



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER EN SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Filière: Géologie

Option: Hydrogéologie

Par:

Belkadi Yasmine

et

Benkouider Silia

Thème :

**Salinisation des aquifères littoraux, identification par
divers outils de prospection : cas de la nappe alluviale du
Bas Sébaou
(Tizi-Ouzou)**

Soutenu publiquement le 23 / 09 / 2023 devant le Jury composé de :

M. Brahmi B.	MACA (UMMTO)	Président
M. Drouiche A/M.	MCB (UMMTO)	Examineur
M. kadache R.	MCA (UMMTO)	Promoteur
M. Bouadjela M'h.	Ingénieur (ANRH)	Co-Promoteur

.....

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude envers Dieu pour nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce modeste travail. Nous espérons sincèrement qu'il soit estimable et réussi.

Nous tenons à remercier notre promoteur M. Kardache R. d'avoir accepté de nous encadrer durant la réalisation de ce mémoire, pour sa patience, sa disponibilité, et aussi notre Co-promoteur M. Bouadjela M'h pour tous les conseils.

Nous remercions M. Brahmi B. de nous avoir accordé l'honneur de présider le jury de notre soutenance.

Nos remerciements vont aussi à M. Drouiche A. d'avoir accepté de juger notre travail en qualité d'examineur.

Que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué par leurs conseils, leurs encouragements et leur assistance à l'aboutissement de ce travail, trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

.....

.....

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

Mon mari

Mes frères et sœurs

Et à tous mes amis (es) sans exception

À tous ceux que j'aime et qui
m'aiment.

Silia.

.....

.....

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à mes chers parents ma mère et mon père Pour
leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements

A mes frères et sœurs

A ma grande mère

A mes amis (es) et mes camarades.

Yasmine.

.....

Résumé :

Notre travail vise à réaliser une analyse qualitative approfondie des eaux souterraines de la nappe alluviale du bas Sébaou, dans le but principal d'identifier la présence ou non du biseau salé au niveau de la nappe.

Cette étude hydrochimique a permis de caractériser la composition chimique des eaux souterraines. L'une des conclusions majeures de notre recherche est la confirmation que la nappe alluviale subit une intrusion marine. Cet état de fait est accentué par le bas niveau piézométrique, en raison de la sécheresse et la surexploitation, cela entraîne une pollution de l'eau douce de la nappe par l'eau salée de la mer, ce qui a des implications importantes sur la qualité et la gestion durable de cette ressource.

Mots-Clés : Bas Sébaou, nappe alluviale, eaux souterraines, intrusion marine, étude hydrochimique.

Abstract:

Our work aims to carry out a comprehensive qualitative analysis of the groundwater in the lower Sébaou alluvial aquifer, with the primary objective of identifying the presence or absence of a saltwater wedge within the aquifer. This hydrochemical study has allowed us to characterize the chemical composition of the groundwater. One of the major conclusions of our research is the confirmation that the alluvial aquifer is experiencing a marine intrusion. This situation is exacerbated by the low piezometric level due to drought and overexploitation, leading to the contamination of the freshwater in the aquifer by seawater. This has significant implications for the quality and sustainable management of this resource.

Keys words : Lower Sébaou, alluvial aquifer, groundwater, saltwater intrusion, hydrochemical study.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	2
1 Cadre géographique et administratif de la zone d'étude :.....	2
2 L'aspect socio-économique de la zone d'étude :.....	5
2.1 Potentiels humains :.....	5
2.2 Potentiels agricoles :.....	5
2.3 Potentiel en sol de la wilaya de Boumerdes :.....	5
3 Cadre hydrologique de la zone d'étude :.....	5
4 Paramètres hydromorphométriques du sous bassin versant du Bas Sébaou :	7
5 Conclusion.....	8
CHAPITRE 2 : CADRE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	9
1 Introduction	9
2 Les grands ensembles géologiques de la chaîne des Maghrébides :.....	10
3 Cadre géologique local :.....	11
4 Les formations de l'aquifère du bas Sébaou (02-20 ANRH) :	12
4.1 Coupe géologique de la vallée du Bas Sébaou (Belhai et Al, 2008) :	12
5 Conclusion.....	13
CHAPITRE 3 : ETUDE DE LA NAPPE ALLUVIALE DU BAS SEBAOU.....	14
1 Introduction.....	14
2 Description de la nappe alluviale du Bas Sébaou :	14
3 L'état de la nappe alluviale bas Sébaou :.....	14
4 Equipement de la nappe en ouvrages de captage et en piézomètres :	15
5 Vulnérabilité de la nappe alluviale du bas Sébaou :.....	17
6 Conclusion.....	17

CHAPITRE 4 : ETUDE HYDRO-CLIMATOLOGIQUE.....	18
1 Introduction.....	18
2 La morphologie du bas Sébaou.....	18
2.1 Caractéristiques de la forme.....	18
2.1.1 La surface.....	18
2.1.2 Le périmètre.....	18
2.1.3 L'indice de capacité et de Gravelius KC.....	18
2.1.4 Dimension du rectangle équivalente.....	19
2.1.5 La courbe hypsométrique.....	20
a) La courbe hypsométrique.....	20
b) Le relief.....	22
2.1.6 Les altitudes caractéristiques	22
2.1.6.1 Altitude moyenne " H_{moy} "	22
2.1.6.2 Altitude médiane " $H_{méd}$ "	23
2.1.7 L'indice de pente globale " I_g ".....	23
2.1.8 Dénivelée spécifique " D_s ".....	23
2.1.9 L'indice de pente de roche " I_p ".....	24
3 Caractéristiques de réseau hydrographique.....	24
3.1 Hiérarchisation.....	24
3.2 Développement du réseau hydrographique.....	25
3.2.1 Densité de drainage " D_d ".....	25
3.2.2 Densité hydrographique " F ".....	26
3.2.3 Densité des talwegs élémentaires " F " (Aigoun C., 2014).....	26
3.2.4 Rapport de confluence " R_c " (Aigoun C., 2014)	26
4 Climatologie de la région d'étude.....	28
4.1 Etude de précipitations.....	28
4.2 Températures	29
4.2.1 Les Températures annuelles.....	29
4.2.2 Les Températures mensuelles	30

4.3	Humidité.....	31
4.4	Vitesse du vent.....	32
4.5	Evaporation.....	33
4.5.1	Evapotranspiration réelle et L'évapotranspiration potentielle	35
a)	Evapotranspiration réelle ETR.....	35
b)	Evapotranspiration potentielle ETP.....	35
4.5.2	Estimation de l'évapotranspiration potentielle L'ETP selon C.W.Thornthwaite (1948).....	35
5	Bilan simplifié selon Thornthwaite.....	36
6	Conclusion.....	40
CHAPITRE 5 : L'INTRUSION MARINE.....		41
1	Introduction.....	41
2	Généralités sur l'intrusion marine :	41
3	Causes de l'intrusion marine :	42
4	La remontée du niveau de la mer :	44
5	Pollutions diffuses par les activités anthropiques :	45
6	Mécanismes de l'intrusion marine :	45
7	Un aquifère côtier :	46
8	Salinité des eaux :	46
9	Sources possibles de minéralisation des eaux douces :	47
10	Facteurs déterminants le biseau salé :	47
10.1	Effet de l'exploitation :	47
10.2	Situation par rapport à la mer :	48
10.3	Alimentation de la nappe :	48
10.4	Hydrogéologie :	48
11	Approche hydrostatique :	48
12	Approche hydrodynamique :	50
13	Identification de l'intrusion marine :	51
13.1	Méthodes d'étude de l'intrusion marine :	51
13.1.1	La géophysique :	51
13.1.2	La Piézométrie :	51
13.1.3	La chimie des eaux :	51

14	Conclusion.....	52
	CHAPITRE 6 : CAMPAGNE PIEZOMETRIQUE.....	53
1	Introduction.....	53
2	Les moyens utilisés pour les mesures :.....	59
3	Comparaison entre le niveau statique en (avril 2022 et juillet 2023) :.....	63
4	Caractéristiques hydrodynamique	64
4.1	Les essais de pompages	64
4.1.1	La perméabilité	64
4.1.2	Coefficient d’emmagasinement	64
4.1.3	La résistivité	64
4.1.4	Débit de la nappe (A. Benamour, 1967) :.....	65
5	Conclusion.....	65
	CHAPITRE 7 : ETUDE HYDRO-CHIMIQUE.....	66
1	Introduction.....	66
2	Matériels et analyses :.....	66
3	Les paramètres physico-chimiques :.....	68
3.1	La température :.....	68
3.2	Le potentiel d’hydrogène pH :.....	68
3.3	La conductivité :.....	69
3.4	Le Résidu sec :.....	72
4	Les paramètres chimiques :.....	74
4.1	Le calcium Ca^{2+} :.....	74
4.2	Le magnésium Mg^{2+} :.....	76
4.3	Dureté totale TH :.....	77
4.4	Alcalinité TAC :.....	78
4.5	Bicarbonate HCO_3^- :.....	79
4.6	Les nitrates NO_3^-	80
4.7	Chlorure Cl^-	81
4.8	Le Sodium Na^+	84
4.9	Le Potassium K^+	86
4.10	Les sulfates SO_4^{2-} :.....	86
5	Facès chimique.....	88
5.1	Diagramme de Piper	88

6	Identifications des zones à risque d'intrusion marine dans la nappe alluviale du Bas Sébaou	89
7	Conclusion.....	90
	Conclusion générale.....	91
	Recommandations	91
	Références bibliographiques	93
	Annexe.....	95

LISTE DES ABREVIATIONS

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

HE : hautes eaux.

BV : bassin versant.

Ca : Calcium.

CE : Conductivité électrique.

Cl : Chlore.

HCO₃ : Bicarbonate.

K : Potassium.

Mg : Magnésium.

Na : Sodium.

NO₃ : Nitrate.

RS : résidu sec.

NP : niveau piézométrique.

NS : niveau statique.

OMK : oligo-mociéne kabyle.

OMS : l'Organisation mondial de la santé.

PZD : piézomètre de la rive droite.

PZG : piézomètre de la rive gauche.

SDEM : station de dessalement d'eau de mer.

SO₄ : Sulfates.

STEP : station d'épuration des eaux usées.

TAC : Titre alcalimétrique complet.

TDS : le total des solides dissous.

TH Ca⁺² : Titre Hydrotimétrique calcique.

TH Mg⁺² : Titre Hydrotimétrique magnésienne.

TH : Titre Hydrotimétrique.

µs/cm : micro siemens par centimètre.

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Situation de la région d'étude (Extrait de la carte topographique 1/500 000 de l'INCT).	2
Figure 2	Situation géographique du Bas Sébaou (Image satellitaire non traitée 202).	3
Figure 3	Situation géographique du bassin versant du Sébaou (In Yacoub, 2005 modifiée).	4
Figure 4	Les sous bassins versants de la vallée de Sébaou, (ANRH.2022).	7
Figure 5	Les différents domaines du Nord Algérie (coupe H.Haddoum, modifiée par Chabou, 2015).	9
Figure 6	Carte du Nord de l'Algérie dans le cadre géodynamique de la méditerranée occidentale (Boulin, 1986).	10
Figure 7	Coupe géologique de la vallée de Bas Sébaou 02-20 (Belhai et Al, 2008).	12
Figure 8	Cartes de situation des piézomètres (a) et des forages (b), (Aigoun. C. 2014).	15
Figure 9	Carte de situation des puits dans le Bas Sébaou, (Aigoun. C. 2014).	16
Figure 10	Courbe hypsométrique du sous bassin versant du Sébaou (bas Sébaou code 02-20).	21
Figure 11	Carte schématique du relief de basse et moyenne vallée de l'oued Sébaou (Aigoun C., 2014).	22
Figure 12	Carte du réseau hydrographique du sous bassin versant du bas Sébaou (Aigoun, 2014).	25
Figure 13	Nombre et longueur moyenne des talwegs du bassin versant du Sébaou (Aigoun, 2014).	27
Figure 14	Précipitations mensuelles de la station ANRH de Tizi-Ouzou, (1990-2012).	29
Figure 15	La température mensuelle de la station de Tizi-Ouzou, (1990-2012).	31
Figure 16	Humidité réenregistrée à la station de Tizi-Ouzou, (1990 -2012).	32
Figure 17	La rose des vents à l'échelle annuelle à Tizi-Ouzou 1913-1938 (Seltzer1946).	33
Figure 18	L'évaporation mensuelle enregistrée par le tube Piche de la station ANRH de Tizi-Ouzou, (1990-2012).	34
Figure 19	Schéma simplifié d'un aquifère libre côtier (Werner et al. 2013).	42
Figure 20	Exemple d'implantation de forages en bordure de mer (SIGES Bretagne, 2023).	43
Figure 21	Exemple d'exploitation d'un forage : pompe située sous le niveau de la mer (SIGES Bretagne, 2023).	44
Figure 22	Zone de transition dans une intrusion marine (Custodio, 2002).	46
Figure 23	Gammes de concentrations et terminologie (Hanor 2005)	47
Figure 24	Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon le principe de Ghyben-Herzberg.	49
Figure 25	Schéma hydrodynamique.	50

Figure 26	Situation des piézomètres du Bas Sébaou sur fond topographique l'échelle 1/50 000 (ANRH), 2005/2006	54
Figure 27	Situation des piézomètres de la campagne piézométrique du bas Sébaou (rive gauche, juillet 2023).	58
Figure 28	Situation des piézomètres de la campagne piézométrique du bas Sébaou (rive droite, juillet 2023).	58
Figure 29	Carte piézométrique du Bas Sébaou (juillet 2023).	59
Figure 30	L'évolution du niveau statique en hautes eaux en 2012-2021 (ANRH), 2022 et 2023 du bas Sébaou.	61
Figure 31	L'évolution du niveau statique en hautes eaux en 2022 et 2023 du bas Sébaou.	62
Figure 32	L'évolution de la conductivité électrique en fonction de la distance de l'exutoire du bas Sébaou, (juillet 2023).	72
Figure 33	Variation du résidu sec dans la nappe du Bas Sébaou 2023.	73
Figure 34	Carte de concentration de Ca^{2+} dans les eaux souterraines du bas Sébaou, (juillet 2023).	75
Figure 35	Carte de concentration de Cl^{-} dans les eaux souterraines du bas Sébaou, (juillet 2023).	82
Figure 36	L'évolution de la concentration des eaux souterraines en chlorure du Bas Sébaou 202.	83
Figure 37	Carte de concentration de Na^{+} dans les eaux souterraines du bas Sébaou, (juillet 2023).	85
Figure 38	Classification des échantillons d'eau selon Digramme de Piper 2023.	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Caractéristiques générales du sous bassin versant du Bas Sébaou (AIGOUNE.C. 1983).	7
Tableau 2	Les données nécessaires au tracé de la courbe hypsométrique (Aigoun C., 2014).	20
Tableau 3	Classification d'OROSTOM.	24
Tableau 4	Caractéristiques de la station de ANRH de Tizi-Ouzou.	28
Tableau 5	Répartition des pluies mensuelles de station de Tizi-Ouzou, (1990-2012).	28
Tableau 6	Températures moyennes mensuelles de la station de Tizi-Ouzou, (1990-2012).	30
Tableau 7	Température mensuelle de la station de Tizi-Ouzou, (1990 - 2012).	30
Tableau 8	Humidité moyenne mensuelle de la station de Tizi-Ouzou, (1990-2012).	31
Tableau 9	Répartition mensuelle des paramètres du vent et nombre de jours moyen de Siroco à Tizi-Ouzou, (1913-1938).	32
Tableau 10	Evaporation mensuelle enregistrée par le tube Piche de la station ANRH de Tizi-Ouzou, (1990-2012).	34
Tableau 11	Bilan hydrologique selon Thornthwaite station l'ANRH de Tizi-Ouzou, (1990-2012).	38
Tableau 12	Coordonnées et caractéristiques des puits et forages du Bas Sébaou. Campagne juin 2023.	55
Tableau 13	Les résultats de mesures piézométriques de la vallée de Bas Sébaou. Campagne juin 2023.	56
Tableau 14	Le niveau statique en hautes eaux en 2012-2021 (ANRH), et en 2022-2023 du Bas Sébaou.	60
Tableau 15	Coordonnées des deux forages des essais de débit (A. Benamour, 1967).	64
Tableau 16	Les résultats de l'analyse chimique au laboratoire Tizi-Ouzou des eaux souterraines du bas Sébaou, (juillet 2023).	67
Tableau 17	La température de l'eau du Bas Sébaou, (juillet 2023).	68
Tableau 18	Le pH mesuré au laboratoire (juillet 2023) de la nappe du bas Sébaou.	69
Tableau 19	Les classes de conductivité électrique « CE » (Rodier 1996).	70
Tableau 20	La conductivité électrique en 2010 et 2023 de la nappe du bas Sébaou. (in-situ).	70
Tableau 21	La conductivité électrique du Bas Sébaou, (juillet 2023) et la distance entre les piézomètres et l'exutoire.	71
Tableau 22	La concentration du résidu sec RS des eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023).	73
Tableau 23	La concentration de Ca^{2+} des eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023).	74
Tableau 24	La concentration de Mg^{2+} dans les eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023).	76
Tableau 25	Plage de valeurs du titre hydrotimétrique (SEQ Eaux Souterraines).	77
Tableau 26	Le TH total correspond à chaque piézomètre, (juillet 2023).	78

Tableau 27	Les valeurs de la TAC des eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023).	79
Tableau 28	La concentration des bicarbonates des eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023).	79
Tableau 29	La concentration de nitrates NO_3^- dans les eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023).	80
Tableau 30	La concentration des eaux souterraines en chlorures Cl^- du bas Sébaou, (juillet 2023).	81
Tableau 31	La concentration des eaux souterraines en Sodium Na^+ du Bas Sébaou, (juillet 2023).	84
Tableau 32	La concentration des eaux souterraines en Potassium K^+ du Bas Sébaou, (juillet 2023).	86
Tableau 33	La concentration des eaux souterraines en Sulfates SO_4^{2-} du Bas Sébaou, (juillet 2023).	87

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La Terre est appelée « la planète bleue » car l'eau recouvre 72 % de sa surface. La quantité d'eau présente sur la Terre est toujours la même depuis plus de 4 milliards d'années. Ce volume d'eau est stable et réparti de la manière suivante : 97,20 % d'eaux salées, 2,15 % des glaces polaires, 0,63 % d'eaux souterraines, 0,019 % d'eaux de surface (lacs, fleuves, et rivières) et 0,001 % d'eaux atmosphériques, seulement 0,65 % de cette eau n'est ni salée ni glacée, donc potentiellement douce [ANRH].

Les ressources en eaux souterraines sont aujourd'hui une préoccupation majeure à l'échelle mondiale en raison de plusieurs facteurs convergents. L'un de ces facteurs est l'exploitation intensive de ces ressources, alimentée par la croissance démographique rapide et le développement croissant des secteurs agricole et industriel. Cette exploitation excessive est accentuée par les effets des changements climatiques, ce qui aggrave la menace pesant sur la disponibilité des eaux souterraines et détériore leur qualité.

La dégradation de la qualité des eaux souterraines se manifeste principalement par la contamination et la salinisation. Ces problèmes résultent de diverses causes, dont l'utilisation excessive d'engrais chimiques dans l'agriculture, les rejets industriels et domestiques non traités, ainsi que d'autres facteurs environnementaux.

Les activités humaines, en particulier l'agriculture et l'industrie, ont tendance à se développer à proximité des cours d'eau et encore davantage en bord de mer. Ces zones côtières sont particulièrement prisées, surtout dans les régions arides et semi-arides, où les ressources en eau douce sont extrêmement limitées.

Les aquifères côtiers sont fragilisés par des prélèvements massifs, souvent concentrés, notamment pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation. Ces pompes excessifs d'eau douce peuvent entraîner la formation de dépressions piézométriques dans lesquelles l'eau de mer voisine s'infiltrerait à travers le sous-sol, principalement en raison de la différence de densité entre l'eau douce continentale et l'eau salée. Ce phénomène est couramment appelé intrusion marine.

L'objectif de notre étude est l'identification de l'intrusion marine. Pour bien comprendre le phénomène, nous avons procédé à interpréter les analyses physico-chimiques et des campagnes piézométriques des eaux souterraines de la nappe du bas Sébaou.

Ce travail est structuré en deux parties, l'une théorique et l'autre pratique, une introduction générale, une conclusion et des références bibliographiques.

- Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude.
- Chapitre 2 : Cadre géologique de la zone d'étude.
- Chapitre 3 : Etude de la nappe alluviale du bas Sébaou
- Chapitre 4 : Etude hydro-climatologique
- Chapitre 5 : L'intrusion marine.
- Chapitre 6 : La campagne piézométrique.
- Chapitre 7 : Etude hydro-chimique

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1 Cadre géographique et administratif de la zone d'étude

La plaine alluviale de l'Oued Sébaou se situe au Nord de l'Algérie, à 80 km à l'Est d'Alger. La région chevauche deux wilayas, Tizi-Ouzou (Haut et Moyen Sébaou) et Boumerdes (Bas Sébaou). Notre terrain d'étude se trouve dans la wilaya de Boumerdes. (Figure 1)



Figure1 : Situation de la région d'étude (Extrait de la carte topographique 1/500 000 de l'INCT)

Le Bas Sébaou, tronçon aval de la vallée de l'Oued Sébaou, s'étend sur environ 20 km, depuis la localité de Tadmaït jusqu'à son embouchure sur la Mer Méditerranée.

Les coordonnées géographiques qui représentent le Bas Sébaou sont :

(Figure 2)

Latitude :	36° 54' 46" N – 36° 41' 31" N
Longitude :	3° 51' 25" E – 3° 58' 49" E



Figure 2 : Situation géographique du Bas Sébaou (Image satellitaire non traitée 2021).

Le Bas Sébaou est limité, au Nord par la mer méditerranéenne, à l'Est par les communes de Tizi-Ouzou, à l'Ouest par les communes de Boumerdés. Il est intégré en totalité dans les communes de Baghliia, Taourga et Ben Choud et partiellement dans les communes de Dellys, Sidi Daoud, Ouled Aissa, Naciria, Tadmaït, Draa Ben Khedda et Sidi Naamane. (Figure 3)

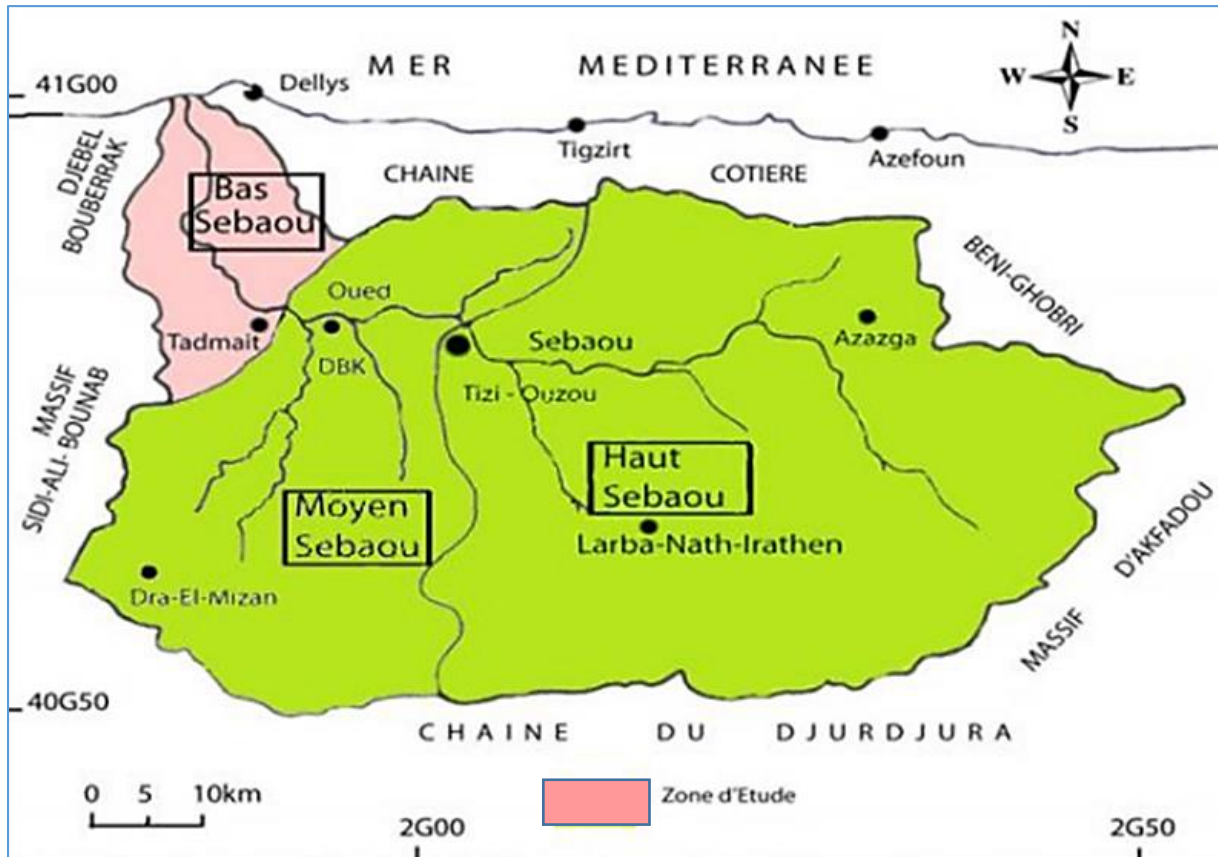


Figure 3 : Situation géographique du bassin versant du Sébaou

(In Yacoub, 2005 modifiée)

2 L'aspect socio-économique de la zone d'étude

La wilaya de Boumerdes renferme diverses opportunités socio-économiques, notamment dans les secteurs de l'agriculture et de l'industrie, ainsi que sur le plan humain. Chacune de ces opportunités nécessite une quantité considérable d'eau pour leur subsistance et leur développement. Cependant, les conditions climatiques actuelles marquées par une diminution et une irrégularité des précipitations sur près d'une décennie, ainsi que les problèmes de qualité de l'eau souterraine constamment menacée par les effets de l'agriculture intensive et des rejets industriels et urbains, compliquent la tâche de répondre à ces multiples besoins en eau de manière de plus en plus complexe.

2.1 Potentiels humains

En date du 16 avril 2008, la population totale répartie sur l'ensemble du territoire d'étude s'élevait à 43 293 habitants. La daïra de Baghliia, faisant partie des neuf daïras qui constituent la wilaya de Boumerdes en Algérie, a pour siège la ville éponyme de Baghliia. Elle couvre une superficie de 151,15 km² et se trouve dans la plaine du Sébaou, une zone privilégiée pour une concentration humaine importante en raison de la présence d'infrastructures socio-économiques de base.

2.2 Potentiels agricoles

La région de Baghliia, située à l'est de Boumerdes en Algérie, est en passe de devenir un pôle majeur en arboriculture et viticulture, selon le chef de service de la production végétale de la wilaya de Boumerdes. Cette région bénéficie d'un climat favorable, de terres fertiles adaptées à ces cultures, et d'une abondance de ressources hydriques pour l'irrigation. La commune de Baghliia se distingue déjà avec des produits qui rivalisent efficacement avec les importations, grâce aux efforts des agriculteurs qui ont profité des programmes de relance de la production agricole. La commune s'étend sur 6 055 hectares, dont plus de la moitié est dédiée à l'agriculture, notamment 1 000 hectares de cultures irriguées le long de l'oued Sébaou, avec le soutien des autorités locales. Cette région possède un potentiel agricole prometteur.

2.3 Potentiel en sol de la wilaya de Boumerdes

La wilaya possède un précieux potentiel agricole, principalement concentré dans des zones clés telles que la vallée du bas Isser, la plaine du Sébaou et le périmètre du Hamiz (plaine de la Mitidja Est). Elle est classée en zone 1, signifiant qu'elle bénéficie de fortes potentialités agricoles. Les chiffres indiquent que la superficie agricole utile (SAU) s'étend sur 65 738 hectares, sur une superficie agricole totale (SAT) de 99 592 hectares, comprenant également une superficie agricole irriguée d'environ 12 200 hectares. Ces données confirment l'existence d'un important potentiel agricole dans la wilaya de Boumerdes.

3 Cadre hydrologique de la zone d'étude

Le bassin versant de l'oued Sébaou s'étend sur une superficie de 2500 km², englobant pratiquement toute la wilaya de Tizi-Ouzou (à l'exception d'une partie de la frange côtière exclue sur le plan administratif), Il s'étend également sur la région Est de la wilaya de Boumerdes, connue sous le nom du Bas Sébaou. La surface drainée par l'oued et ses affluents (le bassin versant) est limitée entre les latitudes 36°27 et 36°55 Nord et les longitudes 3°55 et

4°53 Est. Le bassin versant de Sébaou est caractérisé par un relief typiquement montagneux, couvrant 82 % de la superficie totale, elle se limite comme suit :

- Au Nord par la mer Méditerranée.
- Au Nord et au Nord-Est par la chaîne littorale.
- Au Sud et au Sud-Est par la chaîne de Djurdjura.
- À l'Ouest par les chaînons de Naciria et Sidi-Ali-Bounab, orientés ENE-WSW.

L'oued Sébaou est le cours d'eau majeur de la région de la grande Kabylie. Il représente le réceptacle des eaux du versant nord du Djurdjura et d'Akfadou ainsi que tous les cours d'eaux en amont et tous les ruisseaux s'y jettent. Le débit moyen de l'oued est de 23,4 m³/s enregistré à Baghlia dans la wilaya de Boumerdes (Wikipédia).

L'existence de deux cluses naturelles sur le parcours de l'Oued Sébaou a donné lieu à trois tronçons : Haut Sébaou, Moyen Sébaou et Bas Sébaou. Ces divisions ont été établies pour faciliter la gestion hydraulique par la DREW de Tizi-Ouzou.

Administrativement, le bassin versant englobe deux wilayas ; la wilaya de Tizi-Ouzou qui englobe le haut et le moyen Sébaou et la wilaya de Boumerdes dans laquelle se trouve le bas Sébaou avec une superficie de 220 Km² pour un périmètre de 62,6 Km. Il est subdivisé en six sous bassins réparties de façon inégale sur le Haut, le Moyen et le Bas Sébaou (Figure 4) :

- Sous bassin de l'Acif N'boubhir (02-15).
- Sous bassin de l'oued Sébaou Rebta (02-16).
- Sous bassin de l'oued Aissi (02-17).
- Sous bassin de l'oued Sébaou Sebt (02-18).
- Sous bassin de l'oued Bougdoura (02-19).
- Sous bassin de l'oued Sébaou Maritime (02-20).

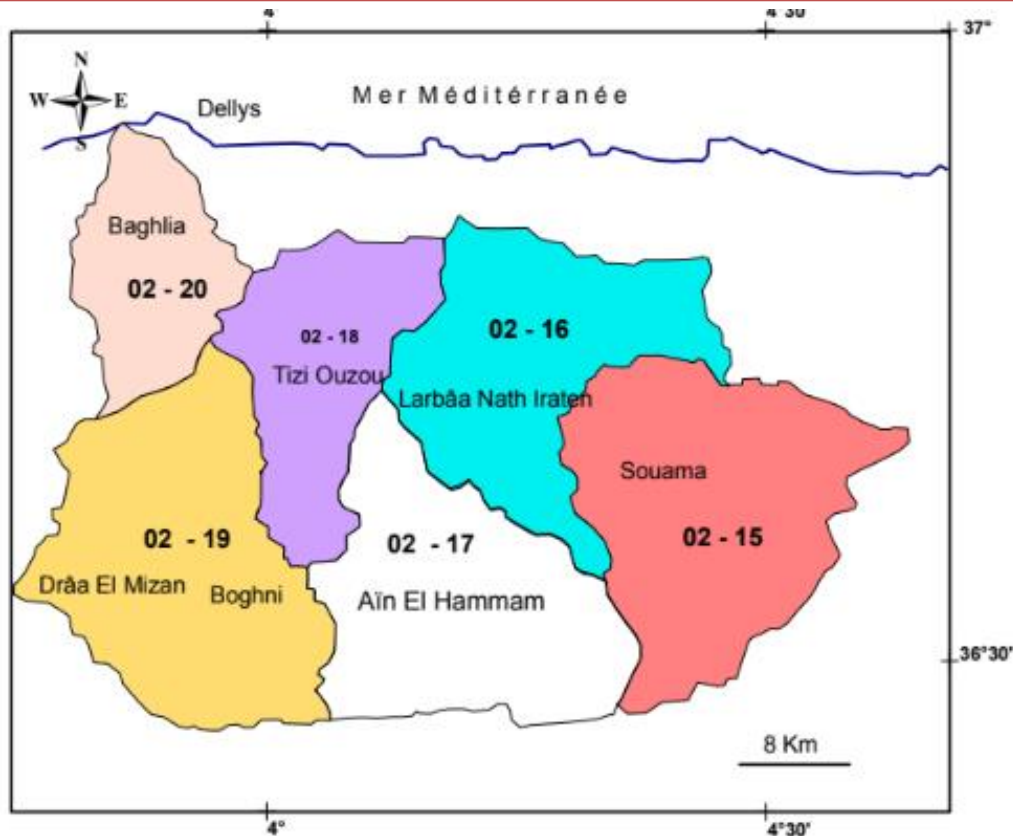


Figure 4 : Les sous bassins versants de la vallée de Sébaou, (ANRH 2022).

4 Paramètres hydromorphométriques du sous bassin versant du Bas Sébaou

Le sous bassin du Bas Sébaou ou l'Oued Sébaou maritime (code 02-20) couvre une superficie d'environ 229 km², de périmètre de 62,6 km et de longueur de 22km, la largeur de la nappe dépasse par endroit 2 km (Sidi Daoud). Le réseau hydrographique est orienté NNW-SSE (Aigoun. C. 1983)

Les caractéristiques du sous bassin versant se résument dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Caractéristiques générales du sous bassin versant du Bas Sébaou (Aigoun. C. 1983).

Sous bassin versant	Surface (km ²)	Périmètre (km)	Longueur (km)	Kc (indice de forme)
Bas Sébaou 02-20	229	62,6	22	1,18
	Débit moyen (m ³ /s)	Longueur des cours d'eau $\sum L_i$ (km)	Coefficient de torrencialité	Temps de concentration (h)
	23,4	6453	19,6	17

- Du tableau on constate que le sous bassin est très peu allongé avec Kc qui se rapproche à 1. Le débit moyen de l'Oued est estimé de 23,4 m³/s à Baghlia.

5 Conclusion

La plaine alluviale de l'oued Sébaou se situe à 80 km à l'est d'Alger. Du point de vue administratif, elle est répartie entre deux wilayas : Tizi-Ouzou pour le haut et le moyen Sébaou, et Boumerdes pour le bas Sébaou.

Cette basse vallée marque un changement de direction de l'oued Sébaou, qui s'écoule désormais vers le nord-nord-ouest et le sud-sud-est.

Cette région est caractérisée par une nappe d'eau souterraine captive à semi-captive, d'une profondeur moyenne. La recharge de cette nappe est principalement alimentée par l'infiltration des eaux de pluie sur les terrasses basses et très basses. Cette zone joue un rôle crucial dans la vie quotidienne des habitants et dans le développement agricole de la région.

CHAPITRE 2 : CADRE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

1 Introduction

L'étude hydrogéologique bénéficie grandement de l'utilisation de la géologie en tant que méthode d'investigation. En effet, la géologie permet d'identifier les formations géologiques qui sont potentiellement des réservoirs d'eau (aquifères), de suivre leur évolution dans l'espace et dans le temps, et de caractériser les matériaux et la structure du sous-sol pour déterminer leur capacité à stocker et à conduire les eaux souterraines provenant des précipitations. De plus, la géologie permet d'identifier le type d'aquifère présent.

D'un point de vue géologique, l'Algérie est localisée dans la partie nord du craton Ouest africain. Elle peut être divisée en deux domaines distincts (figure 5), qui se distinguent par leur histoire géologique et leur structure :

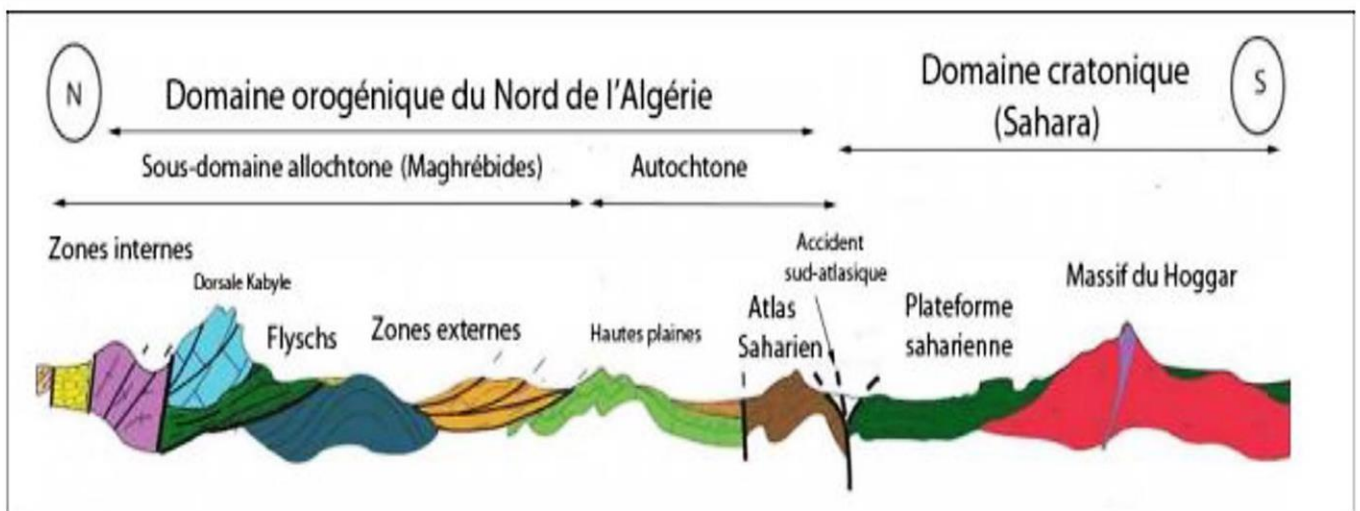


Figure 5 : Les différents domaines du Nord Algérie (coupe H.Haddoum, modifiée par Chabou,2015).

- L'Algérie du Nord, faisant partie de la chaîne alpine, a été formée au cours du Tertiaire et reste instable jusqu'à ce jour (figure 6).
- L'Algérie Saharienne est un domaine relativement stable depuis la fin du Précambrien. Il est composé d'un socle déformé par les orogénèses éburnéennes et panafricaines, ainsi que d'une couverture paléozoïque généralement tabulaire qui peut localement présenter des plis hercyniens. De plus, cette région possède une couverture méso-cénozoïque également tabulaire.

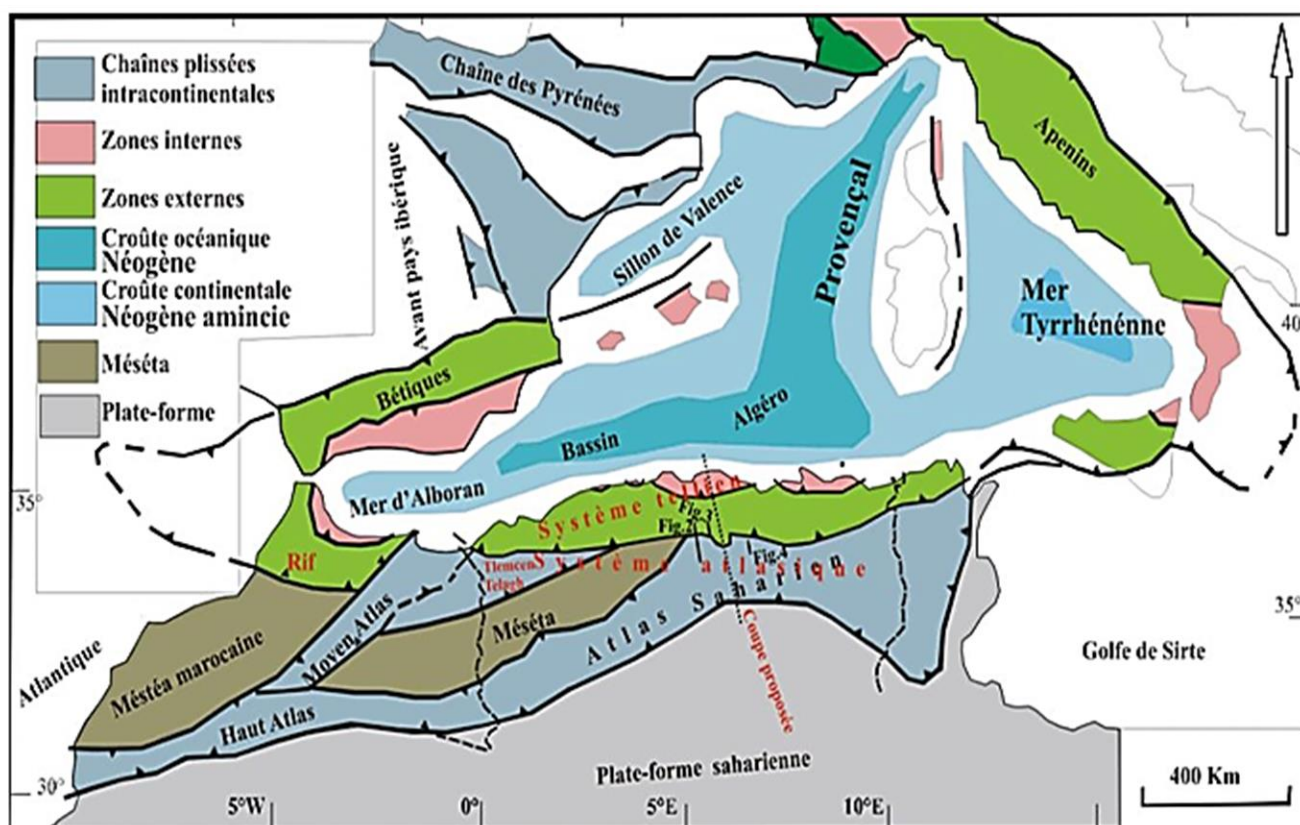


Figure 6 : Carte du Nord de l'Algérie dans le cadre géodynamique de la méditerranée occidentale (Boulin, 1986)

La limite entre ces deux domaines est marquée par l'accident sud-Atlasique, tel que représenté dans (Figure 5). Cet accident suit la partie sud de l'Atlas saharien. La zone d'étude, située dans la partie inférieure de la plaine de l'oued Sébaou, appartient au premier domaine et fait partie de la chaîne Maghrébine.

2 Les grands ensembles géologiques de la chaîne des Maghrébides

Nous procéderons à une description lithologique en utilisant des cartes géologiques et des synthèses bibliographiques provenant de divers auteurs ayant réalisé des travaux sur les terrains du bassin versant de l'Oued Sébaou. La carte géologique (Figure 6) nous a permis d'identifier, du Sud au Nord, les différentes formations géologiques.

Le terme "Maghrébides" (Durand-Delga, 1971) est utilisé pour désigner une partie de la Méditerranée occidentale qui a subi l'orogénèse alpine, s'étendant de Gibraltar à la Calabre en passant par l'Afrique du Nord, où l'Algérie du Nord est située. Le premier schéma structural de l'Algérie du Nord (alpine) a été proposé par (Kieken en 1962). (Raoult en 1974), (Bouillin en 1977) et (Vila en 1980) ont défini l'ensemble de ces structures générées par l'orogénèse alpine comme étant la superposition d'unités allochtones charriées sur l'autochtone présaharien.

Cet ensemble peut être subdivisé en trois ensembles structuraux : les zones internes, le domaine des flyschs et les zones externes, qui sont recouvertes de matériaux discordants d'âge Mio-Plio-Quaternaire (Kieken, 1962).

L'orogénèse alpine : est un processus géologique au cours duquel de grandes chaînes de montagnes se forment en raison de la collision de plaques tectoniques. Elle est caractérisée par le plissement, la déformation, et l'élévation de la croûte terrestre, ce qui entraîne la création de chaînes montagneuses spectaculaires. Cette orogénèse a joué un rôle majeur dans la formation des montagnes des Alpes, des Himalaya, et d'autres grandes chaînes de montagnes à travers le monde. Elle a débuté au cours du Cénozoïque et continue d'affecter les paysages géologiques actuels.

3 Cadre géologique local

La basse vallée de l'Oued Sébaou est une dépression accumulant des sédiments mio-plio-quaternaires. Les formations les plus importantes de la région sont :

a. Formation post-nappes : Terrains d'âge miocène pliocène déposés postérieurement au dépôt des nappes. Le miocène est essentiellement gréseux, conglomératique et marneux affleurant sur la rive gauche au niveau des Djebels Bouberrak Guerbissa et El Gueblia, et sur la rive droite au niveau de Drâa Karrouch et Tagdent.

b. Formation synchro-nappes (olistostromes) : Correspond à des argiles à blocs (olistolites). On distingue la superposition directe avec l'Oligo-miocène « olistostromes I » et la superposition à l'unité de Dellys « olistostromes II ». Cette formation affleure à Oued Keddach, Kouanine, Ben N'choud, Guerada, Cherguia et Oued Chaabane.

c. Unité numidienne : Elle comprend des argiles sous-numidiennes brunes (oligocène), des grès numidiens de 300-400m d'épaisseur et des argiles supra-numidiennes à intercalation de marnes, émergeant dans la région de Kouanine et Sébaou El Kedim.

d. Unité tellienne de Dellys : Des terrains calcaire-marneux d'âge Crétacé- Eocène affleurant en rive droite à Baghlia et à Ouled Kaddach.

e. Alluvions : Ce sont des dépôts quaternaires occupant la vallée de l'Oued Sébaou et ses principaux affluents. Six terrasses alluviales se distinguent (M. Benhassaïne, 1980) datées du Quaternaire ancien, moyen et récent. Elles sont constituées de sables, de graviers, de galets et d'argiles. Les dépôts récents sont les plus importants en termes d'épaisseur :

Le Soltanien, de couleur brune et rougeâtre est présent dans toute la vallée (alluvions récents). Le Rharbien représentant les alluvions actuelles, sont d'épaisseur de 40m environ.

4 Les formations de l'aquifère du bas Sébaou (02-20 ANRH) :

4.1 Coupe géologique de la vallée du Bas Sébaou (Belhai et Al, 2008) :

A partir de la coupe géologique de vallée de la nappe du bas Sébaou (Belhai et al, 2008), le profil montre une description géologique de trois principales composantes : les dépôts alluvionnaires constitués de gravier et de sable hétérogène, des marnes et marnes sableuse (figure 7)

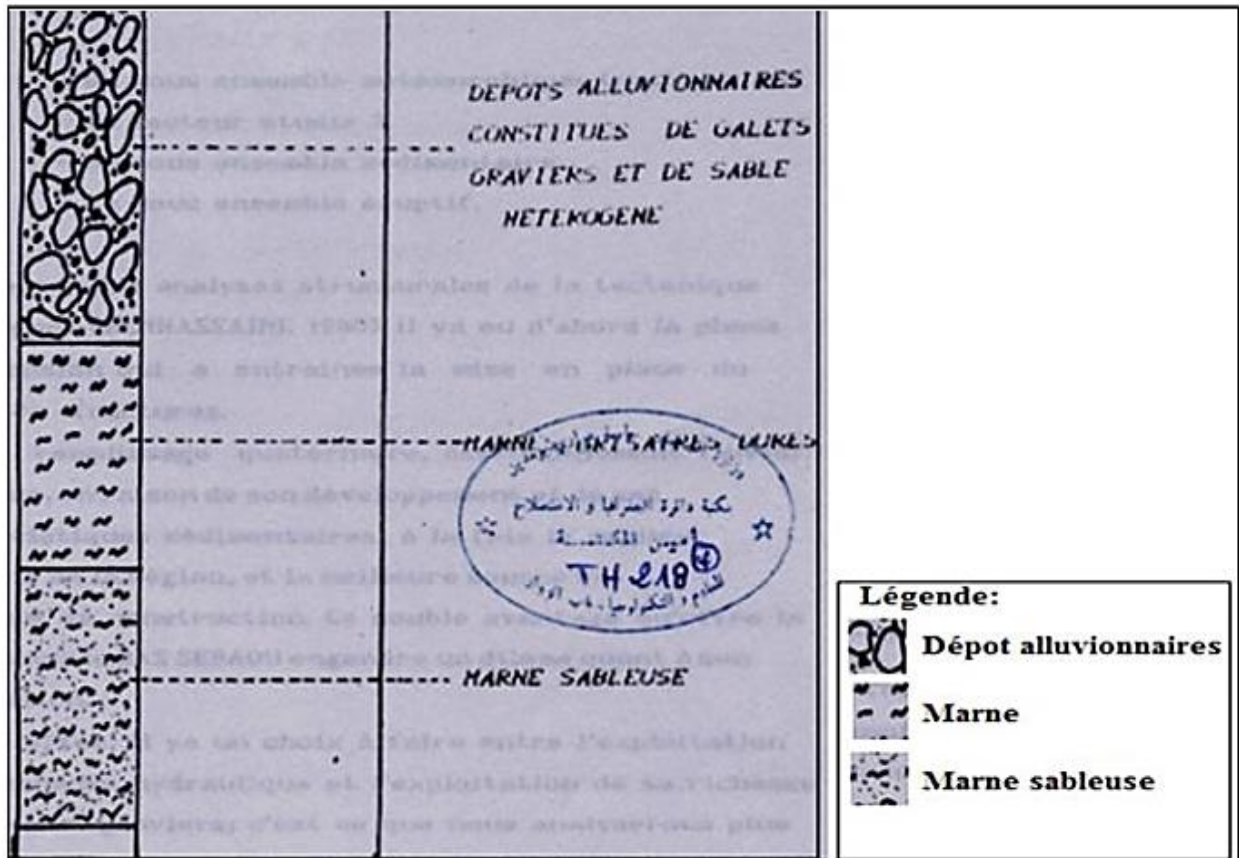


Figure 7 : Coupe géologique de la vallée de Bas Sébaou 02-20 (Belhai et Al, 2008)

5 Conclusion

La vallée du Bas Sébaou est caractérisée par une dépression comblée d'alluvions, formant un complexe de terrasses continentales récentes et emboîtées. Ces dépôts alluvionnaires reposent sur les marnes et les argiles du Miocène inférieur et de l'Oligocène qui affleurent sur les bordures de la vallée. L'aquifère du Bas Sébaou présente une matrice pétrographique hétérogène datant du quaternaire, composée d'alluvions (graviers, sables, argiles et limons), reposant sur un substratum marneux du Miocène. Cette formation s'étend latéralement sur de larges terrasses emboîtées, atteignant en moyenne une épaisseur de 60 m, ce qui en fait des terres particulièrement propices à l'agriculture.

CHAPITRE 3 : ETUDE DE LA NAPPE ALLUVIALE DU BAS SEBAOU

1 Introduction

Les nappes alluviales jouent un rôle essentiel en tant que réservoirs d'eau souterraine stratégiques et sensibles aux variations hydrologiques. Dans ce chapitre, nous focalisons notre attention sur la nappe alluviale du Bas Sébaou qui a une importance cruciale au sein de la région géographique qui lui donne son nom, une région caractérisée par sa dépendance étroite à cette ressource hydrique souterraine.

2 Description de la nappe alluviale du Bas Sébaou

La nappe alluviale du Bas Sébaou est une caractéristique hydrogéologique importante de la vallée. Elle représente une réserve d'eau souterraine essentielle pour la région. Elle se situe dans la partie aval du bassin versant de l'Oued Sébaou dont l'exutoire débouche sur la mer Méditerranée. Il s'agit d'un réservoir de forme allongée, direction NS et dont la matrice pétrographique hétérogène, d'âge quaternaire, est composée d'alluvions (graviers, sables, argiles et limons) reposant sur un substratum marneux daté du Miocène. Son extension latérale, souvent large, donne lieu à des terrasses emboîtées cumulant une épaisseur moyenne de 60 m et constituant des terrains très favorables à l'agriculture.

Cette nappe alluviale présente une épaisseur variable en fonction de la topographie et de la nature des matériaux. Elle est alimentée par les précipitations, les infiltrations provenant des affluents et les écoulements souterrains en provenance des montagnes avoisinantes.

Elle joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau de la région, tant pour les besoins agricoles que pour la consommation domestique. De nombreux puits et sources captent cette eau souterraine pour divers usages.

Cependant, il convient de noter que la gestion de la nappe alluviale est importante pour éviter une surexploitation qui pourrait entraîner une diminution du niveau d'eau et des problèmes liés à l'intrusion saline. Des mesures de surveillance et de régulation de l'exploitation de la nappe alluviale sont nécessaires pour assurer sa durabilité et sa préservation à long terme.

3 L'état de la nappe alluviale du bas Sébaou

La nappe alluviale du Bas Sébaou présente une configuration complexe, caractérisée par une puissance moyenne d'environ 40 m et une largeur pouvant atteindre plus de 2000 m dans certaines zones, notamment à Sidi Daoud.

Les études géoélectriques et hydrogéologiques ont révélé la présence de deux couches perméables, avec une résistivité variant entre 130 Ωm et 150 Ωm , séparées par une couche conductrice dont la résistivité varie entre 10 Ωm et 20 Ωm . Dans cette région, la nappe est généralement captive à semi-captive.

À partir de Tadmait, l'écoulement de la nappe prend une direction Sud-Nord. Le niveau statique de la nappe se situe en moyenne entre 1,5 m et 6 m du sol, et elle peut être libre ou semi-captive en certains endroits. De plus, les niveaux piézométriques démontrent une relation hydraulique entre la nappe et les eaux de surface drainées par l'Oued Sébaou. En période de basses eaux,

l'Oued alimente la nappe, tandis qu'en période de hautes eaux, le niveau de la nappe remonte, contribuant ainsi à l'alimentation du cours d'eau superficiel.

Dans cette zone de la nappe, l'aquifère présente une bonne transmissivité, permettant les échanges d'eau, mais sa perméabilité est considérée comme moyenne. Il est donc important de prendre en compte ces caractéristiques hydrogéologiques dans la gestion et l'utilisation de la nappe alluviale du Bas Sébaou, afin d'assurer une exploitation durable de cette ressource en eau précieuse pour la région.

4 Equipement de la nappe en ouvrages de captage et en piézomètres

a. Les forages : ce sont des ouvrages complets dont le diamètre est de 500 mm et la profondeur de l'ordre de 50 m au minimum. Ils sont réalisés au mode rotary et sont destinés essentiellement à l'AEP (Figure 8 b).

b. Les piézomètres : ce sont des ouvrages de surveillance du niveau piézométrique de la nappe à l'abri de toute perturbation, de points d'observation d'effet de pompages éventuels et de prélèvements d'échantillons d'eau pour les analyses chimiques. Leur profondeur atteint le substratum et leur diamètre est de 152,4mm (6 pouces) (Figure 8 a).

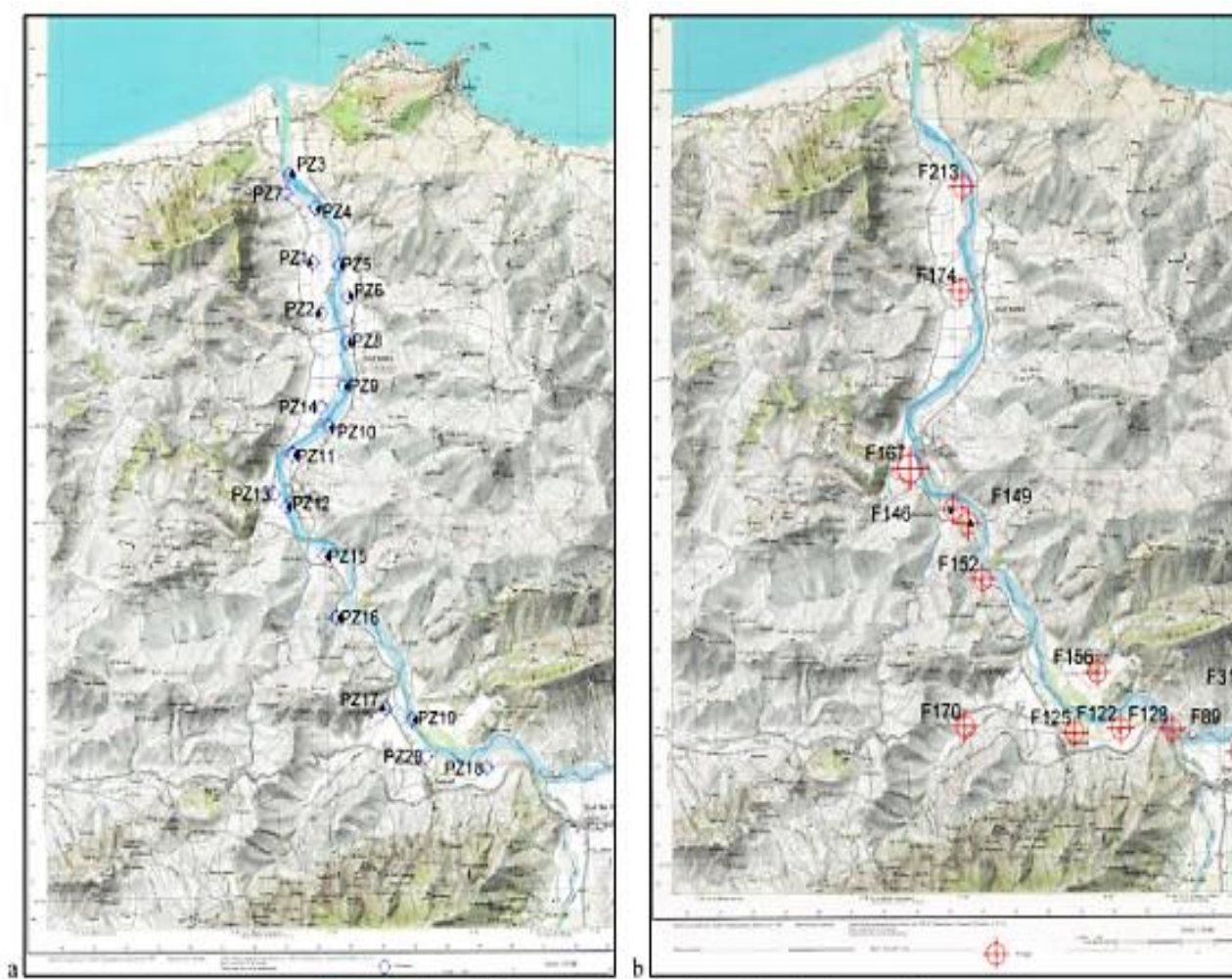


Figure 8 : Cartes de situation des piézomètres (a) et des forages (b), (Aigoun. C. 2014)

c. Les puits : ce sont généralement profonds entre 15 et 25 m et leurs diamètres entre 1,80 et 2,00 m. Ils sont réalisés artisanalement. La quasi-totalité sert à l'irrigation (figure 9).

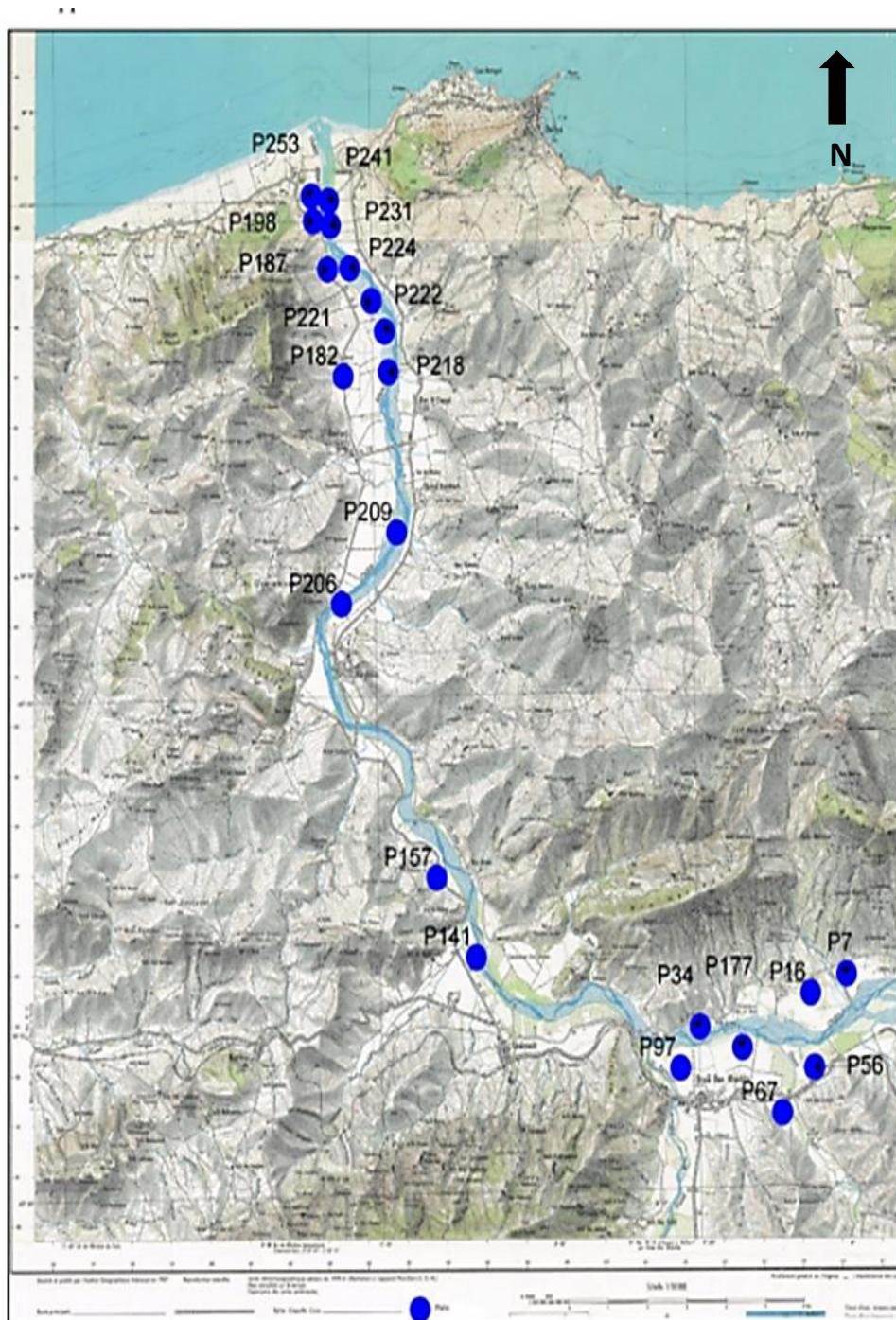


Figure 9 : Carte de situation des puits dans le Bas Sébaou, (Aigoun. C. 2014)

5 Vulnérabilité de la nappe alluviale du bas Sébaou

L'emplacement de la nappe du bas Sébaou près de la mer l'a rendu vulnérable à l'intrusion marine, en particulier dans les zones de faible élévation. Les fluctuations du niveau de la mer liée aux marées et aux variations climatiques, telles que l'élévation du niveau de la mer due au changement climatique, peuvent augmenter ce risque.

De plus, les pratiques agricoles intensives, notamment l'irrigation excessive, peuvent contribuer à la concentration de sels dans le sol et à l'infiltration de ces sels dans la nappe, aggravant le risque de salinisation. Une utilisation inappropriée des fertilisants et des pesticides peut également contribuer à la contamination de la nappe par des produits chimiques, affectant la qualité de l'eau.

Afin de prévenir la salinisation de la nappe, des mesures préventives rigoureuses sont nécessaires. Cela inclut la mise en place de zones tampons pour protéger la nappe des intrusions marines, la régulation judicieuse des prélèvements d'eau pour éviter un abaissement excessif du niveau de la nappe, et la promotion de pratiques agricoles durables pour réduire la charge de sels et de produits chimiques dans le sol.

6 Conclusion

L'étude de la nappe alluviale du Bas Sébaou met en évidence son rôle crucial en tant que source d'eau souterraine pour la région. Cependant, sa gestion est essentielle pour prévenir une surexploitation et les risques potentiels liés à l'intrusion marine et à la salinisation. Les caractéristiques géoélectriques complexes de la nappe soulignent la nécessité d'une approche adaptée à sa gestion à long terme. La protection contre l'intrusion marine et la promotion de pratiques agricoles durables sont des mesures clés pour préserver cette ressource et assurer sa durabilité.

CHAPITRE 4 : ETUDE HYDRO-CLIMATOLOGIQUE

1 Introduction

Le but de l'utilisation des caractéristiques morpho-métriques (telles que le relief et la pente) est de déterminer un ensemble de paramètres quantitatifs qui décrivent la capacité d'écoulement d'une région donnée. La répartition des précipitations dans la région d'étude dépend largement des conditions générales du climat méditerranéen. L'étude hydro-climatologique confirme que le bassin versant présente un climat de type méditerranéen.

L'évaluation des paramètres tels que la pluviométrie, l'évapotranspiration et le ruissellement a permis de proposer une approche de bilan hydrologique pour la région.

2 La morphologie du bas Sébaou

2.1 Caractéristiques de la forme

2.1.1 La surface

Le bassin versant de la vallée du Sébaou, qui occupe une aire géographique de $A=172 \text{ km}^2$, est délimité par la ligne de crêtes environnantes. À l'intérieur de cette zone, les précipitations sont collectées et dirigées par un réseau hydrographique jusqu'à l'exutoire. La taille de cette surface a un impact significatif sur le processus de formation de l'écoulement des eaux. Cette superficie a été calculée à l'aide du logiciel MapInfo.

2.1.2 Le périmètre

Le périmètre du bassin versant est défini par la ligne de crêtes qui forme son contour. L'objectif principal de déterminer ce périmètre est de pouvoir calculer l'indice de compacité de Gravelius (K_c). Le périmètre du bassin versant en question a été mesuré à $P=58 \text{ km}$ à l'aide du logiciel MapInfo.

2.1.3 L'indice de capacité et de Gravelius K_C

D'un point de vue morphologique, l'indice de compacité de Gravelius, noté K_C , est utilisé pour évaluer la forme d'un bassin versant. Cet indice est défini comme le rapport entre le périmètre P du bassin versant et le périmètre P d'un cercle ayant la même surface A que le bassin versant. Ainsi, K_C nous permet de caractériser la configuration géométrique du bassin versant en le comparant à une forme circulaire idéale.

L'expression de cet indice est:
$$K_c = \frac{P}{\sqrt{\pi} \times \sqrt{A}} \cong 0.0282 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Les valeurs respectives du périmètre P et de la superficie A sont :

$P= 58 \text{ km}$ et $A= 172 \text{ km}^2$

D'où: $k_c \cong 1.25$ Comparativement au différents indices de compacité ($k_c \cong 1.25 > 1.15$), donc le bassin versant est de forme ramassée.

2.1.4 Dimension du rectangle équivalente

La notion du rectangle équivalent est une transformation géométrique en vertu de laquelle on assimile le bassin versant à un rectangle ayant la même surface et même périmètre.

2.1.4.1 La longueur "L" et la largeur "l" du rectangle équivalent

On définit le rectangle équivalent comme le rectangle de longueur L et de largeur l qui a même surface et même périmètre que le bassin versant

$$L = kc \frac{\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left[\frac{1.12}{kc} \right]} \right] \text{ et } l = kc \frac{\sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left[\frac{1.12}{kc} \right]} \right]$$

D'où: $L = 20,78 \text{ km} \cong 20,80 \text{ km}$ et $l = 8,28 \text{ km} \cong 8,30 \text{ km}$

Les dimensions de rectangle du notre bassin versant sont les suivantes :

$$L+l = P/2 = 58 \text{ km}$$

$$L \times l = A = 172 \text{ km}^2$$

Telle que :

A : surface de bassin versant.

P : périmètre de bassin versant.

L : longueur de rectangle équivalent.

l : largeur de rectangle équivalent.

$$\text{Le périmètre : } P = 2(L+l)$$

$$\text{La surface : } A = L \times l$$

$$\text{Le coefficient de Gravelius : } kc = 0.282 \times \frac{p}{\sqrt{A}}$$

La longueur est largement supérieure à la largeur de ce rectangle ce qui nous confirme que le bassin versant est de forme allongée.

2.1.5 La courbe hypsométrique

a) La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique illustre la distribution de la surface du bassin versant en relation avec son élévation. Elle offre, entre autres informations, la possibilité de déterminer l'altitude médiane et l'indice de pente global I_g du bassin versant.

La courbe représente de manière synthétique la déclivité du bassin, c'est-à-dire le relief. Sur l'axe horizontal, on trouve la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin située au-dessus ou en dessous de l'altitude indiquée sur l'axe vertical. Ainsi, elle permet de visualiser la superficie du bassin (ou le pourcentage de superficie) qui se trouve au-delà d'une altitude spécifique.

Les données nécessaires (tableau 2) à l'établissement de la courbe hypsométrique (figure 10) sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau 2 : Les données nécessaires au tracé de la courbe hypsométrique (Aigoun C., 2014)

L'intervalle d'altitude (m)	Altitude du milieu de l'intervalle h_i (m)	Superficie		Pourcentage des surfaces cumulées (%)
		Planimètre (cm^2)	Réelle a_i (km^2)	
0-50	25	193	48,25	100
50.-100	75	81	20,25	71,95
100-200	150	196	49,00	60,18
200-300	250	117,5	29,38	31,69
300-400	350	61,5	15,37	14,61
400-500	450	29,4	7,35	5,67
500-600	550	6,5	1,62	1,40
600-700	650	2,5	0,63	0,46
700-762	731	0,6	0,15	0,09
Total		688,00	172,00	

a_i : Superficie Réelle

h_i : Altitude du milieu de l'intervalle

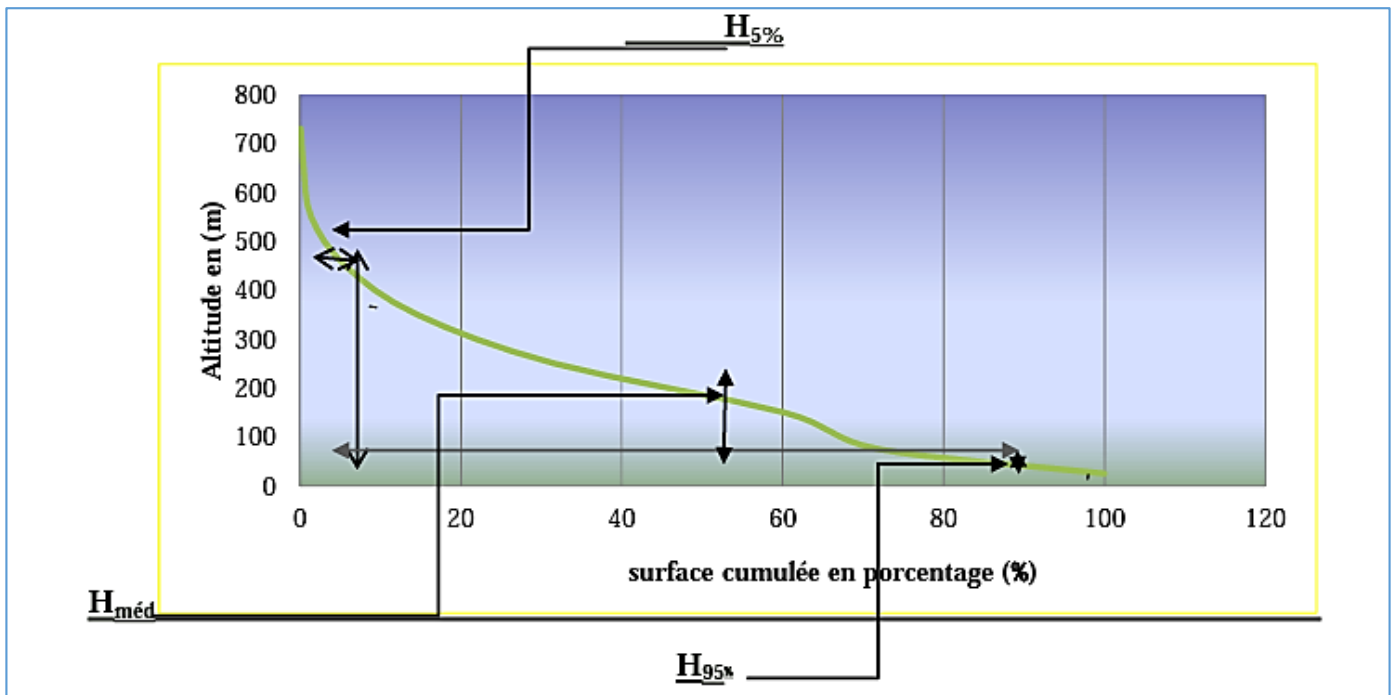


Figure 10 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant du Sébaou (bas Sébaou code 02-20)

- D'après la courbe hypsométrique (figure 10) :

$$H_{5\%} = 460 \text{ m et } H_{95\%} = 32 \text{ m}$$

- La courbe montre que les zones à faible altitude (0-50 m) couvrent la plus grande superficie, suivie par des altitudes plus élevées avec des superficies décroissantes. Les zones les plus élevées (700-762 m) sont les moins étendues. En résumé, la courbe illustre comment les altitudes sont réparties, avec une prédominance des altitudes basses et une diminution progressive vers les altitudes plus élevées.

b) Le relief

Il est facile de comprendre l'impact du relief sur l'écoulement, car de nombreux facteurs hydrométéorologiques tels que les précipitations, les températures, etc., varient en fonction de l'altitude et de la configuration du bassin versant. De plus, la pente joue un rôle important en influençant la vitesse de l'écoulement, (Figure 11).

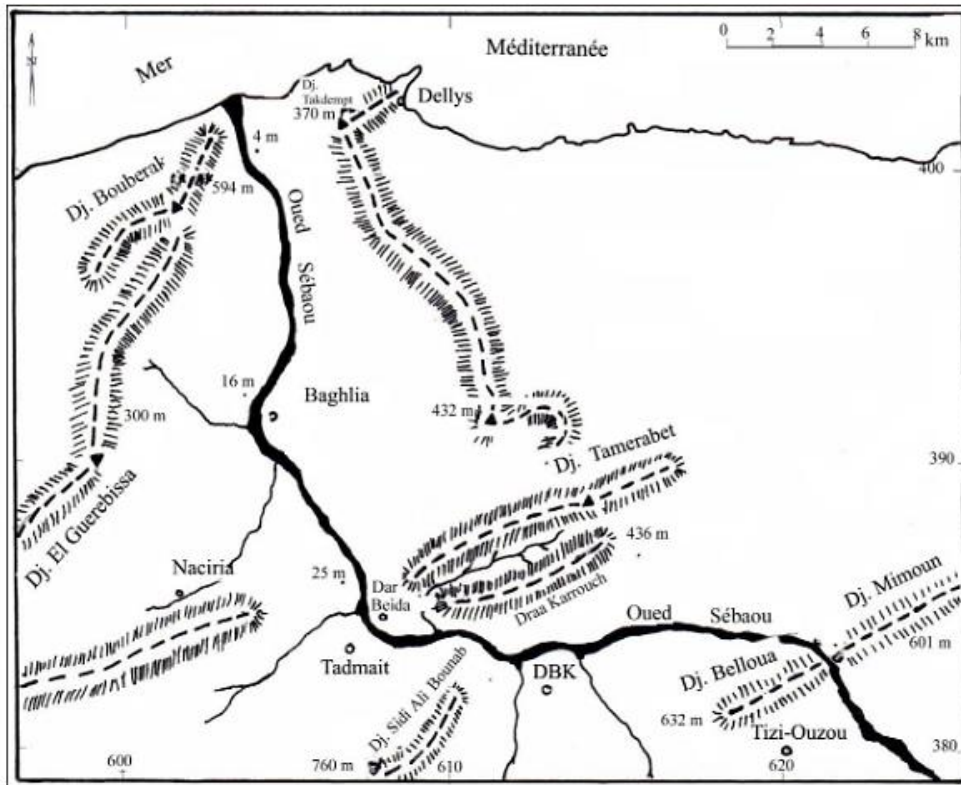


Figure 11 : Carte schématique du relief de basse et moyenne vallée de l'oued Sébaou (Aigoun C., 2014)

2.1.6 Les altitudes caractéristiques

2.1.6.1 Altitude moyenne " H_{moy} "

$$H_{moy} = \frac{ai \times hi}{A}$$

Avec :

ai : c'est l'aire comprise entre deux courbes de niveau (km^2).

hi : c'est l'altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m).

A : c'est la superficie totale du bassin versant (km^2).

Le tableau précédent (3.4) permet de déduire que $H_{moy} = 160$ m.

2.1.6.2 Altitude médiane " $H_{\text{méd}}$ "

Elle est égale à l'ordonnée correspondant à l'abscisse 50 % (figure 11)

C'est-à-dire : $H_{\text{méd}} = 189 \text{ m}$.

Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière (Musy, 2004).

2.1.7 L'indice de pente globale " I_g "

L'indice de pente est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5 % et 95 % (figure 10) de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Il est donné par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

Avec : $D = H_{5\%} - H_{95\%}$

I_g : indice exprimé en (m/km) ou en (%).

L_r : la longueur du rectangle équivalent.

D : désigne la dénivelée totale exprimée en (m).

Selon la courbe hypsométrique (figure 10)

$H_{5\%} = 460 \text{ m}$ et $H_{95\%} = 32 \text{ m}$

Donc : $I_g = \frac{460-32}{20.80} = 20.58 \text{ m/km}$

$I_g = 20,58 \text{ m/km}$

2.1.8 Dénivelée spécifique " D_s "

La dénivelée spécifique nous permis d'établir la classification d'ORSTOM et définir les différents types de bassin versant quelle que soient leurs surfaces, elle est définie comme suit :

$$D_s = I_g \times \sqrt{A}$$

Avec :

D_s : la dénivelée spécifique en (m).

I : l'indice de pente globale exprimé en m/km.

A : la surface totale du bassin versant, exprimé en km^2 .

Donc : $D_s = 20,58 \times \sqrt{172}$

$D_s = 269,9 \text{ m}$.

Selon la classification de d'ORSTOM (tableau 3) le relief est très fort. La classification est comme suite :

Tableau 3 : classification d'ORSTOM

R	Relief très faible	$D_s < 10 \text{ m}$
R	Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$
R	Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$
R	Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$
R	Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$
R	Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$
R	Relief très fort	$500 \text{ m} < D_s$

2.1.9 L'indice de pente de roche "I_p"

C'est la somme des racines carrées des pentes moyenne de chacun des éléments, pondérées par la surface intéressée, Plus élaboré que l'indice de pente global, il tient compte des surfaces partielles réparties par tranches d'altitudes.

$$I_p = 1/\sqrt{L} \times \sum_{i=1}^n \sqrt{\beta_i h_i - h_{i-1}}$$

Avec :

I_p : l'indice de pente de Roche, sans unité.

L : la longueur du rectangle équivalent (km).

i : la surface partielle comprise entre h_i et h_{i-1} en (%).

h_i : la courbes de niveau croissant de l'exutoire au point culminant (m).

L'indice de pente global et l'indice de pente de roche peuvent s'exprimer, l'un en fonction de l'autre, à l'aide de la relation suivante :

$$I_g = 0,8 I_p$$

$$I_p = 25,72$$

3 Caractéristiques de réseau hydrographique

3.1 Hiérarchisation

L'oued Sébaou, qui prend sa source à l'est (Djurdjura), est formé par la confluence de plusieurs affluents s'écoulant de part et d'autre de la montagne. Il traverse ensuite une plaine étroite mais très étendue sur une distance de 110 km jusqu'à son embouchure dans la mer méditerranée. Le cours de l'oued Sébaou continue de s'allonger dans trois directions distinctes, à savoir SSE-NNW, en parallèle à la section amont qui se jette dans la mer près de Dellys.

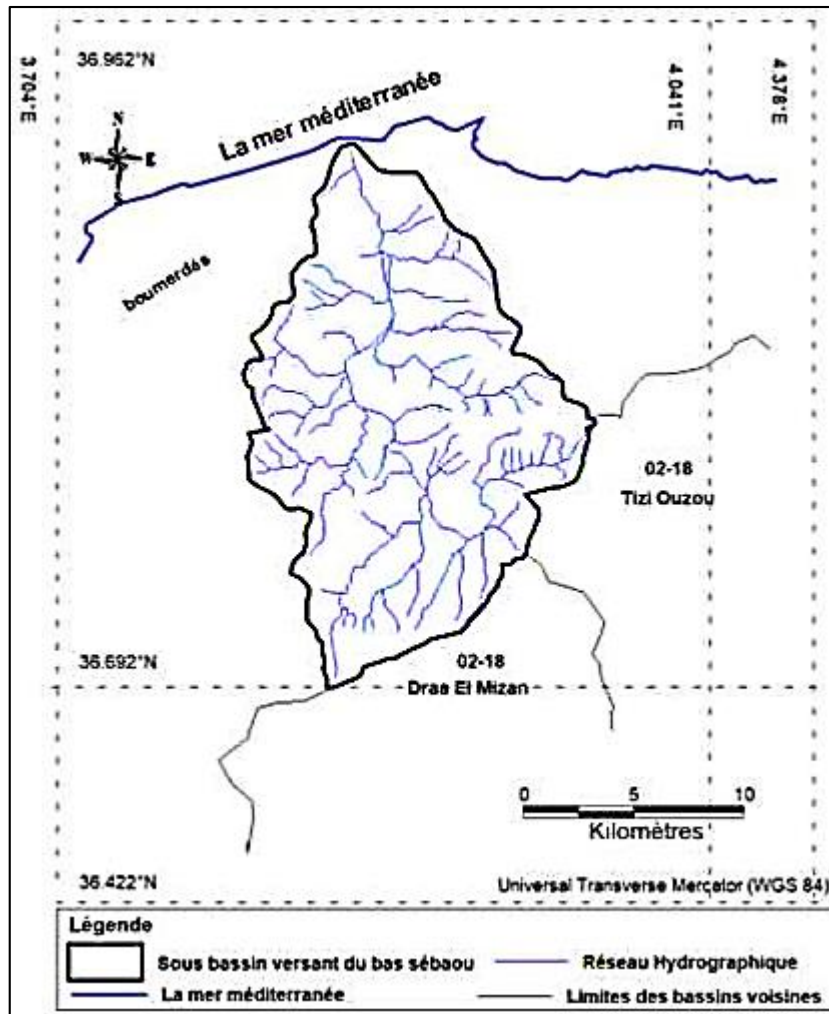


Figure 12 : Carte du réseau hydrographique du sous bassin versant du bas Sébaou (Aigoun, 2014)

3.2 Développement du réseau hydrographique

3.2.1 Densité de drainage "D_d"

Elle se définit par le rapport de la longueur totale des cours d'eau à la surface du bassin versant, et s'exprime comme suit selon (J.P. Laborde) :

$$D_d = \frac{\sum_1^n L_x}{A}$$

Où :

D_d : la densité de drainage (km/km⁻¹).

L_x : longueur totale cumulée des cours d'eau d'ordre x (km).

A : surface du bassin versant (km²).

AN : $D_d = \frac{652}{172}$ avec :

$L_x = \sum L_x = 652$ (Aigoun, 2014)

A = 172 Km²

$$D_d = 3.79 \text{ km}^{-1}$$

La densité de drainage du sous bassin versant (02-20) est de 3,79 km⁻¹

3.2.2 Densité hydrographique "F"

Elle représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface. Elle est représentée sous la forme suivante :

$$F = \frac{\sum_1^n N_x}{A}$$

Avec :

F : densité hydrographique (km⁻²).

N_x : nombre de cours d'eau cumulés d'ordre x

A : superficie du bassin versant en (km²).

$$\text{AN : } F = \frac{2102}{172} \quad \text{avec :}$$

$$N_x = 2102 \text{ (Aigoun C., 2014)}$$

$$A = 172 \text{ Km}^2$$

$$F = 12,22 \text{ Km}^{-2}$$

3.2.3 Densité des talwegs élémentaires "F" (Aigoun C., 2014)

C'est le rapport du nombre des talwegs élémentaires N₁ et la superficie A du bassin versant.

$$F = \frac{N_1}{A}$$

$$\text{AN : } F = \frac{1770}{172} \quad \text{avec : } N_1=1770 \text{ (Aigoun C, 2014)}$$

$$A = 172 \text{ Km}^2$$

$$F = 10,29 \text{ Km}^{-2}$$

3.2.4 Rapport de confluence "R_c" (Aigoun C., 2014)

Pour étudier l'évolution du réseau hydrographique, on peut utiliser la méthode de Horton, qui repose sur des lois empiriques permettant de lier le nombre, la longueur moyenne et l'ordre des cours d'eau. Un paramètre important est le rapport de confluence (R_c), qui représente le rapport entre le nombre N_x de talwegs cumulés d'ordre x et le nombre N_{x+1} de talwegs d'ordre x+1.

$$R_c = \frac{N_x}{N_x + 1} = cte$$

Le rapport des longueurs moyennes

$$R_1: R_1 = \frac{L_i}{L_i - 1} = Cte$$

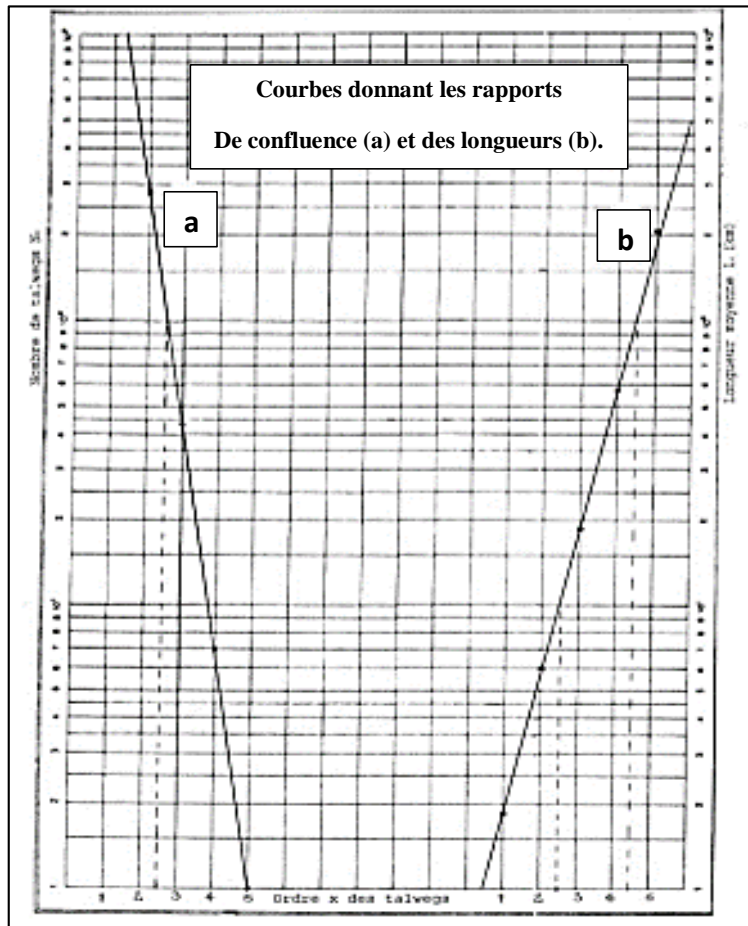


Figure 13 : Nombre et longueur moyenne des talwegs du bassin versant du Sébaou (Aigoun, 2014)

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

La détermination de R_c et R_1 se fait par voie graphique en portant N_x , L_x et x sur un graphique semi logarithmique où la pente de la droite moyenne permet de déterminer la raison de la progression géométrique.

$$a = \frac{\log N_x - \log N_x + 1}{x - (x + 1)} = |\log R_c|$$

AN : Dans notre cas, en prenant $N_x = 1$ puis $N_x = 100$, soit 2 modules logarithmiques, ce qui correspond à un écart sur l'axe des abscisses égal à 2,5.

D'où : $\log R_c = \frac{2}{2.5} = 0.80$

$R_c = 6.31$

4 Climatologie de la région d'étude

Le but de cette étude est de caractériser les aspects hydro-climatologiques principaux du bassin versant du bas Sébaou, en particulier ceux qui influent sur le bilan hydrologique (précipitations, évapotranspiration et écoulement), responsables de la réaction de l'aquifère. L'interaction de ces facteurs (évaporation, ruissellement) permet de déterminer le bilan hydrique, ce qui permet à son tour de calculer le taux d'infiltration par la pluviométrie nécessaire pour les fluctuations de la surface piézométrique, c'est-à-dire l'alimentation et le renouvellement des réserves souterraines (Castany, 1982).

Les données météorologiques utilisées dans cette étude proviennent de l'ANRH, et elles représentent les moyennes sur la période de 1990 à 2012 de la station de Tizi-Ouzou.

Tableau 4 : Caractéristiques de la station de ANRH de Tizi-Ouzou

Station	Coordonnées Lambert			La période d'observation
	X	Y	Z	
Tizi-Ouzou	620,00	380,05	160	ANRH 1990-2012

4.1 Etude de précipitations

Les précipitations représentent la composante fondamentale de l'hydrologie, étant l'apport principal en eau sur le sol. La connaissance précise de cette contribution hydrique au sol revêt une importance cruciale pour appréhender l'état des réserves en eau du sol, évaluer le taux de recharge des nappes phréatiques et comprendre le régime hydrologique des cours d'eau. Ces données sont essentielles pour une meilleure compréhension des interactions entre les différents éléments du cycle de l'eau et pour une gestion durable des ressources en eau.

Tableau 5 : Répartition des pluies mensuelles de la station de Tizi-Ouzou, (1990-2012)

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
P.Mensuelles (mm)	38,7	65,7	105,8	123,9	117,9	84,5	70,5	88,3	63,1	9,5	3,3	6,7	775
P Min (mm)	3,8	5,6	7,8	12,5	8,7	0,1	2,6	7,9	1,2	0	0	0	50,2
P Max (mm)	153,1	241,7	227,2	276,7	316,2	316,7	258,6	204,5	231,1	37	25,4	51,6	1316,7
Ecart type	32,6	51,1	58,9	68,4	77,8	77,4	64,5	55,5	50	11,7	5,7	10,8	197,1

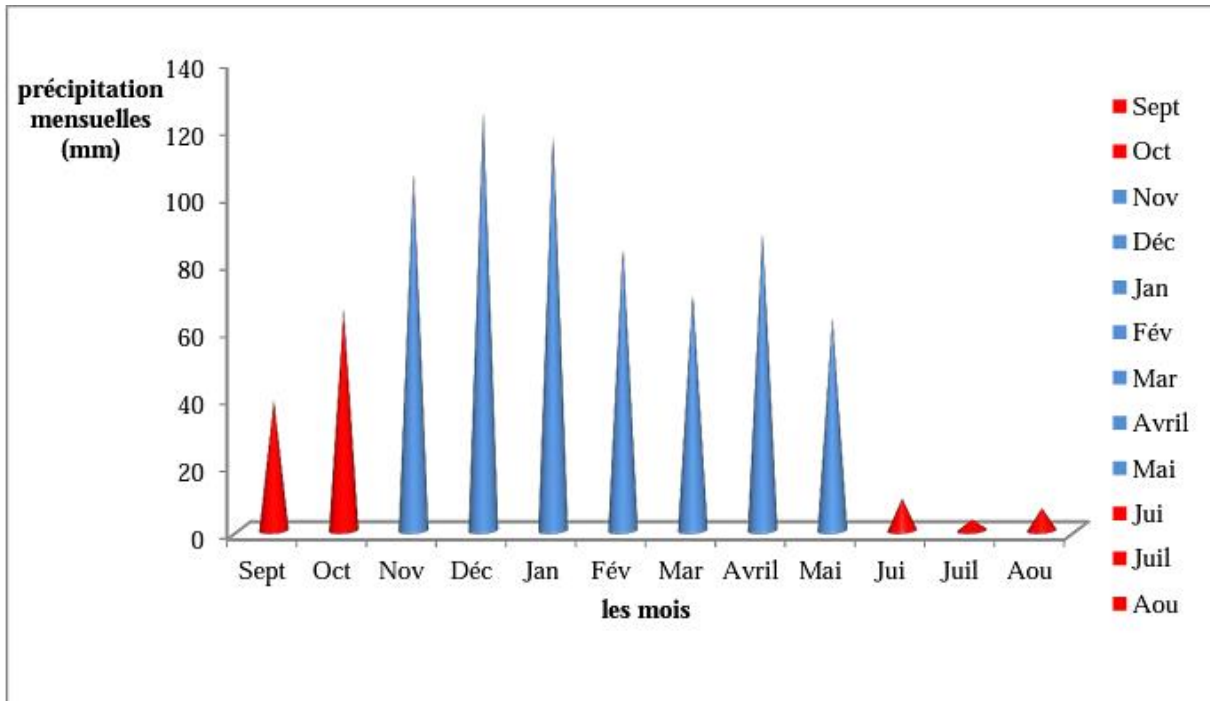


Figure 14 : Précipitations mensuelles de la station ANRH de Tizi-Ouzou, (1990-2012)

- L'histogramme illustre la répartition des précipitations mensuelles entre 1990 et 2012. Il montre deux périodes distinctes : de novembre à mai, les mois sont plus pluvieux, avec un pic de précipitations en décembre, alors qu'ils diminuent de juin à septembre, signalant le début de la saison sèche. La valeur maximale des précipitations est enregistrée en décembre (123,9 mm), tandis que la valeur minimale se trouve en juillet (3,3 mm). Cet histogramme permet d'observer les variations mensuelles des précipitations sur la période étudiée.

4.2 Températures

4.2.1 Les Températures annuelles

La température annuelle moyenne est un indicateur météorologique qui représente la moyenne des températures maximales et minimales enregistrées au cours d'une année donnée. Pour obtenir cette valeur, on calcule la moyenne de la température la plus basse enregistrée pendant le mois le plus froid de l'année et on la combine avec la moyenne de la température la plus élevée enregistrée pendant le mois le plus chaud.

Ce paramètre joue un rôle fondamental dans le climat, car il influe sur de nombreux autres facteurs climatiques tels que les précipitations, l'humidité, les saisons, et les variations météorologiques. En étudiant les données disponibles au niveau de la station météorologique de Tizi-Ouzou, il est possible d'établir un ordre de grandeur des conditions climatiques dans la zone d'étude.

Tableau 6 : Températures moyennes mensuelles de la station de Tizi-Ouzou, (1990-2012)

année	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
T°C	19	18	17	18	19	18.2	18	18	18.3	18.1	19	19

année	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
T°C	18	19	18	18.1	18.4	18.9	18	18.5	19	18	19

➤ La moyenne annuelle des températures est : 18,3 °C.

4.2.2 Les Températures mensuelles

La température moyenne mensuelle représente la valeur obtenue en calculant la moyenne des températures moyennes quotidiennes de tous les jours qui composent le mois considéré. Ce-la signifie que l'on additionne toutes les températures moyennes relevées chaque jour pendant le mois, puis on divise cette somme par le nombre total de jours du mois. Cette méthode permet d'obtenir une mesure globale de la température moyenne pour cette période spécifique, ce qui est essentiel pour comprendre les variations climatiques sur une base mensuelle.

Tableau 7 : Température mensuelle de la station de Tizi-Ouzou, (ANRH 1990 - 2012)

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
T _{moy} °C	24,3	20	15	11,5	10,1	11	13	15	20	24	27,7	28
T _{Min} °C	21,6	17	13	9	7,4	6.5	12	14	16	21	25,6	26,3
T _{Max} °C	29,9	25	17	15,8	12,9	13	17	18	22	27	29,7	30,9

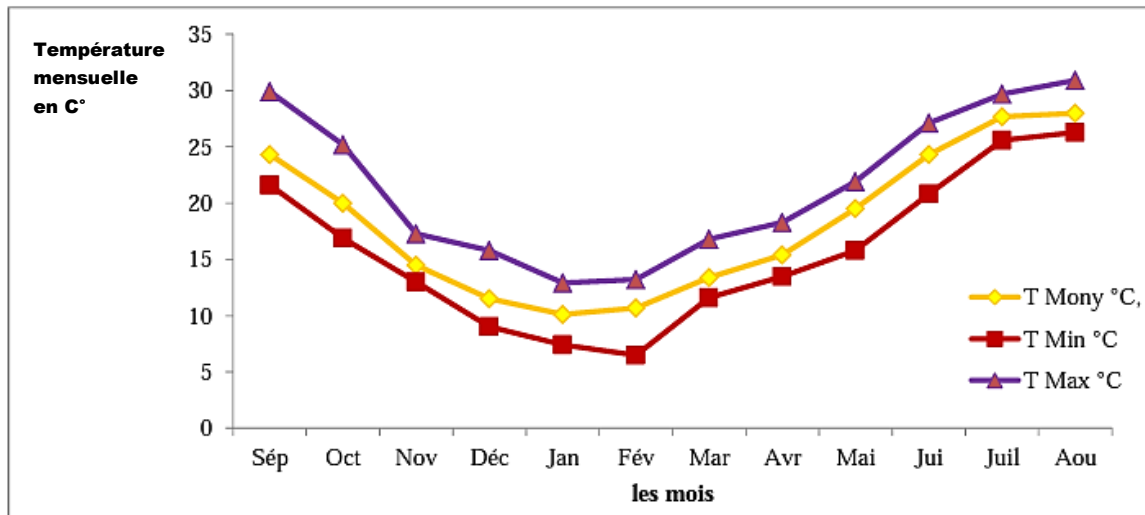


Figure 15 : La température mensuelle de la station de Tizi-Ouzou, (1990-2012)

$T_{Moy} \text{ } ^\circ\text{C} : 25$

$T_{Min} \text{ } ^\circ\text{C} : 5$

$T_{Max} \text{ } ^\circ\text{C} : 30$

- En été, la température atteint son maximum en août avec 28 °C, tandis qu'en hiver, elle atteint son minimum en janvier avec 10 °C. Pendant les trois mois d'hiver (décembre, janvier et février), la température diminue, alors qu'elle progresse pendant les trois mois d'été (juin, juillet et août). Le mois le plus chaud de l'année est août.

4.3 Humidité

L'humidité est un élément naturel de notre atmosphère, résultant de la présence de vapeur d'eau provenant principalement des océans, mers, lacs, et rivières. C'est un élément essentiel du cycle de l'eau, où l'eau s'évapore, forme des nuages, et se précipite sous forme de pluie ou de neige. L'humidité influence le climat, la météorologie, notre confort quotidien et joue un rôle crucial dans la régulation de la vie et de l'équilibre climatique de notre planète.

Tableau 8 : Humidité moyenne mensuelle station de Tizi-Ouzou, (1990-2012)

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
Humidité%	60	70	74	77	77	74	71	70	66	59	52	52

Ce tableau exprime l'humidité moyenne mensuelle en % (station de l'ANRH Tizi-Ouzou). On remarque que l'humidité est plus élevée pendant les mois d'automne et d'hiver, atteignant son sommet en novembre et décembre, pour ensuite diminuer progressivement jusqu'en août. Pendant les mois d'été, l'humidité moyenne est la plus basse.

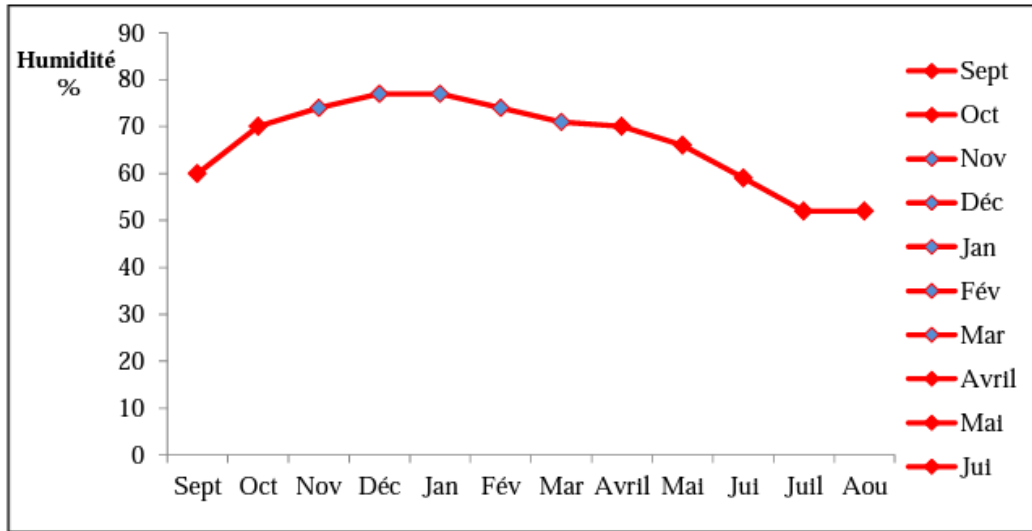


Figure 16 : Humidité réenregistrée à la station de Tizi-Ouzou, 1990 -2012)

- L'humidité à Tizi-Ouzou suit un schéma saisonnier, avec des niveaux élevés en automne et en hiver, atteignant un pic en novembre et décembre en raison de températures plus fraîches et de précipitations. En été, l'humidité diminue en raison de températures plus élevées et d'une évaporation accrue, atteignant son niveau le plus bas en juin-août.

4.4 Vitesse du vent

Le régime climatique d'une région, incluant les schémas de précipitations et l'évapotranspiration, est directement influencé par les vents. Par conséquent, il est important d'obtenir une compréhension précise de la répartition mensuelle et des directions des vents. Les seules données accessibles proviennent de l'étude de P. Seltzer réalisée en 1946 (Tableau 9). Les observations principales concernant les vents dans cette région indiquent deux directions dominantes : Est-Ouest et Sud-Est à Nord-Ouest. La vitesse moyenne enregistrée des vents est de 1,7 m/s.

Tableau 9 : Répartition mensuelle des paramètres du vent et nombre de jours moyen de Siroco à Tizi-Ouzou, (1913-1938)

Mois	Sept	Nov	Oct	Dec	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Année (la moyenne)
Direction de vent	w	w	w	w	w	w	w	w	W	w	w	w	W
Force de vent (m/s)	2,0	1,3	1,5	1,6	1,2	1,3	1,6	1,7	1,9	2,1	2,4	2,1	1,7
Sirocco Fréq en jours	1,4	1,0	0,6	0,3	0,2	0,4	0,9	0,7	0,8	0,8	1,5	2,0	0,8

- Le tableau représente la distribution mensuelle des paramètres du vent et le nombre moyen de jours de sirocco à Tizi-Ouzou entre 1913 et 1938. Les vents dominants

viennent de l'Ouest, les vitesses varient saisonnièrement (1.2 m/s en janvier à 2.4 m/s en juillet) en raison des différences thermiques. Le sirocco est plus fréquent en été (2.0 jours en août) en raison des températures désertiques et du gradient de pression.

- **Sirocco** : Le sirocco est un vent chaud et sec qui souffle du désert du Sahara vers les régions méditerranéennes et parfois au-delà. Il s'agit d'un vent caractérisé par sa chaleur intense et son pouvoir desséchant.

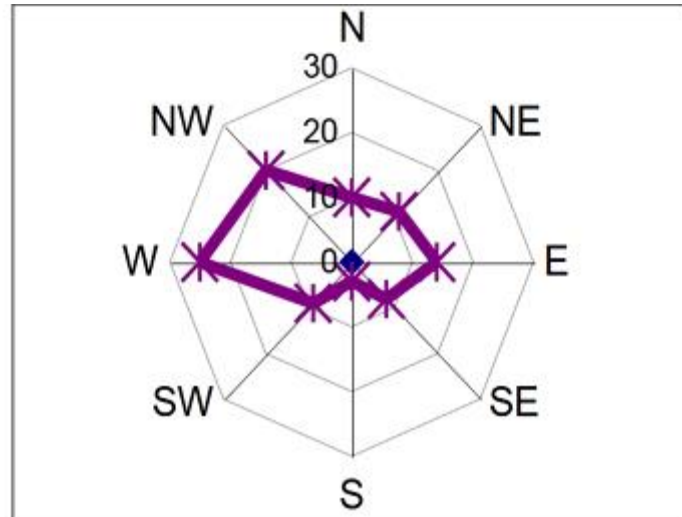


Figure 17 : La rose des vents à l'échelle annuelle à Tizi-Ouzou 1913-1938 (Seltzer1946)

4.5 Evaporation

L'évaporation désigne la transformation de l'eau en vapeur issue des étendues d'eau ou du sol humide, ainsi que la transpiration des plantes, connue sous le terme d'évapotranspiration.

Cependant, il convient de différencier l'évapotranspiration réelle (ETR) de l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'ETP, également appelée EP pour des raisons de simplicité, concerne l'évaporation et la transpiration lorsque l'approvisionnement en eau du sol est inépuisable.

L'évaporation est un phénomène lié à la température et à l'aridité, influencé par divers facteurs, tant atmosphériques (humidité, température, pression, vents) qu'en lien avec la surface. Elle est la résultante des échanges entre l'eau et l'atmosphère, constituant le passage de l'état liquide à l'état gazeux. Les valeurs d'évaporation pour les plans d'eau libres varient. Parmi les éléments influençant l'évaporation et son intensité, on compte les facteurs climatiques tels que l'ensoleillement, la température de l'air, l'humidité, la pression atmosphérique et la vitesse des vents, ainsi que des caractéristiques environnementales.

Le tableau suivant montre la répartition mensuelle de l'évaporation enregistrée par le tube de Piche à la station de l'ANRH Tizi-Ouzou sur la période de 1990-2012)

Tableau 10 : Evaporation mensuelle enregistrée par le tube Piche de la station ANRH de Tizi-Ouzou, (1990-2012)

Mois	Sept	Nov	Oct	Dec	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
Evaporation Moy (mm)	132	93,3	61,4	45,7	41,6	47	69,5	75,9	98	150	197,2	192,1	1203,5
Evaporation Min (mm)	108,9	64,2	38	25,3	29	34	48,2	37,1	60	86,4	136,2	132	799,3
Evaporation Max (mm)	181,6	119	84,2	90	61,6	85,5	104	101	147	197	249,8	263,5	1683
Écart-type	19,3	19,2	15,7	15,7	8,8	11,6	15,8	12,9	24,1	33	31,2	36,8	244,1

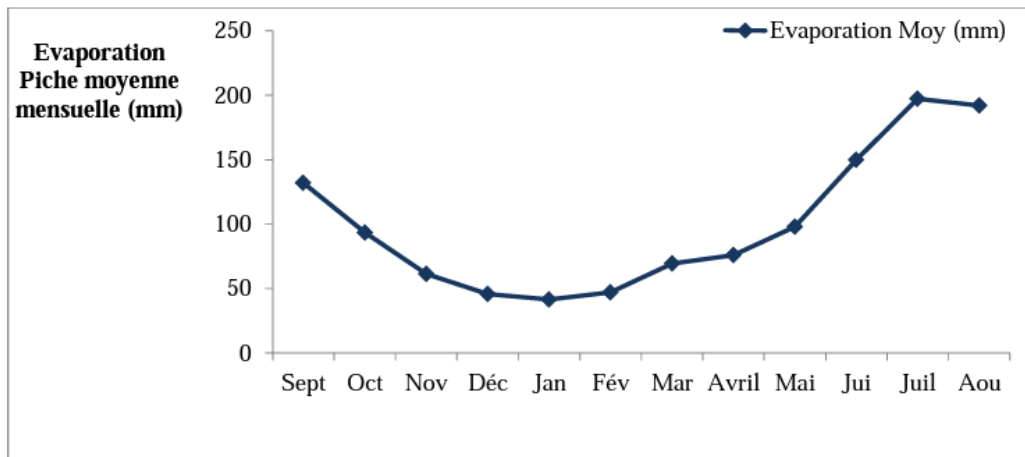


Figure 18 : Evaporation mensuelle enregistrée par le tube Piche de la station ANRH de Tizi-Ouzou, (1990-2012)

- L'histogramme représente l'évaporation mensuelle enregistrée par le tube Piche à la station ANRH de Tizi-Ouzou entre 1990 et 2012. Les valeurs d'évaporation varient tout au long de l'année, avec des pics en juillet et août, atteignant près de 250 mm, tandis que les valeurs minimales sont enregistrées en décembre et janvier, descendant à environ 25 mm en décembre. Les variations saisonnières sont mises en évidence, montrant des écarts plus élevés en été et des valeurs plus stables en hiver.
- Les variations d'évaporation mensuelle sont liées aux conditions climatiques. Les pics en juillet et août, résultent des températures élevées et de l'exposition solaire. Les valeurs minimales en décembre et janvier, s'expliquent par les températures plus basses et l'humidité accrue. Les variations saisonnières montrent : des valeurs plus élevées en été en raison des facteurs favorables à l'évaporation, et des valeurs plus basses en hiver en raison de conditions climatiques moins favorables.

4.5.1 Evapotranspiration réelle et Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la quantité effective d'eau retirée d'une surface due à l'évaporation et à la transpiration des plantes. L'évaporation transforme l'eau en vapeur depuis les surfaces, tandis que la transpiration libère l'humidité des plantes. Ces processus dépendent de facteurs tels que la température, l'humidité, la végétation et la disponibilité en eau du sol.

L'ETR joue un rôle crucial dans le cycle de l'eau, influençant les précipitations, les écosystèmes et la gestion de l'eau. Les scientifiques surveillent l'ETR pour prévoir les variations, gérer les ressources hydriques et comprendre les impacts du changement climatique.

a) Evapotranspiration réelle ETR

L'évapotranspiration réelle (ETR) d'un bassin versant désigne la somme d'eau évaporée ou transpirée depuis le sol, les plantes et les surfaces ouvertes. Mesurée en millimètres, l'ETR reflète la perte effective d'eau due à l'évaporation et à la transpiration, jouant un rôle majeur dans le bilan hydrique et l'équilibre écologique du bassin versant.

b) Evapotranspiration potentielle ETP

L'évapotranspiration potentielle (ETP) exprime la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée depuis un bassin versant si la disponibilité d'eau n'était pas une contrainte. En résumé, l'ETP représente la demande en humidité de l'atmosphère sur une surface donnée, tandis que l'évapotranspiration réelle (ETR) désigne l'humidité réellement absorbée par l'atmosphère. Ces mesures sont calculées au moyen de formules empiriques utilisant des paramètres simples tels que les précipitations, la température, l'humidité de l'air, le rayonnement solaire, le vent, et des indices spécifiques pour les variations saisonnières et les latitudes.

4.5.2 Estimation de l'évapotranspiration potentielle L'ETP selon C.W.Thornthwaite (1948)

La formule expérimentale de Thornthwaite permet de calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle et annuelle en fonction de la température moyenne mensuelle (T), de l'indice thermique annuel (I) basé sur les températures mensuelles, et des coefficients a et K, qui ajustent les valeurs en fonction de la latitude. L'ETP représente la quantité théorique d'eau évaporée et transpirée dans des conditions optimales.

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

Avec :

ETP : l'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée en mm.

T : la température moyenne mensuelle en °C.

I : Indice thermique annuel : somme des indices mensuels calculées à partir des températures moyennes mensuelles selon la formule :

$$I = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

$$a = \left(\frac{1.6}{100}\right) \times I + 0.5$$

K : coefficient d'ajustement mensuel. Dépend de latitude de la région.

Les résultats de l'ETP :

mois	sept	oct	nov	déc	janv	févri	mars	avril	mai	juin	juill	août	Total
T_{moy}M	24.3	20	14.5	11.5	10.1	10.7	13.4	15.4	19.5	24.3	27.7	28	18.3
Précipitations mensuelles (mm)	38.7	65.7	105.8	123.9	117.9	84.5	70.5	88.3	63.1	9.5	3.3	6.7	755
ETP	119.64	89.92	54.93	41.02	36.55	38.18	60.04	75.34	108.93	141.71	167.62	158.78	1092.66

- Au cours de l'année, l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans la région montre une évolution saisonnière distincte. En septembre, au début de l'automne, l'ETP diminue par rapport aux mois d'été, mais reste relativement élevée. Cette tendance à la baisse se poursuit en octobre et novembre, marquée par une diminution significative en raison de la baisse des températures. En décembre, l'ETP continue à diminuer avec l'arrivée de l'hiver, atteignant son point le plus bas en janvier, mois hivernal. À partir de février, l'ETP augmente légèrement en préparation du printemps, s'accéléralant de manière significative en mars. Avril marque une augmentation considérable de l'ETP à mesure que les températures augmentent, atteignant un pic en juin, en plein été. Juillet maintient des niveaux élevés d'ETP, caractéristiques de la saison estivale, suivis d'une légère diminution en août, signalant la fin de l'été. Le total annuel, à 1092.66 mm, représente la somme cumulée de l'ETP sur l'année, offrant une perspective globale de la quantité théorique totale d'eau évaporée et transpirée.

5 Bilan simplifié selon Thornthwaite

Le bilan simplifié selon Thornthwaite repose sur le concept de « réserve en eau facilement utilisable », également appelée RFU. Selon cette méthode, on considère que le sol peut stocker une certaine quantité d'eau, la RFU, qui peut être utilisée par les plantes pour l'évapotranspiration.

La RFU se situe entre les limites de 0 (quand elle est vide) et RFU max (la capacité maximale de stockage, variant généralement entre 0 et 200 mm en fonction des types de sols et de sous-sols. En Algérie du Nord, une RFU de 100 mm est utilisée.

Le processus de calcul du bilan se déroule de la manière suivante

- Si les précipitations (P) excèdent l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) est égale à l'ETP. L'excédent (P - ETP) est d'abord destiné à reconstituer la RFU, et si celle-ci est déjà pleine, il contribue à l'écoulement (Q).
- Si les précipitations sont inférieures à l'ETP, toute la pluie est évaporée et l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR est puisée de la RFU jusqu'à son épuisement. Ainsi, $ETR = P + \min(RFU, ETP - P)$, où RFU peut être soit 0, soit $RFU + P - ETP$.

- Si la RFU est vide ($RFU = 0$), la quantité ($Da = ETP - ETR$) représente le déficit agricole, indiquant la quantité d'eau nécessaire pour prévenir les effets de la sécheresse sur les plantes.

Pour établir ce bilan, il est nécessaire de définir la valeur maximale de la RFU en fonction des caractéristiques du bassin versant. Il faut également connaître l'état de la RFU à la fin du mois précédent le début du calcul du bilan. Deux approches sont envisageables :

- Si la RFU doit être pleine un jour, cela se produira à la fin de la période durant laquelle elle a pu être remplie, c'est-à-dire à la fin du dernier mois où les précipitations ont excédé l'ETP.
- Si la RFU doit être vide un jour, cela se produira à la fin de la période durant laquelle elle a pu être vidée, c'est-à-dire à la fin du dernier mois où les précipitations étaient inférieures à l'ETP.

Une fois ce bilan établi pour chaque mois, l'évapotranspiration réelle annuelle (ETR annuelle) est obtenue en additionnant les 12 valeurs mensuelles d'ETR.

L'application numérique pour trouver l'ETP selon Thornthwaite présent dans le tableau 11.

Tableau 11 : Bilan hydrologique selon Thornthwaite station l'ANRH de Tizi-Ouzou, (1990-2012)

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avril	mai	Juin	Juil	Aout	Total
Précipitations mensuelles (mm)	38,7	65,7	105,8	123,9	117,9	84,5	70,5	88,3	63,1	9,5	3,3	6,7	755
T_{moyM}	24,3	20	14,5	11,5	10,1	10,7	13,4	15,4	19,5	24,3	27,7	28	18,3
ETP	119,64	89,92	54,93	41,02	36,55	38,18	60,04	75,34	108,93	141,71	167,62	158,78	1092,66
ETR	38,7	65,7	54,93	41,02	36,55	34,18	60,04	75,34	108,93	63,67	3,3	6,7	593,06
RFU	0	0	100	100	100	100	100	100	54,12	0	0	0	/
Déficits Agricole	80,94	24,22	0	0	0	0	0	0	0	78,04	164,32	152,05	/
Écoulement	0	0	50,87	82,88	81,35	46,32	10,46	12,96	0	0	0	0	/

- L'analyse des données du tableau montre que : Le ETR est de 593,06 mm Soit 76,52 % des précipitations moyennes mensuelles, et pour cela, on peut diviser l'année hydrologique moyenne en deux périodes :

a) Période Humide (d'octobre à avril) : Pendant cette période, les précipitations dépassent l'évapotranspiration réelle (ETR). Cela indique un excès d'eau disponible, permettant de remplir la réserve en eau du sol (RFU). Les besoins en eau des plantes sont bien satisfaits, et la RFU est maintenue.

b) Période Sèche (de mai à septembre) : Au cours de cette période, les précipitations sont insuffisantes pour répondre aux besoins en eau des plantes. L'ETR dépasse les précipitations, ce qui épuise progressivement la RFU. La RFU diminue, atteignant son niveau minimum en été, entraînant un déficit en eau pour les plantes.

- **Calcul du ruissellement R**

Le ruissellement peut être calculé par la formule de Tixeront-Berkaloff qui s'exprime par :

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2} \text{ si } P < 600 \text{ mm ou } R = \frac{P^3}{3} \text{ si } P > 600 \text{ mm.}$$

R : ruissellement (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (mm) **P= 755 mm**

ETP : Evapotranspiration annuelle en (mm) **ETP= 1092,66 mm**

- Application numérique :

$$R = 143,46 \text{ mm}$$

$$R = 120,16 \text{ mm}$$

- **Calcul de l'infiltration I**

L'infiltration peut être estimée à partir de l'équation du bilan hydrologique comme suit :

$$I = P - (ETR + R)$$

I : lame d'eau infiltrée (mm)

ETR : évapotranspiration réelle annuelle (mm) **ETR= 593,06 mm**

R : ruissellement (mm) **R= 143,46 mm**

- Application numérique :

$$I = 755 - (593,06 + 143,46)$$

$$I = 41,78 \text{ mm}$$

- **Bilan hydrologique :**

	P	ETR	R	I
mm	755	593,06	143.46	18,48
%	100	78,5	19.0	2,45

Le bilan hydrologique indique une dominance de l'évapotranspiration, représentant 78,6% des précipitations. Le ruissellement contribue significativement avec 20,3%, soulignant des considérations importantes pour la gestion des eaux de surface. L'infiltration, bien que plus modeste, demeure cruciale pour la recharge des nappes souterraines.

6 Conclusion

Cette section d'étude a abouti à la détermination des caractéristiques géomorphologiques et climatiques du bassin versant du bas Sébaou. Le bassin versant présente une forme allongée avec un relief très accentué, couvrant une superficie de 172 km² et s'étendant sur un périmètre de 58 km. L'étude menée sur la période 1990-2012 nous a permis de calculer l'évapotranspiration réelle totale (ETR) au cours de cette période, représentant 78,6 % de la moyenne mensuelle des précipitations.

Cette analyse a également conduit à la division de l'année hydrologique en deux phases distinctes : une période humide et une période sèche. La température moyenne mensuelle enregistrée est de 18,3 °C.

CHAPITRE 5 : L'INTRUSION MARINE

1 Introduction

En général, le long des côtes, des plaines se forment grâce à l'accumulation de sédiments alluvionnaires. Ces plaines renferment des réservoirs aquifères dont les niveaux d'eau souterraine sont très proches de la surface, rendant le sol fertile. Cependant, l'équilibre hydrodynamique de ces systèmes aquifères dans les zones côtières est particulièrement délicat. Leur exploitation présente des défis spécifiques liés principalement aux interactions entre les eaux douces et les eaux marines.

Lorsque de l'eau salée pénètre dans une nappe aquifère souterraine, il est généralement difficile de faire disparaître ses effets. Par conséquent, il est préférable de chercher à anticiper les risques d'intrusion marine. Cela nous confronte à un double problème complexe, car il est essentiel de prendre en compte à la fois la quantité et la qualité de l'eau disponible.

Ces zones côtières, souvent arides ou semi-arides, connaissent une forte demande en eau pour subvenir aux besoins quotidiens des populations rurales et pour l'irrigation des cultures. Les agriculteurs des zones côtières agricoles ont besoin de vastes quantités d'eau pour leurs investissements, ce qui les pousse à creuser davantage de puits pour puiser dans les nappes côtières. Cependant, ces nappes sont généralement de minces lentilles d'eau douce flottant fragilement au-dessus d'une masse d'eau salée omniprésente.

En résumé, l'exploitation des eaux souterraines dans les zones côtières présente des enjeux complexes liés à la fragilité de l'équilibre entre les eaux douces et les eaux marines. La demande élevée en eau pour l'agriculture accentue encore plus ces défis, ce qui nécessite une gestion prudente et durable de ces précieuses ressources en eau.

2 Généralités sur l'intrusion marine

L'intrusion marine est un phénomène hydrologique préoccupant qui se produit lorsque de l'eau salée provenant de la mer pénètre dans les réserves d'eau douce souterraine côtières (figure 19). Ce processus est principalement observé dans les régions où les aquifères côtiers sont en contact direct avec l'océan ou la mer. L'intrusion marine peut avoir des conséquences graves sur les ressources en eau douce, allant de la détérioration de la qualité de l'eau douce à la perturbation des écosystèmes côtiers sensibles.

L'intrusion marine est le résultat complexe de divers processus hydrologiques et géologiques, intimement liés aux variations du niveau de la mer, à l'hydrodynamisme des eaux souterraines et aux caractéristiques géologiques du sous-sol.

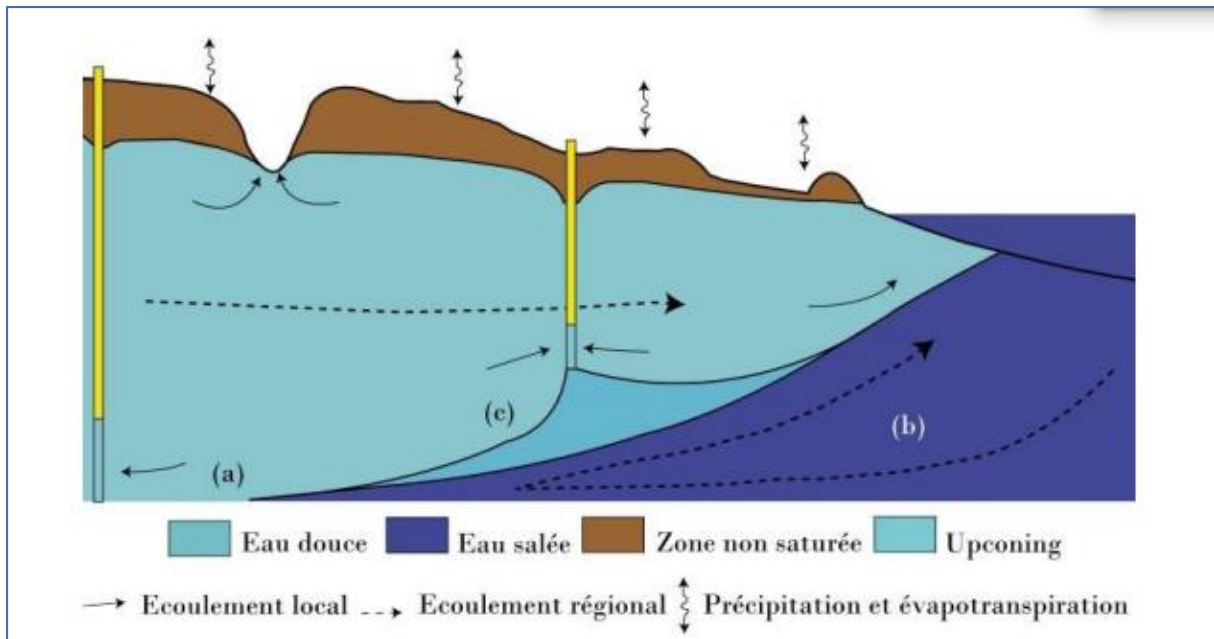


Figure 19 : Schéma simplifié d'un aquifère libre côtier (Werner et al. 2013)

- (a) Intrusion marine.
- (b) circulation de l'eau de mer.
- (c) remontée de l'eau de mer en raison du pompage.

3 Causes de l'intrusion marine

Plusieurs facteurs contribuent à l'intrusion marine dans les aquifères côtiers :

a. Réchauffement climatique

Le changement climatique provoque une élévation du niveau de la mer, augmentant la pression sur les aquifères côtiers et facilitant ainsi l'intrusion marine.

b. Surexploitation des eaux souterraines

Les humains surexploitaient l'eau souterraine dans de nombreux grands aquifères essentiels à l'agriculture (l'irrigation s'est surtout développée par une multiplication de pompes individuelles en rivières et en nappes). Ces prélèvements ont engendré des perturbations majeures du milieu naturel et aquatique, surtout en période d'étiage).

La surexploitation est le fait d'une exploitation trop intense d'une nappe d'eau souterraine, par exemple pour l'irrigation ou pour l'exploitation de ressources énergétiques fossiles. Dans le cas de la surexploitation, le volume d'eau extrait de la nappe n'est pas compensé par le volume de la recharge et ceci durant plusieurs années consécutives.

c. Géologie du sous-sol

La géologie du sous-sol joue un rôle essentiel dans la vulnérabilité des aquifères à l'intrusion marine. La perméabilité et la porosité des formations géologiques déterminent la facilité avec laquelle l'eau salée peut s'infiltrer dans l'aquifère.

d. Un puits mal positionné

Si un ouvrage de captage est réalisé trop près de la côte et qu'il est trop profond (la crépine est près de la zone de transition), l'eau pompée sera saumâtre et impropre à la consommation dès le début de son exploitation, parce que la crépine va se retrouver directement dans la zone où l'eau est salée. De plus, pendant la saison sèche, puisque la nappe ne se recharge pas, on a alors une avancée de l'intrusion saline dans la nappe, ce qui augmente le risque d'avoir un puits situé dans la zone de transition.

e. Forages mal réalisés et mal exploités

La mauvaise réalisation d'un forage en bordure du littoral où l'eau salée est susceptible de remonter, et provoquer une pollution de la nappe d'eau douce (figure 20). Cette pollution, quand elle est établie, est pratiquement irréversible. Toute la zone aquifère localisée autour du forage mal implanté, trop profond et/ou surexploité est touchée et provoque la pollution de tous les ouvrages du secteur (l'étendue de la pollution est proportionnelle au rabattement provoqué par le pompage).

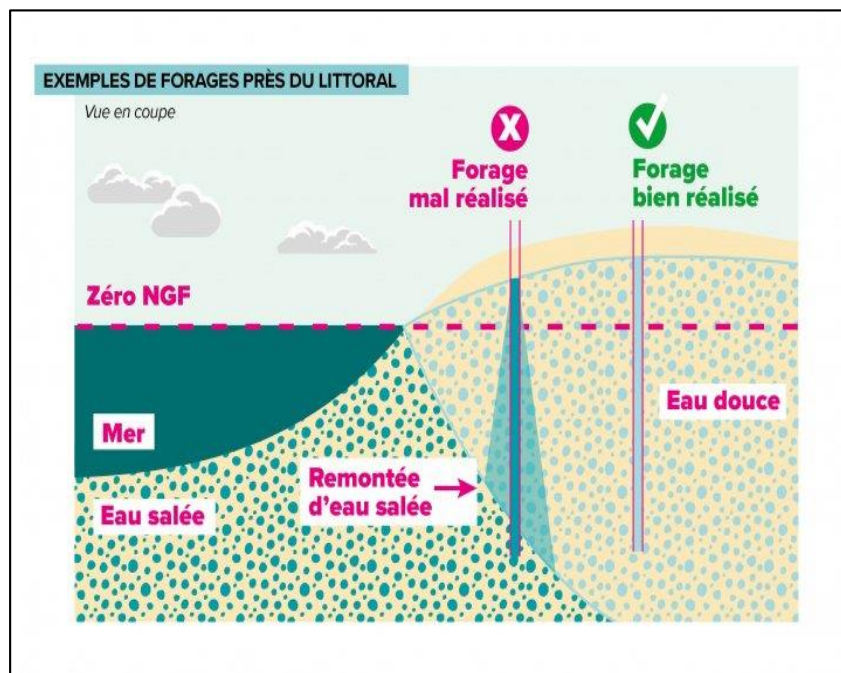


Figure 20 : Exemple d'implantation de forages en bordure de mer (SIGES Bretagne, 2023)

Exemple d'implantation de forages en bordure de mer (SIGES Bretagne, 2023)

Lors de la réalisation d'un forage, s'il dépasse le biseau salé, cela entraînera la remontée de l'eau salée dans l'eau douce et une pollution à long terme de celle-ci (figure 20). Il est donc impératif de ne pas le traverser pour éviter ces conséquences néfastes.

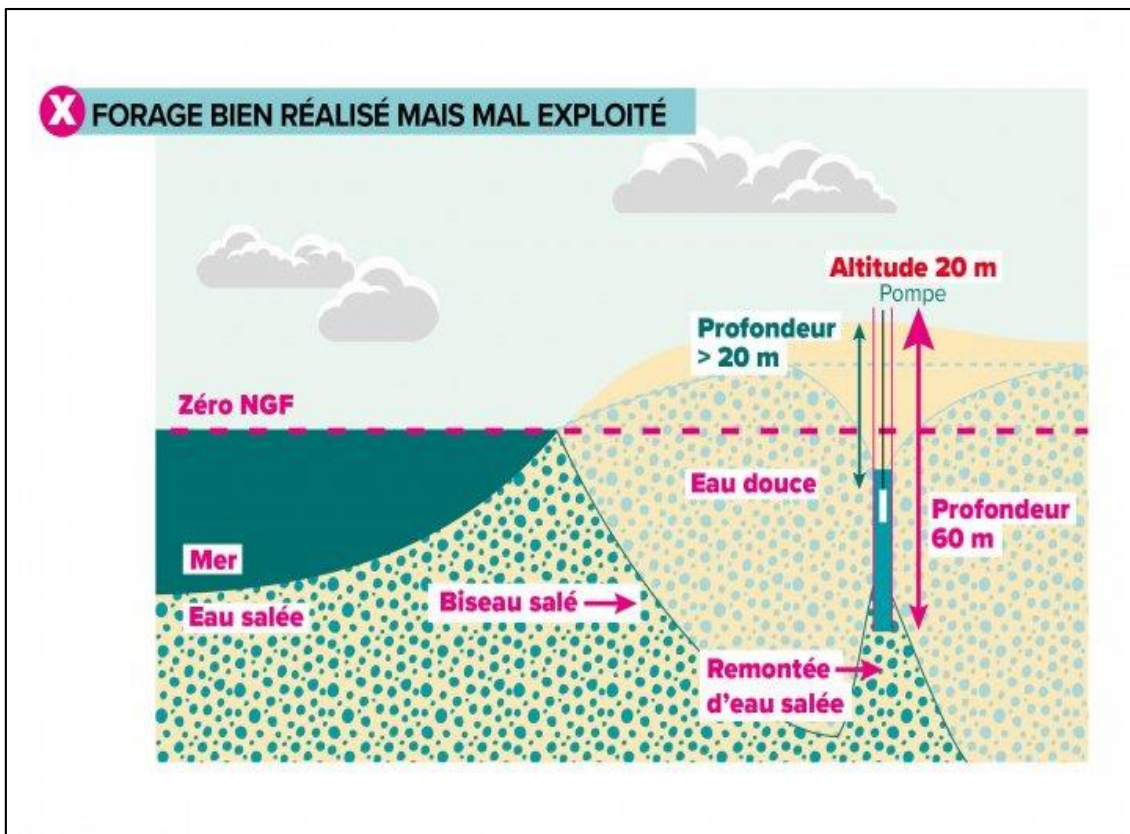


Figure 21 : Exemple d'exploitation d'un forage : pompe située sous le niveau de la mer (SIGES Bretagne, 2023)

En bordure de mer et le long des rivières où la mer remonte, faire descendre le niveau de la nappe sous le niveau de la mer entraînera un risque d'invasion saline. Pour éviter cette situation, il est important de veiller à ce que la pompe soit installée au-dessus du niveau de la mer, limitant ainsi les risques potentiels.

4 La remontée du niveau de la mer

Il correspond à la remontée du niveau marin pendant l'histoire géologique. D'après certains chercheurs, il y a 20 000 ans, lors du dernier maximum glaciaire, le niveau marin était de 130 mètres inférieur à celui que nous connaissons actuellement, une grande partie de l'eau terrestre se trouvant sous forme de glace continentale. Il est ensuite progressivement remonté avec la déglaciation et les experts considèrent qu'il s'est stabilisé, il y a environ 3000 ans. Depuis, le niveau moyen de la mer a peu varié : il ne se serait élevé que de 0,5 millimètres par an au maximum. Durant la remontée importante du niveau marin, les aquifères côtiers, ont été envahis par la mer. Depuis sa stabilisation, les eaux marines ont pu être repoussées dans les aquifères où le gradient piézométrique était suffisamment élevé. Pour des aquifères à faibles gradient hydrauliques, l'intrusion marine n'a pas toujours pu être repoussée. Le degré de l'intrusion marine dépend des conditions hydrogéologiques de l'aquifère (géométrie, perméabilité...).

Les conséquences et l'importance de l'intrusion sont donc très variables suivant les endroits, allant d'une contamination locale restreinte dans une petite partie de l'aquifère, à une contamination régionale affectant fortement la ressource en eau.

Les variabilités climatiques locales couplées aux changements globaux vont irrémédiablement modifier les caractéristiques des principales composantes du cycle hydrologique, l'abondance des précipitations leur type, leur fréquence ainsi que leur répartition géographique et saisonnière. Les taux d'évaporation et d'évapotranspiration, la survenue et la vitesse de la fonte des neiges. L'évaluation des capacités actuelles et futures des modèles pour prédire les conditions climatiques futures et les composantes du cycle hydrologique est un enjeu fondamental pour prédire le devenir des ressources en eaux souterraines. Il est largement établi qu'une hausse de la température de l'air induit une plus forte évapotranspiration et que l'infiltration des précipitations, étant dépendante du type d'événement pluvieux (durée, intensité et fréquence), une réduction de la recharge des aquifères serait probable dans le contexte des changements climatiques.

5 Pollutions diffuses par les activités anthropiques

Les aquifères côtiers et insulaires sont sensibles aux pollutions diffuses qui s'exercent en surface ainsi qu'à celles qui s'exercent directement en profondeur. Cinq grandes classes d'activités peuvent être responsables de ces pollutions :

- Occupation et transformation des sols (agriculture, foresterie, irrigation, barrage)
- Urbanisation et développement municipal (extraction d'eau, fosse septique, etc.).
- Développement industriel (perte ou déversement de produits, injection souterraine.
- Développement d'exploitation minière (cendres volantes des centrales thermiques, zone de stockage et déversement d'hydrocarbures, etc.).
- Transport (stockage du sel pour les routes, ruissellement sur les infrastructures routières...etc.)

6 Mécanismes de l'intrusion marine

Dans un état d'équilibre dans l'aquifère côtier, la nappe surmonte l'eau de mer affectant la forme d'un biseau (figure 22). Tout prélèvement intense au niveau d'un ouvrage de captage va causer un abaissement du niveau piézométrique et ainsi modifier cet état d'équilibre. Cela se traduit par une avancée du biseau d'eau salée qui peut atteindre le fond du puits (Todd, 1980).

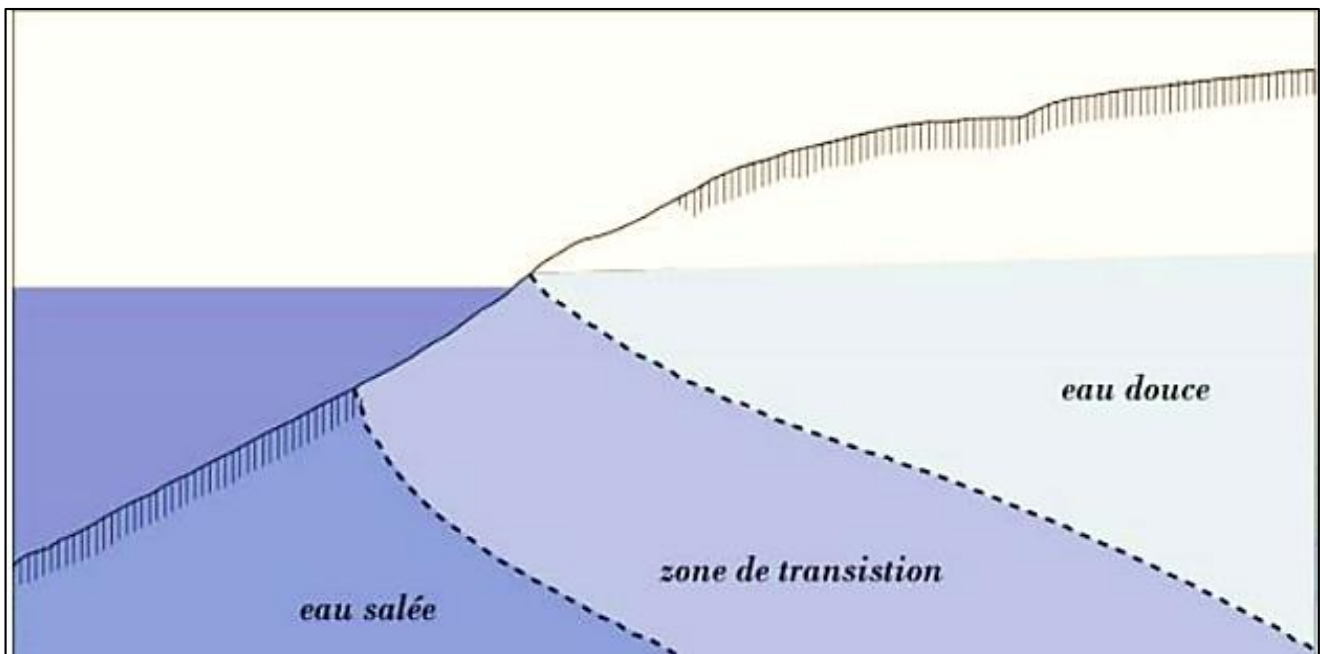


Figure 22 : Zone de transition dans une intrusion marine (Custodio, 2002)

Cette zone est étroite dans les milieux poreux et homogènes. Son épaisseur varie selon les caractéristiques géologiques et hydrodynamiques de l'aquifère ainsi que la marée et la surexploitation de la nappe.

7 Un aquifère côtier

Un aquifère côtier désigne un réservoir d'eau souterraine situé dans les régions proches des côtes et qui est en connexion avec la mer ou l'océan. Cette connexion peut être directe, ou bien se faire par le biais d'une zone humide. Les aquifères côtiers sont susceptibles d'être influencés par l'invasion marine, un phénomène au cours duquel l'eau de mer pénètre à l'intérieur des terres sur une distance pouvant s'étendre sur plusieurs kilomètres. Cette situation représente un risque considérable pour les régions côtières qui dépendent des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau.

Dans certaines conditions, l'eau salée avance à l'intérieur des terres et contamine les eaux de l'aquifère côtier. En conséquence, les eaux souterraines deviennent salines, ce qui entraîne une détérioration de la qualité des sols et une salinisation due à l'irrigation avec ces eaux salées. La salinisation de l'aquifère côtier peut être provoquée par plusieurs facteurs, notamment la présence de sédiments marins qui sont partiellement lessivés dans l'aquifère ou à proximité de celui-ci. De plus, l'eau salée piégée dans des couches profondes, l'infiltration d'eau saumâtre provenant d'estuaires ou de sources de surface peuvent également contribuer à ce phénomène.

8 Salinité des eaux

Le terme de salinité est souvent utilisé comme synonyme de chlorinité qui désigne la concentration en chlore dissous sous forme de chlorures (mg/l ou g/l). La salinité peut être déterminée directement par la somme des concentrations mesurées en éléments dissous et indirectement, à partir de la conductivité électrique (ms/cm).

On classe les eaux en fonction de leur salinité. Les gammes de concentrations sont représentées dans la (Figure 23) :

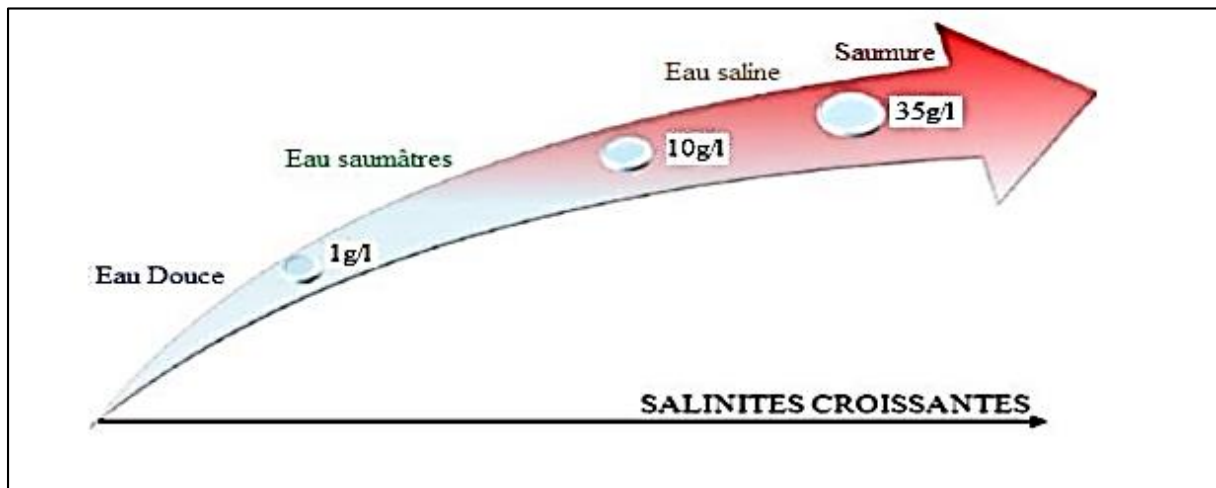


Figure 23 : Gammes de concentrations et terminologie (Hanor 2005)

On considère en fonction de leur salinité, les eaux douces, saumâtres, salines et les saumures

-Eau douce : eau dont la salinité est inférieure à 1g/l.

-Eau saline : eau dont la salinité est comprise entre 1 g/l et 35 g/l.

-Saumure : eau dont la valeur de salinité est supérieure à la valeur moyenne de celle de l'eau de mer, c'est-à-dire plus de 35 g/l TDS (3.5×10^4 mg/l TDS).

9 Sources possibles de minéralisation des eaux douces

Les sources de la salinisation des eaux douces peuvent être classées en deux principaux groupes, salinisation naturelle ou salinisation anthropique (Williams, 1987).

a. La salinisation naturelle : C'est la conséquence des facteurs géologiques et climatiques. Plusieurs éléments chimiques proviennent de la roche aquifère. Dans les régions arides et semi-arides de la planète, l'évaporation produit une concentration en sels dans les eaux. Dans les zones arides côtières la salinisation peut être due à la pénétration de l'eau de mer, en conséquence de la rareté des précipitations, donc une faible recharge de la nappe.

b. La salinité anthropique : C'est la conséquence de l'action humaine, les pratiques agricoles et le pompage non contrôlé.

10 Facteurs déterminants le biseau salé

10.1 Effet de l'exploitation

L'exploitation intensive de la nappe côtière par des creusements de puits anarchiques entraîne un déséquilibre hydrodynamique au niveau de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée de la mer. Ce phénomène se manifeste par une réduction des débits souterrains et une baisse du niveau de la nappe. Ainsi, le niveau de la nappe devient inférieur à celui de la mer, ce qui provoque un influx d'eau marine vers l'aquifère côtier.

10.2 Situation par rapport à la mer

La distance du point de captage par rapport à la mer joue un rôle déterminant dans l'évolution de la qualité des eaux. En effet, ces eaux accusent une salinité de plus en plus élevée au fur et à mesure que l'on se rapproche du rivage.

10.3 Alimentation de la nappe

Généralement, les nappes d'eau souterraines côtières sont alimentées principalement par l'infiltration et la percolation efficaces des eaux de pluie. Le taux d'infiltration efficace conditionne l'évolution piézométrique et par conséquent l'évolution de la qualité des eaux souterraines. En effet, une importante infiltration efficace va favoriser une élévation du niveau de la nappe, une augmentation de son débit et un phénomène de dilution de sa salinité. Dans le cas contraire, une infiltration efficace moindre ou nulle, combinée à des pompages intensifs. Un abaissement du niveau de la nappe est observé avec une surconcentration saline des eaux souterraines.

10.4 Hydrogéologie

La nature lithologique de l'aquifère, sa perméabilité, sa productivité, son épaisseur et la topographie du substratum à proximité de la mer sont tous des facteurs qui jouent des rôles importants dans les mécanismes de pollution des eaux souterraines. Les débits souterrains faibles et une bonne perméabilité de l'aquifère côtier favorisent des intrusions marines dont l'extension dépend de l'intensité des pompages dans ces endroits vulnérables.

11 Approche hydrostatique

❖ La loi de Ghyben-Herzberg

La "Loi de Ghyben-Herzberg" est un principe hydrogéologique qui décrit la relation entre une nappe d'eau douce et une nappe d'eau salée en contexte côtier dans une zone d'aquifère côtier stratifié. Cette loi a été formulée indépendamment par les géologues néerlandais Eelco Ghyben et Joseph Valentine Franz Herzberg au début du 20e siècle.

La loi de Ghyben-Herzberg repose sur l'équilibre hydrostatique dans un aquifère côtier composé de deux couches : une couche supérieure constituée d'eau douce (légère) et une couche inférieure constituée d'eau salée (dense). Cette loi est particulièrement pertinente pour les systèmes d'aquifères côtiers dans lesquels l'eau douce est présente au-dessus de l'eau salée en raison de la différence de densité entre les deux types d'eau.

Selon cette loi, l'interface entre l'eau douce et l'eau salée dans un aquifère côtier se trouve à une profondeur égale à 40 fois la hauteur (élévation) de la nappe d'eau douce au-dessus du niveau de la mer. (Figure 24)

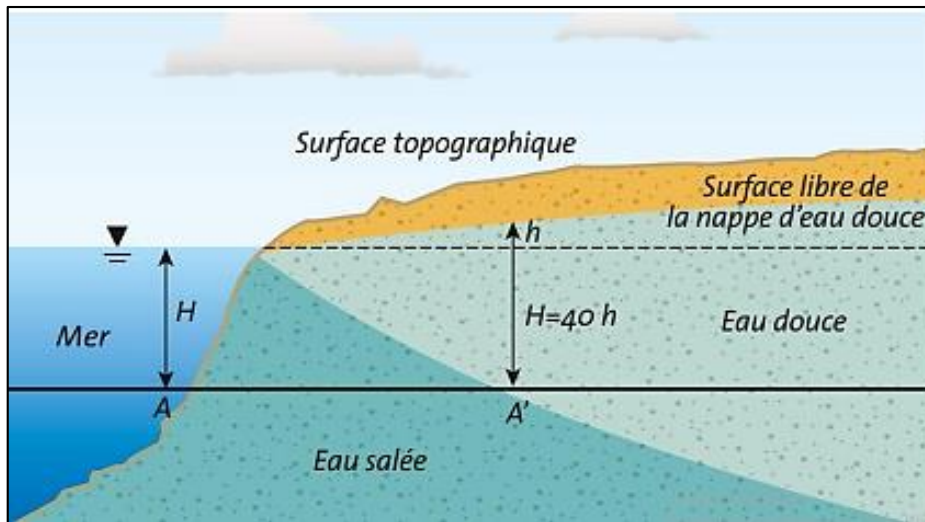


Figure 24 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon le principe de Ghyben-Herzberg.

Sur une ligne horizontale **AA'** on a : **$H \cdot d_s = (H+h) \cdot d$**

d_s : la densité de l'eau salée

d : la densité de l'eau douce

h : la hauteur d'eau douce au-dessus du niveau de la mer en un point **A'**

H : la hauteur de l'interface

$$H \times 1.025 = (H + h)1$$

$$H = \frac{h}{d_s - 1}$$

$$H = \frac{h}{0.025} = 40h$$

La densité de l'eau de mer varie en fonction de sa salinité. Pour une concentration équivalente de NaCl de 36 g/l, elle est égale à 1,025. Cette valeur représente la moyenne de salinité des mers et des océans.

Aussi, si **$d_s=1,025$** , on a : **$H = h/ 0,025 = 40h$**

- Cela signifie qu'en un point quelconque de la nappe, l'interface eau douce/eau salée se situe sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation du niveau de la nappe au-dessus du niveau de la mer (Lorsqu'une nappe d'eau douce se trouve près de la côte et que la pression de l'eau salée de la mer exerce une influence sur cette nappe, on observe un phénomène appelé "intrusion marine". L'interface eau douce/eau salée est la limite entre ces deux types d'eau).

Cette relation est une approximation simplifiée, valable pour un aquifère non perturbé par des facteurs tels que les variations de perméabilité, les intrusions artificielles, ou d'autres influences locales.

Cette loi a des implications importantes pour la gestion des ressources en eau douce dans les zones côtières. Elle permet de comprendre comment les changements dans le niveau de la nappe d'eau douce peuvent affecter la profondeur de l'interface eau douce/eau salée et, par conséquent, la vulnérabilité de l'aquifère à l'intrusion saline. Cette loi est souvent utilisée comme un outil de base pour évaluer les risques d'intrusion saline dans les nappes d'eau douce situées à proximité des zones côtières.

12 Approche hydrodynamique

L'amélioration du principe de Ghyben-Herzberg par les approches hydrodynamiques rend plus réaliste la description géométrique de l'interface eau douce / eau salée en fonction du niveau piézométrique de la nappe.

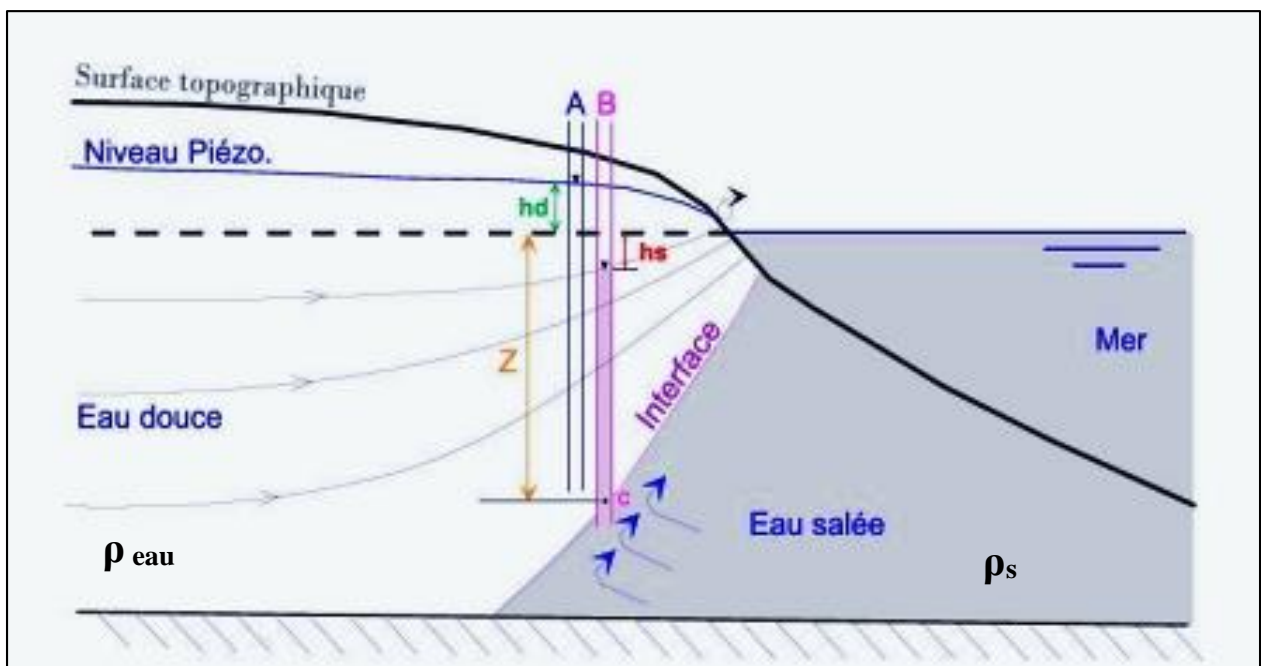


Figure 25 : Schéma hydrodynamique.

Près de la côte, l'interface avec l'eau de mer se situe donc plus en profondeur que ce que prédit le principe de Ghyben-Herzberg (figure 25) :

$$Z = (\rho \cdot h_d - \rho_s \cdot h_s) / (\rho_s - \rho)$$

Avec :

h_a et h_s niveaux piézométriques de l'eau douce et l'eau salée respectivement.

ρ_s : la masse volumique de l'eau salée

ρ : la masse volumique de l'eau douce

13 Identification de l'intrusion marine

13.1 Méthodes d'étude de l'intrusion marine

La délimitation de l'interface eau douce-eau salée est très compliquée à déterminer, ce qui rend la lutte contre ce problème délicat, difficile et nécessite une approche pluridisciplinaire. Plusieurs auteurs ont étudié le phénomène pour localiser la position de l'interface « eau douce - eau salée » par différentes méthodes tels que la géophysique, la piézométrie et la chimie.

13.1.1 La géophysique

L'utilisation de la géophysique s'est avérée essentielle pour identifier l'intrusion marine. En observant les variations des valeurs de résistivité électrique dans le sous-sol, les scientifiques peuvent détecter les changements dans la composition des eaux souterraines. Lorsque l'eau salée pénètre dans une zone d'eau douce, les propriétés électriques du sous-sol changent en raison de la conductivité différente de ces deux types d'eau. La cartographie des variations de résistivité peut donc fournir des informations cruciales sur la présence et l'extension de l'intrusion marine.

13.1.2 La Piézométrie

L'étude des niveaux d'eau dans les piézomètres permet de déterminer le sens de l'écoulement des eaux souterraines. En examinant la direction dans laquelle l'eau se déplace, les chercheurs peuvent déduire le sens de migration de l'eau douce et de l'eau salée. Cela aide à saisir la manière dont l'intrusion marine se propage au sein des aquifères et les éventuelles méthodes pour la maîtriser.

13.1.3 La chimie des eaux

L'analyse de la composition chimique des eaux souterraines est une méthode fondamentale pour détecter l'intrusion marine. En étudiant la répartition spatiale et l'évolution temporelle des concentrations en ions majeurs, les chercheurs peuvent identifier des signatures chimiques spécifiques associées à l'intrusion d'eau salée. Cette approche permet de suivre le biseau salé au fil du temps et de comprendre comment les mélanges d'eau douce et d'eau salée influencent la qualité de l'eau souterraine.

14 Conclusion

L'intrusion marine joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la pollution des eaux de surface et souterraines, et représente un défi significatif pour de nombreux aquifères côtiers en Méditerranée, notamment le long du littoral algérien. L'exploitation intensive de ces aquifères expose à un risque de contamination par l'eau de mer salée, dont les conséquences peuvent être difficiles à inverser.

Cependant, avec une bonne connaissance de l'hydrogéologie et une gestion rationnelle, il est possible d'exploiter ces aquifères côtiers sans provoquer d'intrusion saline. Ils demeurent une précieuse ressource en eau, qui peut être préservée par des mesures adéquates.

Pour mieux comprendre et identifier l'intrusion marine et l'eau de mer salée, des campagnes hydrochimiques et piézométriques ont été entreprises dans différents secteurs de la plaine du Bas Sébaou, à divers moments hydrologiques. Ces études permettent de mieux cerner ces phénomènes et de proposer des solutions adaptées pour préserver la qualité et la disponibilité de cette ressource vitale en eau. En adoptant une approche raisonnée et en s'appuyant sur les résultats de ces recherches, il est possible de trouver un équilibre entre l'exploitation des aquifères côtiers et la préservation de leur intégrité hydrologique.

CHAPITRE 6 : CAMPAGNE PIEZOMETRIQUE

1 Introduction

L'exploitation anarchique des nappes côtières entraîne une importante baisse de leur niveau, ce qui provoque l'intrusion marine. Ce phénomène ne doit pas être négligé, car il a des conséquences graves sur la santé humaine, les végétaux et la qualité du sol. Il est crucial de prendre des mesures appropriées pour faire face à cette situation préoccupante.

Le bas Sébaou représente l'une des régions d'Algérie les plus fortement impactées par ce phénomène. Les cartes piézométriques montrent clairement l'inversion complète du sens d'écoulement des eaux, passant de la mer vers le continent et atteignant ainsi les zones de captage où les niveaux piézométriques se situent en dessous du niveau de la mer (ANRH). L'étude piézométrique est réalisée après la campagne piézométrique.

Les services de l'ANRH de Tizi-Ouzou effectuent régulièrement des campagnes de mesures piézométriques dans la vallée du Sébaou en hautes et basses eaux.

Dans le contexte du programme d'action 2005 de l'Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), un ensemble de vingt piézomètres a été installé dans la vallée alluviale du bas Sébaou (figure 26). L'objectif de cette initiative est de surveiller les variations des niveaux d'eau statiques dans la nappe alluviale de la région.

Nous avons réalisé des mesures du niveau statique lors de la campagne piézométrique en juillet 2023 dans la plaine du bas Sébaou (tableau 13). L'objectif était de surveiller et de contrôler les variations des niveaux statiques par rapport à la mer.

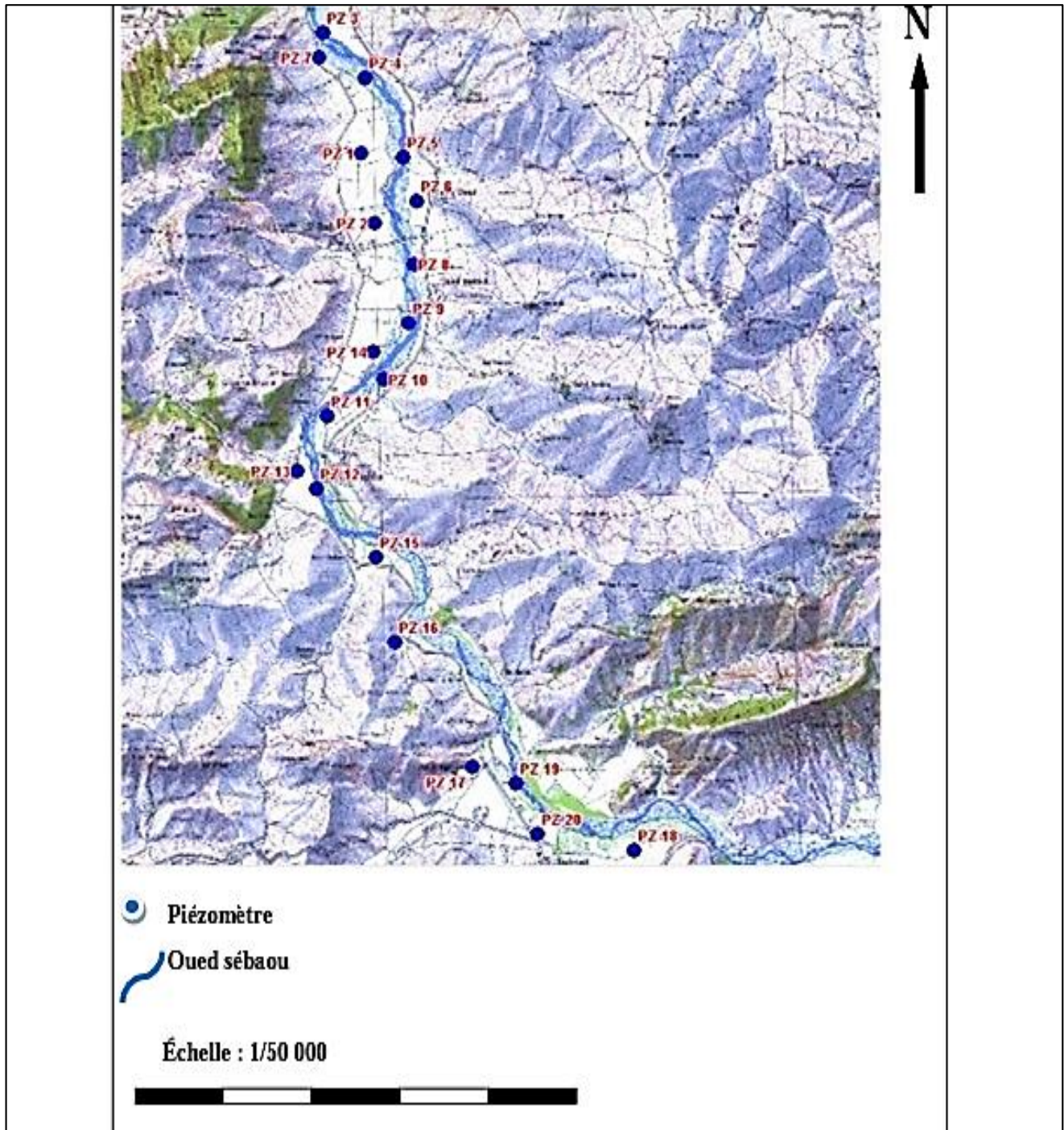


Figure 26 : Situation des piézomètres du Bas Sébaou sur fond topographique l'échelle 1/50 000 (ANRH), 2005/2006

Tableau12 : coordonnées et caractéristiques des puits et forages du Bas Sébaou. Campagne juin 2023.

NOM	N°B.I.R.H	N°catalogue	type d'ouvrage	X (m) Lambert	Y (m) Lambert	Z (m)	NS/s (m)	N.P(m)
F5	W023-001	E00804641	FORAGE	618166	385274	55,99	2,10	53,89
P7	W023-002	E00804642	PUITS	616125	384939	50,94	0,9	50,04
P16	W023-004	E00804644	PUITS	615300	384725	54	4,4	49,60
F23	W023-005	E00804645	FORAGE	614166	384046	44,74	Fermé	/
F31	W023-007	E00804647	FORAGE	613670	384440	43,21	à sec	/
P34	W023-008	E00804648	PUITS	615989	382971	41,73	6,7	35,03
F51	W023-009	E00804649	FORAGE	615540	383090	48,3	Inaccessible	/
F82	W023-012	E00804652	FORAGE	613733	382941	43,22	14,70	28,52
F7	W023-003	E00804643	FORAGE	614487	382170	49,7	Bouché	/

NS/s : le niveau statique par rapport au sol.

N.P : le niveau piézométrique.

Tableau13 : les résultats de mesures piézométriques de la vallée de Bas Sébaou. Campagne juin 2023.

NOM	N°B.I.R.H	N°catalogue	type d'ouvrage	X (m) Lambert	Y (m) Lambert	Z (m)	NS/s (m)	N.P(m)	la distance par rapport à la mer (km)
PZ1	W023-016	E00904249	PIEZOMETRE	603921	397281	28	11,51	16,49	4,07
PZ2	W023-017	E00808407	PIEZOMETRE	604185	395928	29	18,8	10,2	6,28
PZ3	W023-018	E00808408	PIEZOMETRE	603200	399614	21	5,82	15,18	2,91
PZ4	W023-019	E00808409	PIEZOMETRE	604003	398730	17	2,27	14,73	6,3
PZ5	W023-020	E00808410	PIEZOMETRE	604739	397198	13	8,57	4,43	8,09
PZ6	W023-021	E00808411	PIEZOMETRE	605009	396365	16	10,3	5,7	9,78
PZ7	W023-022	E00808412	PIEZOMETRE	603107	399120	15	5,07	9,39	3,14
PZ8	W023-023	E00808413	PIEZOMETRE	604974	395163	13	12,47	0,53	10,02
PZ10	W023-025	E00808415	PIEZOMETRE	605934	387270	20	12,53	7,47	20,25
PZ11	W023-026	E00808416	PIEZOMETRE	603263	392218	24	14,26	9,74	13,78
PZ12	W023-027	E00808417	PIEZOMETRE	603057	390829	20	15,53	4,47	15,61
PZ13	W023-028	E00808418	PIEZOMETRE	602681	391164	-	15,66	N,D	10,51

PZ14	W023-029	E00808419	PIEZOMETRE	604165	393462	-	12,94	-	-
PZ15	W023-030	E00808420	PIEZOMETRE	604237	389518	-	15,76	-	12,77
PZ16	W023-031	E00808421	PIEZOMETRE	604604	387889	-	9,9	-	14,31
PZ17	W023-032	E00808422	PIEZOMETRE	606121	385473	-	18,56	N,D	16,96
PZ18	W023-033	E00808423	PIEZOMETRE	609265	383878	-	5,65	-	21
PZ19	W023-034	E00808424	PIEZOMETRE	606943	385175	-	17,88	-	-
PZ20	W023-035	E00808425	PIEZOMETRE	607376	384194	-	17,7	-	20,25

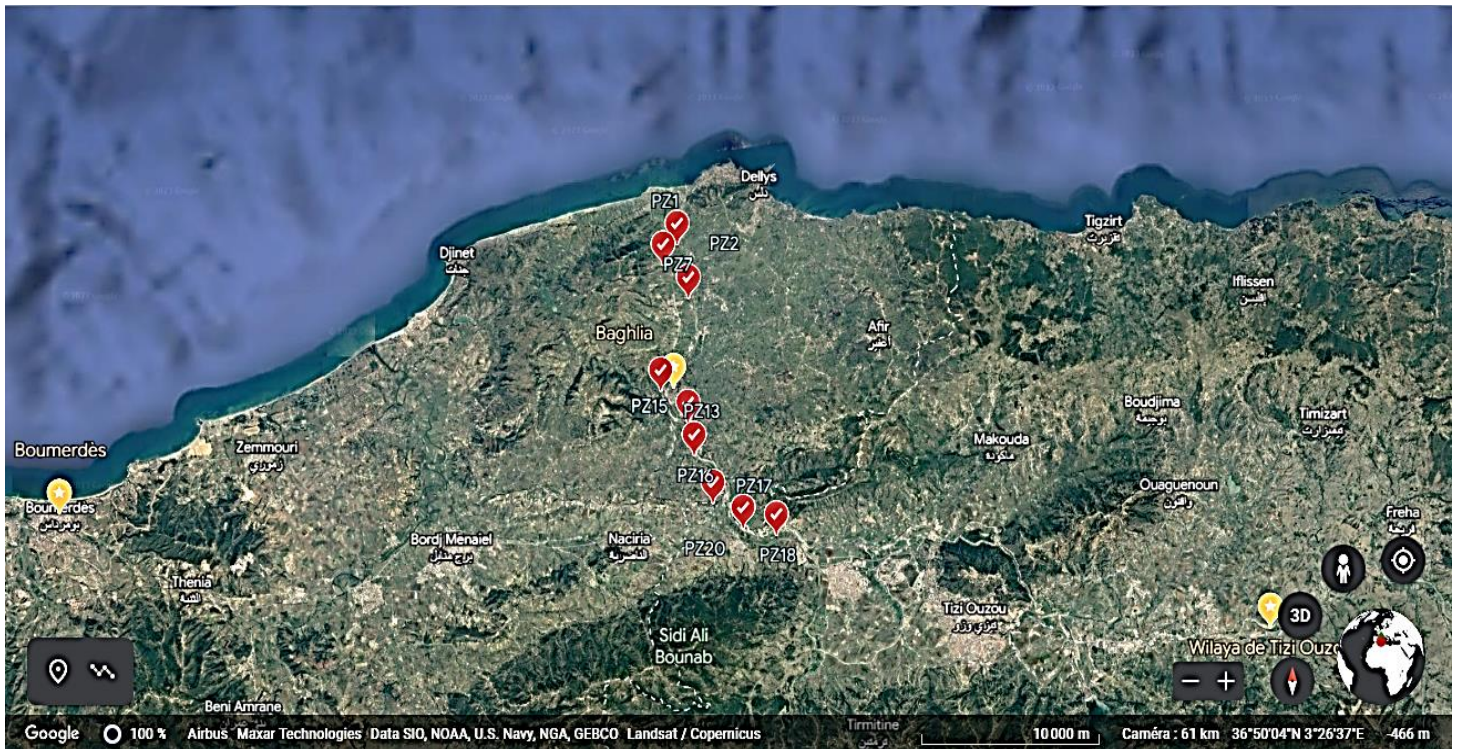


Figure 27 : Situation des piézomètres de la campagne piézométrique du bas Sébaou (rive gauche, juillet 2023)

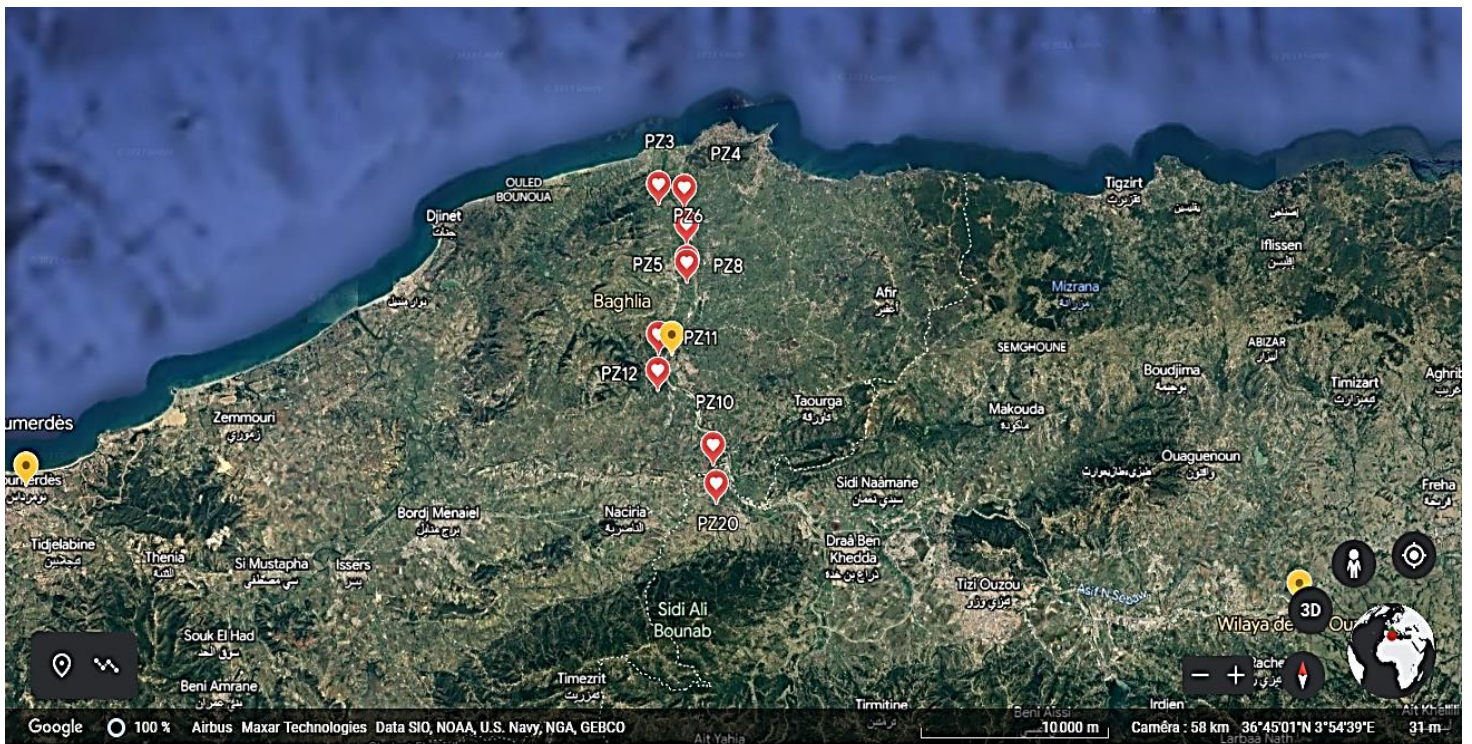


Figure 28 : Situation des piézomètres de la campagne piézométrique du bas Sébaou (rive droite, juillet 2023)

Les points d’eaux mentionnés sont 20 piézomètres (tableau 13), 3 puits et 6 forages (tableau 12).

2 Les moyens utilisés pour les mesures

Un GPS pour avoir la localisation des points d’eau, une sonde piézométrique pour la mesure du niveau d’eau dans l’ouvrage, un conductimètre et une sonde de température.

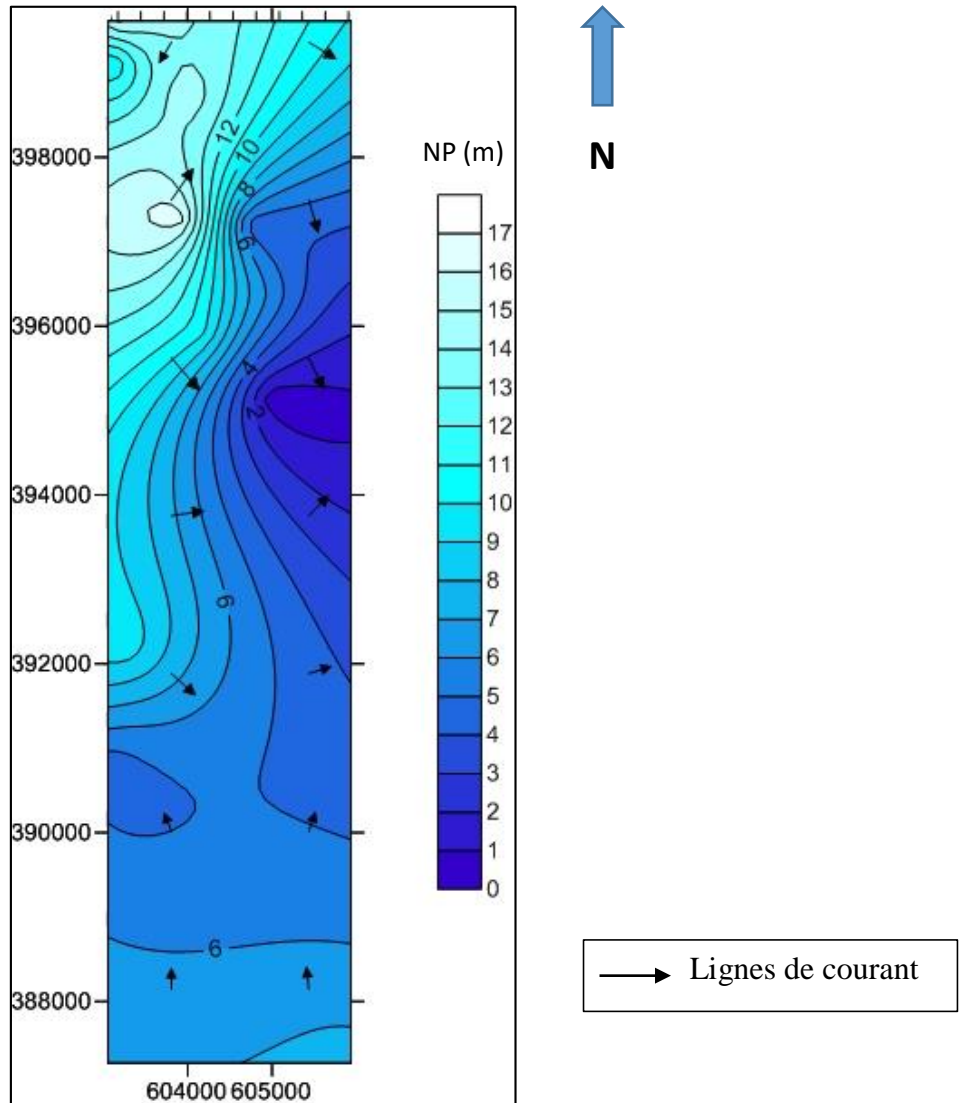


Figure 29 : Carte piézométrique du Bas Sébaou (juillet 2023)

- L’écoulement se fait globalement du Sud vers le Nord puis il change de direction du Nord vers l’Est, cela indique que l’eau de l’aquifère est repoussée vers l’EST par l’intrusion de l’eau de mer.

Tableau14 : Le niveau statique en hautes eaux en 2012-2021 (ANRH), et en 2022-2023 du
Bas Sébaou

Nom	X	Y	NS HE Mai 2012	NS HE Juin 2021	NS HE Avril 2022	NS HE juillet2023
PZ1D	603921	397281	10.63	8.6	15.45	11,51
PZ2D	604185	395928	8.77	16.2	12.82	18,8
PZ3D	603200	399614	5.52	14.1	11.89	5,82
PZ4D	604003	398730	1.85	12.2	10.1	2,27
PZ5D	604739	397198	5.23	11	8.8	8,57
PZ6D	605009	396365	7.78	8.6	6.09	10,3
PZ7G	603107	399120	4.96	8.25	5.45	5,07
PZ8G	604974	395163	10.27	14.33	11.47	12,47
PZ9G	36°51'33,6"N	03°52'6,6"E	10.15	12.3	9.67	/
PZ10G	605934	387270	10.15	12.3	9.67	12,53
PZ11G	603263	392218	13.7	16.7	12.62	14,26
PZ12G	603057	390829	/	/	/	15,53

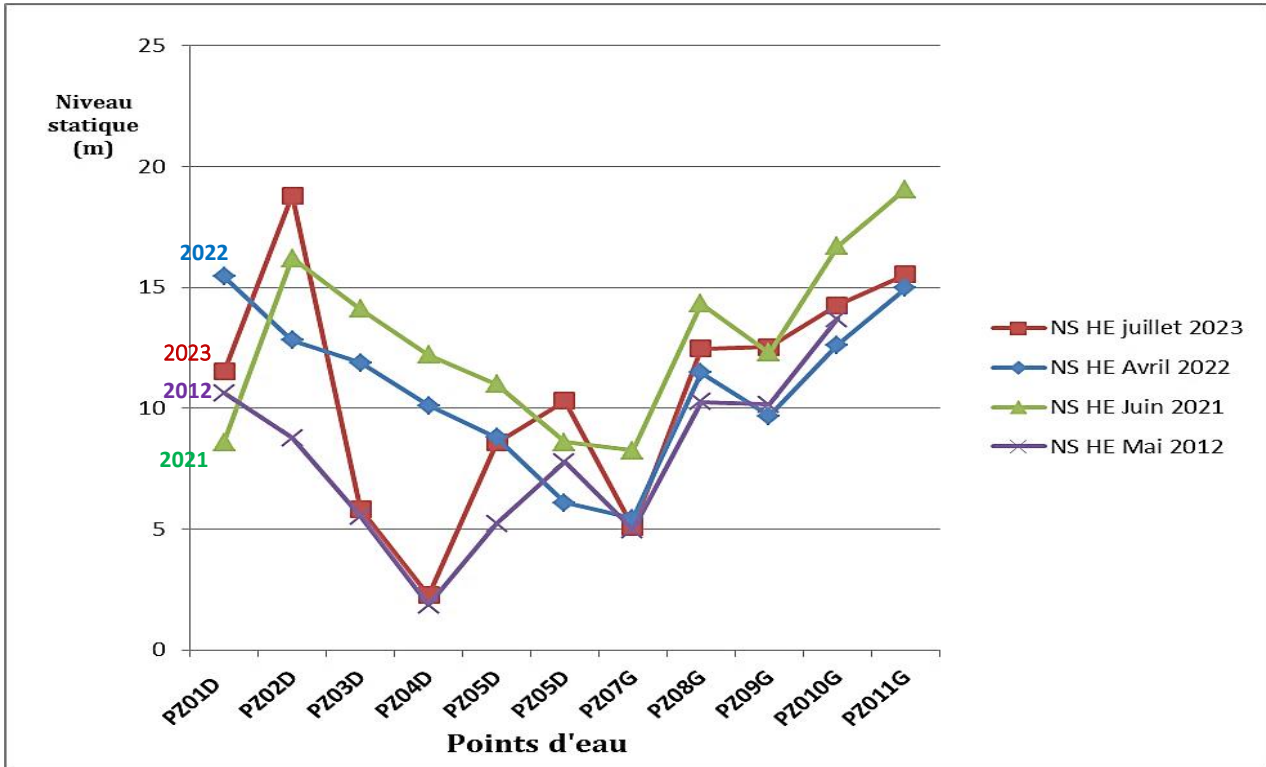


Figure 30 : L'évolution du niveau statique en hautes eaux en 2012-2021 (ANRH), 2022 et 2023 du bas Sébaou

Interprétation

a. Stabilité des niveaux statiques de 2012 : Les données pour l'année 2012 montrent une certaine stabilité des niveaux statiques en hautes eaux, variant entre 1,85 m (PZ4D) et 15,45 m (PZ1D). Cette stabilité suggère des conditions hydrogéologiques relativement constantes pendant cette période.

b. Changements marqués en 2021 et 2022 : Les années 2021 et 2022 ont connu des changements significatifs dans les niveaux statiques en hautes eaux. En 2021, les niveaux ont augmenté, atteignant jusqu'à 16,7m (PZ11G). Cette augmentation indique des modifications notables dans le régime hydrologique.

c. Variation spatiale des niveaux statiques en 2022 : En 2022, le piézomètre PZ1D a enregistré la plus haute valeur de niveau statique (15,45m), et le piézomètre PZ7G, a montré les niveaux les plus bas (5,45m). Cette variation spatiale indique des différences locales dans la réponse des nappes aux facteurs externes.

d. Niveaux statiques en 2023 : Les données de 2023 montrent que les niveaux statiques en hautes eaux continuent à varier. Le piézomètre PZ2D présente toujours un niveau relativement élevé (18,8m), tandis que d'autres piézomètres, comme "PZ4D" (2,27m) et "PZ7G" (5,07 m), ont des niveaux plus bas.

- Les variations observées dans les niveaux statiques sont attribuées à la quantité d'eau qui s'infiltre dans les nappes, aux pompages des puits et à l'impact de la surexploitation de la nappe.

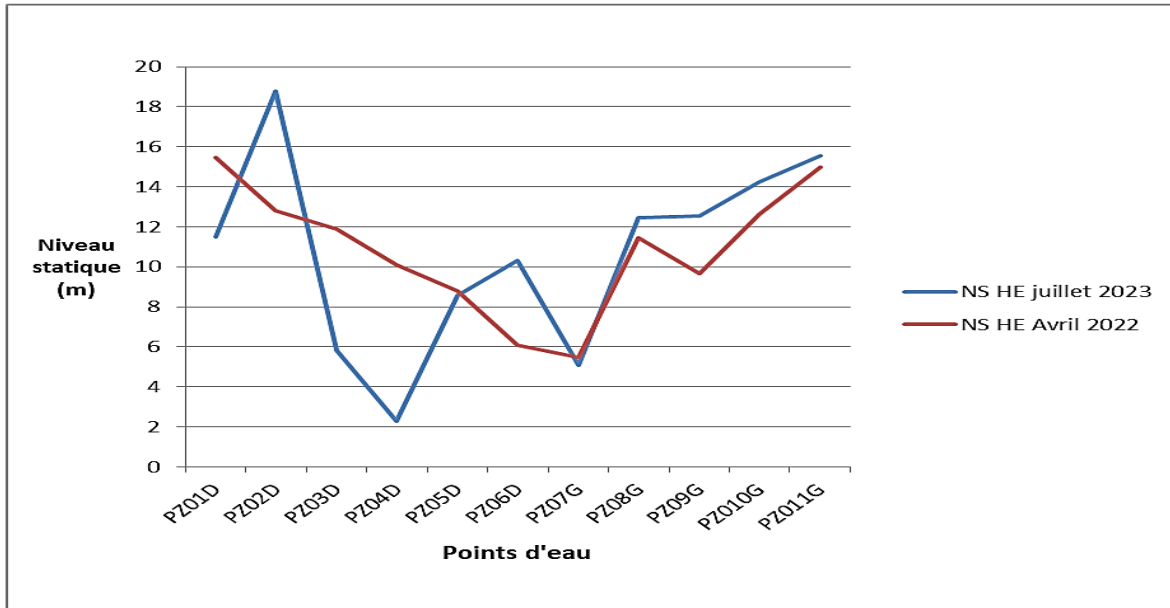


Figure 31 : L'évolution du niveau statique en hautes eaux en 2022 et 2023 du bas Sébaou

Interprétation

Les variations observées dans les niveaux statiques entre les deux périodes indiquent des zones potentiellement vulnérables à la surexploitation ou à la sécheresse.

3 Comparaison entre le niveau statique en (juillet 2023 et avril 2022)

Point de Mesure	Juillet 2023 (m)	Avril 2022 (m)	Variation (m)	Causes possibles
PZ1	11.51	15.45	-3.94	Éventuelle diminution des précipitations, prélèvements excessifs dans la nappe.
PZ2	18.8	12.82	+5.98	Peut-être une moindre utilisation des ressources en eau.
PZ3	5.82	11.89	-6.07	Possibilité de prélèvements importants ou de sécheresse locale.
PZ4	2.27	10.1	-7.83	Probable diminution de la recharge, peut-être une surutilisation de la nappe.
PZ5	8.57	8.8	-0.23	Légère diminution, peut-être des prélèvements modestes ou des facteurs saisonniers.
PZ6	10.3	6.09	+4.21	Forte augmentation, possiblement une recharge accrue, des facteurs climatiques favorables.
PZ7	5.07	5.45	-0.38	Légère diminution, peut-être des facteurs locaux ou des prélèvements mineurs.
PZ8	12.47	11.47	+1	Légère augmentation, peut-être une recharge saisonnière ou une utilisation accrue.
PZ10	12.53	9.67	+2.86	Augmentation, peut-être liée à une recharge conséquente due aux précipitations.
PZ11	14.26	12.62	+1.64	Légère augmentation, possiblement une recharge accrue, une utilisation modérée.

4 Caractéristiques hydrodynamiques

4.1 Les essais de pompages

En Aout 1967, des essais de débit établie par : A. Benamour, ANRH Alger, ont eu lieu sur deux forages situés en rive gauche de l'oued Sébaou dont les coordonnées sont mentionnées dans le tableau 15.

Tableau 15 : coordonnées des deux forages des essais de débit (A. Benamour, 1967)

Forage	X [km]	Y [km]	Z [m]
Forage 1	606,400	385,590	30,80
Forage 2	606,335	375,710	29,76

Le premier forage a été foncé en 1963. Actuellement il est équipé d'une pompe capable de fournir un débit de 450 m³/h. Le deuxième forage a été foncé en 1967. Les essais ont eu lieu en Aout 1967, donc en pleine période d'étiage, ces essais de pompage ont permis de mesurer les caractéristiques suivantes :

4.1.1 La perméabilité

La perméabilité est donnée par la formule suivante : $K = \frac{T}{H}$

H : Epaisseur de l'aquifère, on prend dans le cas de ces essais **H= 40m**.

T : la transmissivité. On admet une transmissivité moyenne d'ordre de :

$$T = 2 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{s}$$

Donné : **AN. $k = \frac{2 \times 10^{-1}}{40}$**

$$k = 5 \times 10^{-3} \text{ m/s (A. Benamour 1967, ANRH Alger)}$$

- La perméabilité est moyenne

4.1.2 Coefficient d'emmagasinement

Il n'est pas possible d'obtenir des valeurs cohérentes, Les valeurs obtenues pour le coefficient d'emmagasinement doit se situer entre 15 % à 20 %.

4.1.3 La résistivité

L'étude géophysique menée par A. Benamour de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) identifie deux zones de résistivité distinctes. La première zone correspond à un chenal central où les forages sont situés, avec une résistivité d'environ 120 ohms (A. Benamour, ANRH Alger). La seconde zone, en dehors de ce chenal, présente des horizons de résistivité légèrement moins élevée, soit entre 80 et 90 ohms (A. Benamour, ANRH, Alger).

4.1.4 Débit de la nappe (A. Benamour, 1967)

Connaissant la pente de la nappe, sa perméabilité et la section de l'aquifère, le débit qui passe à travers la section d'aquifère qui nous intéresse donné par la formule :

$$Q = K \times S \times i$$

Avec :

Q : le débit qui passe à travers l'aquifère en m³/s.

K : la perméabilité en m/s. ($K = 5 \times 10^{-3}$ m/s) pour la surface mouillée Q_m

Et ($K = 2,5 \times 10^{-3}$ m/s) pour les zones latérales Q_i

S : Superficie mouiller/latérale en m² (16000m²)

i : la pente en m/m. ($i = 2 \times 10^{-3}$ m/m)

$$Q_m = 160 \text{ L/s} \quad \text{et} \quad Q_i = 60 \text{ L/s}$$

Le débit total est :

$$Q_m + Q_i = 160 + 60$$

$$Q_T = 220 \text{ L/s (A. Benamour, ANRH, Alger)}$$

Le pompage simultané sur les deux forages à montrer qu'il était possible de pomper un débit de 280 l/s sans danger sur les ouvrages et sans provoquer un rabattement excessif de la nappe.

➤ Analyse et recommandations (A. Benamour, 1967) :

Cet essai de débit a été de courte durée pour permettre des prévisions à long terme sur l'évolution de la nappe surtout si celle-ci est sollicitée pendant plusieurs mois consécutifs. Donc, il sera souhaitable de ne pas dépasser le débit calculé, qui doit être exploité de la nappe 220 l/s, et faire une surveillance systématique des niveaux piézométriques pendant les durées de pompages. A un débit supérieur au débit total calculé, la surface piézométrique se déprime en permanence et l'on pompe alors dans les réservoirs de la nappe qu'est possible de les entamer pendant la période d'étiage.

5 Conclusion

La surexploitation de la nappe alluviale du bas Sébaou a favorisé l'intrusion de l'eau salée de la mer dans la nappe ce qui a entraîné un changement de direction de l'écoulement de la nappe.

CHAPITRE 7 : ETUDE HYDRO-CHIMIQUE

1 Introduction

L'objectif de l'étude hydro-chimique de la nappe du Bas Sébaou est de caractériser la composition chimique des eaux souterraines, en mettant en évidence les faciès chimiques dominants. Cette approche repose principalement sur des analyses en laboratoire des éléments chimiques présents dans des échantillons d'eau prélevés sur le terrain. Cette démarche permet de surveiller et d'évaluer la qualité chimique de l'eau, tout en étudiant comment les concentrations de ces éléments évoluent en réponse aux changements climatiques et aux variations des niveaux statiques de la nappe.

2 Matériels et analyses

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux (température, pH, conductivité et les éléments chimiques dissous) évoluent en fonction de la nature lithologique des formations traversées.

- Echantillonnage

L'étape d'échantillonnage influence directement sur la qualité des résultats analytiques obtenus. Il est essentiel de prendre des précautions pour garantir un échantillon représentatif et minimiser les risques de contamination. Dans ce contexte, les échantillons ont été collectés dans des bouteilles en plastique de 1 litre, en veillant à suivre des procédures appropriées pour les paramètres physico-chimiques. De plus, les mesures in-situ des paramètres tels que la conductivité, la température et la profondeur ont été effectuées à l'aide d'une sonde électrique et un conductimètre. Pour préserver les caractéristiques physico-chimiques des échantillons, ils ont été transportés dans des glacières adéquates. Les prélèvements ont été effectués le 2 et le 3 juillet 2023.

- Analyses au laboratoire :

Les résultats des analyses chimiques (Tableau 16) réalisées ont porté principalement sur les éléments majeurs à savoir.

-Cation : Na^+ , Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+} .

-Anion : NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- et HCO_3^- .

Tableau 16 : Les résultats de l'analyse chimique au laboratoire Tizi-Ouzou des eaux souterraines du bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	Ca^{2+} mg/l	Mg^{2+} mg/l	Na^+ mg/l	K^+ mg/l	Cl^- mg/l	SO_4^{2-} mg/l	HCO_3^- mg/l	NO_3^- mg/l	pH	CE μcm	RS	TH	TAC	e%
PZ17	63	21	120	5	150	43	308	0	7,9	1 013	698	24	25	0
PZ18	127	74	93	0	195	15	625	0	7,6	1 657	1 075	63	51	1
PZ15	85	49	40	0	48	105	427	0	7,4	1 068	806	42	35	3
PZ20	46	66	55	2	87	136	311	0	7,2	1 032	631	39	26	1
PZ2	40	45	135	1	136	8	537	0	8,1	1 347	737	29	44	5
PZ7	183	65	900	1	1 900	15	58	0	7	5 550	4 153	73	5	1
PZ10	67	23	95	4	232	12	122	1	7,2	895	578	26	10	3
PZ3	94	25	191	1	310	132	168	4	7,6	1 545	905	34	14	3
PZ6	63	50	164	0	405	56	153	0	6,1	1 473	877	36	13	2
PZ19	23	55	71	0	171	2	204	1	8	883	514	29	17	3
PZ12	21	38	31	0	58	2	226	0	7,8	583	321	21	19	1

3 Les paramètres physico-chimiques

La polarité fondamentale de la molécule d'eau conduit à la possibilité d'interactions entre les molécules d'eau. Cette polarité entraîne plusieurs anomalies physiques remarquables, que nous aborderons brièvement, telles que :

3.1 La température

La température joue un rôle essentiel en tant que paramètre physique, influençant les processus chimiques et biologiques au sein des cours d'eau. Elle exerce une influence sur la solubilité des sels et des gaz, ainsi que sur la dissociation des sels dissous. De plus, la température joue un rôle crucial dans la détermination du pH et de la conductivité de l'eau, ce qui permet d'obtenir des indications sur l'origine de l'eau et les possibles mélanges. Cette mesure de température revêt une grande importance pour les études limnologiques, qui se penchent sur les caractéristiques des écosystèmes aquatiques.

Le tableau suivant donne les mesures des températures de l'eau (°C) de la nappe alluviale du Bas Sébaou mesurés en juillet 2023 :

Tableau 17 : La température de l'eau du Bas Sébaou, (juillet 2023)

Nom	N° catalogue	T° eau	Nom	N° catalogue	T° eau
PZ1	E00904249	23,3	PZ11	E00808416	24
PZ2	E00808407	26	PZ12	E00808417	24,7
			PZ13	E00808418	17,62
PZ3	E00808408	24	PZ14	E00808419	24,3
PZ4	E00808409	23,4	PZ15	E00808420	23,8
PZ5	E00808410	23,5	PZ16	E00808421	22
PZ6	E00808411	25	PZ17	E00808422	24,2
PZ7	E00808412	25	PZ18	E00808423	20,7
PZ8	E00808413	/	PZ19	E00808424	/
PZ10	E00808415	24,4	PZ20	E00808425	24,4

Interprétation

- Plusieurs points de mesure présentent des températures proches les unes des autres, autour de 24°C, ce qui pourrait indiquer une certaine stabilité thermique dans ces régions spécifiques de la nappe.

3.2 Le potentiel d'hydrogène pH :

Le pH, aussi connu sous le nom de potentiel hydrogène, représente la concentration d'ions H^+ dans une solution, déterminant ainsi son caractère acide ou basique. Ce paramètre physique influence la nature incrustante ou agressive d'une eau. Le pH des eaux naturelles est en corrélation avec les caractéristiques géologiques des terrains traversés. Mesurant l'acidité ou la basicité d'une solution, à une température de 25° C :

- Une solution de pH =7 est dite neutre.
- Une solution de pH < 7 est dite acide (Agressive, Dissolution des CaCO₃).
- Une solution de pH >7 est dite basique. (Sursaturés, incrustante dépôt CaCO₃)

Les mesures de pH effectuées lors de la campagne des hautes eaux 2023 sont consignées dans le tableau 18.

Tableau 18 : Le pH mesuré au laboratoire (juillet 2023) de la nappe du Bas Sébaou :

NOMS	pH
PZ2	8,1
PZ6	6,1
PZ7	7
PZ10	7,2
PZ12	7,8
PZ15	7,4
PZ17	7,9
PZ18	7,6
PZ19	8
PZ20	7,2

Interprétation

- Les points PZ2 et PZ19 présentent les valeurs de pH les plus élevées (8,1 et 8,0) ce qui indique une tendance vers la basicité. Des valeurs de pH élevées peuvent être associées à des eaux légèrement alcalines.
- On constate une variation des valeurs de pH au sein de la nappe du Bas Sébaou, allant de légèrement acide (PZ6 avec PH=6.1) à légèrement basique, avec la plupart des points de mesure situés dans la plage neutre à légèrement basique. Cette variation peut être influencée par la géologie et les caractéristiques chimiques des terrains traversés par les eaux souterraines.

3.3 La conductivité

La conductivité joue un rôle crucial dans la validation des analyses physicochimiques de l'eau. En effet, les variations de conductivité mesurées au sein d'un environnement donné permettent de mettre en évidence divers éléments tels que la présence de polluants, les zones de mélange ou d'infiltration. Cette grandeur est également influencée par la température de l'eau, augmentant en corrélation avec cette dernière. De plus, elle offre un aperçu de la concentration des sels dissous dans l'eau, offrant ainsi une mesure significative de la minéralisation de l'eau.

La conductivité est une mesure de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique entre deux électrodes. Étant donné que la plupart des substances dissoutes dans l'eau prennent la forme d'ions électriquement chargés, la conductivité sert à évaluer la concentration des sels

dissous. Cette grandeur est généralement exprimée en micro-siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$). En évaluant la conductivité d'une source d'eau, il est donc possible d'estimer approximativement son niveau global de minéralisation et de suivre son évolution au fil du temps.

Rodier, 1996, propose une classification d'eau selon les valeurs de la conductivité (tableau 19)

Tableau 19 : les classes de conductivité électrique « CE » (Rodier 1996)

Classe de conductivité	Valeur ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Moyenne	500-1000
Importante	1000-1500
Excessive	1500-2000

Le tableau suivant permet de suivre les variations de la conductivité électrique mesurées aux différents points d'eaux aux compagnes ANRH 2010, et en juillet 2023, dans la nappe du Bas Sébaou.

Tableau 20 : la conductivité électrique en 2010 et 2023 de la nappe du bas Sébaou. (in-situ)

Nom	N°catalogue	Conductivité 2010	Conductivité 2023
		en HE $\mu\text{S}/\text{cm}$	en HE $\mu\text{S}/\text{cm}$
PZ1	E00904249	/	>à 2000
PZ2	E00808407	1500	1223
PZ3	E00808408	1100	>à 2000
PZ4	E00808409	1362	1320
PZ5	E00808410	1491	>à 2000
PZ6	E00808411	2420	1350
PZ7	E00808412	2200	>à 2000
PZ10	E00808415	/	825
PZ11	E00808416	714	1291
PZ12	E00808417	/	518
PZ13	E00808418	/	998
PZ14	E00808419	838	912
PZ15	E00808420	1000	1775
PZ16	E00808421	/	1675
PZ17	E00808422	1215	919
PZ18	E00808423	/	1526
PZ20	E00808425	657	820

Interprétation

- On remarque que dans certains points, la conductivité en 2023 est plus élevée que celle de 2010 (comme PZ11, PZ14, PZ15 et PZ20), ce qui peut suggérer une augmentation de la minéralisation de l'eau souterraine au fil du temps.

- Cependant, il existe également des cas où la conductivité en 2023 est inférieure à celle de 2010, ce qui peut indiquer des variations naturelles dans la composition chimique de l'eau souterraine.
- On constate une variation de la conductivité électrique entre 2023 et 2010, avec des valeurs élevées en 2023, ce qui peut refléter des changements dans la composition de l'eau souterraine, possiblement liés à des facteurs tels que l'intrusion marine ou d'autres processus géochimiques.
- Un problème peut également survenir lors de la transcription ou de la manipulation des appareils de mesure.

Le tableau 21 montre les valeurs de la conductivité mesurées en juillet 2023 par rapport au rivage.

Tableau 21 : La conductivité électrique du Bas Sébaou, (juillet 2023) et la distance entre les piézomètres et l'exutoire.

Nom	N° catalogue	Conductivité 2023 en HE μS/cm (in-situ)	la distance par rapport à la mer (km)
PZ1	E00904249	>à 2000	4,07
PZ2	E00808407	1223	6,28
PZ3	E00808408	>à 2000	2,91
PZ4	E00808409	1320	6,3
PZ5	E00808410	>à 2000	8,09
PZ6	E00808411	1350	9,78
PZ7	E00808412	>à 2000	3,14
PZ10	E00808415	825	20,05
PZ11	E00808416	1291	13,78
PZ12	E00808417	518	15,61
PZ13	E00808418	998	10,51
PZ14	E00808419	912	-
PZ15	E00808420	1775	12,77
PZ16	E00808421	1675	14,31
PZ17	E00808422	919	16,96
PZ18	E00808423	1526	21
PZ20	E00808425	820	20,25

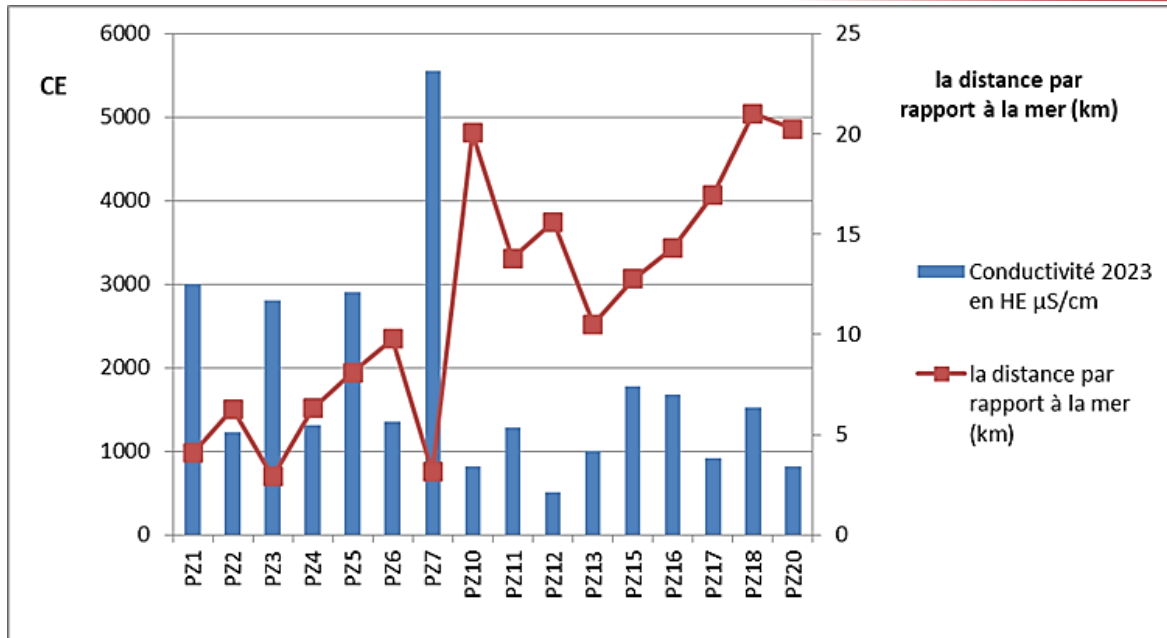


Figure 32 : L'évolution de la conductivité électrique en fonction de la distance de l'exutoire du Bas Sébaou, (juillet 2023)

Interprétation

- D'après le tableau de classification de la conductivité électrique (tableau 19) on constate que ces eaux ont le risque de minéralisation moyen à important.
- Les conductivités des eaux souterraines varient entre 518 et >à 2000 µS/cm.
- Les valeurs élevées de conductivité électrique dans certains points de mesure (dépassant 2000 µS/cm) indiquent une forte concentration de sels dissous dans l'eau souterraine, c'est le cas des piézomètres PZ1, PZ3, PZ5 et PZ7 (PZ7 avec 5500 µS/cm mesuré au labo). Cela suggère que ces zones sont touchées par l'intrusion d'eau de mer.
- Il y a une corrélation entre la distance des piézomètres par rapport à la mer et la conductivité électrique. Certains points proches de la mer ont des valeurs de conductivité élevées, tandis que d'autres points plus éloignés ont des valeurs plus faibles.

3.4 Le Résidu sec

Le résidu sec d'une eau est la quantité de matières solides dissoutes restantes après l'évaporation complète de l'eau. Ces matières solides comprennent généralement des sels, des minéraux et d'autres composés qui sont dissous dans l'eau. La mesure du résidu sec donne un aperçu global de la concentration totale des solides dissous, ce qui peut être utile pour évaluer la qualité de l'eau, notamment dans des contextes tels que l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole ou l'industrie.

Les valeurs du RS mesurées en juillet 2023 sont récapitulées dans le tableau 22.

Tableau 22 : La Concentration du résidu sec RS des eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	Résidu Sec mg/L	La distance par rapport à la mer (km)
PZ2	737	6,28
PZ3	905	2,91
PZ6	877	9,78
PZ7	4 153	3,14
PZ10	578	20,05
PZ12	321	15,61
PZ15	806	12,77
PZ17	698	16,96
PZ18	1 075	21
PZ19	514	/
PZ20	631	20,25

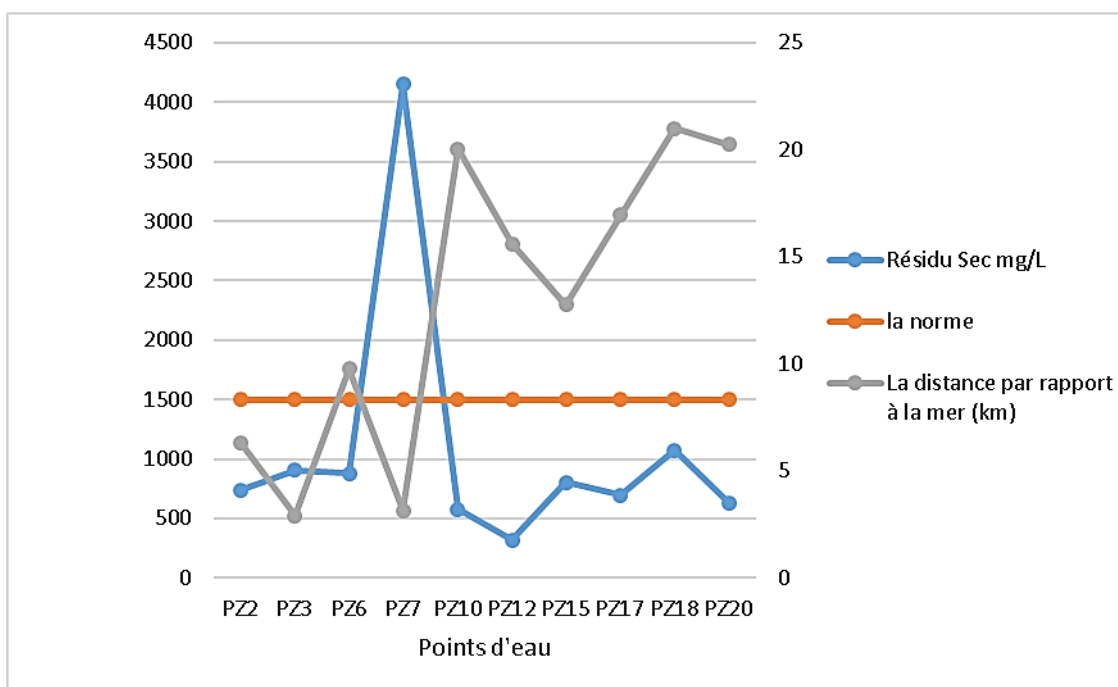


Figure 33 : Variation du résidu sec dans la nappe du Bas Sébaou 2023.

Interprétation

- Les valeurs de La concentration des résidus secs dans les échantillons varient entre 321mg/l en (PZ12) et 4 153mg/l en (PZ7).
- Les eaux de (PZ7) ont la concentration la plus élevée en résidus secs, ce qui est dû à de fortes concentrations en calcium et en magnésium.
- Cette variation est due à la quantité de minéraux que les eaux souterraines du Bas Sébaou contiennent.

4 Les paramètres chimiques :

Pour étudier les variations des paramètres chimiques des eaux souterraines de la plaine du bas Sébaou on va faire une comparaison entre les normes de la potabilité (journal officiel N°34 2011 / annexe 1) et les résultats des analyses effectuées en juillet 2023 sur les échantillons fournis par le laboratoire de l'ANRH.

4.1 Le calcium Ca^{2+}

Le calcium, un métal alcalino-terreux largement présent dans la nature, se trouve notamment sous forme de carbonates dans les roches calcaires. Il constitue un élément prépondérant de la dureté de l'eau et domine habituellement la composition des eaux destinées à la consommation. Les niveaux de concentration de calcium dans les échantillons sont répartis comme montré dans le tableau 23.

Tableau 23 : La Concentration de Ca^{2+} des eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	Calcium Ca^{2+} mg/l
PZ2	40
PZ3	94
PZ6	63
PZ7	183
PZ10	67
PZ12	21
PZ15	85
PZ17	63
PZ18	127
PZ19	23
PZ20	46

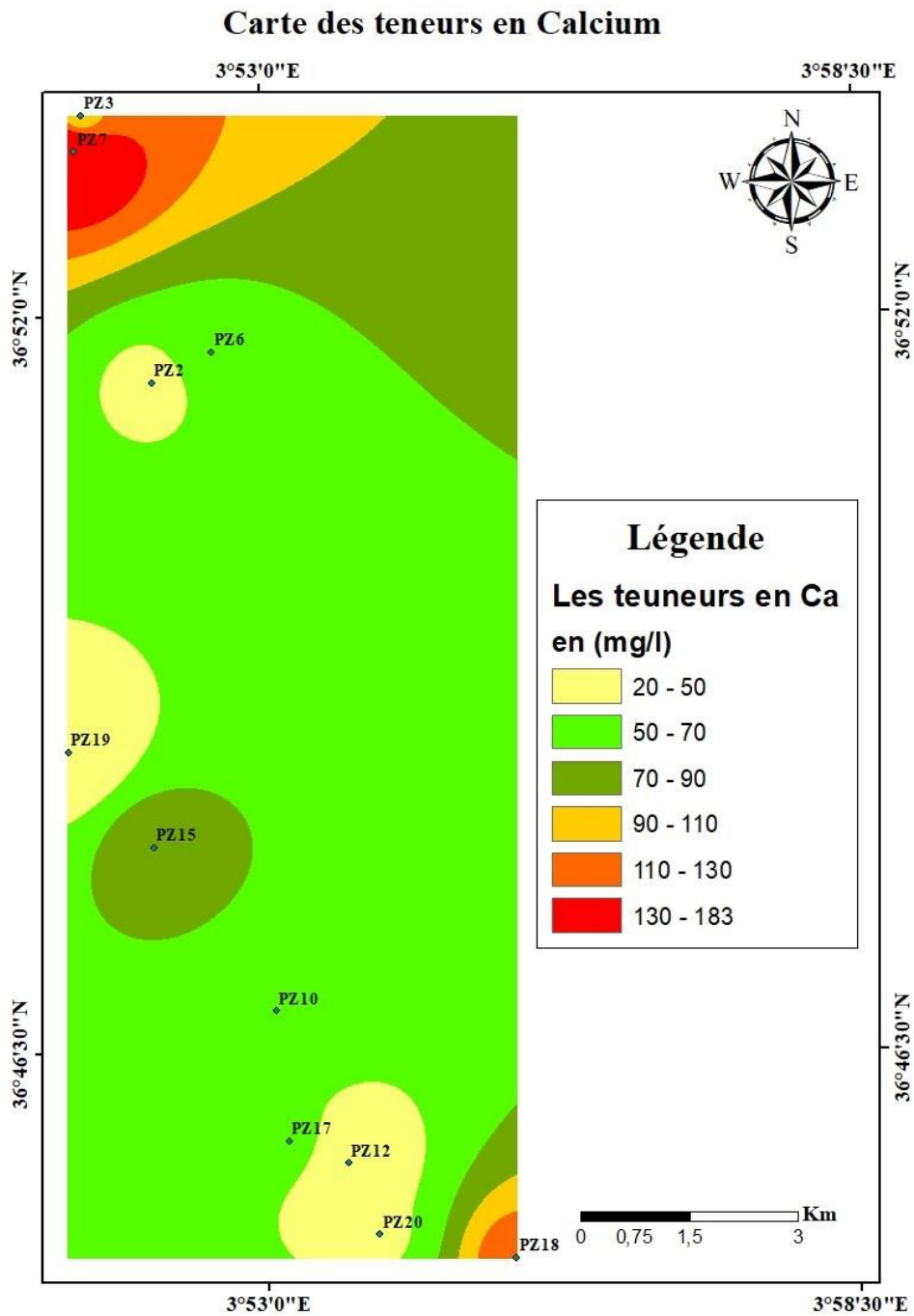


Figure 34 : Carte de concentration de Ca^{2+} dans les eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023)

Interprétation

- Les variations de la concentration de calcium dans les eaux souterraines de Bas Sébaou varient entre 21 mg/l (PZ12) et 183mg/l (PZ7).
- La plupart des échantillons présentent des niveaux de calcium conformes aux normes de potabilité, qui ne dépassent pas 200 mg/l.
- Les plus grandes valeurs sont (183mg/l) PZ7 et (127 mg/l) PZ18.
- La teneur varie essentiellement suivant la nature de terrains traversés.

4.2 Le magnésium Mg^{2+}

Le magnésium, l'un des éléments les plus abondants dans notre environnement, représente environ 2,1% de la croûte terrestre. Sa présence varie en fonction de la composition des roches sédimentaires rencontrées, telles que les calcaires, les dolomies, et les formations du Jurassique ou du Trias moyen. Le magnésium joue un rôle important dans la détermination de la dureté de l'eau.

Tableau 24 : La Concentration de Mg^{2+} dans les eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	Magnésium mg/l	La distance par rapport à la mer (km)
PZ2	45	6,28
PZ3	25	2,91
PZ6	50	9,78
PZ7	65	3,14
PZ10	23	20,05
PZ12	38	15,61
PZ15	49	12,77
PZ17	21	16,96
PZ18	74	21
PZ19	55	/
PZ20	66	20,25

Interprétation

- Ces valeurs de magnésium varient entre 21 mg/L (PZ17) et 74 mg/L (PZ18). La norme de potabilité pour le magnésium est 50 mg/L.
- PZ7 et PZ20 dépassent légèrement la norme de potabilité 50 mg/L, avec des concentrations de 65 mg/L et 66 mg/L.
- La plupart des échantillons respectent les normes, à l'exception de PZ18, qui présente la concentration la plus élevée à 74 mg/L.

4.3 Dureté totale TH

Le titre hydrotimétrique (T.H), ou dureté de l'eau, est un indicateur de la minéralisation de l'eau qui est surtout due aux ions calcium et magnésium

$$TH = Ca^{2+} + Mg^{2+} \text{ (még/l)}.$$

La potabilité d'une eau est aussi évaluée à l'aide du degré hydrotimétrique qui est exprimée en degrés français (°F).

Une eau trop dure peut présenter des inconvénients d'utilisation. L'eau dure, utilisée en agriculture augmente la concentration de sels dans les sols et favorise leur stérilisation. Aussi, certains sels, en particulier le calcaire, peuvent se déposer sous une forme de tartre, sur les parois des canalisations, des ballons d'eau chaude ou des chaudières causent leurs certains dommages. Enfin une eau dure diminue les propriétés détergentes des lessives et savons qu'il faut utiliser en plus grande quantité afin d'obtenir le résultat souhaité.

Tableau 25 : Plage de valeurs du titre hydrotimétrique (SEQ Eaux Souterraines)

TH (°F)	0 à 7	7 à 15	15 à 30	30 à 40	+ 40
Eau	très douce	eau douce	plutôt dure	dure	très dure

Le titre hydrotimétrique (TH) en degrés français (°F) est une mesure de la dureté totale de l'eau, principalement due aux ions calcium et magnésium. Pour calculer le TH en °F, on utilise la formule suivante :

$$TH \text{ } f^{\circ} = \frac{[Ca] \times \text{facteur de conversion Ca}}{10} + \frac{[Mg] \times \text{facteur de conversion Mg}}{10}$$

Où :

[Ca] : la concentration en calcium en mg/l

[Mg] : la concentration en magnésium en mg/l

Le facteur de conversion pour le calcium est 2.5.

Le facteur de conversion pour le magnésium est 4.1.

Tableau 26 : Le TH total correspond à chaque piézomètre, (juillet 2023)

NOMS	Magnésium mg/l	Calcium mg/l	Mg ²⁺ °F	Ca ²⁺ °F	TH °F	Catégorie de Dureté
PZ17	21	63	8,71	15,63	24,34	Eau Douce
PZ18	74	127	30,24	31,77	62,01	Très Dure
PZ15	49	85	19,99	21,35	41,35	Plutôt Dure
PZ20	66	46	27,16	11,46	38,63	Plutôt Dure
PZ2	45	40	18,45	9,89	28,35	Eau Douce
PZ7	65	183	26,65	45,83	72,49	Très Dure
PZ10	23	67	9,225	16,66	25,9	Eau Douce
PZ3	25	94	10,25	23,44	33,69	Plutôt Dure
PZ6	50	63	20,5	15,62	36,13	Plutôt Dure
PZ19	55	23	22,55	5,73	28,28	Eau Douce
PZ12	38	21	15,37	5,20	20,58	Eau Douce

- Cette dureté des eaux fait référence à la quantité de calcium et de magnésium contenue dans l'eau. Ces deux éléments proviennent de l'altération de la roche-mère.
- La teneur en Calcium est habituellement plus élevée que le Magnésium dans les eaux souterraines. Par contre, là où on trouve de la contamination par l'eau de mer, la concentration en magnésium peut être plus élevée que celle du calcium.

4.4 Alcalinité TAC

Le titre alcalimétrique (TA) d'une eau permet de connaître sa concentration en carbonates (CO₃²⁻) et en bases fortes, autrement dit son alcalinité. Ce titre se mesure en degrés français (°F) : 1°F équivaut à 3,4 mg/l d'ion hydroxyde (HO⁻) ou à 6 mg/L d'ion carbonate, ou encore à 12,2 mg/l d'ion hydrogénocarbonate (HCO₃⁻). Pour prendre également en compte les ions bicarbonates (HCO₃⁻), on utilise le titre alcalimétrique complet (TAC).

L'alcalinité d'une eau est fortement liée à sa dureté et donc à son caractère corrosif et à sa capacité d'entartrage des canalisations.

Tableau 27 : Les valeurs de la TAC des eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	TAC mg/l
PZ2	44
PZ3	14
PZ6	13
PZ7	5
PZ10	10
PZ12	19
PZ15	35
PZ17	25
PZ18	51
PZ19	17
PZ20	26

- Les valeurs sont entre 5 mg/l (PZ7) et 51 mg/l (PZ18)
- Ces variations sont dues à la variation de la concentration de Ca^{2+} Mg^{2+} .

4.5 Bicarbonate HCO_3^-

Les bicarbonates sont des sels dérivés de l'acide carbonique qui contiennent une quantité réduite d'hydrogène et deux fois plus d'acide que les carbonates. La présence de bicarbonates dans l'eau résulte de la dissolution des formations carbonatées telles que le cipolin, le calcaire et la dolomie par des eaux riches en gaz carbonique.

Tableau 28 : La Concentration des bicarbonates des eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	Bicarbonates HCO_3^- mg/l
PZ2	537
PZ3	168
PZ6	153
PZ7	58
PZ10	122
PZ12	226
PZ15	427
PZ17	308
PZ18	625
PZ19	204
PZ20	311

- Les piézomètres PZ18 et PZ2, affichent des concentrations élevées en bicarbonates, PZ18 (625mg/l) et PZ2 (537mg/l) ce qui peut indiquer une dissolution intensive de formations géologiques carbonatées à proximité. En revanche, PZ7 présente une concentration beaucoup plus faible, ce qui peut être attribué à des caractéristiques géologiques différentes dans ces zones.

- Les bicarbonates proviennent principalement de la dissolution de formations géologiques carbonatées, mais des activités anthropiques peuvent également les influencer comme L'usage excessif d'engrais et de pesticides en agriculture peut augmenter la concentration de bicarbonates dans les eaux souterraines, car ces produits chimiques réagissent avec le sol et l'eau, générant des ions bicarbonates qui sont ensuite entraînés dans les eaux souterraines par les pluies.

4.6 Les nitrates NO_3^-

Les nitrates sont produits naturellement dans le cadre du cycle de l'azote. Cependant, leur présence dans les eaux souterraines peut indiquer une contamination de ces eaux. En effet, des niveaux élevés de nitrates sont souvent associés à des activités humaines telles que l'agriculture intensive, l'utilisation excessive d'engrais et la gestion inadéquate des déchets. Ces sources anthropiques peuvent augmenter les niveaux de nitrates au-delà des seuils naturels et avoir des implications pour la qualité de l'eau et la santé environnementale.

Tableau 29 : La Concentration de nitrates NO_3^- dans les eaux souterraines du Bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	Nitrates NO_3^- mg/l
PZ2	0
PZ3	4
PZ6	0
PZ7	0
PZ10	1
PZ12	0
PZ15	0
PZ17	0
PZ18	0
PZ19	1
PZ20	0

- Le taux de concentration des nitrates varie entre 0mg/l et 4 mg/l (PZ3).
- Cette faible concentration est lié soit :
 - Premièrement, il pourrait être dû à la quantité relativement limitée d'infiltration de nitrates dans les eaux souterraines. Cette infiltration dépend notamment de la quantité d'engrais azotés utilisés dans les zones agricoles voisines, ainsi que de la profondeur à laquelle ces nitrates pénètrent dans le sol.
 - Deuxièmement, les nitrates pourraient être le résultat de l'infiltration de quantités restreintes de pesticides et d'herbicides. Ces produits chimiques peuvent également être utilisés dans les zones environnantes et finir par atteindre les eaux souterraines.

4.7 Chlorure Cl⁻

La source principale des chlorures dans les eaux provient de la dissolution des roches sédimentaires déposées en milieu marin, qui n'ont pas été entièrement lessivées, ainsi que de la présence d'évaporites. L'entrée d'eau de mer due à des processus tels que l'intrusion d'eau salée et les phénomènes d'évaporation dans les bassins fermés sont également des sources potentielles de chlorures. Les roches cristallines ont un rôle limité dans l'enrichissement des eaux en chlorures.

Tableau 30 : La concentration des eaux souterraines en chlorures Cl⁻ du Bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	Chlorures Cl ⁻ mg/l	La distance par rapport à la mer (km)
PZ2	136	6,28
PZ3	310	2,91
PZ6	405	9,78
PZ7	1 900	3,14
PZ10	232	20,05
PZ12	58	15,61
PZ15	48	12,77
PZ17	150	16,96
PZ18	195	21
PZ19	171	/
PZ20	87	20,25

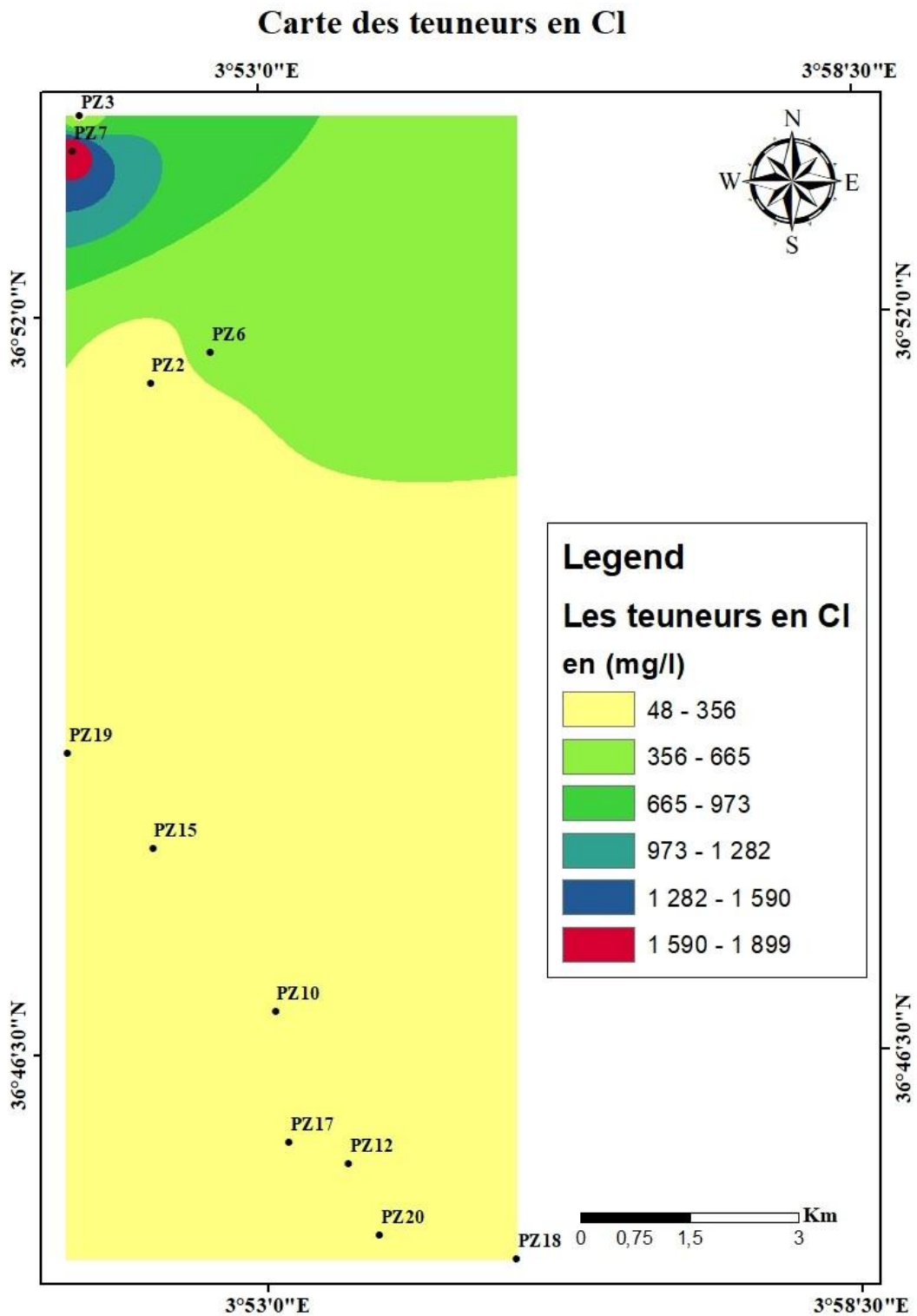


Figure 35 : Carte de concentration de Cl dans les eaux souterraines du bas Sébaou, (juillet 2023)

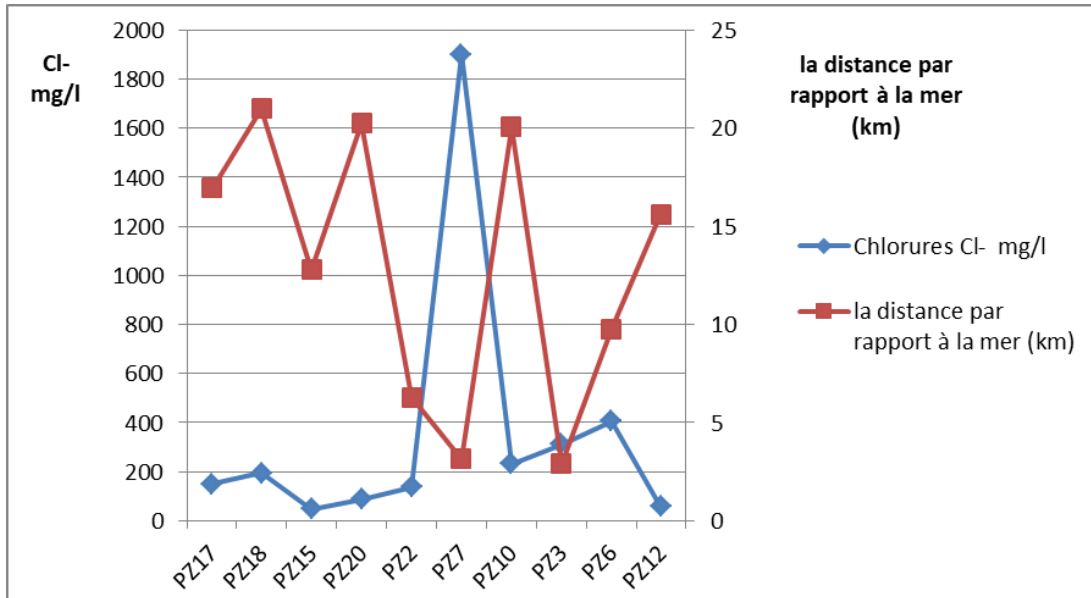


Figure 36 : L'évolution de la concentration des eaux souterraines en chlorure du Bas Sébaou 2023

- La concentration de chlorures d'après les analyses est entre 48 mg/l (PZ15) et 1 900mg/l (PZ7).
- Le piézomètre PZ7 présente une concentration de chlorures extrêmement élevée de 1 900 mg/l, dépassant largement la norme de potabilité de 500 mg/l. Cette forte concentration suggère une intrusion d'eau de mer.
- La plupart des échantillons présentent des concentrations de chlorures conformes aux normes de potabilité 500 mg/l.

4.8 Le Sodium Na⁺

Le sodium se présente dans les eaux souterraines à des concentrations variées, qui souvent sont influencées par des facteurs anthropiques mais les concentrations restent en général constantes et ne doivent pas dépasser les 150 mg/l. Le sodium provient de la météorisation des roches, contenant des silicates de sodium et d'aluminium, des urines et des selles des animaux, mais il peut être également apporté par le lessivage des sols après l'utilisation des fertilisants (Abba, 2006).

Tableau 31 : La concentration des eaux souterraines en Sodium Na⁺ du Bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	Sodium Na ⁺ mg/l
PZ2	135
PZ3	191
PZ6	164
PZ7	900
PZ10	95
PZ12	31
PZ15	40
PZ17	120
PZ18	93
PZ19	71
PZ20	55

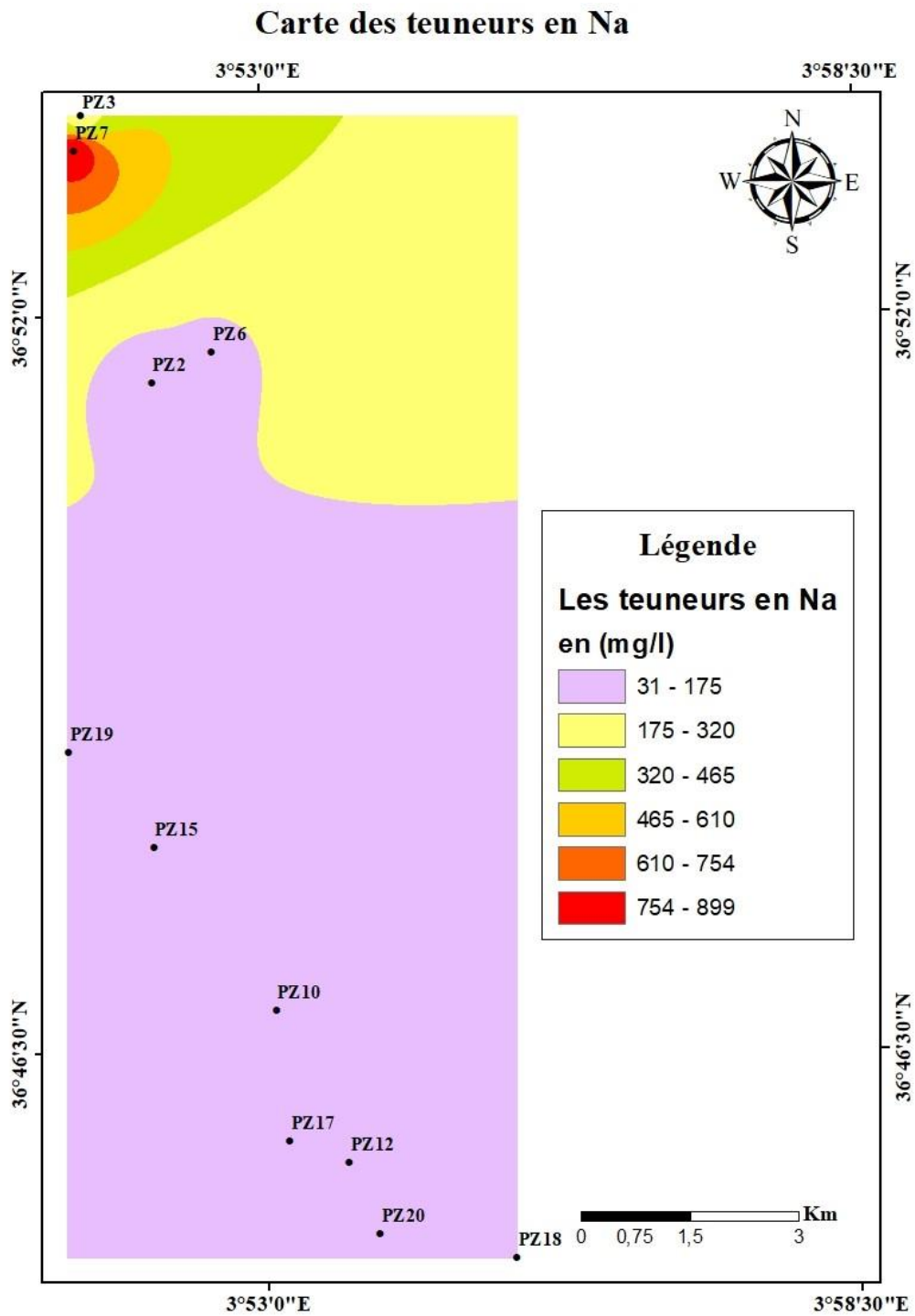


Figure 37 : Carte de concentration de Na⁺ dans les eaux souterraines du bas Sébaou, (juillet 2023)

Interprétation

- Les concentrations en sodium enregistrées au niveau des piézomètres étudiés sont comprises entre 31 (PZ12) et 900mg/l (PZ7).
- La majorité des valeurs sont conformes à la norme Algérienne 200 mg/l, sauf PZ7.
- La valeur élevée en sodium à PZ7 (900 mg/l) suggère une possible influence de l'intrusion d'eau de mer.

4.9 Le Potassium K⁺

Les eaux naturelles présentent des concentrations faibles en K⁺, qui ne dépassent généralement pas 15 mg/l. Cela est principalement dû à la faible solubilité des minéraux. Il est tout de même à noter que les valeurs peuvent être influencées par les activités anthropiques agricoles, minières ou encore industrielles.

Tableau 32 : La concentration des eaux souterraines en Potassium K⁺ du Bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	Potassium K ⁺ mg/l
PZ2	1
PZ3	1
PZ6	0
PZ7	1
PZ10	4
PZ12	0
PZ15	0
PZ17	5
PZ18	0
PZ19	0
PZ20	2

- Les concentrations en potassium dans cette série d'échantillons sont conformes à la norme de potabilité de 12 mg/l.

4.10 Les sulfates SO₄²⁻

Le soufre est un élément non métallique qui existe à l'état naturel dans les sols et les roches sous forme organique (soufre protéique) et à l'état minéral (sulfures, sulfates et soufre élémentaire). Le soufre se combine à l'oxygène pour donner l'ion sulfate, présent dans certains minéraux tels que le gypse et la baryte. La transformation réversible des sulfates en sulfures se fait grâce au cycle du soufre (Peck et al. 1970, Smith, 1970).

Tableau 33 : La concentration des eaux souterraines en Sulfates SO_4^{2-} du Bas Sébaou, (juillet 2023)

NOMS	Sulfates SO_4^{2-} mg/l
PZ2	8
PZ3	132
PZ6	56
PZ7	15
PZ10	12
PZ12	2
PZ15	105
PZ17	43
PZ18	15
PZ19	2
PZ20	136

- La norme de potabilité pour les sulfates est fixée à 400 mg/l. Les concentrations en sulfates dans les échantillons d'eau souterraine du Bas Sébaou sont en dessous de cette limite réglementaire.

5 Faciès chimique

5.1 Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est un outil graphique couramment utilisé en hydrogéologie pour déterminer le faciès chimique de l'eau souterraine en fonction des concentrations relatives des principaux ions. Pour déterminer le faciès chimique à partir d'un diagramme de Piper, il est essentiel d'analyser la répartition des ions dans les trois zones distinctes du diagramme : la zone des bicarbonates, la zone des chlorures-sulfates, et la zone des sulfates-chlorures.

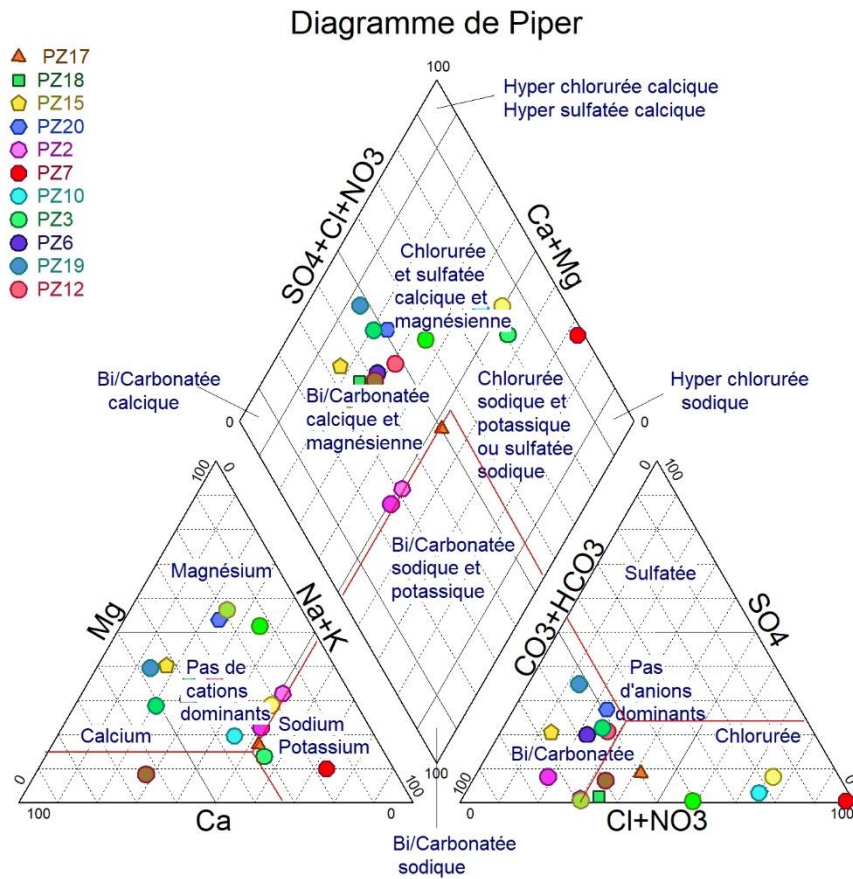


Figure 38 : Classification des échantillons d'eau selon le diagramme de Piper

Nous distinguons la prédominance de deux faciès chimiques :

- Chlorurée et Sulfatée Calcique et Magnésienne.
- Bicarbonatée calcique et magnésienne.

6 Identifications des zones à risque d'intrusion marine dans la nappe alluviale du Bas Sébaou :

Pour identifier les zones qui pourraient montrer des signes d'intrusion d'eau de mer en raison de concentrations élevées en chlorures (Cl^-), sodium (Na^+), et conductivité électrique (CE), on examine les valeurs de Cl^- , Na^+ et la conductivité dans les données. Les zones avec des concentrations élevées de ces ions et une conductivité élevée sont plus susceptibles de montrer des signes d'intrusion d'eau de mer. Cependant, il est important de noter que d'autres facteurs tels que la géologie locale peuvent également influencer ces concentrations.

Nom	Cl^- mg/l	Na^+ mg/l	CE $\mu\text{/cm}$ (au labo)	CE $\mu\text{/cm}$ (in-situ)	la distance par rapport à la mer (km)
PZ2	136	135	1 347	1223	6,28
PZ3	310	191	1 545	> à 2000	2,91
PZ6	405	164	1 473	1350	9,78
PZ7	1 900	900	5 550	> à 2000	3,14
PZ10	232	95	895	825	20,05
PZ12	58	31	583	518	15,61
PZ15	48	40	1 068	1775	12,77
PZ17	150	120	1 013	919	16,96
PZ18	195	93	1 657	1526	21
PZ19	171	71	883	/	/
PZ20	87	55	1 032	820	20,25

On remarque que : le piézomètre PZ7 est le point d'eau où l'intrusion saline est la plus évidente, car il présente des concentrations très élevées en Cl^- (1 900 mg/l), en Na^+ (900 mg/l) et une valeur de CE très élevée (5550 μcm) avec une distance par rapport à la mer de (3,14 km) ce qui suggère une intrusion d'eau de mer, en notant que d'autres facteurs tels que la géologie locale peuvent également influencer ces concentrations.

7 Conclusion

L'analyse des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la zone d'étude révèle un lien direct avec les conditions géologiques et les activités humaines. Sur le plan géologique, la contamination naturelle résulte de la dissolution des formations géologiques, en particulier celles de nature évaporatoire et carbonatée, ce qui conduit localement à des concentrations élevées en éléments majeurs tels que le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), les bicarbonates (HCO_3^-), le chlore (Cl^-), et autres.

La majorité des fortes valeurs en concentration de Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , TH, et RS des eaux souterraines du bas Sébaou sont enregistrées au PZ7.

Les eaux souterraines du Bas Sébaou dépassent les normes de potabilité en certains points tels que PZ7 et PZ18, cela indique une pollution de ces eaux et une intrusion marine.

Conclusion générale :

La plaine alluviale de l'Oued Sébaou, située à 80 km à l'est d'Alger, chevauche les wilayas de Tizi-Ouzou (Haut et Moyen Sébaou) et de Boumerdes (Bas Sébaou) en Algérie. Notre zone d'étude se concentre spécifiquement dans la wilaya de Boumerdes. Le Bas Sébaou, qui constitue la partie aval de la vallée de l'Oued Sébaou, s'étend sur environ 20 km, depuis la localité de Tadmaït jusqu'à son débouché sur la Mer Méditerranée.

La vallée du Bas Sébaou est une dépression comblée d'alluvions sédimentaires récents, reposant sur des formations de marnes et d'argiles anciennes du Miocène et de l'Oligocène. L'aquifère du Bas Sébaou est composé d'alluvions variés, offrant des terres propices à l'agriculture, avec une épaisseur moyenne d'environ 60 mètres.

La nappe alluviale du Bas Sébaou est confrontée à un déséquilibre entre la recharge et les prélèvements, entraînant une surexploitation, provoquant ainsi l'intrusion d'eau de mer dans la zone côtière. L'impact majeur de cette intrusion marine est à l'origine des problèmes de qualité de l'eau constatés, faisant de cette nappe un aquifère vulnérable.

La surexploitation de la nappe alluviale du bas Sébaou a entraîné l'intrusion d'eau salée de la mer dans la nappe, ce qui a provoqué un changement de la direction de l'écoulement souterrain. De plus, dans certains piézomètres, comme (PZ7) et (PZ18), les eaux souterraines dépassent les normes de potabilité, ce qui suggère une pollution de ces ressources et une intrusion marine potentielle.

Recommandations

Pour freiner le phénomène de l'intrusion marine qui est un phénomène irréversible, on propose un certain nombre de mesures à considérer dans la région :

1. Gestion Responsable des Captages : Effectuer une gestion responsable des puits de captage en surveillant étroitement les niveaux d'eau souterraine, en contrôlant les débits prélevés, et en limitant l'installation de nouveaux forages. Une régulation stricte des prélèvements est essentielle pour éviter la surexploitation de la nappe.
2. Utilisation de la recharge artificielle des nappes par bassins d'infiltration ou par forage d'injection en créant une barrière hydraulique nécessaire pour stopper l'intrusion marine.
3. Recyclage et réutilisation des eaux usées traitées pour arriver aux besoins agricoles.
4. Dessalement de l'eau de mer en assurant le fonctionnement régulier des unités de dessalement et la maintenance des différentes pompes et appareillage de station. Le pompage des eaux salées se limite au niveau de la station de dessalement ce qui limitera la propagation des eaux salées vers les terres internes.
5. Surveillance Continue : Maintenir une surveillance continue des niveaux piézométriques, de la qualité de l'eau, et des activités humaines qui pourraient avoir un impact sur la nappe. Cela permettra une réaction rapide en cas de dégradation de la qualité de l'eau souterraine.

6. Suivi Hydrochimique : Établir un suivi hydrochimique régulier de la qualité de l'eau souterraine pour détecter toute augmentation des concentrations en chlorures, sodium, et conductivité électrique, signes potentiels d'intrusion marine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE :

- Aigoun Chabane (2014) : potentialité hydrique de l'aquifère alluviale de Bas Sébaou (w.de Boumerdes), magister en hydrogéologie, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- Doufene Safia, Aissani Belkacem, Hamis Ahmed : Etude de l'Intrusion Marine et de ses répercussions sur la nappe : cas du Bas Sébaou, Tizi Ouzou, N.E. Algérie, proceeding du séminaire international sur l'hydrogéologie et l'environnement SIHE 2013 Ouargla, Université Kasdi Merbah-Ouargla.
- Allal Hayet, Hadjadj Sabrina (2022) : l'identification de l'intrusion marine : « le biseau salé » cas de Bas Sébaou, mémoire de Master Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou.
- Khoualed Radja, Remili Safaa (2017) : mise en évidence de l'intrusion marine vers les aquifères côtiers : cas de la plaine de Mitidja Orientale. Mémoire de master, université kasdi Merbah Ouargla.
- Fatiha Hadjou (2008) : étude hydrogéologique par modélisation mathématique en vue d'une approche rationnelle et optimale de la gestion des eaux souterraines de la vallée de l'oued Sébaou. Mémoire de Magister, université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- Chikhi Meriem Imene (2016) : étude qualitative des eaux souterraines de la vallée alluviale de l'Oued Sébaou. Projet de fin d'étude, école nationale Polytechnique.
- Belhadi Khadidja, Zaouche Racha Maissa (2021) : contribution de la modélisation géo-électrique à l'identification des intrusions salines dans la nappe alluviale du Bas Sébaou, mémoire de Master en hydrogéologie, université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- Benbeskri Hamza (2015) : impact de l'intrusion marine sur la qualité des eaux d'irrigation et de la dégradation du sol cas du Sahel Est algérois, Master en hydraulique, école nationale supérieur d'hydraulique- Arbaoui Abdallah-.
- Ghobrini Khadidja, Bendifallah Leila et Ghobrini Lamia : étude qualitative des eaux superficielles du bas Sébaou (Dellys, Algérie), la 4eme conférence internationale des énergies renouvelables (CIER-2016) proceedings of engineering and technology- PET / Vol.14.pp.174-179, université M'hamed Bougara Boumerdes.
- Kaci Moussa Dyhia et Moali Safia (2019) : Suivi de la qualité hydro chimique des eaux brutes du barrage Taksebt en surface et en profondeur et des affluents de l'Oued Aissi. Master en Géologie Spécialité Hydrogéologie, master en Géologie, Spécialité Hydrogéologie, université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.
- Hamad Karima (2013) : Bilan hydrologique du bassin versant de l'oued Sébaou, Master en Génie Civil, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- Tababouchet S. (2017) : étude de la pollution des eaux superficielles et souterraines du bassin versant du Sébaou. Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique –Arbaoui Abdallah-. Département aménagement et génie hydraulique.
- Slimani A. (2015) : contribution à l'étude du phénomène de l'intrusion marine par différentes approches méthodologiques dans la plaine de la Mitidja-Est (Baie d'Alger). Faculté des Sciences de la Terre, département de Géologie USTHB.

- Site (SIGES Bretagne 2023) : <https://sigesbre.brgm.fr>

Annexe figure 1 : Journal officiel N°34, 2011

ANNEXE				
Objectifs de qualité des eaux superficielles et souterraines destinées à l'alimentation en eau potable des populations				
Groupes de paramètres	Paramètres	Unité	Valeur maximale	
			Eaux superficielles	Eaux souterraines
Paramètres organoleptiques	Couleur	mg/l Echelle Pt	200	20
	Odeur (taux dilution à 25°)	—	20	3
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Chlorures	mg/l Ci	600	500
	Concentration en ions hydrogène (pH)	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9	≥ 6,5 et ≤ 9
	Conductivité	μS/cm à 20°C	2800	2800
	Demande biochimique en oxygène (DBO 5)	mg/l O ₂	7	< 3
	Demande chimique en oxygène (DCO)	mg/l O ₂	30	—
	Matières en suspension	mg/l	25	25
	Sulfates	mg/l SO ₄	400	400
Taux de saturation en oxygène dissous	% O ₂	30	> 70	

ANNEXE (suite)

Groupes de paramètres	Paramètres	Unité	Valeur maximale	
			Eaux superficielles	Eaux souterraines
Paramètres chimiques	Baryum	mg/l	1	0,7
	Bore	mg/l	1	1
	Fer dissous	mg/l	1	0,3
	Fluor	mg/l	2	1,5
	Manganèse	mg/l	1	0,05
	Nitrates	mg/l NO3	50	50
	Phosphore	mg/l	10	5
	Arsenic	µg/l	100	10
	Cadmium	µg/l	5	5
	Chrome	µg/l	100	50
Paramètres microbiologiques	Escherichia coli	n/100ml	20.000	20
	Entérocoques	n/100ml	10.000	20
	Salmonelles	—	Absence dans 1000 ml	Absence dans 5000 ml

ANNEXE (suite)

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITES
Paramètres chimiques (suite)	Xylènes	µg/l	500
	Styène	µg/l	100
	Agents de surface régissant au bleu de méthylène	mg/l	0,2
	Epychlorehydrine	µg/l	0,4
	Microcistine LR	µg/l	1
	Pesticides par substance individualisée		
	- Insecticides organochlorés persistants	µg/l	0,1
	- Insecticides organophosphorés et carbamates	µg/l	0,1
	- Herbicides	µg/l	0,1
	- Fongicides	µg/l	0,1
	- P.C.B	µg/l	0,1
	- P.C.T	µg/l	0,1
	- Aldrine	µg/l	0,03
	- Dieldrine	µg/l	0,03
	- Heptachlore	µg/l	0,03
	- Heptachlorépoxyde	µg/l	0,03
	Pesticides (Totaux)	µg/l	0,5
	Bromates	µg/l	10
	Chlorite	µg/l	0,07
	Trihalométhanes par substance individualisée :		
- Chloroforme	µg/l	200	
- Bromoforme	µg/l	100	
- Dibromochlorométhane	µg/l	100	
- Bromodichlorométhane	µg/l	60	
Chlorure de vinyle	µg/l	0,3	
1,2-Dichloroéthane	µg/l	30	
1,2-Dichlorobenzène	µg/l	1000	
1,4-Dichlorobenzène	µg/l	300	
Trichloroéthylène	µg/l	20	
Tetrachloroéthylène	µg/l	40	

Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Alcalinité	mg/l CaCO ₃	65 pour les eaux désalées ou déminéralisées (valeur minimale)
	Calcium	mg/l	200
	Chlorure	mg/l	500
	Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9
	Conductivité à 20 °C	µS/cm	2800
	Dureté (TH)	mg/l en CaCO ₃	500
	Fer total	mg/l	0,3
	Manganèse	µg/l	50
	Phosphore	mg/l	5
	Potassium	mg/l	12
	Sodium	mg/l	200
	Sulfates	mg/l	400
	Température	°C	25

Radionucléides	Particules bêta	Millirems/an	4
	Tritium	Bequerel/l	100
	Uranium	µg/l	30
	Dose totale indicative (DTI)	mSv/an	0,15
paramètres microbiologiques	Escherichia Coli	n/100ml	0
	Entérocoques	n/100ml	0
	Bactéries sulfitoréductrices y compris les spores	n/20ml	0

7 Joumada El Oula 1435
9 mars 2014

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 13

17

Tableau 2

Paramètres avec valeurs indicatives

GRUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS INDICATIVES
Paramètres Organoleptiques	couleur	mg/l platine	15
	Turbidité	NTU	5
	Odeur à 25 °C	Taux dilution	4
	Saveur à 25 °C	Taux dilution	4
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Alcalinité	mg/l CaCO3	65 pour les eaux déssalées ou déminéralisées (valeur minimale)
	Calcium	mg/l	200
	Chlorure	mg/l	500
	Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9
	Conductivité à 20 °C	µS/cm	2800
	Dureté (TH)	mg/l en CaCO3	500
	Fer total	mg/l	0,3
	Manganèse	µg/l	50
	Phosphore	mg/l	5

Annexe figure 3 : Journal officiel de la république algérienne N° 60, page 04 ; 2005

4	JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 60	30 Rajab 1426 4 septembre 2005
<p>— le droit d'utilisation des ressources en eau, dévolu à toute personne physique ou morale de droit public ou privé, dans les limites de l'intérêt général et dans le respect des obligations fixées par la présente loi et les textes réglementaires pris pour son application ;</p> <p>— la planification des aménagements hydrauliques de mobilisation et de répartition des ressources en eau dans le cadre de bassins hydrographiques ou de grands systèmes aquifères constituant des unités hydrographiques naturelles, et ceci, dans le respect du cycle de l'eau et en cohérence avec les orientations et les instruments d'aménagement du territoire et de protection de l'environnement ;</p> <p>— la prise en compte des coûts réels des services d'approvisionnement en eau à usage domestique, industriel et agricole et des services de collecte et d'épuration des eaux usées, à travers des systèmes tarifaires ;</p> <p>— la récupération suffisante des coûts d'intervention publique liés à la protection quantitative et qualitative des ressources en eau et des milieux aquatiques, à travers des systèmes de redevances d'économie d'eau et de protection de sa qualité ;</p> <p>— la systématisation des pratiques d'économie et de valorisation de l'eau par des procédés et des équipements appropriés ainsi que le comptage généralisé des eaux produites et consommées, pour lutter contre les pertes et le gaspillage ;</p>	<p>— les eaux superficielles constituées des oueds, lacs, étangs, sebkhas et chotts ainsi que les terrains et végétations compris dans leurs limites ;</p> <p>— les alluvions et atterrissements qui se forment naturellement dans les lits des oueds ;</p> <p>— les ressources en eau non conventionnelles constituées par :</p> <ul style="list-style-type: none"> * les eaux de mer dessalées et les eaux saumâtres déminéralisées dans un but d'utilité publique ; * les eaux usées épurées et utilisées dans un but d'utilité publique ; * les eaux de toute origine injectées dans les systèmes aquifères par la technique de recharge artificielle. <p>Art. 5. — Toute personne physique ou morale ayant découvert, intentionnellement ou fortuitement, des eaux souterraines, ou ayant été présente lors de pareilles découvertes, est tenue d'en faire déclaration à l'administration des ressources en eau territorialement compétente.</p> <p>Art. 6. — La mobilisation, la production et l'utilisation de toutes les ressources en eau, y compris les eaux non conventionnelles sont soumises aux conditions particulières fixées par la présente loi, les textes réglementaires pris pour son application et les cahiers des charges y afférents.</p>	<p style="text-align: center;">Section 2</p> <p style="text-align: center;">De la délimitation du domaine public hydraulique naturel</p>

