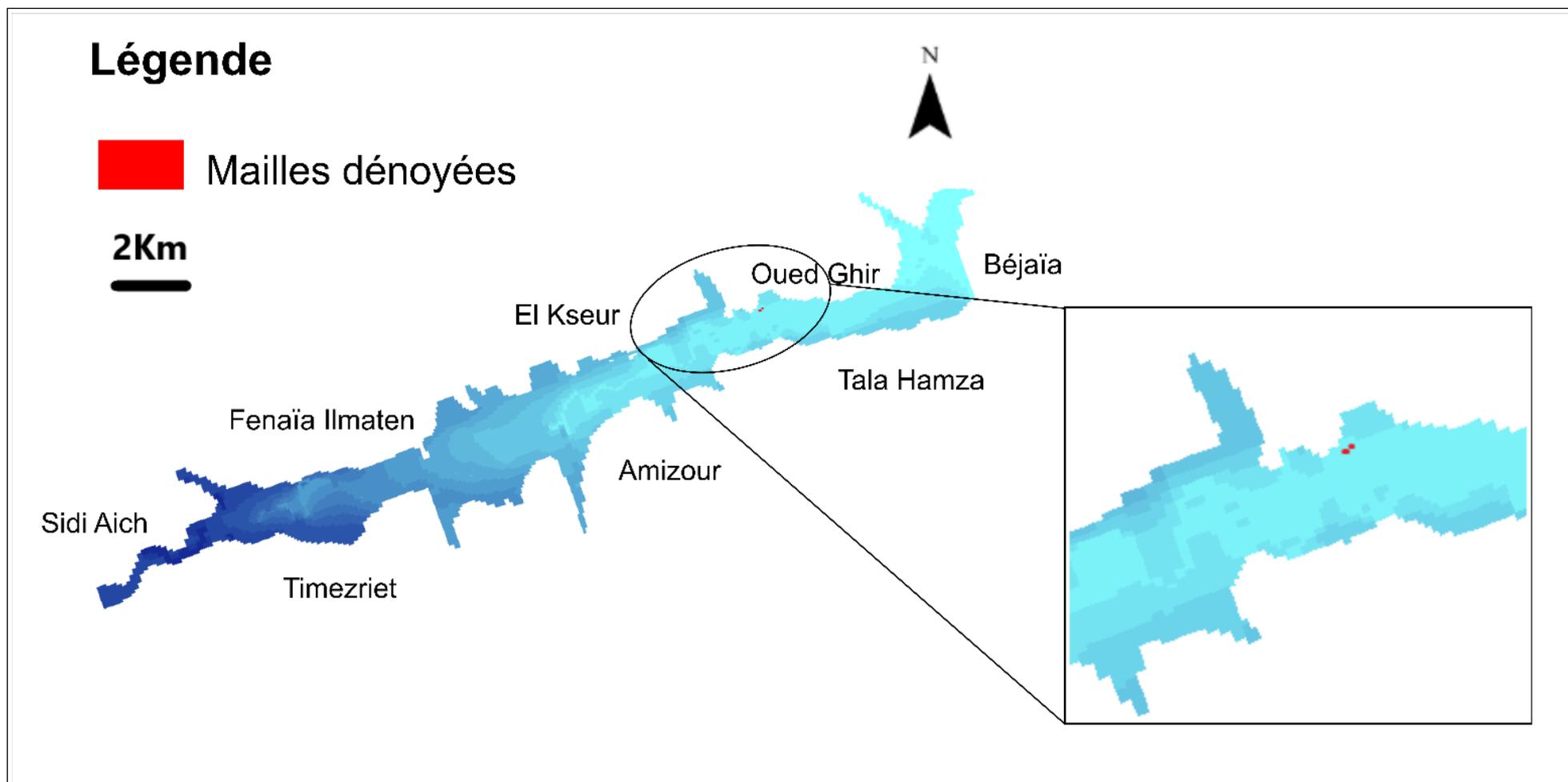


Fig.38. Carte simulée montre les mailles pompées et dénoyées pendant le troisième scénario 2030-2050

2. Analyse des issues du modèle hydrogéologique

Au cours du processus de simulation, il a été noté trois tendances distinctes dans les variations des niveaux piézométriques. D'abord, une hausse des niveaux piézométriques calculés dans certains puits pompés a été observée, d'autre part, une diminution dans d'autres puits simulés et pompés et enfin une stabilisation des niveaux piézométriques dans d'autres.

A ce propos, le niveau piézométrique n'a pas changé au cours des scénarios simulés dans huit puits : EAC5 ; F. Amzal 2 ; D. Massaoudi ; O. Ghir ; F. Moustache ; Hakim ; Fetissan 3 ; Remila et O.A. Kader. Le puits Hakim est situé dans une zone à perméabilité élevée ($8 \cdot 10^{-2}$ m/s) d'où la stabilisation de son niveau piézométrique malgré les pompages simulés. En revanche, les puits F. Amzal 2 ; D. Massaoudi sont situés sur les axes d'écoulement principaux et les puits F. Moustache et O. Ghir sont situés près des limites d'alimentation latérale (GHB) caractérisés par d'importants flux d'eau qui soutiennent la nappe et qui renouvellent continuellement son stock d'eau. Les puits Fetissan 3 ; Remila et O.A. Kader sont localisés près de l'Oued qui a tendance à soutenir et alimenter la nappe pendant la période des hautes eaux.

Au niveau des puits L'abreuvoir et Fetissan 1, ils ont accusé une diminution dans le premier scénario et une stabilisation pendant le deuxième et troisième scénario. Lorsque le volume d'eau pompé est de $45,8 \text{ Mm}^3/\text{an}$, les cônes de dépression se forment dans la nappe. Par contre, dans le deuxième et troisième scénario le pompage n'a pas influencé ces deux puits, ils sont localisés près de l'oued qui contribue à stabiliser la concentration.

Au puits Fetissan 2, Le niveau piézométrique a été stable dans le premier et deuxième scénario, et une légère diminution de 0,01 m dans le troisième scénario, cela revient à son emplacement dans une zone de bonne perméabilité ($1,09 \cdot 10^{-2}$ m/s).

Les niveaux piézométriques ont diminué d'environ 1,05 m dans 12 puits : Fetissan 2, F. Amzal 1, Souissi, F. Azzoug, Sidi Salem, T. Hamza 4, Djamaa, T. Hamza 2, Ramdani, T. Hamza 1, SIMAF, Mouzhaoui, Saidj. Le puits Fetissan 2 est localisé dans la zone à perméabilité élevée $5 \cdot 10^{-2}$ m/s. Le puits F. Amzal 1 est localisé près de l'oued. Les puits Souissi, F. Azzoug, Djamaa, Sidi Salem et Ramdani sont localisés entre Oued Ghir et Tala Hamza où la nappe est étroite donc ils sont situés près de l'oued qui soutient la nappe et compense rapidement le volume pompé. Les puits T. Hamza 2, T. Hamza 4, T. Hamza 1 et Djamaa sont localisés près des limites d'alimentation latérale (GHB).

3. Bilan d'eau de la nappe :

Le bilan d'eau illustre un état d'équilibre pendant les périodes simulées (Tableau.26). Premièrement le volume total des apports d'eau dans les scénarios simulés a été dominé d'abord par les échanges avec la rivière. Le système aquifère est principalement alimenté par la rivière avec $1319,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ce qui représente 44,3 % de l'apport total. Notez que le lit de la rivière est caractérisé par une bonne perméabilité et une profondeur d'eau assez importante. Il a été identifié trois axes : de Sidi Aich au sud de Fenaïa Ilmaten avec une perméabilité et une profondeur estimées respectivement entre 4,2 et 7,04 m/s et de 53 à 65 m. Il a été accordé respectivement de 4,6 à 11,2 m/s et de 16 à 45 m entre Fenaïa Ilmaten et sud El Kseur. Les axes étendus entre El Kseur et Bejaia sont caractérisés par une perméabilité calculée entre 0,6 à 4,8 m/s et une profondeur comprise entre 6 et 15 m. Elle concorde largement avec les résultats expérimentaux issus des campagnes de jaugeage différentiel entreprises dans l'oued Soummam (Clicnks, 1973). Elles stipulent qu'entre Sidi Aich et El Kseur a été mises en évidence une infiltration de la rivière dans l'aquifère. Cependant, entre El Kseur et Béjaïa, l'aquifère semble alimenter la rivière. Cette affirmation "physique" concorde avec les issues numériques et nos résultats de simulation restituent parfaitement ces échanges et tendances nappe-oued.

Deuxièmement, les axes simulés d'alimentation latérale nommés GHB sur MODFLOW approvisionnent bien l'aquifère avec un volume de $1140,6 \text{ m}^3/\text{s}$ représentant 38,3 % des apports totaux. En effet, l'aquifère est bordé par deux axes GHB sur la rive gauche et trois autres sur la rive droite. Les perméabilités introduites sont comprises entre 10^{-5} à 10^{-2} m/s, leurs hauteurs piézométriques estimées entre 12 et 70 m et un débit d'eau entrant dans l'aquifère est estimé entre 0,0003 et $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$ par endroit.

Cependant, les flux sortant du système sont restitués numériquement par le niveau constant de l'aquifère qui est calculée à $2551,54 \text{ m}^3/\text{s}$ représentant 85,7 %. Le débit sortant du système aquifère vers la rivière est estimé à $400,7 \text{ m}^3/\text{s}$ représentant 13,5 %. Le reste de l'écoulement d'eau sortant indique que les GHB et le stockage représentent 0,8 % de l'écoulement total.

A cet effet et au cours des périodes de simulation, le niveau constant présente un déséquilibre et semble dominant dans le débit sortant du système aquifère représentant environ 89 % du débit total. Cependant, la rivière et l'alimentation latérale sont en équilibre ; la rivière et la GHB prévalaient à environ 87 % de l'apport total. La rivière est caractérisée par une conductance du lit allant de 0,6 à $11,2 \text{ m}^2/\text{s}$; et une hauteur de charge réduite d'amont en aval et variant entre 1 et 75 m qui assurent l'alimentation de la nappe en hautes eaux. Les

axes d'alimentation latérale sont caractérisés par une perméabilité variante entre $5 \cdot 10^{-5}$ et $9 \cdot 10^{-2}$ m/s, une hauteur allant de 12 à 70 m et un débit d'eau entrant de 0,0003 à 0,56 m³/s. Ces axes sont localisés sur la limite nord et trois d'entre eux au sud assurant donc une alimentation latérale.

Tableau 26. Bilan hydrique de chaque scénario simulé en régime transitoire ; les données sont exprimées en m³/s

	Termes du bilan	Les entrées	Les sorties	Différence
S1 : 2011-2021	Recharge	0,13	0	0,13
	Niveau Constant	515,91	2551,54	-2035,63
	GHB	1140,66	22,22	1118,44
	Stockage	0,03	0,17	-0,13
	Rivière	1319,27	400,7	918,57
	Puits	0	1,42	-1,42
	Total	2976,02	2976,07	0,046
S2 : 2021-2030	Recharge	0,39	0	0,39
	Niveau Constant	515,90	2551,61	-2035,71
	GHB	1140,63	22,22	1118,40
	Stockage	0,04	0,19	-0,15
	Rivière	1319,26	400,71	918,55
	Puits	0	1,53	1,53
	Total	2976,24	2976,28	-0,044
S3 : 2030-2050	Recharge	0,39	0	0,39
	Niveau Constant	515,98	2551,35	-2035,37
	GHB	1141,05	22,21	1118,83
	Stockage	0,019	0,098	-0,079
	Rivière	1319,29	400,66	918,63
	Puits	0	2,45	-2,45
	Total	2976,74	2976,77	-0,035

IV. Conclusion

Le calage du modèle hydrodynamique en régime permanent montre une bonne corrélation entre les niveaux piézométriques mesurés et ceux simulés avec un coefficient de corrélation de 0,96.

Le modèle hydrodynamique présente une variation insignifiante ne dépassant pas 2 m lors des trois simulations. Le puits Mouzhaoui est le plus réactif au cours des trois scénarios. Cependant les puits Remila ; EAC 5 ; O.A. Kader ; F. Amzal 2 ; D. Massaoudi ; F. Moustache ; O. Ghir et Fetissan 3 sont stables. Les puits Fetissan1 ; Fetissan 2 ; F. Amzal 1 ; F. Azzoug ; Hakim ; M. Ahcen ; Souissi ; L'abreuvoir ; S. Salem ; T. Hamza 4 ; Djamaa ; T. Hamza 2 ; Ramdani ; T. Hamza 1 ; Saidj et SIMAF présentent des fluctuations pendant les trois scénarios.

Le bilan d'eau montre que la rivière est dominante dans l'apport total et représente presque 45% du total des apports en 2021, 2030 et 2050 et suivie par le GHB avec 38 % du total des apports en 2021, 2030 et 2050. Cependant, le volume de sortie a été présenté par le niveau constant avec 89 % de la sortie totale.

Quatrième partie
Modèle de transport des
nitrites de la vallée de la
basse Soummam

I. Introduction

La principale menace à la détérioration des plans d'eau provient de la pollution de source non ponctuelle ou diffuse telles que les nitrates qui constituent une menace importante sur la qualité des eaux souterraines (Goody et al. 2005). Ils résultent de l'intensification de l'agriculture et du développement de grands centres urbains (Gikas et al. 2006a, 2009a). Dans un tel contexte, l'un des principaux défis reste de développer des approches efficaces pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines à l'échelle régionale, y compris la modélisation numérique quantitative, en tant qu'aide à la décision pour la gestion des eaux souterraines (Orban, 2010). Une approche de modélisation combinée avec la géochimie des eaux a pour objectif d'étudier et prévoir la qualité des eaux souterraines. La modélisation du transport des polluants est un outil de description quantitative et meilleure compréhension qualitative des processus géochimiques et physiques qui se produisent dans le sous-sol (Miotliński, 2008).

Psarropoulou et Karatzas (2014) ont développé le modèle de transport des nitrates de l'aquifère côtier en Grèce, basé sur une simulation d'écoulement d'eau souterraine en régime transitoire précédemment établi. Les auteurs ont observé des variations saisonnières des concentrations des nitrates et ont conclu que l'approche couplant un modèle d'écoulement transitoire des eaux souterraines à un modèle de transport simple donnait des résultats acceptables. Jiang et Somers (2009) ont examiné la contamination des eaux souterraines par les nitrates sur le littoral Est du Canada dont le but est de protéger l'aquifère de cette contamination. Les résultats du modèle d'écoulement des eaux souterraines et de transport des nitrates ont montré qu'il faudrait plusieurs années pour réduire la concentration des nitrates dans la partie peu profonde de l'aquifère, et plusieurs décennies ou plus pour restaurer la qualité de l'eau dans les parties plus profondes de l'aquifère. Gao et al. (2010) ont utilisé l'écoulement des eaux souterraines (MODFLOW) et la modélisation du transport de masse (MT3DMS) pour étudier la réponse de la concentration des nitrates dans les eaux souterraines à différents scénarios de changement d'utilisation des terres dans le deuxième plus grand aquifère de Grande-Bretagne. D'après les résultats des simulations, la plus grande diminution future de la concentration des nitrates a été associée au remplacement des terres agricoles par des terres forestières.

Dans notre étude, les résultats de l'analyse des nitrates en Mai 2021 dans la nappe alluviale de la vallée de la basse Soummam ont été utilisés pour mettre en œuvre un modèle de transport et de l'évolution des nitrates. Tout d'abord, le processus de calage a été réalisé dans

des conditions de l'écoulement permanent des eaux, puis la validation est basée sur l'optimisation des différences entre les concentrations des nitrates simulées et celles mesurées. Enfin, des scénarios de simulation ont été réalisés entre 2021 et 2050 afin de fournir des prédictions sur l'évolution spatio-temporelle des concentrations des nitrates dans l'aquifère étudié. Les issues de cette modélisation visent à renforcer les connaissances hydrogéologiques et hydrogéochimiques de la communauté scientifique travaillant sur la vallée de la Soummam, à fournir plus d'options fiables dans la gestion des ressources en eau et à renforcer la capacité des gestionnaires à faire face à la crise actuelle de l'eau en Algérie.

II. Matériels et méthodes

1) Modélisation du transport des nitrates

Le Modèle du Transport en 3 dimensions (MT3D) est un modèle de transport de soluté, qui a été établi par Zheng, et amélioré à plusieurs reprises. L'interface MT3D permet de construire un modèle géochimique couplé au modèle hydrodynamique. Les données intégrées sont les sources des nitrates dans l'eau : les concentrations initiales dans l'aquifère et les concentrations des nitrates dans la rivière et dans la recharge ou la pluie.

Les concentrations des nitrates mesurées en 2021 sont injectées dans le modèle du transport des nitrates sous forme des champs des nitrates. Des forages d'observation des concentrations en nitrates ont été renseignés sur le logiciel. Les résultats sont présentés dans la figure 39, les concentrations en nitrates varient entre 4 et 270 mg/L dont les moyennes sont distribuées sur 8 zones. La concentration la plus faible est enregistrée à 4,9 mg/L au niveau d'Oued Ghir et la concentration la plus élevée est enregistrée au niveau d'El Kseur à 267,5 mg/L. A Sidi Aich, la concentration est enregistrée à 10,32mg/L. La zone entre Fenaïallmaten et Timezriet est divisée latéralement en deux zones dont les concentrations sont enregistrées à 36,73 mg/L au nord et à 17,72 mg/L au sud. Au niveau d'Amizour, la concentration en nitrates atteint 43,3 mg/L suivie par une concentration de 13,08mg/L. Une deuxième zone à Oued Ghir avec une concentration en nitrates enregistrée à 142,07 mg/L. Enfin, la concentration en nitrates enregistrée à Béjaïa à l'aval de la nappe est à 14,9mg/L.

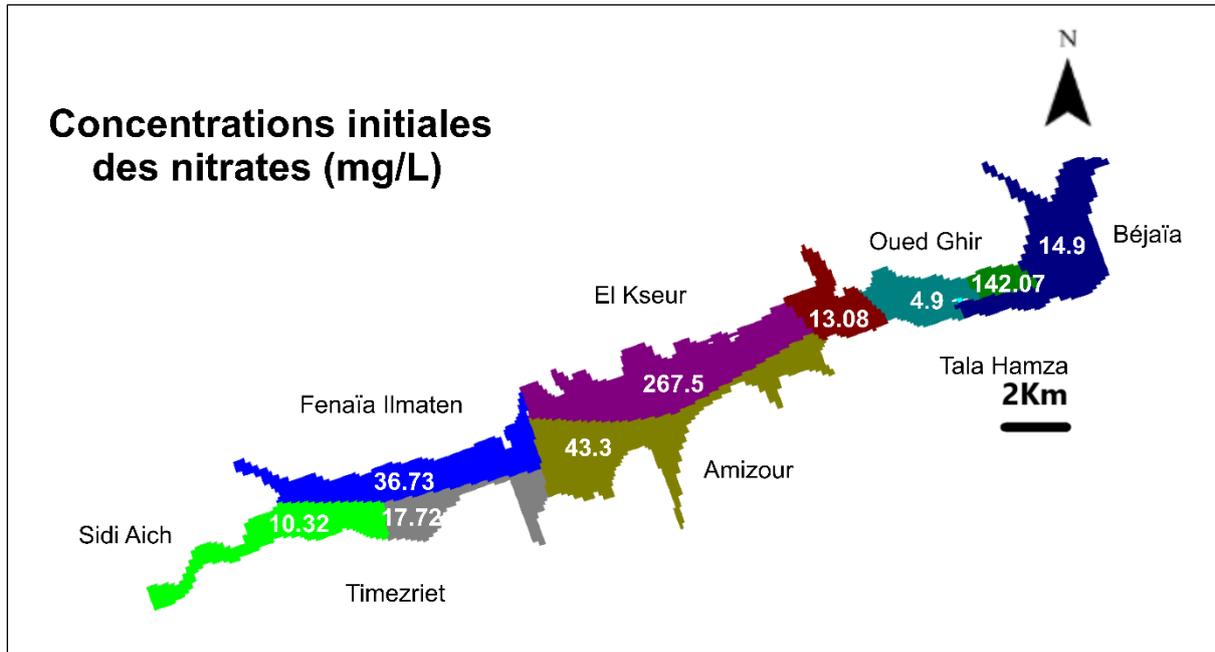


Fig.39. Concentrations initiales des nitrates dans l'aquifère de la vallée de la basse Soummam (mg/L)

Par ailleurs, les concentrations des nitrates dans la rivière (Fig.40) ont été mesurées et intégrées dans le modèle. La répartition des nitrates se présente sous forme de quatre tronçons distincts. Le premier tronçon s'étend sur l'axe de la rivière entre Sidi Aich et Fenaïa Ilmaten il est caractérisé par une concentration en nitrate mesurée à 0,09 mg/L. Elle s'annule dans le tronçon de Fenaïa Ilmaten à 0 mg/L. Ensuite elle augmente une autre fois dans les deux tronçons entre Amizour et El Kseur et entre Oued Ghir et Béjaïa, la concentration en nitrate atteint respectivement 8,21 mg/L et 4,56 mg/L. Généralement les teneurs en nitrates des eaux de surface en hautes eaux sont largement inférieures aux teneurs dans les eaux souterraines, cette caractéristique pourrait contribuer à diluer les eaux de l'aquifère modélisé à travers le processus d'infiltration de la rivière dans la nappe.

La concentration des nitrates dans la recharge (Fig.40) a été mesurée dans deux zones distinctes où la pluie a été échantillonnée et analysée au laboratoire pendant la période des hautes eaux également (Mai 2021). La première s'étend entre Sidi Aich et Amizour avec un poste de prélèvement situé près de Remila et la seconde s'étend entre Amizour et Béjaïa avec un poste de prélèvement près du puits Saidj à Béjaïa. Les concentrations en nitrates dans la pluie sont mesurées respectivement à 0,95 et 1,85 mg/L.

Les paramètres de dispersion attribués au modèle des nitrates sont la dispersion transversale horizontale et verticale égale à 0,1.

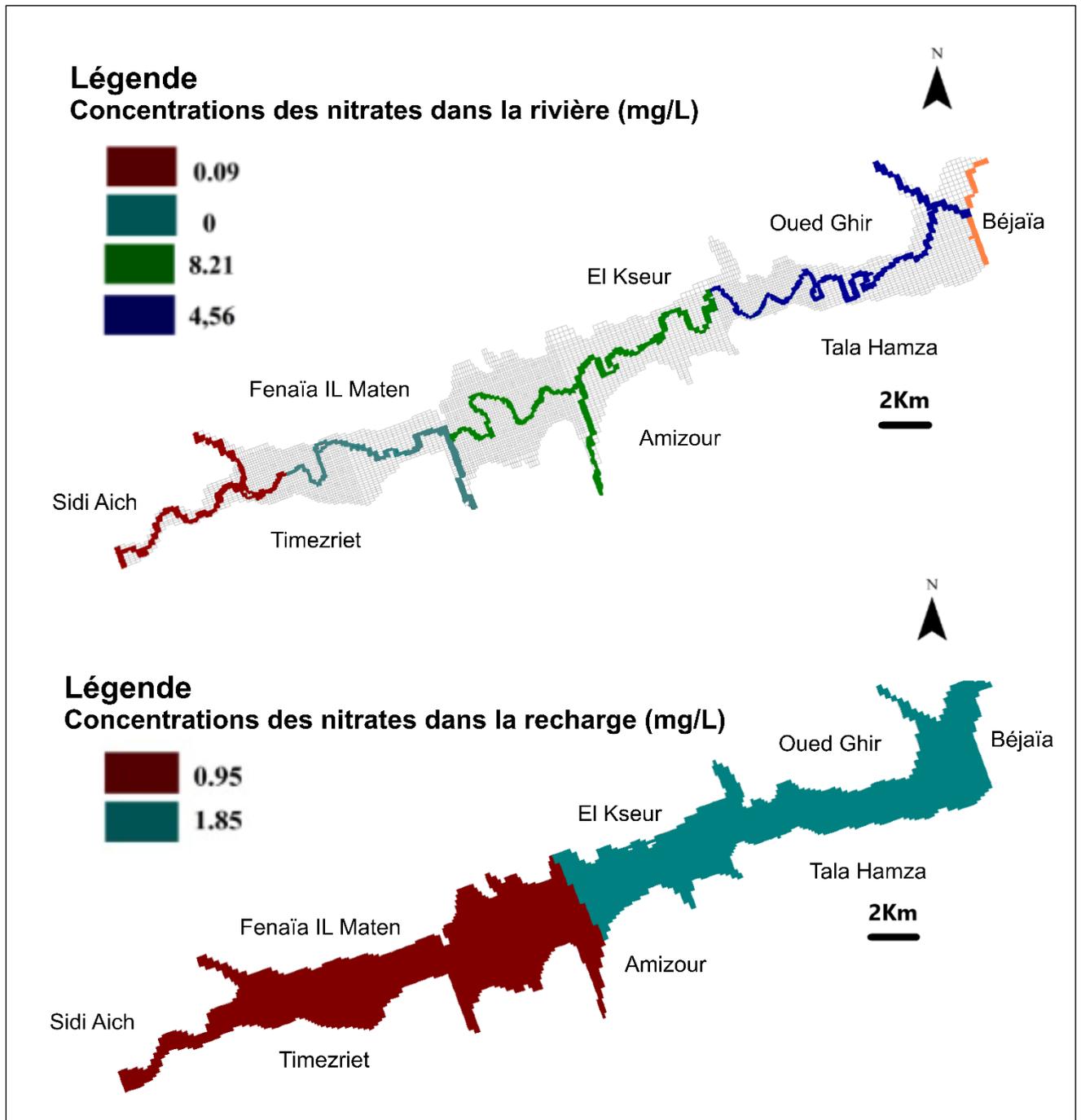


Fig.40. Concentrations initiales des nitrates dans la rivière et l'eau de recharge

2) Calage en régime permanent

Le calage a été établi en régime permanent sur une période de 31 jours. Il se base sur les concentrations initiales des nitrates analysées en Mai 2021 sur vingt-neuf puits et forages. Le calage est basé sur la méthode d'essai à erreur, il s'agit d'une méthode manuelle qui permet de modifier et ajuster graduellement les teneurs NO_3 analysées afin de minimiser l'écart entre les concentrations en nitrates mesurées et celles simulées dans la nappe aquifère. Le processus de validation s'en est suivi, il a été basé sur la méthode statistique représentée par le diagramme de dispersion et le coefficient de corrélation généré systématiquement après chaque étape de calage.

3) Simulations du transport des nitrates en régime transitoire

La simulation en régime transitoire est basée sur deux facteurs : le temps de simulation et le volume d'eau pompée, trois scénarios ont été simulés afin de suivre l'évolution des concentrations des nitrates en 2020, en 2030 et en 2050. Le temps de simulation est variable d'un scénario à un autre, il est exprimé en jours. Dans le premier et troisième scénario, nous avons opté pour une durée de simulation de 3650 jours (10ans) avec un palier de temps et de calcul de dix et 3287 jours (9 ans) dans le deuxième scénario avec un palier de temps de neuf.

Le volume de pompage de l'eau a été calculé pour chaque scénario en fonction des projections établies par le Plan national de l'eau (PNE, 2010), identiques à celles adoptées dans le modèle hydrogéologique précédemment. Des simulations ont été effectuées selon trois scénarios résumées dans le tableau 27, comme suit :

- Scénario 1 : (2011-2021) il a été simulé afin d'évaluer la variation des niveaux piézométriques et des concentrations en nitrates des différents puits analysés dans notre étude à l'horizon 2021. Le volume prélevé a été estimé à 45,8 Million m^3/an . Il s'agit des besoins en eau potable à 29,31 Million m^3/an , soit 63,99% du volume total, de l'irrigation à 13,43 Million m^3/an soit 29,32% du volume total et des besoins en eau industrielle à 3,06 Million m^3/an soit 6,68% du volume total.

- Scénario 2 : (2021-2030) il a été simulé afin d'évaluer la variation des niveaux piézométriques et des concentrations en nitrates à l'horizon 2030. Le volume prélevé a été estimé à 49,19 Million m^3/an . Il s'agit de 34,49 Million m^3/an attribué à l'approvisionnement en eau potable soit 70,12% du volume total, 10,71 Million m^3/an pour l'irrigation soit 21,77% du volume total et 3,99 Million m^3/an pour l'approvisionnement en eau industrielle soit 8,11% du volume total.

- Scénario 3 : (2030-2050) en raison d'un manque de données, le volume d'eau pompée prévu en 2050 a été établi à 98,38 Million m³/an, ce qui représente le double du volume d'eau prévu en 2030.

Tableau 27. Période de simulation et débit de pompage dans les forages

Période simulée	Total (Million m ³ /an)	Le volume pompé (Million m ³ /an)
2011-2021	45,8	Eau potable : 29,31
		Irrigation : 13,43
		Eau destinée à l'industrie : 3,06
2021-2030	49,19	Eau potable : 34,49
		Irrigation : 10,71
		Eau destinée à l'industrie : 3,99
2030-2050	98,38	Eau potable : 68,98
		Irrigation : 21,42
		Eau destinée à l'industrie : 7,98

III. Résultats et discussion

1) Processus de calage et de validation

Vingt-neuf puits mesurés en Mai 2021 ont été utilisés dans le processus de calage. Les concentrations initiales ont été graduellement modifiées à l'aide de la méthode d'essai-à-erreur dans des conditions supposées stationnaires de l'écoulement permanent. Les résultats indiquent une bonne performance où les différents puits simulés s'alignent en majorité sur la droite de régression, ils s'en approchent sauf un seul puits. Il s'agit du puits Hakim, lequel à cause de son positionnement près de l'axe d'écoulement latéral où les eaux arrivant des massifs environnants ont de très faibles concentrations en nitrates, se voit largement diluer dans ses concentrations. Le coefficient de corrélation a été calculé à R^2 égal à 0,98 (Fig.41). Il a été traité en respectant la différence admissible entre la concentration de nitrate observée et celle calculée qui a été fixée à priori à 2 mg/L pendant la simulation.

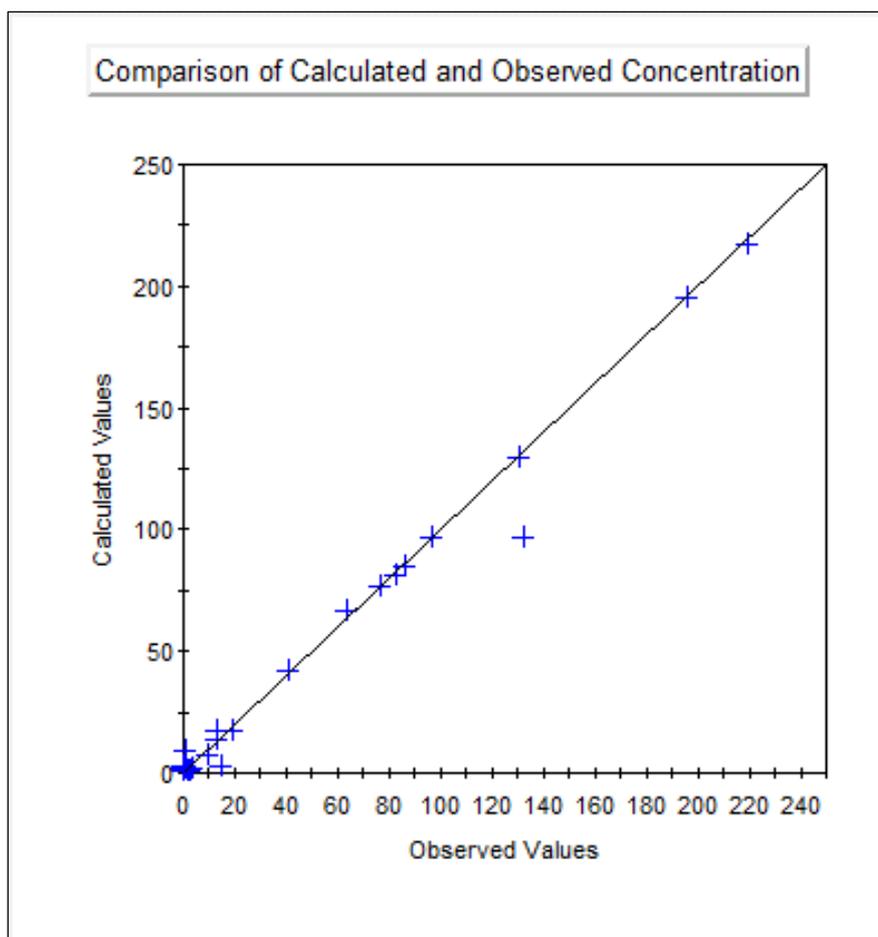


Fig.41. Diagramme de dispersion représentant les concentrations des nitrates observées par rapport aux concentrations calculées en régime permanent

2) Simulations du transport des nitrates

Les résultats des trois scénarios réalisés successivement en 2021, 2030 et 2050 sont présentés comme suit (Tableau. 28) :

- Scénario 1 (2011-2021) : les concentrations des nitrates calculées ont augmenté dans 6 des 29 puits simulés. Une hausse allant respectivement entre 0,1 et 14,7 mg/L dans les puits SIMAF et Remila a été observée. Cependant les concentrations des nitrates calculées ont baissé dans 6 des 29 puits simulés. En effet, une baisse variante respectivement entre 2 et pouvait atteindre 19,9 mg/L dans les puits F. Moustache et Saidj a été relevée. En revanche, les concentrations calculées sont restées invariantes dans 17 des 29 puits tout au long de ce premier scénario.

- Scénario 2 (2021-2030) : les concentrations des nitrates calculées ont été relevées supérieures à celles analysées en mai 2021 dans 7 des 29 puits. En effet, il a été noté une hausse estimée respectivement de 0,2 à 16,5 mg/L dans les deux puits T. Hamza 2 et Remila. Cependant, les concentrations des nitrates calculées ont baissé dans 6 des 29 puits. La baisse a été de l'ordre de 0,4 jusqu'à atteindre 24,4 mg/L respectivement dans les puits F. Amzal 1 et Saidj. Enfin, les concentrations sont restées constantes durant les dix années de simulation dans 12 des 29 puits.

- Scénario 3 (2030-2050) : jusqu'à l'horizon 2050, les issues du modèle des nitrates montre que les concentrations des nitrates calculées ont augmenté dans 8 des 29 puits simulés. La hausse est comprise respectivement entre 0,1 et pouvant atteindre 27,3 mg/L dans les puits O. Ghir et Remila. En outre, Les concentrations des nitrates calculées ont baissé dans 8 puits sur 29. La baisse calculée est comprise respectivement entre 0,4 et 16,8 mg/L dans les deux puits F. Amzal 1 et Saidj. Enfin, Les concentrations demeurent constantes dans 13 des 29 puits simulés dans ce dernier scénario.

Tableau 28: Différents scénarios de concentrations de nitrates en régime transitoire

Puits et forages	Concentration des nitrates mesurés (mg/L)	Concentration des nitrates simulés (mg/L)		
		S1 2011-2021	S2 2021-2030	S3 2030-2050
Fetissan 1	13,7	13,7	13,7	13,7
Remila	7,12	21,79	23,59	34,42
Fetissan 2	8,92	8,92	8,92	9,38
Fetissan 3	217,46	217,46	217,46	213,61
O. A. Kader	1,49	1,49	1,94	1,49
EAC 5	76,56	76,56	76,56	76,56
F. Amzal 1	96,34	97,33	95,9	95,93
F. Amzal 2	0,77	0,77	0,77	0,77
D. Massaoudi	0,8	3,11	2,43	2,33
F. Moustache	84,77	82,82	82,18	82,68
Hakim	96,34	93,41	92,39	92,92
M. Ahcen	0,77	0,77	0,77	0,79
O. Ghir	0,8	0,8	0,8	0,86
F. Azzoug	16,94	16,94	16,94	16,94
Souissi	0,9	0,9	0,9	0,9
L'abreuvoir	16,94	16,93	16,93	16,93
S. Salem	0,9	0,9	0,9	0,9

T. Hamza 4	80,77	78,15	78,45	78,24
Djamaa	42,09	41,41	41,09	40,94
T. Hamza 2	2,62	2,77	2,79	2,79
Ramdani	1,45	1,89	1,72	1,71
T. Hamza 1	1,45	1,45	1,45	0,9
SIMAF	2,67	2,81	2,84	3,27
Saidj	195,05	175,13	170,66	178,3
Mouzhaoui	66,41	67,26	67,4	67,19
Mendi	2,67	2,67	2,67	2,64
Hocini	2,33	2,33	2,33	2,38
Cevital	0,9	0,9	0,9	0,9
Pépinière	129,87	129,87	129,87	129,87

3) Modèle d'évolution des nitrates

La modélisation hydrodynamique couplée au modèle de transport des nitrates dans la vallée de la basse Soummam approuve que le processus de dispersion du nitrate dans les eaux souterraines soit explicitement lié à une multitude de facteurs tels que la perméabilité ; le gradient hydraulique ; les échanges Oued-nappe, les conditions aux limites imposées en particulier les axes d'alimentation latérale, l'épaisseur de l'aquifère et l'épaisseur de la zone non saturée.

Il est à noter que les concentrations des nitrates n'ont pas changé au cours des trois scénarios simulés dans les puits et forages suivants, à savoir, Fetissan1 ; EAC5 ; F. Amzal 2 ; M. Ahcen; F. Azzoug ; Souissi ; L'abreuvoir ; S. Salam ; Mendi ; Hocini ; Cevital et Pépinière (Fig.41). En revanche, en raison des fluctuations piézométriques insignifiantes restituées par le modèle hydrodynamique, une faible variation des concentrations en nitrates a été relevée dans d'autres puits simulés, Il s'agit de Fetissan 2 ; O.A. Kader ; F. Amzal 1 ; O. Ghir ; Djamaa ; T. Hamza 1 ; SIMAF et Mouzhaoui.

Néanmoins, une augmentation a été calculée dans le puits de Remila ; une augmentation de l'ordre de 14,7 mg/L a été observée en 2021, En effet, en raison d'une hausse dans le pompage estimée à 49,19 Million m³/an en 2030 et 98,38 Million m³/an en 2050, les concentrations des nitrates ont augmenté respectivement de 1,8 jusqu'à atteindre 10,8 mg/L. cette hausse est probablement liée à l'épuisement piézométrique dû à une exploitation intensive générant une diminution du volume du réservoir. Notez que le puits de Remila est situé respectivement en amont de la vallée de la basse Soummam, par conséquent, les effets

de frontière et des bordures génèrent une instabilité numérique dans le calcul des concentrations des nitrates en régime transitoire.

Quant à Saidj, il montre une forte variation en 2021, 2030. En effet, une diminution a été calculée respectivement à 19,9 ; 4,5 et une augmentation a été calculée à 7,6 mg/L en 2050, lorsque le volume de pompage ait atteint 45,8 Million m³/an dans le premier scénario ; 49,38 Million m³/an et 98,38 Million m³/an respectivement dans les deuxième et troisième scénarios, En raison de son emplacement près de la rivière, la réduction en NO₃ est probablement liée aux mécanismes d'échange rivière-aquifère, Comme indiqué dans le bilan d'eau restitué par nos simulations hydrodynamiques précédentes, le flux d'eau de la rivière vers l'aquifère représente 45% du flux total, En effet, lorsque le pompage augmente l'aquifère se voit naturellement soutenu par la rivière, Cette dernière a été analysé en Mai 2021 avec moins de charges en nitrate de l'ordre de 4,56 mg/L et a généré un mélange d'eau . Le processus de dilution pourrait être retenu comme hypothèse plausible dans la réduction des nitrates dans notre aquifère.

Remila et Saidj illustrent une variation substantielle qui s'explique par leur localisation respectivement en amont et en aval du modèle où les effets des frontières génèrent une instabilité numérique dans le calcul des concentrations en nitrates.

Au puits D. Massaoudi, une variation relativement modérée a été restituée également. Une augmentation des teneurs en nitrates a été calculée à 2,3 mg/L en 2021 et une diminution a été calculée respectivement à 0,7 et 0,1 mg/L en 2030 et 2050. Celle ci-est associée au volume de pompage qui a augmenté de 45,8 Million m³/an en 2021 à 98,38 Million m³/an en 2050. Cette augmentation est liée au rabattement piézométrique et à la baisse des réserves d'eau, d'où la concentration des nitrates dans cet endroit. Cependant, en raison du flux d'eau sur l'axe d'alimentation latérale (axe Aguellal-Amizour) considéré comme un support à l'aquifère.

Le puits Hakim montre une variation assez modérée. En fait, une diminution a été estimée à 2,9 et 1 mg/L et une augmentation a été calculée à 0,5 mg/L respectivement en 2021, 2030 et 2050, Ces axes sont caractérisés par une perméabilité variant entre $2,2 \cdot 10^{-3}$ et $6,5 \cdot 10^{-2}$ m/s et une hauteur piézométrique allant de 21 à 45 m qui fournit un débit d'eau appréciable, Il a été calculé à 38,3% dans le bilan d'eau avec théoriquement une très faible concentration de nitrate, Le puits de Hakim est situé dans une zone caractérisée à la fois par une bonne perméabilité mesurée à 10^{-2} m/s qui accélère la dispersion du nitrate et une zone saturée

épaisse d'environ 35 m fournie par les données géophysiques, En effet, le stockage de l'eau est important avec un effet de dilution significatif des teneurs en nitrate simulées.

Ainsi, Au puits T. Hamza 4, soit une diminution modérée est évaluée respectivement à 2,6 et 2,5 mg/L en 2021 et 2050 et une augmentation a été estimée à 2,3 mg/L en 2030, Il en résulte également des eaux souterraines fournies par les flux d'eau émanant de la limite latérale nommée Tala Hamza- Littoral. Le gradient hydraulique est estimé approximativement à 20 % ce qui accélère la dispersion du polluant et une baisse des concentrations.

Notez que la concentration en nitrates est stable au puits Fetissan 3 dans le premier et deuxième scénario ; cependant, elle présente une diminution dans le troisième scénario lorsque le volume de pompage atteint 98,38 Million m³/an, Cette réduction est justifiée par la proximité du puits à l'oued, la bonne perméabilité mesurée dans la zone à 10⁻² m/s et le gradient hydraulique estimé à environ 10 %, De plus, l'épaisseur de l'aquifère a été estimée entre 25 et 30 m. Une diminution similaire a été observée au puits F. Moustache estimée à 2 mg/L en 2021, 0,6 mg/L en 2030 et une augmentation a été calculée à 0,5 mg/L en 2050. Il est probablement lié aux mêmes facteurs, tels que la bonne perméabilité estimée à 10⁻² m/s, le gradient hydraulique estimé approximativement à 10 %, l'épaisseur de l'aquifère qui est estimée entre 15 et 35 m et à l'influence du flux d'eau latéral (Aguellal-Amizour).

Le bilan d'eau illustre un état d'équilibre au cours de nos simulations, Le volume de flux entrant total est fortement dominé par la rivière présentant environ 45%. Cependant, le niveau constant semble dominant dans le débit sortant à 89% du débit total. Par conséquent, les simulations révèlent que la variation des eaux souterraines représentée par le niveau piézométrique et le volume de pompage n'ont pas influencé de manière significative le transport des nitrates. Cependant, les concentrations des nitrates ont été assez influencées par les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère tels que la perméabilité, les gradients hydrauliques, les échanges oued-nappe et le flux d'eau latéral.

Ces résultats expérimentaux et numériques corrélés apportent des connaissances hydrogéologiques et hydrogéochimiques sur la vallée de Soummam et offrent plus de perspectives pour un futur plan d'exploitation des eaux et de gestion du transport des polluants. La réhabilitation environnementale de l'écosystème aquatique de la vallée de Soummam, incluant la rivière et l'aquifère alluvial, devrait être engagée sachant que les

changements climatiques accélèrent l'épuisement des eaux souterraines et la dégradation accélérée de la qualité des ressources en eau dans la vallée.

4) Les incertitudes de modèle hydrodynamique et du transport des nitrates

Lors de la construction et l'actualisation du modèle hydrodynamique; plusieurs incertitudes peuvent être relevées et discutées ici. Il en est de même pour le modèle du transport des nitrates lequel, en plus de l'incertitude du modèle hydrogéologique s'ajoute encore celle de la modélisation du transport de soluté. Plusieurs facteurs interviennent dans le degré de fiabilité des résultats et des prédictions numériques, en l'occurrence:

- Il s'agit d'abord d'un aspect primordial et décisif dans la réussite de tout modèle numérique, la disponibilité ou l'insuffisance des données nécessaires à la paramétrisation. Les données utilisées dans nos modèles demeurent insuffisantes au vu de la précision recherchée dans cette étude, à titre d'exemple pour le modèle de transport des nitrates; la mesure et l'intégration des paramètres liés à la biodégradation des nitrates est importante pour mieux cerner et interpréter les variations des nitrates dans la zone saturée;

- Afin de caractériser le rôle primordial de la rivière et les échanges oued-nappe dans le modèle hydrodynamique, il y'a lieu de constater que d'anciennes données de jaugeage différentiel ont été utilisées. Il s'agit de l'unique campagne de jaugeage réalisée dans la vallée de la Soummam. Bien que la rivière se caractérise par une dynamique fluviale très importante, le cours de l'oued a bien changé sous l'effet de plusieurs facteurs, l'ancienne campagne ne restitue pas un fonctionnement et des échanges récents et actuels entre les deux entités. Cela influencerait considérablement certaines issues du modèle en question.

- Autre incertitude retenue, la piézométrie de référence sur laquelle a été calé notre modèle hydrogéologique en particulier en régime sensé être permanent. Dans la vallée de la Soummam, la majorité des mesures piézométriques ne reflète guère l'état stationnaire recherché en raison des milliers d'ouvrages hydrauliques en pompage. La densité, la proximité de ses forages et les taux de pompage assez élevés créent inéluctablement des cônes de dépression et des rabattements très prononcés aussi bien durant saison des hautes eaux et bien plus problématique pendant la saison d'étiage où les puits s'assèchent. Aussi bien que pour des travaux antérieurs réalisés sur la vallée, la nappe s'est montrée influencée par l'effet de pompage excessif et la multiplication du nombre de puits et forages, parfois illicites, dans la région. Il en résulte que le processus du calage des piézométries mesurées et calculées s'avère bien complexe dans certaines zones circonscrites.

IV. Conclusion

Le modèle des nitrates montre qu'une variation négligeable a été calculée dans la majorité des puits sélectionnés au cours des trois scénarios, à l'exception de Remila et de Saidj, qui présentent une variation importante en raison de leur emplacement dans l'extrême sud-Ouest et nord-est de la zone modélisée où l'effet de frontière génère une instabilité numérique dans le calcul du nitrate,

Les résultats de la modélisation couplée du modèle hydrodynamique et le modèle du transport des nitrates indiquent que la rivière et le GHB sont les principaux facteurs contrôlant le niveau piézométrique et le transport des nitrates, Ces résultats préliminaires constituent un pas de plus vers la gestion de la qualité des ressources en eau de la vallée de Soummam.

Conclusion générale et perspective de recherche

Conclusion Générale

Ce travail de thèse a eu pour objectif de comprendre l'effet des activités anthropiques et en particulier l'effet de l'agriculture sur les ressources en eau dans la vallée de la basse Soummam. La méthodologie adoptée est de suivre l'évolution spatio-temporelle des composés azotés d'origine principalement agricole et urbaine dans les eaux de la vallée, de modéliser ensuite ses écoulements d'eau souterraine et enfin d'achever la simulation numérique du transport des nitrates au sein de l'aquifère des alluvions.

La vallée de la basse Soummam fait partie de bassin versant de la Soummam, elle occupe une superficie de 420 Km² entre Sidi Aich et Béjaïa. L'oued Soummam déverse un apport d'eau de 700 m³/an dans la mer Méditerranée, son débit moyen est estimé à 25 m³/s. La population des communes qui longent la vallée de la basse Soummam atteint 344455 hab en 2020, ce qui engendre une hausse dans la demande en eau potable qui est établie à 29,59 Mm³/an. La superficie agricole utilisable est estimée à 184,78 Km², en outre la superficie irriguée présente 5,27 Km² soit 2,85 % de la SAU avec un volume d'eau d'irrigation demandé estimé à 7,82 Million m³/an. La demande en eau industrielle atteint 6,13 Million m³/an pour les 105 unités industrielles concentrées en grande partie dans la commune de Béjaïa.

L'aquifère de la basse vallée d'âge Mio-Plio-Quaternaire est composé d'alluvions actuelles, de graviers, de sables, de galets, de gravier argileux et d'argiles. Son épaisseur varie entre 25 et 62 m. En effet, l'aquifère présente de bonnes caractéristiques hydrogéologiques : sa perméabilité varie entre 10⁻⁵ et 10⁻² m/s et sa transmissivité entre 10⁻³ et 10⁻² m²/s. La variation temporelle des niveaux piézométriques a été suivie pendant deux campagnes de mesure en Mai et en Octobre 2021. Les cartes piézométriques montrent que l'axe d'écoulement principal est orienté du SW au NE parallèle à l'écoulement de l'oued Soummam. Le niveau piézométrique conserve les mêmes tendances en hautes et basses eaux. Le gradient hydraulique est variable d'une zone à une autre en fonction de la perméabilité des sols, il est calculé en amont près de Sidi Aich à 10 %, au milieu de la vallée à El Kseur à 4 % et à l'aval à Tala Hamza à 12 %.

La variabilité des paramètres physiques et composés analysés dans l'eau de la vallée a été remarquée entre les hautes eaux et les basses eaux. En effet, la température des eaux souterraines de la vallée de la basse Soummam montre un effet saisonnier. Le pH présente un faciès neutre à basique influencé essentiellement par les ions bicarbonatés qui offrent le caractère basique aux eaux. La CE est très élevée, ce qui indique une forte minéralisation des

eaux. Les teneurs en OD sont très variables en hautes et basses eaux. Les nitrates présentent des fluctuations spatio-temporelles irrégulières, elles dépassent la norme associée dans plusieurs puits et forages localisés près des grandes villes et des domaines agricoles d'Amizour, El Kseur et Oued Ghir. Les nitrites, l'ammonium et les ortho-phosphates présentent des faibles teneurs. D'après les résultats obtenus les eaux superficielles et souterraines de la vallée de la Soummam sont affectées par une contamination par les composés azotés essentiellement par les nitrates. Les fortes concentrations sont dues à des activités anthropiques telles que l'utilisation d'engrais, les rejets de polluants organiques et les rejets domestiques.

Le modèle hydrodynamique a subi une nouvelle amélioration dans cette étude afin d'améliorer sa performance dans les prévisions futures. Son calage en 2021 est basé sur l'ajustement des perméabilités et des niveaux piézométriques afin de rapprocher les niveaux piézométriques calculés à ceux mesurés en mai 2021. Les résultats montrent une bonne corrélation. Quant aux simulations en régime transitoire, elles ont été entreprises sur la base de deux paramètres, à savoir la durée de simulation et le volume d'eau pompée où il a été estimé à 45 Million m^3 /an en 2021 ; 49,19 Million m^3 /an en 2030 et 98,38 Million m^3 /an en 2050.

Les résultats des simulations numériques issus des trois scénarios ont montré une faible variation des niveaux piézométriques ne dépassant pas 2 m. une variation significative pendant les trois scénarios est enregistrée dans le puits Mouzhaoui qui est localisé à la sortie de la zone modélisée. Une stabilisation dans les niveaux piézométriques est remarquée dans les trois scénarios aux puits EAC5 ; F. Amzal 2 ; D. Massaoudi ; O. Ghir ; F. Moustache ; Hakim ; Fetissan 3 ; Remila et O.A. Kader. Pendant les trois scénarios, les puits L'abreuvoir, Fetissan 1, Fetissan 2, Hakim et M. Ahcen présentent des fluctuations. Les deux puits L'abreuvoir et Fetissan 1 présentent une diminution dans le premier scénario simulée respectivement à 0,01 et 0,04 m et une stabilisation dans le deuxième et troisième scénario. Par contre, le puits Fetissan 2 présente une stabilisation dans le premier et le deuxième scénario et une légère diminution dans le troisième scénario simulée à 0,01 m. Les deux puits Hakim et M. Ahcen présentent une augmentation simulée respectivement à 0,02 et 0,03 m dans le premier scénario et une stabilisation dans le deuxième et le troisième scénario. Une diminution pendant les trois scénarios est remarquée aux puits F. Amzal 1 avec 0,01 m dans les trois scénarios, Souissi avec 0,03 ; 0,02 et 0,02 m, F. Azzoug avec 0,45 ; 0,36 et 0,34 m, S. Salem avec 0,13 ; 0,09 et 0,08 m, T. Hamza 4 avec 0,13 ; 0,08 et 0,08 m, Djamaa avec

0,24 ; 0,15 et 0,36 m, T. Hamza 2 avec 0,02 ; 0,01 et 0,01 m, Ramdani avec 0,19 ; 0,1 et 0,12 m, T. Hamza 1 avec 0,16 ; 0,08 et 0,08 m, SIMAF avec 0,52 ; 0,28 et 0,29 m, Mouzhaoui avec 1,05, 0,32 et 0,29 m, Saidj avec 0,44 ; 0,21 et 0,14 respectivement dans le premier, le deuxième et le troisième scénario.

Le bilan d'eau montre que l'alimentation de la nappe se fait essentiellement à partir de la rivière, elle représente presque 45% du total des apports d'eau arrivant à la nappe en 2021, 2030 et 2050. Ils ont mis en évidence la relation entre la nappe et la rivière où la rivière alimente la nappe durant la période des hautes eaux. D'autre part, l'alimentation latérale à partir des massifs environnants des rives gauche et droite présente 38% du total des apports en 2021, 2030 et 2050, ce qui indique l'importance de ces limites à l'alimentation de la nappe des alluvions. Cependant, les termes des flux sortants ont été présentés par le niveau constant avec environ 89 % du volume sortant total.

Par ailleurs, le modèle du transport des nitrates a pour but de suivre l'évolution de la dispersion des nitrates au sein de l'aquifère de la vallée de la basse Soummam. Les résultats révèlent une variation modérée à faible dans les concentrations au cours des trois scénarios simulés et cela dans la majorité des puits sélectionnés. Exceptés les puits Remila et de Saidj, qui présentent une variation importante en raison de leur emplacement dans l'extrême sud-Ouest et nord-est de la zone modélisée où l'effet de frontière est soupçonné de générer une instabilité numérique dans le calcul des concentrations.

En effet, les puits Remila et Saidj sont les plus réactifs en termes de variation des concentrations en nitrates. Le puits Remila présente une augmentation significative simulée respectivement à 14,7 ; 1,8 et 10,8 mg/L pendant les trois scénarios. Au moment où le puits Saidj présente une diminution simulée à 19,9 et 4,5 mg/L dans le premier et le deuxième scénario et une augmentation simulée à 7,6 mg/L dans le troisième scénario.

Par contre, dans les puits Fetissan1 ; EAC5 ; F. Amzal 2 ; M. Ahcen ; Azzoug ; Souissi ; L'abreuvoir ; S. Salam ; Mendi ; Hocini ; Cevital et Pépinière les concentrations en nitrates demeurent stables dans les trois scénarios. Les puits Fetissan 2 ; Fetissan 3 ; O.A. Kader ; F. Amzal 1 ; D. Massaoudi ; F. Moustache ; Hakim ; O. Ghir ; T. Hamza 4 ; Djamaa ; T. Hamza 2 ; Ramdani ; T. Hamza 1 ; SIMAF et Mouzhaoui présentent des fluctuations dans les trois scénarios. Les puits Fetissan 2 ; O. Ghir ; T. Hamza 1 et Fetissan 3 présentent une stabilisation pendant le premier et le deuxième scénario et pendant le troisième une augmentation est relevée dans les puits Fetissan 2 et O. Ghir simulée respectivement à 0,5 et

0,1 mg/L et une diminution dans les puits T. Hamza 1 et Fetissan 3 simulée respectivement à 0,6 et 3,8 mg/L. Les deux puits F. Amzal 1 et Ramdani montrent une augmentation dans le premier scénario simulée respectivement à 1 et 0,4 mg/L, une diminution dans le deuxième scénario simulée respectivement à 1,4 et 0,2 mg/L et une stabilisation dans le troisième scénario. Les puits Hakim et F. Moustache présentent une diminution simulée respectivement à 2,9 et 2 mg/L pendant le premier et à 1 et 0,6 mg/L pendant le deuxième scénario et une augmentation simulée à 0,5 mg/L pendant le troisième scénario. Le puits D. Massoudi présente une augmentation simulée à 2,3 mg/L en premier scénario et une diminution simulée respectivement à 0,7 et 0,1 mg/L en deuxième et troisième scénario. Une diminution est remarquée au puits T. Hamza 4 simulée respectivement à 2,6 et 0,2 mg/L et pendant le premier et le troisième scénario avec une augmentation simulée à 0,3 mg/L en deuxième scénario. Dans le puits Djamaa une diminution est présente à 0,7 ; 0,3 et 0,2 mg/L pendant les trois scénarios. Une augmentation est remarquée à 0,2 mg/L dans le puits T. Hamza 2 durant le premier scénario avec une stabilisation successive dans le deuxième et troisième scénario. Le puits SIMAF présente une augmentation simulée respectivement à 0,1 et 0,4 mg/L dans le premier et troisième scénario et une stabilisation dans le deuxième scénario. Enfin, le puits Mouzhaoui présente une augmentation simulée à 0,9 et 0,1 mg/L dans le premier et deuxième scénario et une diminution simulée à 0,2 mg/L durant le troisième scénario.

La modélisation couplée du modèle hydrodynamique et du modèle du transport des nitrates indique que la rivière et les axes d'alimentation latérale sont les principaux facteurs contrôlant le niveau piézométrique et le transport et la dispersion des nitrates.

La modélisation couplée permet d'enrichir davantage la gestion des ressources en eau de la vallée de la Soummam incluant la disponibilité de l'eau, et la qualité de ces ressources. Comme perspectives de recherches, nous suggérons de poursuivre les investigations par :

- L'identification des sources de pollution à l'aide d'analyses isotopiques sur l'eau de surface et l'eau souterraine afin de pouvoir déterminer l'origine de l'azote N et instaurer des périmètres de protection des captages d'eau.
- L'analyse des sols et des sédiments afin de comprendre les mécanismes d'adsorption et de relargage des polluants entre l'eau, le sol et les sédiments.
- L'analyse des éléments traces métalliques dans les eaux de surface et les eaux souterraines afin de confirmer l'impact des pratiques agricoles de par leur présence dans les engrais et les pesticides.

- L'établissement des prévisions des teneurs en nitrates dans la rivière, les flux d'alimentation latérale et la pluie, pour une meilleure performance du modèle de transport des nitrates.
- Le calcul de l'indice de biodégradabilité des nitrates et les réactions chimiques au sein de l'aquifère afin de pouvoir obtenir des meilleures prévisions à long terme.
- Le couplage des modèles des pluies-débits avec les modèles hydrodynamiques et les modèles de transport afin de mieux calculer et quantifier les entrées et les sorties de système aquifère.
- Opter pour les agroécosystèmes dans lesquels on utilise le moins possible les produits chimiques polluants comme l'agroforesterie où le couvert végétal est quasi permanent avec une bio-fertilisation.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

Adhikary, P.P., Chakraborty, H., Kamble, K. (2010). Assessment of groundwater pollution in West Delhi, India using geostatistical approach. *Environmental Monitoring and Assessment* 167 : 599–615 . <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1076-5>.

Agence du Bassin hydrographique (Algérois-Soummam-Hodna) (2001). 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).

AHS (Agence de bassin Algérois - Hodna – Soummam) (2003) - Les carnets de l'agence, N°03, Alger, 38 p.

Aissaoui, M. (2018). Caractérisations hydro-chimiques des eaux de l'oued Seybouse et ses affluents dans la région de Guelma- Quantification du degré de la pollution. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 162p.

Angelopoulos, K., Spiliopoulos, I.C., Mandoulaki, A., Theodorakopoulou, A., Kouvelas A. (2009). Groundwater nitrate pollution in northern part of Achaia Prefecture. *Desalination*, 248 (1-3) : 852-858. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.11.007>.

ANRH (2004). Base de données des forages sud. Digital database, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Hydrogeology Department, Algiers, Algeria.

Baazi, H., Kalla, M., Tebbi, F.Z. (2020). Hydrochemical Characterisation of Groundwater Quality: Merdja Plain (Tebessa Town, Algeria). *Civil Engineering Journal* 6 (2):318-325. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091473> .

Bekkoussa, S., Bekkoussa, B., Taupin, J.D., Patris, N., Meddi, M. (2018). Groundwater hydrochemical characterization and quality assessment in the Ghriss Plain basin, northwest Algeria. *Journal of Water Supply Research and Technology—AQUA*. 67 (5):jws2018013. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.013> .

Bencini, A., Ercolanelli, R., Sbaragli, A., Verrucchi, C. (1993). Groundwaters of Florence (Italy): Trace element distribution and vulnerability of the aquifers. *Environmental Geology* 22 : 193–200 <https://doi.org/10.1007/BF00767403>.

Bennabi, M.S. (1985). Contribution à l'étude hydrogéologique de la Plaine Alluviale de l'Oued Sahel-Soummam. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, France. 156 p.

- Bartzas, G., Tinivella, F., Medini, L., Zaharaki, D., Komnitsas, K. (2015). Assessment of groundwater contamination risk in an agricultural area in north Italy. *Information Processing in Agriculture* 2(2): 109-129. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.06.004> .
- Bétier, G., Royer, L., Termier, H., Lafitte, R. (1951). Carte géologique détaillée de Sidi Aich, feuille N°46 (1/50 000e). Service géologique de l'Algérie, Alger.
- Bétier, G. (1936). Carte géologique détaillée de Bougie, feuille n°26 (1/50000°). Service géologique de l'Algérie, Alger.
- Boyle, D.P., Gupta, H.V., Sorooshian, S., (2000). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research* 36(12) : 3663-3674. <https://doi.org/10.1029/2000WR900207>.
- CENEAP. (2012). Rapport sur les volumes des eaux usées domestiques et lieu des décharges publiques. Centre National d'Etudes et d'Analyses pour la Population et le Développement, 34p. Alger.
- CGG-Compagnie Générale de Géophysique. (1969-1970). Etude hydrogéologique par prospection électrique et sismique dans la vallée de la Soummam, Rapport, 56p, Alger.
- Chabani, A., Bekkouche, A., Abdelaziz, Y. (2009). Utilisation de modèles numériques pour simuler les processus d'écoulement et de transport dans les eaux souterraines. Colloque International Sols Non Saturés et Environnement « UNSATlemcen09 ». Tlemcen, 27 et 28 Octobre 2009.
- Chapman, D., Kimstach, V., World Health Organization, UNESCO & United Nations Environment Programme. (1996). *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring* in Deborah Chapman, 2nd ed. E & FN Spon, London: behalf of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, World Health Organization, United Nations Environment Programme. 59-126 <https://iris.who.int/handle/10665/41850>.
- Chapman, S.W., Parker, B.L., (2005). Plume persistence due to aquitard back diffusion following dense nonaqueous phase liquid source removal or isolation. *Water Resources Research* 41 (12): W12411. <https://doi.org/10.1029/2005WR004224>.

- Clinckx, C. (1973). Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de la basse Soummam (Sidi Aich - Béjaïa), N°74.HYG.02. RS, Direction des Etudes de Milieu et de la Recherche Hydraulique (DEMRH), Alger, p. 80.
- DSA. (2018). rapport sur les quantités des engrais et des produits phytosanitaires (Fichiers Excel). Direction de service agricole de Béjaïa.
- Direction de l'Environnement de Béjaïa. (2007). Plan de wilaya de gestion des déchets spéciaux, rapport technique, 19p.
- Direction de l'Environnement de Béjaïa. (2015). Liste des détenteurs de pesticides périmes au niveau de la wilaya de Béjaïa, rapport technique, 2p.
- Eckhardt, K., Arnold, J.G., (2001). Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology* 251(1-2): 103-109. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00429-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00429-2).
- El bouqdaoui, K., Aachib. M., Kholtei. S., Blaghen, M. (2009). Modélisation de la pollution par les nitrates de la nappe de Berrechid, au Maroc. *Afrique SCIENCE* 05(1) : 99 - 113. <https://doi.org/10.4314/afsci.v5i1.61711>.
- Ficheur, E. (1891). Stratigraphie, descriptions régionales 2ème série, N° 01 : la Kabylie du Djurdjura, Bulletin du Service de la carte géologique de l'Algérie, p. 407. Alger.
- Freitas, J.G., Rivett, M.O., Roche, R.S., Durrant, M., Walker, C., Tellam, J.H. (2015). Heterogeneous hyporheic zone dechlorination of a TCE groundwater plume discharging to an urban river reach. *Science of The Total Environment* 505:236–252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.083>.
- Gao, H., Lin, J., Li. W., Hu, Z., Zhang, Y. (2010). Formation of shaped barium sulfate-dye hybrids: waste dye utilization for eco-friendly treatment of wastewater. *Environmental Science and Pollution Research* 17:78–83. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0249-7>.
- Gikas, G.D., Yiannakopoulou, T., Tsihrintzis, V.A. (2006a). Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin. *Environmental Modeling and Assessment* 11:219–233. <https://doi.org/10.1007/s10666-005-9017-3>.
- Gikas, G.D., Yiannakopoulou, T., Tsihrintzis, V.A. (2009a). Hydrodynamic and nutrient modeling in a Mediterranean coastal lagoon. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 44(13):1400–1423. <https://doi.org/10.1080/10934520903217336>.
- Golmohammadi, G., Prasher, S.O., Madani, A., Rudra, R.P. (2014). Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology* 1(1):20–39, <https://doi.org/10.3390/hydrology1010020>.

Goody, D.C., Stuart, M.E., Lapworth, D.J., Chilton, J.P., Bishop, S., Cachandt, G., Knapp, M., Pearson, T. (2005). Pesticide pollution of the Triassic Sandstone aquifer of South Yorkshire. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 38 (1): 53-63. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/04-012>.

Habiche, J. (2002). La dynamique de la vie- l'oxygène de l'eau, Fiche technique appartient au CAHIER 2002 INDICATEURS édité par le GIP Loire Estuaire, 8p, France.

Hamed, Y., Awad, S., Ben Sâad, A. (2013). Nitrate contamination in groundwater in the Sidi Aïch–Gafsa oases region, Southern Tunisia. *Environmental Earth Sciences* 70(5) : 2335-2348. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2445-5>.

Hussain, G., Alquwaizany, A., Al-Zarah., A. (2010). Guidelines for Irrigation Water Quality and Water Management in The Kingdom of Saudi Arabia: An Overview. *Journal of Applied Sciences* 10: 79-96. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.79.96> .

IBGE- Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, (2005). Qualité physico-chimique et chimique des eaux de Surface : cadre général 4, Rapport Final, 58p, Bruxelles.

Jiang, Y., Somers, G. (2009). Modeling effects of nitrate from non-point sources on groundwater quality in an agricultural watershed in Prince Edward Island, Canada. *Hydrogeology Journal* 17: 707–724. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0390-2>.

Jmal, I., Ayed, B., Boughariou, E. Allouche, N. Saidi, S. Hamdi, M. Bouri, S. (2017). Assessing groundwater vulnerability to nitrate pollution using statistical approaches: a case study of Sidi Bouzid shallow aquifer, Central Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences* 10 : 364 <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3143-5>.

Journal Officiel de la République Algérienne. (2011). Arrêté interministériel du 18 Rabie Ethani 143é correspondant au 23 mars 2011 : Objectifs de qualité des eaux superficielles et souterraines destinées à l'alimentation en eau potable des populations, 4p.

Journal Officiel de la République Algérienne. (2012). Arrêté interministériel du 8 Safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation, 4p.

Kazakis, N., Matiatos, I., Ntona, M.M., Bannenberg, M., Kalaitzidou, K., Kaprara, E., Mitrakas M., Ioannidou, A., Vargemezis, G., Voudouris, K. (2020). Origin, implications and management strategies for nitrate pollution in surface and ground waters of Anthemountas

basin based on a $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ isotope approach. *Science of the Total Environment*. 724. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138211>.

Kemoukh, S. (2007). Dégénération de la qualité des eaux du barrage de zerdezas suite à une pollution naturelle w.de Skikda. Mémoire de magister, Univ. Batna. Batna.117 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. Mémoire de magister, 188p, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.

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. Thèse de doctorat, 454p, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.

Kessasra, F., Benabes, D., Seraoui, S., Chetibi, N., Mesbah, M., Khaled-Khodja, S., Foughalia, A. (2021). Groundwater flow and chloride transport modeling of the alluvial aquifer of lower Soummam Valley, Béjaïa, North-East of Algeria. *Journal of African Earth Sciences* 173. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.104023>.

Kessasra, F., Mesbah, M., Bendjoudi, H. (2014). Modélisation des écoulements souterrains dans les alluvions de la basse vallée de la Soummam (Nord Est Algérien). *Bulletin du Service Géologique National* 25(2) :1-18 Alger.

Kessasra, F., Mesbah, M., Khemissa, Z., Bouab, N., Khaled-Khodja, S., Lamari, H. (2017). Combined hydrogeological and nitrate modeling to manage water resources of the middle Soummam aquifer, North-East of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 10(16): 1–20. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3160-4>.

Khedidja, A., Boudoukha, A. (2012). Risk assessment of agricultural pollution on groundwater quality in the high valley of Tadjenanet-Chelghoum Laid (Eastern Algeria). *Desalination and Water Treatment* 52(22-24): 1-10. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.714521>.

Kim, K.R., Owens, G., Kwon, S.I., So, K.H., Lee, D.B., Ok, Y.S. (2011). Occurrence and environmental fate of veterinary antibiotics in the terrestrial environment. *Water, Air, & Soil Pollution* 214: 163–174. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0412-2>.

Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5: 89-97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>.

Larose-Charrette, D. (2000). Modélisation hydrogéologique régionale des aquifères libres de la MRC de Portneuf. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M. Sc.) en Sciences de la Terre. INRS-Géoresources, Université du Québec, Canada. 326 p.

Legates, D. R., McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1): 233-241.

Leikine, M. (1971). Etude géologique des Babor occidentaux (Algérie). Thèse de doctorat sciences naturelles. Faculté des Sciences de l'Université de Paris, France, 536 p.

Lerolle, Y. (1975). Alimentation en eau de Béjaïa et sa zone industrielle : Modèle mathématique, rapport n° 2, DEMRH, Rapport 43p.

Liechti, P., Frutiger, A., Zobrist, J. (2004). Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEPF), Berne, Rapport, 63p.

Mallya, C.L., Rwiza, M.J. (2021). Influence of land use change on nitrate sources and pollutant enrichment in surface and groundwater of a growing urban area in Tanzania. *Environmental Earth Sciences* 80 : 111. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09386-z> .

Mastrocicco, M., Colombani, N., Palpacelli, S., Castaldelli G. (2011). Large tank experiment on nitrate fate and transport: the role of permeability distribution. *Environmental Earth Sciences* 63 : 903–914. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0759-0>.

Meneroud, J.P., Rognon, P. (1970). Carte géologique de la vallée de la Soummam.

Miotlinski, K. (2008). Coupled Reactive Transport Modeling of Redox Processes in a Nitrate-Polluted Sandy Aquifer. *Aquatic Geochemistry* 14:117–131. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9028-1>.

Moeck, C., Affolter, A., Radny, D., Dressmann, H., Auckenthaler, A., Huggenberger, P., Schirmer, M. (2017a). Improved water resource management for a highly complex environment using three-dimensional groundwater modelling. *Hydrogeology Journal* 26:133–146. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1640-y>.

- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(3): 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- Mouni, L., Hamid Arkoub, D. M., Moussaceb, K. (2009). Etude et caractérisation physico-chimique des eaux de l'oued Soummam (Algerie). *Sécheresse* 20(4): 360-366.
- Musolff, A., Leschik, S., Reinstorf, F., Strauch, G., Schirmer, M. (2010). Micropollutant loads in the urban water cycle. *Environ. Sci. Technol.* 44(13):4877-83. <https://doi.org/10.1021/es903823a>.
- Neal, C., Jarvie, H.P., Howarth, S.M., Whitehead, P.G., Williams, R. J., Neal, M., Harrow, M., Wickham, H. (2000a). The water quality of the river Kennet: initial observations on a lowland chalk stream impacted by sewage inputs and phosphorus remediation. *Science of The Total Environment*. 251-252: 477-495.
- OFEV-Office fédéral de l'environnement. (2010). Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Analyses physico-chimiques, nutriments, Rapport, 46p, Berne. www.environnement-suisse.ch/uv-1005-f.
- ONM-Office Nationale de Météorologie de Béjaïa. (2021). Chroniques de précipitations et de températures aux stations d'Aéroport de Béjaïa (Fichiers Excel).
- OMS- World Health Organization (WHO). (2017). Guidelines for drinking water quality. Geneva.
- Orban, P., Brouyere, S., Battle-Aguilar, J. (2010). Regional transport modeling for nitrate trend assessment and forecasting in a chalk aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology* 118(1-2): 79-93. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2010.08.008>.
- Pittalisa, D.b., Carreya, R., Da Peloc, S., Carlettid, A., Biddauc, R., Ciduc, R., Celicob, F., Solera, A. and Ghiglieric, G. (2018). Hydrogeological and multi-isotopic approach to define nitrate pollution and denitrification processes in a coastal aquifer (Sardinia, Italy). *Hydrogeology Journal* 26(6): 2021-2040.
- PNE-Plan National de l'Eau. (2010). Réalisation de l'étude d'actualisation du Plan National de l'Eau (PNE), Rapport final, 38p.

- Psarropoulou, E.T., Karatzas, G.P. (2014). Pollution of nitrates-contaminant transport in heterogeneous porous media: a case study of the coastal aquifer of corinth, Greece. In *Global NEST Journal* 16(1):9-23.
- Richard, A. (2018). L'approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole au service de la qualité des eaux souterraines. L'expérience d'une démarche de co-conception avec et par les agriculteurs, Sciences agricoles, thèse de doctorat, Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, France, 245p.
- Rodier, J. (2009). L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Dunod, Paris.
- Rouabhia, A., Baali, F., Fehdi, C. (2010). Impact of agricultural activity and lithology on groundwater quality in the Merdja area, Tebessa, Algeria. *Arabique Journal of Geoscience* 3: 307–318. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0087-4>.
- Rufino, F., Busico, G., Cuoco, E. Darrah, T.H., Tedesco, D. (2019). Evaluating the suitability of urban groundwater resources for drinking water and irrigation purposes: an integrated approach in the Agro-Aversano area of Southern Italy. *Environmental Monitoring and Assessment* 191(12) : 768. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7978-y>.
- Semroud, B. (1981). Evolution pétrologique du complexe magmatique Néogène de la région de Béjaïa-Amizour. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 267p.
- Sener, E., Davraz, A. (2012). Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: The case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal* 21(3): 701–714. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0947-y>.
- Stamatis, G., Parpodis, K., Filintas, A. (2011). Groundwater quality, nitrate pollution and irrigation environmental management in the Neogene sediments of an agricultural region in central Thessaly (Greece). *Environmental Earth Sciences* 64(4):1081-1105. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0926-y>.
- Touhari, F., Mehaiguen, M., Messelmi, H. (2018). Evolution de la qualité des eaux des barrages dans le bassin du Haut Cheliff. *SAGEN* 2(1):41–57.

Townsend, A.R., Howarth, R.W., Bazzaz, F.A., Booth, M.S., Cleveland, C.C., Collinge, S.K., Dobson, A.P., Epstein, P.R., Holland, E.A., Keeney, D.R., et al. (2003). Human health effects of a changing global nitrogen cycle. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1(5): 240–246. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0240:HHEOAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0240:HHEOAC]2.0.CO;2) .

Troudi, N., Tzoraki, O., Melki, F., Zammouri, M. (2020). Assessment of groundwater quality for drinking purpose with special emphasis on salinity and nitrate contamination in the shallow aquifer of Guenniche (Northern Tunisia). *Environmental Monitoring and Assessment* 192:641. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08584-9> .

Wakida, F.T., Lerner, D.N. (2005). Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. *Water Research* 39 : 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.026>.

Zamiche, S., Fella, H., Demiai, A. (2018). Pollution of the quaternary aquifer of mitidja (algeria) nitrates: origins and impacts on the quality of water for human consumption. *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 10(1):113-131. <https://doi.org/10.4314/jfas.v10i1.8>.

Zouggaghe, F., Moali, A. (2009). Variabilité structurelle des peuplements de macro-invertébrés benthiques dans le bassin versant de la Soummam (Algérie, Afrique du Nord). *Revue d'Écologie (La Terre et La Vie)* 64(4) :305-321.

Site 1 :
https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/DZ1898RISformer_161020.pdf?language=en

Consulter le 09-09-2023.

Site 2 :
https://www.oieau.fr/ReFEA/fiches/AnalyseEau/Physico_chimie_PresGen.htm (Analyse physico-chimique) consulter le 07-02-2020.

Site 3 :
<https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2020/bejaia/valeurs/60402.html> (climatologie de l'année 2020 à Béjaïa) consulter le 04-10-2023.

Annexes

Annexe 1 : les niveaux piézométriques

Puits	NP : 05-2021	NP : 10-2021
Fetissan 1	77,5	75
Remila	71,53	69,69
Fetissan 2	75,44	74,17
Fetissan 3	72,43	72,4
O. A. Kader	43,93	42,46
EAC 5	27,35	ND
F. Amzal 1	22,82	19,95
F. Amzal 2	22,7	20,43
D. Massaoudi	17,08	17,68
F. Moustache	27,4	25,04
Hakim	20,83	19,64
M. Ahcen	23,27	22,2
O. Ghir	24,58	26,09
V. Ibezghiden	ND	25,57
F. Azzoug	15,35	14,9
Souissi	10,86	12,92
L'abreuvoir	11,22	ND
S. Salem	21,88	21,6
T. Hamza 4	19,17	18,35
Djamaa	9,6	8
T. Hamza 2	0,5	2,5
Ramdani	12,4	10,82
T. Hamza 1	12,49	10,91
SIMAF	4,32	2,04
Saidj	2,55	0,2
Mouzhaoui	0,76	0,5

ND : non disponible

Annexe 2. Les valeurs des températures dans les eaux souterraines

Puits forages et	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2011	Norme OMS, 2017
Fetissan 1	ND	ND	13,8	20,5	12,7	25	25
Remila	20,9	26	16,6	22,4	16,4		
Fetissan 2	ND	ND	14,4	21,3	15,3		
Fetissan 3	ND	ND	8,2	20,9	9,4		
O. A. Kader	ND	ND	9,3	19,9	10,5		
7villages	22,4	37,3	19,5	ND	ND		
EAC 4	21,2	SEC	SEC	SEC	SEC		
EAC 5	20,9	29,7	SEC	20,5	SEC		
Pépinière	ND	ND	20,7	19,3	21,3		
F. Amzal 1	19,7	21,8	19,5	20,3	19,2		
F. Amzal 2	ND	ND	18,3	21,5	18,1		
D. Massaoudi	ND	ND	19,2	21,2	18,7		
F. Moustache	ND	ND	SEC	18,5	19,8		
Hakim	ND	ND	20,7	18,7	20,4		
M. Ahcen	18	29,9	16,7	18,3	21,2		
O. Ghir	ND	ND	17,5	19,7	17,3		
V. Ibezghiden	ND	ND	18,7	ND	18,5		
F. Azzoug	ND	ND	20,3	18,6	19,8		
Souissi	16,7	27,8	17,4	19,7	17,8		
L'abreuvoir	ND	ND	17,8	18,5	ND		
Cevital	19,1	22,3	18,7	19,3	19,1		
S. Salem	ND	ND	20,5	20,7	21,8		
Hocini	ND	ND	22,5	18,8	21,3		
T. Hamza 4	ND	ND	17,7	21,2	18,1		
T. Hamza 3	ND	ND	18,2	ND	ND		
Djamaa	19,4	20,6	18,1	17,1	17,9		
T. Hamza 2	ND	ND	18,3	21,8	18,8		
Mendi	19,7	27	22,5	22,3	22,3		
Ramdani	17,5	20	17,3	17	18,5		
T. Hamza 1	ND	ND	18,1	20,3	18,5		
SIMAF	ND	ND	20,2	19,1	19,7		
Saidj	17,6	21,3	21,7	17,4	21,9		
Mouzhaoui	ND	ND	20,9	17,5	19,7		

ND : non disponible

Annexe 3. Les valeurs de potentiel d'hydrogène dans les eaux souterraines

Puits et forages	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2011	Norme OMS, 2017
Fetissan 1	ND	ND	7,26	7,19	7,7	6,5-9,5	--
Remila	8,35	7	6,99	7,41	7,73		
Fetissan 2	ND	ND	7,12	6,93	7,47		
Fetissan 3	ND	ND	7,51	7,45	8,09		
O.A. Kader	ND	ND	7,07	7,52	8,02		
7villages	8,25	6,67	8,15	ND	ND		
EAC 4	8,3	SEC	SEC	SEC	SEC		
EAC 5	8,57	7,21	SEC	7,43	SEC		
Pépinière	ND	ND	7,11	7,77	8,01		
F. Amzal 1	8,85	7,43	7,17	7,56	7,65		
F. Amzal 2	ND	ND	7,18	7,56	8,04		
D. Massaoudi	ND	ND	7,01	7,52	8		
F. Moustache	ND	ND	SEC	8,04	8,27		
Hakim	ND	ND	7,12	7,91	8,11		
M. Ahcen	8,04	7,16	7,06	7,72	7,75		
O. Ghir	ND	ND	7,97	8,36	8,6		
V. Ibezghiden	ND	ND	7,63	ND	8,08		
F. Azzoug	ND	ND	7,57	8,18	8,08		
Souissi	8,88	6,87	7,54	8,52	8,27		
L'abreuvoir	ND	ND	7,86	8,23	ND		
Cevital	8,55	7,27	7,36	7,66	8		
S. Salem	ND	ND	6,87	7,89	8,3		
Hocini	ND	ND	6,89	7,39	7,59		
T. Hamza 4	ND	ND	7,73	8,14	8,25		
T. Hamza 3	ND	ND	7,01	ND	ND		
Djamaa	9,09	7,27	7,17	7,57	7,79		
T. Hamza 2	ND	ND	7,19	8,1	7,71		
Mendi	8,31	7,08	7,32	7,77	7,89		
Ramdani	8,25	8,08	7,53	8,36	8,04		
T. Hamza 1	ND	ND	8,39	7,56	8,29		
SIMAF	ND	ND	7,4	7,16	7,8		
Saidj	8,63	6,89	7,9	7,91	7,79		
Mouzhaoui	ND	ND	7,05	7,33	7,72		

ND : non disponible

Annexe 4. Les valeurs de la conductivité électrique dans les eaux souterraines

Puits forages	et	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2011	Norme OMS, 2017
Fetissan 1		ND	ND	4300	2800	4900	2800 à 20°C	--
Remila		5792,9	7580,6	7600	6600	6800		
Fetissan 2		ND	ND	6900	5900	6600		
Fetissan 3		ND	ND	4900	4200	4600		
O.A. Kader		ND	ND	5100	5100	5020		
7villages		2230,27	2562,84	3100	ND	ND		
EAC 4		2899,62	SEC	SEC	SEC	SEC		
EAC 5		2164,14	2008,89	SEC	4200	SEC		
Pépinière		ND	ND	3600	3100	3400		
F. Amzal 1		2077,55	1606,5	1800	2100	3200		
F. Amzal 2		ND	ND	2000	2200	2700		
D. Massaoudi		ND	ND	2800	5100	2500		
F. Moustache		ND	ND	SEC	2400	2400		
Hakim		ND	ND	2900	2500	2700		
M. Ahcen		1681,92	1538,5	1800	2100	2300		
O. Ghir		ND	ND	700	700	1000		
V. Ibezghiden		ND	ND	1100	ND	1600		
F. Azzoug		ND	ND	500	600	900		
Souissi		437,41	422,45	600	500	1000		
L'abreuvoir		ND	ND	2500	2200	ND		
Cevital		2665,26	2289,6	2900	2600	2900		
S. Salem		ND	ND	2700	2800	1100		
Hocini		ND	ND	3400	3200	3400		
T. Hamza 4		ND	ND	700	900	1100		
T. Hamza 3		ND	ND	1300	ND	ND		
Djamaa		2069,73	2289,6	1800	2100	2100		
T. Hamza 2		ND	ND	1100	1100	1500		
Mendi		909,63	1179,57	1400	1300	1600		
Ramdani		1801,8	2424,36	1700	500	1900		
T. Hamza 1		ND	ND	1200	2100	1300		
SIMAF		ND	ND	2900	3300	6000		
Saidj		2165,03	1862,8	2070	2100	2400		
Mouzhaoui		ND	ND	2200	2000	2100		

ND : non disponible

Annexe 5. Les valeurs de l'oxygène dissous dans les eaux souterraines

Puits forages	et	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2011	Norme OMS, 2017
Fetissan 1		ND	ND	ND	ND	3,59	5	--
Remila		5,52	4,1	ND	ND	4,84		
Fetissan 2		ND	ND	ND	ND	3,58		
Fetissan 3		ND	ND	ND	ND	6,21		
O.A. Kader		ND	ND	ND	ND	8,87		
7villages		6,35	2,66	ND	ND	ND		
EAC 4		7,33	SEC	ND	ND	SEC		
EAC 5		5,46	2,83	ND	ND	SEC		
Pépinière		ND	ND	ND	ND	6,01		
F. Amzal 1		8,52	4,67	ND	ND	6,67		
F. Amzal 2		ND	ND	ND	ND	2,3		
D. Massaoudi		ND	ND	ND	ND	3,2		
F. Moustache		ND	ND	ND	ND	5,01		
Hakim		ND	ND	ND	ND	5,91		
M. Ahcen		4,59	5,07	ND	ND	7,24		
O. Ghir		ND	ND	ND	ND	4,2		
V. Ibezghiden		ND	ND	ND	ND	3,46		
F. Azzoug		ND	ND	ND	ND	5,75		
Souissi		2,69	3,26	ND	ND	2,65		
L'abreuvoir		ND	ND	ND	ND	ND		
Cevital		7,35	4,21	ND	ND	8,55		
S. Salem		ND	ND	ND	ND	9,05		
Hocini		ND	ND	ND	ND	2,15		
T. Hamza 4		ND	ND	ND	ND	2,11		
T. Hamza 3		ND	ND	ND	ND	ND		
Djamaa		5,59	4,21	ND	ND	5,42		
T. Hamza 2		ND	ND	ND	ND	6,16		
Mendi		3,59	5,27	ND	ND	7,11		
Ramdani		6	5,52	ND	ND	4,8		
T. Hamza 1		ND	ND	ND	ND	2,71		
SIMAF		ND	ND	ND	ND	9,15		
Saidj		6,24	4,33	ND	ND	6,46		
Mouzhaoui		ND	ND	ND	ND	8,83		

ND : non disponible

Annexe 6. Les valeurs des nitrates dans les eaux souterraines

Puits forages	et	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2011	Norme OMS, 2017
Fetissan 1		ND	ND	2,06	13,37	3,2	50	50
Remila		18,03	11,53	7,76	9,59	4,65		
Fetissan 2		ND	ND	3	1,25	3,07		
Fetissan 3		ND	ND	291,59	219,6	107,59		
O.A. Kader		ND	ND	66,35	0	49,48		
7villages		130,83	27,09	48,58	ND	ND		
EAC 4		58,73	SEC	SEC	SEC	SEC		
EAC 5		78,33	48,43	SEC	76,49	SEC		
Pépinière		ND	ND	123,59	129,97	145,93		
F. Amzal 1		81,38	14,35	117,51	96,59	57,47		
F. Amzal 2		ND	ND	9,01	0	34,05		
D. Massaoudi		ND	ND	0	0	0		
F. Moustache		ND	ND	ND	86,49	4,73		
Hakim		ND	ND	67,15	132,04	119,72		
M. Ahcen		21,89	45,04	34,36	36,43	34,78		
O. Ghir		ND	ND	1,43	2,15	0,9		
V. Ibezghiden		ND	ND	4,48	ND	20,97		
F. Azzoug		ND	ND	0	12,78	12,58		
Souissi		5,15	0	0	2,51	0,54		
L'abreuvoir		ND	ND	9,51	19,38	ND		
Cevital		4,26	1,83	0	0	0,94		
S. Salem		ND	ND	0	0	6,09		
Hocini		ND	ND	0	0	0		
T. Hamza 4		ND	ND	0	82,37	0,9		
T. Hamza 3		ND	ND	8,07	ND	ND		
Djamaa		3,94	4,12	0	40,6	27,96		
T. Hamza 2		ND	ND	43,6	1,07	31,57		
Mendi		14,8	1,56	0,39	14,76	1,75		
Ramdani		4,71	21,26	0,08	0,53	2,48		
T. Hamza 1		ND	ND	0	3,41	2,39		
SIMAF		ND	ND	0	0	0		
Saidj		14,67	21,08	26,55	195,82	119,27		
Mouzhaoui		ND	ND	18,61	63,39	84,44		

ND : non disponible

Annexe 7. Les valeurs des nitrites dans les eaux souterraines

Puits et forages	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2011	Norme OMS, 2017
Fetissan 1	ND	ND	0	0,15	0,004	0,2	3
Remila	2,1	0,03	0,03	0,05	0,006		
Fetissan 2	ND	ND	0,03	0,16	0,004		
Fetissan 3	ND	ND	0	0,15	0,003		
O.A. Kader	ND	ND	0,03	0	0,005		
7villages	0,004	0	0,03	ND	ND		
EAC 4	0	SEC	SEC	SEC	SEC		
EAC 5	0	0,13	SEC	0,18	SEC		
Pépinière	ND	ND	0,02	0,13	0,004		
F. Amzal 1	0,0008	0,0008	0	0	0,005		
F. Amzal 2	ND	ND	0	0,03	0,006		
D. Massaoudi	ND	ND	0	0,007	0,014		
F. Moustache	ND	ND	ND	0,19	0,006		
Hakim	ND	ND	0,0008	0,53	0,005		
M. Ahcen	0,02	0,04	0	0,15	0,004		
O. Ghir	ND	ND	0	0,04	0,019		
V. Ibezghiden	ND	ND	0,0008	ND	0,005		
F. Azzoug	ND	ND	0	0,14	0,005		
Souissi	0,1	0,004	0	0,26	0,003		
L'abreuvoir	ND	ND	0	0,15	ND		
Cevital	0,03	0,03	0	0,19	0,011		
S. Salem	ND	ND	0,01	0,13	0		
Hocini	ND	ND	0,12	0,24	0		
T. Hamza 4	ND	ND	0,02	0,17	0,005		
T. Hamza 3	ND	ND	0	ND	ND		
Djamaa	0	0	0	0,14	0,004		
T. Hamza 2	ND	ND	0,06	0,16	0,004		
Mendi	0,02	0,05	0	0,13	0,019		
Ramdani	0,03	0,0008	0	0,02	0,005		
T. Hamza 1	ND	ND	0,07	0,27	0,008		
SIMAF	ND	ND	0	0,12	0,004		
Saidj	0	0,03	0	0,11	0,005		
Mouzhauoui	ND	ND	0,86	0,03	0,015		

ND : non disponible

Annexe 8. Les valeurs de l'ammonium dans les eaux souterraines

Puits forages	et	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2011	Norme OMS, 2017
Fetissan 1		ND	ND	0,01	0,15	0	0,5	0,5
Remila		0	0	0,01	0,19	0		
Fetissan 2		ND	ND	0,08	0,09	0		
Fetissan 3		ND	ND	0,14	0,19	0		
O.A. Kader		ND	ND	0	0	0,009		
7villages		0	0,17	0	ND	ND		
EAC 4		0	SEC	SEC	SEC	SEC		
EAC 5		0	0	SEC	0,11	SEC		
Pépinière		ND	ND	0,03	0,06	0		
F. Amzal 1		0	0	0,07	0	0,008		
F. Amzal 2		ND	ND	0	0,69	0,39		
D. Massaoudi		ND	ND	0	0,53	0,92		
F. Moustache		ND	ND	ND	0,04	0		
Hakim		ND	ND	0	0,19	0,36		
M. Ahcen		0	0	0	0,07	0		
O. Ghir		ND	ND	0	0	0		
V. Ibezghiden		ND	ND	0	ND	0		
F. Azzoug		ND	ND	0	0,02	0		
Souissi		0	0	0	0,02	0		
L'abreuvoir		ND	ND	0	0	ND		
Cevital		0,12	0,95	0	0,74	1,65		
S. Salem		ND	ND	0	0,04	0		
Hocini		ND	ND	0,43	1,02	0,92		
T. Hamza 4		ND	ND	0	0,01	0		
T. Hamza 3		ND	ND	0	ND	ND		
Djamaa		0	0	0	0,06	2,03		
T. Hamza 2		ND	ND	0,03	0,1	0,03		
Mendi		0	0,13	0	0,05	0,01		
Ramdani		0	0,002	0	0	0		
T. Hamza 1		ND	ND	0,07	0,19	0		
SIMAF		ND	ND	0,15	0,14	0,16		
Saidj		0	0,12	0	0	0,08		
Mouzhaoui		ND	ND	0	0	0		

ND : non disponible

Annexe 9. Les valeurs des ortho-phosphates dans les eaux souterraines

Puits et forages	Mai-19	Sept-19	Oct-20	Mai-21	Oct-21	Norme Algérienne, 2011	Norme OMS, 2017
Fetissan 1	ND	ND	0	0,02	0,0079	5	--
Remila	0	0,05	0	0,01	0,0079		
Fetissan 2	ND	ND	0	0,001	0,0079		
Fetissan 3	ND	ND	0	0,02	0,0033441		
O.A. Kader	ND	ND	0,007	0,01	0		
7villages	0	0	0	ND	ND		
EAC 4	0	SEC	SEC	SEC	SEC		
EAC 5	0	0,03	SEC	0,0001	SEC		
Pépinière	ND	ND	0	0	0,0044		
F. Amzal 1	0	0,08	0,001	0,01	0		
F. Amzal 2	ND	ND	0,001	0,01	0,012		
D. Massaoudi	ND	ND	0	0,012	0,0079		
F. Moustache	ND	ND	ND	0,01	0,017		
Hakim	ND	ND	0,004	0,09	0,00795664		
M. Ahcen	0,002	0,05	0,003	0,003	0		
O. Ghir	ND	ND	0,003	0,01	0,0056		
V. Ibezghiden	ND	ND	0	ND	0,034		
F. Azzoug	ND	ND	0,003	0,01	0,013		
Souissi	0,01	0,04	0,002	0,01	0,0033		
L'abreuvoir	ND	ND	0,002	0,02	ND		
Cevital	0	0,04	0,0001	0,02	0		
S. Salem	ND	ND	0	0,001	0		
Hocini	ND	ND	0	0,002	0		
T. Hamza 4	ND	ND	0,02	0,01	0,019		
T. Hamza 3	ND	ND	0,004	ND	ND		
Djamaa	0	0,23	0,0001	0,0001	0		
T. Hamza 2	ND	ND	0,01	0,03	0,0044		
Mendi	0	0,04	0,001	0,001	0,011		
Ramdani	0,0002	0,27	0,0001	0,02	0,002		
T. Hamza 1	ND	ND	0,04	0,07	0,052		
SIMAF	ND	ND	0,006	0	0		
Saidj	0	0,06	0,001	0,02	0,014		
Mouzhauoui	ND	ND	0,002	0,01	0		

ND : non disponible