

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة باجي مختار – عنابة

Année 2017

BADJIMOKHTAR-ANNABAUNIVERSITY

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



Faculté des Sciences de
la Terre et l'univers
Département de géologie

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Evaluation de la pollution dans la plaine de Collo, interaction nappe-rivière

Option : Hydrogéologie

Par: BOULABEIZ Mahrez

DIRECTEUR DE THESE : Houha Belgacem Professeur Université de Khenchela

CO-DIRECTEUR DE THESE : Kherici Houria Professeur Université d'Annaba

DEVANT LE JURY :

Président :	Benhamza Moussa	Professeur, Université d'Annaba
Examineurs :	Derradji El fadel	Professeur, Université d'Annaba
	Gouaidia Layachi	Professeur, Université de Tebessa
	Kachi Slimane	Professeur, Université de Guelma

RESUME

Le développement des activités agricoles et urbaines et l'accroissement rapide de la population dans la région de Collo (NE Algérie) constituent un risque potentiel de pollution des eaux souterraines. Cette étude fait l'état d'évaluation de vulnérabilité et de risque de l'aquifère régional à la pollution. L'étude de la vulnérabilité consiste à évaluer la sensibilité de la ressource en eau souterraine à toute forme de polluant introduit à partir de la surface du sol en basant sur les propriétés physiques du milieu. Quatre méthodes DRASTIC, GOD, SI et GALDIT ont été appliquées afin d'être comparées. Quatre classes de degré de vulnérabilité à la pollution ont été mises en évidence par ces méthodes. Les zones à plus forte vulnérabilité apparaissent dans toute la partie nord de la zone d'étude soit dans les zones de recharge. Les zones à vulnérabilité modérées apparaissent au sud où la profondeur de la nappe devient plus importante, alors que les zones à faible et très faible vulnérabilité apparaissent à l'ouest de la zone d'étude où l'épaisseur d'argile de la zone non saturée est importante. On a pu remarquer que la méthode DRASTIC met en évidence une bonne adéquation dans l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Le recoupement de la carte de vulnérabilité avec l'estimation simplifiée des aléas selon l'approche COST Action 620 permet d'établir la carte des risques. Les cartes résultantes fournissent une base pour le zonage de la protection des eaux souterraines et l'aménagement de l'espace. Les données hydrochimiques (nitrates) ont confirmé les évaluations de la vulnérabilité et des risques.

Mots clés : Vulnérabilité, Risque, pollution, eaux souterraines, Collo (NE Algérie), SIG

ABSTRACT

The development of agricultural and urban activities and rapid population growth in the Collo region (NE Algeria) constitute a potential risk of groundwater pollution. This study reports on the vulnerability and risk assessment of the regional aquifer. The vulnerability study consists of assessing the sensitivity of the groundwater resource to any form of pollutants introduced from the soil surface based on the physical properties of the environment. Four methods DRASTIC, GOD, SI and GALDIT was applied in order to be compared. Four classes of vulnerability degree to pollution have been demonstrated by these methods. The areas with the highest vulnerability degree appear throughout the northern part of the study area either in the recharge zones. Moderately vulnerable areas appear to the south where the depth of the aquifer increased, while areas with low and very low vulnerability degree appear to the west of the study area where the thickness of clay of vadose zone is high. It has been observed that the DRASTIC method demonstrates a good adequacy in the estimation of the vulnerability of groundwater to pollution. The cross-checking of the vulnerability map with the simplified hazard estimation according to the COST Action 620 approach makes it possible to establish the risk map. The resulting maps provide a basis for the zoning of groundwater protection and spatial planning. Hydrochemical data (nitrates) confirmed the vulnerability and risk assessments.

Keyword: Vulnerability, Risk, Pollution, Groundwater, Collo (NE Algeria), GIS

ملخص

ان تطوير الأنشطة الزراعية والحضرية والنمو السكاني السريع في منطقة سهل القل شمال الجزائر تشكل خطرا محتملا لتلوث المياه الجوفية. هذه الدراسة تهدف الى وضع تقييم لدرجة الحساسية وخطر التلوث على المياه الجوفية في المنطقة. ان دراسة درجة الحماية هي تقييم حساسية موارد المياه الجوفية إلى أي شكل من أشكال التلوث القادم من سطح اعتمادا على الخصائص الفيزيائية للمجال. أربعة طرق مختلفة أستعملت من أجل تقدير درجة حماية المياه الجوفية هي DRASTIC, GOD, SI , GALDIT على أن تجرى مقارنة بينها.

أربعة أقسام من درجات حساسية المياه الجوفية للتلوث تم الوصول إليها من خلال هذه الدراسة. درجة التحسس العالية تظهر في المنطقة الشمالية لمنطقة الدراسة والمتوسطة تظهر في الجنوب أين عمق المياه يصبح أكبر أما بالنسبة لدرجات الحساسية الضعيفة والضعيفة جدا تظهر في الغرب أين الجزء الغير مغمر بالماء مكون أساسا من الطين.

إن مطابقة خريطة درجات الحساسية للتلوث مع خريطة شغل سطح الأرض وفقا للمقاربة الأوروبية cost action 620 مكننا من إنشاء خريطة عامة للمخاطر والتي تستعمل في تحديد أماكن حماية وتسيير المياه الجوفية.

خريطة توزيع النترات في المياه الجوفية وخريطة درجات حساسية المياه الجوفية للتلوث و كذلك خريطة المخاطر يظهر نوع من التطابق بينها مما يؤكد النتائج الموصول لها.

الكلمات المفتاحية: الحساسية، الخطر، التلوث، المياه الجوفية، القل شمال الجزائر، أم ج

REMERCIEMENTS

Un travail de doctorat n'est pas un ouvrage réalisé en solitaire, où un seul cerveau (et des mains...) est mis à l'épreuve. Le résultat final est l'œuvre d'une multitude de contributions qui ont toutes consolidé et augmenté le travail effectué. Ces lignes témoignent de ma profonde reconnaissance pour toutes les personnes impliquées de près ou de loin dans cette étude.

Je tiens à remercier très sincèrement mon directeur de thèse Pr Houha Belgacem et mon co-directeur de thèse Pr Kherici Houria qui m'ont laissé une très grande liberté intellectuelle lors de ce travail, et pour ses nombreux conseils et l'aide qu'il m'a apporté pour la réalisation de cette thèse.

Je remercie tout particulièrement messieurs les membres de Jury d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Mes remerciements s'adressent également au Pr AZZAM Rafig pour son accueil au sein de département de génie géologique et hydrogéologie université RWTH Aachen. Allemagne. au cours desquelles il m'a fait partager son expérience et sa connaissance de l'hydrogéologie, Je vous remercie pour votre gentillesse, votre bonne humeur et votre aide très précieuse.

Je remercie également mes collègues qui ont m'aider beaucoup surtout Stefan Klebingat, Sinha Manish Kumar, Abu el hassen Yazen et Elzein salaheddine.

Mes remerciements vont aussi au responsable de laboratoire d'hydrochimie Mme Diana Essen pour son aide a réalisé les analyses chimiques utilisées dans cette thèse.

Je remercie tout particulièrement Mme Claudia Püplichuisen et Mr Reinhold Schwarz pour son accueil chaleureux dans sa maison pendant mon stage en Allemagne et pour sa gentillesse exceptionnelle.

Je tiens à remercier tous les amis et les collègues pour leur soutien moral et pour leur amitié Laiche, Tarek, Ramzy, Hamid.

Je remercie ma famille qui a su me prodiguer toute son affection et ses encouragements surtout à ma femme ou ces quelques lignes ne suffisant évidemment pas pour leur témoigner son immense gratitude pour leur soutien permanent durant toutes les années de travail.

Enfin à l'ensemble des étudiants en écologie et environnement que j'ai encadré durant six ans, trop nombreux pour être cités ici. Leur fraîcheur d'esprit a régulièrement alimenté mon enthousiasme durant toute cette période.

Liste des Figures

N°		Page
01	Situation de la zone d'étude.....	5
02	Les grands bassins versants de l'Algérie.....	6
03	Répartition des précipitations dans le nord de l'Algérie.....	6
04	Réseaux hydrographique de BV de oued Guebli (Boulabeiz M 2016).....	7
05	Les grande ensemble de l'édifice structural alpin de l'Algérie du nord orientale...	11
06	Coupe synthétique et théorique de la kabylie de Collo et d'elMilia (d'après Bouillin 1979, modifier).....	11
07	Schéma géologique de la kabylie de Collo (d'après Bouillin et Kornprobst 1974).....	12
08	Colones stratigraphiques synthétique de la chaine calcaire (d'après J.F. Raoult, 1974).....	14
09	Colonnes stratigraphiques synthétiques des série du flysch Mauretanien et flysch Massylien (d'après J.F. Raoult, 1974).....	15
10	Carte géologique de la plaine de Collo (d'après la mission russe, 1967).....	21
11	Coupe géologique selon le tracé 1-1(d'après l'étude russe 1967).....	21
12	Coupe géologique selon le tracé 2-2(d'après l'étude russe 1967).....	22
13	Coupe géologique selon le tracé 3-3(d'après l'étude russe 1967).....	23
14	Coupe géologique selon le tracé 4-4(d'après l'étude russe 1967).....	23
15	Carte des profils électriques (CGG, 1965).....	25
16	Sondage électrique Etalon « P10 ».....	27
17	Sondage électrique Etalon « M11 ».....	28
18	Sondage électrique Etalon « Q9 ».....	28
19	Sondage électrique du profil « Y ».....	30
20	Carte des résistivités transversales (CGG 1965).....	31
21a	Coupe géoélectrique selon le tracé I-I.....	33
21b	Coupe géoélectrique selon le tracé II-II.....	33
21c	Coupe géoélectrique selon le tracé III-III.....	34
21d	Coupe géoélectrique selon le tracé IV-IV.....	34
22	Inventaires des forages avec direction des coupes hydrogéologiques.....	36
23a	Coupe hydrogéologique suivant le tracée 1-1.....	37

23b	Coupe hydrogéologique suivant le tracée 2-2.....	37
23c	Coupe hydrogéologique suivant le tracée 3-3.....	38
24a	Carte des perméabilités.....	39
24b	Carte des transmissivités.....	39
25	Carte piézométrique de la nappe de Collo (novembre 2015).....	40
26	Distribution des précipitations moyennes mensuelles à la station de Skikda (port) (1970-2014).....	45
27	Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Skikda (1970-2014).....	46
28	Diagramme pluviothermique à la station de Skikda (Port). (1970-2014).....	48
29	Variations mensuelles des éléments climatiques du bilan hydrique.....	53
30	Variations mensuelles des résultats du bilan hydrique.....	53
31	Processus influant sur le comportement et la migration des contaminants au niveau du sol (d'après Sims et al. 1984).....	58
32	Transfert d'un polluant depuis une source situé dans le sol vers l'eau souterraine (d'après Nwell et O'Connor, 1998).....	58
33	Les composantes d'un système d'information géographique.....	69
34	Types de données manipulées par un SIG.....	70
35	Concept d'évaluation du risque des eaux souterraines vis-à-vis d'une contamination.....	76
36	Schéma conceptuelle de l'évaluation du risque de pollution de l'eau souterraine...	78
37	Inventaire des points de prélèvement.....	79
38	Valeurs des pH des eaux souterraines de la plaine de Collo (octobre 2015).....	80
39	Valeurs de la CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux souterraines de la plaine de Collo (octobre 2015).....	81
40	Faciès chimique des eaux souterraines de la plaine de Collo (octobre 2015).....	84
41	Évolution géochimique des eaux souterraines.....	85
42	Relation Na^+ et Cl^- des eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015).....	86
43	Relation Na^+ et Ca^{2+} des eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)...	86
44	Relation Na^+ et Ca^{2+} des eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)...	87
45	Relation HCO_3^- et Ca^{2+} des eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)	88
46	Relation SO_4^- et Ca^{2+} des eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)...	88
47	Concentrations en cuivre pour les eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre	

2015).....	90
48 Concentrations en plomb pour les eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015).....	91
49 Concentrations en Zinc pour les eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015).....	91
50 Concentrations en Fer pour les eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015).....	92
51a Concentration des ions nitrates dans les eaux souterraines (Octobre, 2015).....	93
51a Concentration des ions nitrites dans les eaux souterraines (Octobre, 2015).....	93
52 La démarche méthodologique proposée.....	96
53 Modèle conceptuel des données pour la réalisation de la carte de vulnérabilité par les méthodes proposées.....	99
54 Profondeur de la nappe dans la zone d'étude.....	104
55 Recharge nette de la nappe de Collo.....	105
56 Lithologie de l'aquifère de Collo.....	106
57 Texture des sols de la plaine de Collo.....	107
58 Carte de pente de la plaine de Collo.....	108
59 Carte de la lithologie de la zone vadose de la nappe de Collo.....	109
60 Carte des conductivités hydrauliques de la plaine de Collo.....	110
61 Carte de vulnérabilité de la nappe de Collo par la méthode DRASTIC.....	111
62 Indice de vulnérabilité DRASTIC (en %).....	112
63 La méthode GOD, paramètre et cotation.....	113
64 Lithologie de l'aquifère dans la plaine de Collo	114
65 Lithologie la zone vadose de l'aquifère de Collo.....	115
66 Profondeur de la nappe dans la zone d'étude.....	115
67 Indice de vulnérabilité de la nappe de Collo par la méthode GOD.....	116
68 Comparaison statistique entre les degrés de vulnérabilité GOD.....	117
69 Occupation du sol selon CORINE Land cover de la plaine de Collo.....	119
70 Carte d'indice de vulnérabilité SI de la nappe de Collo.....	120
71 Indice de vulnérabilité SI en %.....	121
72 Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre G.....	125
73 Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre A.....	126
74 Carte piézométrique de la nappe de Collo (novembre 2015).....	127

75	Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre L (novembre 2015).....	127
76	Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre D.....	128
77a	Carte de répartition des notations GALDIT pour les teneurs en Cl ⁻ (novembre 2015).....	129
77b	Carte de répartition des notations GALDIT pour le rapport Cl ⁻ / (HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻) (novembre 2015).....	129
78	Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre T.....	130
79	Carte de vulnérabilité multicritère selon la méthode GALDIT pour l'aquifère de Collo (novembre 2015).....	131
80	Points des mesures piézométriques.....	132
81	Carte piézométrique simulée de la nappe de Collo (2100).....	133
82	Carte de vulnérabilité multicritère simulée selon la méthode GALDIT pour l'aquifère de Collo (2100).....	133
83a	Concentration des NO ₃ ⁻ (mg/l) (octobre 2015).....	139
83b	Carte de distribution des nitrates (en mg/l) dans la plaine de Collo (octobre 2015).....	140
84a	Concentration des Cl ⁻ (mg/l) (octobre 2015).....	141
84b	Carte de distribution des Chlorures (en mg/l) (octobre 2015).....	141
85	Fig. 85 Illustration schématique de la procédure de cartographie de risque.....	144
86	Illustration schématique de la procédure de cartographie du danger.....	153
87	Inventaires des dangers dans la plaine de Collo (non classier).....	156
88	Carte de danger classifié de la plaine de Collo.....	158
89	Diagramme des pourcentages des classes de dangers de la plaine de Collo (selon l'approche cost 620).....	159
90	Carte de risque de la plaine de Collo.....	160
91	Pourcentages des classes de risque de la plaine de Collo (selon l'approche Cost 620).....	161

Liste des tableaux

N°		Page
01	Évolution de la population de Collo par période et par zone de dispersion (1966 – 2007) (source ONS).....	8
02	Corrélation entre lithologie et résistivité électrique des niveaux imprégnés d'eau.....	27

03	Ordre de grandeur pour les sondages électriques étalon.....	35
04	Inventaire des forages avec colonne stratigraphique.....	44
05	Coordonnée géographique de la station de Skikda.....	44
06	Précipitation moyenne mensuelle enregistrée à la station de Skikda (Port) (1970-2014).....	44
07	Température moyenne mensuelle à la station de Skikda (Port) 1970-2014).....	45
08	Variations mensuelles de l'humidité relative de l'air à la station de Skikda (Port). (1970-2014).....	46
09	Variations mensuelles des vitesses moyennes du vent à la station de Skikda (Port). (1970-2014).....	47
10	Classification du climat selon MARTON.....	49
11	L'ETR selon la méthode de Turc à la station de Skikda (Port). (1970-2014).....	51
12	Comparaison des valeurs de l'ETR calculées par les deux méthodes (Turc et Thornthwaite) (Port de Skikda 1970-2014).....	51
13	Bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwaite à la station de Skikda (1970-2014).....	52
14	Résultats des calculs de ruissèlement par la formule de Tixeront Berkhallof.....	54
15	Résultats des calculs de l'infiltration efficace.....	55
16	Les résultats du bilan hydrique.....	55
17	Critères intrinsèque et spécifiques de la vulnérabilité des eaux souterraines et leurs paramètres (Vrba et Civita, 1994).....	62
18	Critères intrinsèque et spécifiques de la vulnérabilité des eaux souterraines et leurs paramètres (Vrba et Civita, 1994) (Suite).....	64
19	Avantages, inconvénients et type d'utilisateurs cibles pour les trois types principaux de méthodes d'estimation de la vulnérabilité.....	67
20	Paramètre et notation utilisée par la méthode AVI.....	71
21	Sommaire statistique des paramètres mesurés in situ.....	81
22	Concentrations caractéristiques en éléments majeurs.....	83
23	Critères d'identification de l'origine de la salinité (YELLE, 2003).....	89
24	Classification des échantillons selon les critères proposés par Yelle, 2003..	89
25	Méthodes et critères de vulnérabilité intrinsèque et spécifique proposés.....	97
26	Sources de données brutes et mode de traitement de chaque paramètre.....	98
27	Paramètres utilisés par le modèle DRASTIC.....	101
28	Classes et notes retenues pour D.....	102
29	Classes et notes retenues pour R.....	102

30	Classes et notes retenues pour A.....	102
31	Classes et notes retenues pour S.....	102
32	Classes et notes retenues pour T.....	102
33	Classes retenues pour I.....	103
34	Classes et notes retenues pour C.....	103
35	Les critères d'évaluation de degré de vulnérabilité DRASTIC.....	110
36	Principales classes d'occupation des sols et valeurs correspondantes.....	118
37	Poids attribués aux paramètres SI.....	118
38	Classement de la vulnérabilité dans la méthode SI.....	118
39	Classement de l'indice GALDIT.....	122
40	Valeurs caractéristiques pour le paramètre G.....	123
41	Valeurs caractéristiques pour le paramètre A.....	123
42	Valeurs caractéristiques pour le paramètre L.....	124
43	Valeurs caractéristiques pour le paramètre D.....	124
44	Valeurs caractéristiques pour le paramètre I.....	124
45	Valeurs caractéristiques pour le paramètre T.....	125
46	Niveau piézométrique Nov 2015 et 2100.....	132
47	Le résumé statistique des paramètres DRASTIC.....	135
48	Les statistiques du test « Map removal sensitivity analysis ».....	136
49	Les statistiques du test « Map removal sensitivity analysis ».....	136
50	Les statistiques du test « Single-parameter sensitivity analysis ».....	137
51	Le résumé statistique des paramètres GALDIT.....	137
52	Les statistiques du test « Map removal sensitivity analysis » suppression d'un paramètre à la fois.....	138
53	Les statistiques du test « Map removal sensitivity analysis » suppression de plusieurs paramètres.....	138
54	Les statistiques du test « Single-parameter sensitivity analysis ».....	139
55	Comparaison des surfaces occupées par les différents degrés de vulnérabilité déterminés selon les méthodes.....	142
56	Classification des risques pour la protection des eaux souterraines.....	145
57	Indice et classe de danger.....	148
58	Valeurs des pondérations des dangers.....	149
59	Classification de la carte de risque.....	155
60	Liste des dangers cartographiés dans la plaine Collo.....	157

61	Classification de carte de risque de la plaine de Collo.....	160
----	--	-----

Table des matières

	Page
Résumé.....	i
Abstract.....	ii
ملخص.....	iii
Remerciement.....	iv
Dédicace.....	v
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I :Cadre physico-géographique et géologique

1. Contexte géographique.....	5
1.1 Situation de la zone d'étude.....	5
1.2 Climat et fonctionnalités hydrologiques	6
1.3 Population	7
1.4 Faune et flore.....	8
1.5 Géomorphologie.....	8
1.5.1 Les bordures.....	9
1.5.2 Le réseau hydrographique.....	9
1.5.3. Les niveaux quaternaires.....	9
1.5.3.1 Le plus haut niveau (V).....	9
1.5.3.2 Le niveau (IV)......	9
1.5.3.3 Le niveau (III)......	10
1.5.3.4 Le niveau (II)......	10
1.5.3.5 La basse terrasse du niveau (I)......	10
1.5.4 Les cordons dunaires du littoral	10
1.5.5 Les zones marécageuses	10
2 Géologie.....	10
2.1 Les formations métamorphiques.....	12
2.1.1 Ensemble inférieur métamorphique	13
2.1.2 Ensemble supérieur métamorphique	13
2.1.3Le troisième ensemble	13
2.2 Les formations sédimentaires : La chaîne calcaire.....	13

2.2.1 La chaîne calcaire interne.....	13
2.2.2 La chaîne calcaire médiane.....	13
2.2.3 La chaîne calcaire externe.....	14
2.2.4. La série de flyschs kabyles	14
2.2.4.1 Le Flysch maurétanien	14
2.2.4.2 Le Flysch masyilien	15
2.2.5 Les séries telliennes.....	15
2.2.5.1 Les séries ultras- telliennes	16
2.2.5.2 Les séries telliennes (sens strict)	16
2.2.5.3 Les séries péni-telliennes	16
2.2.5.4 La nappe néritique Constantinoise	16
2.2.6 Les unités stratigraphiques postérieures au Lutétien.....	16
2.2.6.1 Les formations du nummulitique sens strict	16
2.2.6.2 Les formations oligo-miocènes kabyles	16
2.2.6.3 Les séries argileux-gréseuses numidiennes	17
2.2.6.4 Les formations Poste- nappes	17
2.3 Les formations éruptives	17
2.4 Tectonique	18
3 Paléogéographie	19
4 Géologie locale.....	20
5 Conclusion.....	23
 CHAPITRE II : Hydrogéophysique	
1 Introduction.....	24
2 Approche Géophysique	24
3 Méthodes géophysiques utilisées.....	24
3.1 Méthode électrique.....	24
3.2 Méthode de sismique réfraction.....	26
4 Examen des résultats.....	26
5 Carte des résistances transversales (RT).....	30
6 Interprétation des coupes géo-électriques.....	32
6.1 La coupe 1.....	32
6.2 La coupe 2.....	32

6.3 La coupe 3.....	32
6.4 La coupe 4	32
7 Approche hydrogéologique	34
7.1 Au Sud de Koudiet Telezza.....	34
7.2 Au Nord de Koudiet Telezza.....	34
8. Coupes hydrogéologiques.....	36
8.1. Coupe suivant le tracé 1-1	36
8.2 Coupe suivant le tracé 2-2.....	37
8.3 Coupe suivant le tracé 3-3.....	37
9. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe de Collo	38
9.1. Transmissivité	38
9.2. Perméabilités	38
10 Piézométrie.....	39
11. Conclusion.....	41

CHAPITRE III : Hydroclimatologie

1 Introduction.....	42
2 Caractéristiques géométriques du bassin versant de l'Oued El Guebli.....	42
2.1 Périmètre.....	42
2.2 Superficie.....	42
2.3 Forme.....	42
3. Caractéristiques climatiques.....	44
3.1 Les précipitations.....	44
3.1.1 Les précipitations mensuelles et leurs variabilités.....	44
3.2 La température.....	45
3.2.1 Température moyenne mensuelle.....	45
3.3 L'humidité relative de l'air.....	46
3.4 Les vents.....	47
3.5 L'évaporation.....	47
4 Le diagramme ombrothermique.....	47
5 Classification du climat.....	48
5.1 Classification du climat selon l'indice de MARTON.....	48

6. Le bilan hydrique.....	49
6.1 L'évapotranspiration.....	49
6.2 L'évapotranspiration potentielle ETP.....	50
6.3 Calcul de l'ETP.....	50
6.3.1 Formule de Thornthwaite.....	50
6.3.2 L'évapotranspiration réelle (ETR) selon la formule de Turc.....	51
6.3.3 L'ETR selon la formule de Thornthwaite.....	51
6.4 L'estimation de la réserve facilement utilisable (RFU).....	51
6.5. L'interprétation du bilan hydrique de Thornthwaite.....	54
6.5.1 Ruissèlement.....	54
6.5.2 L'infiltration efficace.....	55
7 Conclusion.....	55

CHAPITRE IV : Revue de littérature

1 Introduction.....	56
2 Apport de la connaissance du comportement des polluants	57
3 Vulnérabilité des eaux souterraines.....	59
3.1 Le concept de vulnérabilité.....	59
3.2 Les critères conditionnant la vulnérabilité intrinsèque.....	61
3.2.1 Critères relatifs aux conditions de surface ou subsurface.....	62
3.2.2 Critères relatifs à la zone non saturée :.....	63
3.2.3 Critères relatifs à la zone saturée	63
3.3 Détermination de la vulnérabilité spécifique	63
3.4 Techniques d'estimation de la vulnérabilité	64
3.4.1 Les méthodes paramétriques.....	65
3.4.2 Approches statistiques et par modélisation physique.....	67
4 Apport des SIG et principales sources d'information.....	68
4.1 Composantes d'un SIG.....	68
4.2 Mode de représentation des données.....	69
4.2.1 Mode raster (ou matricielle).....	69
4.2.2 Mode vecteur (ou filaire).....	70
5. Quelques méthodes d'évaluation de vulnérabilité intrinsèque les plus utilisées dans le	

milieux poreux et karstique.....	70
5.1 Aquifer vulnerability index (AVI).....	71
5.2 SINTACS.....	72
5.3 DRASTIC	72
5.4 La méthode SI (Susceptibilité index).....	73
5.5 La méthode GOD (Foster 1987).....	74
5.6 La méthode GALDIT.....	74
5.7 La méthode GLA (Hölting et al 1995).....	74
5.8 La méthode RISK et RISK2	75
5.9 L'approche européenne (COST Action 620).....	75
6. La vulnérabilité dans un cadre de risque.....	76
6.1 Définition du danger.....	77
6.2 Définition du risque :.....	77
7 Évaluation du risque	78

CHAPITRE V : Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines

1 Introduction	79
2 Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse	79
3 Traitement des résultats.....	80
4 Contexte hydrochimique général.....	80
4.1 Les principaux paramètres physicochimiques :.....	80
4.1.1 Paramètres in situ	80
4.1.1 Le pH	80
4.1.2 La Conductivité électrique	81
4.2 Les éléments chimiques majeurs	82
4.2.1 Cations	82
4.2.1.1 Le calcium (Ca^{++})	82
4.2.1.2 Le magnésium (Mg^{++}).....	82
4.2.1.3 Le sodium (Na^{+})	82
4.2.2 Anions	82
4.2.2.1 Les chlorures (Cl^{-}).....	82
4.2.2.2 Les sulfates (SO_4^{-})	82

4.2.2.3 Les bicarbonates (HCO_3^-)	83
4.2.2.4 Les nitrates (NO_3^-)	83
4.3 Faciès chimiques.....	83
5 Les rapports caractéristiques.....	85
5.1 Le rapport Na^+/Cl^-	85
5.2 Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$	86
5.3 Le rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	87
5.4 Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$	87
5.5 Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^-$	88
6 Identification de l'origine de la salinité	89
7 LES MÉTAUX.....	90
7.1 Le cuivre (Cu)	90
7.2 Le Plomb (Pb).....	90
7.3 Le Zinc (Zn).....	91
7.4 Le Fer (Fe)	92
8 Les composées azotées.....	92
8.1 Les nitrates.....	92
8.2 Les nitrites.....	93
9 Conclusion	94

CHAPITRE VI : Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

1.Introduction	95
2 Méthodologie	95
2.1 Choix des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.....	96
2.2 Logiciel utilisée.....	97
2.3 Les données à disposition.....	98
3 Description des méthodes retenues et applications.....	100
3.1 La méthode DRASTIC	100
3.1.1 Les paramètres du modèle DRASTIC.....	100
3.1.2 Le système de notation appliqué.....	101
3.1.3 DRASTIC Pollution Index (DPI).....	103
3.1.3.1 Profondeur de la nappe	103
3.1.3.2 Recharge nette R	104

3.1.3.3 Lithologie de l'aquifère A	106
3.1.3.4 Type du sol S	107
3.1.3.5 Topographie T	107
3.1.3.6 : Zone non saturée I	108
3.1.3.7 Conductivité hydraulique C	109
3.1.4 Calcul de l'indice DRASTIC (DPI)	110
3.2 La méthode GOD.....	112
3.2.1 Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques CG	114
3.2.2 Impact de la zone vadose CO	114
3.2.3 Profondeur à la nappe CD	115
3.2.4 Carte de vulnérabilité GOD.....	116
3.3 la méthode SI (Susceptibility Index)	117
3.3.1 Les paramètres de la méthode SI (RIBEIRO (2000)).....	117
3.3.2 Carte de vulnérabilité SI.....	119
3.4 La méthode GLADIT (Chachadi et Lobo Ferreira 2001)	121
3.4.1 Les paramètres de la méthode GALDIT.....	122
3.4.1.1 Paramètre G : le type d'aquifère.....	122
3.4.1.2 Paramètre A : la conductivité hydraulique de l'aquifère.....	123
3.4.1.3 Paramètre L : Niveau piézométrique de la nappe par rapport au niveau de la mer ..	123
3.4.1.4 Paramètre D : distance perpendiculaire à la côte.....	124
3.4.1.5 Paramètre I : Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée....	124
3.4.1.6 Paramètre T : Épaisseur de l'aquifère.....	125
3.4.2 Application de la méthode GALDIT sur la nappe côtière de Collo.....	125
3.4.2.1 Paramètre G : Type de nappe	125
3.4.2.2 La conductivité hydraulique de l'aquifère A	126
3.4.2.3 Niveau piézométrique de la nappe par rapport au niveau de la mer L.....	126
3.4.2.4 Paramètre D : distance perpendiculaire à la côte.....	127
3.4.2.5 Paramètre I : Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée	128
3.4.2.5.1 Le rapport $Cl^- / (HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$	128
3.4.2.5.2 la carte de teneurs en chlorures	129
3.4.2.6 Paramètre T : Épaisseur de l'aquifère.....	130
3.4.3 L'indice GALDIT sous les conditions actuelles et futures	130
3.4.3.1 Scénario 1 : L'état actuel du niveau de la mer	130
3.4.3.2 Scénario 2 : Élévation du niveau de la mer : d'ici à 2100 (+1m).....	131
3.4.4 Discussion	133

4 Validation des méthodes de vulnérabilité.....	133
4.1 Validation statistiques : (Test de sensibilité des modèles DRASTIC, GOD, SI et GALDIT).....	134
4.1.1 Sensibilité du modèle DRASTIC.....	135
4.1.1.1 Le test "Map removal sensitivity analysis":.....	136
4.1.1.2 Le test "Single-parameter sensitivity analysis":	136
4.1.2 Sensibilité du modèle GALDIT	137
4.1.2.1 Le test "Map removal sensitivity analysis":.....	138
4.1.2.2 Le test "Single-parameter sensitivity analysis":	138
4.2 Validation chimique:	139
5 Comparaison des cartes de vulnérabilité	141
6 Conclusion	143

CHAPITRE VII *Evaluation de risque des eaux souterraines à la pollution*

1 Introduction.....	144
2 Évaluation et classification des dangers (Aléas)	145
3 Notation et pondération de danger	146
3.1 Méthode de pondération	146
3.2 Procédure de classement	147
3.3 Probabilité de contamination des eaux souterraines	147
3.4 Calcul de l'indice de danger HI.....	147
4 Technique de cartographie des dangers	153
5 Evaluation de risque	154
6 Application de la méthodologie COST 620 sur la nappe de Collo	155
6.1 Inventaire des dangers (aléas)	155
6.2 Détermination de l'indice du danger (HI) Tableau. 60	157
6.3 cartographie du risque	159
7 Conclusion	162
Conclusion générale et recommandation.....	163
Référence.....	166
Annexe.....	174

Introduction

En Algérie, l'accès durable aux ressources en eau est une préoccupation majeure qui concerne tous les pays du bassin méditerranéen. Le changement climatique et la croissance urbaine et démographique attendus dans la région risquent d'aggraver la situation de stress hydrique qui frappe déjà la plupart des pays du sud et de l'est de la Méditerranée (PSEM). Plusieurs facteurs peuvent expliquer la situation de stress hydrique,

- Les contraintes physiques liées au relief et à la morphologie du pays
- La baisse de la pluviométrie depuis trois décennies, avec un pic de sécheresse en 2001-2002. et 2014-2015.
- La croissance de la demande en eau (multipliée par quatre en quarante ans), notamment dans le nord du pays et dans les zones urbaines (neuf Algériens sur dix vivent dans le nord du pays, soit 13 % de la superficie nationale, et six Algériens sur dix vivent dans plus de 550 agglomérations urbaines).

Cette situation pourrait être amplifiée par les effets du changement climatique qui sont susceptibles d'être plus prononcés dans le bassin méditerranéen que dans d'autres régions du monde. Les eaux souterraines en Algérie sont estimées de 8 milliards de m³/an dont 3 milliards m³ renouvelables et 5 milliards m³ non renouvelable (fossiles) dans les régions sahariennes. (FAO, 2002).

Par conséquent, les eaux souterraines sont probablement la source naturelle la plus extraite et consommée de façon intensive pour répondre aux différentes demandes, y compris domestiques, agricoles et industrielles. La croissance rapide des surfaces cultivées et infrastructures urbaines et industrielles exerce d'énormes pressions sur ressources en eaux souterraines disponibles qui induisent à une vraie crise d'eaux représentée par la rareté et la détérioration de leur qualité. Selon le METAP (2008) (Mediterranean Environmental Technical Assistance Program) la plupart des ressources en eau en Algérie sont polluées par :

- Les eaux usées municipales non traitées (87 % de la population urbaine est reliée à un réseau d'assainissement, mais la plupart des unités de traitement des eaux usées sont hors de service)
- Les rejets industriels non traités se déversent dans les cours d'eau naturelle en violation de la réglementation gouvernementale. Environ 200millions de mètres cubes par an des eaux usées industrielles non traitées sont rejetés dans l'environnement.

- Les pratiques agricoles et mal surveillées seront à l'origine d'une pollution diffuse par les nitrates et pesticides.

Étant donné les coûts importants engendrés par la restauration des aquifères contaminés, il est important, dans le contexte environnemental actuel, que des mesures soient prises afin de protéger les aquifères de la pollution tout en étant conscientes que les activités humaines sont une nécessité au sein de la société.

Donc il est essentiel de développer des plans de protection des eaux souterraines aux différents polluants provient de la surface par infiltration. La meilleure approche pour la protection d'un aquifère à l'échelle régionale est d'utiliser des outils préventifs à sa contamination. Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité et le risque à la pollution des nappes permettent de répondre à ce besoin. Suivant les variations de la topographie, de l'occupation du sol et de la géologie, certaines portions de l'aquifère sont naturellement mieux protégées que d'autres et sont ainsi moins vulnérables à une éventuelle contamination causée par les activités de surface.

La vulnérabilité à la pollution d'une nappe d'eau souterraine matérialise la facilité avec laquelle peut être atteinte par une pollution, c'est est une notion relative, non mesurable et sans dimension. Sa caractérisation est basée généralement sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres plus ou moins important, relatif notamment à la couverture de la nappe (sol et zone non saturée) et à la zone saturée proprement dite. Il y a plusieurs approches pour évaluer ces propriétés allant de plus simples au plus complexe.

Dans cette thèse, quatre approches ont été utilisées pour évaluer le degré de vulnérabilité intrinsèque et spécifique de la plaine littorale de Collo (NE Algérie). Il s'agit de l'approche GOD (Foster 1987), DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), SI (Ribeiro 2000) et GLADIT (Chachadi *et al.* 2003).

L'application de ces méthodologies ne peut être possible sans l'utilisation des systèmes d'Information géographique (SIG), en raison de la masse très importante des données nécessaires.

2. Justification et objectifs de la présente étude

L'étude présentée ici a pour objectif de déterminer quelle méthode s'avère la plus efficace et réaliste du point de vue de l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe littorale de Collo (NE Algérie) afin de délimiter les zones à risque. Un compromis doit être établi entre les différentes données nécessaires à l'établissement de chaque paramètre versus le nombre de fois où ces mêmes données seront utilisées par l'ensemble des paramètres et entre la quantité

d'information nécessaire, dont la collecte peut engendrer des coûts élevés, versus celle disponible.

L'étude de la vulnérabilité de l'aquifère de Collo comporte trois objectifs :

- 1) Estimer la vulnérabilité intrinsèque et spécifique et incorporer les résultats dans un système d'information géographique (SIG).
- 2) Comparer statistiquement les différentes méthodes afin de déterminer quel est leur degré d'adéquation et d'où viennent les différences d'évaluation.
- 3) Adopter une approche pour évaluer le risque des eaux souterraines à la pollution. Ce dernier s'articule sur la vulnérabilité intrinsèque et l'estimation de l'aléa de contamination (le danger) (Probabilité d'occurrence d'une contamination).

Cette étude permettra de fournir une aide en matière de protection des eaux souterraines dans la plaine de Collo en identifiant des zones de plus forte vulnérabilité qui permet de prévenir une partie de la contamination en guidant le gestionnaire lors de l'aménagement du territoire.

3. Organisation de la thèse :

Cette thèse de doctorat se compose de sept chapitres répartis sur deux grandes parties :

Une 1^{re} partie théorique relative à l'étude des caractéristiques générales de la plaine de Collo afin de comprendre la nature et la géométrie de l'aquifère, leurs conditions d'existence et les conditions climatiques qui règnent dans la région d'étude. Il a été ainsi développé les chapitres suivants :

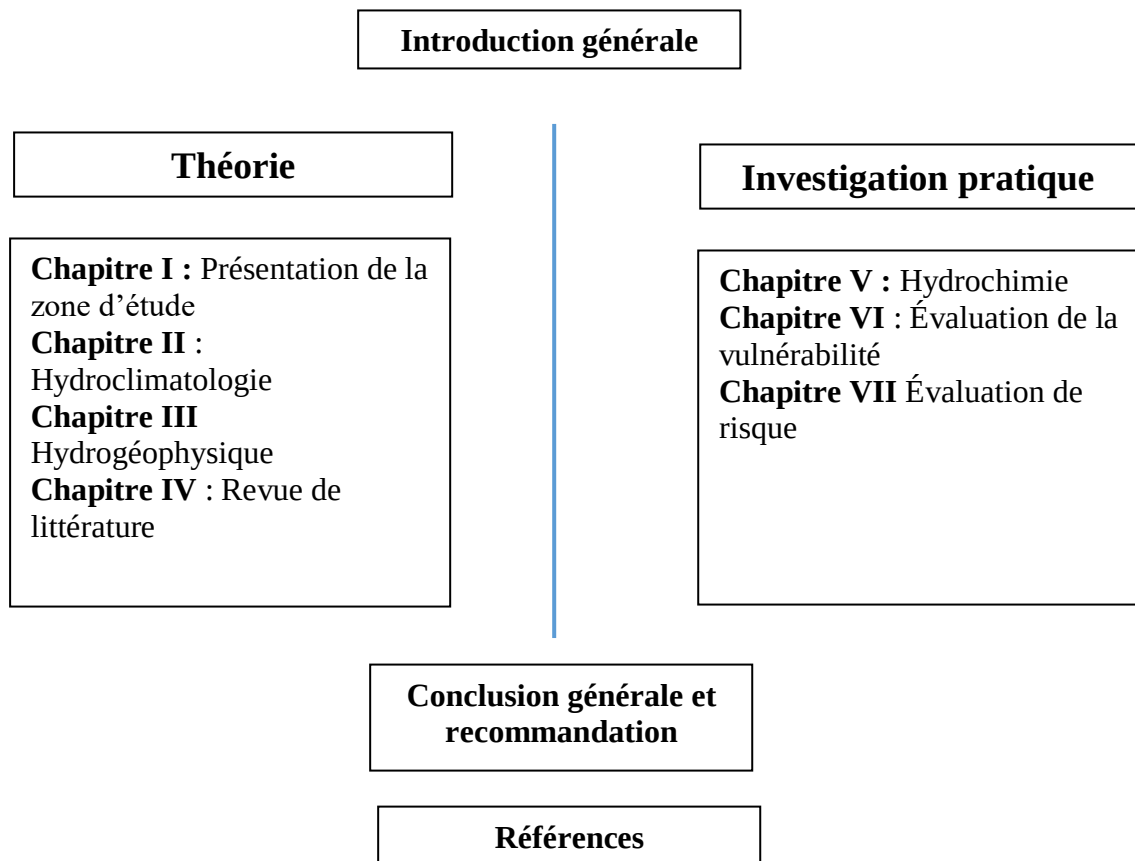
- Chapitre I : Description de la zone d'étude (cadre physico-géographique et géologique). La situation géographique de la zone d'étude, les caractéristiques hydrologiques sont incluses dans le chapitre. À partir de ce chapitre, on a pu avoir une idée détaillée concernant les différentes formations géologiques, leurs natures et la susceptibilité aquifère du site étudié.
- Chapitre II : Expose la géométrie de l'aquifère et la lithologie du remplissage alluvionnaires en utilisant les données hydrodynamiques et géophysique ainsi que l'évaluation de certains paramètres hydrogéologiques en l'occurrence, la perméabilité et la transmissivité.
- Chapitre III : consacré à l'analyse des paramètres hydroclimatiques de la zone d'étude pour aboutir à l'établissement du bilan hydrique.

- Chapitre IV : Expose un examen complet de la littérature avec les antécédents théoriques des concepts principaux qui apparaissent dans cette thèse.

Une 2^e partie pratique en deux chapitres :

- Chapitre V : expose l'interprétation d'un ensemble des données hydrochimiques mesurées récemment *in situ* et au laboratoire afin de mettre un état des lieux des eaux souterraines de la plaine de Collo.
- Chapitre VI : consacré à la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique des eaux souterraines à la pollution par les méthodes DRASTIC, GOD, SI et GALDIT, ainsi qu'une validation des méthodes.
- Chapitre VII : consacré à la cartographie du danger sur la base de l'approche européen COST action 620 afin de faire une évaluation de risque des eaux souterraines à la pollution.

Enfin, des perspectives à ce travail seront évoquées en conclusion en termes d'utilisation future des résultats acquise pour la protection des eaux souterraines et l'utilisée comme un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire.



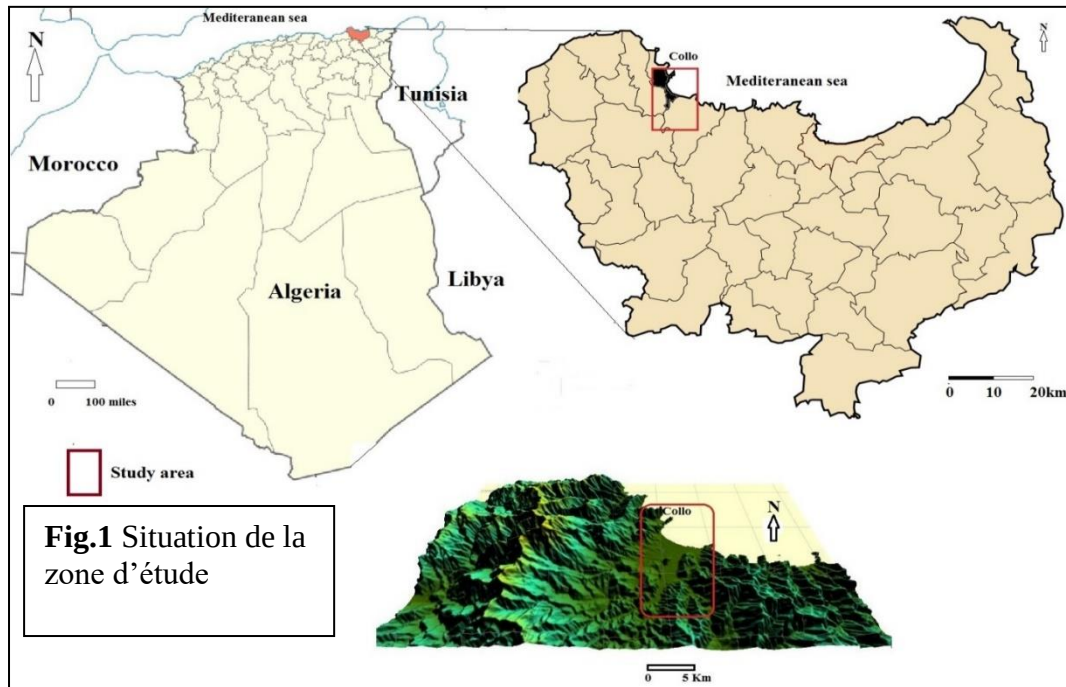
CHAPITRE I

Cadre physico-géographique et géologique

1. Contexte géographique

1.1 Situation de la zone d'étude

La zone d'étude (plaine de Collo) est localisée à l'ouest de la wilaya de Skikda (NE Algérie), et elle occupe une superficie de 50 Km² (Fig. 1). Elle est drainée par oued El Guebli et Oued Cherka. La plaine de Collo appartient au bassin côtier constantinois (code 3) (Fig. 2),



Elle a une forme quadrilatérale allongée, d'une longueur de 8 km et d'une largeur de 5 km le long de la mer, avec une superficie d'environ 50 Km², avec les coordonnées 6°36'41.37"E et 36°58'10.33" N.

Du point de vue administratif, la plaine est limitée : A l'Est par la commune de Kerkera ;

À l'ouest par la commune de Collo et Cheraia.

Au sud par la commune Beni Zid.

Au Nord la mer méditerranée, constitue leur limite septentrionale.

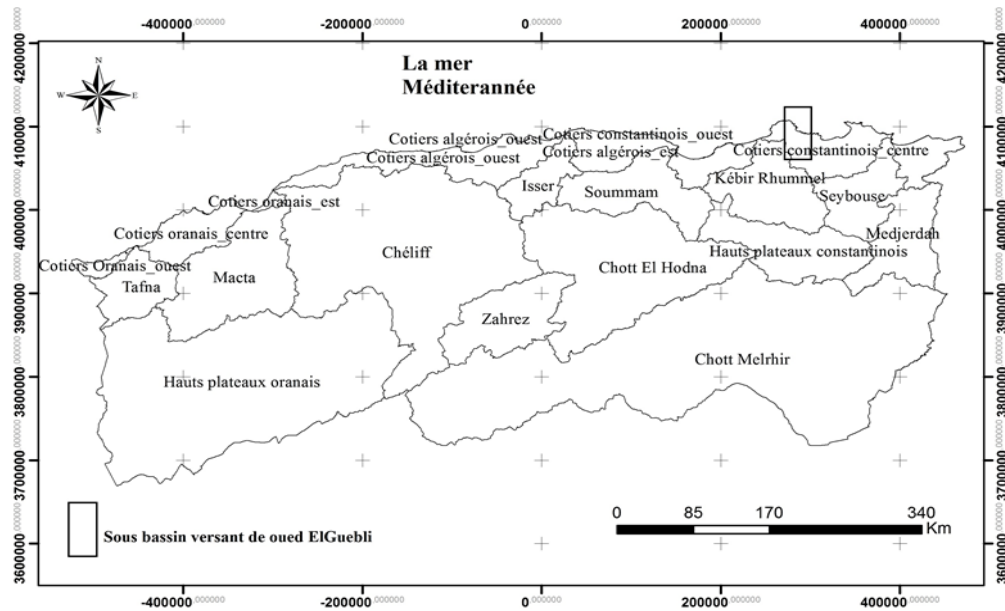


Fig. 2 Les grands bassins versants de l'Algérie

1.2 Climat et fonctionnalités hydrologiques :

Le bassin versant de l'Oued Guebli se localise dans une zone à climat méditerranéen. Dans son ensemble, cette zone est caractérisée par une sécheresse d'été bien marquée et, selon les sous-régions, d'un maximum pluviométrique d'automne ou d'hiver (A. Douguédroit, 1997 ; E. Xoplaki, 2002). La zone d'étude est classée parmi les zones les plus arrosées de l'Algérie (Fig. 3)(ANRH). Des études récentes (Lionello et al., 2006) sur les changements globaux ont montré que la région méditerranéenne pouvait être soumise à des variations climatiques complexes marquées surtout par des périodes de sécheresse prolongées (2001-2002. et 2014-2015).

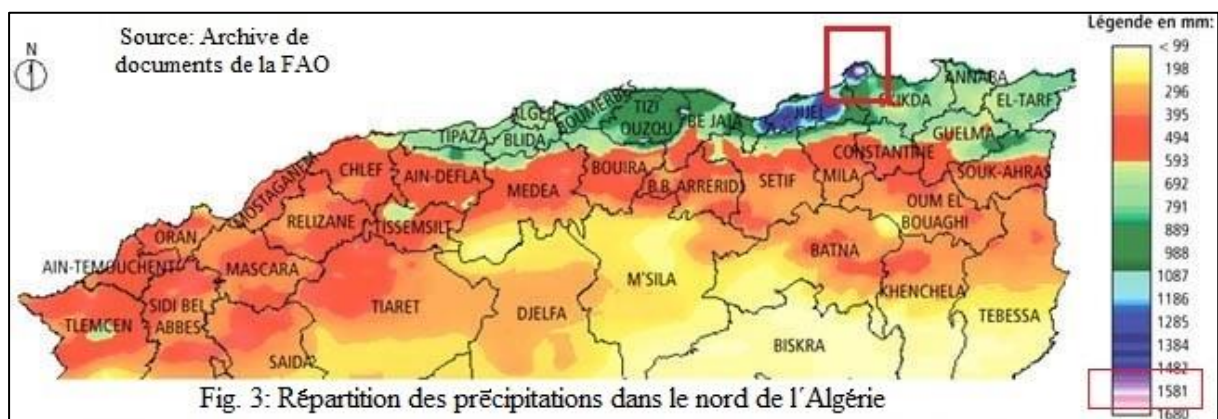


Fig. 3: Répartition des précipitations dans le nord de l'Algérie

Dans la plaine de Collo, le réseau hydrographique est représenté par l'Oued Guebli, qui est la principale et qui draine la plaine du Sud au Nord avec ses affluents oued Guergoura et oued Fessa, et l'Oued Cherka au Nord-ouest qui reçoit son alimentation de Ghedir El Mohken et quelques petits affluents dans ça rive gauche.

Les vallées des Oueds (figure. 4) ont la forme d'une auge avec des versants assez raides, et le fond est légèrement incliné. Les lits des oueds sont en général de forme trapézoïdale large de 10 à 40 m, font de multitudes méandres en s'écartant dans les fonds des vallées jusqu'à la profondeur de 2 à 4 m.

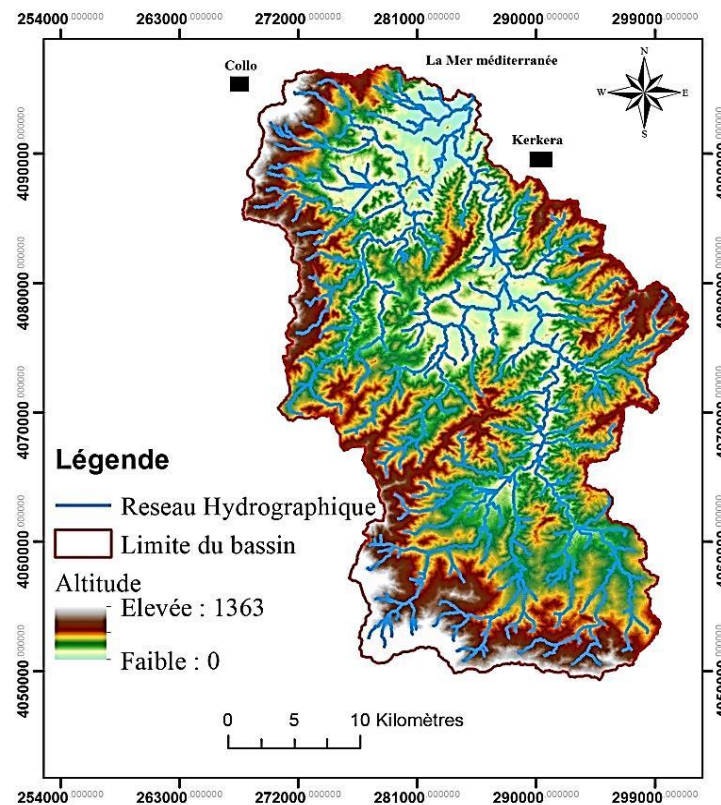


Fig. 4 Réseaux hydrographique du bassin versant de oued ElGuebli (Boulabeiz, M 2016)

Toutes les vallées sont d'origine tectonique et datent du pliocène, l'écoulement de ces oueds est permanent à cause du climat humide. Ces derniers jouent un rôle capital dans la recharge de la nappe alluviale d'une part et reconstituent les réserves du barrage Guenitra d'une autre part.

1.3 Population :

La population de la commune de Collo a été estimée en 2007 à 35162 habitants, soit 4.36 % du total de la wilaya de Skikda (804697 habitants). La population a connu une

évolution rapide depuis l'indépendance, elle a doublé en deux décennies, passant de 12815 habitants en 1966 à 24380 habitants en 1987, pour atteindre environ 35162 habitants en 2007. Elle est confirmée par des valeurs de taux de croissance démographique très élevés (Tableau 1).

Tableau 1 : Évolution de la population de Collo par période et par zone de dispersion (1966 – 2007) (source ONS)

Indicateurs Zones de dispersion	Nombre et pourcentage de la population communale										Taux moyen annuel d'accroissement (%)			
	1966		1977		1987		1998		2007		66-77	77-87	87-98	98-07
	NP	%	NP	%	NP	%	NP	%	NP	%				
A.C.L	10828	84.49	12408	75.20	21043	86.31	27550	86.18	30239.32	86.00	1.24	5.42	2.73	2.5
A.S	/	/	/	/	2259	9.26	3339	10.44	3927.6	11.17	-	-	3.61	3.5
Z.E	1987	15.51	4092	24.80	1078	4.42	1075	3.36	995.1	2.83	6.7	12.35	0.026	0.020
Total	12815	100	16500	100	24380	100	31967	100	35162	100	2.32	3.97	2.49	2.52

1.4 Faune et flore :

La tectonique affectant la quasi-totalité de la région de Collo et l'écoulement de réseau hydrographique dans une formation lithologique dure (socle kabyle) donnent au territoire communal une topographie chaotique, aérée et allongée. Ces caractéristiques font de cette entité spatiale montagnarde un véritable écosystème désigné par ses richesses en faune et en flore (Agaguenia.S, 2010)

La faune compte environ 11 espèces de mammifères, 10 espèces d'oiseaux, dont les plus répandues sont la cigogne blanche, le canard, le héron, la perdrix, la tourterelle des bois, la caille, l'aigle royal, etc. Cette diversité faunistique constitue une véritable aubaine pour les amateurs de la découverte et de la chasse ;

La flore est représentée par des arbres, des maquis et des herbages verdoyants, dont les plus importants sont :

- le pin maritime qui coexiste avec le chêne-liège ;
- le chêne-liège, une essence climatique de la région méditerranéenne, il est parfois associé au chêne zen et au pin maritime ;
- le chêne zen qui se rencontre principalement sur des terrains aux altitudes supérieures à 300 m,

1.5 Géomorphologie :

L'évolution géomorphologique de la Kabylie de Collo est reconstituée, et deux facteurs sont mis en évidence : d'une part le rôle des héritages morphoclimatiques, d'autre

part celui de la tectonique dans son aspect passif comme dynamique. L'étude géomorphologique de la région de Collo fait apparaître cinq domaines bien distincts (Alain Marre, 1987) :

1.5.1 Les bordures :

- Au Sud-Est, elle est limitée par un talus rectiligne qui descend en pente régulière et forte depuis la Koudiat Draa Bou Diss, jusqu'à la basse terrasse de l'Oued Guebli et plus au nord par un escarpement qui se termine au Ras-Frao.
- Au Nord-Ouest, elle est limitée par un autre escarpement de direction sud-est ; mais traversé par de petits ruisseaux qui descendent depuis de Cheraia, et se terminent sur la basse terrasse, mais se prolongent par une série de buttes ou de glacis qui dominant la basse plaine.
- Au Sud-Ouest, elle se termine par une série de Koudiats plus ou moins importante qui délimite bien l'espace dans lequel est installée la plaine de Collo.

Enfin, au centre de la plaine, s'élève la Koudiat Telezza, qui domine de tous les côtés la basse plaine de Collo.

1.5.2 Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est concentré autour de l'Oued Guebli qui descend depuis le bassin de Tamalous suivant un tracé Sud-Nord pour venir buter contre Koudiat Télézza; il s'oriente alors vers le Nord-Est après sa confluence avec l'Oued Guergoura. Ce dernier ainsi que ses affluents Oued Zadra et Afflassane présentent dans la région des Koudiats un tracé curieux faisant le tour de certains Koudiats en dédaignant des passages plus directs. Ceci s'expliquant par l'existence d'une subsidence permanente et le rejeu des failles de bordures après le Pliocène. A l'Ouest, un petit Oued peu actif (l'Oued Cherka) que les eaux de mer remontent souvent.

1.5.3. Les niveaux quaternaires : Il se trouve cinq niveaux quaternaires dont les plus anciens sont les plus dégradés :

1.5.3.1 Le plus haut niveau (V): Topographiquement, il est représenté de buttes de petites tailles (Koudiat Guendebou et Msalleh) qui dominent les Oueds de 110 mètres environ. Il s'agit d'un matériel colluvial; l'ensemble repose sur des grès karstifiés et déformés du second cycle marin Miocène post-nappes.

1.5.3.2 Le niveau (IV) : Il se traduit par une série de replis tout autour de Koudiat Zrikaiya et sur le piémont d'Aghbal. Ces formes dominent les Oueds de 70 mètres environ.

1.5.3.3 Le niveau(III):C'est les restes d'une série de glacis descendant en pente régulière vers le fond de la plaine. Ce niveau se trouve au pied des Koudiats El Halia et Zrikaiya; ils dominent les oueds de 30 mètres environ.

1.5.3.4 Le niveau (II):On le trouve surtout sur le piémont d'Aghbal à 20 mètres environ au dessus de l'Oued Cherka.

1.5.3.5 La basse terrasse du niveau (I):La plaine de Collo proprement dite, de part et d'autre de l'Oued Guebli correspond à la très basse terrasse qui domine de 3 mètres environ au cours de l' Oued.D'autre part, au pied des versants de Tallezza et Draa Bou Diss, de petits cônes caillouteux viennent se poser sur cette basse terrasse. D'après les analyses granulométriques des dépôts des différents niveaux, on peut conclure que contrairement aux quatre autres niveaux mis en place par l'Oued Guebli, le niveau I a été déposé par la mer.

1.5.4 Les cordons dunaires du littoral : Ce domaine s'étalant d'ouest en est, est incisé par l'oued Guebli à l'est et l'oued Cherka à l'ouest et constitué de sable gris, qui-en mouvement a tendance à fermer les exutoires de l'oued Cherka qui est peu actif et que les niveaux de la mer remontent souvent.

1.5.5 Les zones marécageuses : représentées principalement par le lac de Ghedir El Mohken au sud de Koudiet Talleza due essentiellement à la nature argileuse des sols.

2 Géologie

La région de Collo appartient au domaine de la petite Kabylie qui présente trois massifs anciens : les Babors, le massif de Collo et le massif de l'Edough avec leurs couvertures plissées d'âge cénozoïque. La petite Kabylie se limite au nord par la mer méditerranée à l'ouest par la soummam (la grande faille qui sépare la grande Kabylie de la petite Kabylie) à l'est se limite par la dépression de la plaine d'Annaba toute a fait au sud et se situe entre la ligne des partages des eaux le bassin de El Hodnna.(figure.5 et 6)

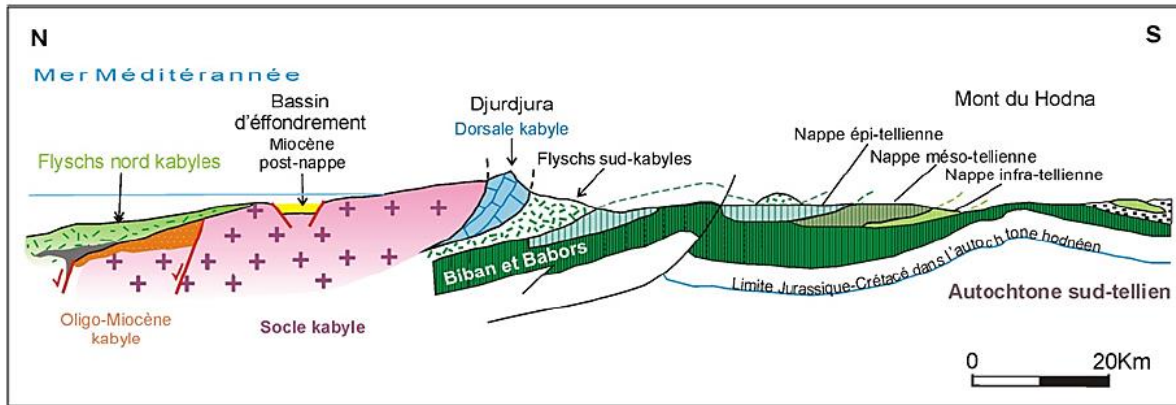


Fig. 5 : Les grands ensembles de l'édifice structural alpin de l'Algérie du nord orientale

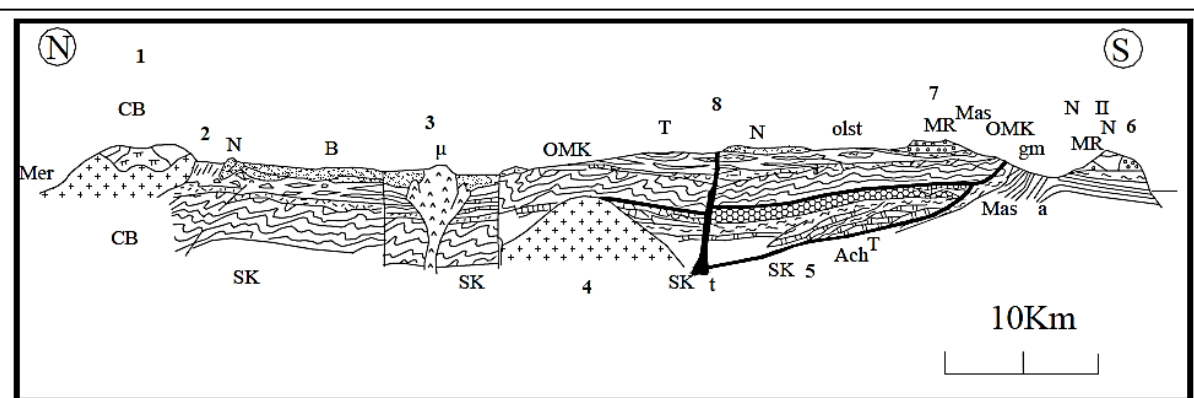


Fig. 6 : Coupe synthétique et théorique de la Kabylie de Collo et d'El Millia. (D'après Bouillin, 1979; modifiée). SK : Socle Kabyle. CB : Socle du Cap Bougaroun associé aux péridotites. OMK : OligoMiocène Kabyle. OLST : Ollisostomes à blocs et oolistrolites de flyschs-maurétaniens et massylien. T : Lambeau de formations telliennes à position supra-Kabyle. MR : Fyschs maurétaniens. Mas : Fyschs massyliens. N : Numidien. B : Burdigalien Moyen-Superieur post nappes. μ : microgranite. CB : granite du Cap Bougaroun. t : Trias en position de diapir à travers le socle Kabyle. Ach : Série maurétanienne épimétamorphique des Achaïches.

1 : massif du Cap Bougaroun. 2 : bordure Nord- Ouest du « bassin » de Collo. 3 : environ de Collo et bassin d'El Milia. 4 : fenêtre des Beni Toufout. 5 : massif du mouled Demamène. 6 : chaînon d'El Karn. 7 : synclinal de l'Oued Rezel, au Sud Ouest d'Ain Kachera. 8 : Trias du Djebel arbala et au environ de la mechtat Stalgneuf.

La majeure partie de la petite Kabylie est formée par des roches cristallophylliennes avec une couverture sédimentaire formée de grès et des dépôts plus récents, l'ensemble est traversé par un filon éruptif. La région de Kabylie de Collo a fait l'objet de plusieurs études, parmi lesquelles nous citons les plus récents : J.F Raoult (1974), J.P Bouillin (1977), J.M Vila (1980), et A.Marre (1983).

Les différentes formations de la petite Kabylie sont représentées sur la Figure. 7 :

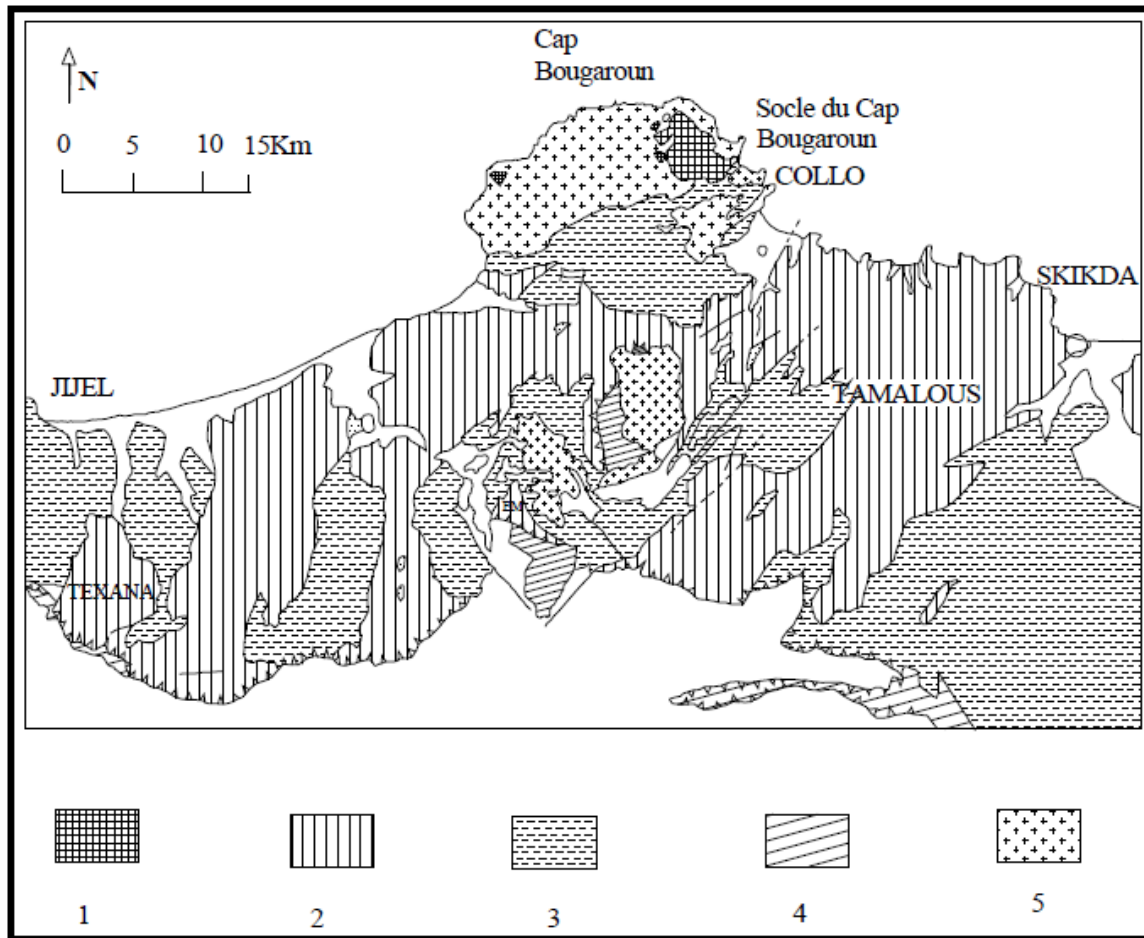


Fig.7 : Schéma géologique de la Kabylie de Collo, d'après (Bouillin et Kornprobst, 1974).

1 : socle de Cap Bougaroun; 2 : socle de petite Kabylie ; 3 : terrains sédimentaires : Oligo-Miocène Kabyle, flyschs allochtones et olistrostromes, Miocène post nappes; 4 : Mésozoïque épimétamorphique (Achaïches, Sendouh, Beni Toufout); 5 : granite et microgranites Miocène.

2.1 Les formations métamorphiques :

Les affleurements du socle de la petite Kabylie recouvrent de grandes surfaces de la région d'étude. Le socle est constitué, dans son ensemble, d'une vaste nappe qui repose sur des terrains mésozoïques et cénozoïques et qui ont fait l'objet déjà de description relativement ancienne (Roubault, 1934; Durand Délga, 1955; Mahjoub et Merle, 1990; Mahjoub *et al.*, 1997). À l'heure actuelle, il s'est établi l'idée d'une structure principalement compartimentée de ce massif. On suppose que ce dernier est recoupé par une grande zone de blastomylonites et charriée vers le sud (jusqu'à 30 km) sur les ensembles de flyschs (Bouillin, 1979, 1982; Mahjoub, 1991).

Il paraît être constitué de trois ensembles superposés, deux ensembles métamorphiques inférieurs et le dernier principalement sédimentaire.

2.1.1 Ensemble inférieur métamorphique :

Il est formé de gneiss à biotites et muscovites avec intercalation de marbres et d'amphibolites.

2.1.2 Ensemble supérieur métamorphique :

Il est constitué de phyllades ou de schistes satinés (200 à 300 m d'épaisseur) gris, grès bleuté, parfois bleu vif, rosé ou verdâtre, avec de nombreux quartz d'exsudation à la base, ainsi que des porphyroïdes œillets blancs ou verdâtres à litage grossier et à filons de quartz.

2.1.3 Le troisième ensemble :

Il sert de base aux séries mésozoïques et cénozoïques. À la base de cet ensemble, se retrouve des formations épaisses de (50 à 100 m). Que J.F Raoult a attribué à l'Ordovicien-Silurien, elles sont constituées de bas en haut, de grauwalks, de spilites, d'amphibolites.

À nouveau, de grauwalks, des schistes et de pélites gris verdâtre ou gris bleutés au-dessus, des calcaires de faciès variables (calcaire cristallin, gris rose ou rouge violacé, calcaires noduleux...) sont datés du Dévonien. Enfin cet ensemble se termine par des schistes et pélites gris verdâtre à gris vert, avec débris de quartz, phyllades et Lydiennes et alternances de bancs gréseux et conglomérats à la base ; ce matériel est attribué au Carbonifère.

2.2 Les formations sédimentaires : La chaîne calcaire (Fig. 8)

L'étude de la chaîne calcaire, dont les principaux sommets de datation s'étant, de Lias inférieur au Lutétien a été menée par J.F Raoult (1974) et J.M Vila (1980) qui ont pu définir trois sous- zones qui sont :

2.2.1 La chaîne calcaire interne :

Ces séries sont lacuneuses et très souvent condensées d'épaisseur (30 à 70 m), ces calcaires massifs dont la sédimentation a été interrompue par la phase du Lutétien supérieur constituent un trait majeur du paysage de la chaîne calcaire interne. Il est visible dans la région de Kef Toumiat.

2.2.2 La chaîne calcaire médiane :

Ces formations ont comme caractère original la présence de calcaire à micro faunes pélagiques du crétacé supérieur au lutétien. À la différence de la chaîne calcaire interne, elle ne présente pas de calcaires massifs.

2.2.3 La chaîne calcaire externe :

Elle a comme caractère original une forte épaisseur de calcaire massif du Lias inférieur (100 à 400m). Cette chaîne calcaire n'affleure pas dans la Kabylie de Collo.

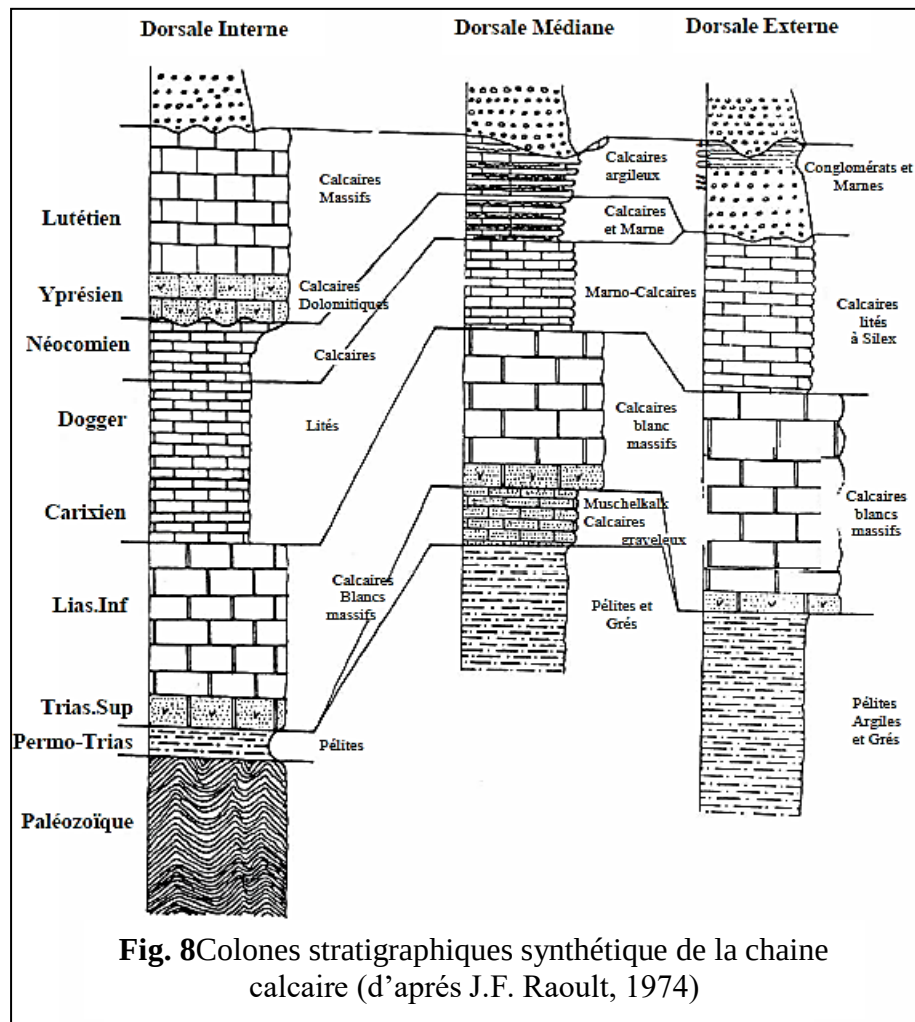


Fig. 8 Colones stratigraphiques synthétique de la chaîne calcaire (d'après J.F. Raoult, 1974)

2.2.4. La série de flyschs kabyles : Fig. (9)

Deux séries nettement caractéristiques ont été définies : paléo géographiquement, et du nord au sud, ce sont :

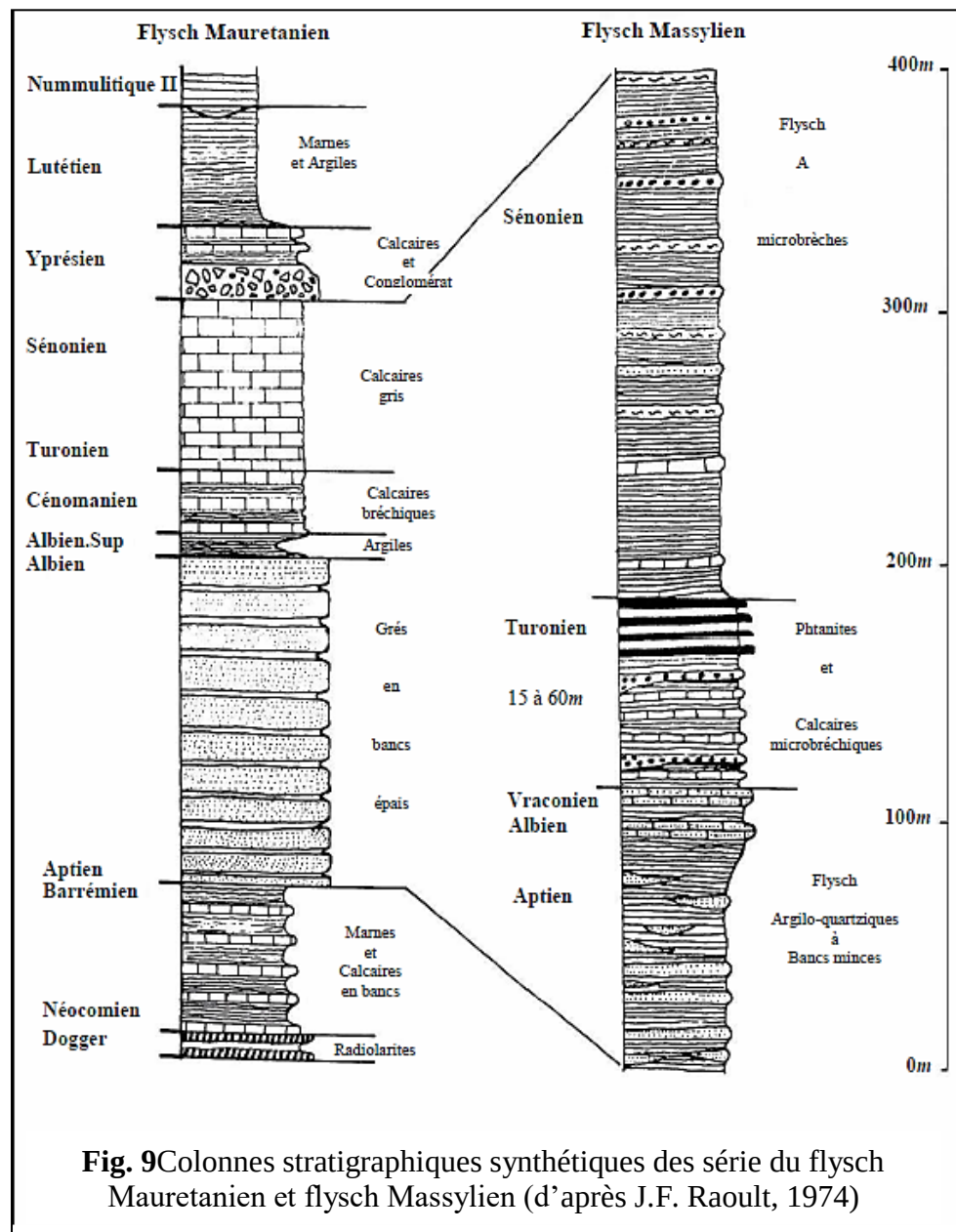
2.2.4.1 Le Flysch maurétanien :

La série est composée d'alternance de bancs argileux, calcaires et gréseux. Sur le plan lithologique, l'élément principal de ces flyschs maurétanienne est la diminution de

l'importance des grès Albo-Aptien depuis la série maurétanienne (sens strict) vers la série de Ziane. Il affleure sur les versants nord de Djebel Sidi drisse.

2.2.4.2 Le Flysch masylien :

Cette série s'étend essentiellement sur le versant nord du Djebel Sidi Driss et au col du Kantour. Elle présente une part importante de marnes et d'argiles. Ce qui favorise le développement de toutes les formes de glissements et de ravinements.



2.2.5 Les séries telliennes :

Elles ont été étudiées par un grand nombre des géologues qu'a pu définir plusieurs séries telliennes. Paléogéographiquement et du nord au sud, on distingue :

2.2.5.1 Les séries ultras- telliennes :

Définies en 1969 par Durand Delga, elles se caractérisent par un faciès essentiellement marneux et clair avec quelques bancs de calcaire, ce qui donne des reliefs en général mous.

C'est une série normale et monte du terrain de crétacé au Lutétien .elle affleure sur les versants nord du Djebel Sidi Driss.

2.2.5.2 Les séries telliennes (sens strict) :

Ces séries vont du Trias au Lutétien et présentent des variations de faciès dans le temps. À un Lias de plateforme succédé un Jurassique plus marneux. Le crétacé, d'abord détritique devient marneux à argilo-calcaire. L'éocène se caractérise par des marnes épaisses avec le classique faciès des calcaires yprésiens.

2.2.5.3 Les séries péni-telliennes :

Elles sont définies dans le Djebel Zouaoui (À Marre et al, 1987), elles affleurent toujours au sud du Tell oriental algérien. Leur faciès très carbonaté les a fait confondre pendant longtemps avec les séries néritiques constantinoises.

2.2.5.4 La nappe néritique Constantinoise :

Elle est constituée essentiellement par des formations carbonatées qui représentent le siège d'une grande variété de formes karstiques. Ces nappes s'est mises en place lors de la phase tangentielle d'âge Alpine.

2.2.6 Les unités stratigraphiques postérieures au Lutétien :

2.2.6.1 Les formations du nummulitique sens strict :

Etudiée par J.F Raoult (1974), ce sont les formations qui succèdent à la phase priabonienne. Elles sont en général sableuses, riches en micas détritiques et en débris de socle. On les a souvent appelées séries molassiques gréseux-micacées.

2.2.6.2 Les formations oligo-miocènes kabyles :

Elles constituent la couverture sédimentaire, discordante et transgressive du socle kabyle, elles affleurent dans la région de Collo débutant de l'oligocène terminal à l'aquitaniens inférieur, d'épaisseur variable d'une pointe à un autre.

2.2.6.3 Les séries argileux-gréseuses numidiennes :

Relativement peu étendues dans la Kabylie de Collo à l'ouest de la plaine de Oued Gueblie, marquée à ses bases par des argiles varicolores et un sommet daté de l'Oligocène supérieur en grande Kabylie, ensuite viennent des gros bancs de grès épais de (0.5 à 3 m) et enfin, des formations supranumidiennes (marnes et silexites) atteignant le Burdigalien basal.

2.2.6.4 Les formations Poste- nappes :

Ces formations sont représentées par les dépôts du Miocène moyen et terminal. Parmi ces formations seront distinguées les séries marines, qui affleurent surtout dans les régions littorales, et les séries continentales du bassin de Constantine. Il se trouve au Nord Ouest de la plaine de Collo.

2.3 Les formations éruptives :

Les travaux de Roubault. (1934) ont fait connaître dans la région de Collo (petite Kabylie) l'affleurement de deux masses de roches d'origine magmatique post Burdigalien: le premier est localisé au Cap Bougaroun (granite du nord) et l'autre à Beni Toufout (granite du sud). Ces roches ignées comprennent des granites, des microgranites, des rhyolites et des roches basiques et ultrabasiques. D'après l'analyse des différentes cartes géologiques (Roubault, 1934 ; Bouillin et Kornoprost. 1974; Ouabadi *et al.*, 1992), une évolution spatiale de mise en place de ces roches magmatiques (microgranites, granites à grains fins et granites à grains grossiers vers la région de Oued Zhour) peut être remarquée dans la région depuis l'est

jusqu'à l'Ouest. Les roches encaissantes sont représentées par des gneiss, des micaschistes et des schistes du socle primaire ainsi que par des argiles et des marnes de l'éocène. Le Quaternaire est représenté par des alluvions.

Les roches basiques sont peu représentatives et de moindre extension. Les roches ultrabasiques sont de deux types. Les uns sont localisés au voisinage du Cap Bougaroun; il s'agit de péridotites associées au gneiss à cordiérite et sillimanite. Les autres sont sous forme d'épandages qui affleurent à une quinzaine de kilomètres plus au sud-ouest près du

Mechta de Yaddène. Elles présentent certains caractères communs aux complexes stratifiés et aux sériesophiolitiques (Bouillin et Kornoprost. 1974).

2.4 Tectonique :

La région présente une complexité extrême de l'édifice structural caractérisée par la superposition de nombreuses nappes la plus spectaculaire d'entre elles est constituée par le socle kabyle. Cet édifice est découpé par un système de fractures post nappes.

On distingue trois compartiments superposés comportant chacun des flyschs et des formations telliennes, ce sont :

- Le compartiment nord-inférieur, constitué par l'empilement sous le socle kabyle, de plusieurs nappes à matériel schisteux et plus ou moins métamorphisé.
- Un compartiment nord supérieur, constitué du socle kabyle avec la couverture oligomiocène supportant des lambeaux de nappes de flyschs et du matériel tellien associé à des Olistostromes, cela conduit à dire que le matériel allochtone s'est mis en place du Sud vers le nord et que l'action de la gravité a joué ici un rôle déterminant.
- Un compartiment structural sud, composé de deux parties précédentes et séparées par un accident tardif chevauchant vers le sud, il comporte : d'une part, une bande de flyschs massiliens pratiquement continue d'Est en Ouest qui sépare le socle des terrains télliens. et d'autre part le chaînon d'El Karm, formé de séries mauritaniennes, superposées au téllien par l'intermédiaire d'une Nappe de flyschs massiliens, un lambeau du numidien coiffe cet édifice.

Selon J.M Vila (1980), la tectonique priabonienne marque la fin du grand cycle sédimentaire commencé avec le Trias supérieur. Elle a eu pour résultats :

- La genèse du chevauchement kabyle au fond duquel se manifeste un métamorphisme épizonal.
- La genèse des nappes des flyschs et des nappes telliennes.

Dans la partie radicale des unités telliennes et sous le chevauchement kabyle, ces formations s'accompagnent d'un métamorphisme dynamique qui sera transporté et dispersé par les phases ultérieures (selon J.M Vila 1980).

La tectonique burdigalienne se manifeste par la genèse de :

- Des Olistostromes kabyles et de la nappe numidienne préfigurant la méditerranée.
- D'un bombement à la plombe du bord kabyle méridional où s'étaient ultérieurement empilées les unités de flyschs sur les nappes telliennes au Priabonnien.

Au Tortonien, la région de la Kabylie peu ou pas déformée marquée par un bloc kabyle septentrionale à Burdigalien-anghien. Enfin un aspect majeur de la tectonique du sillon des flyschs paraît être une compression Nord-Sud que traduisent les plis à axes horizontaux et les schistosités est-ouest que l'on observe dans le soubassement triasique et jurassique des flyschs de la petite Kabylie.

3 Paléogéographie :

La paléogéographie est déterminée à partir de la lithostratigraphie. Selon J-P- Bouillin (1977), le sillon des flyschs se serait différencié à l'aurore du crétacé par l'effondrement entre une marge kabyle (socle et dorsale) et le domaine tellien d'une zone affectée par des distensions, la première tectonique tangentielle débute à la fin du Lutétien (Raoult 1974). à partir de cette époque, on aura la succession des faits suivant :

- ❖ Fin Lutétien à l'Oligocène supérieur sous charriage, accompagné de métamorphisme, du soubassement des flyschs sous le socle kabyle.
- ❖ Fin Oligocène, début burdigalien , la partie de l'édifice des nappes situées au sud du socle kabyle aurait été déformée en un bourrelet, des lambeaux s'en seraient déposés en position plus externe.
- ❖ Au Burdigalien inférieur un vaste cisaillement aurait transporté vers le Sud l'ensemble des zones internes déjà structurées.
- ❖ Le Numidien aurait glissé à son tour vers le Nord sur les zones internes.
- ❖ Du Burdigalien supérieur au Quaternaire après la mise en place de la nappe numidienne, il y a émergence de la petite Kabylie puis, rapidement, la mer revient en transgression au Burdigalien supérieur-Langhien en déposant des marnes, suivies par un second cycle Langhien gréseux et transgressif sur le premier. Il y a ensuite émergence et développement d'un important magmatisme granitique calco-alcalin dans la région de Collo, le granite du Cap Bougaroun vient au contact des formations sédimentaires suprakabyles qui sont alors déformées et schistosées.

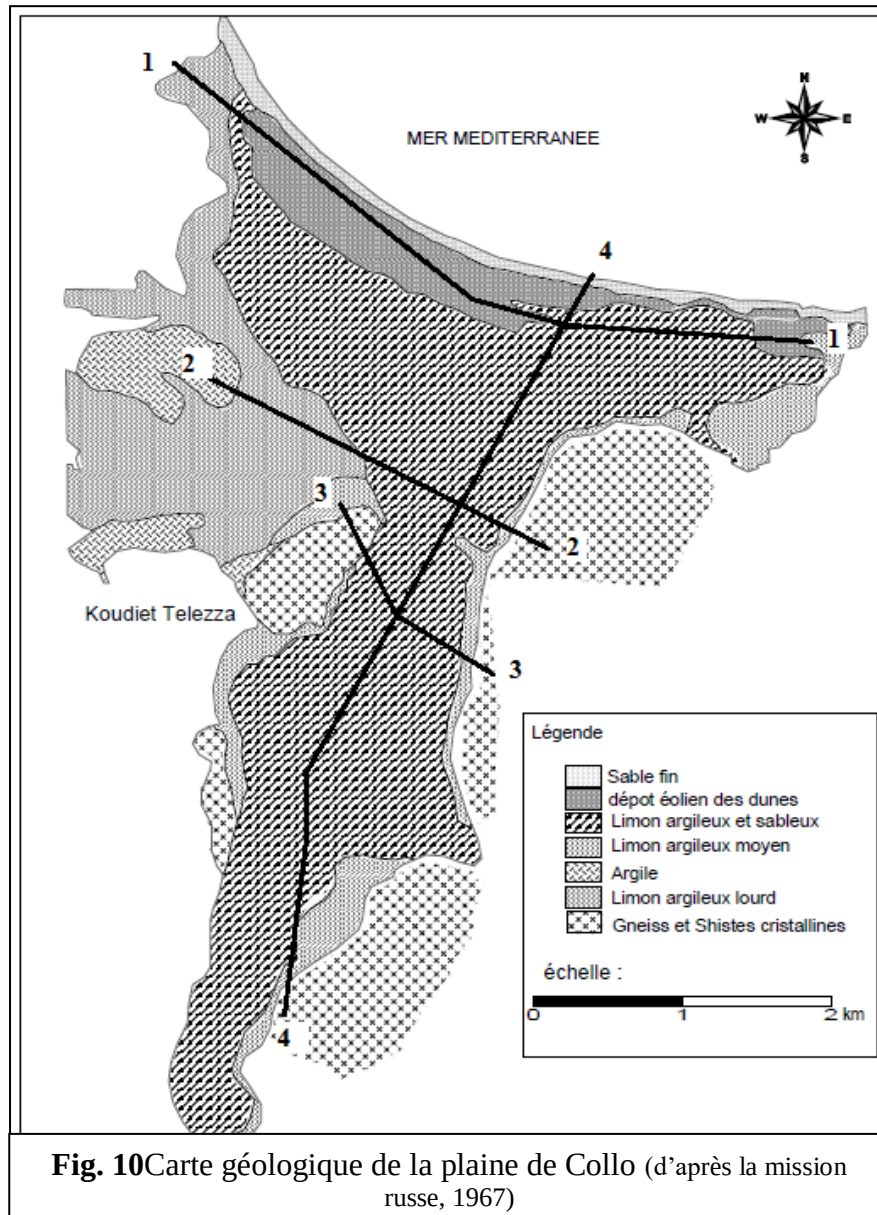
Ultérieurement, on assiste à la transgression du pliocène marin qui envahit les grès et les sables dans le Sahel de Jijel et de la vallée de l'Oued Kebir, et les marnes bleues au sud de Collo.

Enfin les dépôts quaternaires situés au sud de Collo et les terrasses de Cap Bougaroun paraissent indiquer les mouvements verticaux positifs de la petite Kabylie de Collo au cours de tout le Quaternaire.

4 Géologie locale

La structure géologique du secteur d'étude est relativement simple (Figure. 10), la vallée (d'origine tectonique datant du Pliocène) est taillée dans un massif de roches métamorphiques (micaschistes et gneiss du socle kabyle) au pied duquel est bâtie la ville de Collo. Sur ce socle, des sédiments marins presque entièrement argileux se sont déposés, il s'agit du :

- ❖ **Miocène** : constitué d'une alternance de marnes et des grès. À cette époque se mettent en place des granites intrusifs tels qu'à la bordure est de la plaine de Collo.
- ❖ **Pliocène** : constitué de marnes bleues, affectées par des failles le mettant en contacte directe avec les séries métamorphiques, ainsi que les calcaires à algues visibles au niveau de Koudiat Zrikaiya. Ces marnes du miocène et pliocène formant le substratum imperméable de la plaine alluviale, percées de quelques pointements de roches métamorphiques.
- ❖ **Quaternaire** : du sud au nord, le remplissage alluvial présente 2 faciès distincts :
 - Au Sud de Koudiat Télézza (191m) : Alluvions peu épaisses, essentiellement limoneuses, peu perméables à l'exception d'une zone peu étendue en rive gauche de l'oued Guebli.
 - Au Nord de Koudiat Télézza : Épaississement du remplissage (15 à 25 m) formé de sables et graviers.



La partie étendue au sud –ouest de la plaine à Ghédir Mokhène est constituée par de matériaux fortement argileux, ils sont exempts de calcaires et des roches allochtones mais ne constituent pas un aquifère important du fait de leur perméabilité très faible.

Il est à noter que les roches métamorphiques environnant, présentent une fissuration qui peut être d'origine tectonique ou d'altération surtout au niveau de la partie Sud du secteur, où la profondeur d'altération dans les fissures tectoniques remplies de quartz et de calcite est de l'ordre de (5 à 20 m) et le coefficient de fissuration est de (2 à 6 %) avec un coefficient d'infiltration est égale à (10 m /jour d'après l'étude Russe 1967).

L'altération à faible profondeur se manifeste dans la faible ouverture des fissures et le changement de la couleur des terrains en leur donnant près des parois les nuances gris

jaunâtres. Les différentes formations de la plaine alluviale ainsi que leurs épaisseurs respectives, désignées sur les coupes [1.1] ; [2.2] ; [3.3] ; [4.4] dans le (Fig.11, 12, 13, 14) établi d'après la mission russe (1967).

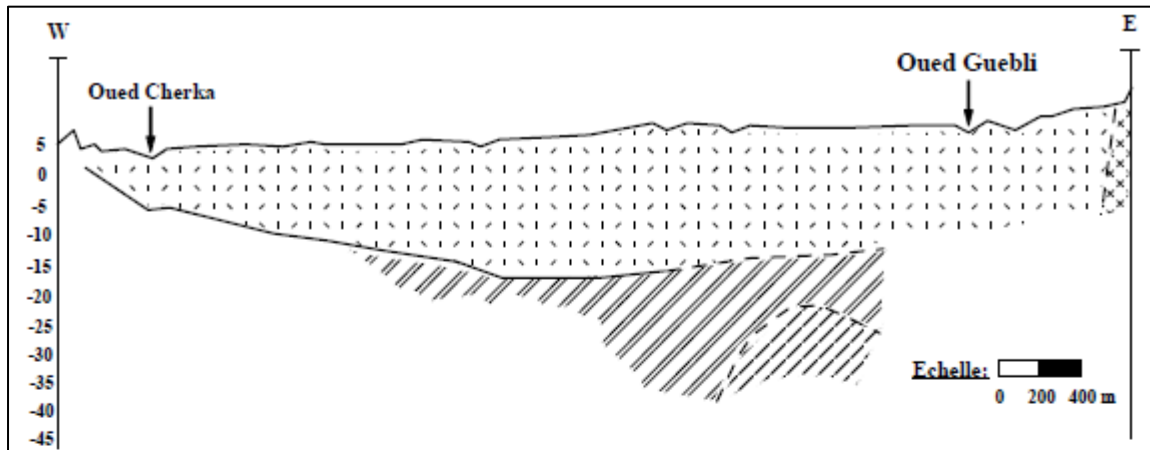


Fig.11 : Coupe géologique suivant le tracé 1-1 (d'après l'étude russe 1967)

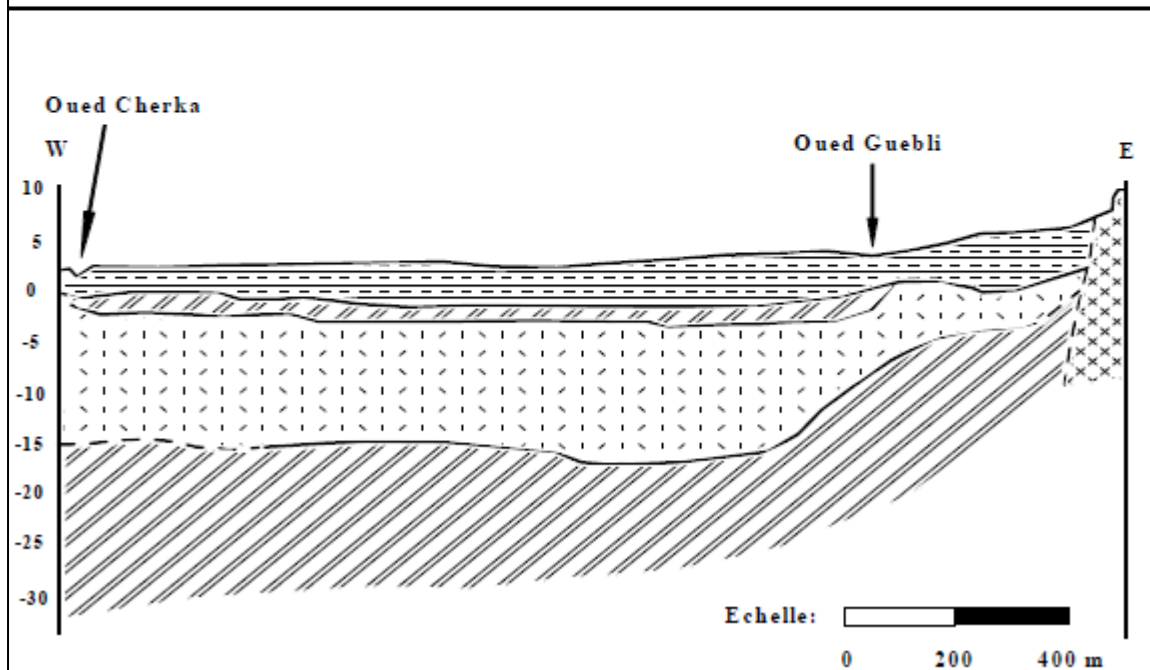


Fig.12 : Coupe géologique suivant le tracé 2-2 (d'après l'étude russe 1967).

Légende:	
	Sable
	Argile noire
	Limon argileux
	Gneiss et granite
	Limon argileux et sableux

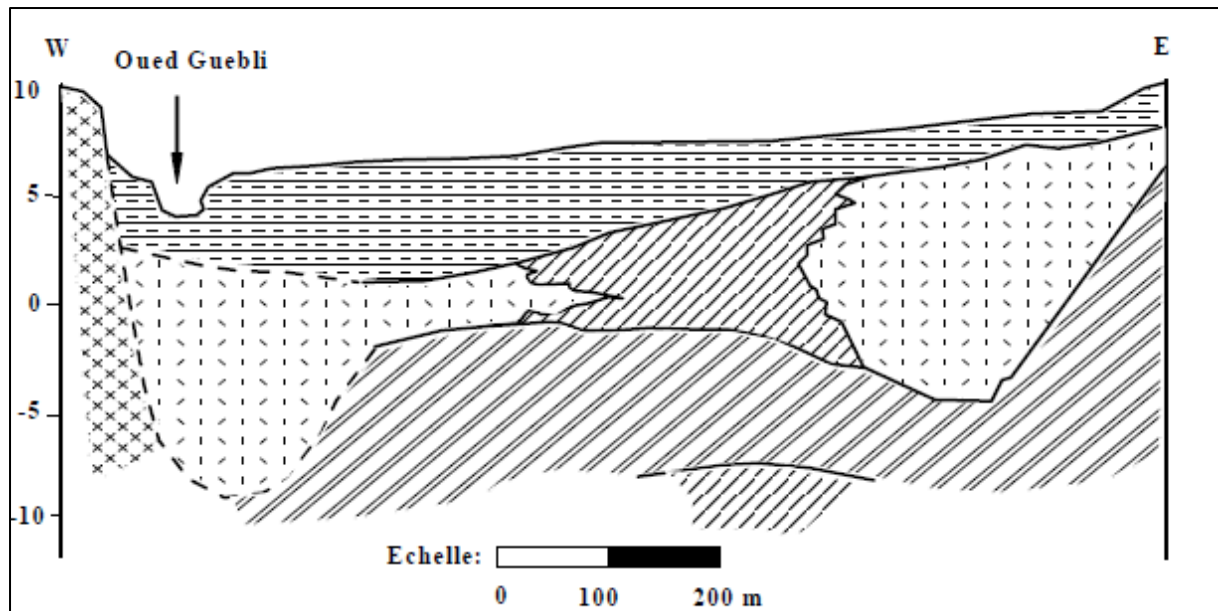


Fig.13 : Coupe géologique suivant le tracé 3-3 (d'après l'étude russe 1967)

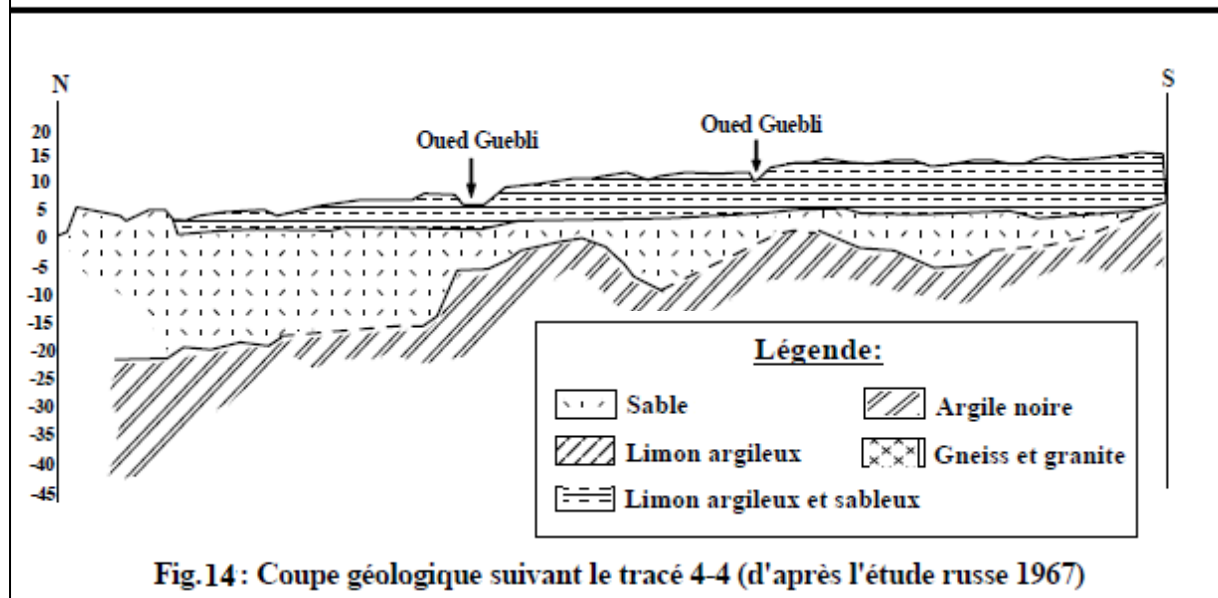


Fig.14 : Coupe géologique suivant le tracé 4-4 (d'après l'étude russe 1967)

5 Conclusion

Dans son ensemble, la géologie de la région régionale de la kabylie de Collo est très compliquée, ceci est le résultat de la tectonique affectant la quasi-totalité de la région. Mais le cadre géologique de la plaine est simple ; la vallée est taillée dans le massif des roches rigide (granite, gneiss et schiste).

Sur le socle des sédiments marins sont déposés, ce sont les marnes à lentilles gréseuses du miocène et les marnes bleus du Pliocène inférieur formant ainsi le substratum imperméable du remplissage alluvial. Ce dernier constitue le principal aquifère de la plaine de la région.

CHAPITRE II

Hydrogéophysique

1 Introduction :

Dans la plaine de Collo la nappe phréatique superficielle du quaternaire constitue l'aquifère le plus important de la région. Elle circule principalement dans un remplissage sédimentaire reconnu par les coupes stratigraphiques des forages et la géophysique (CGG 1965). Pour but d'identifier les formations hydrogéologiques et paramètres hydrodynamiques, deux approches ont été utilisées : une approche géophysique qui repose sur les sondages géo électrique élaborée par la CGG (Compagnie général de géophysique, 1965) et l'interprétation coupe stratigraphiques des forages.

2 Approche Géophysique :

La plaine de Collo a été l'objet de plusieurs études géophysiques, parmi lesquelles nous nous basons sur l'étude élaborée par la compagne générale de géophysique (CGG) durant l'année 1965. Au cours de laquelle, 289 sondages électriques ont été réalisés dont 14 dispositifs sismiques classiques.

Le but de cette étude géophysique consiste à :

- Déterminer l'épaisseur des alluvions, des sables et graviers argileux à marneux et du toit du substratum marneux.
- Préciser la limite entre les limons à l'amont et les sables et graviers à l'aval.
- Localiser, au sud de Koudiet Telezza, les lentilles de sables et graviers au sein des limons imperméables.
- Reconnaître l'extension de l'invasion salée dans la plaine d'une part en direction de rivage, et d'autre part au voisinage de l'oued Cherka.

3 Méthodes géophysiques utilisées :

3.1 Méthode électrique : Fig. (15)

La C.G.G à utiliser le dispositif quadripôle ABMN de "Schlumberger" qui consiste à mesurer la résistivité apparente du terrain d'après la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \cdot \Delta V / I$$

où:

ρ : Résistivité apparente en ($\Omega.m$).

K : Facteur géométrique qui dépend du dispositif M et N

ΔV : Différence de potentiel entre M et N

I : Intensité du courant injecté dans le sol entre A et B.

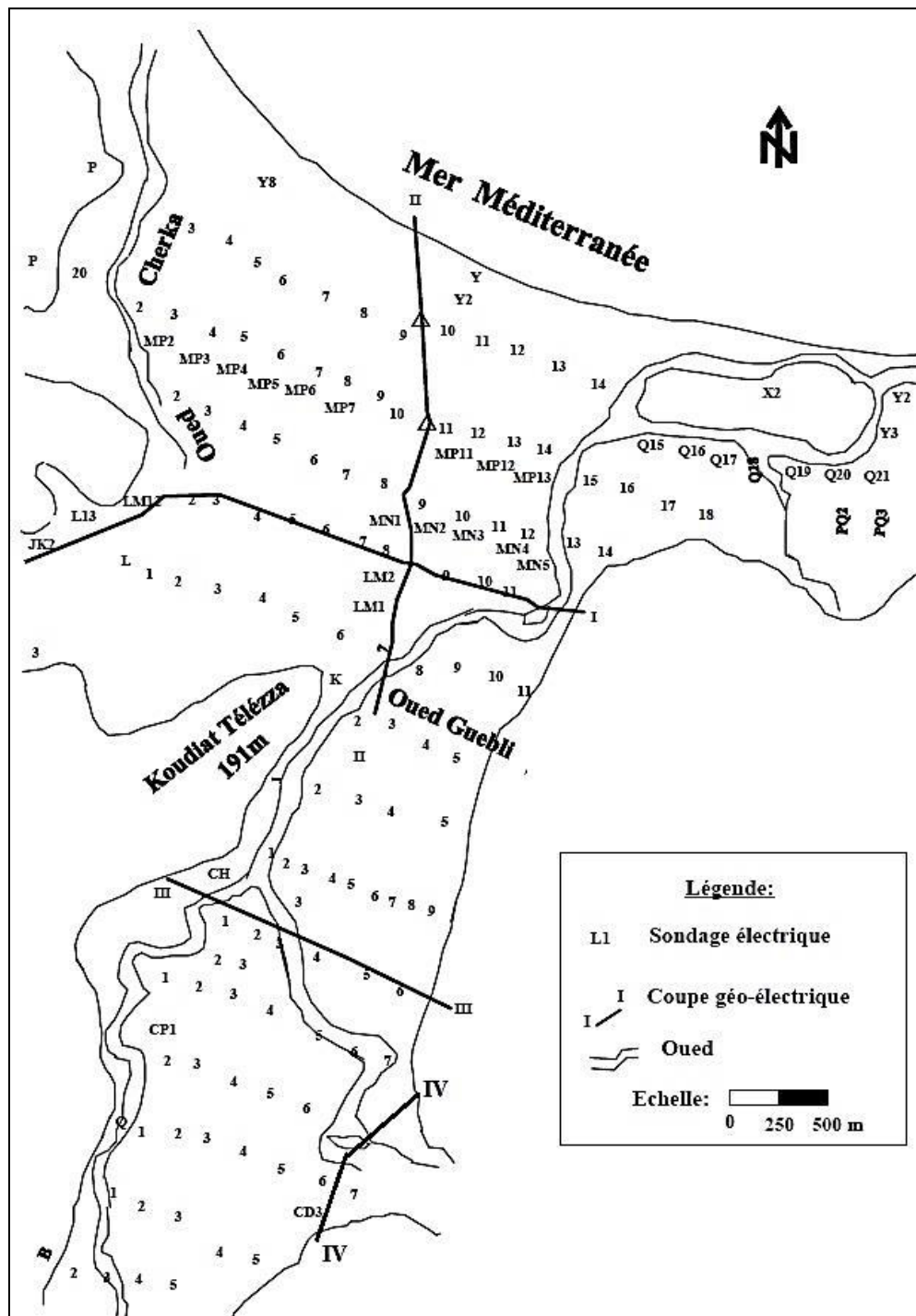


Fig. 15 Carte des profils électriques (CGG, 1965)

Les travaux réalisés dans la plaine d'Oued Guebli comprennent :

- 01 sondage électrique d'étalonnage sur le forage S10
- 20 profils principaux des sondages électriques recoupent entièrement la vallée d'Ouest en Est.
- 08 profils de 2 à 3 sondages électriques pour l'étude de l'invasion marine
- 01 profil Nord-Sud de sondage électrique (R) dans la région de Kerkera
- Un certain nombre de sondages électriques intermédiaires dans les zones à préciser.

Soit un total 245 sondages électriques dont 14 furent repris suivant une deuxième direction de dispositif.

La méthode de sondage électrique permet de répondre dans la majorité des cas à résoudre les problèmes posés. Les sables et graviers à eau douce résistants, se distinguent des limons argileux et des marnes de substratum, tous deux conducteurs.

Par ailleurs leur résistivité est directement proportionnelle à celle de l'eau d'imbibition (Les sables envahi d'eau salée sont des niveaux très conducteurs).

3.2 Méthode de sismique réfraction :

- 02 dispositifs (A et B) rattachés au sondage électrique Ki et E8
- 03 dispositifs (C, D et E) recoupent la vallée d'Oued Guebli immédiatement à l'aval de Kerkera.

C'est dans le cas où les marnes de substratum devenant trop minces ou finiraient par disparaître entre les alluvions résistantes, il sera nécessaire de faire appel à la sismique réfraction pour lever l'indétermination.

4 Examen des résultats : Fig.16, 17, 18

La résistivité de l'eau de la nappe se situe généralement entre 7.2 et 40.4 ohm.m avec une forte proportion de valeurs voisines de 20 ohm.m (l'équivalent Cl Na 0.3g/l).

Par contre la zone envahie de l'Oued Cherka a fourni, pour sa part les valeurs suivantes :

- 1.1 ohm.m au pont du CD 6 (équivalent Cl Na 7g/l)
- 1.9 ohm.m au SE jK1 (équivalent NaCl 3.5g/l)
- 4.1 ohm.m au SE jK2 (équivalent NaCl 1.5g/l)

L'examen des sondages électriques étalons P10, M11, et Q9 montrent l'existence d'un ensemble résistant, parfois recouvert d'un placage de limons conducteurs au-dessus d'un substratum conducteur.

Tableau. 2 corrélation entre lithologie et résistivité électrique des niveaux imprégnés d'eau.

		Niveaux imprégnés d'eau douce				substratum	
forage	SE	nature	Epaisseur (m)	Rt ($\Omega.m^2$)	Résistivité ($\Omega.m$)	Nature	résistivité ($\Omega.m$)
S10	P10	Sable grossier Graviers sables Fins limons	15m	1650	300 80	Argile pliocène	7
M11	M11	Sable grossier graviers	18.5m	2350	130	Argile pliocène	12
Q9	Q9	Sable avec Rares graviers	11.5m	1150	100	Sable à eau saumâtre	4

Ces étalonnages fournissent un ordre de grandeur de la porosité des formations aquifères par les relations suivantes:

$$\rho_t = F \rho_w \text{ et } F = 0.62/P^{2.15} \text{ (loi de Humble)}$$

Avec :

ρ_t : résistivité du terrain saturé ($\Omega.m$).

ρ_w : résistivité de l'eau d'imprégnation ($\Omega.m$).

F : facteur de formation.

P : porosité efficace en (%).

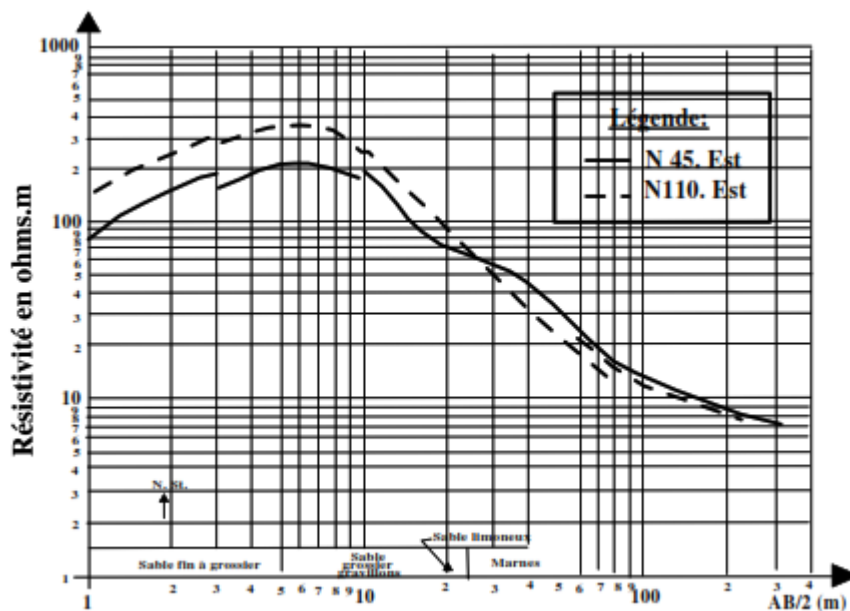


Fig. 16 Sondage électrique Etalon « P10 »

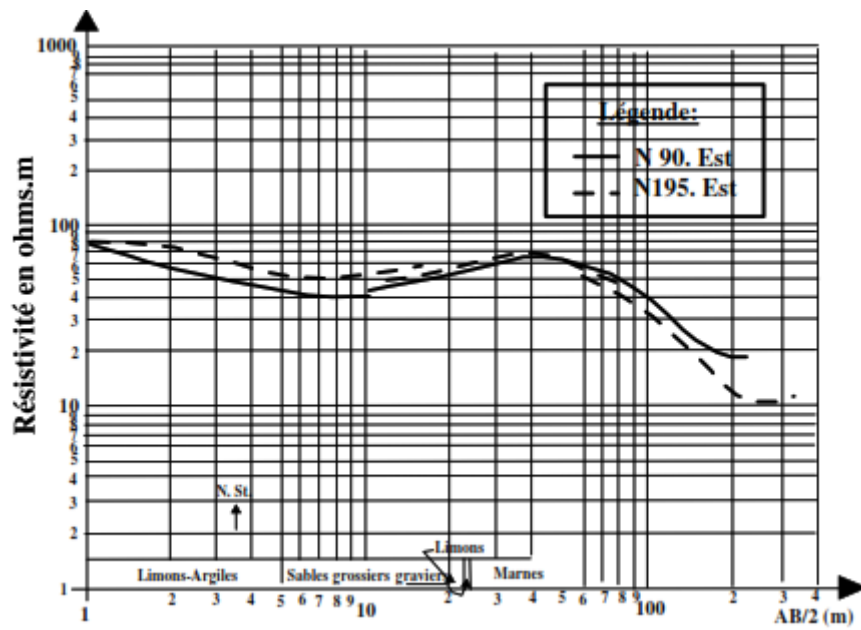


Fig. 17 Sondage électrique Etalon « M11 »

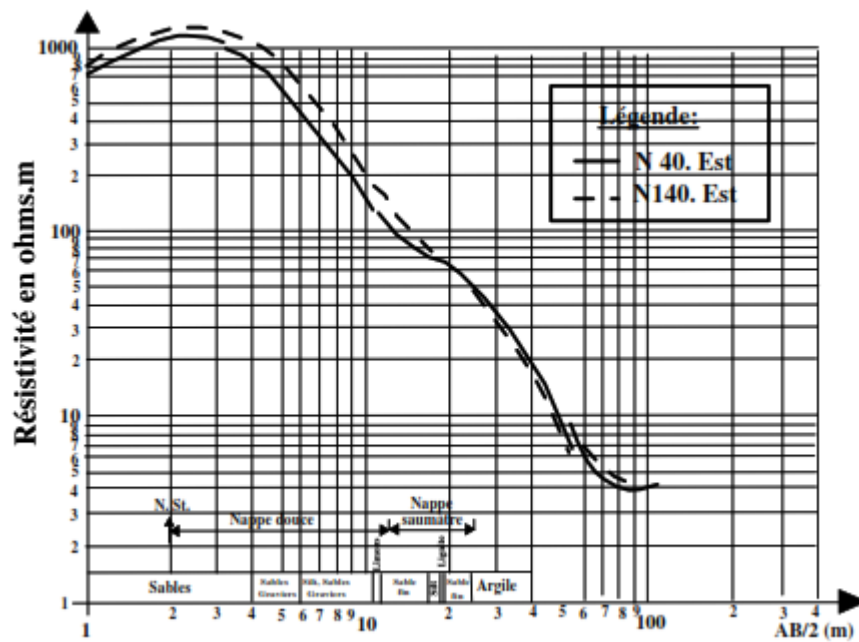


Fig. 18 Sondage électrique Etalon « Q9 »

Pour les trois forages étalons on obtient par l'application de la loi d'Humble les résultats suivants :

Tableau. 3 Ordre de grandeur pour les sondages électriques étalon

SE	ρ_t	ρ_w	F	P en %
P10	300	18.8	16	21.5
	80	18.8	4.25	41
M11	130	19.6	6.63	33
Q9	100	20	5	38

Etant donné la forte proportion de valeur de ρ_w comprise entre 80 et 120 ohm.m on peut adopter avec surestimation 30% comme porosité efficace à l'ensemble du massif de sables, gravier et limons littoraux.

Dans la plupart des sondages électriques de la zone située à l'aval de Koudiet Telezza, appartenant au sondage électrique étalon, surtout la partie amont de la vallée, les diagrammes montrent en général un recouvrement peu résistant correspondant aux limons semi-perméables, au-dessus des marnes conductrices.

Les dispositifs sismiques exécutés dans la vallée de l'Oued Aflassane ont permis la distinction entre un recouvrement lent (400 et 1500m/s) et un substratum rapide (3200 à 3800m/s) correspond aux roches métamorphiques seines.

Sur les diagrammes des sondages électriques, le recouvrement conducteur se distingue du substratum résistant par la faible résistivité permettant de supposer qu'ils sont essentiellement constitués de limons à passés sableux.

De l'examen de l'ensemble des diagrammes il ressort que le paramètre le plus représentatif de l'importance des niveaux imprégnés d'eau douce est constitué par leur résistance transversale produite, de leurs épaisseurs et de leur résistivité que nous allons examiner.

Nous avons représenté sur la figure (19) les diagrammes de profils "Y" qui illustre l'invasion marine dans les sables.

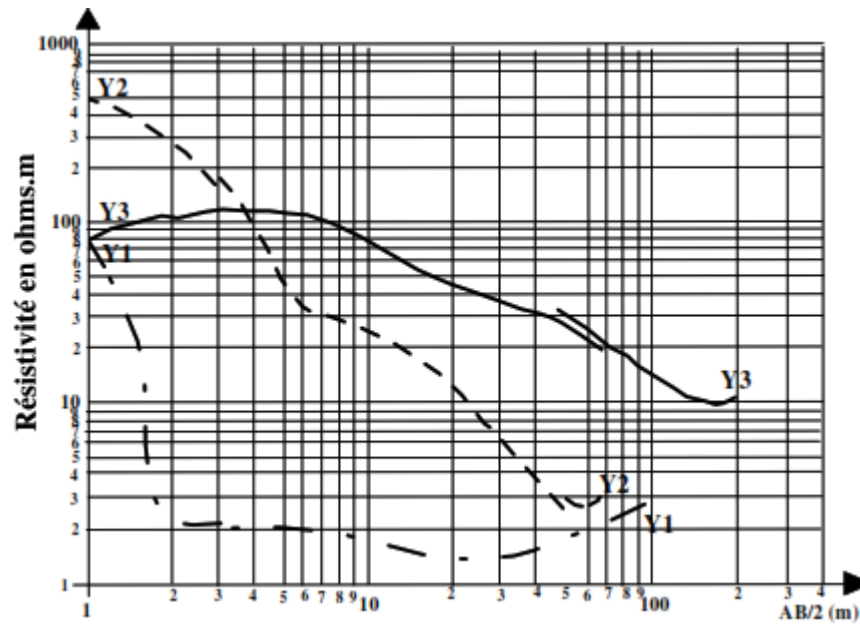


Fig. 19 Sondage électrique du profil « Y »

Au sondage électrique Y1 toute la formation de résistivité comprise entre 1 et 2 ohm.m et d'épaisseur voisine de 22 mètres, est salée. Au sondage électrique Y2, des sables secs (résistivité 500 ohm.m), surmontent un niveau à 30 ohm.m représentent les sables à eau saumâtre au dessus des sables salées à 20 ohm.m. Le sondage électrique Y3 marque la disparition complète de ces derniers: La nappe est entièrement douce.

5 Carte des résistances transversales (RT) : Fig. (20)

Dans la partie amont de la vallée, la résistance transversale du recouvrement est généralement inférieure à $500 \Omega.m^2$.

Toutefois, au débouché de l'Oued Guebli dans la plaine, immédiatement à l'Est de Kerkera, une plage de valeur supérieure à $1000 \Omega.m^2$ correspond apparemment au dépôt grossier d'un cône de déjection fossile au confluent des Oueds Guebli et Boutoute. Une zone des valeurs supérieures à $1000 \Omega.m^2$ met en évidence une nouvelle lentille de matériaux grossiers, elle croît à nouveau et les courbes dessinent un axe résistant orienté SE-NW s'étendant sur près de 3 Km.

Les valeurs maximales de l'ordre de $220 \Omega.m^2$, sont atteintes entre les sondages électriques LM2 et M11 correspondant aux dépôts littoraux de sable et graviers qui occupent ainsi la plus grande partie de la basse vallée de Guebli.

Vers le Sud la courbe $500 \Omega.m^2$ dessine leur limite avec les limons de la haute vallée.

Au Nord Vers la mer, les résistances transversales décroissent par suite de la diminution progressive de la granulométrie de l'ensemble et par l'apparition du biseau salé vers l'Est, les valeurs supérieures à 1000 $\Omega.m^2$ traduisent l'existence d'un cône de déjection de l'oued Lahmar.

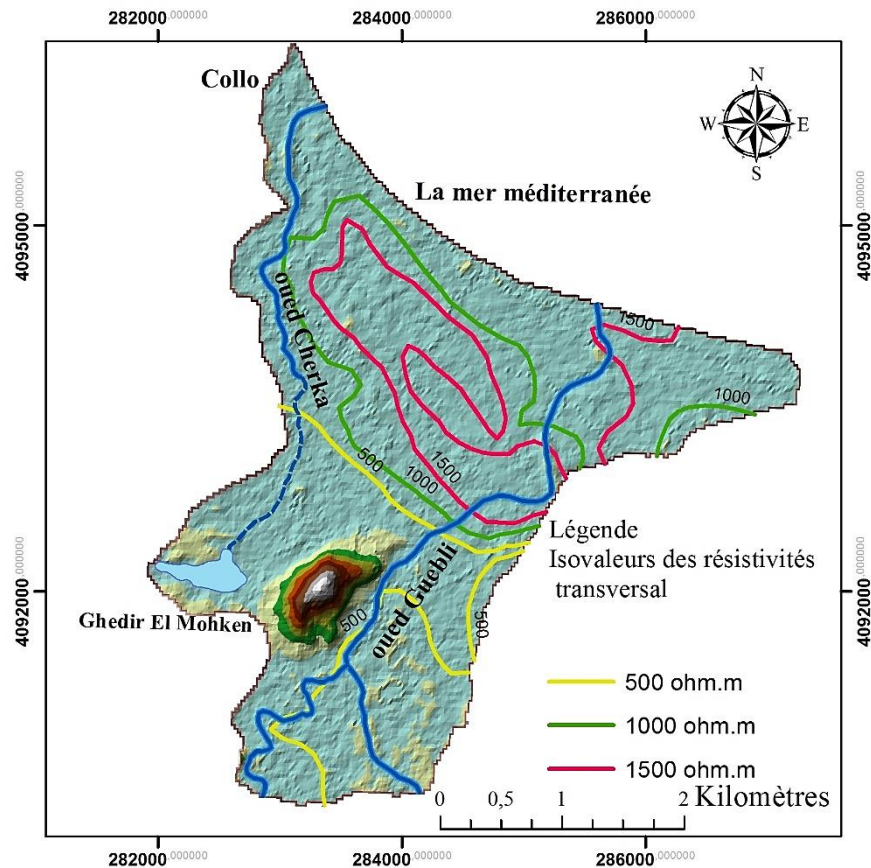


Fig. 20 Carte des résistivités transversales (CGG 1965)

6 Interprétation des coupes géo-électriques :

6.1 La coupe 1 : Fig. 21a

Orientée Est-ouest illustre l'invasion des sables et graviers par l'eau salée aux bordures d'Oued Cherka, l'afflux d'eau douce provenant du massif de Sud-est Repousse le front salé en rive gauche de l'oued.

Au sondage électrique M1, la résistivité des sables de l'ordre de $20 \Omega.m^2$ marque la zone mélange des nappes vers l'Est, l'accroissement de la résistivité des formations à eau douce traduit la disparition progressive des intercalations limoneuses.

6.2 La coupe 2 : Fig. 21b

Perpendiculaire à la précédente, intéresse l'ensemble de la zone des sables et graviers littoraux vers le Sud, elle fait apparaître sa limite avec les limons de la haute vallée.

6.3. La coupe 3 : Fig. 21c

D'orientation E-W en amont du Koudiet Telezza, donne les limites de la lentille résistantes, du confluent des Oueds Guebli et Boutoute.

6.4 La coupe 4 : Fig. 21d

Met en évidence les niveaux à 130-150 ohm.m représentent les dépôts grossiers du cône de déjection de l'Oued Guebli dans la plaine au voisinage de Kerkera.

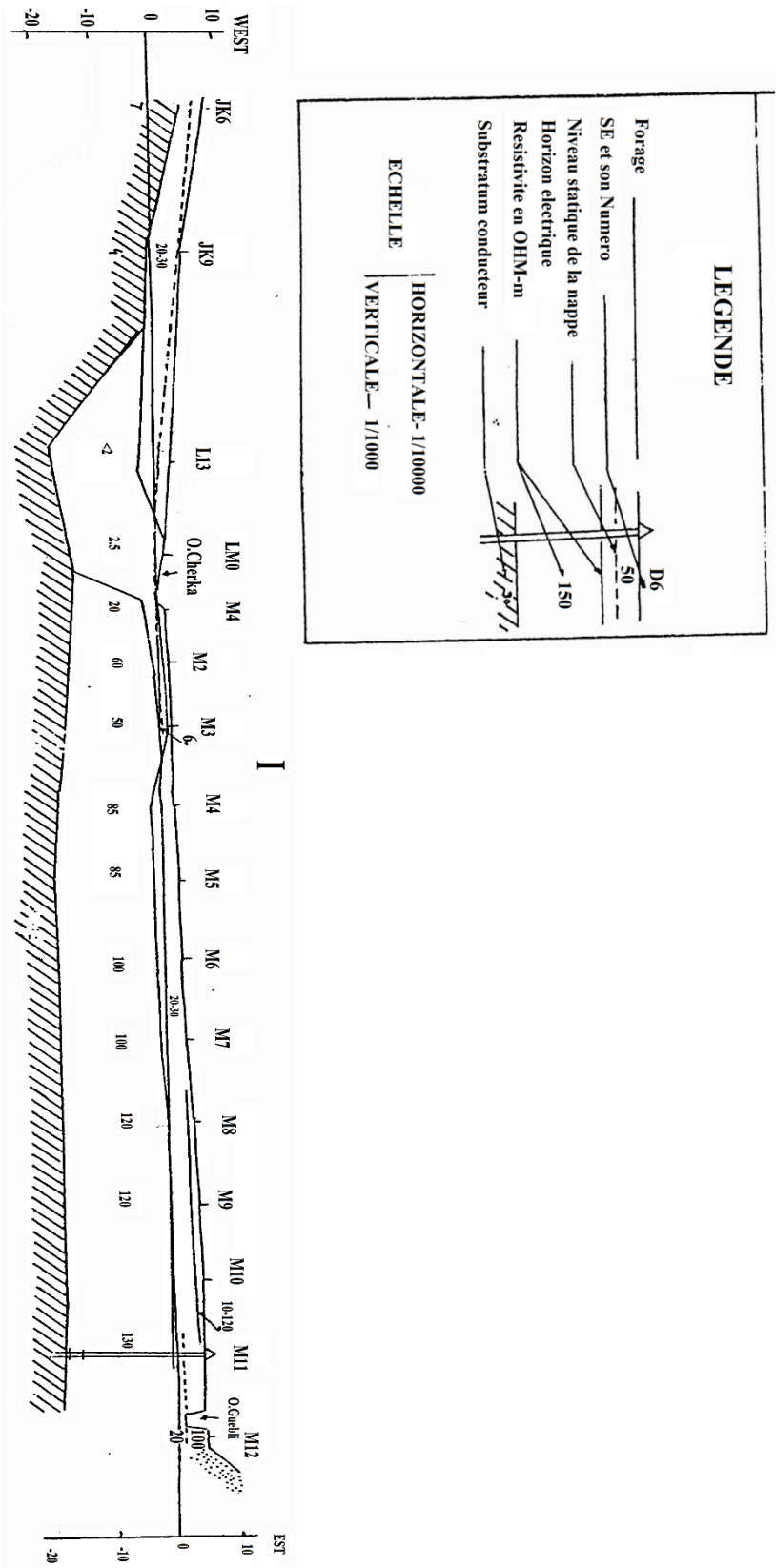


Fig. 21a coupe géoélectrique selon le tracé I-I

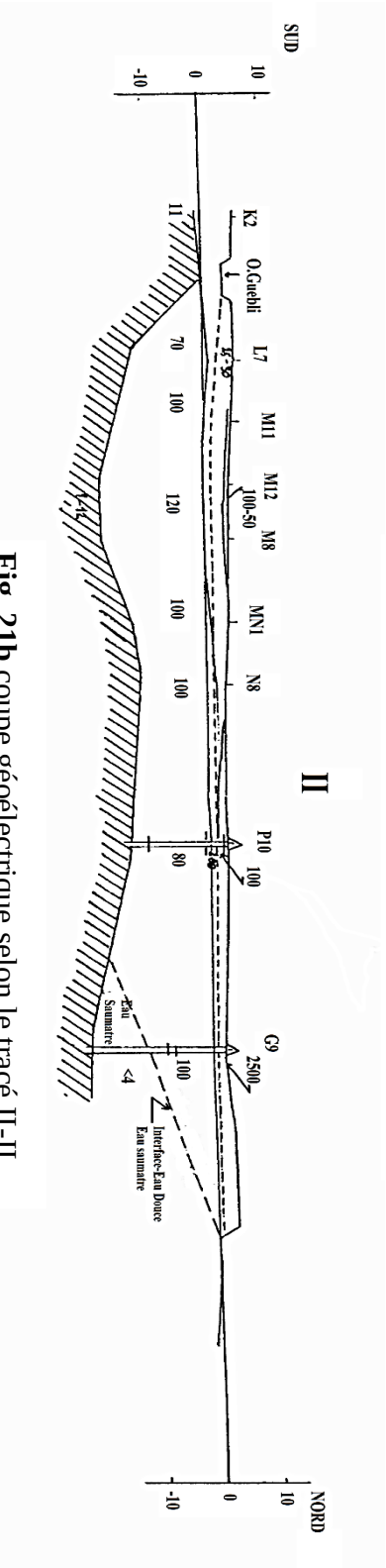
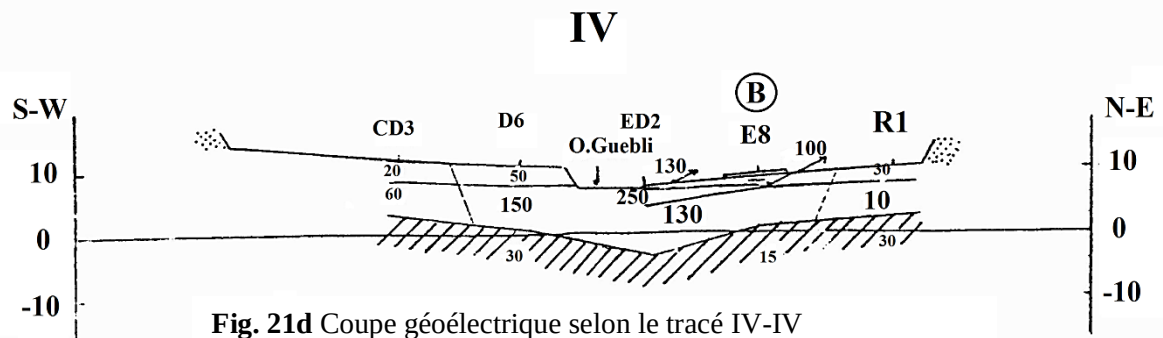
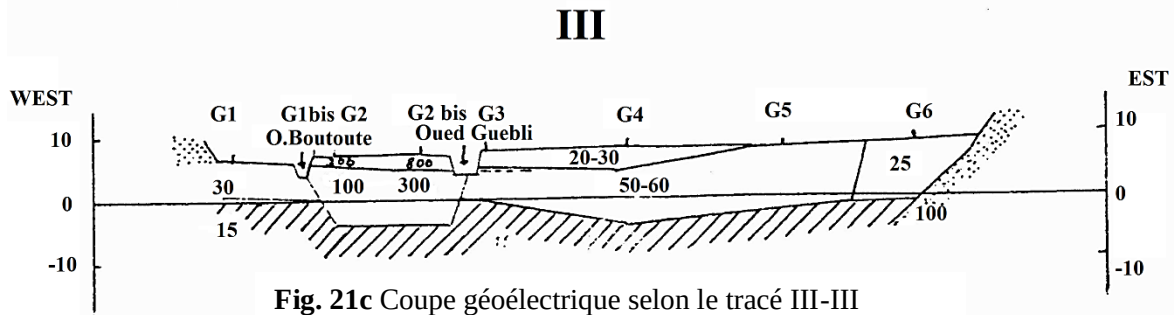


Fig. 21b coupe géoélectrique selon le tracé II-II



7 Approche hydrogéologique :

Les forages réalisés sur la zone d'étude nous ont permis d'identifier les principales formations hydrogéologiques (Tableau. 4)

Les forages exécutés dans la plaine ont traversé une alternance de sable, de graviers et galet avec passage argileux avant de pénétrer dans les marnes pliocènes qui constituent le substratum imperméable de la plaine. L'aquifère utile de la plaine de Collo est d'âge quaternaire de composition hétérogène et d'épaisseur variant entre 5 à 25 mètres au nord de Koudiet Telleza. La plaine de Collo comprend deux parties bien distinctes :

7.1 Au Sud de Koudiet Telezza : La plaine alluviale d'oueds Guebli et Boutotoute est large d'un (1) Kilomètre environ et creusée dans des massifs de gneiss et de micaschistes. Les dépôts fluviaux comprennent une majorité de limons argileux dans laquelle s'interstratifient les lentilles de sable et de graviers.

7.2 Au Nord de Koudiet Telezza: La plaine s'élargit considérablement, les collines qui la bordent à l'est sont en continuité avec le massif de gneiss, vers l'Ouest au contraire le massif s'intercale entre les granites de Collo et les formations récentes de la plaine.

Tableau. 4 Inventaire des forages avec colonne stratigraphique

Nom de forage	Coordonné		Profondeur (m)	Colonne stratigraphique
	X	Y		
Collo secour CS	845.400	413.585	35	0-5 m : Limon et limon sableux. 5-23 m : sable. 23-35 m : argiles grises
Benotto CB	845.425	413.375	24	0-4 m : Limon et limon sableux. 4-24 m : sable.
Ain aghbel AA	844.555	414.690	25	0-5 m : sable fin. 5-12 m : sable. 12-25 m : argiles grises
GR1	845.825	413.400	26	0-5 m : argile brune. 5-20 m : gravier et sable. 20-26 m : marnes
Talleza 1	842.900	414.500	35	0-7 m : argile. 7-20 m : gravier avec sable grossier. 20-22 m : gravier grossier. 22-24 m : gravier avec passage marneux. 24-35 m : marnes.
Talleza 2	843.200	414.750	35	0-6m : argile. 6-20 m : gravier fin et sable grossier. 20-24 m : gravier grossier. 24-35 m : marnes.

L'Oued Guebli se rapproche de la limite orientale de la vallée, cependant on note à l'ouest, l'Oued Cherka mal alimenté situé à une côte très faible provoquant une invasion marine en profondeur des terres par l'eau de mer.

Quelques formations de terrasses anciennes, des éboulis au pied des collines de gneiss, des cônes de déjection au débouché des petites vallées affluent complètement le schéma géomorphologique de la plaine.

Du point de vue hydrogéologique, il convient également de distinguer les deux tracés de la vallée dans la partie amont de la plaine alluviale, les limons ont une perméabilité faible ou nulle.

Dans la partie aval, les lentilles de sables et de graviers littoraux possèdent une perméabilité élevée qui diminue avec l'augmentation de la proportion de limons, la nappe

Qu'il renferme est alimentée en partie par leur impluvium propre, mais principalement par les apports de l'Oued Guebli.

8 Coupes hydrogéologiques:

Pour mieux comprendre le système aquifère de la plaine de Collo, deux coupes hydrogéologiques ont été réalisées (CGG 1967) de direction NW-SE et SSW-NNE complété par une troisième coupe de direction NE-SW (Boulabeiz M, 2015). Fig. 22.

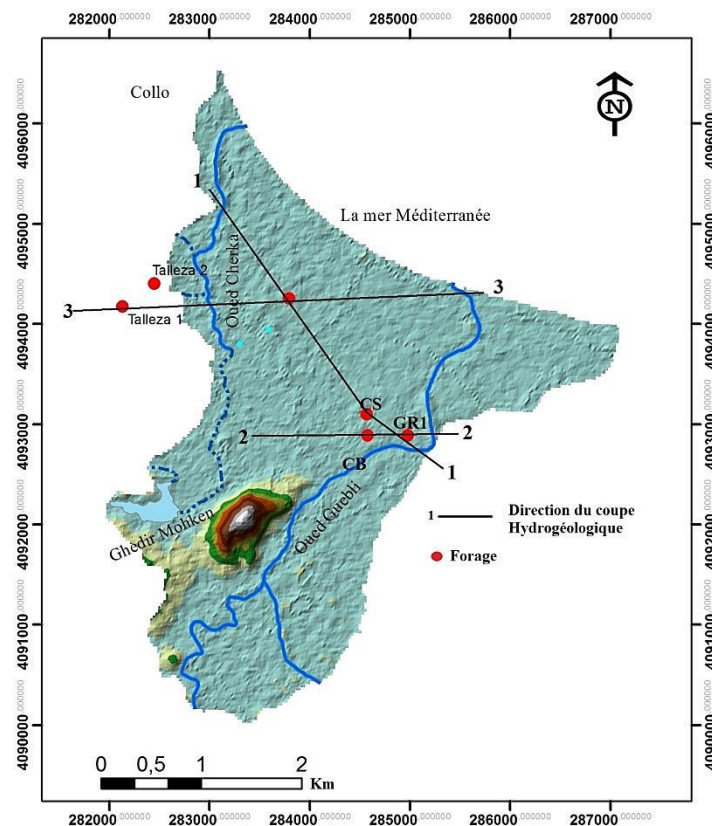
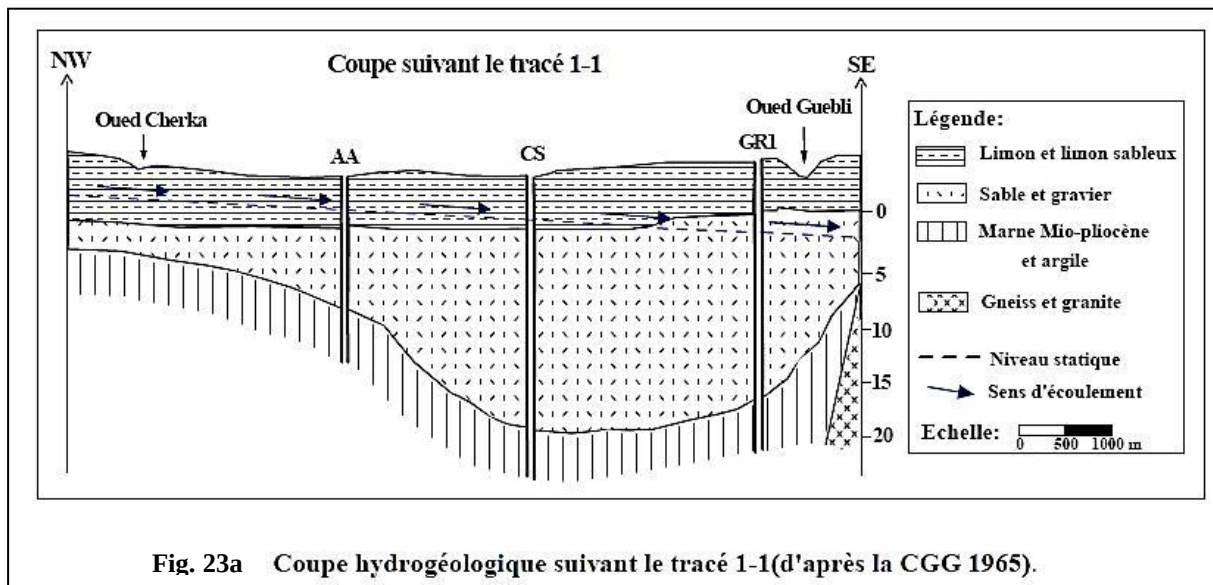
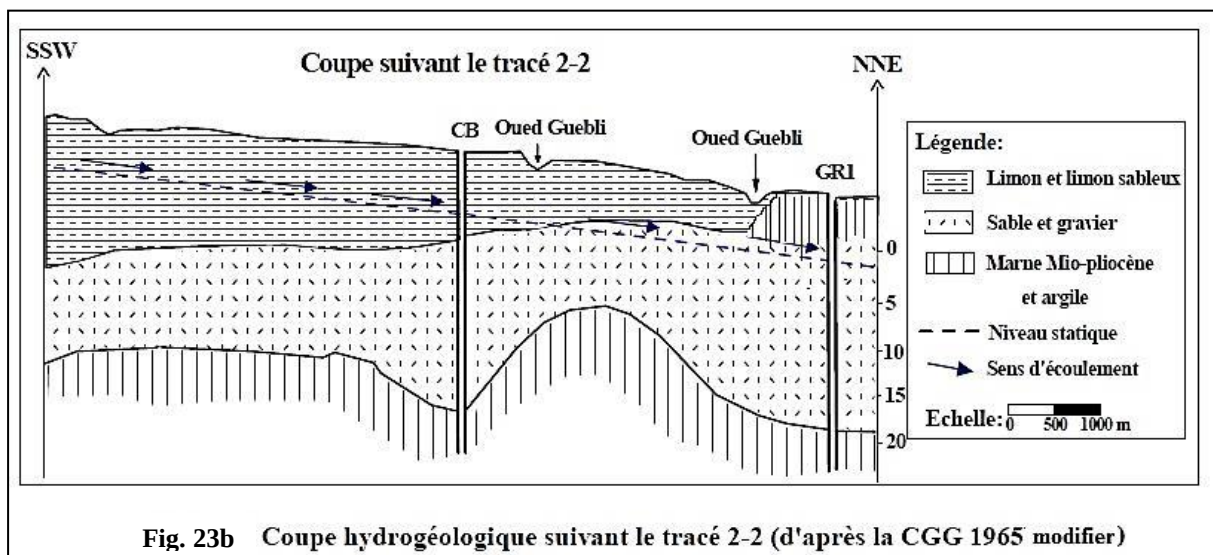


Fig. 22 Inventaires des forages avec direction des coupes hydrogéologiques

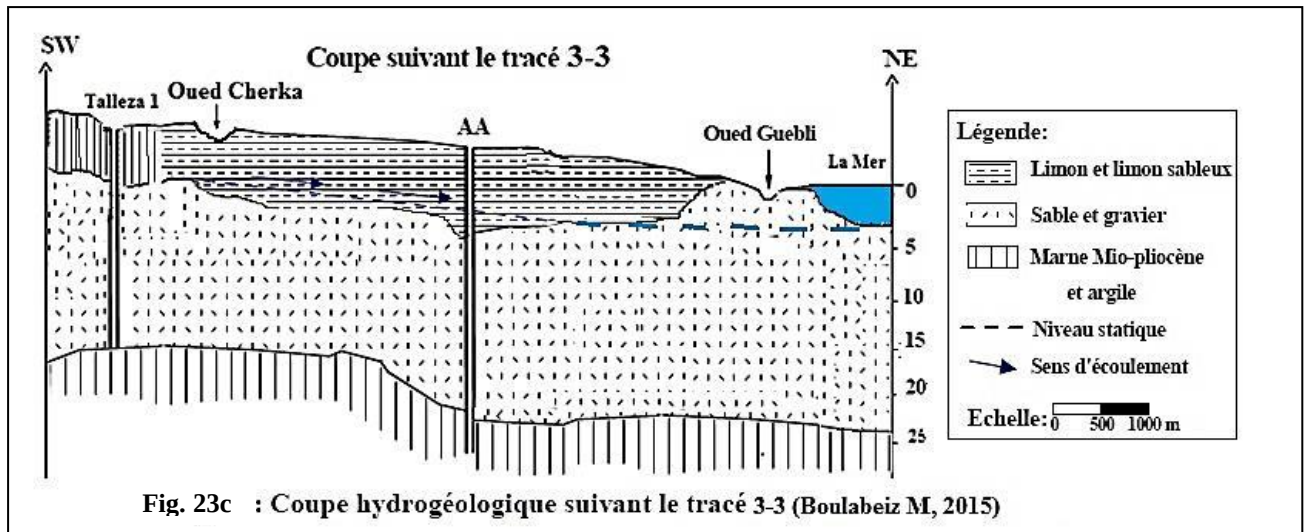
8.1 Coupe suivant le tracé 1-1 : Fig. 23a : Cette coupe traverse la nappe dans une direction NW-SE. Elle recoupe l'Oued Guebli, l'Oued Cherka et un certain nombre de forages (Ain Aghbel "AA", Collo Secours "CS" et GR1). On constate que l'épaisseur des alluvions (sables, graviers, et une mince couche de limons) atteint les 23 mètres, et qui diminue à 12 m en allant au nord-ouest, à cet endroit le toit du substratum (marnes et argiles) est inclinées de plus en plus vers le haut, et constitue le toit de la nappe captive à l'ouest de la plaine.



8.2 Coupe suivant le tracé 2-2 Fig.23b cette coupe traverse les deux forages GR1 et Collo Benito (CB). Le substratum marneux est surmonté par une couche de graviers et de sables ayant une épaisseur variant de 9 à 18 mètres. Cette couche est recouverte d'une autre limoneuse qui est mince (de 4 mètres) du côté du forage Collo Benoto et s'épaissit en allant vers le SSW où elle atteint les 13.5 mètres. Par contre le forage GR1 est couvert par une couche d'argile de 4 m d'épaisseur.



8.3 Coupe suivant le tracé 3-3 Fig. 23c : Cette coupe traverse les deux forages Ain Aghbel (AA) et Talleza 1. L'épaisseur du remplissage aquifère varie de 12 à 20 m. cette coupe montre une variation latérale de la lithologie du toit de la nappe, en allant vers le sud-ouest il devient argileux par contre en allant vers la mer il devient sableux.



9. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe de Collo :

Les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe de Collo sont calculées sur la base des essais par pompage des forages Ain Aghbel "FB" et GR1 de coordonnées

$X = 844.550$, $Y = 414.690$ et $X = 845.800$, $Y = 413.380$. (Fig. 23) (Boulabeiz. M 2006, Annexe)

9.1 Transmissivité : Fig. 24a

D'une façon générale, les transmissivités oscillent entre 5×10^{-2} et 10^{-5} m²/s avec une moyenne de 10^{-4} m²/s. La zone de forte transmissivité ($5,3 \cdot 10^{-2}$ et 10^{-2} m²/s) se localise au centre de la plaine en rive gauche de l'oued Guebli, et comportant la majorité des forages reconnus productifs, ceci coïncide avec la présence de forte épaisseur des formations graveleuses et sableuses. Fig. 18. En s'éloignant de cette zone la transmissivité diminue progressivement pour obtenir des valeurs très faibles $\approx 10^{-5}$ m²/s à l'ouest de Koudiet Telezza et au sud, correspondant à des formations marécageuses, limoneuses argileuses et marneuses.

9.2 Perméabilités : Fig. 24b

Dans la partie nord et centrale de la plaine la perméabilité varie entre 1.9×10^{-3} m/s et 0.5×10^{-5} m/s ce qui qualifie de forte perméabilité. Dans le sud et l'ouest de la plaine, la perméabilité est faible ($< 10^{-5}$ m/s).

Ces écarts importants de transmissivité et de perméabilité se rapportent à l'hétérogénéité latérale et verticale des faciès lithologiques dans l'aquifère.

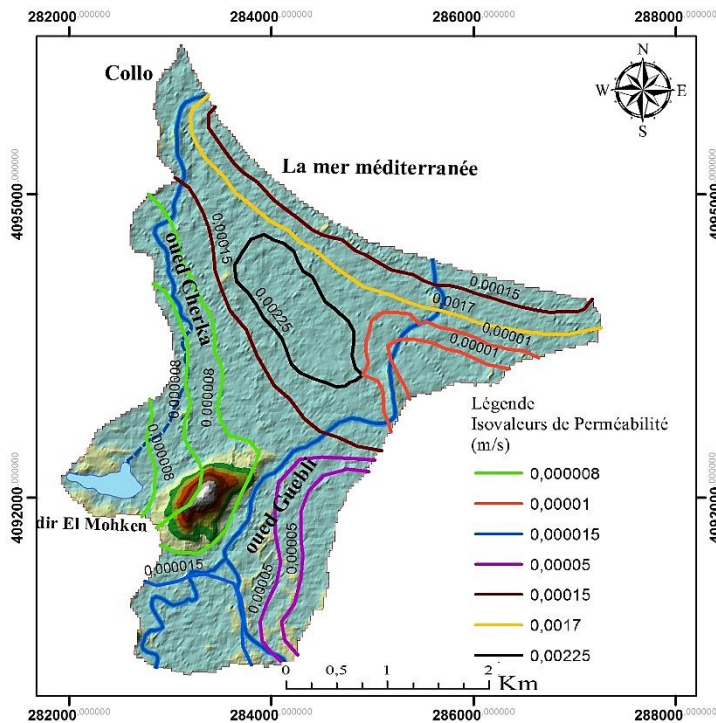


Fig. 24b Carte des perméabilités

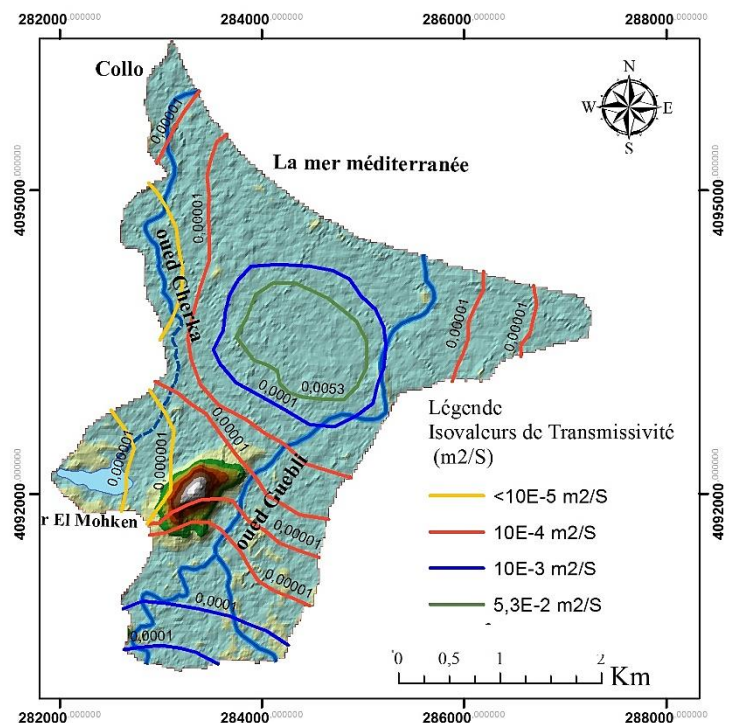


Fig. 24a Carte des transmissivités

10 Piézométrie

Le niveau piézométrique correspond au niveau atteint par l'eau d'une nappe souterraine en un point et à un instant donné. La piézométrie, quant à elle, est la mesure de la profondeur de la surface de la nappe.

Une carte piézométrique est une carte qui permet de visualiser les niveaux d'eau dans le sous-sol. Ces niveaux sont représentés par des courbes d'égale altitude, ou hydroisohypses, qui rejoignent les niveaux piézométriques identiques ; elles sont tracées grâce à des méthodes d'interpolations. Une carte piézométrique est donc une représentation spatiale des niveaux piézométriques. L'interprétation globale des cartes structurales et piézométriques conduit à l'identification des zones favorables à l'implantation des captages. Elle contribue également à la prescription des mesures de protection de la qualité des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine.

Plusieurs campagnes piézométriques ont été effectuées dans la zone d'étude (CGG, 1965 ; Belloulou, 1986 ; Boulabeiz et al, 2002 ; Boulabeiz 2006)

Dans le cadre de ce travail et pour réaliser la carte piézométrique (Fig. 25) on a sélectionné un réseau de 30 points d'eaux souterraines distribué régulièrement sur l'ensemble de la zone d'étude pendant la période des basses eaux (Novembre, 2015).

On remarque que les axes sont majoritairement orientés sud-nord, bien qu'au nord de la zone on retrouve 2 axes drainant du nord au sud (écoulement mer vers la nappe) ce qui n'est pas le cas avant.

Les zones de recharge de l'aquifère sont plus présentes dans la partie nord-ouest et centrale où le gradient hydraulique est plus fort que les autres régions. Dans la partie nord-est de la zone d'étude on remarque qu'oued el Guebli draine la nappe pendant cette période de basses eaux ce qui explique la salinité des masses d'eaux dans cette partie de la plaine.

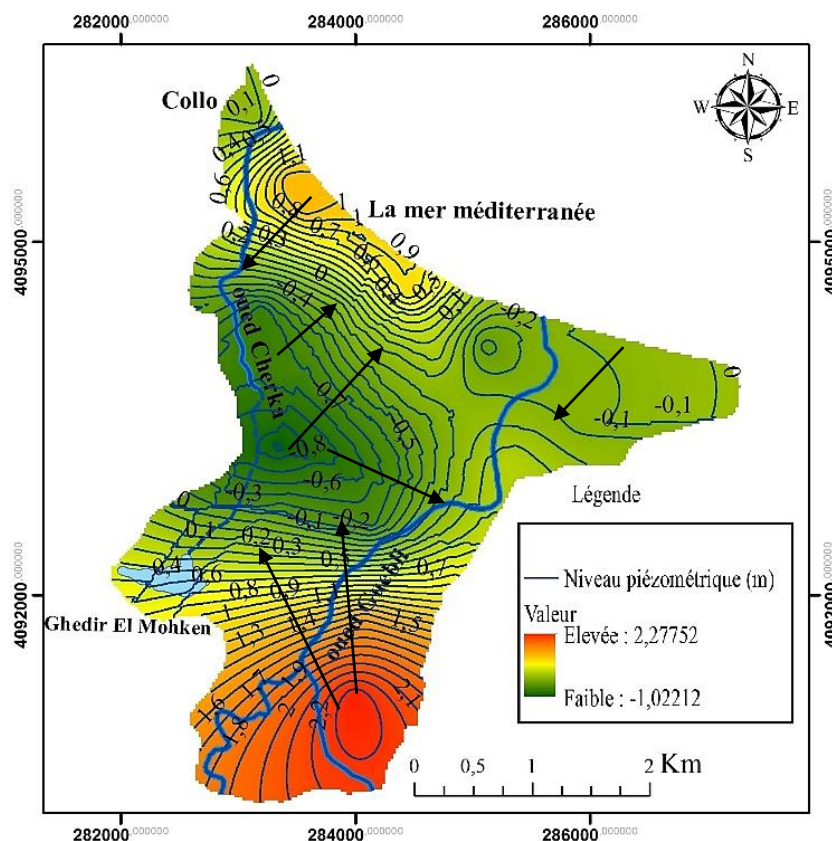


Fig. 25 : Carte piézométrique de la nappe de Collo (novembre 2015)

11 Conclusion :

L'étude hydrogéologique complétée par la géophysique ainsi que la géologie et les données de forages ont permis de schématiser la géométrie de l'aquifère alluvionnaire. Il s'agit d'un aquifère libre au nord devient captif à l'ouest et semi-captif au sud où l'épaisseur de couvertures limoneuses devient important. Le substratum de l'aquifère est essentiellement marneux de Mio-pliocène sur laquelle repose une couche de sable et gravier d'épaisseur environ 25 m au nord, qui constitue le principal réservoir de l'aquifère. La perméabilité est forte dans le nord et le centre de la plaine et faible à l'ouest et au sud, dû au changement de la granulométrie de la nappe. La carte piézométrique de la période des basses eaux (Nov. 2015) montre que l'écoulement est majoritairement sud nord.

Chapitre III

Hydroclimatologie

1 Introduction

Les données climatologiques sont nécessaires afin d'avoir une idée sur les mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux superficielles et souterraines, par une étude détaillée des précipitations, des températures, de l'évapotranspiration et du bilan hydrique global.

En réalité, il existe une interférence entre climats, composition des communautés propre à un écosystème donné et nature des sols, d'où la trilogie typique climat – sol – végétation. Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un point de la surface terrestre. Aussi, la bonne connaissance des conditions climatiques de la zone d'étude, et ses caractéristiques est importante pour la compréhension de l'évolution des éléments chimiques et du comportement hydrologique des cours d'eau. (Aissaoui. 2013).

Cette étude climatique débouchera sur un calcul de bilan en exploitant les données et en utilisant les méthodes adaptées à la région.

La plaine est caractérisée par un régime hydrographique très dynamique présenté par une principale Oued qui traverse la plaine de sud vers le nord et vient se jette à la mer c'est Oued Guébli, et le secondaire à l'ouest c'est Oued Cherka.

2 Caractéristiques géométriques du bassin versant de l'Oued El Guebli

2.1 Périmètre

Il est mesuré à partir de la carte topographique à l'aide d'un curvimètre, et soit de l'ordre de : $P = 77 \text{ km}$ ce qui correspond à **$P = 154 \text{ km}$** .

2.2 Superficie

La superficie du bassin versant est mesurée manuellement par planimétrie, elle indique l'aire du bassin versant délimiter des autres bassins limitrophes par la ligne de partage des eaux. Elle est d'environ $236,15 \text{ km}^2$ qui correspond à : **$A = 944 \text{ Km}^2$** .

2.3. Forme

Elle est tirée à l'aide de l'indice de compacité de Gravelius, donné par la formule suivante :

$$C = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Où : C : indice de compacité de Gravelius.

P : périmètre (en km).

À : superficie (en Km²).

Application numérique $C = 0.28 \frac{154 \text{Km}}{\sqrt{944.6 \text{Km}}} = 1.40$

D'après Gravelius, la forme du bassin versant de l'Oued Guebli est allongée (forme rectangulaire puisque l'indice de compacité $C > 1.128$). Ce qui permet de déterminer la largeur moyenne du bassin versant par le rapport de la superficie à la longueur du rectangle équivalent.

$$B = \frac{A}{L_e}$$

Soit :

B : largeur moyenne en (km).

À : Superficie En (Km²) = 944.6 Km².

L_e : Longueur du rectangle équivalent (km) = 60.74Km.

Application numérique : $B = \frac{944.6}{60.74} = 15.55 \text{km}$

Pour apprécier la forme, et les dimensions du bassin versant, on assimile ce dernier à un rectangle ayant la même superficie, le même périmètre et la compacité. Ce rectangle appelé rectangle équivalent. Il est caractérisé par sa longueur (L_e en km) calculée à l'aide de la formule suivant :

$$L_e = \frac{C\sqrt{A}}{1.128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{C} \right)^2} \right]$$

Avec :

L_e : Longueur du rectangle équivalent (km).

C : Indice de compacité de Gravelius.

À : Superficie (Km²).

Application numérique : $L_e = 60.74 \text{ km}$

3. Caractéristiques climatiques

Les données climatiques disponibles concernent les stations les plus proches (Barrage de Guenitra et Port de Skikda) situées parfois loin (30 à 40 km) des limites de la zone d'étude. Parmi ces deux stations, celle du port de Skikda qui se situe en bordure de la mer méditerranéenne et qui contient des données plus complètes que la station du barrage de Guenitra a été choisie pour cette étude climatologique.

Tableau 5 : Coordonnée géographique de la station de Skikda

Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période d'observation
Port de Skikda	6°54'25,24 "E	36°53'14,48"	10	1970-2014

Source : (Google Earth)

3.1 Les précipitations

Les précipitations constituent la source principale de l'eau dans le sol. Du point de vue météorologique (Dastane. 1977), ce sont l'ensemble des eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, grive...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression (Musy. 2005).

Toute étude climatologique nécessite une analyse de précipitation, car les précipitations sont évidemment le facteur essentiel des régimes hydrologiques puisqu'elles constituent la matière première des débits des cours d'eau et conditionnent l'écoulement saisonnier.

3.1.1. Les précipitations mensuelles et leurs variabilités

En se basant sur les données des précipitations recueillies à la station de Skikda (Port) durant 44 ans allant de 1970 à 2014. (Tableau 6, figure, 26)

Tableau 6 : Précipitation moyenne mensuelle enregistrée à la station de Skikda (Port) (1970-2014)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou
P (mm)	44.51	73.74	99.48	129.34	107.01	93.18	76.79	63.87	40.09	18.20	3.10	10.72

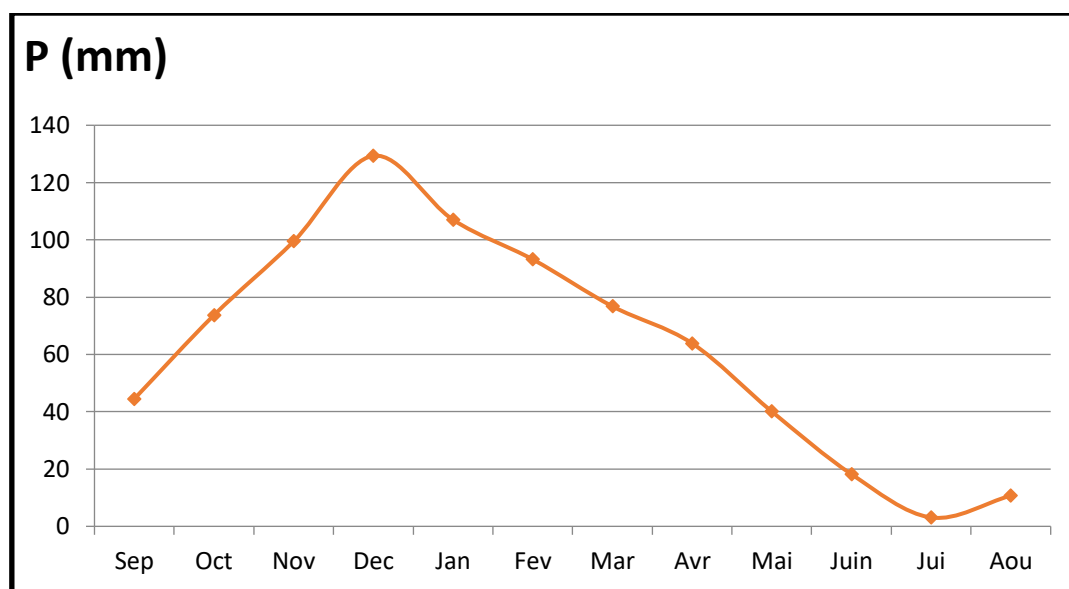


Fig. 26 Distribution des précipitations moyennes mensuelles à la station de Skikda (port) (1970-2014)

L'observation du tableau 6 et la figure 27, indique que le mois le plus arrosé est le mois de décembre avec une précipitation moyenne mensuelle de 129.34 mm par contre le mois le plus sec correspond au mois de juillet avec une précipitation moyenne mensuelle de l'ordre de 3.10mm.

3.2. La température

La température est un facteur important dans l'étude climatique, car elle agit directement sur le phénomène d'évapotranspiration et donc le déficit d'écoulement annuel et saisonnier.

La connaissance des températures est nécessaire pour déterminer leur incidence sur le choix des cultures.

3.2.1 Température moyenne mensuelle

L'analyse des données de la température est basée sur les mesures relevées au niveau de la station de Skikda (Port) de 1970 jusqu'à 2014. (Tableau 7, figure 27)

Tableau 7 : Température moyenne mensuelle à la station de Skikda (Port).
(1970-2014)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou
T (°C)	23.44	20.59	16.33	13.77	12.55	12.73	13.89	15.62	18.50	21.70	24.67	25.67

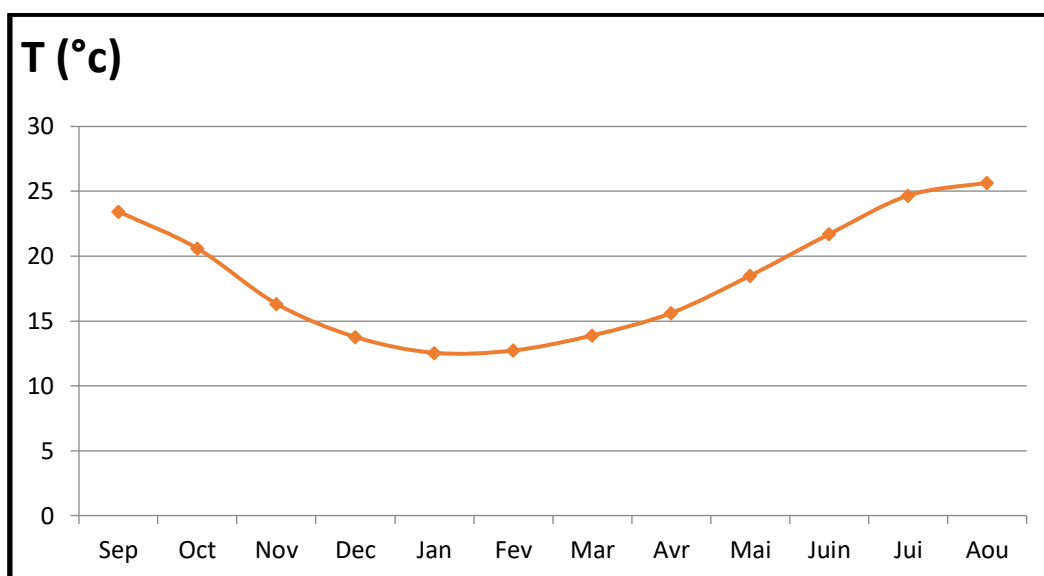


Fig. 27 Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Skikda (1970-2014)

L'examen des valeurs du tableau n°04 montre que le mois le plus froid est janvier avec 12.55°C, tandis que le mois le plus chaud est aout avec 25.67°C.

3.3 L'humidité relative de l'air

L'humidité est un facteur qui conditionne d'évaporation, elle influence sur les conditions de développement de la végétation et par conséquent sur la nature de l'écoulement de surface (Eliard. 1987). Les échanges de vapeur d'eau des couverts végétaux dépendent en premier lieu de l'humidité de l'air atmosphérique (Crétinon. 1994).

Tableau 8 : Variations mensuelles de l'humidité relative de l'air à la station de Skikda (Port).
(1970-2014)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou
Humidité relative (%)	74.50	72.60	73.80	74.30	74.60	73.90	74.10	74.10	75.30	74.00	72.30	73.60

À partir du tableau on constate que les valeurs de l'humidité sont relativement homogènes, les moyennes mensuelles varient entre 72.30% et 75.30%.

3.4 Les vents

L'existence de hautes et de basses pressions est à l'origine du vent, on le caractérise par sa direction et la vitesse de sa composante horizontale (Vilain. 1987). Le vent est l'un des éléments les plus caractéristiques du climat, la connaissance de sa direction importante, et le plus déterminant des régimes pluviaux, il influence l'agriculture de façon directe et non négligeable (Parceveaux. 1990).

Tableau 9 : Variations mensuelles des vitesses moyennes du vent à la station de Skikda (Port). (1970-2014)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Moyenne
Vent (m/s)	2.77	2.88	3.35	3.53	3.45	3.64	3.07	3.09	2.67	2.75	2.73	2.71	3.05

3.5 L'évaporation

L'évaporation se traduit par la transformation de l'eau liquide existant dans le sol en vapeur d'eau, elle dépend généralement de la température ambiante, de la quantité de l'eau initialement présente dans le sol, de la pression et des mouvements de l'air et des vents. La capacité de l'air nécessaire à accroître la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère détermine le pouvoir évaporant (Vilian. 1987).

4. Le diagramme ombrothermique

Il constitue un type de représentation très utilisé pour comparer les climats, en considérant qu'un mois est sec quand le total des précipitations exprimées en mm est égal ou inférieur au double de la température exprimée en degrés Celsius. Les périodes d'aridités sont celles durant lesquelles la courbe pluviométrique est au-dessous de la courbe thermique. Selon l'échelle ($P=2T$), les courbes ombrothermiques déterminent deux périodes, l'une humide, l'autre sèche.

Le rythme climatique est résumé graphiquement dans la figure 28.

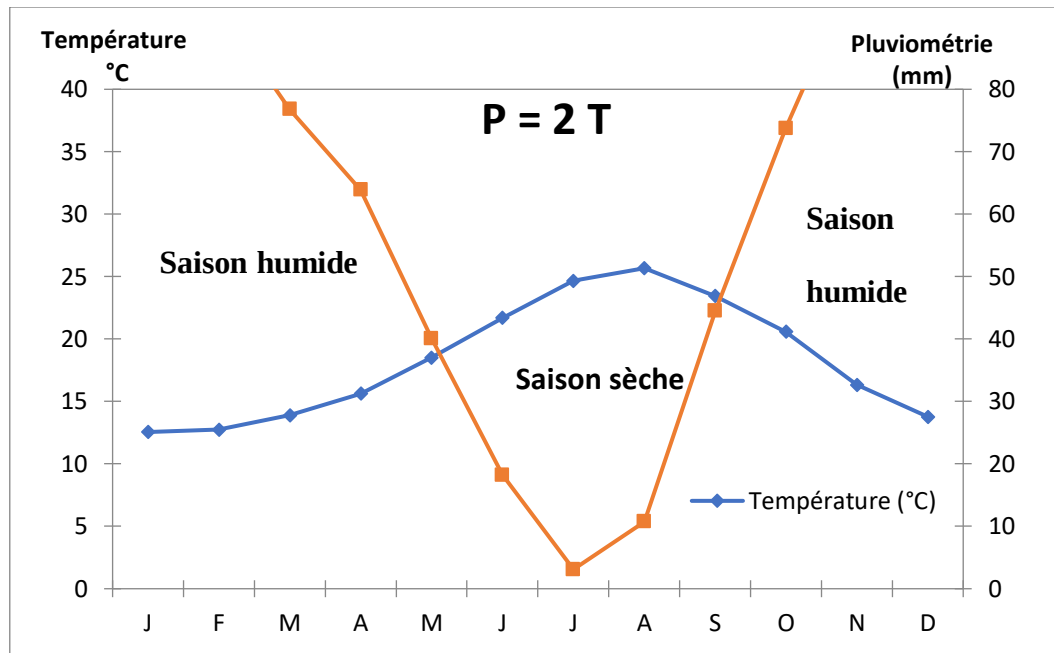


Fig. 28 Diagramme pluviothermique à la station de Skikda (Port). (1970-2014)

D'après le diagramme pluviothermique de la station de Skikda (Port), qui résulte de la combinaison des températures et des précipitations mensuelles moyennes, on distingue deux périodes :

- L'une humide et froide qui s'étale du mois de septembre jusqu'au mois de mai ;
- Et la deuxième sèche et chaude, elle s'étale du mois de juin jusqu'au mois d'août.

5 Classification du climat

Pour restituer le caractère global du climat d'un lieu, on utilise des indices ou des représentations graphiques pour les éléments climatiques considérés comme déterminants. Les indices climatiques sont plus adaptés pour caractériser le climat général (Vilian. 1987).

5.1. Classification du climat selon l'indice de MARTON

Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température. Il permet de connaître le degré de sécheresse de la région selon la formule suivante :

$$I = P / (T + 10)$$

Avec :

- **P** : précipitations annuelles moyenne de la région en (mm/an) ;
- **T** : température annuelle moyenne en (°C).

Tableau 10 : Classification du climat selon l'indice de MARTON

Valeur de I	Type de climat	Irrigation
$I < 5$	Désertique	Indispensable
$5 < I < 10$	Très sec	Indispensable
$10 < I < 20$	Sec	Souvent indispensable
$20 < I < 30$	Relativement humide	Par fois utile
$I > 30$	Humide	Inutile

Pour la station de Skikda : $I = 26.85$

Suite aux calculs de l'indice et d'après la classification précédente, notre zone d'étude a un climat : Relativement humide.

6. Le bilan hydrique

Par définition, l'irrigation doit apporter aux plantes le complément d'eau qui est nécessaire et que les pluies ou la réserve du sol ne peuvent satisfaire. Les besoins des plantes ne sont constants dans le temps, il y a une sensibilité particulière au déficit en eau à certaines périodes de leur cycle végétatif. Les besoins en eau d'irrigation représentent le volume et la fréquence des applications d'eau nécessaire pour compenser les déficits en eau du sol pendant le cycle végétatif de la culture.

Le calcul des volumes d'eau à apporter par irrigation et par mois, se fait par période en dressant le bilan hydrique. Les variables qui composent un bilan hydrique se présentent comme suit :

- Les besoins en eau maximum de chaque culture ETM ;
- La pluie efficace P_e ;
- La fraction de la réserve facilement utilisable du sol RFU ;
- La contribution effective de l'eau du sous-sol apporté à la zone racinaire des plantes par la nappe phréatique (Dorenbos et Pruitt. 1976).

6.1 L'évapotranspiration (ET)

C'est la perte totale d'eau sous forme de vapeur, d'une culture par évaporation et transpiration, pendant un intervalle de temps donné, cette perte comprend l'évaporation de l'eau du sol, ainsi que la transpiration des plantes, cette quantité est généralement exprimée

par unité de surface et par unité de temps, en mm ou m/ha/jour, par mois et par m (Perrier. 1984).

6.2 L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Des différentes parties du cycle de l'eau, l'évapotranspiration est le point le plus délicat à évaluer. Contrairement aux pluies ou aux écoulements qui peuvent faire l'objet d'une approche quantitative satisfaisante, bien que peu précise, il est actuellement très difficile de mesurer directement le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

L'évapotranspiration dépend de nombreux facteurs :

- température du sol, de l'air et de l'eau ;
- hygrométrie de l'air ;
- état et quantité d'eau contenue dans le sol ;
- rayonnement solaire ;
- vent et pression atmosphérique ;
- nature et état de la végétation ;
- topographie et exposition.

L'évapotranspiration potentielle ETP est la quantité d'eau théoriquement évaporable par une surface d'eau libre.

6.3 Calcul de l'ETP

L'ETP peut être évaluée à l'aide de nombreuses formules (Thornthwaite, Turc, Primault, Penman, ...)

6.3.1 Formule de Thornthwaite

Cette formule est proposée par C.W. Thornthwaite (1948) :

$$ETP = 16 (10T / I)^a \cdot K \text{ (mm)}$$

Avec :

- **ETP** : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm) ;
- **I**: indice thermique annuel $I = \sum_{i=1}^{12} i$ avec $i = (t/5)^{1.514}$;
- **T**:température moyenne mensuelle (°C) ;
- **a** (coefficient fonction de I) : $a = (0.016 I + 0.5)$;
- **K** : facteur de correction fonction de la durée d'ensoleillement.

I= 87.6 et a=1.90 donc ETP = 885,7mm.

6.3.2 L'évapotranspiration réelle (ETR) selon la formule de Turc

$$ETR = P / \sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}$$

Avec :

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3.$$

ETR : évapotranspiration réelle (mm) ;

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

L : paramètre arbitraire lié à la température ;

T : température moyenne annuelle (°C).

Application numérique :

Tableau 11 : L'ETR selon la méthode de Turc à la station de Skikda (Port).
(1970-2014)

Station	P (mm)	L	T (°C)	ETR (mm/an)
Port de Skikda	760.00	1063.92	18.30	639.97

6.3.3 L'ETR selon la formule de Thornthwaite

Si : P < ETP, alors : - suffisant : ETR = P;

- insuffisant : ETR = P+RFU (du mois précédent).

Si : P > ETP, alors : ETR = ETP.

Tableau 12 : Comparaison des valeurs de l'ETR calculées par les deux méthodes (Turc et Thornthwaite) (Port de Skikda 1970-2014)

Station	ETR : Turc (Mm/an)	ETR du bilan de Thornthwaite (mm/an)
Port de Skikda	639.97	513.6

Les valeurs de tableau ci-dessus sont variables selon chaque méthode de calcul et pour ce là la station météorologique de Skikda (Port) a une évapotranspiration réelle moyenne de l'ordre de 576.78 mm/an.

6.4 L'estimation de la réserve facilement utilisable (RFU)

C'est la quantité d'eau disponible dans le sol. Cette quantité d'eau est comprise entre 0 (réserve superficielle vide) pendant l'étiage et une valeur maximale appelée réserve en eau facilement utilisable (RFU ou RUMax).

Le volume de cette réserve est évidemment lié à la porosité et à l'épaisseur du sol.
(Eric, Christian, Jacques. 2008).

Selon G. Gastanoy : $RFU = (P - ETP) + RFU$ (du mois précédent).

Tous les résultats sont mentionnés dans le tableau 13 ; figure 29 et figure 30.

Tableau 13 : Bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwaite à la station de Skikda
(1970-2014)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Total
P (mm)	44.51	73.74	99.48	129.34	107.01	93.18	76.79	63.87	40.09	18.20	3.10	10.72	760.0
T (°c)	23.44	20.59	16.33	13.77	12.55	12.73	13.89	15.62	18.50	21.70	24.67	25.67	18.30
K	1.04	0.98	0.85	0.84	0.86	0.85	1.03	1.9	1.21	1.21	1.23	1.16	/
i	10.04	8.5	6	4.6	4	4.1	4.7	5.6	7.2	9.2	11.2	11.9	87.6
ETP (mm)	107.8	79.9	44.5	31.7	27.4	27.8	39.6	52.2	80.5	109	141.4	143.9	885.7
ETR (mm)	44.5	73.7	44.5	31.7	27.4	27.8	39.6	52.2	80.5	77.8	3.1	10.7	513.6
RFU (mm)	00	00	55	100	100	100	100	100	59.6	00	00	00	/
DA (mm)	63.2	6.2	00	00	00	00	00	00	00	31.2	138.3	133.2	372.1
EXC (mm)	00	00	00	52.6	79.6	65.4	37.2	11.7	00	00	00	00	246.4

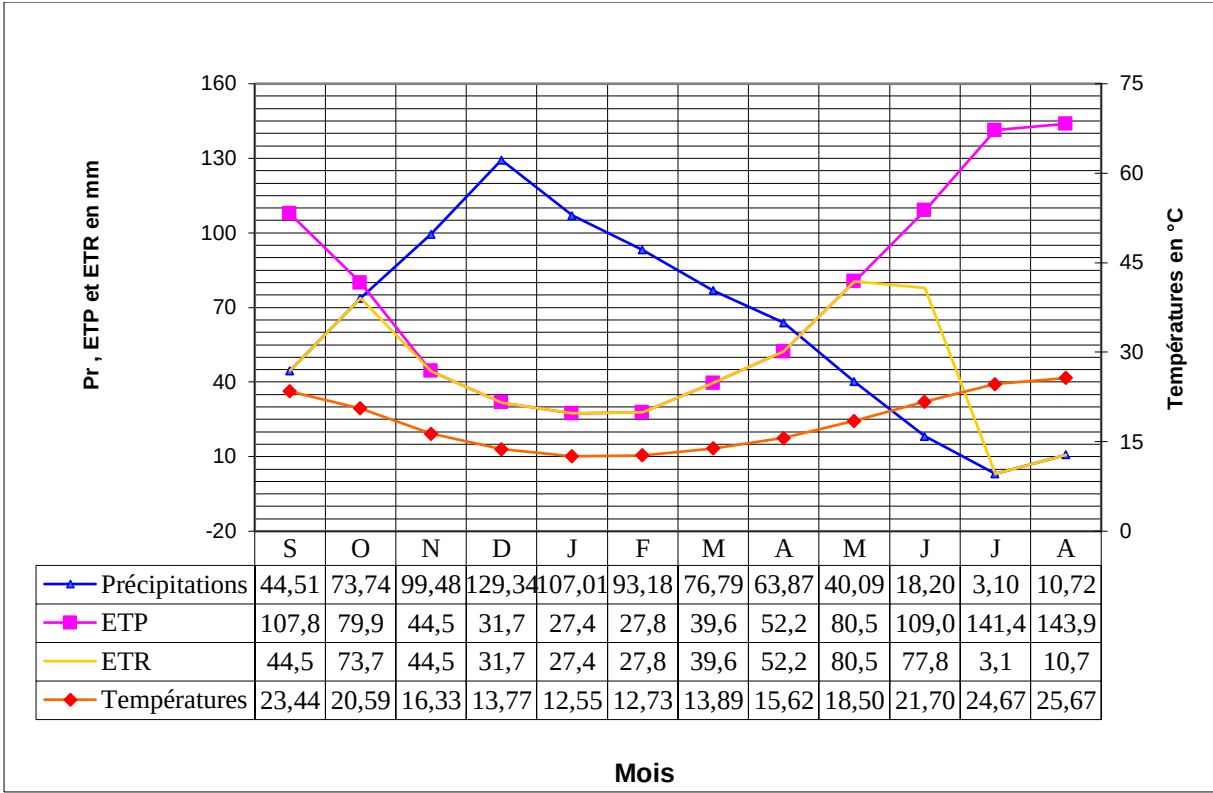


Fig. 29 Variations mensuelles des éléments climatiques du bilan hydrique

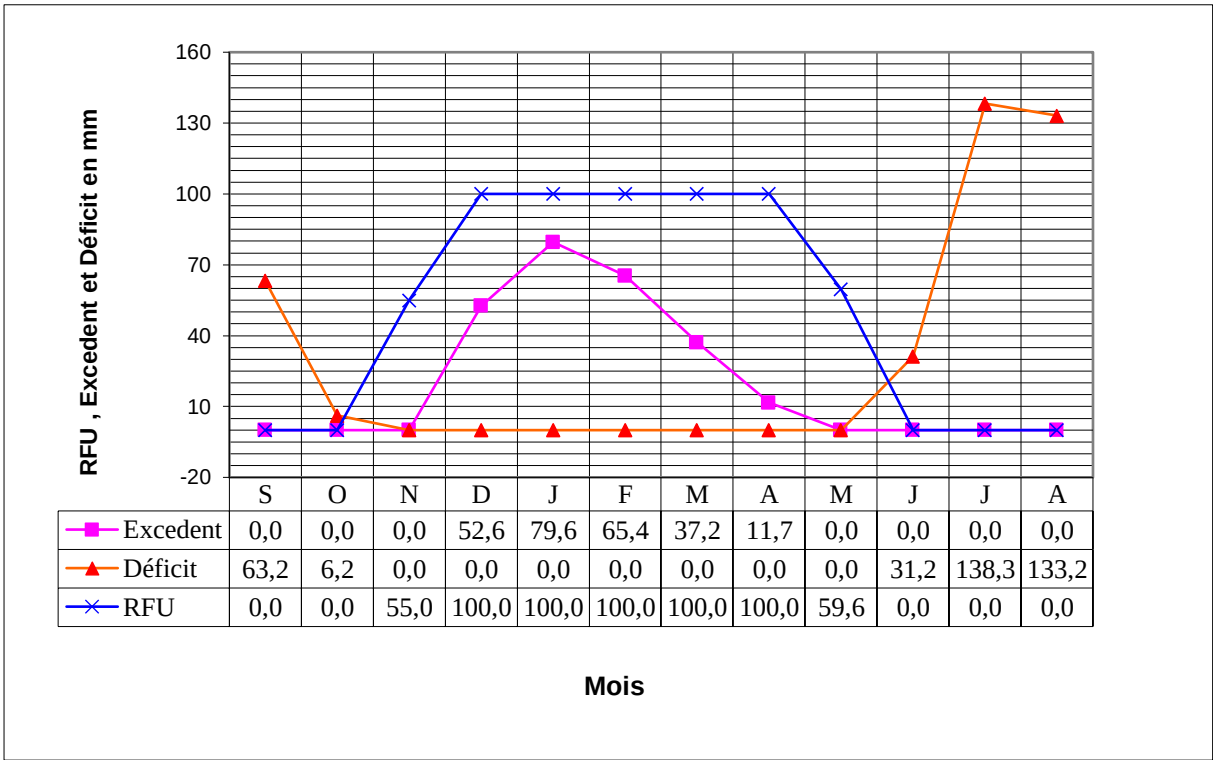


Fig. 30 Variations mensuelles des résultats du bilan hydrique

6.5 L'interprétation du bilan hydrique de Thornthwaite

La région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 760mm et une température moyenne annuelle de 18.30 °C.

□ L'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint son maximum au mois de juillet (143.9 mm) et son minimum au mois de janvier (27,4 mm). L'ETP total est de l'ordre de 885.7 mm.

□ L'Évapotranspiration réelle (ETR) totale est de 513.6 mm.

□ Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est pleine, il y a un surplus d'eau accompagné par un ruissèlement et quand elle a tendance à diminuer et au point qu'il sera carrément vide, il y aura un épuisement du stock et par conséquent un déficit agricole s'étalant du mois de juin jusqu'au mois d'octobre avec une moyenne annuelle de 372.1 mm.

□ La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (55 mm). Elle atteint son maximum (saturation : 100 mm) au mois de décembre et reste ainsi jusqu'au mois d'avril puis elle commence à s'épuiser pour se vider complètement au mois de juin ou il devient nul.

□ L'écoulement débute après le remplissage de la RFU (100 mm), au mois de décembre et se termine à la fin du mois d'avril avec un maximum au mois de janvier (79.6 mm) et un minimum au mois d'avril de l'ordre de 11,7 mm.

□ L'excédent annuel est égal à 246.4 mm.

6.5.1 Ruissèlement

Estimer à partir de la formule de Tixeront Berkallof qui est la suivante :

$$R = P^3 / 3 \cdot (ETP)^2$$

Avec :

R : ruissellement en mm ;

P : précipitation moyenne annuelle en mm ;

ETP : évapotranspiration potentielle en mm/an.

Application numérique :

Tableau 14 : Résultats des calculs de ruissèlement par la formule de Tixeront Berkallof

Paramètre	P (mm)	ETP (mm/an)	R (mm)	R (%)
Résultats	760.0	885.7	186.53	24.54

6.5.2 L'infiltration efficace

Exprimer par la formule suivante :

$$P = ETR + R + Ie \quad \Longrightarrow \quad Ie = P - (ETR + R)$$

Avec **P** : précipitation moyenne annuelle en (mm) ;

ETR : évapotranspiration réelle en (mm/an) ;

Ie : infiltration efficace en (mm/an) ;

R : ruissellement en (mm).

Application numérique :

Tableau 15 : Résultats des calculs de l'infiltration efficace

Paramètres	P (mm/an)	ETR(mm/an)	R (mm/an)	Ie (mm/an)	Ie (%)
Résultats	760.0	513.6	186.53	59.87	7.87

L'infiltration efficace est de l'ordre de 59.87 mm/an ce qui représente 7.87 % des précipitations.

7 Conclusion

Notre zone d'étude est typique tempéré de type méditerranéen, elle est considérée comme étant la région la plus arrosée en Algérie. (Boulabeiz. 2006). Le climat de la région est subhumide avec un hiver pluvieux et froid et un été sec et chaud. La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 760 mm/an. La variation de la température durant les années se fait d'une manière progressive avec une moyenne de 18.30°C.

Le bilan hydrique et l'estimation de ses paramètres nous ont permis de ressortir les résultats présentés dans le tableau 16.

Tableau 16 : Les résultats du bilan hydrique

Les paramètres	Les valeurs
P : précipitation moyenne annuelle	760 mm/an
T : température moyenne annuelle	18.30°C
ETP : évapotranspiration potentielle	885.7 mm/an
ETR : évapotranspiration réelle	513.6 mm/an
EXC : excédent	246.4 mm/an
DA : déficit agricole	372.1 mm/an
R : ruissèlement	24.54 %
Ie : infiltration efficace	7.87 %

CHAPITRE IV
Revue de littérature

1 Introduction

Les eaux souterraines représentent une importante ressource exploitée pour la consommation humaine et pour l'utilisation dans les domaines agricoles et industriels. Ces eaux sont souvent menacées par la contamination par des polluants de différente nature : biologique, chimique ou physique. Ces polluants peuvent faire leur chemin vers le bas dans la nappe phréatique. Le mouvement de l'eau et de la dispersion dans l'aquifère propage les polluants sur une zone plus large. Cependant, l'eau de recharge provoque une dilution des polluants qui pourrait être partiellement ou totalement atténuée ou éliminée par le biais de leur résidence dans le sous-sol.

En outre, il existe différents processus qui contrôlent le comportement des polluants aux subsurface et dépendent de milieux poreux et les propriétés des polluants. Par conséquent, le système hydrogéologique joue un rôle important dans le transport et la transformation des polluants des eaux souterraines. La Pollution ou la contamination des eaux souterraines est définie comme tout changement défavorable dans la qualité des eaux souterraines. Ces changements nuisent à la qualité de l'eau dans la mesure où il ne répond pas aux normes standards environnementales et de la santé. Ces changements indésirables de la qualité des eaux souterraines proviennent d'activités humaines (anthropogéniques).

Selon le dictionnaire environnement et développement durable la pollution de l'eau est définie comme une altération de sa qualité et de sa nature qui rend son utilisation dangereuse et (ou) perturbe l'écosystème aquatique. Elle peut concerner les eaux superficielles (rivières, plans d'eau) et/ou les eaux souterraines. La pollution de l'eau a pour origines principales, l'activité humaine, les industries, l'agriculture et les décharges de déchets domestiques et industriels.

La pollution de l'eau se manifeste principalement, dans les eaux de surface, par :

- **Une diminution de la teneur en oxygène dissout** : les matières organiques, essentielles à la vie aquatique en tant que nourriture, peuvent devenir un élément perturbateur quand leur quantité est trop importante. Parmi les substances qui entraînent une importante consommation d'oxygène, notons en particulier les sous-produits rejetés par l'industrie laitière, le sang rejeté par l'industrie de la viande, les déchets contenus dans les eaux usées domestiques, etc. Cette diminution de l'O₂ dissous peut provoquer dans certains cas des mortalités importantes de poissons.
- **La présence de produits toxiques** : rejetées sous-différentes formes, ces substances provoquent des effets qui peuvent être de deux formes : effet immédiat ou à court terme

conduisant à un effet toxique brutal et donc à la mort rapide de différents organismes et effet différé ou à long terme, par accumulation au cours du temps, des substances chez certains organismes. La plupart des produits toxiques proviennent de l'industrie chimique, de l'industrie des métaux, de l'activité agricole et des décharges de déchets domestiques ou industriels.

- **Une prolifération d'algues** : bien que la présence d'algues dans les milieux aquatiques soit bénéfique pour la production d'oxygène dissout, celles-ci peuvent proliférer de manière importante et devenir extrêmement gênantes en démarrant le processus d'eutrophisation. Les algues se nourrissent de matières minérales c'est-à-dire phosphore sous forme de phosphate, ainsi qu'azote (ammonium, nitrates et azote gazeux), carbone (gaz carbonique) et d'autres éléments minéraux. La présence excessive de ces éléments est essentiellement liée aux activités humaines, à l'agriculture et à l'industrie.
- **Une modification physique du milieu récepteur** : le milieu peut être perturbé par des apports aux effets divers : augmentation de la turbidité de l'eau (ex. lavage de matériaux de sablière ou de carrière), modification de la salinité (ex. eaux d'exhaure des mines de sel), augmentation de la température (ex. eaux de refroidissement des centrales nucléaires).
- La présence de bactéries ou virus dangereux : les foyers domestiques, les hôpitaux, les élevages et certaines industries agroalimentaires rejettent des germes susceptibles de présenter un danger pour la santé.

2 Apport de la connaissance du comportement des polluants

Un polluant donné, une fois déversé dans le milieu poreux souterrain fractionne entre ses différentes phases :

- phase liquide,
- phase aqueuse,
- phase adsorbée,
- phase gazeuse

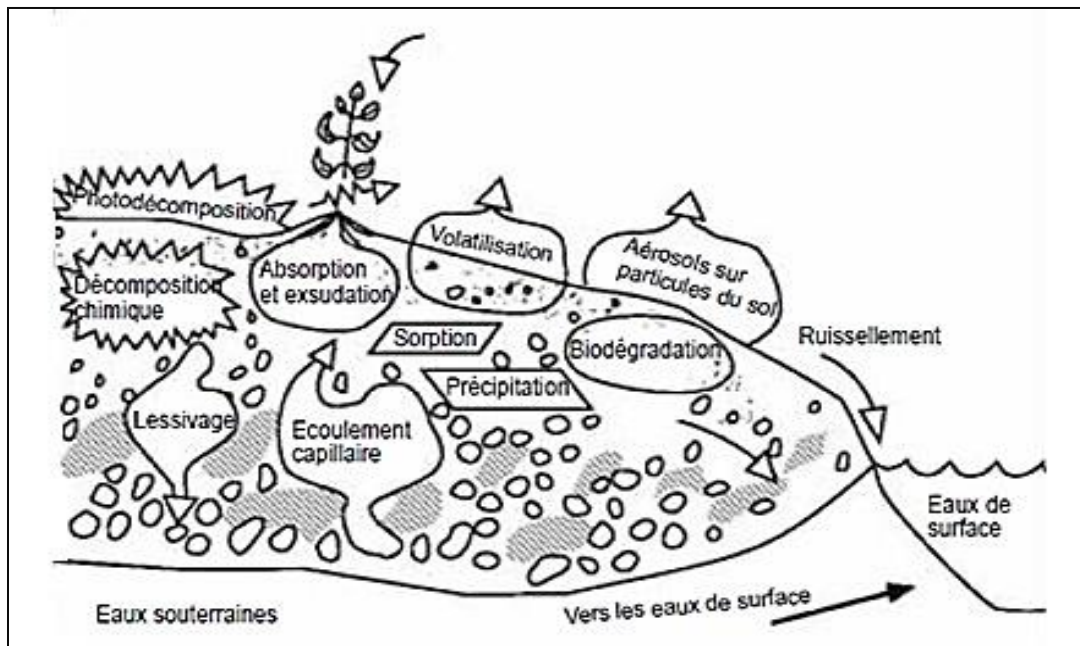


Fig. 31 Processus influant sur le comportement et la migration des contaminants au niveau du sol (d'après Sims et al. 1984)

Les principaux vecteurs de leur transport vers les ressources en eau sont pour les :

- solides : l'entraînement de particules par de l'eau (ex. : ruissèlement de pluie) et la dissolution dans l'eau ;
- liquides : la solubilisation dans l'eau ou la migration de la phase liquide immiscible dans l'eau
- gaz : la solubilisation dans l'eau.

Le vecteur principal d'une pollution vers une ressource en eau est donc l'eau. Par conséquent, le transfert de contaminants d'une source vers une ressource en eau est avant tout le fait d'écoulements sous forme liquide : polluant organique en phase liquide, polluant dissout dans l'eau.

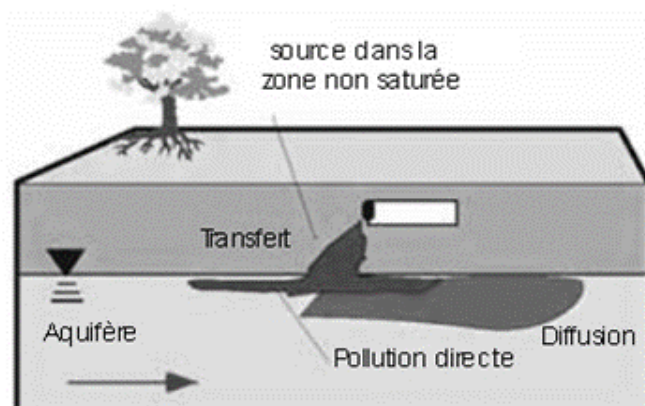


Fig.32 Transfert d'un polluant depuis une source situé dans le sol vers l'eau souterraine (d'après Nwell et O'Connor, 1998)

La portée du transfert dépend étroitement du comportement des polluants dans les milieux naturels traversés lors de leur migration. Les propriétés intrinsèques des polluants, les propriétés intrinsèques des milieux traversés, les interactions entre les polluants et le milieu, ainsi que les conditions locales (pluviométrie par exemple) sont autant de facteurs influençant la migration des polluants.

Donc le milieu récepteur joue un rôle primordial dans la détermination du degré de protection des eaux souterraines par ces caractéristiques qui peuvent être positive ou négative contre une toute menace provient surtout des activités anthropogéniques de l'homme.

La prévention contre la pollution des nappes constitue une étape importante à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'effort, notamment en étudiant la vulnérabilité des nappes souterraines.

3 Vulnérabilité des eaux souterraines

Depuis quelques décennies, l'exigence de planification du territoire selon des modalités tolérables pour l'environnement souterrain a contribué au développement de la notion d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. L'identification des zones de plus forte vulnérabilité permet de prévenir une partie de la contamination en guidant le gestionnaire lors de l'aménagement du territoire.

3.1 Le concept de vulnérabilité

Le terme vulnérabilité a été introduit dans la littérature hydrogéologique par le français J.Margat en 1968 (Martinez-Bastida et al 2010, Vrba and Zaporozec 1994) Il est aujourd'hui couramment usité, y compris dans sa version anglaise (vulnerability) ; cf. " *Guide Book on mapping Groundwater Vulnerability* " (AIH Intern. Contrib. to Hydrogeology, n°16, 1994).

ce terme de vulnérabilité, appliqué d'abord aux eaux souterraines, permettait par une métaphore expressive, d'abord de sensibiliser (rendre conscient que les eaux souterraines ne sont pas, en général, à l'abri des pollutions, malgré l'idée de pureté naturelle qui leur est communément attachée), puis de faire comprendre des différences (la variété des conditions naturelles rend ces eaux inégalement protégées, d'où divers degrés de vulnérabilité à identifier et cartographier).

Il n'y a pas une définition générale de la vulnérabilité des eaux souterraines (Magiera 2000).

Une des premières définitions trouvées dans la littérature est celle d'Albinet et Margat (1970) qui proposent que "la vulnérabilité d'un aquifère soit la possibilité de percolation et de diffusion de polluants depuis la surface du sol jusqu'à la nappe, dans des conditions naturelles".

Olmer et Rezac (1974) suggèrent que la vulnérabilité des eaux souterraines soit "le degré de dangerosité déterminé par les conditions naturelles et indépendantes des sources de pollution actuelles". Leur point de vue est que la vulnérabilité dépend dans la zone non saturée de la perméabilité verticale et, dans l'aquifère, du gradient hydraulique et de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine.

Vrana (1984) définit la vulnérabilité des eaux souterraines comme "le complexe des conditions naturelles de la surface et de la subsurface influençant le mouvement d'un polluant vers l'aquifère".

Villumsen et al. (1982) proposent que la vulnérabilité des eaux souterraines soit "le risque qu'a une substance chimique, utilisée ou entreposée sur ou près de la surface du sol, d'influencer la qualité des eaux souterraines". Selon ces auteurs, la vulnérabilité des eaux souterraines dépend d'une série de paramètres, aussi bien dynamiques que statiques. Ils insistent sur le fait que la composition chimique des eaux souterraines peut être utilisée comme indicateur de la vulnérabilité et ils recommandent que les analyses chimiques des eaux soient utilisées comme vérification préliminaire des cartes de vulnérabilité.

Sotomikova et Vrba (1987) comprennent la vulnérabilité d'un système hydrogéologique comme "l'aptitude de ce système à faire face à des impacts extérieurs, aussi bien naturels qu'anthropogéniques, qui affectent son état et ses Caractéristiques dans le temps et dans l'espace". Civita définit le degré de vulnérabilité intrinsèque comme la possibilité d'infiltration et de percolation de contaminants à travers la zone non saturée (Benacchio et al., 1988)

Mais la majorité des travaux recensés utilise celle de l'association internationale des hydrogéologues (AIH) Vrba Zaporozec (1994) : "la vulnérabilité à l'échelle du temps humain soit une propriété intrinsèque naturelle invariante des parties non saturées et saturées du système aquifère et qui dépend de la capacité ou de l'incapacité de ce système à faire face à des processus naturels et des impacts humains. "

L'approche européenne COST 65 (1995) donne un aperçu sur les différentes définitions de la vulnérabilité qui ont été proposé jusqu'à présent. La plupart d'entre eux sont tout à fait

semblables. COST action 620 évaluée et discuté de cette question et propose par conséquent les définitions suivantes :

- **La vulnérabilité intrinsèque** des eaux souterraines à des contaminants tient compte de la géologie, caractéristiques hydrologiques et hydrogéologiques d'une région, mais est indépendante de la nature des contaminants et des scénarios de contaminations.
- **La vulnérabilité spécifique** prend en compte les propriétés d'un contaminant particulier ou d'un groupe de contaminants, en plus de la vulnérabilité intrinsèque de la zone (Zwahlen 2004).

La distinction des deux types de vulnérabilité est nécessaire, car, d'une façon générale, elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps (à notre échelle de travail) alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis.

3.2 Les critères conditionnant la vulnérabilité intrinsèque

Pour qualifier la vulnérabilité intrinsèque, un certain nombre de critères sont disponibles, ils sont associés aux ensembles souterrains dans lesquels ils interviennent et sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 17 : Critères intrinsèque et spécifiques de la vulnérabilité des eaux souterraines et leurs paramètres (Vrba et Civita, 1994) in (Murat V, 2000)

	Vulnérabilité intrinsèque (naturelle)			
	Critères essentiels			
paramètres	Sol	Zones non saturée	Aquifères (zone saturée)	Recharge
Principaux	-Texture -Structure -Epaisseur -Tau de matière -Teneur en argile -Perméabilité	-Epaisseur (par rapport aux niveaux piézométriques) -Lithologie (en tenant compte de la structure et de la stratification de la roche) -Temps de Transfer de l'eau	-lithologie (en tenant compte de la structure et de la stratification de la roche) -Epaisseur -porosité efficace -perméabilité -sens d'écoulement des eaux souterraines -temps de résidence et âge des eaux souterraines	- Taux de recharge annuelle nette - Précipitations - Annuelles
complémentaires	-Capacité d'échange -Cationique -Capacité de réduction et de sorption -Carbonate -Densité apparentes -Humidité capacité au champ -Prélèvement d'eau par les racines -Réaction de transfert d'azote	-Teneurs en eau -Perméabilité	-inaccessibilité hydraulique -capacité d'emménagement -transmissivité	-Evaporation -Evapotranspiration -température de l'air

La vulnérabilité des eaux souterraines dépend donc des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des différents horizons rencontrés. Dans le cas des nappes libres, aucun horizon imperméable ne sépare le toit de la nappe de la surface, elle est protégée vis-à-vis des pollutions de surface.

Dans le cas des nappes captives, la présence de formations imperméables ou semi-perméables entre le sol et la nappe constituent un horizon de protection supplémentaire.

3.2.1 Critères relatifs aux conditions de surface ou subsurface

La quantité d'eau qui ruisselle et donc ne s'infiltre pas dépend entre autres de la pente. Les critères de pédologie comme la nature des sols, leur texture, la perméabilité verticale des sols vont réguler la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la ZNS.

3.2.2 Critères relatifs à la zone non saturée :

Neukum et Azzam (2009), définis de nouveaux indicateurs de vulnérabilité, en utilisant la simulation numérique de l'écoulement de l'eau et le transport de soluté avec des conditions aux limites transitoires. Cette approche révélée les relations fonctionnelles entre l'épaisseur des couches de la zone non saturée, la recharge des eaux souterraines et le temps de transit de polluant.

La profondeur de la nappe libre conditionne de temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physicochimiques avec l'encaissant) et donc son éventuelle dégradation en cours de transfert. La perméabilité verticale de la ZNS dicte le temps de transfert ou même peut empêcher le transfert vertical d'un polluant vers la nappe.

La structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matières organiques et argile) conditionne la migration de fluides vers la nappe.

3.2.3 Critères relatifs à la zone saturée :

Ces critères ne sont pas toujours pris en compte dans la détermination de la vulnérabilité. Certains auteurs considèrent uniquement la facilité et la rapidité suivant lesquelles des matières polluantes d'origine superficielle peuvent atteindre l'eau souterraine et ne prennent pas en compte les conditions hydrodynamiques de la zone saturée. La nappe est alors considérée comme vulnérable, dès l'instant où le polluant l'a atteint.

3.3 Détermination de la vulnérabilité spécifique

La vulnérabilité spécifique des systèmes aquifères est généralement déterminée en termes de risque du système à être exposé à la venue d'un contaminant. En comparaison avec la détermination de la vulnérabilité intrinsèque, qui est le plus souvent basée sur des paramètres intrinsèques statiques du système sol-roche-eau souterraine, des paramètres dynamiques et variables sont inclus dans la détermination de la vulnérabilité intrinsèque (Tableau 18). Le temps de transfert du contaminant dans la zone non saturée et son temps de résidence dans l'aquifère sont fréquemment introduits. Le paramètre essentiel dans la détermination de la vulnérabilité spécifique des eaux souterraines est la capacité d'atténuation du sol, de la zone non saturée et de l'aquifère, en fonction des propriétés des contaminants spécifiques.

Les principaux critères impliqués dans la détermination de la vulnérabilité spécifique comprennent : l'utilisation des terres (impact humain) et la densité de population.

Tableau 18 : Critères intrinsèque et spécifiques de la vulnérabilité des eaux souterraines et leurs paramètres (suite) (Vrba et Civita, 1994) in (Murat V, 2000)

	Vulnérabilité intrinsèque (naturelle)			Vulnérabilité spécifique
	Critères secondaires			
paramètres	Topographie	Unité géologique recouvrant l'aquifère	Relation avec les eaux de surface et les eaux de mer	
Principaux	Variabilité de la pente de la surface du sol	Perméabilité Structure et tectonique Potentiel de recharge / décharge	Perte/ apports par les cours d'eau Evaluation du potentiel d'infiltration Interface/eau de mer / eau douce dans les régions côtières	-Occupation des terres : naturelles, forêts non agricoles. Humaine : terre agricole, terres occupées par activités industrielles, rurales ou des installations urbaines. -densité de la population -temps de transfert des polluants dans la zone non saturée -capacité d'atténuation du sol, de la zone non saturée et de l'aquifère en relation avec des polluants spécifique
complémentaires	Couverture végétale	Dans le cas d'un aquifère captif application des memes paramètres à recouvrant l'aquifère		-temps de résidence des polluants dans l'aquifère. Caractéristique du transport des contaminants-valeurs du coefficient de distribution (Kd), persistance (demi-vie) -recharge artificielle -irrigation -drainage

Il existe une différence fondamentale entre les régions soumises à une activité humaine (agriculture, industrie, urbanisme, dépôts acides) et les régions dominées par des paysages naturels (forêts, terres non cultivées, régions montagneuses non peuplées...).

COST Action 620

3.4 Techniques d'estimation de la vulnérabilité :

Le moyen le plus pratique d'exprimer vulnérabilité des eaux souterraines est cartographie de la vulnérabilité. La vulnérabilité des eaux souterraines variées dans l'espace à cause de la grande variation de faciès lithologique des matériaux qui forme la surface.

Le but de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est de présenter les différents degrés de protection offerte par les différentes lithologies (Ramos Leal and Rodriguez Castillo 2003), et de fournir les informations pour les aménageurs et aux autorités pour contrôler les activités humaines et protégées les eaux souterraines. Ce type

d'information peut aider à assigner les zones sensibles qui ne devraient pas être affectées par les activités anthropogéniques.

Pour chaque zone sensible, le degré de risque des sources de pollutions potentielles doit être estimé (Ramos Leal and Rodriguez Castillo 2003). La carte de risque peut être réalisée par la superposition de la carte qui montre les zones vulnérables avec la carte qui montre la location des sources de pollution potentielles ou les activités polluantes occupant le sol (Gogu and Dassargues 2000).

Comme proposé dans Vrba et al. (1994) (dans un recueil exhaustif sur les méthodes cartographiques de vulnérabilité), la vulnérabilité des eaux souterraines est une propriété qui est relative, non-mesurable et sans dimension. Depuis ce terme introduit, plusieurs scientifiques ont essayé de développer des méthodes pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité.

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses, chacun élaborant sa méthode selon ses besoins. La multiplicité des méthodes provient aussi bien des objectifs recherchés au niveau de la réglementation, des activités humaines, des polluants, etc., que du nombre d'organismes qui développent leur propre méthode (Aubre, 1992).

Les méthodes d'estimation peuvent être classées en trois catégories principales (selon Liggett et al. (2009) :

- Méthodes paramétriques avec indices superposables (empiriques) GOD, EPIK, DRASTIC, SINTACS, CALOD, SI, COP. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple)
- Méthodes par modélisation physique (mathématiques numériques)
- Méthodes statistiques (prévisionnelles)

3.4.1 Les méthodes paramétriques, permettant de calculer rapidement de façon empirique des indices de vulnérabilité, sont fréquemment utilisées et s'appuient sur une sélection d'attributs et paramètres physiques représentatifs de la vulnérabilité (épaisseur de la zone non

saturée, type de sol, etc.), qui sont discrétisés et classés par intervalle décroissant d'effet supposé sur

L'atténuation d'une contamination (donc d'accroissement de la vulnérabilité). Gogu et al. (2000) subdivisent la famille des méthodes paramétriques en trois sous-systèmes, selon l'approche théorique utilisée :

- **Systèmes *matriciels*.** Basés sur un nombre limité de paramètres physiques rigoureusement choisis et présentés sous forme de matrice. L'estimation de l'indice de vulnérabilité se fait alors de façon très rapide et simple, selon un système de tableau multiparamètres.
- **Systèmes de *paramètres classés combinés*.** Les paramètres physiques jugés nécessaires à l'estimation de la vulnérabilité sont répartis sur une échelle de valeurs classées d'après leur influence estimée sur l'atténuation d'une contamination potentielle. Ces classes sont ensuite combinées selon un schéma calculatoire défini pour donner un indice final de vulnérabilité.
- **Systèmes « *point-count systems models PCSM* » (*classement – pondération*).** Proche du système de paramètres classés combinés, avec l'ajout de facteur de pondération pour chaque valeur de paramètre, selon son efficacité particulière dans l'atténuation d'une contamination potentielle. Les valeurs finales d'indices sont alors obtenues par la somme pondérée des valeurs de paramètre. La méthode DRASTIC (Aller et al. (1987)) et la méthode SINTACS (Civita et al. 1997) qui en est dérivée est de bons exemples de systèmes « point-count ».

Le mélange de plusieurs de ces approches dans les schémas conceptuels d'estimation de la vulnérabilité est fréquent (exemple de système hybride matriciel / « point-count » pour la méthode COP).

Tableau 19 : Avantages, inconvénients et type d'utilisateurs cibles pour les trois types principaux de méthodes d'estimation de la vulnérabilité (Murat, V 2000)

Type de méthode	Avantages	Inconvénients	Type d'utilisateur	Références
Méthodes paramétriques-empiriques	• Coûts réduits • Rapides • Peu gourmandes en données hydrogéologiques • Facilement interprétables	• Indices de vulnérabilité purement qualitatifs • Fortement dépendantes du jugement de l'expert • Fréquentes divergences d'estimation entre les méthodes (pour un même site)	• Administrations et gouvernements • Experts divers • Domaine éducatif	Aller et al. (1987), Civita et al. (1997), Vias et al. (2006)
Méthodes par modélisation physique	• Indices de vulnérabilité quantifiés • Peu ou pas de jugement subjectif de l'expert • Permettant l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque ou spécifique • Basées sur la physique réelle des écoulements souterrains	• Gourmandes en données hydrogéologiques • Difficilement utilisables sans consultation de l'expert • Coûts élevés : main-d'œuvre et logiciels	• Experts en hydrogéologie et en sciences de l'environnement • Administrations et gouvernements	Connell et al. (2003), Neukum et al. (2009), Jeannin et al. (2001)
Méthodes statistiques-prévisionnelles	• Indices de vulnérabilité quantifiés, avec incertitudes • Peu ou pas de jugement subjectif de l'expert • Corrélations directes avec des données de terrain (contaminations réelles et potentielles)	• Spécialisées : souvent développées pour un seul type de contaminant • Pas de méthodes « clé-en-main » • Difficilement utilisables sans consultation de l'expert	• Experts en hydrogéologie et en sciences de l'environnement • Administrations et gouvernements	Masetti et al. (2009), Tesoriero et al. (1997), Worrall et al. (2003), Worrall et al. (2005)

3.4.2 Approches statistiques et par modélisation physique :

Basées sur les processus physiques d'écoulement de l'eau et du transport des contaminants, sont à priori indépendantes du contexte hydrogéologique, les méthodes paramétriques – empiriques sont quant à elles en grande partie dépendante de ce contexte. La plupart de ces méthodes sont ainsi en règle générale dédiées à un environnement hydrogéologique précis, par le choix des paramètres géologiques pour l'estimation de la vulnérabilité. Ainsi les méthodes déjà mentionnées DRASTIC et SINTACS s'appliquent de préférence aux milieux aquifères poreux, alors que

Les méthodes EPIK (Doerfliger et al. (1999) ; Doerfliger et al. (1998)) et DISCO (Pochon et al. (2008), entre autres, ont été développées pour les milieux karstiques et fissurés, respectivement. Les milieux karstiques ont également été en premier lieu au centre de l'approche européenne (Zwahlen (2004)).

4 Apport des SIG et principales sources d'information

Un logiciel du type système d'information géographique (SIG) permet de combiner facilement les différentes cartes correspondantes. Cette approche interdisciplinaire implique l'intégration des informations concernant l'utilisation du sol, le transport de contaminants et l'exploitation des ressources pour faciliter la gestion de l'eau.

Un SIG est un outil informatisé capable de créer, transformer, afficher, analyser et stocker de l'information géographique. Il permet d'organiser et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées, en vue notamment de produire des plans et cartes.

4.1 Composantes d'un SIG

Le système d'information géographique intègre en plus de l'outil informatique qui manipule les données, plusieurs composantes qui font la spécificité d'un système complet. À chacune des composantes du système correspond un ensemble de fonctionnalités primaires : abstraction, acquisition, archivage, analyse et affichage. Parmi les principales composantes d'un SIG, on peut citer :

- Le système d'acquisition numérique des données qui permet de convertir l'information analogique sous une forme digitale compatible avec des traitements sur ordinateurs.
- Le système de gestion des bases de données géographiques qui est un ensemble de programmes permettant la manipulation et la gestion facilitées des données thématiques.
- Le système d'analyse spatiale qui permet d'analyser les données sur la base de leurs caractéristiques spatiales.
- Le système de représentation cartographique qui permet de sélectionner des éléments de la base de données cartographique et de les représenter graphiquement sur écran ou sur imprimante.
- Les systèmes auxiliaires : c'est l'ensemble des procédures permettant le traitement numérique d'images aérospatiales et l'analyse statistique des données.



Fig. 33: les composantes d'un système d'information géographique

4.2 Mode de représentation des données : Fig (34)

Les informations d'un SIG sont représentées sous forme de données géographiques qui vont indiquer la forme d'éléments se situant dans l'espace. Les objets géographiques sont organisés en couche qui fait référence à un thème (par exemple la couche de texture du sol). La représentation des objets géographiques dans un SIG peut se faire selon deux modes :

4.2.1 Mode raster (ou matricielle) :

L'espace est régulièrement découpé en cellules élémentaires. La géométrie la plus utilisée pour ces cellules est le carré. Le plan est ainsi discrétisé en carrés élémentaires appelés pixels, dont la taille détermine la résolution. Un pixel est repéré par rapport à son rang en ligne et colonne. Il existe aussi d'autres techniques de découpage régulier de l'espace, où les cellules élémentaires peuvent prendre la forme de polygones variés. L'inconvénient majeur de ce mode est le volume très important des données, qui nécessite l'application de techniques de compactage de données. Ce mode est très utilisé en télédétection (traitement d'images), en saisie automatique des données par l'utilisation de scanners ainsi que pour les modèles numériques de terrain (MNT sous-forme de grille régulière).

4.2.2 Mode vecteur (ou filaire) :

Dans ce mode, un objet est représenté par ses coordonnées (X, Y ou X, Y, Z). Un objet linéaire est représenté par la liste ordonnée des points qui le composent et un objet surfacique ou zonal est représenté par la liste des lignes qui constituent sa frontière. L'avantage principal de ce mode, relativement au mode raster, est le volume très faible des données. Par contre la saisie des données est très lente et couteuse (levés topographiques, photogrammétriques, digitalisation manuelle...) et son automatisation n'est pas encore réalisable.

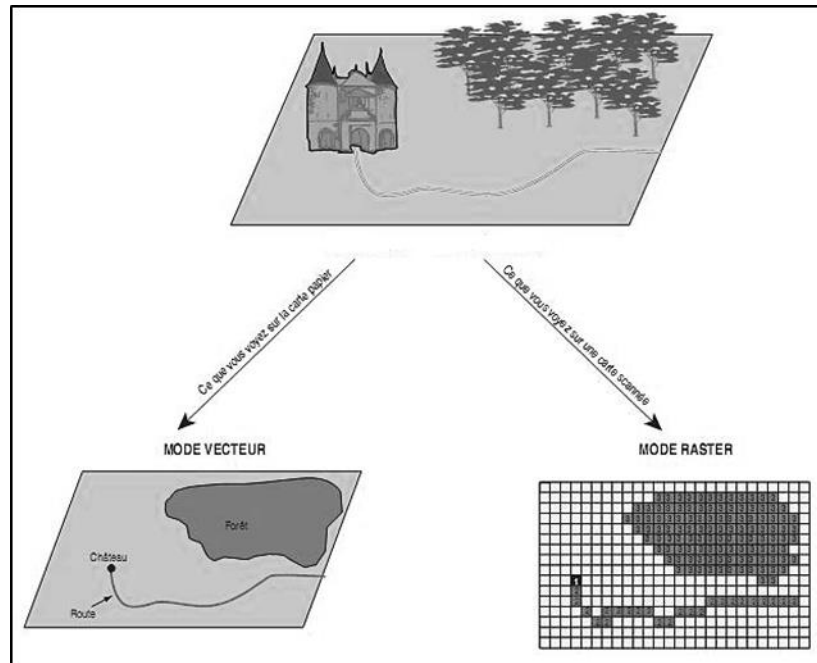


Fig. 34 : Types de données manipulées par un SIG

5. Quelques méthodes d'évaluation de vulnérabilité intrinsèque les plus utilisées dans les milieux poreux et karstique

Pour les différentes méthodes, de nombreux facteurs (liste ci-dessous) peuvent intervenir et être ensuite manipulés, cartographiés et indexés selon différents critères que chacune des méthodes préconise d'employer :

- Recharge par les eaux météoriques,
- Modalités d'Infiltrations,
- Propriétés du sol,
- Géochimie des eaux, (Plagnes V., 2000)
- Bio-géochimie des eaux,
- Caractéristiques de la Z.N.S. (lithologie et fracturation associée, épaisseur, porosité,

transmissivité, temps de séjour, conductivité hydraulique),

-Caractéristiques de la Z.S. (épaisseur, lithologie, perméabilité, temps de transit de l'eau dans l'aquifère),

-Topographie,

-Relations eaux de surface-eaux souterraines,

-Nature de l'encaissant de l'aquifère.

La liste suivante (non exhaustive) décrit les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque les plus utilisées :

5.1 Aquifer vulnerability index (AVI) (Van Stempvoort 1993) : c'est un system d'évaluation a notation et il prend en compte deux paramètres seulement : la conductivité hydraulique **K** (perméabilité) de chaque couche au-dessus de la surface d'eau souterraine et son épaisseur **d**.

$$C = \sum D_i / K_i, \text{ pour les couches de } 1 \text{ à } i$$

Dans ce type d'approche, des valeurs hydrauliques saturées de conductivité (K_{sat}) sont assignées à chaque couche sédimentaire rapportée par point. Ces valeurs sont souvent établies à partir de valeurs typiques issues de recherches bibliographiques. L'épaisseur des différentes couches sédimentaires découle de l'étude des ouvrages existants sur le territoire de l'étude. La résistance hydraulique (c) à la dimension du temps (par exemple en années) et représente le flux-temps par gradient d'unité pour l'eau s'infiltrant au travers des diverses couches de sédiment vers la couche aquifère saturée.

Une résistance hydraulique (c) faible, suppose une vulnérabilité importante, au contraire (c) élevée suppose une vulnérabilité faible.

Tableau 20 : Paramètre et notation utilisée par la méthode AVI

Résistance hydraulique, c (années)	Notation (c)	Catégorie de vulnérabilité
< 10 ans	< 1	vulnérabilité extrêmement élevée
10 -100 ans	1 à 2	vulnérabilité élevée
100 -1000 ans	2 à 3	vulnérabilité modérée
1000 -10000 ans	3 à 4	basse vulnérabilité
> 10.000 ans	> 4	vulnérabilité extrêmement basse

5.2 SINTACS

Elle est dérivée de la méthode DRASTIC, développée en Italie, par CIVITA au début des années 1994, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet et al., 2000). Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien :

- S : Soggiacenza (profondeur de la nappe) ;
- I : Infiltrazione (infiltration) ;
- N : Azione del Non Saturo;
- T : Tipologia della Copertura (sol) ;
- A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero ;
- C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ;
- S : Acclività della Superficie Topographica

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des facteurs de pondération variables selon les situations (Schnebelen et al., 2002). L'index final résultant de cette méthode est divisé sous forme de pourcentage puis d'intervalles définis sur la base de 500 tests. Ces intervalles sont regroupés en six classes de vulnérabilité. SINTACS utilise donc les sept mêmes paramètres que DRASTIC mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération.

L'utilisateur code les données d'entrée en fonction des situations locales de chaque cellule, avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivant les conditions.

5.3 DRASTIC

Cette méthode a été développée par Aller et al (1987) pour U.S Environmental Protection Agency (EPA), comme une méthode d'évaluation de la pollution potentielle des eaux souterraines sur une petite échelle. Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères :

- D : Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée) ;
- R : Recharge (recharge) ;
- A : Aquifer media (nature de la zone saturée) ;
- S : Soil media (nature du sol) ;

- T : Topographie (topographie, pente en %) ;
- I : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ;
- C : Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité.

L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante :

$$D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$$

Où : D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités plus haut

n : notation accordée à chaque paramètre ;

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

5.4 La méthode SI (Susceptibility Index)

La méthode SI (Susceptibility Index ou méthode d'Indice de Susceptibilité), qui estime la vulnérabilité verticale spécifique à la pollution agricole (essentiellement par les nitrates et également par les pesticides), a été développée au Portugal par RIBEIRO (2000). Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques à quatre paramètres déjà utilisés dans la méthode DRASTIC (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : la pente topographique du terrain). Les cotes correspondantes aux différentes classes de ces paramètres, dans la méthode DRASTIC, ont été également conservées. Un cinquième nouveau paramètre a été introduit : le paramètre occupation des sols (OS). La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover (EUROPEAN COMMUNITY, 1993). Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU, variant de 0 à 100, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Il est à signaler que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Ces valeurs varient par conséquent de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité.

5.5 La méthode GOD (Foster 1987).

Développée par Foster en 1987, elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- Type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
- Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.

L'indice de GOD est le résultat de multiplication des trois paramètres $GOD = C_G * C_O * C_D$

5.6 La méthode GALDIT

(Chachadi et Lobo- Ferreira, 2001) développer dans le cadre du projet Euro-Indien COASTIN (programme INCO DEV du 4ème PCRD), cette méthode est préconisée pour les aquifères côtiers pour la détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à l'intrusion saline fondée sur la combinaison de six paramètres pouvant influencer l'intrusion saline potentielle : -Le type d'aquifère, libre, captif ou semi-captif (Groundwater occurrence) ;

- La conductivité hydraulique de l'aquifère (Aquifer hydraulic conductivity)
- La profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer (Depth to groundwater Level above sea)
- La distance par rapport à la côte (Distance from the shore) ;
- L'impact de l'état actuel de l'intrusion saline dans la zone d'étude (Impact of existing status of seawater intrusion in the area)
- L'épaisseur de l'aquifère (Thickness of the aquifer).

Le processus de calcul de l'indice GALDIT prend en considération le poids relatif assigné à chaque paramètre. Il varie de 1 à 4, La variabilité des conditions hydrogéologiques et l'effet cumulé des deux aspects. La multiplication des paramètres du modèle permet de définir l'indice GALDIT de vulnérabilité

5.7 La méthode GLA (Hölting et al 1995)

Cette méthode proposée par l'observatoire géologique allemand (Geologische Landesämter) et l'institut fédéral des géosciences et ressources naturelles. Cette méthode est

basée sur un système de notation par lequel l'efficacité globale de protection de la couverture du sol et zone non saturée est calculée. Elle exige les paramètres suivants :

Paramètre 1: S - capacité de champ effectif du sol

Paramètre 2: W – taux de percolation (recharge des eaux souterraines)

Paramètre 3: R - type de roche

Paramètre 4: T - épaisseur du sol et la roche couverture au-dessus de l'aquifère

Paramètre 5: Q - points de bonus pour les systèmes aquifères perchés

Paramètre 6: HP - points de bonus pour les conditions de pression hydraulique

L'efficacité globale de protection(**PT**) est calculée en utilisant les équations suivantes (1) -(3):

$$PT = P1 + P2 + Q + HP \dots \dots \dots (1)$$

P1-efficacité protectrice de la couverture du sol : $P1 = S * W \dots \dots \dots (2)$

Efficacité protectrice **P2** de la zone non saturée (sédiments ou roches solides) :

$$P2 = W * (R1 * T1 + R2 * T2 + \dots + Rn * Tn) \dots \dots \dots (3)$$

5.8 La méthode RISK et RISK2

Destinée aux milieux karstiques est une méthode de cartographie multicritère de la vulnérabilité des surfaces contribuant à la recharge de l'aquifère. Elle fournit une cartographie hiérarchisée en 5 classes de vulnérabilité. Se basent sur les critères : Réservoir aquifère, Infiltration, Sol, Karstification et Epikarst. RISKE2 prend en compte les phénomènes exo-karstiques tels que les dolines, avens et pertes.

5.9 L'approche européenne (COST Action 620) :

C'est la directive européenne chargée par 51 spécialistes de 15 pays en considération avec le comportement spécifique des aquifères carbonatés et leurs sensibilités particulières à l'impact des activités anthropogéniques. L'approche européenne basée sur la méthode PI a été conçue comme une approche améliorée et cohérente pour la protection de l'eau souterraine karstique. Cette approche générale ne précise pas les facteurs nécessaires pour la mesure, ni des lignes directrices pour la cartographie de la vulnérabilité, mais un guide de méthodes avec un tableau d'éléments en vue d'une application possible. Le choix des éléments à employés est subordonné à la configuration du site et l'utilisation prévue. Cette méthode maintient l'approche conceptuelle origine cible voie (Goldscheider, 2004).

Autres méthodes élaborées pour l'évaluation de la vulnérabilité intègrent l'utilisation des outils sophistiqués tels que les techniques de neuroflous (Dixon, 2005), ou la méthode de quantification floue combinée avec la procédure des moyennes pondérées ordonnée (Gemitzi et al., 2006).

6. La vulnérabilité dans un cadre de risque

La définition de danger et de risque reste compliquée, d'abord parce que cette terminologie a juste commencé à formaliser et d'autre part parce que dans la littérature ces concepts sont étant généralement considérée par rapport à la santé et la sécurité humaine. Les dangers et les risques sont utilisés beaucoup avec une grande variété de définitions, les deux termes sont souvent utilisés simultanément en anglais et en français. Parfois il y a une confusion entre le risque et la probabilité qu'un évènement se produise. Afin d'être utiles, du danger » et le « risque » doivent être définis sans ambiguïté Zwahlen (2003). Généralement, les définitions disponibles dans la littérature n'indiquent pas les termes vise à fournir une mesure absolue mais devrait plutôt comme un moyen de mesure relative ou de comparaison. La distinction entre le danger et le risque est très utile surtout lorsqu'on les considère par rapport au modèle « origine-voie-cible » (Fig. 35)

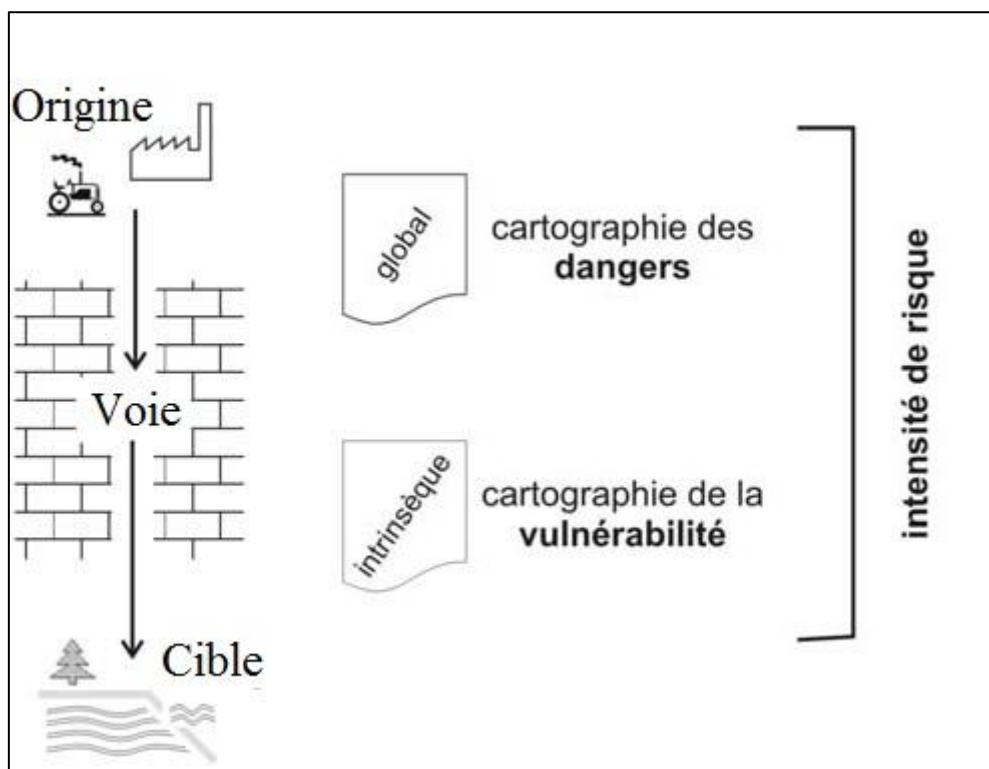


Fig. 35 Concept d'évaluation du risque des eaux souterraines vis-à-vis d'une contamination

6.1 Définition du danger

Le groupe d'étude Royal society (1992) (Londres) définit formellement un danger pour l'environnement comme « un évènement ou un processus continu s'il est réalisé va conduire à des circonstances ayant le potentiel de dégradé directement ou indirectement la qualité de l'environnement », par conséquent, un danger présente un risque quand il est susceptible d'affecter quelque chose de valeur (la cible).

Dans le contexte de la contamination des eaux souterraines, un danger est défini comme une source potentielle de contamination résultant des activités humaines qui se déroulent principalement à la surface du sol, toutefois, les principaux impacts sont considérés comme nuisibles de la manipulation, à travers la production, le transport, le stockage et l'élimination ainsi que l'utilisation des substances nocives dans une large échelle d'activités.

Dans le modèle origine-voie-cible, le risque de contamination des eaux souterraines dépend de trois éléments :

- le danger posé par une activité potentiellement polluante (équivalent à l'origine)
- la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à la contamination (l'équivalent de voie)
- les conséquences potentielles d'un cas de contamination (la cible est l'eau souterraine)

6.2 Définition du risque :

En hydrogéologie l'évaluation et la gestion du risque sont de plus en plus utilisées, y compris les ressources en eau souterraine et la gestion de leur qualité (NEPC 2000, NRC 1993, U.S.EPA 1996). Les schémas de protection des eaux souterraines sont basés sur le concept du risque de contamination et la gestion du risque (Adams & Forster 1992, Daly & Warren 1998).

En général le risque signifie la probabilité dans un laps de temps qu'un résultat (d'un effet) se produira et affecta une personne, un groupe des gens, des animaux, des plantes ou l'écologie d'une zone spécifiée qui est exposée à une dose ou une concentration particulière d'un agent dangereux (COST action 620, 2003). Il existe plusieurs substances dangereuses, par exemple des composés chimiques artificiels, des métaux lourds et des substances radioactives, qui se répandent dans une échelle locale et régionale et polluer notre environnement. Le risque associé à ces substances nocives dépend à la fois de leur degré de toxicité et le degré d'exposition.

Afin d'obtenir une compréhension claire, le risque est défini comme suit :

Un terme utilisé pour désigner la probabilité de subir un préjudice d'un danger. En ce qui concerne les eaux souterraines, il se réfère à la possibilité de contamination à la suite d'un évènement dangereux (COST action 620, 2003). Il englobe à la fois la probabilité et les conséquences, sur les eaux souterraines.

7 Évaluation du risque

Un processus d'évaluation pour estimer l'impact potentiel d'un produit chimique, agent biologique ou physique sur les eaux souterraines. L'évaluation du risque identifier les dangers potentiels ou exister et les voies d'exposition à la contamination afin de fournir les mesures pour protéger les eaux souterraines. Les points suivants doivent être prendre en considération :

- La probabilité d'impact.
- L'intensité d'un impact potentiel avec lequel il affecte les eaux souterraines (intensité de l'impact).
- La sensibilité des eaux souterraines par rapport à l'impact (sensibilité des eaux souterraines).

En pratique le risque de pollution des eaux souterraines sera entrepris par deux approches possibles : - les méthodes directes impliquant la surveillance approprié de la qualité chimique de la masse d'eau souterraine pour donner une indication du début de dégradation. - la méthode indirecte impliquant des études de la charge de polluants proche de la surface et des estimations de la vulnérabilité des aquifères sous-jacentes.

Le risque de pollution est considéré comme l'interaction entre la pression (la charge) des polluants de subsurface et la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère sous-jacent.

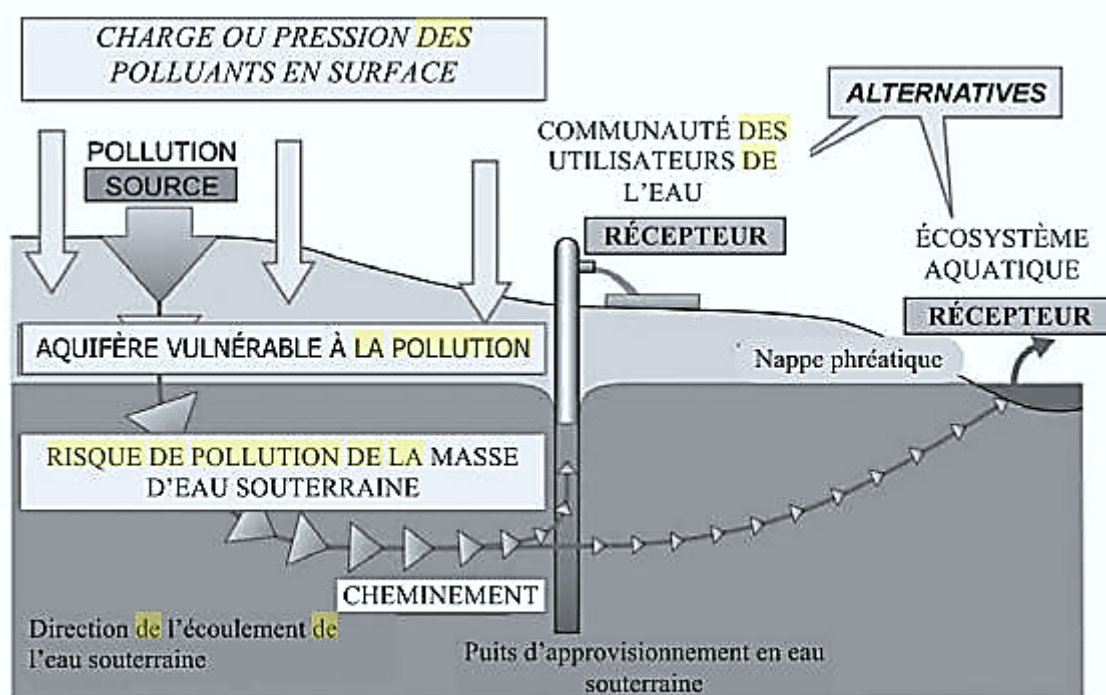


Fig. 36 Schéma conceptuelle de l'évaluation du risque de pollution de l'eau souterraine (Quevauviller P, 2010)

CHAPITRE V
Caractérisation
hydrochimique des eaux
souterraines

1 Introduction :

L'eau souterraine est généralement de meilleures qualités que l'eau de surface, en raison du pouvoir épurateur du sol (Coté M et al, 2006). Cette eau présente ainsi un grand intérêt comme source d'approvisionnement en eau potable. Afin de mieux cerner l'aquifère de Collo, le but de ce chapitre est de dresser un bilan global des caractéristiques physicochimiques des eaux souterraines dans cet environnement fortement anthropisé, et de mettre un état des lieux qualitatif sur la nappe de Collo. Les données existantes ainsi que les nouvelles mesures et analyses permettront de construire des banques de données et de situer la qualité actuelle des eaux souterraines.

2 Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse :

Pour cette étude, l'échantillonnage des eaux souterraines a été fait de manière à couvrir toute la zone d'étude (Fig. 37), afin d'avoir encodé dans la base de données.

Les analyses concernées par la présente étude sont celles relatives aux éléments majeurs suivants : pH, CE, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, HCO₃ et NO₃. Les éléments en trace suivants sont également considérés : Zn, Pb, Fe et Cu.

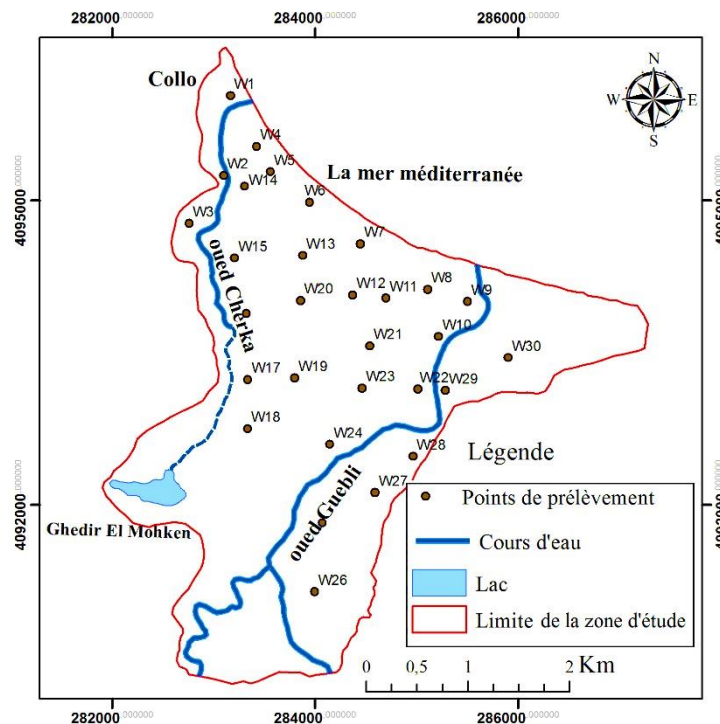


Fig. 37 Inventaire des points de prélèvement

Les mesures *in situ* ont été effectuées au niveau de chaque point d'eau : la température, le pH et la conductivité électrique ont été mesurés à l'aide d'un multiparamètre

numérique WTW 3420 NU. Les échantillons d'eau prélevés sont conservés dans des bouteilles en PEhd rincés au préalable trois fois avec l'eau à prélever, et acidifiés à pH 2 avec de l'acide nitrique (HNO_3). Les ions majeurs Calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), bicarbonates (HCO_3^-), chlorures (Cl^-) ont été dosés par la méthode volumétrique. et le nitrate (NO_3^-), les sulfates (SO_4^{2-}), par spectrophotométrie UV de type Jenway. Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) ont été dosés par un spectromètre à flammes de type Jenway.

Les éléments en trace Zn, Pb, Fe et Cu, ont été dosés par spectrophotomètre à absorption atomique de type Perkins Elmer.

3 Traitement des résultats

Les résultats des analyses chimiques sont exprimés en mg/l. La balance ionique a été vérifiée, et compte tenu de la charge ionique élevée de certains échantillons la limite de validité de 10 % a été retenue.

4 Contexte hydrochimique général

Les paramètres mesurés concernent 30 prélèvements d'eaux souterraines pendant la période d'octobre 2015.

4.1 Les principaux paramètres physicochimiques :

4.1.1 Paramètres *in situ* :

4.1.1 Le pH :

Les pH s'inscrivent dans des gammes basiques avec une tendance légèrement acide entre 6.61 et 7.38 dans tous les puits de la zone d'étude (Fig. 39). La nature silicatée de réservoir (sableuse) explique ce caractère de tendance acide des eaux. La dissociation de l'acide carbonique issu du CO_2 de l'atmosphère constitue un des facteurs de l'acidification des eaux souterraines concernées (aquifère superficiel). En milieu ouvert, l'abondance de CO_2 du sol maintient les pH acides alors que dès que le milieu se ferme (aquifère profond) l'hydrolyse des silicates consomme l'acidité et le pH augmente (Bourrié, 1978).

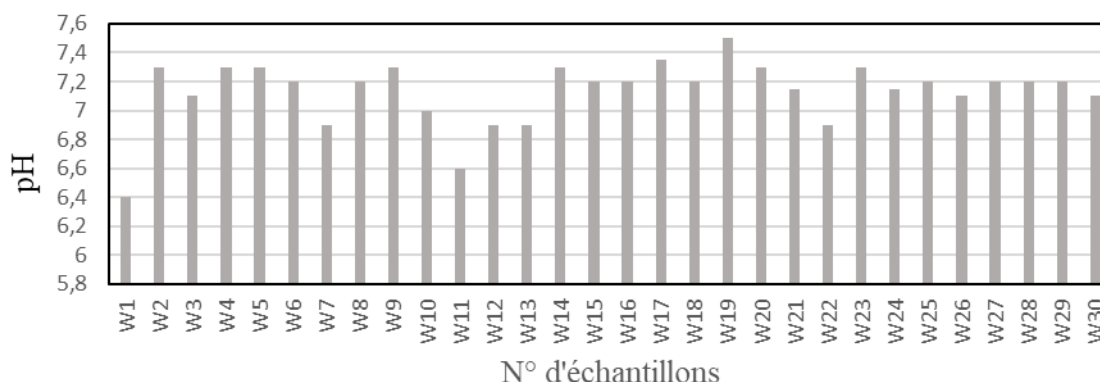


Fig. 38 Valeurs des pH des eaux souterraines de la plaine de Collo (octobre 2015)

4.1.2 La Conductivité électrique :

Les conductivités mesurées présentent une grande amplitude de variation. Elles varient très largement avec la charge minérale des eaux souterraines : de 310 jusqu'à 5600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig.39).

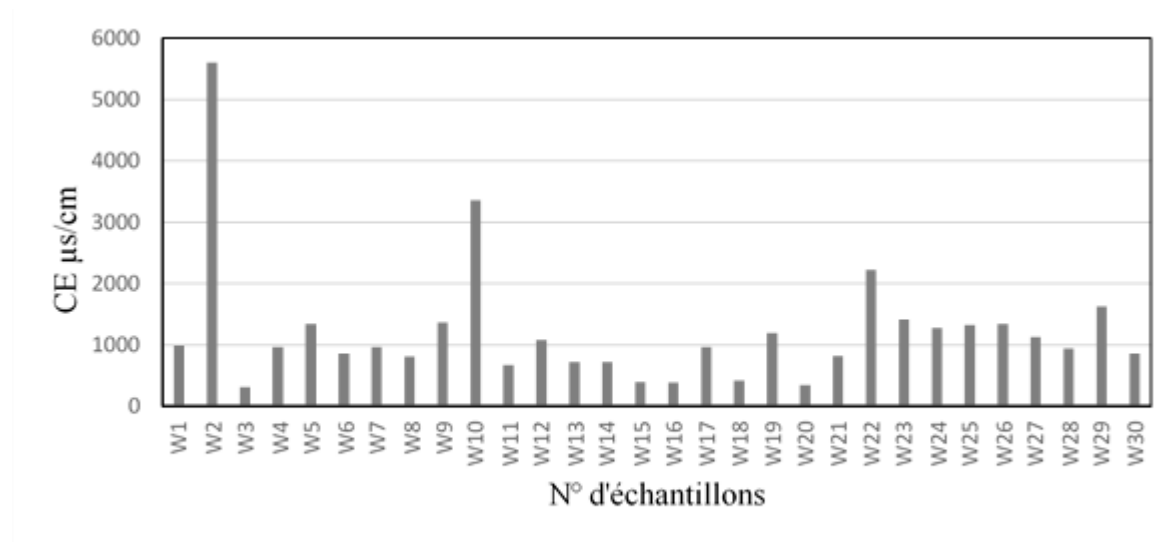


Fig. 39 Valeurs de la CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux souterraines de la plaine de Collo (octobre 2015)

Les eaux les moins minéralisées ($\text{CE} < 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$) sont celle des puits W3, W6, W8, W11, W13, W14, W15, W16, W18, W20, W21 et W30 soit 37% des échantillons mesurés. Les eaux moyennement minéralisées : W1, W4, W5, W7, W9, W12, W17, W19, W23, W24, W25, W26, W27, W28 et W29 soit 50 % des échantillons.

On remarque que les échantillons ayant une conductivité électrique élevée (soit 13 % des échantillons) se situent au rivage des oueds El Guebli et Cherka correspond à la relation hydraulique entre cours d'eaux fortement minéralisées (intrusion saline) et eaux souterraines.

Tableau 21 : sommaire statistique des paramètres mesurés in situ

	pH	CE (25°C)
Min	6,61	310
Max	7,38	5600
Moy	7,17	1212,33
Écart type	0,22	1024,08
CV %	3,06	84,47

4.2 Les éléments chimiques majeurs :

4.2.1 Cations :

4.2.1.1 Le calcium (Ca^{++}) : la teneur moyenne en Ca^{2+} dissoute dans les eaux souterraines est de 124,78 mg/l. Les valeurs maximales sont enregistrées au puits W2, W10 et W22 dont les concentrations sont respectivement 344.69, 264.53 et 216.44 mg/l. Les teneurs minimales sont enregistrées au puits W20, W15 et W3 dont les concentrations sont respectivement 24.05, 36.08 et 44,09 mg/l. 80 % des échantillons ont des concentrations en calcium varié entre 100 et 200 mg/l.

4.2.1.2 Le magnésium (Mg^{++}): la teneur moyenne en Mg^{2+} dissoute dans les eaux souterraines de la nappe de Collo est de 27,72 mg/l. en comparaison avec le calcium les eaux souterraines sont moins riches en Magnésium. Les teneurs varient entre 2,4 mg/l au puit W4 comme valeurs minimale et 124,32 mg/ enregistré au puit W2. Ce dernier puit caractérisé par une forte minéralisation à cause de leur situation très proche d'oued Cherka (oued Cherka reçoit les eaux usées de l'usine de transformation de liège et les eaux domestiques de l'agglomération de Ouled Maazouz).

4.2.1.3 Le sodium (Na^+) : Les teneurs en sodium présentent une distribution qui varie entre 9,66 mg/l au puit W20 et 132,72 mg/l au puit W10. Les concentrations les plus élevées sont observées aux rivages d'oued El Guebli et à l'embouchure d'oued Cherka. Cette forte concentration pourrait résulter d'un effet d'intrusion saline (relation nappe-rivière). Par contre, les teneurs les plus faibles sont observées au nord-ouest de la plaine. C'est-à-dire qu'elles n'ont pas encore subi une minéralisation. Toutefois, au cours de leur cheminement, elles peuvent subir une minéralisation au contact des argiles constituant le mur de l'aquifère. Ils peuvent donner du sodium par le phénomène d'échange de base, et ce en fixant un ion Ca^{2+} après libération de deux ions Na^+ .

4.2.2 Anions :

4.2.2.1 Les chlorures (Cl^-) : L'analyse des résultats des teneurs en chlorures révèle que la distribution spatiale est homogène avec celle des ions de Na^+ et la conductivité électrique. Les concentrations les plus élevées sont enregistrées aux puits W2 et W22 (437,25 et 337,25 mg/l respectivement) qui se situent aux rivages d'oued Cherka et oued el Guebli (ceci s'expliquer par le phénomène d'échange nappe-rivière).

4.2.2.2 Les sulfates (SO_4^{--}) : la teneur moyenne en SO_4^{2-} dissout dans les eaux souterraines est de 64 mg/l. la distribution spatiale des teneurs est homogène à l'exception du puits W2 avec un teneur de 740 mg/l. Les teneurs en sulfates augmentent de sud de la plaine vers le

nord, probablement influencé directement par l'eau de mer, mais resté moins abondant que les ions des chlorures.

4.2.2.3 Les bicarbonates (HCO_3^-) : L'ion de HCO_3^- est le plus fréquent dans la zone d'étude. Les teneurs varient entre 573,4 mg/l au puit W2 et 54,9 mg/l au puit W20 pour une valeur moyenne de 364 mg/l, provient principalement de l'altération de minéraux silicatés (socle kabyle métamorphique).

4.2.2.4 Les nitrates (NO_3^-) : Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. Sa présence dans les eaux souterraines est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques. La teneur moyenne des nitrates dans les eaux souterraines de la plaine de Collo est de 48,12 mg/l. Les valeurs maximales sont enregistrées au puits W4 et W5 avec 115,68 et 111,11 mg/l situé au centre de l'agglomération de Ouled Maazouz. Les teneurs en nitrates diminuent en allant vers le sud de la plaine, où les valeurs minimales atteignent 25,18 mg/l.

Tableau 22 Concentrations caractéristiques en éléments majeurs

	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type
$\text{Ca}^{++}(\text{mg/l})$	124.78	24.05	344.69	66.74
$\text{Mg}^{++}(\text{mg/l})$	27.72	2.4	124.32	23.33
$\text{Na}^+(\text{mg/l})$	52.27	9.66	132.72	33.08
$\text{Cl}^-(\text{mg/l})$	116.39	12.32	437.25	100.16
$\text{SO}_4^{--}(\text{mg/l})$	63.93	17	740	130.28
$\text{HCO}_3^-(\text{mg/l})$	364	54.9	573.4	154.56
$\text{NO}_3^-(\text{mg/l})$	48.12	25.18	115.68	26.78

4.3 Faciès chimiques

Le diagramme de Piper en figure (40) a été construit avec le logiciel DIAGRAMME (Simler, 2004), ceci afin de déterminer les faciès chimiques. En effet, ce diagramme permet de représenter sur un même graphique des nombreuses analyses autorisant des regroupements des faciès chimiques. La projection des résultats des analyses chimiques dans ce diagramme fait apparaître clairement deux grandes classes des eaux souterraines.

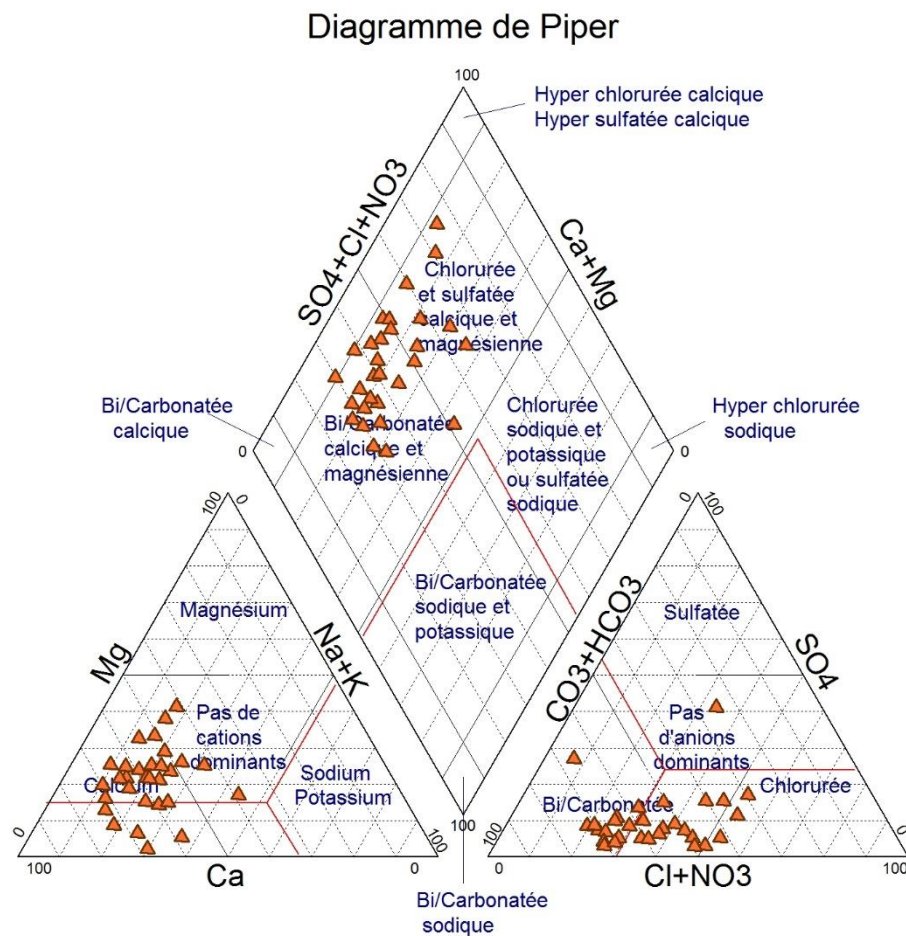


Fig. 40 Faciès chimique des eaux souterraines de la plaine de Collo (octobre 2015)

À partir de diagramme de piper nous remarquons, que 80% des échantillons appartient à un faciès bicarbonaté calcique, 13,33 % à un faciès chloruré calcique, et 6,66 % des échantillons qui restent appartient aux facies sulfatés calcique et bicarbonaté sodiques. Les eaux souterraines de type bicarbonaté calcique (Ca-HCO_3) sont liées à la dissolution des carbonates par les eaux météoriques. Elles se situent surtout dans les zones préférentielles de recharge, car les aquifères à nappe libre renferment des eaux souterraines moins âgées et moins minéralisées que les aquifères à nappe captive (dans la zone d'étude, plus de 70 % de l'aquifère est libre a semi-libre). Pour les eaux souterraines de type, Chloruré calciques ont une origine marine. Lorsque la contamination des eaux souterraines par l'eau de mer est faible (moins de 15 %), il y a un enrichissement en ions Na^+ et si le pourcentage de l'eau de mer augmente, l'eau de la nappe est de plus en plus enrichie en Ca^{2+} et s'appauvrit en Na^+ (Magaritz, M et Luzier, J.E., 1985). Le faciès initialement chloruré sodique devient Chloruré

calcique. La localisation des points d'eau ayant ce faciès en bordure des oueds de Cherka et Guebli met en évidence l'intrusion marine via ces deux oueds.

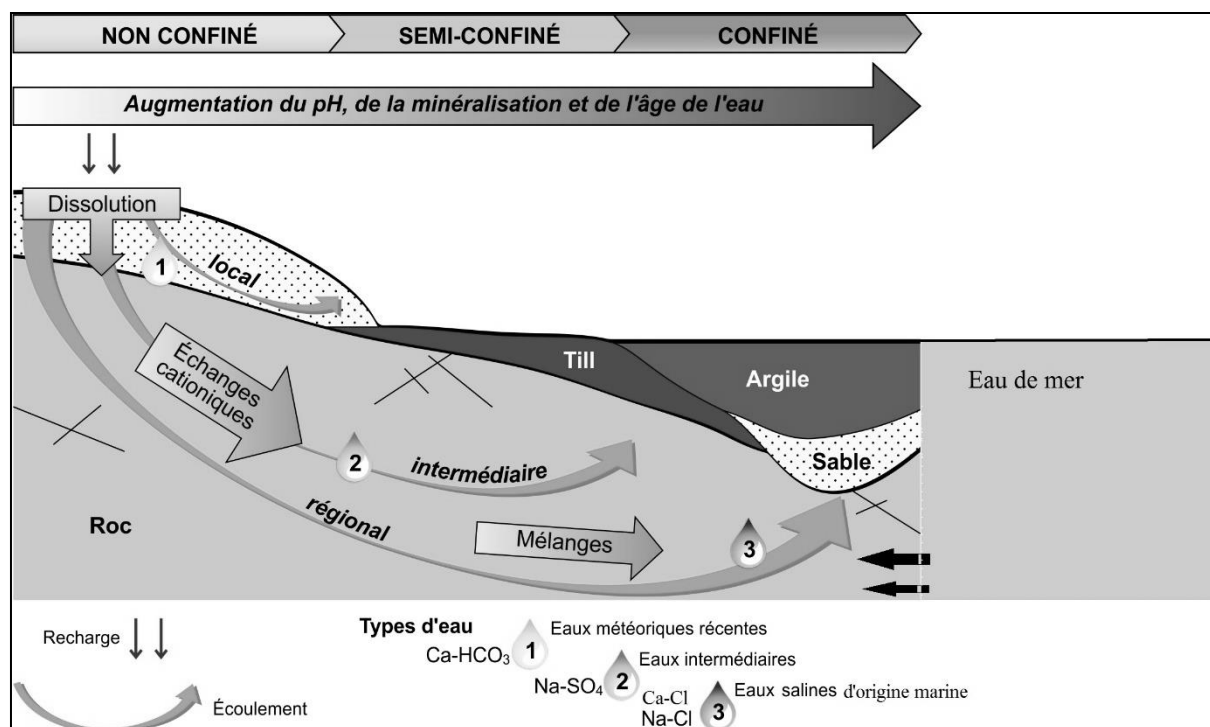


Fig. 41 Évolution géochimique des eaux souterraines

5 Les rapports caractéristiques

5.1 Le rapport Na^+/Cl^- : Fig.42

D'une manière générale, la présence de l'ion Cl^- et de l'ion Na^+ dans les eaux souterraines est attribuée à la dissolution de l'halite rencontrée dans les formations géologiques encaissantes. Mais dans le cas des aquifères côtiers il arrive que les ions de Cl^- et Na^+ aient une origine autre que naturelle, c'est-à-dire une origine marine.

La représentation graphique des teneurs en Na^+ en fonction de celles en Cl^- montre une bonne corrélation, ce qui met en évidence leurs origines communes. Toutefois on remarque un excès des Cl^- par rapport au Na^+ au puits W2, W22, W23, W29, et W9 qui est expliqué par l'intrusion saline de fait de leurs situations au rivage d'oued Guebli et oued Cherka. Les fortes teneurs en Na^+ par rapport au Cl^- au puits W10 sont dues aux phénomènes d'échange de base, car les argiles du substratum peuvent libérer des ions Na^+ après avoir fixé le Ca^{+2} .

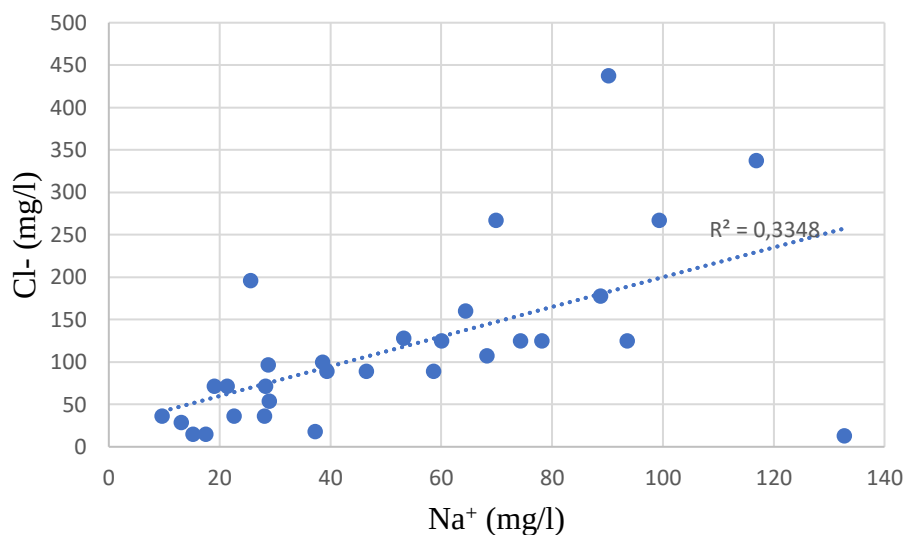


Fig. 42 Relation Na^+ et Cl^- des eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)

5.2 Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$: Fig.43

La représentation graphique des teneurs en Ca^{2+} en fonction de celles en Na^+ montre tendance de corrélation, ce qui met en évidence leurs origines communes. En remarque que 66 % des échantillons ont un excès de Ca^{2+} par rapport aux ions de Na^+ ce qui caractérise une dissolution de la calcite, et l'intrusion marine.

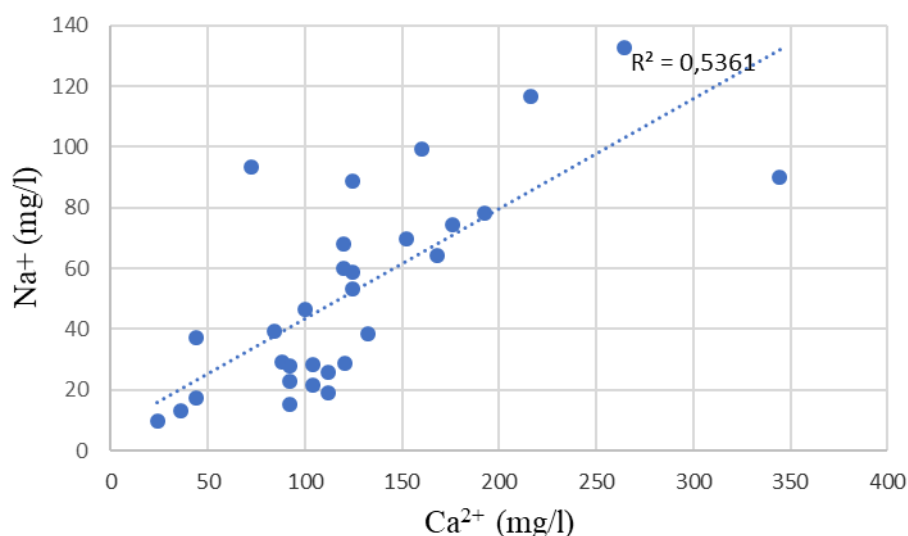


Fig. 43 Relation Na^+ et Ca^{2+} des eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)

5.3 Le rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} : Fig. 44

La représentation graphique des teneurs en Mg^{2+} en fonction de celles en Ca^{2+} (Fig. 32) met en évidence un excès en Ca^{2+} , lequel ne peut s'expliquer que par des phénomènes géochimiques (substitutions isomorphes aux niveaux des couches argileuses et marneuses qui constituent le substratum imperméable de la nappe et des échanges entre Ca^{2+} et Mg^{2+} lors des réactions de précipitation ou de recristallisation de la calcite (Edmunds et al, 1987). Ou bien due à un enrichissement par les ions de Ca^{2+} lorsque l'intrusion marine est importante (Magaritz, M et Luzier, J.E., 1985).

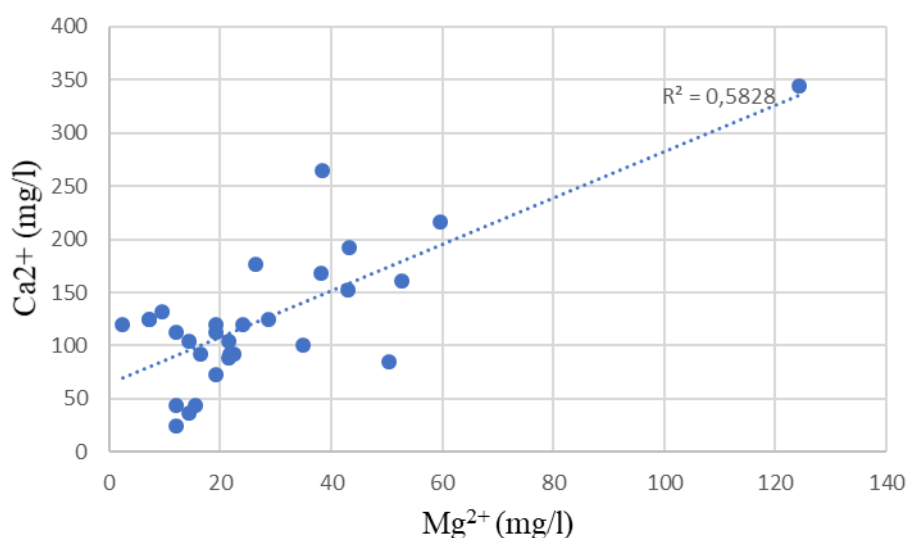


Fig. 44 Relation Na^+ et Ca^{2+} des eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)

5.4 Le rapport Ca^{2+}/HCO_3^- : Fig. 45

Les hydrogénocarbonates HCO_3^- et le calcium Ca^{2+} montrent une bonne corrélation dans les eaux souterraines à l'exception de deux points W2 et W10 (enrichissement des ions en Ca^{2+} par l'intrusion marine). Les teneurs élevées en hydrogénocarbonates s'expliquent par l'abondance de CO_2 produite par les plantes, et qui se dissout dans les eaux et les rendent plus agressives à l'égard de la calcite d'un côté et d'autre côté et la dissolution des minéraux silicatés (considéré comme des grandes consommatrices de CO_2) issue des sables et des marnes (les principaux constituants de l'aquifère de Collo).

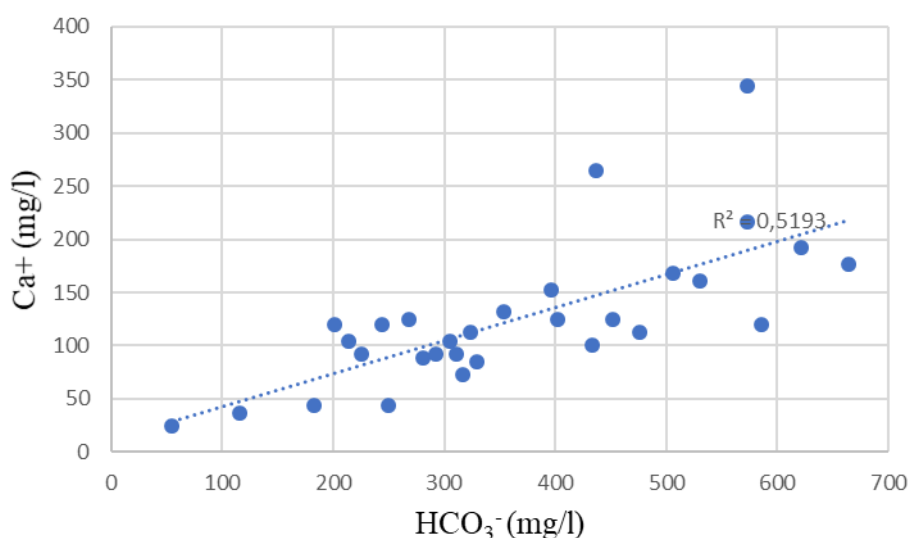


Fig. 45 Relation HCO_3^- et Ca^{2+} des eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)

5.5 Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$: Fig. 46

Généralement les ions de Ca^{2+} et SO_4^{2-} sont tous deux issus des formations sédimentaires évaporitiques. Les ions de sulfates SO_4^{2-} prennent son origine dans les formations gypsifères. La représentation graphique des deux éléments montre que 67 % des échantillons présentent un excès en Ca^{2+} par rapport aux sulfates. Seuls deux-points qui présentent une prédominance en SO_4^{2-} , W2 et W10 qui est probablement d'origine anthropique.

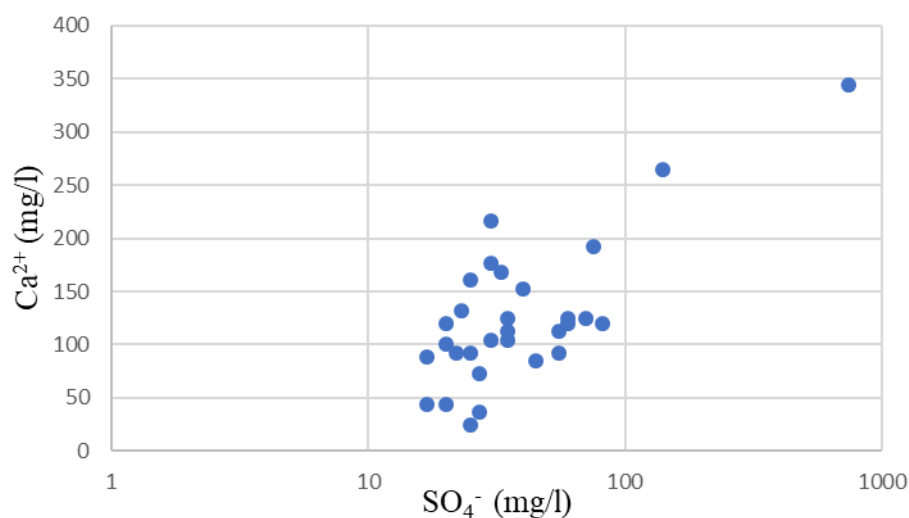


Fig. 46 Relation SO_4^{2-} et Ca^{2+} des eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)

6 Identification de l'origine de la salinité :

Les sources et mécanismes qui peuvent conduire à une salinisation des masses d'eaux sont multiples et liés aussi bien à des processus naturels qu'induits par l'homme. Dans cette partie l'identification de l'origine de salinité sera établie sur la base de classification de YELLE, 2003 (Tableau. 23).

Tableau.23 Critères d'identification de l'origine de la salinité (YELLE, 2003).

$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ $\text{Cl}^- / \text{Na}^+ = 18$	Marque de l'eau de mer (intrusion saline)
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} > 2$	Présence de gypse (CaSO_4) ou de calcite (CaCO_3)
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} = 1$	Présence de dolomie (CaMgCO_3)
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} < 1$	Marque de l'eau de mer (intrusion saline) ou échange de base
$\text{K}^+ / \text{Na}^+ = 1$	Terrain cristallin

Les résultats de classification des échantillons selon les critères proposés par YELLE, 2003 sont représenté au tableau (24), si dessous :

Tableau. 24 Classification des échantillons selon les critères proposés par Yelle, 2003.

Critère	Numéro d'échantillon
$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$	W2, W5, W20, W22 et W23
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} > 2$	W1, W3, W4, W5, W6, W7, W8, W9, W10, W11, W12, W13, W14, W16, W17, W19, W21, W22, W23, W24, W25, W26, W27
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} = 1$	W2, W15, W18
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} < 1$	-

Les résultats obtenus après la classification montrent que selon le rapport $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ les échantillons W2, W5, W20, W22 et W23 ont une salinité d'origine marine. Le rapport $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ montre que 90 % des échantillons acquérir leur salinité de la présence de gypse (CaSO_4) ou de calcite (CaCO_3) et 10 % seulement de la présence de dolomie (CaMgCO_3). Il faut signaler ici que ce rapport ne met pas en évidence l'intrusion saline pour cette étude.

7 LES MÉTAUX

Les valeurs utilisées comme normes sont fixées par le Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 et la directive du Conseil de l'Union européenne n°98/83/CE du 3 novembre 1998.

7.1 Le cuivre (Cu) : Fig. 47

Sur 30 points suivis, 07 échantillons présentent une concentration supérieure à la limite de quantification (2 mg/l). Les concentrations varient de 0,08 mg/l à 3,91 mg/l. La concentration la plus importante correspond au puit W10. Le cuivre est référencé comme un élément indésirable, mais sa toxicité n'est pas certaine. L'environnement géologique peut être une source de cuivre, surtout dans le cas d'eaux acides et en présence, en profondeur, de sulfures de cuivre plus ou moins oxydés. Mais généralement les caractéristiques chimiques du cuivre (pH, Eh, solubilité des minéraux, coprécipitation) n'autorisent pas l'existence de fortes concentrations dans les eaux naturelles. Celles-ci ne dépassent pas habituellement 1 mg/l, ce qui veut dire que les fortes teneurs en Cu sont d'origine anthropique.

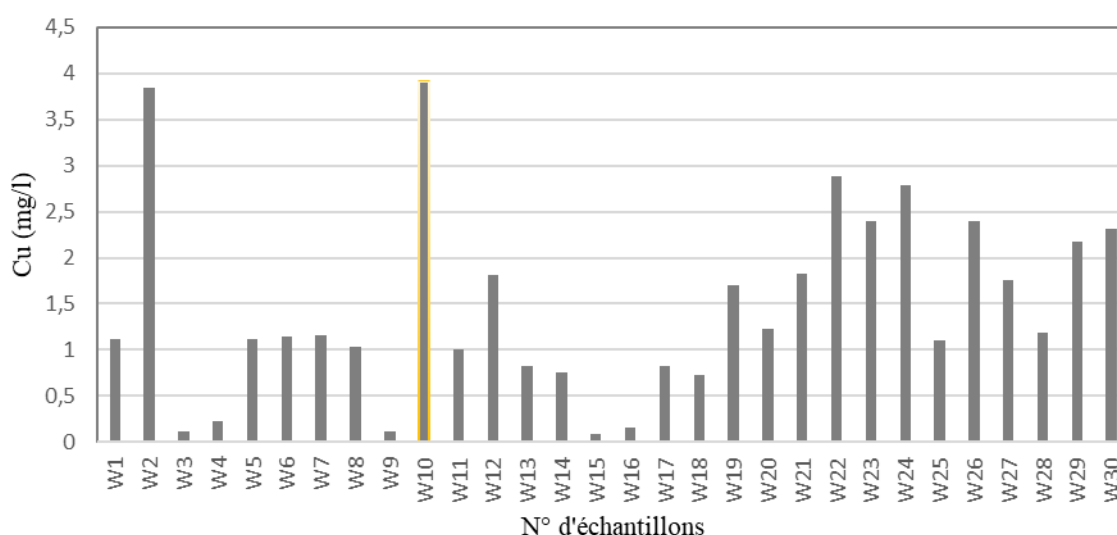


Fig. 47 Concentrations en cuivre pour les eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)

7.2 Le Plomb (Pb). Fig. 48

Dans les eaux souterraines, des concentrations en plomb d'origine naturelle supérieures au seuil analytique sont très rares, même si le contexte géologique en est riche. Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 0,01 mg/l. Sur 30 points de suivi seulement deux points présentent une

concentration supérieure à la limite de quantification il s'agit du puit W2 et W15. Le puit W2 est situé à côté d'une station de lavage et de graissage des véhicules où les d'eaux usées sont rejetés directement dans la plaine. Le puit W15 est situé près de station de distribution de carburant de Talleza (Naftal). Les carburants et notamment le benzène, sont lessivés par la pluie et s'infiltrent dans le sous-sol afin de parvenir dans les eaux souterraines.

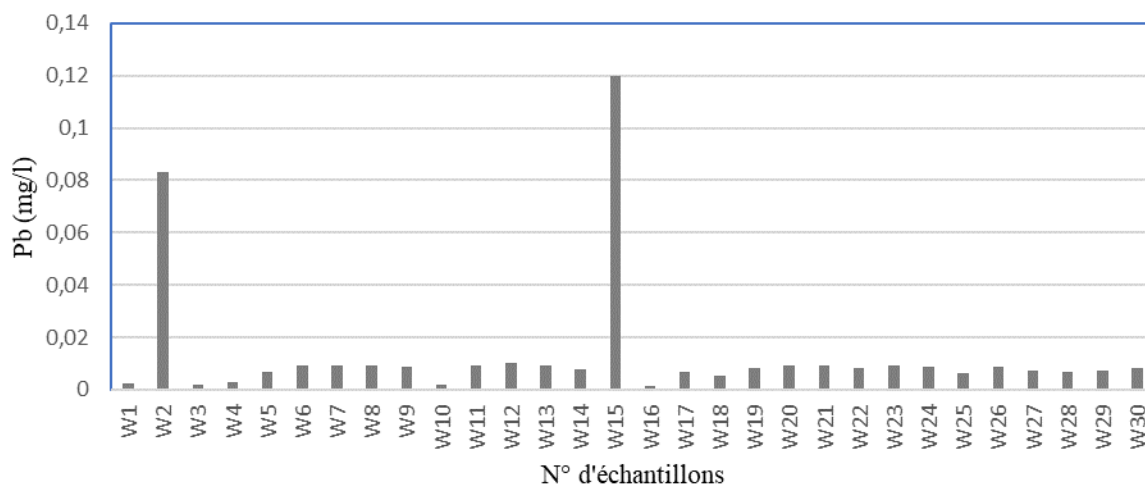


Fig.48 Concentrations en plomb pour les eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)

7.3 Le Zinc (Zn) : Fig. 49

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 3 mg/l. Les concentrations en Zinc dans les eaux souterraines varient entre 0,28 mg/l enregistré au puit W16 et 3,85 mg/l enregistrés au puit W2. Aucun des points suivis n'indique une concentration supérieure à la limite de quantification (3 mg/l) à part le puit W2.

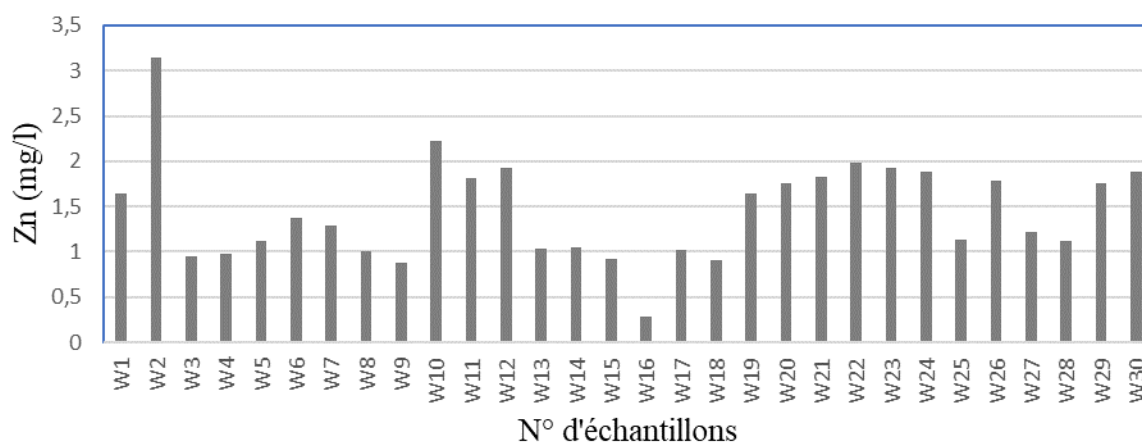


Fig. 49 Concentrations en Zinc pour les eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)

7.4 Le Fer (Fe) : Fig. 50

Les concentrations de Fer dans les eaux souterraines de la plaine de Collo sont faibles, elles varient entre 0,077 mg/l et 0,94 mg/l. La valeur la plus importante correspond au puit W24 Cette forte valeur est liée probablement à l'état d'oxydoréduction de l'eau.

Norme : la concentration en Fer, pour une eau destinée à la consommation humaine, ne doit pas dépasser les 30 mg/l

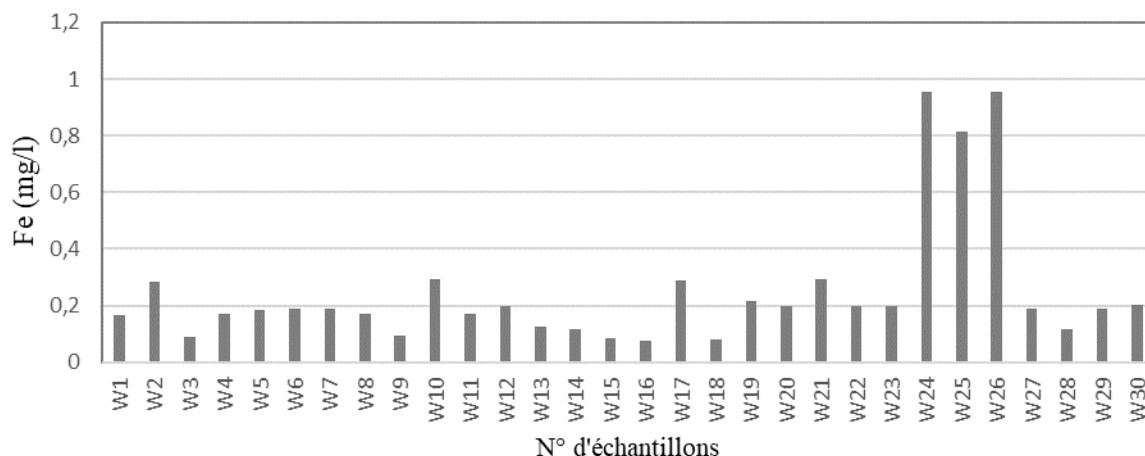


Fig. 50 : Concentrations en Fer pour les eaux souterraines de la nappe de Collo (octobre 2015)

8. Les composées azotées

8.1 Les Nitrates :

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique, leur présence dans une eau polluée indique que le processus d'autoépuration est déjà entamé.

À côté de la fertilisation azotée non rationnelle, d'autres facteurs tels que le degré de vulnérabilité de l'aquifère lié à la nature du milieu physique (caractéristiques hydrogéologiques, nature du sol et du sous-sol...) et les pratiques culturales (occupation du sol, irrigation, degré d'intensification, travaux du sol...) peuvent accentuer ou limiter le processus de pollution nitrrique. Ainsi, il suffit que certaines conditions soient simultanément remplies pour que le problème de migration des nitrates vers les eaux de nappe soit amplifié (Demare et al., 1995; Strebel et al., 1989).

Le diagnostic de la qualité nitrrique des eaux souterraines réalisé en octobre 2015 a montré que sur 30 puits (Fig. 51a), 10 présentent des teneurs dépassant la norme de potabilité de l'eau fixée à 50 mg/l. Les teneurs en nitrates varient entre 20 et 115 mg/l. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au nord-ouest de la plaine de Collo, cette zone contaminée

coïncidé avec l'agglomération de Ouled Maazouz la zone de recharge de la nappe d'eau souterraine. Cette dégradation semble être due essentiellement à l'activité humaine (les eaux usées domestiques, les fosses septiques) et la fertilisation azotée des zones agricoles avoisinantes, ainsi que le caractère physique la nappe dans cet endroit de la nappe (Sols très perméables).

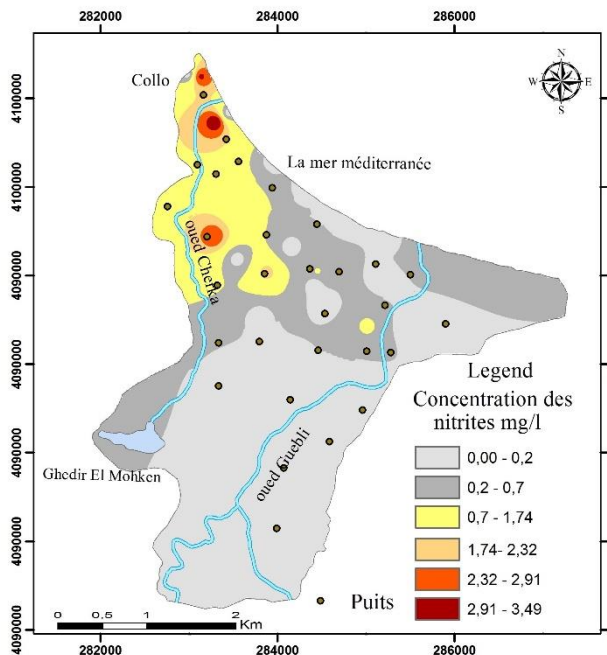


Fig. 51b Distribution spatiale des ions nitrites dans les eaux souterraines (Octobre, 2015)

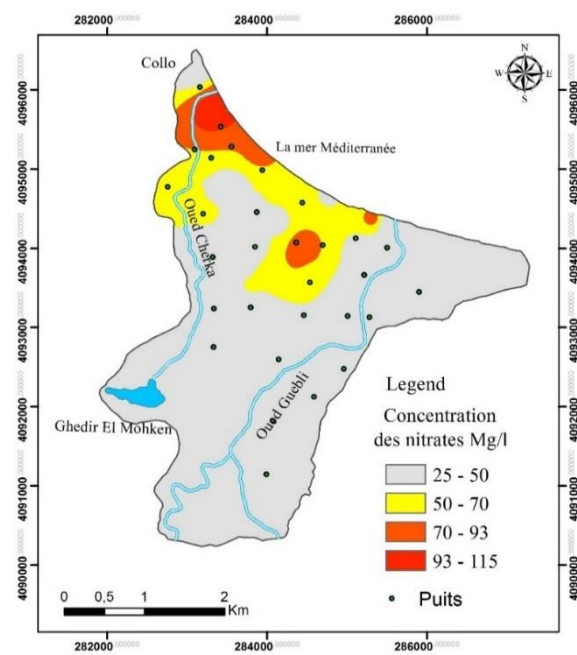


Fig. 51a Distribution spatiale des ions nitrates dans les eaux souterraines (Octobre, 2015)

8.2 Les nitrites

Les nitrites ou l'azote nitreux, représentent une forme moins oxygénée et moins stable, elle représente la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium et qui résulte de la réduction des nitrates par des bactéries spécifiques. 8 sur 30 puits ayant des concentrations supérieures à la norme (0,2 mg/l). Les teneurs en nitrites varient entre 0,00 mg/l et 3,05 mg/l et comme pour les nitrates les teneurs les plus élevées sont enregistrées au nord-ouest de la plaine.

8 Conclusion

L'analyse des données hydrochimiques indique que la grande majorité des échantillons appartiennent à un faciès dominant bicarbonaté calcique (80 %) en relation directe avec la nature lithologique du réservoir et de substratum de la nappe (très riche en minéraux silicatés).

L'étude hydrochimique et l'analyse des rapports caractéristiques montrent que l'apport de l'intrusion marine dans l'acquisition de minéralisation des eaux souterraines est faible. L'intrusion marine est remarquée seulement aux rivages des oueds Cherka et Guebli due aux échanges hydrauliques entre les eaux de surfaces et souterrains.

Les résultats des analyses des ETM (Cu, Pb, Zn et Fe) dans les eaux souterraines se sont révélés un excès de certains éléments notamment le cuivre. Le diagnostic de la qualité nitrique des eaux souterraines à montrer que la nappe de Collo est le siège d'une pollution diffuse par les deux formes d'azotes nitrate et nitrite surtout dans sa partie nord-ouest où les concentrations sont atteintes les 115 mg/l pour les nitrates et 3,05 mg/l pour les nitrites.

-

CHAPITRE VI

Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

1 Introduction :

Parmi les nombreux outils cartographiques à la disposition de l'hydrogéologue ou de toute autre personne responsable de la gestion de ressources en eaux souterraines ou de l'aménagement du territoire, la carte de vulnérabilité. Cette dernière est ainsi un des éléments-clés pour la protection et la gestion des ressources en eau.

Les cartes de vulnérabilité ont toutefois la particularité de représenter les paramètres dérivés directement des ressources en eaux et leurs éléments associés (niveaux piézométriques, sources, etc.), voire parfois non affiliés directement à l'eau souterraine (pente, type de sols, etc.). Elles permettent ainsi de représenter une multitude de données en provenance de sources variées, en les modulant en un nombre limité d'indices relatifs de vulnérabilité. Ces cartes sont également dépendantes du temps (à l'inverse des cartes géologiques, par exemple), dans le sens où les paramètres utilisés (profondeur du niveau piézométrique, infiltration, etc.) peuvent varier dans le temps.

2 Méthodologie :

Dans un premier temps, il est proposé de s'attacher à cartographier la vulnérabilité intrinsèque de la nappe de Collo en se basant sur les caractéristiques du milieu physique en relation avec la nappe, (critère invariable dans le temps). Cependant, deux critères de vulnérabilité spécifique (pollution agricole et intrusion marine) majeure dans le contexte de la nappe littorale de Collo seront également pris en compte (Fig. 52). Après la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique, il est important de faire une évaluation de risque des eaux souterraines à la pollution. Dans cette étude on a utilisé l'approche européenne COST 620 basée sur la vulnérabilité et les dangers recensés dans la zone d'étude (Chapitre VII).

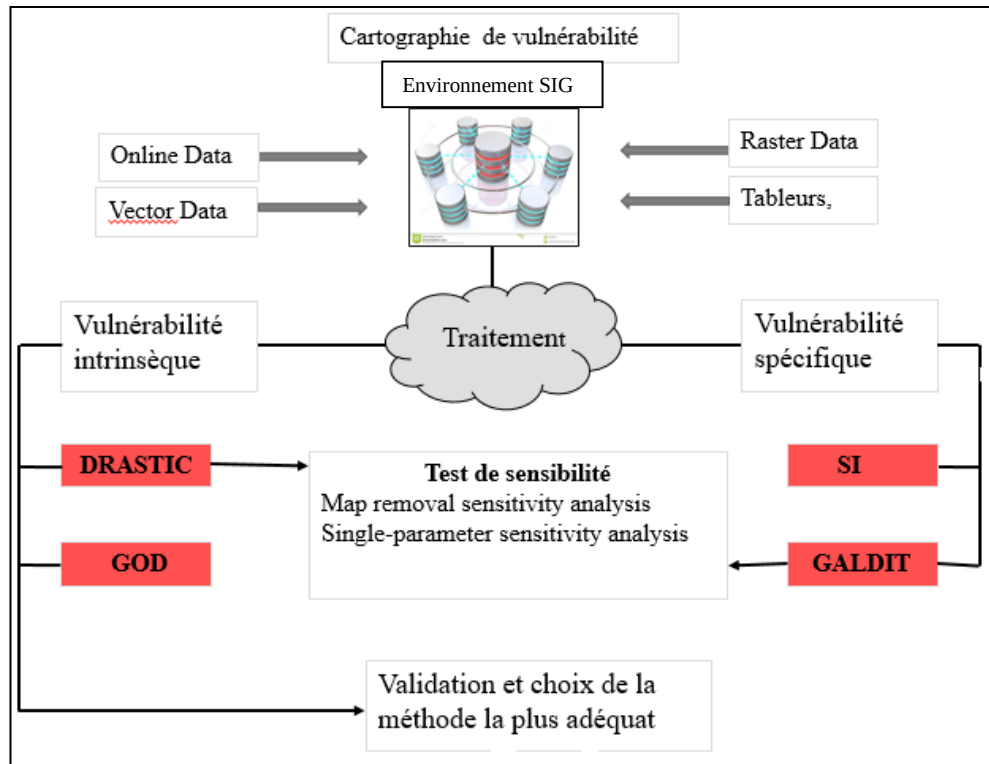


Fig. 52 La démarche méthodologique proposée

2.1 Choix des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :

Dans cette étude, pour rendre compte de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique les modèles DRASTIC, GOD, SI et GALDIT ont été appliqués. Ils ont été proposés à partir de l'analyse du contexte hydrogéologique de la plaine. Les critères sur lesquels reposent ces méthodes (tableau 25), représentent les facteurs du transfert de substances polluantes depuis la surface vers les eaux souterraines.

Tableau 25 : Méthodes et critères de vulnérabilité intrinsèque et spécifique proposés

	Vulnérabilité intrinsèque		Vulnérabilité spécifique	
	DRASTIC	GOD	GALDIT	SI
profondeur de la nappe	X	X	X	X
Recharge nette	X			X
Lithologie de l'aquifère	X	X	X	
Sol (Texture)	X			X
Topographie	X			X
Zone non saturée	X	X		
Perméabilité (conductivité hydraulique)	X		X	
Occupation du sol				X
État actuel de biseau salé			X	
Distance perpendiculaire à la cote			X	

La construction des cartes de vulnérabilité comprend les étapes suivantes :

- Recueil des données relatives à chaque critère.
- Rassemblement des données en classes et indexation des classes.
- Cartographie de chaque critère.
- Pondération des critères.
- Calcul de l'indice de vulnérabilité et reclassification

En raison de la masse très importante de données nécessaires au travail, nous avons mis en place des traitements automatisés dans un environnement SIG où la combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères.

2.2 Logiciels utilisés :

Dans l'étude de la vulnérabilité de la plaine de Collo le logiciel ArcGis version 10.1 a été utilisé. ArcGIS est une suite de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute, Inc.).

ArcGIS Desktop comprend une suite d'applications intégrées : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox. À l'aide de ces trois applications, on peut effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée.

Tableau 26 Sources de données brutes et mode de traitement de chaque paramètre

Paramètre	Source de données	Type de données	Mode de traitement
Profondeur de la nappe	Compagne piézométrique sur 30points de mesures (Novembre 2015)	Point	Interpolation
Recharge nette	Études hydroclimatiques (P, ETP) (1970-2014)	Point	Interpolation
Lithologie de l'aquifère	Cartes géologiques 1/50000 Coupes lithologiques des forages (DHW) Études géophysiques(CGG)	Polygone	Interpolation
Sol (Texture)	Cartes pédologiques	Polygone	Digitalisation
Topographie	Cartes des pentes de la région MNT	Polyline	Digitalisation
Zone non saturée	Cartes géologiques 1/50000 Coupes lithologiques des forages (DHW) Études géophysiques (CGG)	Polygone	Interpolation
Perméabilité (conductivité hydraulique)	Études hydrogéologiques Essais par pompages	Points	Interpolation
Occupation du sol	Plan d'occupation du sol POS (2014) Imagerie satellitaire	Polygone, point, polyline	Digitalisation
État actuel de biseau salé	Analyse Hydrochimique (Novembre 2015)	Point	Interpolation
Distance perpendiculaire à la côte	Carte topographique 1/25000	polyline	Digitalisation

2.3 Les données à disposition : Tableau (26)

Dans ce travail, nous avons utilisé une représentation de données en mode vecteur. Les cartes sont obtenues soit par digitalisation des cartes existantes soit par interpolation de données ponctuelles.

L'interpolation est la procédure qui permet d'estimer la valeur d'une variable dans un endroit déterminé, à partir d'un certain nombre de points de mesure, pour la calculer en chaque point de la zone étudiée. Plusieurs méthodes d'interpolation, déterministes et géostatistiques, sont utilisées pour la spatialisation des données ponctuelles telles que la méthode IDWA (Inverse Distance Weighted Averaging), la méthode spline (splining), la méthode de Thiessen, le krigeage et la méthode de triangulation.

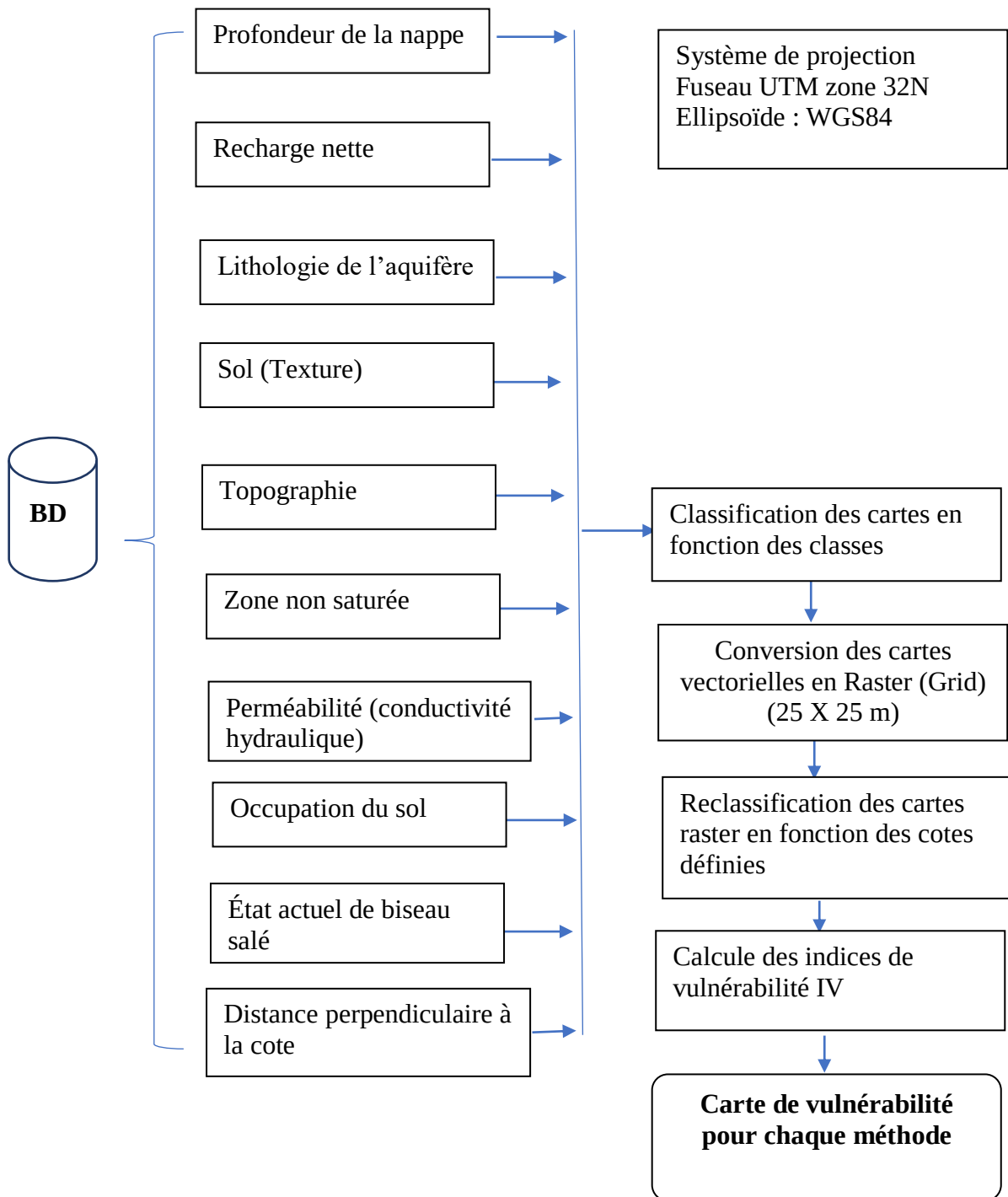


Fig. 53 Modèle conceptuel des données pour la réalisation de la carte de vulnérabilité par les méthodes proposées.

3 Description des méthodes retenues et applications

3.1 La méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC, qui fait partie du groupe des classes pondérées, est un système qui a été développé par 'The U.S. Environmental Protection Agency (US EPA)' et le 'National Water Well Association (NWWA)', en 1987 comme moyen pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution.

Bien qu'il ne soit pas initialement conçu pour les Systèmes d'Information Géographiques, ce modèle repose sur une analyse spatiale classique largement répandue dans les SIG. l'objectif de DRASTIC est de donner une méthodologie standard qui donne des résultats fiables pour les efforts de protection des eaux souterraines.

DRASTIC génère un indice ou 'score' pour le potentiel de pollution des ressources en eau souterraine. Cet indice s'étale sur intervalle d'entiers allant de 23 à 230. il faut noter que la vulnérabilité à la pollution est plus importante pour des notes plus élevées.

La méthode DRASTIC utilise sept paramètres hydrogéologiques : la profondeur du plan d'eau de la nappe souterraine [D], la recharge nette [R], la nature lithologique de l'aquifère [A], la texture du sol [S], la topographie -pente du terrain- [T], l'impact de la zone non saturée [I] et enfin la conductivité hydraulique ou perméabilité de la zone saturée [C].

Dans le SIG, chaque paramètre est noté sur une couche en lui affectant un coefficient correspondant au poids du paramètre. Ensuite, ces couches sont superposées sur une couche résultat où sera calculé l'indice DRASTIC dit 'DRASTIC Pollution Index (**DPI**)'. Les couches superposées devront évidemment avoir les mêmes caractéristiques cartographiques à savoir : un même système de projection, les mêmes unités de longueur, la même étendue géographique et aussi la même résolution, car tous les calculs se feront sur le format matriciel.

Le site ayant le DPI le plus grand sera considéré le plus susceptible à une éventuelle contamination ou pollution.

3.1.1 Les paramètres du modèle DRASTIC

Le tableau suivant (27) résume les propriétés de chaque paramètre et le poids qui lui est affecté et qui traduit son influence dans **DPI**.

Tableau. 27 : Paramètres utilisés par le modèle DRASTIC

Symbole	Paramètre	Propriétés	Poids
D	Profondeur de la nappe	Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre la surface piézométrique.	5
R	Recharge nette	Véhicule principal pour le transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé.	4
A	Lithologie de l'Aquifère	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand.	3
S	Sol	Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.	2
T	Topographie	Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissèlement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible,	1
I	Zone non saturée	Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains qui la constituent. La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable (graviers, sables grossiers ...)	5
C	Perméabilité	Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide.	3

3.1.2 Le système de notation appliqué

Pour chacun des paramètres DRASTIC, une note est affectée sur une échelle entière allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Pour un paramètre donné, une note basse implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution et vice-versa.

L'échelle étant entière (discrète), il est donc naturel que les valeurs obtenues pour chacun des paramètres soient regroupées en classes ayant chacune un nombre unique.

Les tableaux suivants montrent les notes typiques attribuées à chacun des sept paramètres :

Tableau. 28 Classes et notes retenues pour D

<i>Classe (m)</i>	<i>Note</i>
0 – 1.5	10
1.5 – 4.5	9
4.5 - 9	7
9.0 – 15.0	5
15 - 23	3
23 - 30	2
> 30	1

Tableau. 29 Classes et notes retenues pour R

<i>Classe (mm)</i>	<i>Note</i>
0 - 50	1
50 - 100	3
100 - 175	6
175 - 225	8
> 225	9

Tableau. 30 Classes et notes retenues pour A

Classé	Note	Note typique
Massive shale	1 à 3	2
Métamorphique	2 à 5	3
Métamorphique Altéré - grès	3 à 5	6
Calcaire massif	4 à 9	8
Grès massif	4 à 9	6
Sable et gravier	4 à 9	8
Basalte	2 à 10	9
Calcaire Karstique	9 à 10	10

Tableau. 31 Classes et notes retenues pour S

<i>Classe</i>	<i>Note</i>
Mince ou absent	10
Graviers	10
Sables	9
Limons sableux	6
Limons	4
Limons silteux	3
Argiles	1

Tableau. 32 Classes et notes retenues pour T

<i>Plage de la pente(en degré)</i>	<i>Note</i>
0 à 2	10
2 à 6	9
6 à 12	5
12 à 18	3
> 18	1

Tableau. 33 Classes retenues pour I

<i>Nature lithologique</i>	<i>Note</i>	<i>Note typique</i>
Silt et argile	2 à 6	3
Shale	2 à 6	3
Calcaire	2 à 5	3
Grès	2 à 7	6
Sable et gravier avec passage silt et argile	4 à 8	6
Sable et gravier	4 à 8	8
Basalte	2 à 10	9
Calcaire Karstique	8 à 10	10

Tableau. 34 Classes et notes retenues pour C

<i>Plage de la perméabilité (en m/s)</i>	<i>Note</i>
$1.5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-5}$	1
$5 \cdot 10^{-5} - 15 \cdot 10^{-5}$	2
$15 \cdot 10^{-5} - 33 \cdot 10^{-5}$	4
$33 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$	6
$5 \cdot 10^{-4} - 9.5 \cdot 10^{-4}$	8
$> 9.5 \cdot 10^{-4}$	10

3.1.3 DRASTIC Pollution Index (DPI)

Après avoir défini les différentes classes pour chacun des paramètres déjà cités, il est alors possible de calculer l'indice DRASTIC.

L'indice, noté I, est la somme des notes DRASTIC obtenues pour chacun des sept paramètres, pondérés par les coefficients respectifs de ces derniers. La formule est la suivante :

$$I = r_D N_D + r_R N_R + r_A N_A + r_S N_S + r_T N_T + r_I N_I + r_C N_C$$

Où:

- Les r_i sont les poids des paramètres DRASTIC
- Les N_i sont les notes des paramètres DRASTIC

3.1.3.1 Profondeur de la nappe : Fig. 54

La profondeur de la nappe représente la distance verticale traversée par un contaminant à la surface du sol pour atteindre la nappe. Généralement, la protection

potentielle de l'aquifère augmente avec la profondeur de la nappe. Ce paramètre a été obtenu par interpolation sur 30 puits. Dans un premier temps on a utilisé la méthode krigage pour obtenir des courbes d'isoprofondeurs. Par la suite, on a utilisé la méthode de triangulation pour transformer ces courbes en un MNT de profondeur de la nappe. La variabilité spatiale de la profondeur de la nappe est représentée selon deux classes allant de 1,5 à 6 mètres.

La majeure partie de la nappe est située entre 1.5 et 4.5 mètres de profondeur. Cette profondeur représente 64,6 % de la superficie totale de la région.

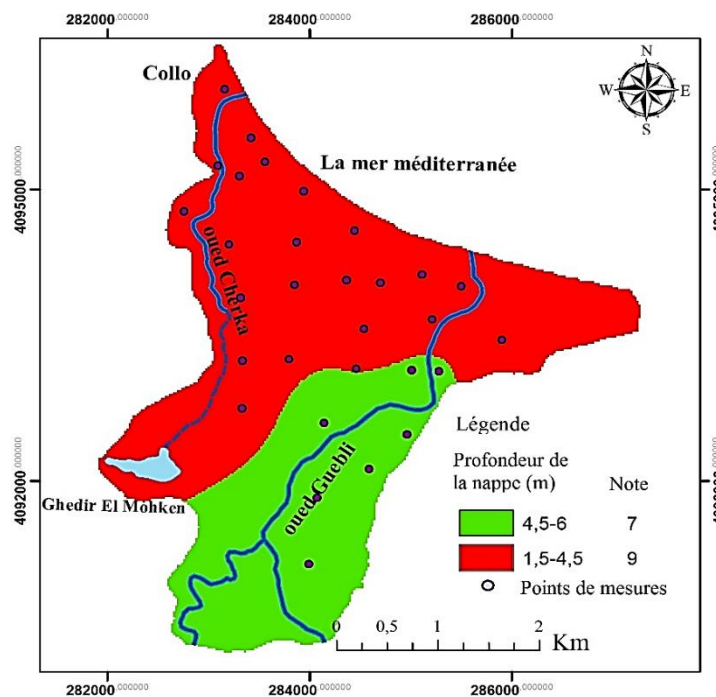


Fig. 54 Profondeur de la nappe dans la zone d'étude

3.1.3.2 Recharge nette R : Fig. 55 :

La recharge nette définie la quantité d'eau de précipitation qui atteint l'aquifère. Le taux d'infiltration de cette fraction d'eau guide le transport des contaminants dans le sol jusqu'à la zone saturée. Le calcul la fraction infiltrée se fait par plusieurs méthodes selon la nature de l'aquifère étudié Karstiques (Al-Adamat et al, 2003) ou poreux (Babiker et al, 2004) et le type du climat qu'il caractérise la région. Dans la région de Collo, la nappe est rechargée directement par infiltration des eaux météoriques. La recharge annuelle nette correspond à la lame d'eau infiltrée au sous-sol.

La méthode utilisée pour élaborer la carte de la recharge nette de la nappe de Collo est celle de Williams and Kissel (1991). La recharge est obtenue selon ce procédé avec les équations suivantes correspondant à différents groupes hydrologiques de sols :

$R = (P - 10.28)^2 / (P + 15.43) \rightarrow$ groupe hydrologique A.

$R = (P - 15.05)^2 / (P + 22.57) \rightarrow$ groupe hydrologique B.

$R = (P - 19.53)^2 / (P + 29.29) \rightarrow$ groupe hydrologique C.

$R = (P - 22.67)^2 / (P + 34.00) \rightarrow$ groupe hydrologique D.

Où P est la somme des précipitations annuelles et irrigation, exprimée en pouces. Les quatre groupes hydrologiques A, B, C et D (Viessmann et al., 1977) correspondent aux types de sols classés en fonction de leur infiltration:

- Groupe A: les sols qui ont un taux d'infiltration très élevé même si elles sont complètement mouillées
- Groupe B: Les sols avec une vitesse d'infiltration modérée lorsqu'il est complètement mouillé.
- Groupe C: les sols caractérisés par une vitesse d'infiltration lente lorsqu'il est complètement mouillé
- Groupe D: les sols caractérisés par une vitesse d'infiltration très lente lorsqu'il est complètement mouillé

Dans la zone d'étude la recharge est de l'ordre de 215,9 mm/an au nord de la plaine, au sud 106,9 mm/an et à l'ouest la recharge est de l'ordre de 45,46 mm/an ou les sols sont à faibles perméabilités.

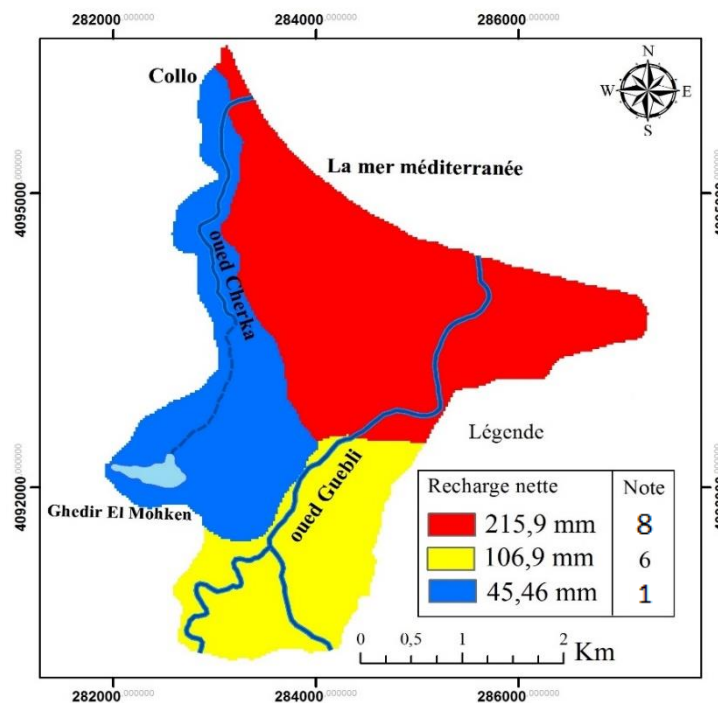


Fig. 55 Recharge nette de la nappe de Collo

3.1.3.3 Lithologie de l'aquifère A : Fig. 56 :

La lithologie de la zone saturée est le responsable du contrôle de l'écoulement des eaux souterraines et qui définit le chemin des polluants et le temps du processus d'atténuation (WWRC, 1988). Une augmentation du temps du voyage du polluant dans l'aquifère, résulte plus d'atténuation du contaminant. En général plus la taille des grains est élevée, plus la perméabilité augmente et la capacité d'atténuation ce diminué.

Ce paramètre est déterminé par la corrélation des coupes lithologiques et les coupes géoélectriques (CGG 1965). La répartition spatiale des niveaux réservoir de la nappe de Collo montre trois classes lithologiques :

- Sable et gravier : couvrant 33,2 % de la surface totale (en rouge)
- Sable : couvrant 45,3 % de la surface totale (en jaune)
- Limon sableux : couvrant : couvrant 21,4 % de la surface totale (en bleu)

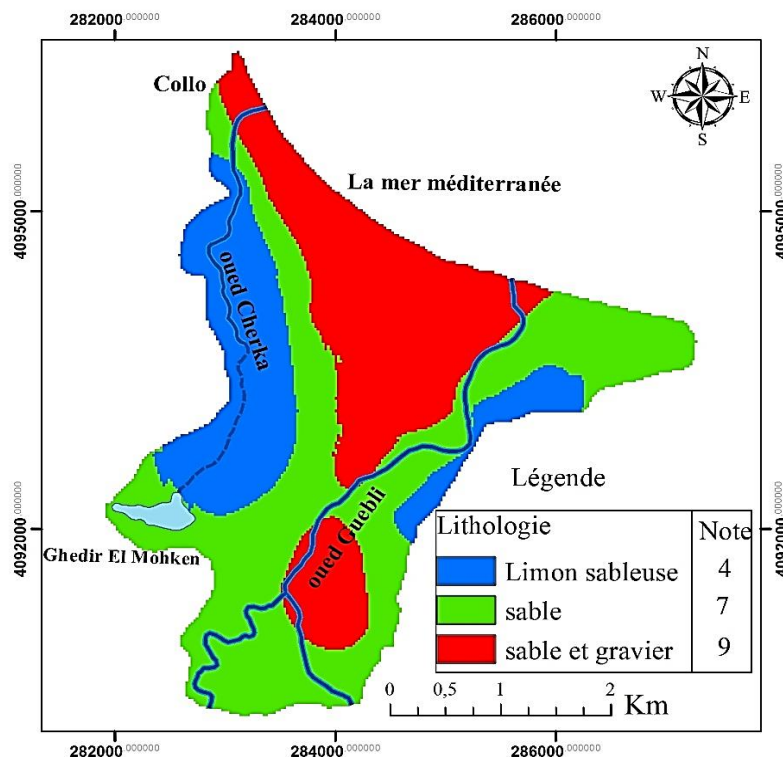


Fig.56 Lithologie de l'aquifère de Collo

3.1.3.4 Type du sol S : Fig. 57 :

Représente la partie de la zone non saturée caractérisée par une activité biologique, ce qui diminue le potentiel de la pollution (Jasrotia et Singh, 2005). L'épaisseur du sol détermine le temps de résidence des contaminants qui se trouve en surface, plus le temps de séjour est élevé plus les processus d'interaction biologiques, chimiques et physiques diminuent le potentiel de pollution.

La présence des matériaux fine réduit l'infiltration et par conséquent réduit le pouvoir polluant. Les sols riches en argile et limon ont une grande capacité de rétention d'eau et donc diminuent le temps de migration des polluants à travers la zone non saturés (Ben Kabbour et al., 2006). La figure 45 montre la répartition spatiale des sols de la région d'étude.

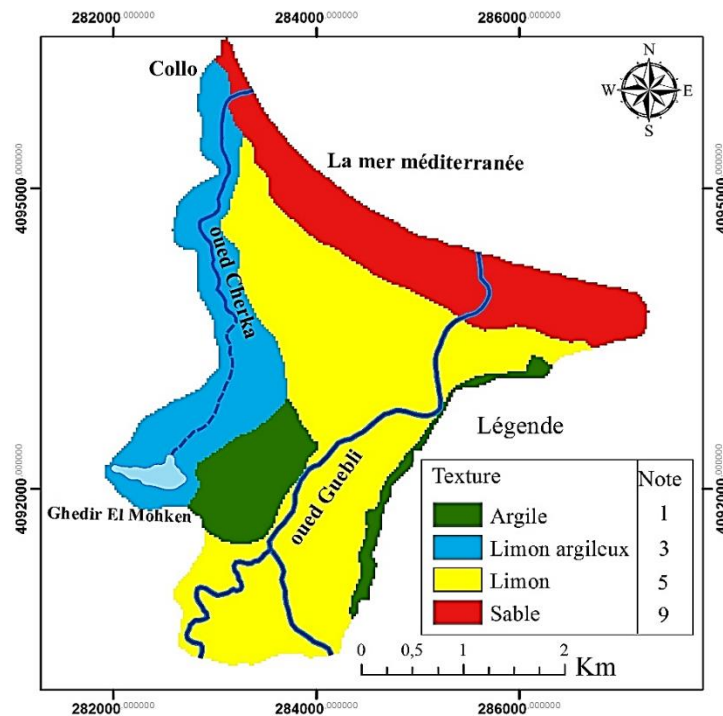


Fig.57 Texture des sols de la plaine de Collo

3.1.3.5 Topographie T : Fig. 58

La topographie se réfère à la pente de la surface du sol. Les pentes qui favorisent l'infiltration sont généralement associées à une grande vulnérabilité. Plus la pente est grande, moins est le potentiel de pollution due à l'augmentation du ruissèlement et le taux d'érosion. Lorsque la pente est inférieure à 2% le ruissèlement est faible ce qui favorise l'infiltration. Par contre lorsque la pente est supérieure à 18 % les eaux de précipitation se ruissèlent

facilement et transférés les polluants. Pour le paramètre topographie, une carte matricielle du pourcentage de pente est réalisée à partir du modèle numérique de terrain SRTM (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) avec maillage de 25m X 25m.

La carte matricielle obtenue montre la prédominance des terrains à pente inférieurs à 2%.

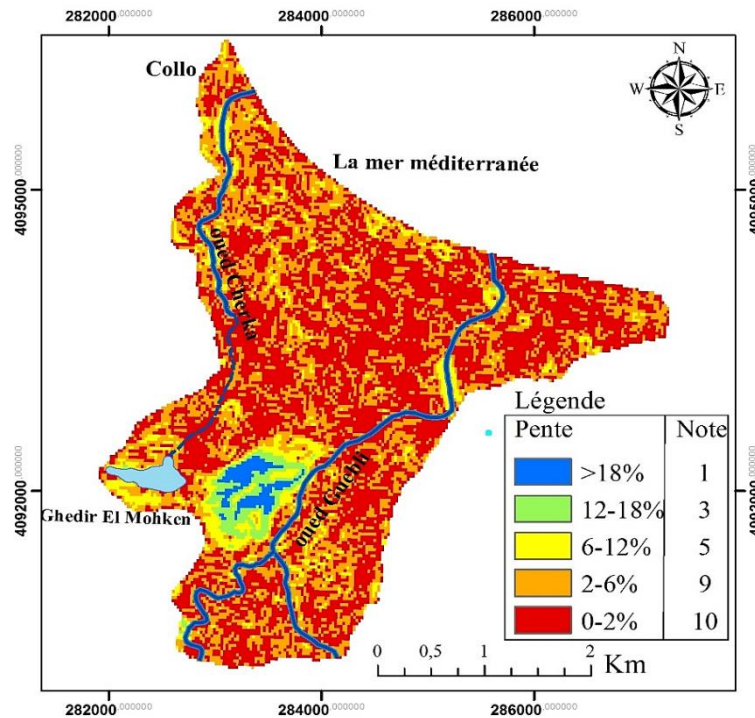


Fig.58 : Carte de pente de la plaine de

3.1.3.6 : Zone non saturée I : Fig. 59 :

La zone non saturée est définie comme la fraction entre la nappe et la surface du sol où les pores sont partiellement saturés en eau. La perméabilité de cette zone non saturée contrôle la circulation des polluants et leur arrivée à la nappe. La plupart des processus physicochimiques qui ont lieu dans cette zone sont influencés par son épaisseur. L'infiltration et la dispersion des contaminants sont guidées par les caractéristiques lithologiques des couches qui contrôlent leurs chemins et leurs trajectoires en subsurface.

L'évaluation de ce variable est basée sur les profils hydrogéologiques et la géophysique (CGG 1965). Dans la zone d'étude, la zone vadose est essentiellement composée par des sables et des limons sableux dans sa partie nord et sud, et des argiles dans sa partie ouest.

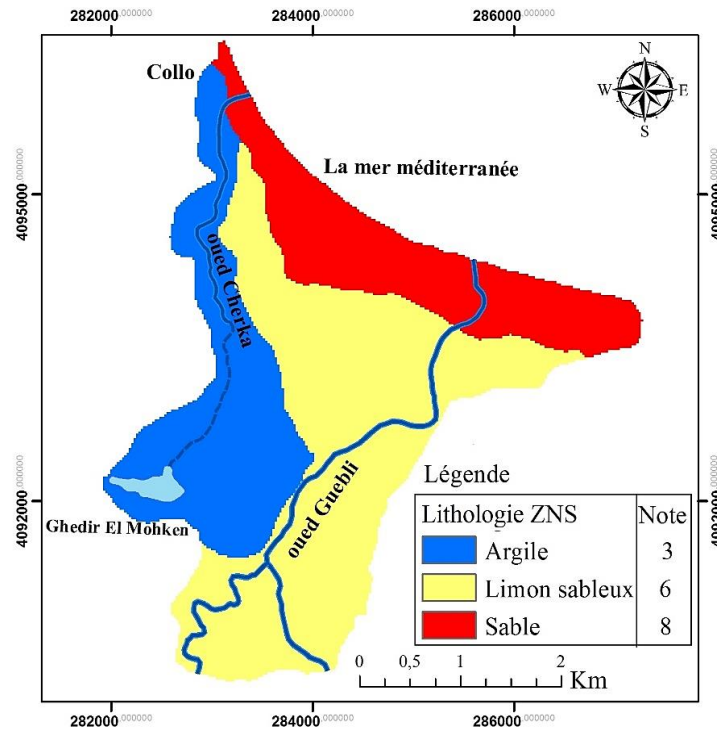


Fig.59 Carte de la lithologie de la zone vadose de la nappe de Collo

3.1.3.7 Conductivité hydraulique C : Fig. 60 :

La conductivité hydraulique C ou la perméabilité se réfère à la capacité de l'aquifère à transmettre de l'eau, et par conséquent elle commande la vitesse et le devenir des contaminants (Al-Zabet, 2002). Les valeurs de la conductivité hydraulique sont contrôlées par les propriétés de la nappe. Quand la perméabilité augmente, la vitesse d'écoulement de l'eau augmente, et par conséquent les contaminants seront déplacés plus rapidement.

La perméabilité est calculée par les essais par pompage et après le calcul de la transmissivité qui décrit la combinaison de la conductivité hydraulique (C) et l'épaisseur (D) de la nappe ($C = T / D$). En outre, le calcul de C a été basé sur la capacité spécifique, lorsque les données de transmissivité ne sont pas disponibles. La capacité spécifique est définie comme étant le rapport de décharge (Q) de rabattement (s) au rabattement pendant un temps donné et il est lié à la transmissivité par la formule $T = b (Q / s)$, où b est un coefficient dépendant de type de l'aquifère. Il varie entre 1,2 et 1,6 (Todd, 1980).

La conductivité hydraulique dans la zone d'étude est comprise entre $2,6 \cdot 10^{-3}$ et $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s au nord et au centre de la plaine. A l'ouest la perméabilité est inférieure à $8 \cdot 10^{-5}$ m/s. Les différentes classes obtenues sont pondérées de 2, 6 et 10 selon le modèle DRASTIC.

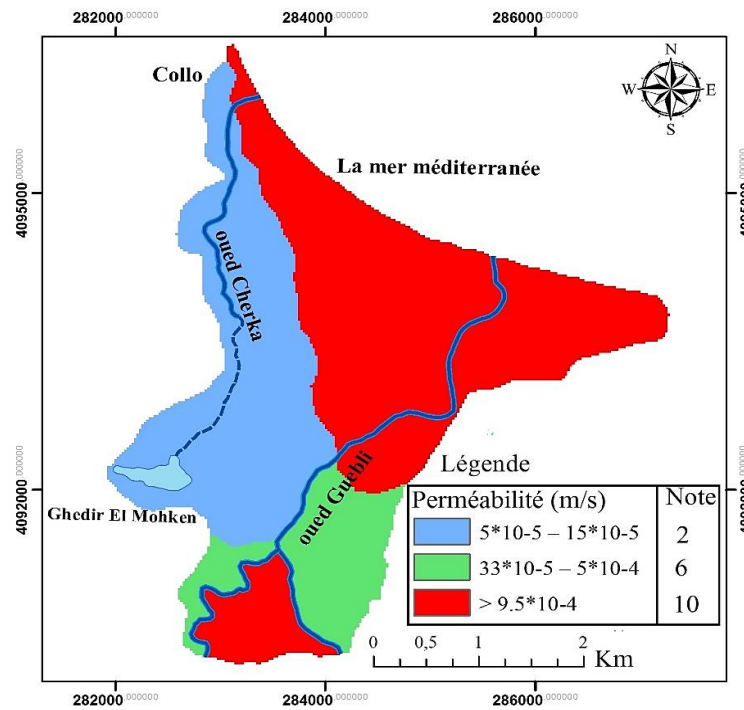


Fig.60 Carte des conductivités hydrauliques de la plaine de Collo

3.1.4 Calcul de l'indice DRASTIC (DPI) : Fig. 61

Les valeurs de l'indice de vulnérabilité sont calculées en utilisant la formule DRASTIC décrite à la définition de la méthode dans un environnement SIG.

Il est souligné que la méthode DRASTIC originale (Aller et al., 1987) ne fournit pas les plages de classification de vulnérabilité, mais permet à l'utilisateur de classer l'indice de vulnérabilité en utilisant leur propre connaissance du terrain et de l'expérience hydrogéologique (Gogu et al., 2003). La classification de l'indice de vulnérabilité couramment définit cinq classes (Civita et De Régibus, 1995). Tableau 35.

Tableau. 35 : Les critères d'évaluation de degré de vulnérabilité DRASTIC

Degré de vulnérabilité DRASTIC	Index de vulnérabilité DPI
Très faible	1-60
Faible	61-120
Modéré	121-160
Forte	161-200
Très forte	>200

La carte de vulnérabilité obtenue montre quatre classes de vulnérabilité :

- **Vulnérabilité très forte** : dans la partie nord de la plaine couvrant une superficie de 11,83 % de la zone d'étude. Cette vulnérabilité est associée surtout à la faible profondeur de la nappe et la lithologie de la zone non saturée pratiquement sableuse.
- **Vulnérabilité forte** : couvrant 31,2 % de la zone d'étude et occupe le centre et le nord-est de la plaine. La zone saturée est sableuse à sableux limoneuse.

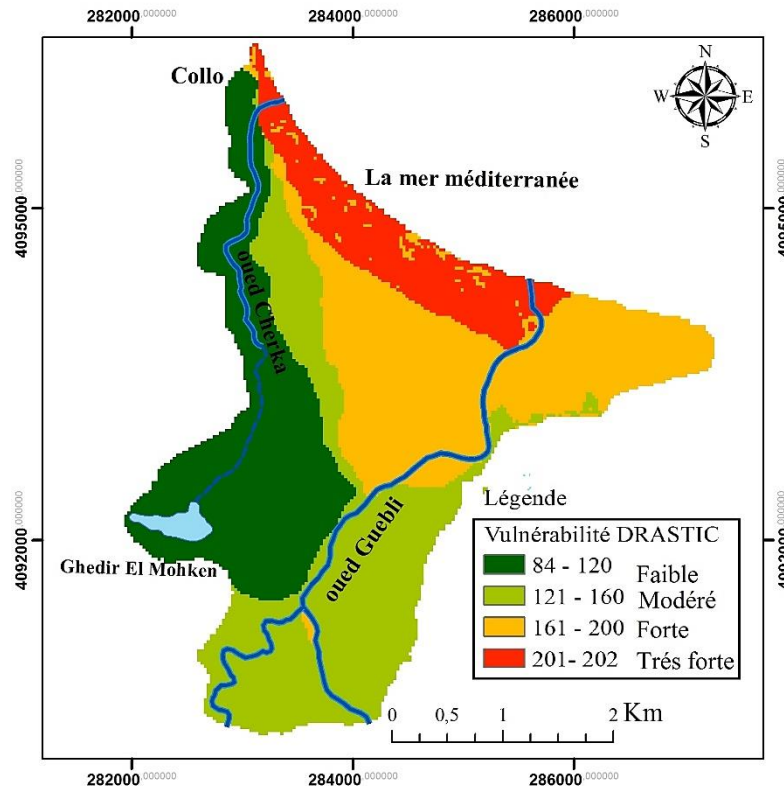
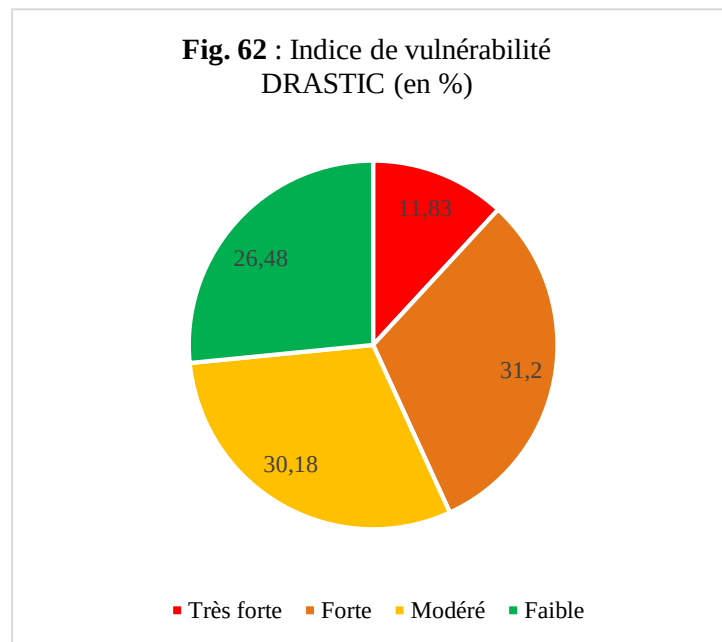


Fig.61 : Carte de vulnérabilité de la nappe de Collo par la méthode DRASTIC

- **Vulnérabilité modérée** : couvrant 30,18 % de la superficie totale de la zone d'étude et localiser surtout au sud.
- **Vulnérabilité faible** : couvrant 26,48 % de la zone d'étude. Elle est localisée à l'ouest de la plaine. Cette vulnérabilité est associée à la couverture argileuse du toit de la nappe dans cette partie de la plaine.



3.2 La méthode GOD

La méthode GOD est une méthode empirique pour l'appréciation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution. Développé en Grande-Bretagne (Foster, 1987) elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- Type de nappe (**G**roundwater occurrence) ;
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**O**verall aquifer class) ;
- Profondeur de la nappe (**D**epth to groundwater table).

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère. L'indice de vulnérabilité est obtenu selon l'équation suivante : $I_{GOD} = C_G * C_O * C_D$;
Où C_G = cote du type d'aquifère, C_O = cote de la lithologie, C_D = cote de la profondeur à la nappe. La vulnérabilité augmente avec l'indice et la classification, elle se fait en cinq classes allant de 0 à 1. (Fig. 63)

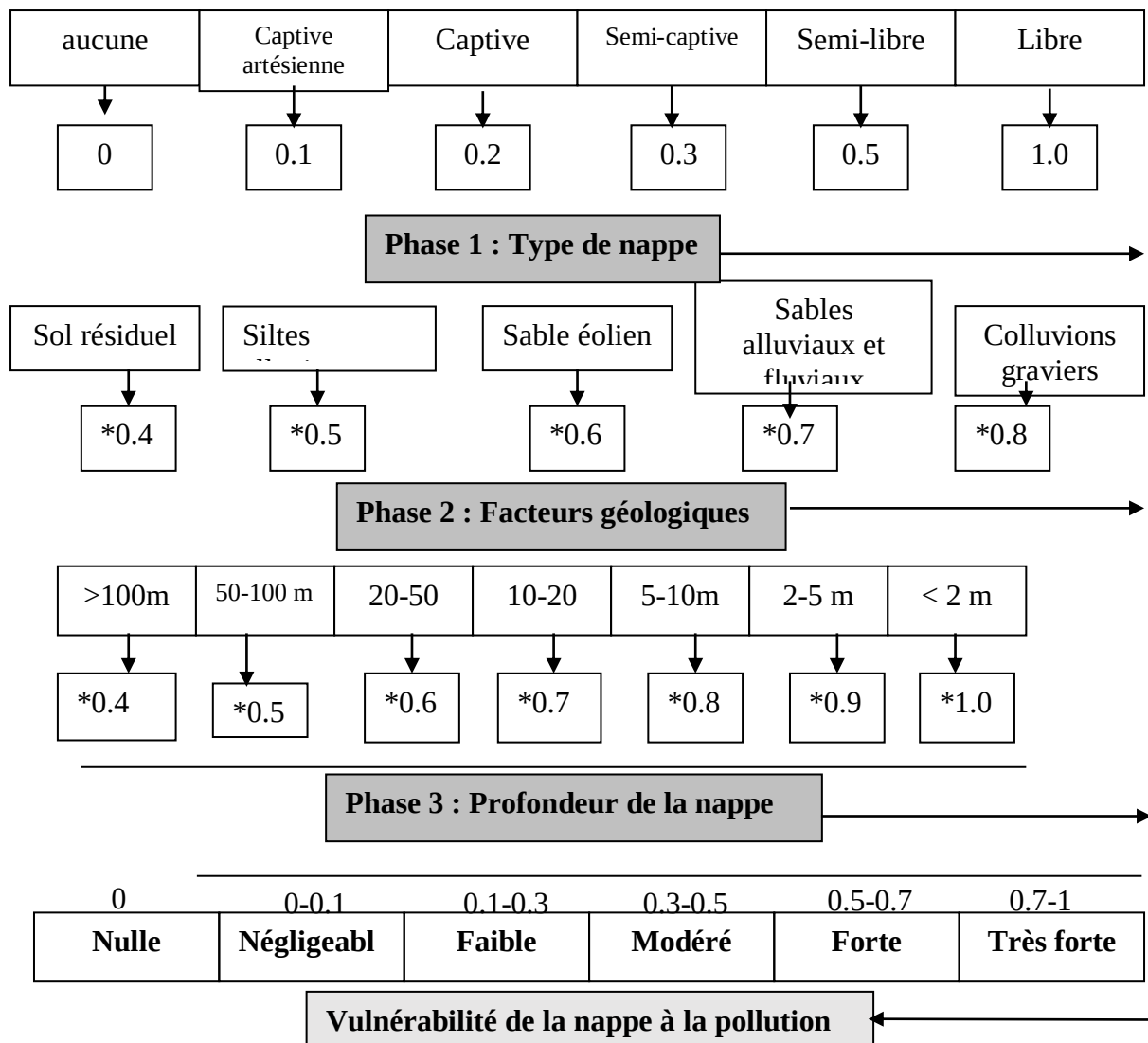


Fig. 63 Système empirique GOD, paramètres et cotation

La vulnérabilité augmente avec l'indice, la classification (en 5 classes) effectuée à partir de ces indices est celle spécifiée dans la Figure 63.

En effet dans le cas de cette méthode, la carte de vulnérabilité intrinsèque représente la première étape de l'évaluation au risque. La classification des aquifères déduite de cette carte n'est qu'un outil destiné à l'estimation du risque de pollution des eaux souterraines (Murat, V 2000).

Limitations : Un des problèmes d'une évaluation régionale est la présence de petits aquifères dont on ne peut pas toujours tenir compte. Foster (1998) recommande dans toute évaluation : (1) d'utiliser la lithologie prédominante des couches au-dessus de l'aquifère ; (2) s'il y a des doutes quant à la continuité et les propriétés des lits confiants, les aquifères doivent être

considérés comme non confinés ; (3) les aquifères peu profonds sont utilisés pour évaluer le risque à la pollution, sauf dans le cas de petites nappes perchées.

3.2.1 Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques C_G : Fig. 64 :

La couverture limoneuse et les terres végétales rendent plus difficile la reconnaissance de type de nappe de la zone d'étude. Pour ce faire on classe les dépôts quaternaires (Bolduc et Ross 2001) en fonction de leur capacité de produire un confinement. L'élaboration de la carte matricielle de type de nappe a été basée essentiellement sur l'interprétation de la carte géologique (mission russe 1964) et la corrélation entre plus de 8 forages réalisés dans la région d'étude (coupes hydrogéologiques). Ces corrélations montrent que la nappe est libre au nord de la plaine, et elle est modérément libre au centre, mais elle devient de plus en plus captive vers le sud-ouest de la zone d'étude.

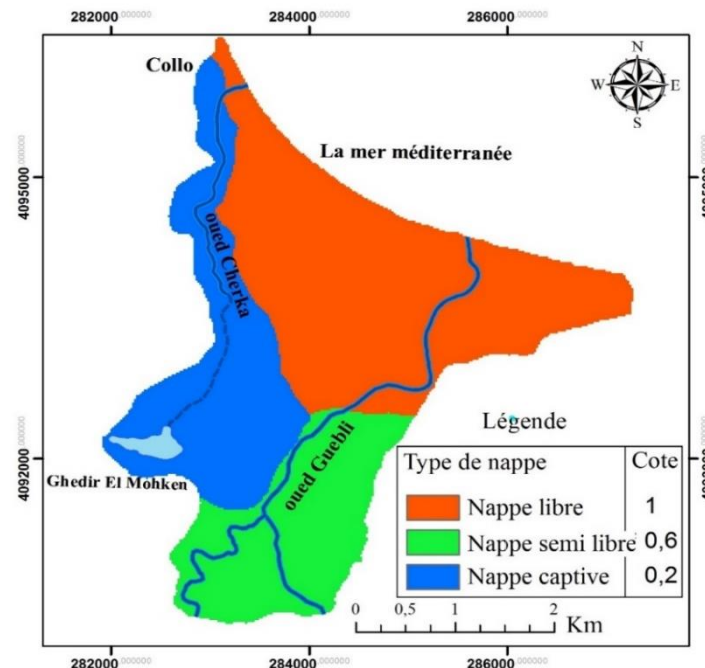


Fig. 64 Lithologie de l'aquifère dans la plaine de Collo

3.2.2 Impact de la zone vadose C_o : Fig. 65 :

La zone non saturée est la partie du profil géologiques ou terrain au-dessus de la surface (Poehls and Smith, 2009). La zone non saturée est aussi le réservoir important pour la capture, le stockage et la libération de contaminants. Le processus d'évaluation du paramètre Impact de la zone vadose, est basé sur l'interprétation des coupes lithologiques des forages. La corrélation montre que la zone non saturée est constituée essentiellement par des

sables au nord et limoneux sableux au centre et sud de la zone d'étude. A l'ouest la zone vadose est essentiellement argileuse. Cette dernière correspond aux zones les plus protégées.

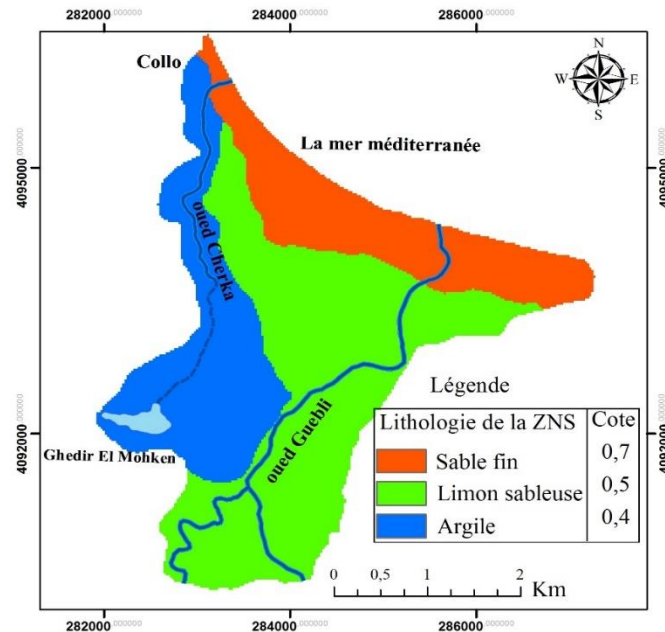


Fig.65 : Lithologie la zone vadose de l'aquifère de Collo

3.2.3 Profondeur à la nappe CD : Fig. 66 :

L'évaluation du paramètre profondeur à la nappe a été réalisée par l'interpolation des données sur les niveaux d'eau mesurés en 30 points dispersée dans la plaine. L'interpolation est effectuée par la méthode de krigeage. La profondeur à la nappe dans la zone d'étude varie entre 1,6 m à 6 m avec une moyenne de 3,28 m.

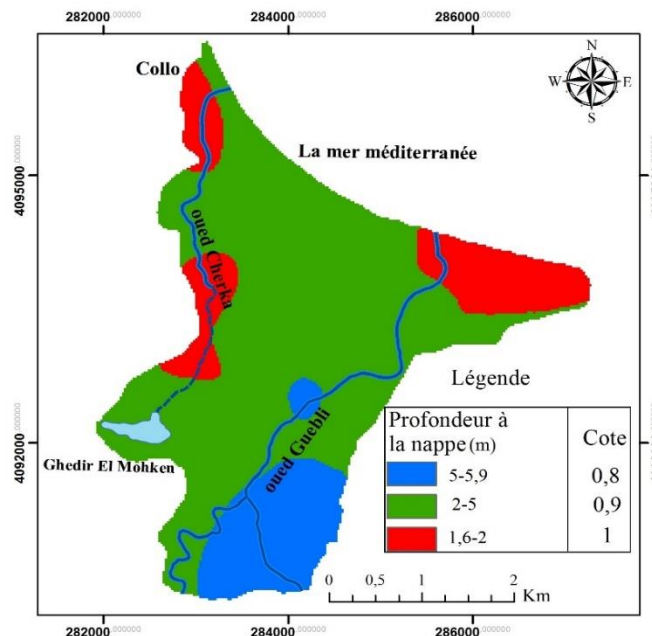


Fig.66 : Profondeur de la nappe dans la zone d'étude

3.2.4 Carte de vulnérabilité GOD. Fig 67 :

L'analyse de la carte de vulnérabilité, établie à l'aide du modèle GOD, a permis de distinguer quatre classes de vulnérabilité différente. Cet indice de vulnérabilité est compris entre 0.1 et 0.7. Ces classes sur l'ensemble de la carte se répartissent principalement en trois zones :

- La première zone est de très faible à faible vulnérabilité qui représente 50,4 % de la zone étudiée et occupe l'ouest et le sud de la plaine. Cela correspond à la nature lithologique de la zone non saturée assez perméable à imperméable ou l'aquifère devient captif surtout dans sa partie ouest.
- La deuxième zone à vulnérabilité modérée : couvrant 27,5 % de la zone d'étude et occupe la partie centrale de la plaine (secteur jaune). La zone vadose est semi-perméable.
- La troisième zone à forte vulnérabilité s'étend principalement au nord de la plaine et couvrant 22,4 % de la surface totale de la zone d'étude. L'épaisseur la zone vadose faible et très perméabilité essentiellement sableuse.

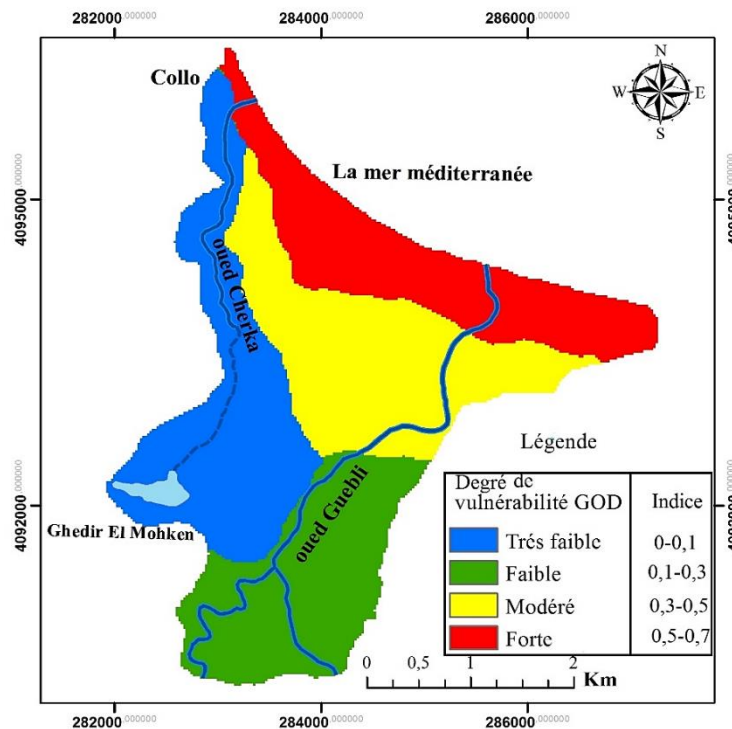


Fig. 67 Indice de vulnérabilité de la nappe de Collo par la méthode GOD

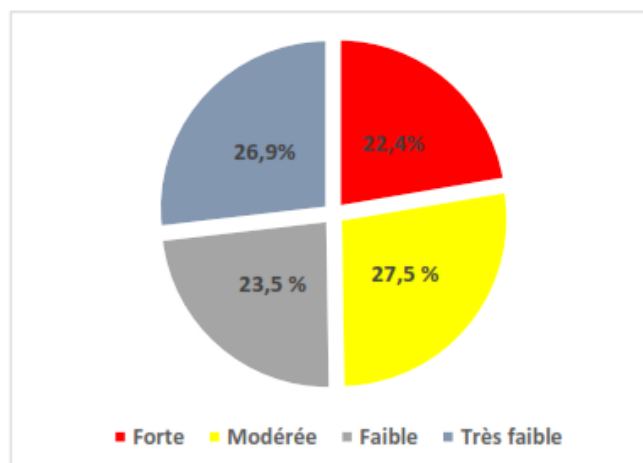


Fig. 68 Comparaison statistique entre les degrés de vulnérabilité GOD

3.3 La méthode SI (Susceptibility Index) : La méthode SI (Susceptibility Index ou méthode d'Indice de Susceptibilité), qui estime la vulnérabilité verticale spécifique à la pollution agricole (essentiellement par les nitrates et également par les pesticides), a été développée au Portugal par Ribeiro (2000).

3.3.1 Les paramètres de la méthode SI (RIBEIRO (2000))

Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques aux quatre paramètres déjà utilisés dans la méthode DRASTIC (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : la pente topographique du terrain). Les cotes correspondantes aux différentes classes de ces paramètres, dans la méthode DRASTIC, ont été également conservées.

Un cinquième nouveau paramètre a été introduit : le paramètre occupation des sols (OS). La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover (EUROPEAN COMMUNITY, 1993) (Tableau 36) une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU, variant de 0 à 100, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Il est signalé que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Ces valeurs varient par conséquent de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité (Tableau. 37) La méthode SI présentent quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices obtenues (Tableau. 38).

Les paramètres qui ne sont pas pris en compte dans la méthode SI par rapport à la méthode, DRASTIC sont les suivants : conductivité hydraulique de l'aquifère, impact de la zone vadose et type de sol. En effet la méthode SI considère que le paramètre conductivité hydraulique de l'aquifère est difficile à évaluer dans l'espace.

Tableau 36 Principales classes d'occupation des sols et valeurs correspondantes.

Tableau 37 Poids attribués aux paramètres SI

Occupation des sols selon la classification CORINE Land Cover	Valeur du facteur d'occupation des sols LU (Land use factor)
Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100
Périmètres irrigués, rizières	90
Carrière, chantier naval	80
Zones artificielles couvertes, zones vertes	75
Cultures permanentes (vignes, vergers, oliviers, etc.)	70
Zones urbaines discontinues	70
Pâturages et zones agroforestières.	50
Milieux aquatiques (marais, salins, etc.)	50
Forêts et zones semi-naturelles	0

Paramètre	D	R	A	T	OS
POIDS	0,186	0,212	0,259	0,121	0,222

Tableau 38 Classement de la vulnérabilité dans la méthode SI.

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 45
Moyen	45 – 64
Élevé	65 - 84
Très élevé	85 - 100

Les cartes relatives aux quatre premiers paramètres nécessaires (D, R, A et T) ont été déjà préparées lors de l'élaboration des cartes DRASTIC. Donc dans cette méthode on s'occupe par la réalisation de la carte relative au paramètre occupation des sols (OS) Fig. 69. Elle a été préparée en se basant sur la carte numérique d'occupation du sol « POS » de la DAIRA de Collo, complétée par l'imagerie satellitaire Landsat (earthexplorer.usgs.gov).

La carte d'occupation du sol de la zone d'étude montre que les périmètres irrigués couvrant plus de 80 % de la surface totale, suivie par les zones bâties et les zones agroforestières.

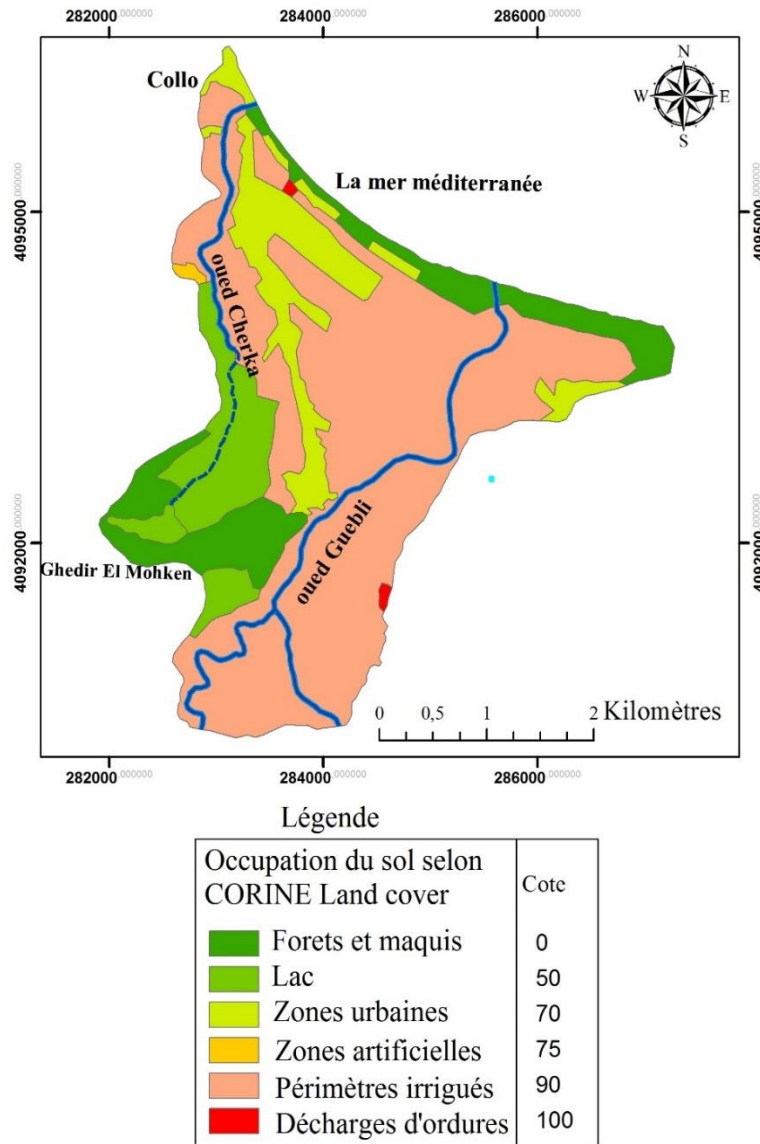


Fig. 69 Occupation du sol selon CORINE Land cover de la plaine de Collo

3.3.2 Carte de vulnérabilité SI. Fig. 70 :

La carte de vulnérabilité finale SI (Fig. 58) est obtenue en exécutant le modèle dans l'environnement du logiciel SIG ArcView en utilisant les cinq couches du modèle SI suivant l'équation :

$$SI_{index} = r_D N_D + r_R N_R + r_A N_A + r_T N_T + r_{OS} N_{OS}$$

Les r_i sont les poids des paramètres SI

les N_i sont les notes des paramètres SI

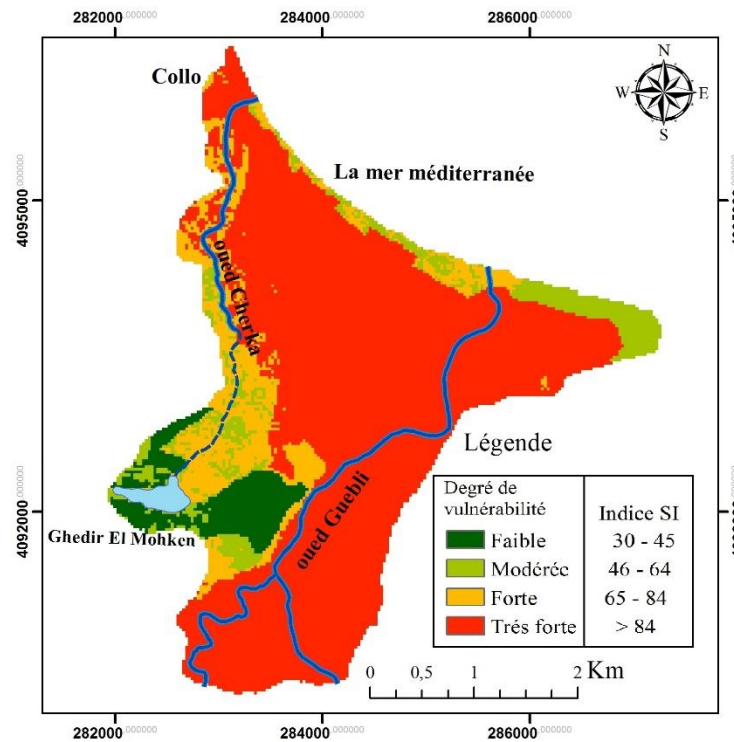


Fig. 70 : Carte d'indice de vulnérabilité SI de la nappe de Collo

La carte de vulnérabilité obtenue montre quatre degrés de vulnérabilité :

- Très élevée couvrant 68,07 % de la zone d'étude.
- Élevée couvrant 17,51 % de la zone d'étude
- Modérée couvrant 8,39 % de la zone d'étude
- Faible couvrant 6,01 % de la zone d'étude

Suivant la méthode SI (RIBEIRO 2000) dans sa majorité, la vulnérabilité de la nappe est très élevée en relation directe avec l'occupation du sol de la zone purement agricole.

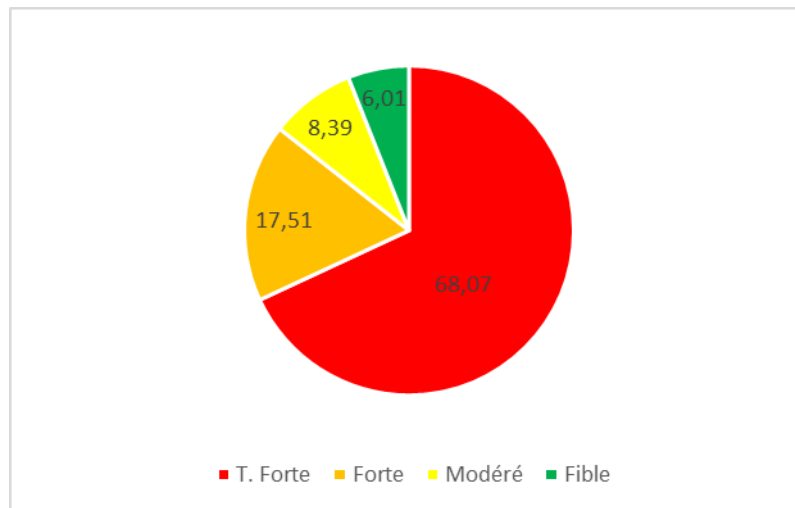


Fig. 71 indice de vulnérabilité SI en %

3.4 La méthode GLADIT (Chachadi et Lobo Ferreira 2001) :

La méthode GALDIT est une méthode de cartographie de la vulnérabilité spécifique des aquifères côtiers, dédiée au risque l'intrusion saline. Elle a été initialement développée par Chachadi et Lobo-Ferreira (2001) dans le cadre du projet européen de coopération avec l'Inde : COASTIN (programme INCO DEV du 4ème PCRD). La méthode a été notamment appliquée dans les régions côtières de Goa en Inde, d'Algarve au Portugal (Lobo-Ferreira et al, 2005a 2005b), et de France métropolitaine (Dörfliger N. et al. 2010).

GALDIT est une approche de « cartographie à index » simple d'utilisation, nécessitant un nombre de données limité. La détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à l'intrusion saline est fondée sur la combinaison de six paramètres pouvant influencer l'intrusion saline :

- Groundwater occurrence (type d'aquifère) ;
- Aquifer hydraulic conductivity (conductivité hydraulique de l'aquifère) ;
- Level above sea (altitude de la nappe au-dessus du niveau de la mer) ;
- Depth to groundwater
- Distance from the shore (distance perpendiculaire à la côte) ;
- Impact of existing status of seawater intrusion in the area (impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée) ;
- Thickness of the aquifer (épaisseur de l'aquifère).

Une indexation de la vulnérabilité et une classification des potentialités d'une intrusion saline dans un contexte géologique donné sont établies à partir des six paramètres de

GALDIT. Le principe d'attribution de classe de vulnérabilité repose sur trois composantes :

- **pondération** : un poids est attribué à chacun des six paramètres en considération de son importance relative par rapport à l'intrusion saline. Un poids allant typiquement de 1 (influence faible moindre) à 4 (grande influence) est proposé par les auteurs ;
- **notation (ou rang)** : une valeur de 1 à 10 est attribuée à chaque paramètre en fonction de ses attributs (plus la valeur est importante plus la vulnérabilité est grande). Par exemple, les valeurs attribuées sont obtenues à partir de tables de correspondance entre les caractéristiques hydrogéologiques locales et la valeur du paramètre ;
- **classification** : la classification des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline est déterminée par un indice de vulnérabilité final correspondant à la somme pondérée et normée des notes attribuées aux six paramètres GALDIT, selon la formule suivante :

$$\text{indice_GALDIT} = \frac{\sum_{i=1}^6 p_i R_i}{\sum_{i=1}^6 p_i}$$

Où « **pi** » est le poids accordé (1 à 4) à chaque paramètre *i*.

Ri est le rang ou la notation accordée à chaque paramètre (2.5 à 10).

Les poids « **pi** » et les notations (**Ri**) des attributs des six paramètres de la méthode GALDIT par rapport à l'intrusion saline sont décrits ci-après.

La valeur minimale de l'indice GALDIT est de 2.5 et la valeur maximale de 10. La vulnérabilité d'un aquifère côtier par rapport à l'intrusion saline peut être répartie en 3 classes de vulnérabilité :

Tableau. 39 Classement de l'indice GALDIT

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	> 7.5
Vulnérabilité moyenne	5 – 7.5
Vulnérabilité faible	< 5

3.4.1 Les paramètres de la méthode GALDIT

3.4.1.1 Paramètre G : le type d'aquifère

Elle désigne la capacité des formations géologiques de la nappe phréatique à permettre le transfert c'est-à-dire de faciliter son écoulement. C'est ce mouvement de l'eau de mer vers la terre qui est influencé par la conductivité hydraulique. Plus la conductivité est élevée plus le risque d'intrusion de l'eau de mer est facilité.

Tableau. 40 valeurs caractéristiques pour le paramètre G

Paramètre G	Poids	Attributs du paramètre	Valeur rang
Type d'aquifère	1	Aquifère captif	10
		Aquifère libre	7.5
		Semi-captif	5
		Aquifère contraint ¹	2.5

¹ Recharge et/ou barrière alignée parallèlement à la côte

3.4.1.2 Paramètre A : la conductivité hydraulique de l'aquifère

L'importance du front d'intrusion saline est influencée par la conductivité hydraulique – plus la conductivité est grande, plus le front de pénétration de l'intrusion saline est important. Une conductivité hydraulique élevée a pour conséquence également un grand cône de dépression lors d'un pompage.

Tableau 41 valeurs caractéristiques pour le paramètre A

Paramètre A	Poids	Classe	Rang	Note
Conductivité hydraulique de l'aquifère (m/jour)	3	Elevée	> 40	10
		Moyenne	10 – 40	7.5
		Faible	5 – 10	5
		Très faible	< 5	2.5

3.4.1.3 Paramètre L : Niveau piézométrique de la nappe par rapport au niveau de la mer :

Le niveau piézométrique par rapport au niveau moyen de la mer est un paramètre important (poids maximal de 4) pour évaluer la vulnérabilité à l'intrusion saline dans une zone donnée, car il détermine le potentiel hydraulique capable de repousser le front d'intrusion saline. Tel que défini par l'équation de *Ghyben-Herzberg*, pour chaque mètre d'eau douce stockée au-dessus du niveau de la mer, ce sont 40 mètres d'eau douce qui sont présents sous l'interface eau douce eau salée ainsi définie.

L'attribution des notes du paramètre L doit prendre en considération les variations du niveau piézométrique sur le long terme. De manière générale, il est important de ne pas considérer uniquement une valeur piézométrique moyenne, mais d'examiner avec attention les périodes pour lesquelles le niveau piézométrique est le plus bas, au-dessus du niveau de la mer, correspondant à la plus grande vulnérabilité potentielle. Pour l'attribution des valeurs, les auteurs proposent la notation suivante :

Tableau 42 Valeurs caractéristiques pour le paramètre L

Paramètre L	Poids	Classe	Rang	Note
Hauteur à la nappe par rapport au niveau de la mer (m)	4	Très faible	<1.0	10
		Moyenne ment faible	1.0 – 1.5	7.5
		Moyenne	1.5 – 2.0	5
		Elevée	> 2.5	2.5

3.4.1.4 Paramètre D : distance perpendiculaire à la côte

En général, l'impact de l'intrusion saline décroît en s'éloignant de la côte. La valeur maximale de l'indice peut être fixée à 10 pour des distances de la côte inférieures à 500 m. Cette valeur est dégressive. Une valeur de 2.5 est acceptable pour des distances supérieures à 1000 m.

Tableau 43 Valeurs caractéristiques pour le paramètre D

Paramètre D	Poids	Classe	Rang	Note
Distance perpendiculaire à la côte (m)	4	Très courte	< 500	10
		Courte	500 – 750	7.5
		Moyenne	750–1000	5
		Éloignée	> 1000	2.5

3.4.1.5 Paramètre I : Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée

Dans cette méthode, il est proposé d'utiliser le ratio $\text{Cl}^- / (\text{HCO}_3^{-1} + \text{CO}_3^{2-})$ comme critère d'évaluation de l'intrusion saline dans l'aquifère côtier. L'ion chlorure (Cl^-) est dominant dans l'eau de mer et peu présent dans les eaux souterraines alors que c'est l'inverse pour le bicarbonate ($\text{HCO}_3^{-1} + \text{CO}_3^{2-}$). Si le ratio est supérieur à 2 ppm (ou milliéquivalent par million), une note maximale de 10 est attribuée au paramètre I. Un ratio inférieur à 1 montre que l'intrusion saline est très faible.

Tableau 44 Valeurs caractéristiques pour le paramètre I

Paramètre I	Poids	Attributs du paramètre		Valeur rang
		Classe	Rang	
Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée : - ratio ($\text{HCO}_3^{-1} + \text{CO}_3^{2-}$) (en ppm) - Méthode nationale - conductivité électrique (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) - teneur en Cl (en mg/l)	1	Elevé	>2 ou $> 1\ 000$ ou >200	10
		Moyen	$1,5 - 2$ ou $800 - 1000$ ou $100 - 200$	7,5
		Faible	$1 - 1,5$ ou $400 - 800$ ou $50 - 100$	5
		Très faible	<1 <400 ou $0-50$	2,5

3.4.1.6 Paramètre T : Épaisseur de l'aquifère

L'épaisseur de l'aquifère ou de la zone saturée d'un aquifère libre joue un rôle important dans l'extension et de l'ampleur de l'intrusion saline en zones côtières. Il a été clairement démontré que plus l'épaisseur de l'aquifère est importante, plus l'extension de l'intrusion saline devrait être moindre et inversement. Suivant ce principe, des valeurs de rang correspondantes à différentes épaisseurs d'aquifère sont attribuées comme suit :

Tableau 45 : Valeurs caractéristiques pour le paramètre T

Paramètre T	Poids	Classe	Rang	Note
Épaisseur de l'aquifère (m)	2	Large	> 10	10
		Moyenne	7.5 – 10	7.5
		Petite	5 - 7.5	5
		Très petite	< 5	2.5

3.4.2 Application de la méthode GALDIT sur la nappe côtière de Collo :

3.4.2.1 Paramètre G : Type de nappe : Fig. 72 :

Sur la base des coupes hydrogéologiques et la nature lithologique de la zone non saturée, on constate que la nappe est libre au nord de la plaine, et elle est modérément libre au centre, mais elle devient de plus en plus captive vers le sud-ouest de la zone d'étude.

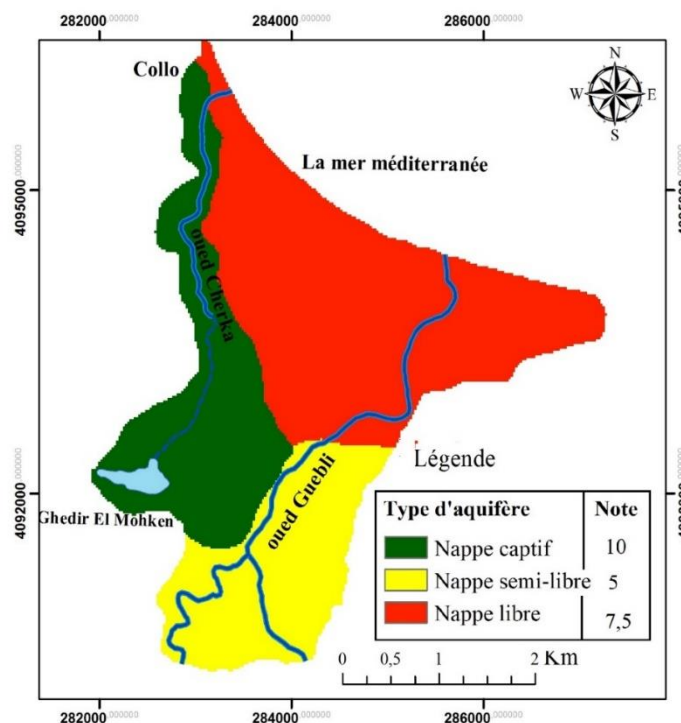


Fig. 72 Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre G

3.4.2.2 La conductivité hydraulique de l'aquifère A : Fig. 73 :

Sur la base des données hydrodynamiques calculées à partir d'essais de pompage et à partir de la connaissance du milieu (lithologie des formations), une carte de perméabilité a été dressée après la reclassification des valeurs selon le modèle GALDIT. La conductivité hydraulique est en (m/j).

Selon le modèle la perméabilité varie entre 82,08 m/j (au nord de la plaine) et 43,2 m/j (au sud). Les valeurs les plus faibles de la perméabilité sont localisées à l'ouest de la plaine (< 5m/j).

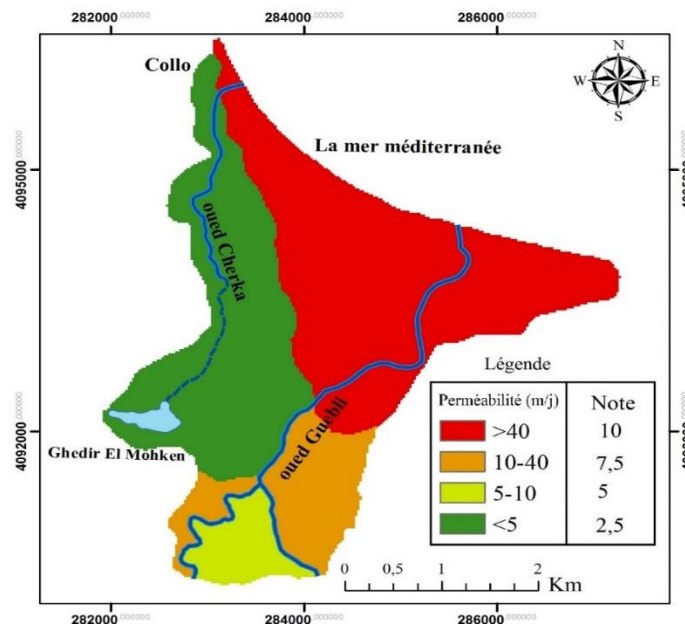


Fig. 73 Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre A

3.4.2.3 Niveau piézométrique de la nappe par rapport au niveau de la mer L : Fig. 74, 75

La méthode GALDIT conseille d'observer les chroniques piézométriques à long terme et de prendre en compte les situations les plus critiques vis-à-vis de l'intrusion d'eau saline. L'intrusion marine atteint son maximum lorsque les cotes d'eau en dessous du niveau de la mer atteignent leurs niveaux minimums. Dans cette étude, ce paramètre a été obtenu à partir de la campagne piézométrique du novembre 2015. La carte piézométrique (Fig. 74) est élaborée par interpolation des données ponctuelles par le biais du module Spatial Analyst Tools du logiciel ArcGis (ESRI). L'option Topo to Raster est utilisée, Il s'agit d'une technique d'interpolation conçue spécifiquement pour créer une surface qui représente plus

précisément une surface d'écoulement naturelle et conserve mieux à la fois les crêtes et les réseaux hydrographiques des données d'isolignes en entrée. Le niveau piézométrique de la zone d'étude est inférieur à 1 mètre (Fig. 75) dans toute la partie nord et centre et il augmente progressivement vers le sud ou il atteint 2,83 mètres comme niveau maximum.

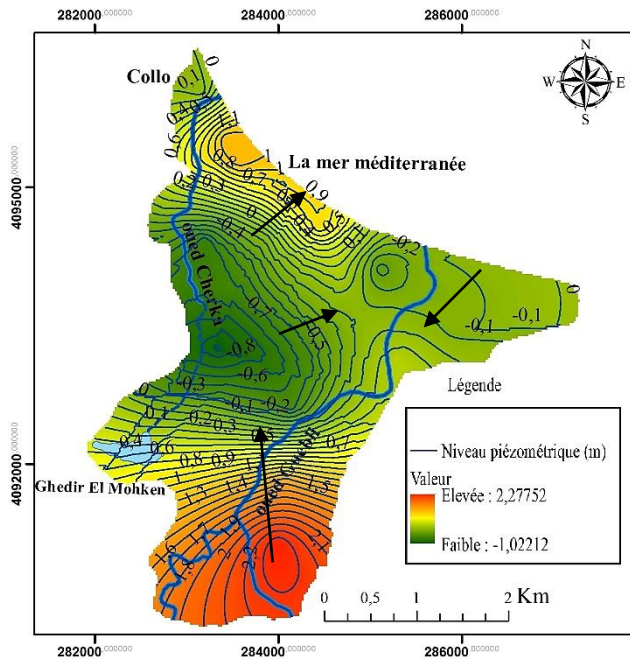


Fig. 74 : Carte piézométrique de la nappe de Collo (novembre 2015)

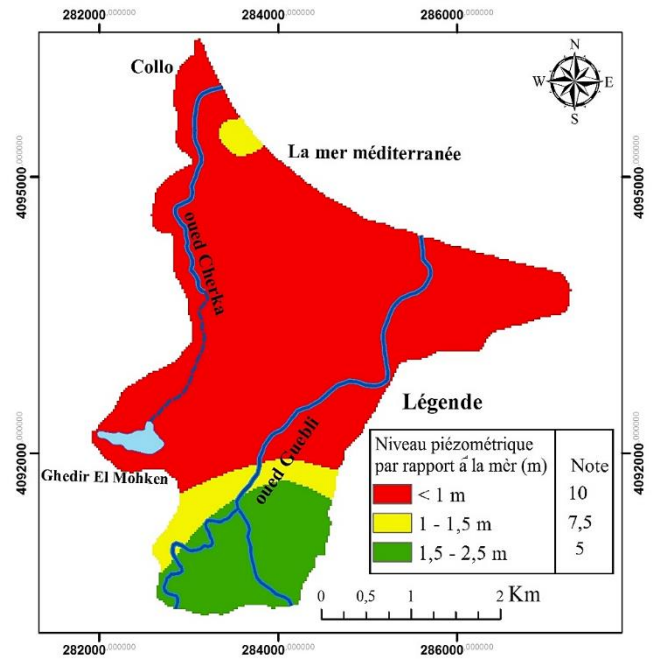


Fig. 75 : Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre L (novembre 2015)

3.4.2.4 Paramètre D : distance perpendiculaire à la côte. Fig. 76 :

En général, l'impact de l'intrusion saline décroît en s'éloignant de la côte. La valeur maximale de l'indice peut être fixée à 10 pour des distances de la côte inférieures à 500 m. Cette valeur est dégressive. Une valeur de 2,5 est acceptable pour des distances supérieures à 1000 m. Les intrusions salines pénètrent les cours d'eau au niveau des estuaires et peuvent ainsi donner lieu à des salinisations des eaux souterraines en relation hydraulique avec les eaux de surface. Ce phénomène a eu lieu surtout à oued Guebli (Boulabeiz M, 2006) où l'eau de mer peut pénétrer jusqu'à 2000 mètres à l'intérieur de la plaine pendant la période estivale. L'effet de la remontée de niveau marin et de salinité au niveau des estuaires n'a pas un impact très important, mais le risque de salinisation des masses d'eaux souterraines reste, notamment s'il y a une surexploitation de la nappe.

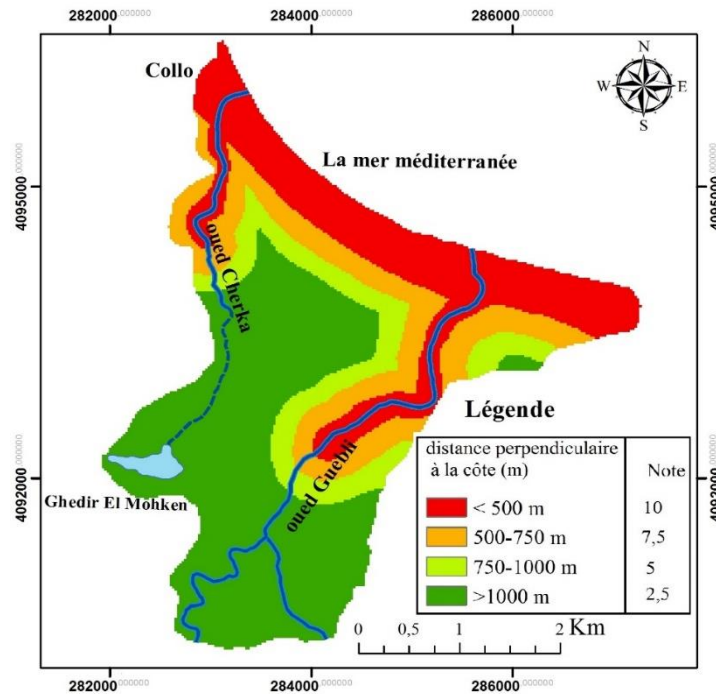


Fig.76 Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre D

3.4.2.5 Paramètre I : Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée :

Fig. 77a, 77b :

Le rapport $Cl^- / (HCO_{3-1} + CO_{3^{2-}})$ est préconisé par la méthode GALDIT pour avoir l'état des lieux de salinisation de la nappe côtière de Collo. Les teneurs en chlorures seront également utilisées à titre de comparaison.

3.4.2.5.1 Le rapport $Cl^- / (HCO_{3-1} + CO_{3^{2-}})$. Fig. 77a:

Dans ce travail nous considérons les valeurs de $CO_{3^{2-}}$ comme nulle en raison de leur faible contribution dans le rapport $Cl^- / (HCO_{3-1} + CO_{3^{2-}})$ (Lobo. F , Chachadi. A G) et puisqu'ils ne sont pas connus pour la zone d'étude.

La teneur en chlorures et les bicarbonates de l'eau sont marqués par des variations périodiques en lien avec le cumul de précipitation et les prélèvements effectués dans la nappe. En suivant le principe de précaution, les données représentatives d'une avancée du biseau salé maximale seront prises en compte, c'est-à-dire les valeurs les plus hautes. Dans cette étude les données issues de la campagne du mois de novembre 2015 sont utilisées.

La carte du rapport $\text{Cl}^- / (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ montre que la rive droite de la plaine en rapport avec oued el Guebli est très vulnérable (notation GALDIT de 10) sur une largeur de 2 km dans l'unité des Hauts et de 3 km dans l'unité des Bas, plus sensible aux risques d'intrusion. La zone de faible vulnérabilité (notation GALDIT de 2,5) occupe le reste de la plaine.

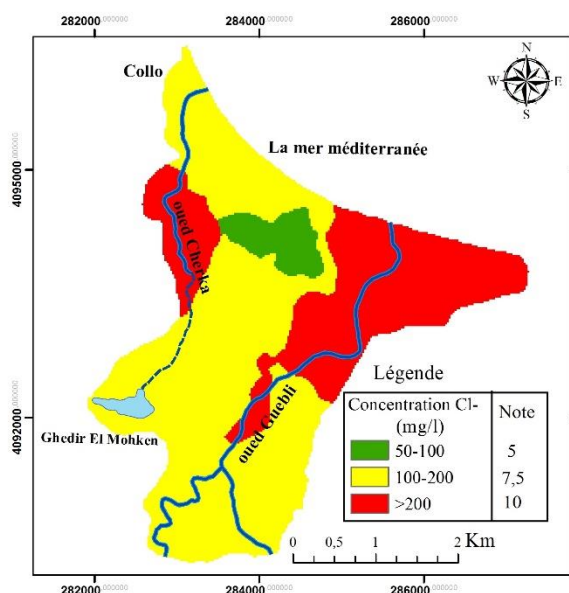


Fig. 77b : Carte de répartition des notations GALDIT pour les teneurs en Cl^- (novembre 2015)

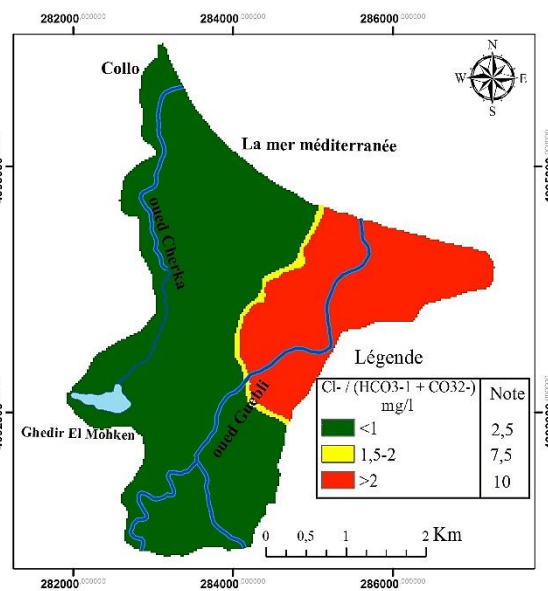


Fig. 77a : Carte de répartition des notations GALDIT pour le rapport $\text{Cl}^- / (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ (novembre 2015)

3.4.2.5.2 la carte de teneurs en chlorures : Fig. 77b :

La carte de répartition des notations GALDIT élaborées à partir des iso-teneurs en chlorures est présentée aussi pour l'état des lieux de la salinisation. Les zones de fortes teneurs en chlorures (notation GALDIT 10) se localisent au nord-est de la plaine et une partie à l'ouest. Ces fortes teneurs s'expliquent par une piézométrie plutôt faible et l'intrusion saline par le biais d'oued el Guebli (salinisations des masses d'eaux souterraines en relation hydraulique avec les eaux de surface). Les zones de faibles et moyennes teneurs en chlorures (notations GALDIT respectivement de 5 et 7,5) occupant le sud et le nord-ouest de la plaine.

La cartographie des chlorures semble être plus révélatrice des zones en danger (Il a été démontré par la prospection électrique (CGG, 1965) que le biseau salé s'étend jusqu'au le nord de koudiet Talleza, ainsi le lien direct des concentrations des chlorures avec la piézométrie).

3.4.2.6 Paramètre T : Épaisseur de l'aquifère : Fig. 78 :

Pour la limite inférieure de la nappe d'eau douce, la pénétration des eaux marines dans la zone étudiée doit être considérée. En effet plus l'épaisseur de la nappe aquifère est grande plus l'intrusion saline a de grande chance de s'étendre. Les coupes hydrogéologiques et la prospection géoélectrique (CGG 1965) montrent que l'épaisseur de la nappe de Collo varie entre 4 et 30 m. L'épaisseur de l'aquifère se diminue en allant vers le sud.

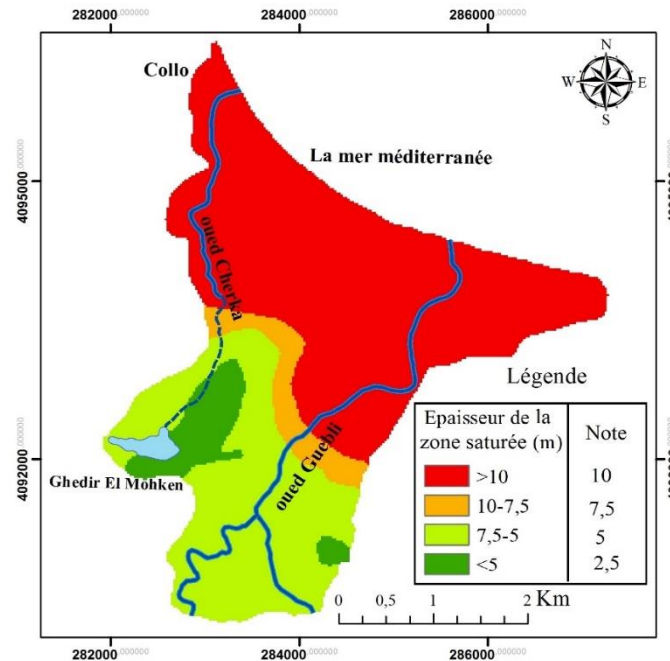


Fig. 78 Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre T

3.4.3 L'indice GALDIT sous les conditions actuelles et futures :

3.4.3.1 Scénario 1 : L'état actuel du niveau de la mer : Fig. 79 :

Le calcul de l'indice GALDIT et la superposition des différentes couches d'information moyennant le logiciel ArcGis (par l'outil raster calculatrice) à permet d'obtenir la carte de vulnérabilité (2015) qui identifie les zones susceptibles significativement d'être affectée par l'intrusion marine. La carte obtenue pour novembre 2015 (période des basses eaux) fait ressortir trois zones de vulnérabilité :

Zone à vulnérabilité forte : elle englobe une zone plus importante en superficie (52,64% de la surface totale) caractérise la frange littorale et les zones parallèle au deux oueds ; oued el

Guebli sur une longueur de 3,5 km et oued Cherka sur une longueur de 2 km à partir de la mer. Celui-ci constitue également une voie de pénétration de biseau salée.

Zone à vulnérabilité moyenne : elle occupe le centre et l'ouest de la plaine (31,49% de la surface totale). C'est une zone marquée par une faible activité agricole donc une faible extraction d'eau souterraine, et une piézométrie modeste (>1 m).

Zone à vulnérabilité faible : elle représente 15,85 % de la surface totale et se situe au sud de la zone d'étude. Leur piézométrie élevée ($> 1,5$ m) leur permet de fonctionner comme zone de recharge de la nappe. De ce fait, elle contribue au maintien de l'équilibre hydrodynamique de la nappe.

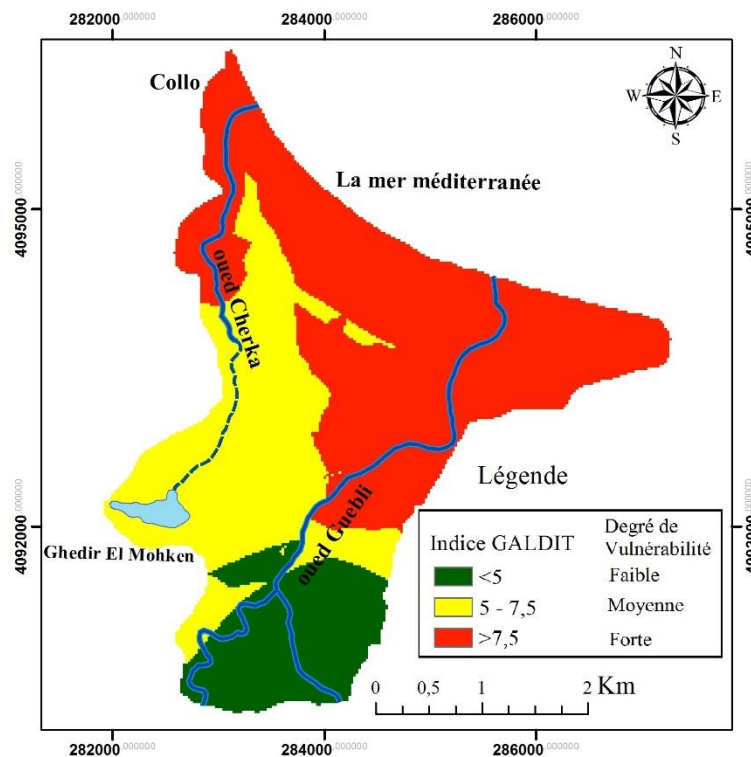


Fig. 79 Carte de vulnérabilité multicritère selon la méthode GALDIT pour l'aquifère de Collo (novembre 2015)

3.4.3.2 Scénario 2 : Elévation du niveau de la mer : d'ici à 2100 (+1m)

La montée des eaux des mers est une conséquence inéluctable du réchauffement climatique. Les satellites la mesurent en continu depuis 1992. Le niveau monte en moyenne d'un peu plus de 3 mm par an. Dans son précédent rapport de 2007, le GIEC (Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, est une organisation qui a été mise en place en 1988, à la demande du G7 (groupe des 7 pays les plus riches : USA, Japon, Allemagne, France, Grande-Bretagne, Canada, Italie)) prévoyait une augmentation du niveau moyen des mers compris entre 18 et 59 cm d'ici à 2100. Quatre ans plus tard, le groupe

international d'experts sur le climat se fait nettement plus alarmiste : la hausse pourrait en réalité atteindre près d'un mètre (98 cm, précisément) dans les hypothèses de calcul les plus défavorables. Une différence considérable dont l'impact pourrait se révéler dramatique pour les centaines de millions de personnes vivant sur des îles ou dans des zones côtières menacées. Pour ce scénario en considère que la nappe est en état de repos et en va calculées le niveau piézométrique par rapport au niveau de la mer qui va augmenter à +1 mètre tout en gardant les hauteurs piézométriques mesurées en novembre 2015 (Fig. 80) comme référence.

Tableau. 46 : Niveau piézométrique Nov 2015 et 2100

Point de mesure	Z (m)	Hp (m) 2015	Np (m) 2015	Np (m) 2100
1	1,15	2,3	-1,15	-2,15
2	2,9	1,6	1,3	0,3
3	3,3	3,1	0,2	-0,8
4	4,58	2,5	2,08	1,08
5	4,82	2,93	1,89	0,89
6	3,57	2,88	0,69	-0,31
7	4,87	2,8	2,07	1,07
8	1,34	2,8	-1,46	-2,46
9	2	2,07	-0,07	-1,07
10	3,27	3,2	0,07	-0,93
11	3,19	2,6	0,59	-0,41
12	2,32	2,6	-0,28	-1,28
13	2	2,6	-0,6	-1,6
14	2,92	2,55	0,37	-0,63
15	1	2,6	-1,6	-2,6
16	1,51	1,9	-0,39	-1,39
17	1	2,5	-1,5	-2,5
18	2	2,3	-0,3	-1,3
19	2,24	3,2	-0,96	-1,96
20	3,12	3,3	-0,18	-1,18
21	3	3,15	-0,15	-1,15
22	4	3,95	0,05	-0,95
23	3,2	3,7	-0,5	-1,5
24	4,14	5,5	-1,36	-2,36
25	6,9	5	1,9	0,9
26	9	6	3	2
27	5	4,5	0,5	-0,5
28	4,36	4,1	0,26	-0,74
29	4,64	4,1	0,54	-0,46
30	2	2,3	-0,3	-1,3

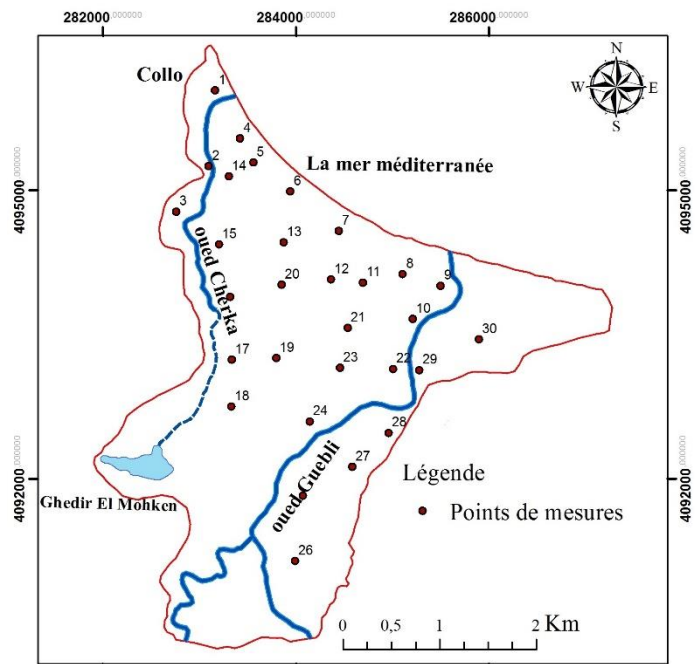


Fig. 80 : Points de mesures des niveaux piézométriques

La figure. (81) montre qu'ici à l'an 2100 le sens d'écoulement sera inversé dans toute la nappe (Nord vers le Sud) à l'exception de la partie sud-ouest. Le changement du sens d'écoulement sera accompagné d'un avancement du biseau salé (qui n'a pas démontré).

En termes de superficie on note que l'étendue des surfaces de faible vulnérabilité a diminué en faveur de la superficie de moyenne vulnérabilité Fig.82 :

- La vulnérabilité faible a disparu complètement au profit de la zone de moyenne vulnérabilité.
- La vulnérabilité moyenne a augmenté de 31,49 % à 43,88%.
- La vulnérabilité forte a augmenté de 52,64 % à 56,11 % de la surface totale.

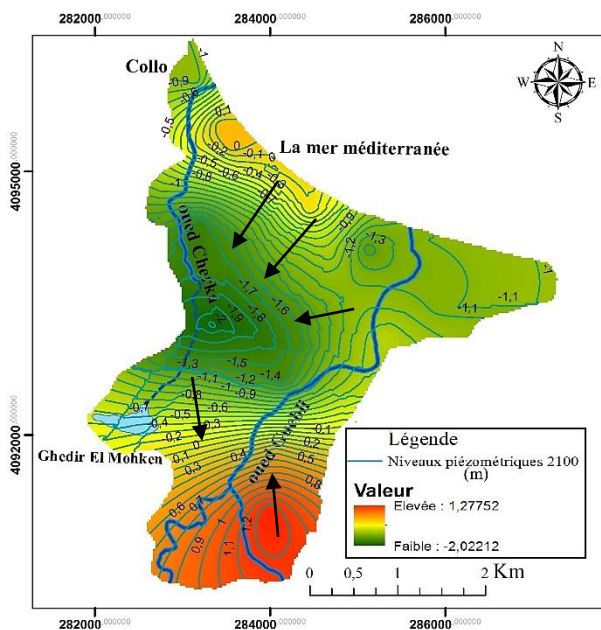


Fig. 81 : Carte piézométrique simulée de la nappe de Collo (2100)

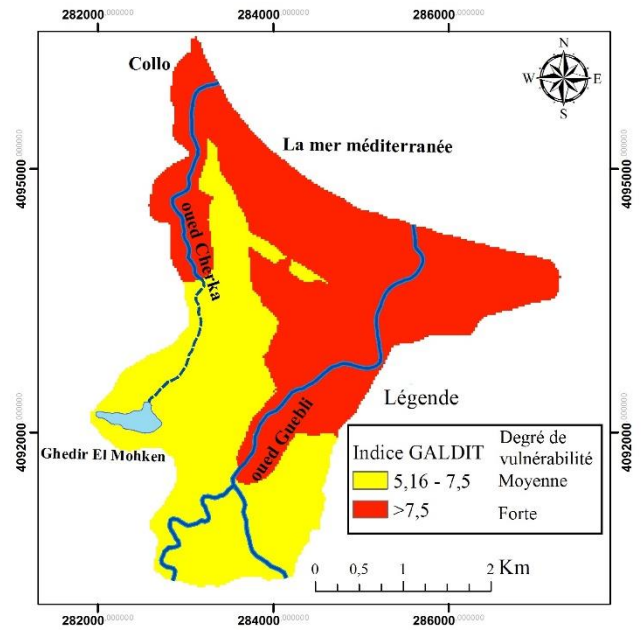


Fig. 82 Carte de vulnérabilité multicritère simulée selon la méthode GALDIT pour l'aquifère de Collo (2100)

3.4.4 Discussion :

La cartographie de la vulnérabilité potentielle à l'intrusion marine moyennant la méthode GALDIT se présente un outil de gestion de la ressource hydrique souterraine côtière. Les résultats obtenus montrant que 56 % de la superficie de la plaine à une forte vulnérabilité caractérise la frange littorale, et la zone parallèle au cours des deux oueds (Cherka et Guebli). La surélévation du niveau marin associée à une forte exploitation des eaux souterraines risque de provoquer un avancement du biseau salé qui mettrait en péril la qualité de l'aquifère côtier de Collo.

4 Validation des méthodes de vulnérabilité :

Il y a deux méthodes pour la validation des cartes de vulnérabilités obtenue :

- Validation basée sur les méthodes statistiques (sensibilité, Le test "Map removal sensitivity analysis" et le test "Single-parameter sensitivity analysis").
- Validation basée sur les données chimiques des eaux souterraines (notamment les nitrates et les chlorures).

4.1 Validation statistiques : (Test de sensibilité des modèles DRASTIC, GOD, SI et GALDIT)

L'évaluation de la vulnérabilité des aquifères nécessite une validation pour réduire la subjectivité dans le choix des gammes et des notations et d'augmenter la fiabilité (Ramos et Rodriguez, 2003). L'analyse de sensibilité fournit des informations utiles sur l'influence de la notation et de pondération des valeurs attribuées à chaque paramètre et aide les hydrogéologues de juger l'importance et la signification des éléments (Gogu et Dassargues, 2000). Il y a deux types de tests de sensibilité : « Map removal sensitivity analysis » introduit par Lodwick et al (1994), et « single parameter sensitivity analysis » introduit par Napolitano et Fabbri (1996).

Le Map removal sensitivity analysis mesure et identifie la sensibilité de la carte de vulnérabilité par la suppression d'un ou plusieurs paramètres de la carte de vulnérabilité. La mesure est exprimée comme suit : $S = (|V/N - V'/n|/V) \times 100$

Où : S : la mesure de sensibilité exprimée comme la variation de l'index.

V et V' : les indices de vulnérabilité non perturbée et perturbée (respectivement)

N et n : le nombre des paramètres (les couches) utilisés pour calculer V et V' respectivement. L'indice de vulnérabilité calculée par les sept facteurs est considéré comme non perturbé, tandis que l'indice de vulnérabilité calculée en utilisant un nombre inférieur des facteurs est considéré comme perturbé (Babiker et al, 2005).

Une autre mesure importante doit être évaluée lors de l'évaluation de la vulnérabilité est l'indice de variation (v_{xi}). L'indice de variation est calculé par la relation suivante (Gogu et Dassargues 2000) : $v_{xi} = (v - v') / v$

La valeur négative de cette mesure expliquée par la faite de supprimé l'un des facteurs augmente les valeurs de vulnérabilité ainsi réduire la vulnérabilité calculée.

"The single single parameter sensitivity mesure" est utilisée pour évaluer l'impact de chaque facteur DRASTIC, GOD, SI et GALDIT sur l'indice de vulnérabilité.

Cette analyse compare le poids effectif de chaque élément dans chaque polygone avec le poids théorique attribué par le modèle utilisé (DRASTIC...).

Le poids effectif pour chaque polygone est obtenu en utilisant la formule suivante :

$$W = (P_r P_w / V) \times 100$$

Où W : le poids (pondération) effectif de chaque paramètre, Pr et Pw sont les valeurs de notation et de pondération de chaque paramètre, et V l'indice de vulnérabilité calculé pour chaque méthode.

Dans cette étude le test de sensibilité serait appliqué pour le modèle DRASTIC et GALDIT de la faite que le modèle GOD et SI font partie du modèle DRASTIC.

4.1.1 Sensibilité du modèle DRASTIC

Le tableau (47) illustre les données statistiques sommaires des sept paramètres utilisés pour calculer l'indice DRASTIC dans la plaine de Collo. L'analyse des moyennes montre que le plus grand risque de contamination des eaux souterraines de la plaine de Collo est favorisé par les paramètres ; Topographie, Profondeurs de l'eau à la surface, et la lithologie de l'aquifère dont les moyennes sont respectivement 8,94 ; 8,29, et 7,02. Cependant le reste des paramètres participe avec un risque modéré.

Le coefficient de variation montre que la grande contribution aux variations de l'indice de vulnérabilité est due au paramètre « conductivité hydraulique » (CV = 53,84 %). Les paramètres « la recharge, texture du sol et utilisation du sol » montrent une contribution moyenne « 52,03% ; 47,4% ; et 43,66% ». Cependant la profondeur à la nappe, lithologie de l'aquifère, topographie, et impact de la zone vadose représente une contribution à la variation de l'indice de vulnérabilité faible

Tableau 47. Le résumé statistique des paramètres DRASTIC

	D	R	A	S	T	I	C
Min	7	1	4	1	1	3	2
Max	9	8	9	9	10	8	10
Moy	8,29	5,65	7,02	5	8,94	5,64	6,76
SD	0,96	2,94	1,80	2,37	1,85	1,87	3,64
CV %	11,58	52,03	25,64	47,4	20,7	33,15	53,84

4.1.1.1 Le test "Map removal sensitivity analysis":

Le tableau (48) et (49), illustre la variation de l'indice de vulnérabilité à la suite de l'élimination d'un ou plusieurs paramètres à la fois. Le tableau (48) illustre la variation de l'indice de vulnérabilité comme résultat d'élimination d'un seul paramètre DRASTIC. Il est

clair que la suppression de l'un ou l'autre paramètre aboutit à une grande variation de l'indice de vulnérabilité.

Les paramètres « profondeur de la nappe, topographie, et texture du sol » sont considérés les plus responsables en termes de variation de l'indice (moyennes, 3,23, 2,36, et 2). La vulnérabilité semble être très sensible à la suppression du paramètre « profondeur de la nappe », est cela confirmé théoriquement par le poids élevé de ce paramètre.

Tableau. 48 Les statistiques du test « Map removal sensitivity analysis » suppression d'un paramètre à la fois

Paramètres enlevés	Indice de variation (%)			
	SD	Min	Max	Moy
D	1,33	1	6	3,23
R	0,71	0	3	0,96
A	0,66	0	2	0,73
S	0,67	1	4	2
T	1,17	0	5	2,36
I	0,68	0	3	1,11
C	0,75	0	3	0,91

Tableau. 49 Les statistiques du test « Map removal sensitivity analysis » suppression de plusieurs paramètres

Paramètre utilisé	Indice de variation %			
	Min	Max	Moy	SD
D, R, S, T, I, et C	0	2	0,73	0,66
D, R, S, T, et I	0	5	1,06	1,05
D, S, T, et I	0	5	1,88	1,66
D, S, et T	0	8	4,17	1,60
D et T	0	14	4,25	4,92
D	9	33	20,10	6,72

4.1.1.2 Le test "Single-parameter sensitivity analysis":

Après la mise en évidence de l'importance des sept paramètres dans le calcul de l'indice de vulnérabilité par le test «**Map removal sensitivity analysis**», dans cette section l'objectif de l'application du test «**Single-parameter sensitivity analysis**», est de compléter et confirmer les premiers résultats. Ce test consiste à faire une comparaison entre les poids théoriques et les poids effectifs des paramètres. Le tableau (50) représente les résultats du test, et montre que les paramètres, « profondeurs de la nappe, Aquifères, et topographies » sont les paramètres influençant beaucoup la vulnérabilité, car leurs poids effectifs moyennes

(28.77 %, 13.70 %, et 5,66 %) sont supérieurs à leurs poids théoriques, sans négliger les autres paramètres surtout le paramètre « Impact de la zone Vadose ».

Avec le test « Single-parameter sensitivity analysis», il est clair que les paramètres « Profondeur de la nappe, zone non saturée, la recharge et la conductivité hydraulique », du modèle DRASTIC influence beaucoup la vulnérabilité dans le secteur d'étude, ce qui confirme les tests précédents.

Tableau 50. Les statistiques du test « Single-parameter sensitivity analysis »

Paramètre	Poids théorique	Poids théorique %	Poids effectif %			
			Min	Max	Moy	SD
D	5	21,7%	19	52	28,77	9,49
R	4	17,4%	2	23	13,17	5,94
A	3	13,0%	7	25	13,70	3,61
S	2	8,7%	1	10	5,77	1,83
T	1	4,3%	1	11	5,66	2,05
I	5	21,7%	10	26	17,63	2,08
C	3	13,0%	3	23	11,83	5,01

4.1.2 Sensibilité du modèle GALDIT :

Le tableau (51) montre le résumé statistique des six facteurs utilisés pour calculer l'indice GALDIT. Le risque le plus élevé de l'intrusion saline dans la zone d'étude provient de « Niveau piézométrique de la nappe par rapport à la mer, l'état actuel de l'intrusion marine, l'épaisseur de l'aquifère et le type de l'aquifère (dont les moyennes sont respectivement : 9.12, 8,20, 7.91 et 7,60). Les autres facteurs impliquent un risque faible pour la contamination par l'intrusion saline. La faible variabilité de facteur implique une faible contribution dans la variation de l'indice de vulnérabilité à travers la zone d'étude (Alaa M et al 2014).

Tableau. 51 Le résumé statistique des paramètres GALDIT

	G	A	L	D	I	T
Min	5	2,5	5	2,5	5	2,5
Max	10	10	10	10	10	10
Moy	7,60	6,82	9,12	5,54	8,20	7,91
SD	1,76	3,36	1,79	3,15	1,37	2,63

4.1.2.1 Le test” Map removal sensitivity analysis”:

Le tableau (52) résume la variation de l’indice de vulnérabilité à la suite de la suppression d’un seul paramètre à la fois. L’indice de vulnérabilité semble être plus sensible à la distance perpendiculaire à la côte, et la conductivité hydraulique de l’aquifère. En outre l’épaisseur de la nappe semble poser une importante influence sur l’indice de vulnérabilité. Le tableau (53) illustre les résultats statistiques de l’analyse de sensibilité de l’indice GALDIT lorsqu’en supprimant plusieurs paramètres à la fois. Comme on peut remarquer à partir du tableau, l’indice de variation augmente avec l’augmentation des paramètres supprimés. Ceci peut être éventuellement attribué au poids assigné pour chaque paramètre et à la note correspond (Almasri et al 2008).

Tableau. 52 Les statistiques du test « Map removal sensitivity analysis » suppression d’un paramètre à la fois

Paramètres enlevés	Indice de variation (%)			
	SD	Min	Max	Moy
G	0,55	1,90	4,02	3,20
A	1,92	0,30	6,86	3,79
L	0,91	0	4,55	2,29
D	1,90	1,32	8,28	5,52
I	0,40	1,80	4,01	3,09
T	0,69	1,28	4,96	3,16

Tableau. 53 Les statistiques du test « Map removal sensitivity analysis » suppression de plusieurs paramètres

Paramètre utilisé	Indice de variation %			
	Min	Max	Moy	SD
G, A, D, I et T	0	4,5	2,29	0,91
G, A, D, et T	0,12	10,4	5,36	2,82
G, A, et D	0,21	19,21	10,91	4,96
G et D	5,67	43,33	22,24	9,02
D	15,24	110,9	53,29	26,15

4.1.2.2 Le test” Single-parameter sensitivity analysis”:

Le “single parameter sensitivity analysis “ compare le poids effectif avec le poids théorique des paramètres utilisés dans le calcul de l’indice GALDIT par la formule de (Babiker et al, 2005). Le poids effectif des paramètres de GALDIT affiche une certaine déviation par rapport à leurs poids théoriques (tableau. 54). Le niveau piézométrique de la nappe par rapport au niveau de la mer a tendance à être le paramètre le plus efficace dans l’évaluation de la vulnérabilité (poids efficaces moyens 34 %), tandis que la distance

perpendiculaire à la cote et la conductivité hydraulique de l'aquifère vient en seconde avec un poids efficace moyenne de 18,66 et 18,18 % respectivement.

Tableau. 54 Les statistiques du test « Single-parameter sensitivity analysis »

Paramètre	Poids théorique	Poids théorique %	Poids effectif %			
			Min	Max	Moy	SD
G	1	6,66	3,45	13,33	7,28	2,54
A	3	20	5,88	32,14	18,18	7,68
L	4	26,66	22,22	50,00	34	7,61
D	4	26,66	8,51	34,04	18,66	6,97
I	1	6,66	3,51	13,79	7,80	1,88
T	2	13,33	6,25	22,22	14,09	2,98

4.2 Validation chimique :

La comparaison des cartes de vulnérabilité avec les cartes de distribution des nitrates constitue la deuxième méthode de validation. Les zones réellement contaminées doivent correspondre à celle où les indices de vulnérabilité sont les plus élevés, et en tient en considération qu'une zone vulnérable peut également avoir un faible indice de vulnérabilité du fait que la notion de vulnérabilité n'est pas synonyme d'une pollution actuellement, mais plutôt d'une prédisposition de ces zones à une contamination éventuelle.

Dans cette étude la carte de distribution des nitrates est utilisée pour la comparaison avec les cartes de vulnérabilité DRASTIC, GOD, SI et les chlorures pour la carte de vulnérabilité GALDIT.

Au cours de cette étude les nitrates et les chlorures sont dosés dans trente échantillons d'eaux souterraines distribuées régulièrement sur l'étendue de la plaine. Les résultats obtenus montrent que l'eau souterraine de la nappe de Collo contient des concentrations en nitrate varié entre 115,68 mg/l enregistré au puits (W4) et 25,17 mg/l au puits (W2) (Fig. 83a, 83b).

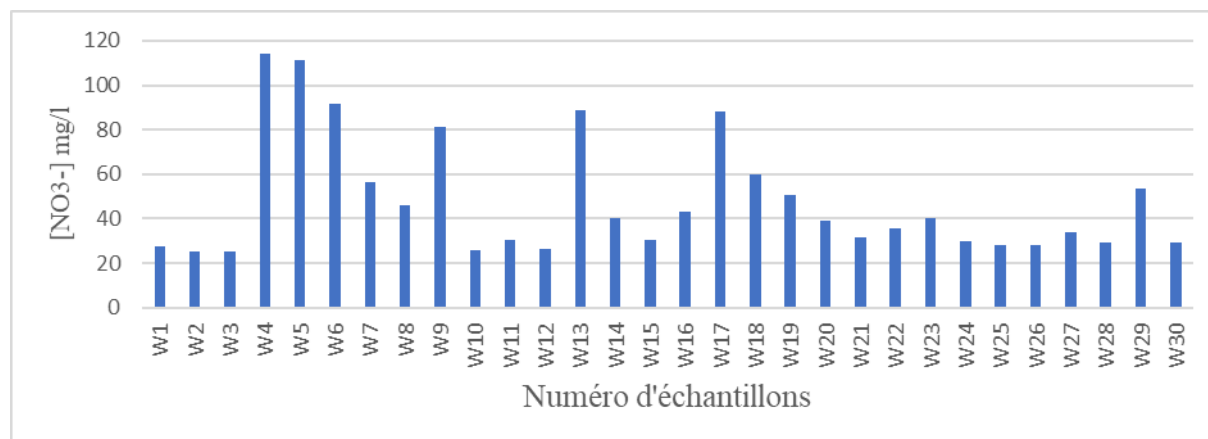


Fig.83a : Concentration des NO₃-(mg/l) (octobre 2015)

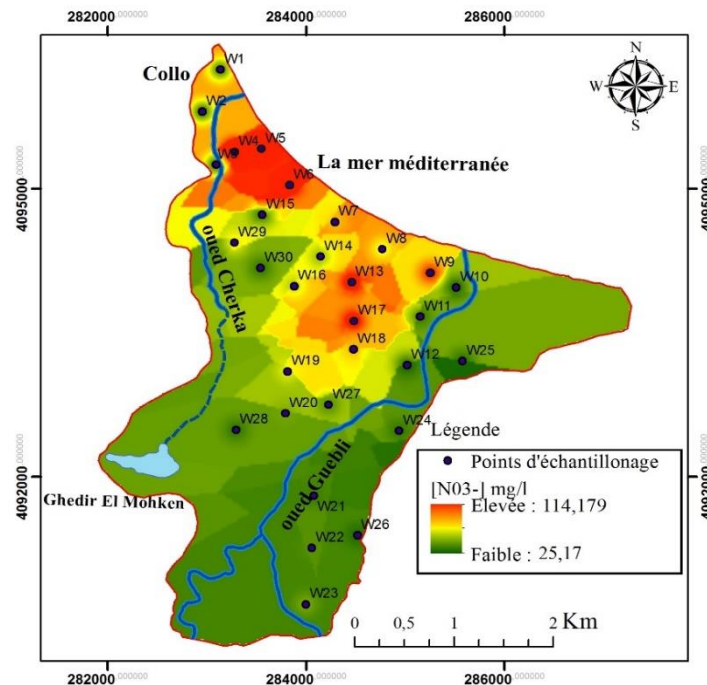


Fig. 83b : Carte de distribution des nitrates (en mg/l) dans la plaine de Collo (octobre 2015)

La distribution spatiale des nitrates montre un décroissement des teneurs du nord vers le sud. La carte obtenue concorde bien avec les modèles DRASTIC et GOD, mais avec le modèle SI elle concorde seulement dans sa partie nord et ouest.

Pour le modèle GALDIT, les chlorures ont été utilisés pour la validation. La distribution spatiale des chlorures affichait des valeurs oscillantes entre 14,2 mg/l et 437,25 mg/l. Les valeurs élevées en chlorures (> 250 mg/l) occupent la partie est et nord-ouest de la zone d'étude (couleur jaune vers le rouge (Fig. 84b) est cela s'adapte parfaitement avec le modèle GALDIT dans ces endroits due à l'échange hydraulique entre les cours d'eau Cherka et Guebli envahis par l'eau de mer pendant la période des basses eaux et la nappe d'eau souterraine. La partie nord de la plaine ne semble pas être influencée par l'intrusion saline à cause de l'absence d'une éventuelle surexploitation de la nappe, en outre la faible profondeur des puits (pour la plupart inférieure à 10 m) implique que ces derniers ne captent que la partie supérieure d'eau douce de l'aquifère.

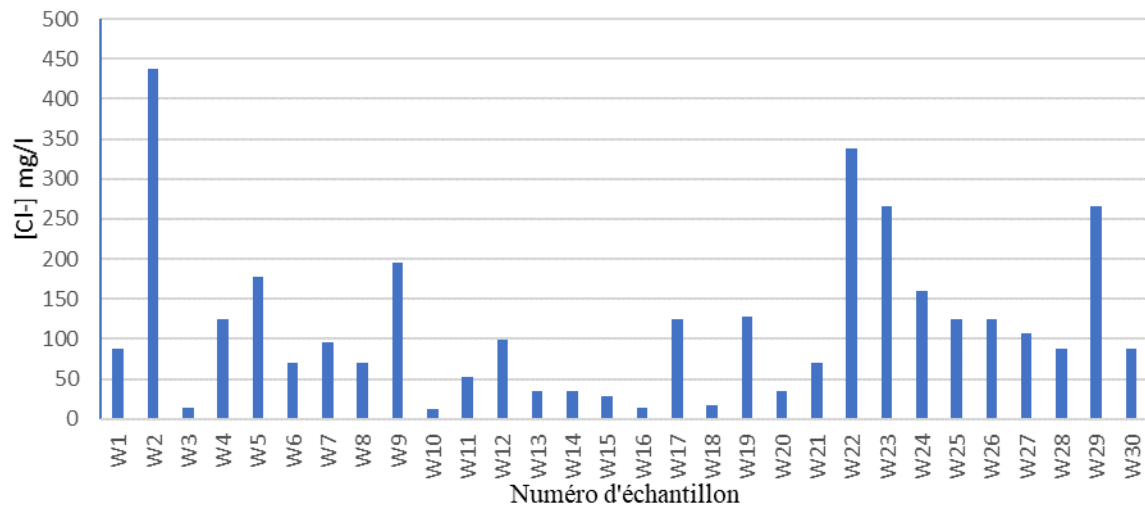


Fig. 84a : Concentration des Cl⁻ (mg/l) (octobre 2015)

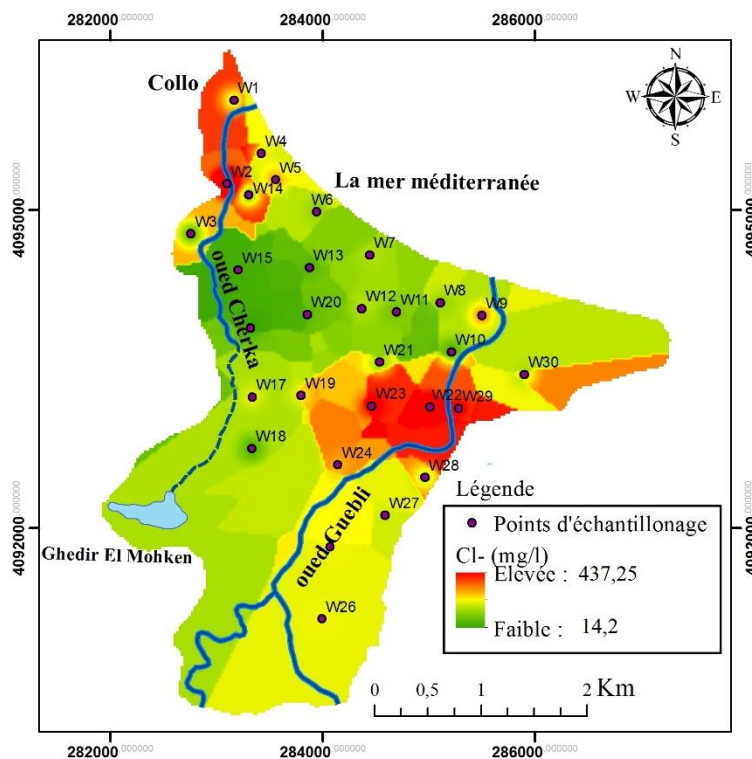


Fig. 84b : Carte de distribution des Chlorures (en mg/l) (octobre 2015)

5 Comparaison des cartes de vulnérabilité :

En ce qui concerne les cartes de vulnérabilité réalisées par les méthodes DRASTIC, GOD et SI, leur comparaison est intéressante, car elle permet de mettre en évidence les différences dans l'évaluation de la vulnérabilité.

Tableau. 55 : Comparaison des surfaces occupées par les différents degrés de vulnérabilité déterminés selon les méthodes DRASTIC, GOD et SI

Degré de vulnérabilité	DRASTIC	GOD	SI
Très forte	11,83 %	-	68,07 %
Forte	31,2 %	22,4 %	17,51 %
Modéré	30,18 %	27,5 %	8,39 %
faible	26,48 %	23,5 %	6,01 %
Très faible	-	26,9 %	

Dans le cas de la méthode DRASTIC, on obtient une carte dont près de 43 % de la surface sont représentées par des zones à vulnérabilité très forte et forte. Ces zones situées aux endroits où il y a présence de sable et limon sableuse dans la zone non saturé. Les secteurs à faible vulnérabilité se trouvent au niveau des zones tampons, c'est-à-dire là où l'argile. Les zones de recharge sont reconnaissables à une vulnérabilité plus forte. L'ensemble de la carte montre un découpage en classe de vulnérabilité assez fin pour une carte d'échelle régionale.

Dans le cas de la méthode GOD, on obtient une carte de quatre degrés de vulnérabilité de forte à très faible et avec des proportions égales. C'est une carte régionale à valeurs relatives. Toute fois la méthode ne permet pas de qualifier les zones de recharge comme étant à forte vulnérabilité (elle la qualifier comme modéré à faible vulnérabilité).

La méthode SI fournissent des résultats où prédomine nettement la classe de vulnérabilité très forte et forte (68,07 %, et 17,51 % de la surface totale). Dans cette méthode les notes attribuées au paramètre occupation du sol sont très élevées en comparaison avec les autres notes, ce qui influent directement sur l'indice de vulnérabilité SI. Les zones de recharge sont qualifiées comme très forte vulnérabilité ce qui coïncide avec celle de la méthode DRASTIC.

En résumé il semble donc que la quantité d'information acquise pour l'évaluation de la vulnérabilité par la méthode GOD et ne soit pas suffisante pour comprendre le fonctionnement du système aquifère puisque la carte produite est très uniforme. La méthode DRASTIC permet une évaluation qui semble correspondre aux attentes puisque la zone à

forte vulnérabilité se situe dans les zones de recharge et dans les zones à faible épaisseur de sédiments de la zone non saturé.

Pour la méthode SI, le système de notation attribuer au paramètre occupation du sol semble fait la différence à cause du grand écart avec celle attribuée aux autres paramètres.

Sur la lumière des résultats obtenue, il apparait que la méthode DRASTIC est le mieux adaptée pour l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère de Collo.

6 Conclusion :

Dans cette étude, nous avons évalué la vulnérabilité à la pollution à partir de 4 méthodes DRASTIC, GOD, SI et GALDIT.

La vulnérabilité de l'aquifère de Collo déterminée par les méthodes DRASTIC, GOD et SI, révèle une tendance à la vulnérabilité moyenne à forte, dont la répartition est la suivante :

Pour la méthode DRASTIC :

- 11,83 % de la zone d'étude, ont une vulnérabilité très forte qui occupe le nord-est de la plaine.
- 31,2 % de la zone d'étude et occupe le centre et le nord-est de la plaine, ont une forte vulnérabilité.
- 30,18 % occupe le sud de la zone d'étude ont une vulnérabilité modérée
- 26,48 % de la zone d'étude a faible vulnérabilité. Elle est localisée à l'ouest de la plaine.

Pour la méthode GOD 22,4 % de la zone d'étude ont une forte vulnérabilité, 27,5 % une vulnérabilité modérée et 50,4% une vulnérabilité faible a très faible.

Pour la méthode SI, 68,07 % de la zone d'étude ont une très forte vulnérabilité, 17,51 % une vulnérabilité forte et 14,4 % une vulnérabilité faible a très faible.

La cartographie de la vulnérabilité potentielle à l'intrusion marine moyennant la méthode GALDIT montre que 52,64% de la superficie totale ont une forte vulnérabilité à l'intrusion marine.

Une comparaison entre les méthodes de vulnérabilité utilisée dans ce travail avec la distribution spatiale des nitrates dans les eaux souterraines montre que la méthode DRASTIC est le mieux adapté avec un découpage en classe de vulnérabilité assez fin pour une carte d'échelle régionale.

CHAPITRE VII

Evaluation de risque des eaux souterraines à la pollution

1 Introduction

La pollution constitue un risque permanent de limitation des ressources en eaux souterraines. L'urbanisation croissante et le développement de l'agriculture contribuent à la dégradation quantitative et qualitative des eaux souterraines. L'eau souterraine étant de plus en plus en demandé, la protection de celle-ci contre les contaminants devient primordiale.

L'objectif général de ce chapitre est de cartographier le risque des eaux souterraines de la plaine de Collo à la pollution, afin de produire un document capable d'aider à la décision en matière d'aménagement.

Selon Morris & Foster (2000) et Foster & Hirata (1988), l'évaluation du risque est calculée en combinant la carte de vulnérabilité intrinsèque et la carte du danger global. Les cartes de danger spécifique avec les cartes de vulnérabilité spécifique.

La carte du risque de l'aquifère de Collo est produite à la base de la carte de vulnérabilité intrinsèque construite par la méthode DRASTIC, et la carte du danger global (aléa) selon le cadre conceptuel proposée par COST 620. Cette approche a été développée pour les zones karstiques, mais elles peuvent également être appliquées avec des modifications mineures aux aquifères poreux (Daly et al. 2002; Voudouris 2008; Saidi et al. 2011).

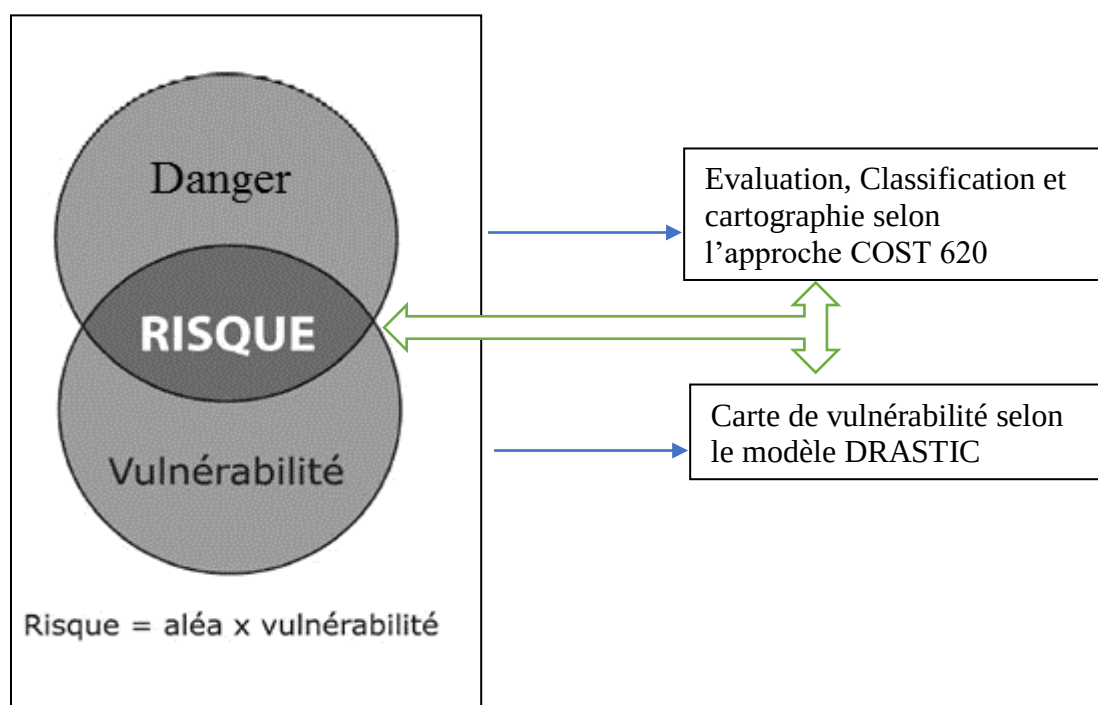


Fig. 85 Illustration schématique de la procédure de cartographie de risque dans la plaine de Collo

2Évaluation et classification des dangers (Aléas) :

Dans le contexte de la contamination des eaux souterraines, un danger est défini comme étant une source potentielle de contamination résultant des activités humaines qui se trouve principalement à la surface du sol (Zwahlen, 2004). Il existe une large gamme des sources qui sont susceptibles de générer certains contaminants. Souvent, le niveau de contamination des eaux souterraines est déterminé par le processus biodégradation qui se produit dans la zone située dans la zone non saturé (Gogu et Dassargues, 2000). Le comportement des polluants est définie par leurs propriétés notamment la toxicité, mobilité et dégradation (Andreo et al., 2006 ; Arias-Estevez et al., 2008 ; Aronson et al., 2006; Nobre et al., 2007; Vahidnia et al., 2007).

Selon l'approche COST 620 le danger doit être classifié selon le type d'occupation du sol soit à l'échelle locale ou régionale. Trois catégories principales distinguées à savoir les infrastructures, l'industrie et les activités agricoles, Tableau (56). Ces grandes catégories sont proposées comme les catégories de niveau I. Les catégories du danger niveau II utilisent des critères supplémentaires qui distinguent les dangers en fonction de :

- Source principale (contaminant liquide ou solide).
- Types d'activités industrielles ou agricoles.

La troisième catégorie niveau III est une subdivision de la catégorie du danger niveau II, présentée au tableau (58).

Tableau. 56 Classification des risques pour la protection des eaux souterraines

Numéro	Catégorie du danger Niveau I	Catégorie du danger Niveau II
1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6	Le développement des infrastructures	Eaux usées Déchets municipaux Carburants Le transport et le trafic Installations de loisirs Risques divers
2 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7	Les activités industrielles	Exploitation minière Sites d'excavation L'exploration pétrolière et gazière Installation industrielle (non minier) Installation d'énergie Stockage industrielle Traitement des eaux usées
3 3.1 3.2	L'élevage et l'agriculture	Bétail Agriculture

L'objectif principal de l'inventaire ci-dessus est de recouvrir les différents types de dangers qui sont considérés comme nuisibles pertinents pour les eaux souterraines dans la plaine de Collo servant des critères raisonnables pour évaluer et cartographie des dangers dans un cadre pratique.

3 Notation et pondération de danger :

L'impact possible d'un danger sur les eaux souterraines peut varier considérablement selon leur potentielle de la dangerosité (tableau. 58). L'évaluation quantitative et la classification fiable du potentiel de nuisance des dangers nécessite de suivre les étapes suivantes :

- Mise en place d'un système de pondération qui permet une comparaison entre les différents types de danger adapté pour une mesure de protection des eaux souterraines.
- Mise en place d'une procédure de classement des dangers de même type
- Le développement d'un système d'évaluation pour la détermination de la probabilité qu'une libération de contaminant puisse avoir lieu en liaison avec un danger.
- Définition d'un algorithme mathématique pour calculer le degré potentiel de nocivité pour chaque type de danger en tenant compte du coefficient de pondération et de classement.

L'évaluation du degré potentiel de nuisance pour chaque type de danger nécessite les informations suivantes :

- Processus ou de la nature de l'activité (production, stockage, etc.).
- Type de substances nocives.
- La quantité de substances qui peut être libéré.
- L'âge et l'état des installations et niveau de maintenance.

3.1 Méthode de pondération :

Les critères de pondération sont les éléments associés à chaque type de danger, et leur propriété (solubilités et mobilité). Il est déterminé le coefficient de pondération ou la « degré de nocivité d'un danger pour les eaux souterraines **H** ». Trois approches ont été examinées pour estimer la nuisance de chaque type de danger (toujours dans le cadre COST 620) :

- En première approche, la liste d'inventaire des dangers a été envoyée aux équipes nationales chargées des zones d'essais avec l'invitation à juger l'importance de

chaque type de danger en attribuant des chiffres entre 0 et 10 en fonction de leur importance.

- Comme deuxième approche, les facteurs de pondération préliminaires ont été calculés avec une formule qui a été utilisée dans le cadre du programme italien d'évaluation de l'indice de vulnérabilité SINTACS (Civita et al, 2000). L'indice de contamination **(DCI)** est calculé pour chaque type de danger en ajoutant les potentiels « impact environnemental causé par les activités humaines spécifiques ICEI » qui sont considérées comme les paramètres les plus importants pour évaluer le degré de nocivité des dangers pour les eaux souterraines. Un score allant de 0 à 3 selon l'expérience générale sur l'impact environnemental a été attribuée à chacun des facteurs ICEI.
- Dans une troisième approche, il est demandé aux six experts d'attribuer des poids à tous les dangers apparaissant sur la liste d'inventaire en fonction de leur expérience de la toxicité générale. Les valeurs devraient être distribuées avec une plage de 0 (non nocif) à 100 (nocivité extrême).

Enfin, en utilisant les résultats obtenus à partir de chacune des trois approches. Une moyenne pondérée est calculée pour chaque type de danger. Les valeurs de pondération sont répertoriées dans le tableau (58) et varient entre 10 et 100.

3.2 Procédure de classement :

Afin de maintenir l'équilibre avec la moyenne des valeurs de pondération, il est recommandé que ces valeurs de pondération doivent être modifiées légèrement en multipliant par un facteur de classement (**Q**) entre 0,8 et 1,2 (pour indiquer les quantités faibles ou élevées respectivement de substances toxiques par rapport à la moyenne générale).

3.3 Probabilité de contamination des eaux souterraines :

Mis à part le type et la quantité de substances nocives associées à un danger, l'état technique, niveau de maintenance, mesure de sécurité et conditions environnantes sont des facteurs importants pour évaluer la probabilité qu'une contamination réelle puisse se produire. Cette probabilité doit prendre en compte chaque fois que l'indice du danger **(HI)** est estimé. Pour cela un facteur de réduction **R_f** est conseillé, ce coefficient fournit une évaluation de la probabilité qu'un événement de contamination se produise.

En théorie le facteur de réduction varié de 0 à 1, qui doit être appliqué soigneusement, sinon ces réductions conduire à une minimisation des effets des risques avec un potentiel toxique élevé.

3.4 Calcul de l'indice de danger HI :

L'indice du danger décrit le degré de nocivité de chaque danger. Pour le calculer, la formule suivante est recommandée :

$$HI = H. Q_n . R_f$$

Où **HI** est l'indice de danger,

H est la valeur du poids pour chaque danger assigné dans le tableau (58).

Q_n est le facteur de classement (0,8 à 1,2).

R_f le facteur de réduction.

L'indice de risque HI varie de 0 à 120 scores. Pour une interprétation ultérieure, il est conseillé de subdiviser l'indice de danger en cinq ou six classes. Tableau (57).

Tableau 57 Indice et classe des dangers.

Indice de danger HI	Classe de HI	Niveau de danger	Couleur
0-24	1	Nul ou très faible	Bleu
24-48	2	Faible	vert
48-72	3	Modéré	jaune
72-96	4	Élevé	orange
96-120	5	Très élevée	Rouge

Tableau 58 Valeurs des pondérations des dangers.

No	Danger	Valeurs de pondération
1	Infrastructure de développement	
1.1	Eaux usées	
1.1.1	Urbanisation (fuites des conduites d'égouts)	35
1.1.2	Urbanisation sans système d'assainissement	70
1.1.3	Maisons individuelles sans système d'assainissement	45
1.1.4	Fosse septique, Latrines	45
1.1.5	Déchets agricoles et système des eaux usées agricoles	55
1.1.6	Décharge à partir d'une usine de traitement inférieur	35
1.1.7	Retenue pour les eaux usées urbaines	60
1.1.8	Ruissèlement à partir des surfaces pavées	25
1.1.9	Rejets des eaux usées dans les cours d'eau	45
1.1.10	Puits d'injection des eaux usées	85
1.2	Déchets municipaux	
1.2.1	Dépôt d'ordures, poubelle, déchet	40
1.2.2	Station de décharge de déchets et déchet de ferraille	40
1.2.3	Site d'enfouissement des déchets sanitaires	50
1.2.4	Déblais et dépôts des débris de constructions	35
1.2.5	Boues de station d'épuration	35
1.3	Combustibles	
1.3.1	Réservoir de stockage au-dessus du sol	50
1.3.2	Réservoir de stockage au-dessous du sol	55
1.3.3	Stock de batteries	50
1.3.4	Dépôt de citernes	50
1.3.5	Station de chargement de carburant	60
1.3.6	Station d'essence	60
1.3.7	Caverne de stockage de carburant	65
1.4	Transport et circulation	
1.4.1	Route non sécurisée	40

CHAPITRE VII *Evaluation de risque des eaux souterraines à la pollution*

1.4.2	Tunnel routier non sécurisé	40
1.4.3	Gare de poids lourd	35
1.4.4	Zone de parkings automobiles	35
1.4.5	Ligne de chemin de fer	30
1.4.6	Tunnel de chemin de fer non sécurisé	30
1.4.7	Station des chemins de fer	35
1.4.8	Gare de triage	40
1.4.9	Piste	35
1.4.10	Conduite de liquide dangereux	60
1.5	Les installations de loisirs	
1.5.1	Urbanisation touristique	30
1.5.2	Camping	30
1.5.3	Stade ouvert de sport	25
1.5.4	Terrain de golf	35
1.5.5	Terrain de Ski	25
1.6	Danger divers	
1.6.1	Cimetière	25
1.6.2	Enfouissement des animaux	35
1.6.3	Locaux de nettoyage à sec	35
1.6.4	Station de transformation	30
1.6.5	Installation militaire abandonnée	35
2	Activité industrielle	
2.1	Mine (opérationnelle ou abandonner)	
2.1.1	Mine, sel	60
2.1.2	Mine, autre non-métallique	70
2.1.3	Mine, minerais	70
2.1.4	Mine, charbon	70
2.1.5	Mine, uranium	80
2.1.6	Stock extérieur des matières premières dangereuses	85
2.1.7	Broyage de minerais et installation d'enrichissement	70
2.1.8	Masses des résidus miniers et ordures	70

CHAPITRE VII *Evaluation de risque des eaux souterraines à la pollution*

2.1.9	Résidus miniers	70
2.1.10	Drainage minier	65
2.1.11	Bassin de résidus	65
2.2	Sites d'excavations	
2.2.1	Excavation et remblais pour le développement	10
2.2.2	Bac de gravier et sable	30
2.2.3	Carrière	25
2.3	Exploitation de gaz et pétrole	
2.3.1	Puits de production	40
2.3.2	Puits de réinjection	70
2.3.3	Station de chargement	55
2.3.4	Conduite de pétrole	55
2.4	Installations industrielles (non minière)	
2.4.1	Fonderie	40
2.4.2	Ouvrages en fer et en acier	40
2.4.3	Transformation des métaux	50
2.4.4	Travaux de galvanoplastie	55
2.4.5	Raffinerie de pétrole	85
2.4.6	Usine de produits chimiques	65
2.4.7	Industrie de caoutchouc et des pneus	40
2.4.8	Fabrication de papiers et de pâtes	40
2.4.9	Tannerie de cuir	70
2.4.10	Industrie de nourritures	45
2.5	Installations d'énergie	
2.5.1	Usine à gaz	60
2.5.2	Centrales caloriques	50
2.5.3	Centrales nucléaires	65
2.6	Stockage industriel	
2.6.1	Les stocks de matières premières et produits chimiques	60

CHAPITRE VII *Evaluation de risque des eaux souterraines à la pollution*

2.6.2	Récipients des substances dangereuses	70
2.6.3	Décharge de cendre et amas stérile	70
2.6.4	Sites des déchets non dangereux	45
2.6.5	Sites des déchets dangereux	90
2.6.6	Sites des déchets nucléaires	100
2.7	Détourner et traitement des eaux usées	
2.7.1	Canalisation des eaux usées	65
2.7.2	Surfaces de bondage pour les eaux usées industrielles	65
2.7.3	Décharge des installations de traitements	40
2.7.4	Puits d'injection des eaux usées	85
3	L'élevage et l'agriculture	
3.1	Élevage	
3.1.1	Grange animale (hangar, jardin, porcherie)	30
3.1.2	Parc d'engraissement	30
3.1.3	ferme industrielle	30
3.1.4	Tas de fumier	45
3.1.5	réservoir où bassin de stockage de lisier	45
3.1.6	Zones d'élevage intensif	25
3.2	Agriculture	
3.2.1	Ensilage ouvert	25
3.2.2	Ensilage fermé	20
3.2.3	Stocks d'engrais et de pesticides	40
3.2.4	Zone d'agriculture intensive (avec une forte demande d'engrais et pesticide)	30
3.2.5	Jardin communautaire	15
3.2.6	Serre	20
3.2.7	Irrigations eaux usées	60

4 Technique de cartographie des dangers :

La cartographie et le collecte d'informations sur les différents dangers est basée sur l'utilisation combinée de :

- Extraction à partir des cartes topographiques et photos aériennes

- La collecte de données à partir d'archives et organismes.
- Observation sur site.
- Enquêtes directes avec les entreprises, les individus ; etc.

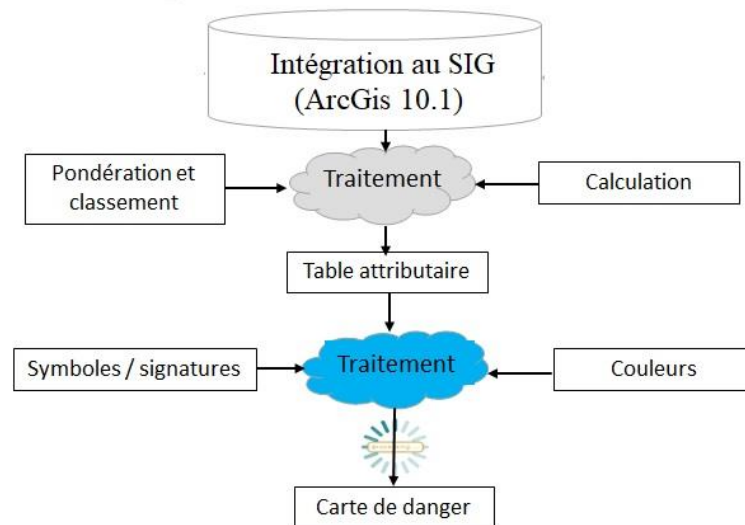


Fig. 86 Illustration schématique de la procédure de cartographie du danger

Les différentes données nécessaires pour effectuer une évaluation des dangers détaillée ont été regroupées dans des cartes. Il est recommandé que l'intégration de ces données aux fins de la cartographie des dangers être effectuée en utilisant un système d'information géographique SIG (ArcGis 10.1 dans l'éventuelle étude).

5Evaluation de risque :

L'évaluation de risque ou l'analyse du risque, est l'identification des dangers potentiels existés et les voies de contaminations afin de fournir les mesures à apprendre pour la protection des eaux souterraines. Cette évaluation doit prendre en compte les éléments suivants :

- La probabilité d'un impact.
- L'intensité d'un impact éventuel qui affecte les eaux souterraines (intensité d'impact).
- La sensibilité des eaux souterraines par rapport à l'impact (sensibilité des eaux souterraines).

L'interaction entre le contaminant à la surface du sol et la vulnérabilité des aquifères à la pollution à un endroit donné décrite comme « intensité du risque ». Le calcul de l'indice

d'intensité de risque tient en compte le danger et les indices de vulnérabilité (Foster 1987, Magiera 2002, Daly & Misstear 2002).

Une autre méthode consiste à combiner la vulnérabilité intrinsèque et le danger en utilisant une approche mathématique suivant une formule simple (Zwahlen, 2003) :

$$RII = 1 / HI . \pi$$

RII : indice de l'intensité du risque.

HI : indice de danger.

π : PI facteur (indice de vulnérabilité intrinsèque).

Les classes de risque ont été proposées en tenant compte des classes de la vulnérabilité et l'indice du danger (Tableau. 59).

Tableau. 59 : Classification de la carte de risque

π Facteur	Indice de danger HI	1 / HI	$\pi. 1 / HI$	Classe de risque	Niveau de risque	Couleur
4-5	0-24	>0.042	>0.167	1	Très faible	Bleu
3-4	24-48	0.042-0.021	0.067-0.063	2	Faible	Vert
2-3	48-72	0.021-0.014	0.063-0.028	3	Modéré	Jaune
1-2	72-96	0.014-0.010	0.028-0.010	4	Elevée	Orange
0-1	96-120	<0.010	<0.010	5	Très élevée	Rouge

6Application de la méthodologie COST 620 sur la nappe de Collo

6.1 Inventaire des dangers (aléas) :

En raison du manque des informations, et la difficulté de l'inventaire, certains dangers comme les stations de lavage, stockage de la matière première et certaines sources ponctuelles de contamination comme les tas de fumier ne sont pas inclus dans cette analyse.

La plupart des dangers dans la plaine de Collo proviennent du secteur agricole, et le secteur urbain. D'autres dangers mineurs sont liés à l'infrastructure et l'industrie. Les dangers existants sont de nature diffuse (pâturage, épandage de fertilisant), linéaire (routes) ou ponctuelle (stations de carburants, décharge, fosses septiques ...etc.). Figure. (87).

- **Le danger surfacique** Dans la plaine de Collo est l'agriculture qui occupe plus de 65 % de la surface totale, très dépendante de l'irrigation et fertilisants, avec une superficie d'environ 1600 ha irrigables. En outre ces dernières années la plaine a connu une forte urbanisation surtout le long de la route nationale vers Collo et la partie nord de la plaine, avec l'absence d'un réseau d'assainissement adéquat, ce qui affecte, significativement, le cycle naturel de l'eau, autant du point de vue quantitatif que qualitatif. L'urbanisation et l'agriculture représentent une source potentielle de

contamination diffuse et ponctuelle surtout par les nitrates. (Type de danger n° 1.1.2, 3.2.4 et 3.2.6).

- ***Le danger linéaire*** est représenté dans la figure (86) par une route non sécurisée qui traverse la plaine du sud vers le nord sur une longueur de 5 Km. Cette route nationale représente une source potentielle de contamination (Type de danger 1.4.4). Le trafic augmente surtout en période estivale.
- ***Le danger ponctuel*** est représenté par deux stations de distribution de carburants (Code 1.3.6), deux sites de déchets dangereux (le plus important se situe au sud vers Kerkera, qui contient tout genre de déchets), et quelques parcs d'engraissement (code 3.1.2). Tableau (60).

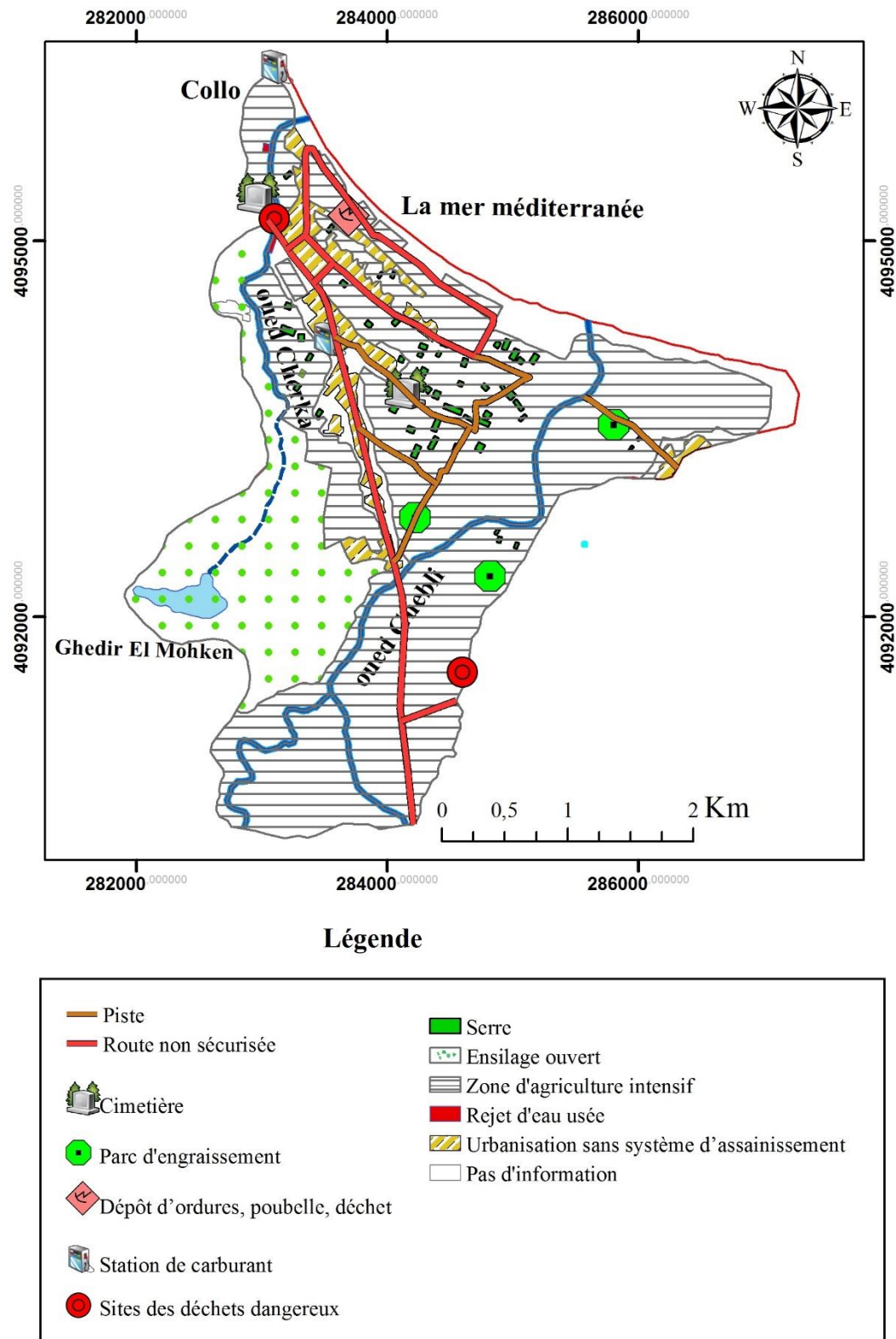


Fig. 87 Inventaires des dangers dans la plaine de Collo (non classier)

Tableau. 60 Liste des dangers cartographiés dans la plaine Collo

Code	Danger	Valeur de pondération	Facteur de classement Qn	Rf	Indice de danger HI
1.1.2	Urbanisation sans système d'assainissement	70	1,2	1	84
1.1.9	Rejets des eaux usées dans les cours d'eau	45	1,2	1	54
1.2.1	Dépôt d'ordures, poubelle, déchet	40	1	1	40
1.3.6	Station d'essence	60	1,2	1	72
1.4.1	Route non sécurisée	40	0,85	1	34
1.4.9	Piste	35	0,85	0,8	24
1.5.1	Urbanisation touristique	30	1	1	30
1.6.1	Cimetière	25	0,8	1	20
1.6.4	Station de transformation (liège)	30	1	1	30
2.6.5	Sites des déchets dangereux	90	1,2	1	108
3.1.2	Parc d'engraissement	30	0,85	1	26
3.2.1	Ensilage ouvert	25	0,8	0,8	16
3.2.4	Zone d'agriculture intensive (avec une forte demande d'engrais et pesticide)	30	1	1	30
3.2.6	Serre	20	1	0,9	18

6.2 Détermination de l'indice du danger (HI) Tableau. 60 :

L'indice de danger est calculé selon la formule

$$HI = H \cdot Qn \cdot Rf$$

H : a été prise à partir de la liste globale des dangers, il varié entre 20 et 90.

Qn : le facteur de classement varié, de 0,8 à 1,2 a été évaluée, compte tenu de la gamme de spécifications techniques possibles de chaque type de danger.

L'urbanisation sans système d'assainissement a été classée selon le nombre d'habitants (indice de danger entre 72-96). Le même principe a également été appliqué pour les rejets des eaux usées. Les routes et les pistes ont été classées en considérant le nombre de véhicules qui le fréquente. Les stations de carburants et sont classées selon leurs surfaces, le nombre des pompes et l'état techniques (dans la zone d'études il y a deux stations fortement fréquentées et d'une grande surface) ($Qn = 1,2$).

Les sites des déchets dangereux et les dépôts de poubelles et ordures ont été classées selon leur surface et la nature des déchets qu'ils contiennent. ($Qn=1$ pour les sites des dépôts de poubelles et ordures ménagères et $Qn = 1,2$ pour les déchets dangereux).

Toutes les zones agricoles ont été classées comme intensives. Les serres sont notées suivant leurs tailles (dans la plaine les serres sont de tailles moyennes $Q_n = 1$).

Les parcs d'engraissement sont notés selon le nombre des animaux ainsi leurs surfaces (les parcs d'engraissement dans la zone d'études sont de moyenne taille avec des animaux peut nombreux)

Rf : Facteur de réduction, varié de 0 à 1. Estime la probabilité d'une contamination de se produire. Pour la plupart des dangers dans la plaine de Collo, aucune information disponible concernant l'état où le niveau de maintenance (de différentes équipement ou infrastructure définis comme dangers) et donc Rf est défini comme 1 (pas de réduction) sauf le cas des pistes et les ensilages ouverts.

Le résultat de multiplication des trois facteurs décrit le degré de nocivité de chaque danger. Fig. (88).

Pour générer la carte du danger classifié, la carte vectorielle non classifiée a été convertie en données raster. Les valeurs de l'indice de danger obtenu sont divisées en cinq classes (très élevés à très faible) figure. (88).

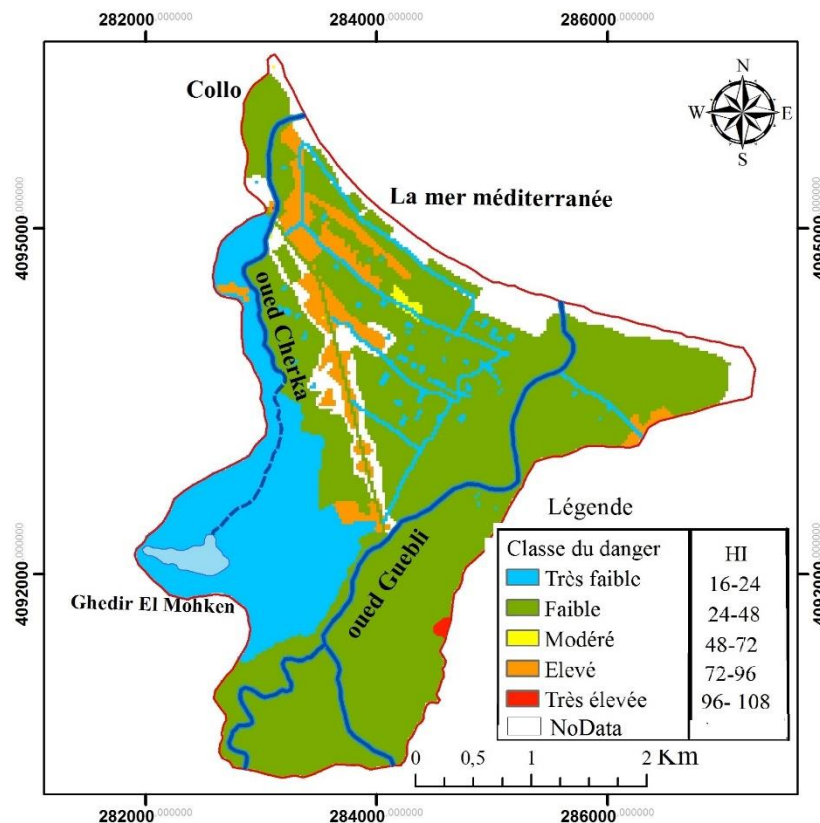


Fig. 88 Carte de danger classifié de la plaine de Collo

La carte des dangers de la plaine de Collo a été cartographiée à l'échelle 1:50000. À cette échelle, seuls un aperçu général des risques et leur emplacement peuvent être donnés, surtout dans les zones avec une forte concentration des dangers comme les zones urbanisées. La carte de danger obtenue montre cinq classes. Mais avec l'échelle utilisée (1/50000) seulement trois niveaux de dangers apparaissent : Fig. (89).

- Très faible, occupe 25,42 % de la surface totale (regroupe les ensilages ouverts, les pistes et les serres).
- Faible, occupe 68,57 % de la surface totale (zone d'agricultures intensives).
- Élevée, occupe 5,71 % de la surface totale et regroupe les zones urbaines sans systèmes d'assainissement et les stations de carburants.

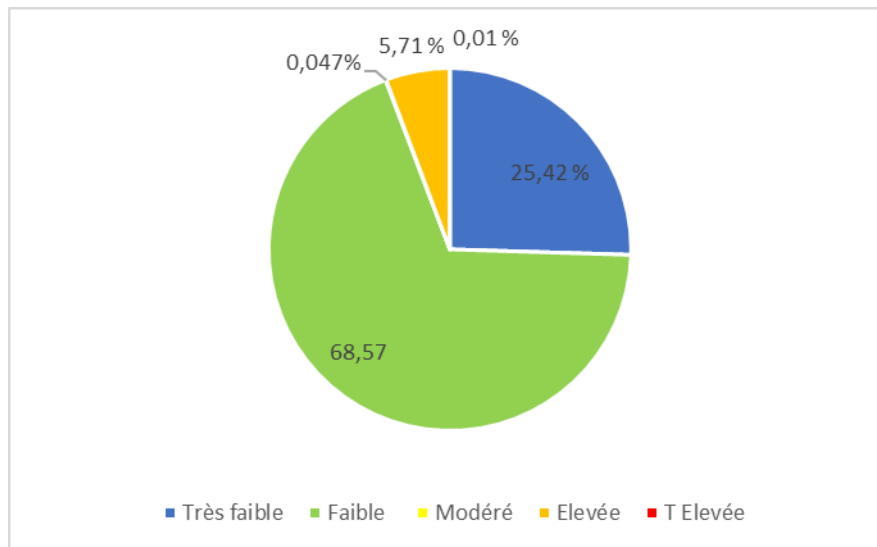


Fig. 89 : pourcentages des classes de dangers de la plaine de Collo (selon l'approche Cost 620)

6.3 Cartographie de risque : Fig. 89 :

Le processus d'évaluation du risque des eaux souterraines à la pollution de la plaine de Collo est basé sur la carte de vulnérabilité intrinsèque construite selon le modèle DRASTIC et la carte du danger (aléa).

En superposant les cartes de vulnérabilité et de danger et en multipliant les valeurs d'évaluation spécifique de la vulnérabilité par les valeurs évaluées du danger. Une nouvelle valeur est calculée.

Cette nouvelle valeur décrit le risque des eaux souterraines à la contamination, qui dépend des caractéristiques de danger et la nature du trajet de ces derniers vers les eaux souterraines (définie par la carte de vulnérabilité), en utilisant l'équation :

$$R = 1 / HI. \pi$$

Où : **R** : valeurs de risque

HI : indice du danger

π : PI facteur (vulnérabilité)

La classification du risque prendre en compte les classes de vulnérabilité et l'indice de danger (voir tableau. 61). La carte du danger a été transformée en mode Grid (raster) ou chaque cellule prend la valeur $1/ HI$, puis multipliée par la même cellule, qui a sa propre valeur d'indice de vulnérabilité (dans notre cas, c'est l'indice de vulnérabilité DRASTIC).

Tableau. 61 Classifications de la carte de risque de la plaine de Collo

π Facteur DRASTIC	Indice de danger HI	$1 / HI$	$\pi. 1 / HI$	Classe de risque	Niveau de risque	Couleur
200-202	0-24	>0.042	> 8,4	1	Très faible	Bleu
160-200	24-48	0.042-0.021	8,4-3,36	2	Faible	Vert
120-160	48-72	0.021-0.014	3,36-1,68	3	Modéré	Jaune
60-120	72-96	0.014-0.010	1,68-0,6	4	Élevée	Orange
1-60	96-120	<0.010	< 0,6	5	Très élevée	Rouge

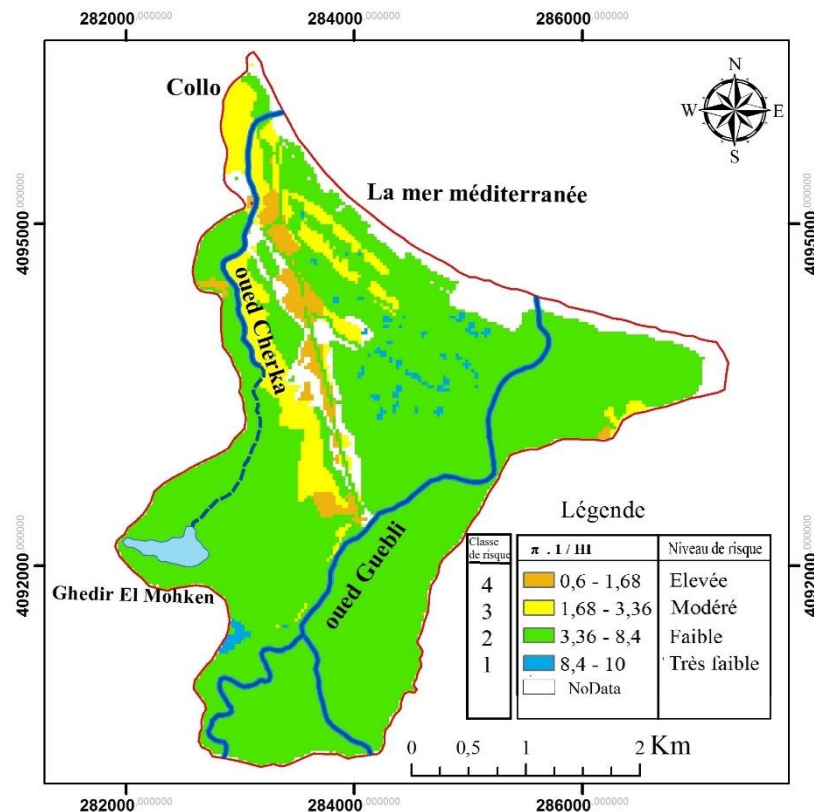


Fig. 90 : Carte de risque de la plaine de Collo

La carte de risque de la plaine de Collo montre principalement des zones de « faible », « très faible », « modéré » et « forte risque ». La classe du risque « très élevée » est absente.

Les pourcentages de la répartition des risques montrent que la majeure partie du risque est occupé par la classe 2, (dans les conditions actuelles de vulnérabilité) où 86 % de tous les dangers représente un risque faible pour les eaux souterraines. 10 % des dangers sont considérés un cause de risque « modéré » et 3% représente un niveau « élevé » du risque. Seulement 1% de danger cause un « très faible » niveau de risque.

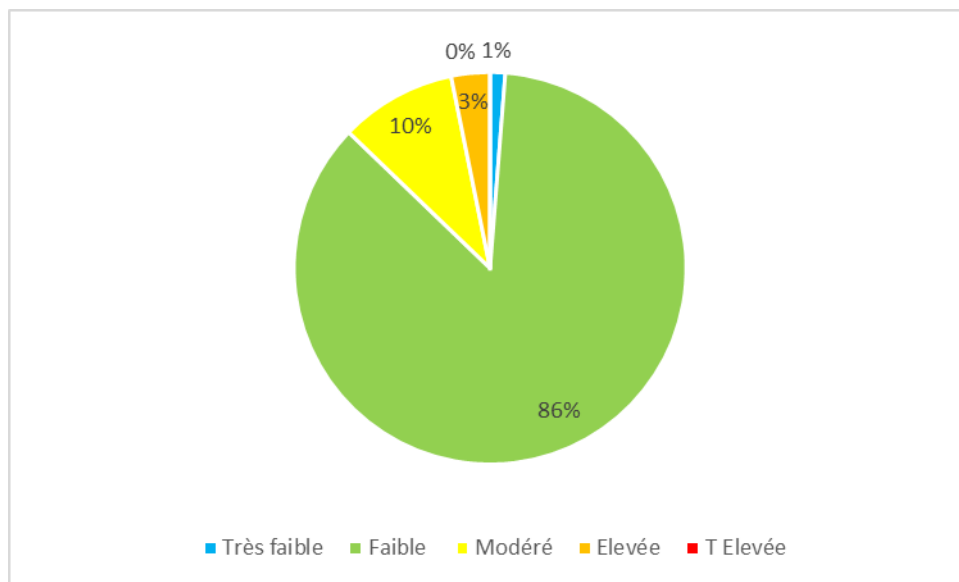


Fig.91 Pourcentages des classes de risque de la plaine de Collo (selon l'approche Cost 620)

La partie sud et nord-est de la plaine contiennent principalement des faibles niveaux du risque, le nord-ouest indique un niveau de risque modéré à élevé et qui coïncide avec des classes de danger élevé et une vulnérabilité moyenne à forte.

Comme le niveau du danger varié légèrement dans la région d'étude alors que la vulnérabilité varie considérablement, les variations des niveaux du risque sont dues principalement à la vulnérabilité élever au nord-ouest et au poids modéré attribué aux dangers représentés par les zones d'agriculture intensive qui occupe 75% de la plaine selon l'approche Cost 620.

7 Conclusion :

Caractérisé par un niveau du risque faible, modéré et élevé. La carte de risque de la plaine de Collo montre la problématique des zones à risque relativement élevé localisé au nord-ouest. Des vastes zones sont classées comme «très faibles» en raison de l'absence des risques, mais aussi en raison de la faible vulnérabilité surtout dans la partie sud de la plaine. Ces zones pourraient par conséquent être intéressantes pour un futur développement, comme ils sont préférables en vue d'une protection des eaux souterraines.

La comparaison entre la distribution de nitrate et de la vulnérabilité et la carte de risque présente une forte similitude entre les différents degrés de vulnérabilité et les concentrations de nitrates. En conséquence, la méthodologie d'évaluation du risque utilisée dans cette étude est valide (Cost 620). Dans ce projet de recherche, les systèmes d'information géographique (SIG) jouent un rôle très important :

- L'intégration, l'organisation et la structuration de l'ensemble de données géographiques.
- Gestion facile d'une base de données importante pour générer les différentes cartes thématiques (vulnérabilité, dangers et risque).
- Attribution des poids et notes pour chaque couche et calcul des différentes indices (vulnérabilité, danger et risque)
- Enfin, les SIG et d'autres technologies comme la télédétection facilitent la mise à jour de la carte de risque, car elle dépend du développement du danger et la vulnérabilité. (Sierra et al. 2008 ; Wood, 2009 ; Pelorosso et al. 2009).

Conclusion générale et recommandations

La plaine de Collo situé au nord-est de l'Algérie et d'une superficie d'environ 50 Km² constituée essentiellement par une succession des formations sédimentaires. Dont la superposition du haut en bas des alluvions à dominance sablo- limoneuse et limono argileux du Mio-Plio-Quaternaire, au-dessous on rencontre une couche de sable et gravier créant le réservoir de la nappe proprement dit ayant une épaisseur moyenne de 5 à 25 m. Ces formations reposent sur une couche former par une alternance de marne et de grès de Pliocène qui constitue le substratum.

Le climat de la région est méditerranéen tempéré, avec un hiver très humide et un été chaud, où la moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 760 mm/an. La température moyenne annuelle est de 18.30°C. Ce type de climat chaud en été et froid en hiver favorise l'évaporation des eaux précipitées et augmente l'ETP et le déficit agricole au profit de l'infiltration et du ruissellement.

L'étude géophysique exécutée et les logs stratigraphiques des forages dans la région d'étude a permis d'identifier la géométrie et l'extension des différentes formations géologiques susceptibles d'être aquifères. L'examen des coupes géoélectriques et des cartes d'iso résistivités ont mis en évidence que le massif de sable et graviers littoraux qui occupe la basse vallée présente une résistance de 150 ohms.m renferment les forages reconnus productifs. La zone la plus propice à l'exploitation de la nappe se trouve définie par la plage des valeurs supérieures à 200 ohms.m.

L'étude hydrochimique a pour but de caractériser le faciès chimique et mettre un état des lieux de la qualité des eaux souterraines de la région à partir de plusieurs modes d'interprétation usuelles en hydrochimie, a montré que :

- Un faciès dominant bicarbonaté calcique (80 % des échantillons analysés) en relation directe avec la nature lithologique du réservoir et de substratum de la nappe
- L'analyse des rapports caractéristiques montrent que l'apport de l'intrusion marine dans l'acquisition de minéralisation des eaux souterraines est faible. L'intrusion marine est remarquée seulement aux rivages des oueds Cherka et Guebli due aux échanges hydrauliques entre les eaux de surfaces et souterrains pendant la période des basses eaux.

- La zone d'étude est le siège d'une pollution diffuse par les nitrates localisés, mais reste difficilement identifiable et quantifiable. Les concentrations atteignent 110 mg/l dans le nord-ouest de la plaine.
- Il a été observé que les moyennes des teneurs maximales en Plomb et Cuivre dans les eaux souterraines qui sont supérieures à la norme de l'OMS pour l'eau potable.

La cartographie de la vulnérabilité par les modèles DRASTIC, GOD, GALDIT et SI par le couplées à un SIG révèle une tendance à la vulnérabilité forte à modérée au nord et au centre et faible au sud et à l'ouest de la zone d'étude. Les cartes de vulnérabilité DRASTIC et GOD sont relativement similaires. La carte de vulnérabilité SI, donne, quant à elle, des résultats largement différents des autres méthodes. Il est donc souhaitable de contrôler les zones et les sources de pollution et de faire le suivi des paramètres de pollution, afin de caractériser la sensibilité de l'aquifère, car cette vulnérabilité peut évoluer par les effets conjugués de l'homme et des années pluviales. Une validation de ces modèles de vulnérabilité utilisés a été effectuée dans la région en établissant une comparaison des résultats de la vulnérabilité avec la distribution spatiale des ions de nitrates a montré que la méthode DRASTIC est la plus adéquate dans notre cas d'étude.

La méthode GALDIT qui a montré une forte vulnérabilité de la nappe à l'intrusion marine dans la zone d'étude avec une atténuation de cette vulnérabilité au-delà des deux premiers kilomètres par rapport à la mer et à la bordure des oueds Cherka et Guebli.

Caractérisé par un niveau du risque faible, modéré et élevé. La carte de risque de la plaine de Collo montre la problématique des zones à risque relativement élevé localisé au nord-ouest. De vastes zones sont classées comme « très faibles » en raison de l'absence des dangers, mais aussi en raison de la faible vulnérabilité surtout dans la partie sud de la plaine. Ces zones pourraient par conséquent être intéressantes pour un futur développement, comme ils sont préférables en vue d'une protection des eaux souterraines. Mais, il serait intéressant de valider les résultats obtenus par les différentes méthodes avec des modèles numériques qui pourraient être basés sur le temps d'infiltration et le pompage (rabattement de la nappe), cela permettrait de montrer à quel point la réalisation de telle carte peut contribuer concrètement à l'aménagement du territoire.

Perspectives :

Cette étude nous amène de proposer les recommandations suivantes afin de participer à la protection quantitative et qualitative de la ressource en eau :

- Crée une base de données et d'information centralisée où tous les organismes y verraient leur initiative volontaire comme une contribution directe au développement d'une politique efficace et rigoureuse de la gestion de l'aquifère.
- Des actions devraient être menées afin de limiter la dégradation des ressources en eau dans la plaine de Collo. Ces actions devraient porter sur la gestion des déchets, sur la mise en place des ouvrages d'assainissement adaptés au contexte socio-économique et géographique. Toutefois, une bonne campagne de sensibilisation et d'éducation des agriculteurs et des populations devrait être menée.
- L'installation d'un réseau de piézomètre pour contrôler la fluctuation de la nappe.
- Mettre à jour régulièrement la base de données intégrée au SIG (ArcGis 10.X) créée au sein de ce travail pour permettre de visualiser les potentiels de contamination des eaux souterraines par les nitrates ou d'autres polluants. Ces outils informatiques et leur couplage rendront plus accessible l'application de la législation touchant la protection des eaux souterraines, permettront d'évaluer les risques de contamination des eaux de façon fiable et facile, et d'établir par la suite des périmètres de protection et de gérer les usages des ressources en eaux.

RÉFÉRENCES

REFERENCES

- Adams, B. & Foster, S. S. D. (1991)** National ground- water protection policy: hydrogeological criteria for division of the land surface area. National Rivers Authority, R&D Note 6.
- Agaguenia, S. (2010)** Principes d'aménagement pour un développement local durable d'un territoire montagneux du littoral. Cas de la commune de Collo (Nord-est Algérien). Thèse de magister en Aménagement de Territoire. Université Badji Mokhtar de Annaba.
- Aissaoui. A. (2013) :** Évaluation du niveau de contamination des de barrage Hammam Grouz de la région d'Oued Athmania (Wilaya de Mila) par les activités agricoles. Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Page 1, 31, 36.
- Al-Adamat, R. A. N., Foster, I. D. L. & Baban, S. N. J. (2003)** Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basalticaquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC. *Appl. Geogr.* 23, 303–324.
- Albinet, M. and J. Margat (1970)** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull. BRGM Paris* , 2, 3, 4. pp. 13-22.
- Aller, L. T., Bennet, J. H., Lehr, R. J., Petty, and G. Hackett. (1987)** DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, EPA/600/2-87-036, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Washington, D.C.
- Al-Zabet, T. (2002)** Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environmental Geology*; 43: 203-208.
- Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo, I., Vias J.M., Neukum, C., Sinreich, M. (2006)** Karst groundwater protection: first application of a Pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Libar (Southern Spain). *Sci Total Environ* ; 357:54–73.
- ANRH (Agence nationale des ressources hydriques). (1974)** Etude hydrogéologique de la plaine de Collo. Rapport (Agence nationale des ressources hydrique Constantine).
- Arias-Estevez M., Lopez-Periago, E., Martinez-Carballo, E., Simal-Gandara, J., Mejuto J.C., Garcia-Rio L., 2008:** The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agric Ecosyst Environ*; 123:247–60.
- Aronson, D., Boethling, R., Howard, P., Stiteler, W. (2006)** Estimating biodegradation half-lives for use in chemical screening. *Chemosphere*; 63:1953–60.
- Aubre, François. (1992)** Développement d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. Mémoire de maîtrise (MSc.), École des gradués, Université Laval, 248p.

Babiker, I.S., Mohamed, A.A.M., Terao, H., Kato, K., Ohta, K. (2004) Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system. *Environ Int*;29(8):1009–17.

Ben Kabbour, B., Zouhri, L. and Mania, J. (2005) Overexploitation and climate changes effects on groundwater yield and marine intrusion: considerations arising from the modelling of Mamora coastal aquifer, Morocco. *Hydrol. Processes*, 19(18): 3481–3797.

Benacchio, S., et al (1988) Dljèsa degli acquiferi dell'alta pianura veneta. stato di inquinamento e vulnerabilità delle acque sotterranee del bacino del Brenta, Vol. 5: Vulnerabilità dei corpi idrici sotterranei all'inquinamento, Monography GNDCI-CNR Venice, n. 207, 21 p.

Bolduc, A. M. and M. Ross. (2001) Surficial Geology, Lachute-Oka, Québec. Geological Survey of Canada, Open File 3520, 1 :50 000.

Bouillin, J.P. (1977) Géologie alpine de la petite Kabylie dans la région de COLLO et d'El millia. Thèse, Paris Toulouse, 511p.

Bouillin, J.-P. (1979) La transversale de Collo et d'El Millia (Petite Kabylie) : une région – clef pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. *Mémoire, Société, Géologique, France, (Nouvelle série)*, 57,135, 84 p.

Bouillin, J.-P., Kornoprobst, J. (1974) Associations ultrabasiques de petite Kabylie : péridotite de type Alpin et complexe stratifié ; comparaison avec les zones internes béticorifaines. *Bulletin de la société Géologique de France, (7), XVI*, 183-194, Paris.

Boulabeiz, M. (2006) Evolution des éléments chimiques et évaluation de risque des eaux souterraines à la pollution Cas de la nappe de Collo, Nord-Est Algérien. Mémoire de Magister. Université de Badji Mokhtar Annaba. 120p.

CGG, (compagnie générale de géophysique). (1965) Rapport de l'étude géophysique dans la plaine de Collo (suite à la demande du service du génie rural et de l'hydraulique agricole arrondissement de Constantine), 20p.

Chachadi, A.G. & Lobo-Ferreira, J.P. (2001) Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. Proc. Workshop on modelling in hydrogeology, Anna University, Chennai, pp.143-156, and in COASTIN A Coastal Policy Research Newsletter, Number 4, March 2001. New Delhi, TERI, pp. 7-9, (cf. <http://www.teriin.org/teri-wr/coastin/newslett/coastin4.pdf>).

Civita, M., De Regibus, C. (1995) Sperimentazione di alcunemetdologie per la valutazione del la vulnerabilita degli aquifer. *Q Geol Appl Pitagora Bologna* 3:63–71

Civita, M., and DE Maio. (1997) SINTACS. Un Sistema Parametrico per la Valutazione e la Cartografia della vulnerabilità Degli Acquiferi All'inquinamento. Metodologia & Automatizzazione. Pitagora EditriceBologna. pp 191.

Côté, M.-J., Y. Lachance., C. Lamontagne, M., Nastev, R. Plamondon et N. Roy., (2006) :*Atlas du bassin versant de la rivière Châteauguay*. Collaboration étroite avec la Commission géologique du Canada et l'Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 64 p.

Crétinon, B. (1994) « Banc d'étalonnage des hygromètres du CETIAT fonctionnant entre – 60 °C et +80 °C de température de rosée. », Bulletin du BNM, 98, Vol 25, page 11-16.

Daly, D., & Warren, W. P. (1998) in Groundwater pollution, aquifer recharge and vulnerability, Mapping groundwater vulnerability: the Irish perspective, Geological Society, London, Special Publications, ed Robins N. S. 130, pp 179–190.

Daly, D., and Misstear, B.D. (2002) The groundwater protection scheme in Ireland: a risk-based tool for effective land-use planning. Proceedings of Conference 'Protecting Groundwater', Birmingham. Environment Agency (England and Wales), 134-144.

Dastane, N.G. (1977) : Précipitation efficaces en agriculture irriguée. Bulletin. FAO, d'irrigation et de drainage, n°25, FAO, Rome 1977.

Demarets, X., Marcoen, J.M., Agneessens, R., Biston, R., Limbourg P. (1995) Flux denitrates dans une zone à nappes superficielles en wallonie (Belgique).Cahier Agricultures, 4, 430-433.

Dixon, B., (2005) Groundwater Vulnerability Mapping: A GIS and Fuzzy rule based integrated tool. Applied Geography, 25 (4): 327-347.

Doerfliger, N., and Zwahlen, F. (1998) Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK), Practical Guide. Swiss Agency for the Environment. Forests and Landscape (SAEFL). Berne

Doerfliger, N., P.-Y. Jeannin, and F. Zwahlehn. (1999) Water vulnerability assessment in karst environments: A new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method), *Environ. Geol.*, 39(2), 165–176.

Douguédroit, A. (1997) Le climat du bassin méditerranéen. In : *Le climat, l'eau et les hommes*, ouvrage en l'honneur de Jean MOUNIER, Presses Universitaires de Rennes, p. 251-280.

Durand-Delga, M. (1955) Etude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique. (Thèse,Paris). *Bulletin du Service de la carte géologique de l'Algérie*, (2), *Stratigraphie.,Descriptions régionales*, no 24, 533 p.

Edmunds, W.M., Cook. J.M., Darling.W.G., Kinniburgh.D.G., and Miles.D.L. (1987) Baseline geochemical conditions in the chalk aquifer Berkshire, UK. Basis for groundwater quality management. *App Geochem.*, 2:251-274.

Foster, S. S. D. (1987) Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundw. to Pollutants, RIVM Proc. and Inf. 38, pp. 69–86.

Foster, S. S. D., and R. Hirata. (1988) Groundwater pollution risk assessment: A methodology using available data, Pan Amer. Cent. for Sanit. Engin. and Envir. Scienc. (CEPIS), Lima.

Gemitzi, A., Petalas, C., Tsihrintzis, V., Pisinaras, V. (2006) Assessment of groundwater vulnerability to pollution: A combination of GIS, fuzzy logic and decision-making techniques. *Environmental Geology*; 49: 653-673.

Gogu, R. C., and A. Dassargues. (2000) Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overly and index methods, *Environ. Geol.*, 39(6), 549–559.

Goldscheider, N., Popescu, N., The European approach. (2004) In: Zwahlen F, editor. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, EUR 20912. Brussels 7 European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development;. p. 17–21.

Hölting, B., Haertle, T., Hohberger, K.-H., Nachtigall, K.H., Villinger E., Weinzierl, E., Wrobel, J.-P. (1995) Konzept zur Ermittlung der Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – *Geol.Jb C63*: 5-24

Jasrotia, A.S. Singh. R. (2005) groundwater pollution vulnerability using the drastic model in a gis environment, devak-rui watersheds, india. *Journal of Environmental Hydrology*, Volume 13. Paper 11.

Ligget, J. E., and S. Talwar. (2009) Groundwater vulnerability and integrated water resource management, *Streamline Watershed Management Bull.*, 13(1), 18–29.

Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R. (2006): Mediterranean Climate Variability. Elsevier, pp 438. ISBN: 0-444-52170- 4

Lodwick, W. A., Monson, W. & Svoboda, L. (1990) Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. *Int. J. Geogr. Inform. Syst.* 4(4), 413-428

Magaritz, M., Luzier, J.E. (1985) Water rock interactions and seawater–freshwater mixing effects in the central dunes aquifer, Coos Bay, Oregon. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49, 2515–2525.

Magiera, P. (2000) Methoden zur Abschätzung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers. *Grundwasser*, 3, 103-114.

Magiera, P. (2002) GIS-gestützte Bewertung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers. – *Geol. Jahrb.*, Reihe C, Heft SC 3, 165 p., Hannover.

Mahjoub, Y. (1991) Cinématique des déformations et évolution P,T anti-alpines et alpines en Petite Kabylie (Algérie Orientale). Un model d'évolution du domaine tellien interne. *Thèse doctorat. Université des Sciences., Université (USTHB), Alger*, 193 p.

Mahjoub, Y., Choukroune, P., Kienast, J.R. (1997) Kinematics of a complex Alpine segment: superimposed tectonic and metamorphic events in the petite Kabylie massif (northern Algeria). *Bulletin de la société géologique de France*, (8), p649-661.

Mahjoub, Y., Merle, O., 1990 : Cinématique des déformations tertiaires dans le massif de Petite Kabylie (Algérie Orientale).). *Bulletin de la société géologique de France*, **8** (4), 629 - 634.

Margat J. (1968) Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine a la pollution [Groundwater vulnerability to contamination]. Bases de al cartographie, (Doc.) 68 SGC 198 HYD, BRGM, Orleans, France.

Marre A. (1987) Etude géomorphologique du Tell oriental algérien de Collo à la frontière tunisienne. Thèse lettre, Aix Marseille II, 2 vol, 559 p.

Martinez-Bastida, J.J., Arauzp, M., Valladolid, M. (2010) Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeology Journal*; 18: 681-698.

Musy. A. (1998) Cours d'hydrologie appliqué. Ecole polytechnique de lausanne, Edition HGA Bucarest. 368p.

MURAT, V. (2000) Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution, application aux aquifères de piémont Laurentien. Mémoire de maîtrise université de Québec INRS – Géo ressources, Québec 127p.

Napolitano, P. and A. G. Fabbri. (1996) Single parameter sensibility analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS in Kova K. And Nachtnebel H. P. (eds) Proc. HydrolGis Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management. IAHS Publ. 235, 559-566.

Neukum, Christoph, Azzam, Rafiq. (2009) Quantitative assessment of intrinsic groundwater vulnerability to contamination using numerical simulations, in: The science of the total environment 408.2, S. 245-254, doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.09.046.

Newell, C.J et J.A O'connor, (1998) Characteristics of dissolved hydrocarbon plumes, Results of four studies, American petroleum institute. Washington DC.

Nobre R.C.M., Rotunno, O.C., Mansur, W.J., Nobre, M.M.M., Cosenza, C.A.N. (2007) Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *J Contam Hydrol*;94:277–92.

Olmer, M., and B. Rezac. (1974) Methodical principles of maps for protection of ground water in Bohemia and Moravia scale 1:200000, Mem. I.A.H. 10, 1, pp. 105–107.

Ouabadi, A., Capdevila, R., Fourcade. (1992) Le granite à biotite et cordiérite du Cap Bougaroun (Algérie). Un analogue alpin des granites de type S de la ceinture de Lachlan (Australie). *Comptendu de l'Académie des sciences, Paris*, 314, Série II., 1187-1194.

Parceveaux. (1990) Dictionnaire encyclopédique d'agrométéorologie, Français-Anglais-Espagnol, index des mots clés I.N.R.A Paris. p323.

Pelorosso, R., Leone, A., Boccia, L. (2009) Land cover and land use change in the Italian central Apennines: a comparison of assessment methods. *Appl. Geogr.* 29, 35–48.

Perrier. A. (1984) Mise à jour des définitions sur l'évapotranspiration et les besoins en eau des cultures Edition INRA, P881, p883.

Petelet-Giraud E., Doerfliger, N., Crochet P. (2000) RISKE: multicriteria assesment of karstic aquifer vulnerability mapping. Application to the Fontanilles and Cent-Fonts karstic aquifers (Herault, S.France). *Hydrogéologie* 4, pp 71-88.

Plagnes, V. (2000) Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par lagéochimie des eaux, Thèse de 3cycle, Université de Montpellier, Document du BRGM 294, 372p.

Pochon, A., J.P. Tripet, R., Kozel, B., Meylan, M., Sinreich., and F. Zwahlen. (2008) Groundwater protection in fractured media: A vulnerability-based approach fordelineating protection zones in Switzerland.*Hydrogeology Journal*16, no. 7:1267–81.

Poehls, D.J. and Smith, G.J. (2009) Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology. Elsevier, London. Pp1-527

Ramos-Leal J.A, Rodriguez-Castillo, R. (2003) Aquifer vulnerability mapping in the Turbio river valley, Mexico, a validation study. *GeofiInt* 42:141–156

Raoult, J.P. (1974) Géologie du centre de la chaine numidique (Nord du Constantinois, Algérie), (thèse, Paris). MEM. SOC géol. Fr., Nouvelle série., L III, N°121, 163p.

Ribeiro L. (2000) Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação, Nota interna, (não publicada), ER-SHA-CVRM, 8 p.

Roubault, M. (1934) La Kabylie de Collo. Etude géologique. *Thèse D'état. Paris. Bulletin du servicede la carte géologique de l' Algérie, (2), No 10*, 272 p.

Saidi, S., Bouri, S., Ben Dhia, H., Anselme, B. (2011) Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: Application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel. *Agricultural Water Management* 98 1671– 1682. doi:10.1016/j.agwat.2011.06.005

Schnebelen N., Platel, J.P., Le nindre, Y., Baudry, D., Hoarau, A., Dufour, P, & Benhammouda, S. (2002) Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Operation sectorielle. Protection de nappe de Voligocene en region bordelaise (ERIC Document Reproduction Service No ED 98-01) 51178)

Serra, P., Pons, X., Saurí, D. (2008) Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: a spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Appl. Geogr.* 28, 189–209.

Sotornikova, R., and J. Vrba. (1987) Some remarks on the concept of vulnerability maps, *Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundwater to Pollutants*, RIVM Proc. and Inf. 38, pp. 471-475.

Strebel, O., Duynisveld, W.H.M., Böttcher, J. (1989) Nitrate pollution of groundwater in western Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 26, 189-214.

Thornthwaite C.W. (1948) An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1. pp. 55-94.

Todd, D.K., 1980: Ground-water hydrology (Second Edition): John Wiley and Sons, New York, 535 p.

Vahidnia, A., Van der Voet G.B., de Wolf, F.A. (2007) Arsenic neurotoxicity review. *Hum Exp Toxicol*;26:823–32

Van Stempvoort, D., Ewert, L., and Wassenaar, L. (1993) Aquifer Vulnerability Index (AVI): A GIS Compatible Method for Groundwater Vulnerability Mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18, 25-37.

Viessmann, W., Knapp, J.W., Lewis G.L. (1977) Introduction to hydrology. Haper and Row publishers, NY, pp. 618-625.

Vilian, M. (1987) la production végétale Tome I, les composantes de la production, Edition BAILLIER, Paris. P416.

Villa, J.M. (1980) La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse doctorat sciences. Université de Pierre et Marie Curie, Paris VI, 655p.

Villumsen, A., Jacobsen, O.S. and Sonderskov, C. (1982) Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution, *Geologic Survey of Denmark, Yearbook 1982*, Copenhagen.

Voudouris, K.S. (2008) Assessing groundwater pollution risk in Sarigkiol basin, NW Greece. In Gallo, M., & Herrari, M. Eds., *River Pollution Research Progress*. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers Inc.

Vrana, M. (1984) Methodology for construction of groundwater protection maps, Lecture for UNESCO/UNEP Proj. PLCE3/29, Moscow, September 1981, in *Hydrogeological Principles of Groundwater Protection*, vol. 1, E. A. Kazlovsky Edit. and Chief, pp. 147–149. UNESCO/UNEP, Moscow.

Vrba, J., Zaporozec, A. (1994) Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Int. Association of Hydrogeologists. Int. Contributions to Hydrogeology; 16. Verlag Heinz Heise, Hannover.

Williams, J.R., Kissel, D.E. (1991) Water Percolation: An indicator of nitrogen-leaching potential in managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability, In R.F. Follett, D.R. Keeney, R.M. Cruse (Eds.), pp. 59-83.

Wood, N. (2009) Tsunami exposure estimation with land-cover data: Oregon and the Cascadia subduction zone. *Appl. Geogr.* 29, 158–170.

Xoplaki, E. (2002) *Climate variability over the Mediterranean*. Thèse de Doctorat de l'Université de Berne (Suisse), 193 p.

Yelle, Paul-Émile. (2003) Propre, propre et salée ; qualité de l'eau d'irrigation. Agri-vision 2003. MAPAQ, Saint-Rémi, 10 p.

Zwahlen, F. (Ed.). (2004) Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report COST Action 620, European Commission, Directorate- General for Research, EUR 20912, Luxemburg.

ANNEXE

- Données climatiques
- Essaie par pompage

Tableau de l'humidité (%).station : Port de Skikda (1970-2014).

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août
1970-1971	76,00	78,00	74,00	79,00	76,00	78,00	80,00	81,00	80,00	75,00	77,00	64,00
1971-1972	74,00	76,00	70,00	79,00	79,00	67,00	79,00	80,00	80,00	79,00	72,00	75,00
1972-1973	78,00	74,00	73,00	75,00	78,00	72,00	77,00	68,00	73,00	79,00	74,00	76,00
1973-1974	73,00	75,00	79,00	76,00	78,00	76,00	79,00	77,00	75,00	73,00	74,00	74,00
1974-1975	72,00	72,00	73,00	80,00	74,00	73,00	73,00	76,00	79,00	75,00	69,00	69,00
1975-1976	74,00	72,00	79,00	76,00	77,00	78,00	75,00	73,00	80,00	77,00	74,00	74,00
1976-1977	83,00	73,00	81,00	80,00	79,00	80,00	81,00	82,00	81,00	80,00	81,00	79,00
1977-1978	90,00	75,00	81,00	82,00	80,00	72,00	75,00	79,00	77,00	75,00	74,00	82,00
1978-1979	83,00	81,00	83,00	73,00	77,00	78,00	80,00	79,00	78,00	82,00	75,00	78,00
1979-1980	83,00	82,00	80,00	81,00	78,00	81,00	76,00	76,00	77,00	73,00	69,00	73,00
1980-1981	77,00	75,00	76,00	71,00	74,00	80,00	83,00	80,00	76,00	76,00	74,00	77,00
1981-1982	76,00	74,00	77,00	66,00	75,00	77,00	73,00	79,00	82,00	78,00	72,00	79,00
1982-1983	79,00	77,00	75,00	77,00	80,00	80,00	78,00	76,00	75,00	76,00	69,00	83,00
1983-1984	73,00	79,00	84,00	76,00	81,00	80,00	82,00	77,00	74,00	73,00	72,00	85,00
1984-1985	75,00	83,00	66,00	79,00	77,00	77,00	79,00	74,00	77,00	75,00	74,00	76,00
1985-1986	80,00	79,00	76,00	79,00	72,00	70,00	78,00	74,00	78,00	81,00	80,00	79,00
1986-1987	79,00	78,00	84,00	86,00	72,00	83,00	77,00	77,00	77,00	73,00	80,00	76,00
1987-1988	74,00	68,00	71,00	80,00	71,00	77,00	73,00	82,00	82,00	82,00	77,00	77,00
1988-1989	81,00	73,00	81,00	77,00	77,00	75,00	76,00	75,00	79,00	75,00	76,00	76,00
1989-1990	77,00	81,00	76,00	70,00	76,00	72,00	74,00	75,00	80,00	79,00	72,00	76,00
1990-1991	72,00	74,00	72,00	73,00	71,00	75,00	73,00	72,00	71,00	72,00	69,00	70,00
1991-1992	77,00	71,00	70,00	66,00	75,00	74,00	74,00	73,00	76,00	69,00	77,00	72,00
1992-1993	71,00	68,00	72,00	70,00	73,00	71,00	69,00	70,00	73,00	75,00	70,00	71,00
1993-1994	69,00	68,00	70,00	75,00	72,00	67,00	76,00	70,00	72,00	71,00	69,00	66,00
1994-1995	68,00	75,00	73,00	73,00	69,00	69,00	67,00	69,00	64,00	76,00	73,00	72,00
1995-1996	68,00	71,00	62,00	69,00	64,00	69,00	70,00	71,00	73,00	73,00	67,00	71,00
1996-1997	68,00	71,00	64,00	63,00	65,00	75,00	71,00	67,00	73,00	71,00	74,00	71,00
1997-1998	73,00	72,00	72,00	67,00	72,00	76,00	69,00	69,00	76,00	69,00	70,00	71,00
1998-1999	70,00	72,00	76,00	74,00	76,00	74,00	70,00	71,00	74,00	74,00	69,00	74,00
1999-2000	72,00	65,00	76,00	73,00	76,00	73,00	74,00	66,00	82,00	78,00	68,00	68,00
2000-2001	74,00	72,00	69,00	74,00	74,00	72,00	66,00	71,00	76,00	67,00	72,00	74,00
2001-2002	76,00	74,00	78,00	79,00	77,00	78,00	74,00	77,00	69,00	72,00	76,00	80,00
2002-2003	79,00	73,00	76,00	81,00	78,00	75,00	73,00	80,00	78,00	71,00	70,00	64,00
2003-2004	76,00	76,00	79,00	79,00	79,00	78,00	76,00	77,00	77,00	79,00	76,00	72,00
2004-2005	74,00	56,00	81,00	78,00	81,00	81,00	80,50	76,00	75,00	76,00	71,00	73,00
2005-2006	73,00	59,00	75,00	73,00	75,00	58,00	71,00	73,00	75,00	71,00	71,00	69,00
2006-2007	70,00	62,00	66,00	76,00	86,00	70,00	75,00	79,00	70,00	76,00	73,00	70,00
2007-2008	71,00	76,00	72,00	76,00	67,00	72,00	73,00	66,00	76,00	63,00	71,00	73,00
2008-2009	72,00	75,00	67,00	73,00	76,00	70,00	73,00	71,00	70,00	65,00	66,00	71,00
2009-2010	71,00	70,00	64,00	65,00	67,00	64,00	66,00	74,00	68,00	71,00	71,00	70,00
2010-2011	68,00	67,00	66,00	60,00	73,00	71,00	68,00	72,00	73,00	73,00	66,00	71,00
2011-2012	71,00	65,00	72,00	70,00	69,00	76,00	72,00	68,00	70,00	69,00	67,00	79,00
2012-2013	63,00	67,00	67,00	66,00	68,00	68,00	61,00	69,00	71,00	68,00	71,00	70,00
2013-2014	74,00	71,00	69,00	73,00	69,80	69,80	69,80	69,80	69,80	69,80	69,80	69,80

Tableau de la température (°C). Station : Port de Skikda (1970-2014).

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août
1970-1971	23,57	19,29	12,40	12,11	13,10	11,40	12,40	14,30	16,80	21,00	23,03	25,19
1971-1972	22,84	19,02	14,10	11,86	11,57	10,66	10,66	15,82	18,23	18,81	23,61	27,62
1972-1973	21,30	18,66	16,34	12,63	11,23	13,26	14,64	13,94	15,96	20,31	22,21	22,74
1973-1974	23,94	18,99	14,76	12,64	11,61	10,13	10,91	13,68	18,48	16,75	24,12	24,58
1974-1975	23,24	17,46	14,90	11,19	13,07	12,40	13,61	13,73	18,07	21,80	22,86	29,74
1975-1976	24,07	18,33	14,55	12,50	12,02	11,34	12,51	13,76	16,02	19,84	23,53	24,42
1976-1977	22,60	18,60	13,80	18,80	10,20	15,00	11,80	14,20	17,70	20,60	23,40	23,80
1977-1978	21,05	20,20	16,20	13,20	18,85	13,50	18,81	15,30	17,80	20,50	23,30	23,26
1978-1979	21,80	17,60	13,60	14,58	10,70	14,00	13,30	14,20	17,20	20,90	23,90	23,90
1979-1980	21,40	19,80	13,80	12,50	13,90	13,50	13,30	13,44	17,70	21,50	23,34	24,10
1980-1981	22,50	18,20	16,10	10,50	11,60	12,29	12,80	11,00	16,60	20,30	22,00	24,20
1981-1982	23,22	19,10	15,10	15,50	9,90	12,50	14,30	16,30	17,80	20,80	22,20	23,60
1982-1983	23,10	20,10	16,40	12,37	13,83	12,89	13,30	14,90	18,12	23,23	27,28	24,55
1983-1984	23,91	20,40	17,87	14,27	11,33	11,20	13,51	16,68	18,81	21,74	27,10	25,10
1984-1985	22,50	19,19	17,77	13,51	12,69	11,76	12,48	15,40	17,30	20,35	24,85	23,60
1985-1986	22,51	20,72	17,92	14,18	11,42	14,83	12,58	16,27	17,80	21,61	24,87	24,09
1986-1987	23,35	21,30	16,60	13,00	12,55	12,53	13,25	18,30	19,49	20,26	23,78	25,61
1987-1988	23,47	25,38	16,99	15,40	12,47	12,99	12,90	16,20	17,20	21,24	24,74	26,21
1988-1989	22,07	22,07	16,78	12,60	14,49	12,07	14,30	15,85	18,97	21,72	24,76	25,76
1989-1990	23,64	19,81	17,63	16,56	11,83	12,72	15,03	16,00	17,68	21,00	24,93	25,90
1990-1991	25,60	22,20	17,10	12,00	12,60	14,60	14,50	15,40	18,80	22,20	24,40	24,30
1991-1992	24,40	20,50	15,90	12,30	12,00	11,40	15,40	13,80	15,80	20,20	24,20	25,30
1992-1993	23,90	19,60	16,70	13,90	11,40	11,80	13,40	15,30	17,70	20,40	22,60	24,80
1993-1994	23,30	21,00	16,10	13,60	11,50	11,10	12,80	15,60	19,20	21,50	24,10	25,40
1994-1995	25,70	21,20	18,30	14,10	12,90	13,40	14,00	14,40	19,50	21,40	25,10	28,50
1995-1996	23,30	20,90	17,80	16,10	12,60	14,60	13,30	14,50	20,00	21,40	24,20	25,70
1996-1997	21,80	18,70	17,40	15,60	15,60	10,50	14,70	16,10	18,30	21,30	24,50	25,60
1997-1998	24,20	21,70	17,50	14,90	14,40	13,40	13,20	15,70	19,90	23,40	24,10	26,50
1998-1999	25,70	19,60	15,40	12,80	13,30	13,30	14,50	16,90	18,50	24,40	24,90	25,60
1999-2000	24,60	23,50	15,90	13,60	12,90	11,90	15,20	16,20	20,60	23,20	25,70	27,90
2000-2001	24,60	21,30	17,70	15,30	10,50	12,90	14,20	17,30	19,50	22,20	26,20	27,00
2001-2002	24,00	23,30	16,60	13,70	14,20	13,10	18,00	16,10	19,00	23,60	25,40	27,30
2002-2003	23,30	21,10	17,90	14,80	12,10	13,10	15,60	13,50	19,30	22,90	24,90	25,40
2003-2004	24,60	22,10	17,20	13,10	12,50	11,90	13,50	17,20	19,40	25,60	28,30	29,20
2004-2005	23,70	22,40	15,10	13,60	10,20	10,10	13,30	16,40	20,10	23,70	26,40	25,70
2005-2006	23,40	21,70	17,50	12,80	11,10	12,00	14,90	18,20	21,00	23,10	26,70	26,10
2006-2007	24,00	22,80	18,40	14,00	13,70	14,50	13,40	18,40	20,20	22,70	25,50	26,40
2007-2008	23,90	20,70	15,90	18,90	13,10	13,30	14,00	17,50	19,80	22,50	26,30	26,70
2008-2009	24,00	21,10	16,10	12,70	12,60	21,10	13,50	15,60	20,60	23,30	26,60	26,80
2009-2010	24,20	20,20	17,10	15,60	13,20	14,20	14,90	16,70	18,40	21,70	25,40	25,30
2010-2011	23,50	20,50	16,70	14,10	12,50	12,20	14,70	17,20	19,20	22,10	25,80	26,60
2011-2012	24,60	20,70	17,60	13,90	12,50	9,50	14,30	16,60	18,90	24,00	25,30	27,60
2012-2013	21,00	21,70	16,80	13,90	12,60	11,20	15,80	16,40	18,10	20,50	24,90	25,60
2013-2014	23,90	23,20	16,00	10,50	13,80	14,00	13,60	17,00	18,57	23,29	24,20	26,13

Tableau de la vitesse du Vent (m/s).Station : Port de Skikda (1970-2014).

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août
1970-1971	3,06	2,90	2,69	2,48	3,57	3,43	2,46	2,27	2,46	3,05	2,60	2,40
1971-1972	2,02	1,50	3,07	2,31	3,50	3,33	2,13	2,43	1,80	1,82	2,22	2,06
1972-1973	1,93	2,56	2,75	3,54	3,39	2,17	2,46	2,23	2,05	2,05	1,65	1,61
1973-1974	2,24	2,23	2,03	3,15	2,78	2,92	2,00	1,74	1,61	1,85	1,84	1,60
1974-1975	1,73	1,72	1,89	2,51	2,48	2,08	2,45	7,46	2,18	2,50	2,30	2,40
1975-1976	2,14	1,79	2,19	1,70	2,60	18,60	2,16	1,60	1,84	2,30	2,55	2,51
1976-1977	2,16	1,81	1,90	2,10	1,30	0,90	1,30	1,60	1,50	2,70	2,80	2,63
1977-1978	2,18	1,83	2,70	1,99	3,47	3,73	3,69	3,50	3,77	3,40	2,79	2,90
1978-1979	3,30	2,60	3,42	4,45	3,90	3,10	3,20	3,18	2,50	2,11	2,78	2,30
1979-1980	1,60	1,70	3,00	2,50	2,50	2,10	3,80	3,10	2,50	3,60	3,36	2,90
1980-1981	2,61	3,70	4,30	4,40	4,70	2,80	2,50	2,70	3,50	3,80	4,30	3,30
1981-1982	4,10	4,00	3,90	5,60	3,90	2,90	3,70	3,00	2,20	1,80	1,80	2,40
1982-1983	2,50	4,65	8,70	3,00	2,70	2,40	3,30	3,00	2,50	2,70	2,80	3,00
1983-1984	3,10	3,30	3,40	4,20	3,80	4,72	3,20	2,90	3,30	2,70	2,70	2,80
1984-1985	2,90	3,10	3,40	4,50	3,90	3,20	3,20	3,90	2,80	2,70	2,50	2,90
1985-1986	2,60	3,03	3,10	3,10	3,80	3,70	3,00	3,40	2,60	3,20	2,90	2,70
1986-1987	2,70	3,10	3,30	3,60	3,90	3,10	3,34	2,60	2,40	2,50	2,40	2,20
1987-1988	2,39	2,70	3,20	2,50	3,29	2,50	3,30	2,10	2,50	2,30	2,30	3,10
1988-1989	3,10	2,70	2,79	3,80	2,37	2,90	2,70	2,90	2,00	2,00	2,40	2,20
1989-1990	2,57	2,60	2,30	2,20	2,30	2,20	2,40	1,80	2,10	1,84	2,20	2,21
1990-1991	2,15	2,37	3,10	2,86	2,05	2,10	2,58	2,38	2,08	1,86	1,38	1,75
1991-1992	1,91	2,08	2,22	3,10	2,19	2,33	2,18	3,21	2,26	2,35	1,82	1,95
1992-1993	2,01	2,36	2,71	3,90	4,24	4,23	3,89	3,90	3,28	3,13	3,06	2,78
1993-1994	3,15	3,42	3,58	4,54	4,60	4,98	3,33	4,08	3,55	3,87	3,33	3,40
1994-1995	3,88	3,43	3,34	3,90	5,72	3,73	4,21	4,13	3,96	3,65	3,40	3,95
1995-1996	3,60	3,51	4,70	3,90	4,20	4,97	3,42	3,16	2,80	2,85	2,40	2,64
1996-1997	3,32	3,76	4,08	4,19	3,70	3,23	3,71	3,73	3,16	2,72	2,89	2,60
1997-1998	2,65	3,33	3,37	4,03	3,76	3,20	2,64	3,24	2,60	2,46	2,70	2,30
1998-1999	2,63	2,67	3,90	3,73	3,20	3,79	3,62	3,28	2,56	2,49	2,83	2,40
1999-2000	2,89	2,81	3,36	3,93	3,02	3,44	2,40	2,98	2,02	2,11	2,70	2,30
2000-2001	2,65	2,65	3,16	3,86	3,50	3,30	3,29	3,30	2,16	2,45	2,27	2,23
2001-2002	1,99	2,20	2,90	3,20	2,84	3,20	2,47	2,78	2,43	2,10	2,20	2,70
2002-2003	2,60	2,52	3,70	3,10	4,12	3,21	2,46	2,64	2,48	2,69	2,73	2,95
2003-2004	3,05	3,00	3,95	6,18	3,65	3,50	2,45	2,77	2,50	3,27	3,25	3,20
2004-2005	3,50	2,86	3,46	4,10	3,17	3,80	2,55	2,90	2,52	2,44	2,59	2,69
2005-2006	2,42	2,50	3,30	3,79	3,59	3,32	4,13	2,98	2,80	3,25	2,60	3,29
2006-2007	3,00	3,10	3,60	3,40	3,40	3,70	4,70	3,40	4,00	3,80	3,90	3,70
2007-2008	3,60	4,20	4,10	4,30	3,90	3,60	3,90	3,50	2,70	3,30	3,40	3,60
2008-2009	3,80	3,40	3,80	3,10	3,90	4,30	3,70	3,80	3,60	3,30	3,10	3,30
2009-2010	3,60	4,00	3,80	4,10	3,90	3,60	3,60	3,20	3,40	3,40	3,40	3,30
2010-2011	3,70	3,70	3,70	3,80	3,50	4,30	3,40	3,30	3,00	3,20	3,30	3,30
2011-2012	3,20	3,60	2,90	4,00	4,00	4,10	3,00	3,40	3,10	2,90	3,50	3,20
2012-2013	3,10	3,20	3,00	3,80	3,80	4,10	3,60	3,30	3,50	3,30	3,20	3,00
2013-2014	2,60	2,60	3,80	2,90	3,50	3,50	3,50	3,00	3,00	3,00	2,90	2,80

Tableau de Précipitation (mm).Station : Port de Skikda (1970-2014).

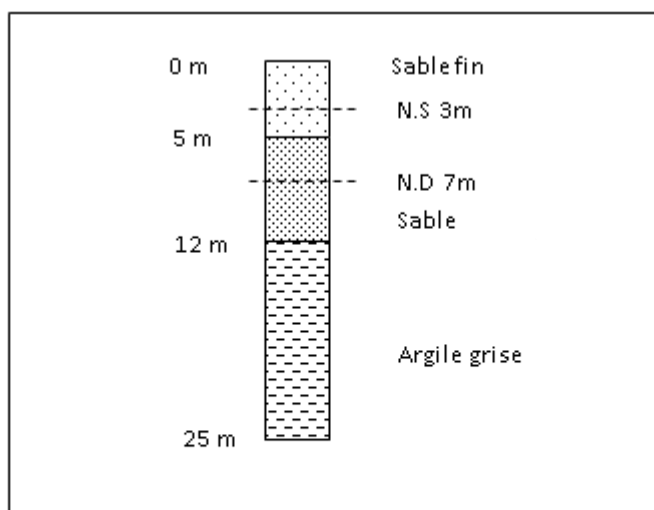
Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août
1970-1971	0,50	186,40	5,70	84,80	55,30	60,10	86,30	182,80	311,50	1,00	12,00	1,30
1971-1972	37,00	127,30	71,60	33,60	148,70	110,00	156,30	65,70	36,10	0,30	1,00	3,00
1972-1973	50,60	85,20	72,00	175,60	128,70	69,10	72,70	94,90	51,00	95,00	1,10	2,40
1973-1974	32,50	31,70	32,50	78,40	194,60	115,60	125,20	17,70	2,10	18,60	0,00	5,20
1974-1975	33,30	166,30	74,00	57,60	19,90	80,90	42,10	82,60	2,40	1,30	7,00	0,00
1975-1976	4,20	25,00	186,30	81,20	25,60	55,80	72,70	9,20	58,20	6,20	0,00	21,30
1976-1977	22,60	18,60	139,00	52,80	92,50	113,80	82,40	34,40	47,10	26,60	0,50	23,80
1977-1978	24,00	11,00	151,00	22,00	54,00	44,00	17,00	67,00	62,00	19,00	0,00	21,00
1978-1979	9,00	81,00	139,00	51,00	124,00	116,00	62,00	77,00	37,00	8,00	0,00	1,00
1979-1980	51,00	73,00	112,00	38,00	111,00	169,00	95,00	211,00	13,00	20,00	10,00	3,00
1980-1981	19,00	88,00	151,00	240,00	48,00	30,00	94,00	74,00	56,00	1,00	0,00	1,70
1981-1982	14,00	67,00	37,00	188,00	87,00	101,00	51,00	39,00	17,00	21,00	1,00	46,00
1982-1983	14,50	100,00	232,00	156,00	141,00	128,00	121,00	59,00	37,00	0,00	0,50	12,00
1983-1984	85,00	91,00	119,00	62,00	21,00	37,00	70,00	13,00	23,00	0,70	0,50	8,00
1984-1985	68,00	148,00	27,00	343,00	204,00	161,00	104,00	52,00	22,00	14,00	0,00	0,90
1985-1986	42,00	22,00	66,00	50,00	148,00	76,00	172,00	21,00	29,00	0,00	0,00	0,20
1986-1987	24,00	86,00	149,00	157,00	162,00	82,00	88,00	56,00	12,00	18,00	13,00	3,00
1987-1988	30,00	14,00	116,00	50,00	140,00	246,00	89,00	36,00	82,00	4,00	11,00	1,00
1988-1989	58,00	4,00	130,00	147,00	111,00	111,00	55,00	36,00	37,00	24,00	0,00	1,00
1989-1990	33,00	83,00	69,00	100,00	48,00	53,00	23,00	148,00	2,00	9,00	5,00	0,00
1990-1991	0,00	66,00	123,00	326,00	157,00	1,00	75,00	65,00	22,00	31,00	4,00	41,00
1991-1992	49,00	118,00	51,00	30,00	89,00	104,00	103,00	34,00	25,00	5,00	0,00	13,00
1992-1993	9,00	38,00	39,00	237,00	109,00	87,00	120,00	144,00	60,00	28,00	7,00	1,00
1993-1994	36,00	85,00	40,00	136,00	53,00	78,00	63,00	39,00	69,00	6,00	1,00	1,00
1994-1995	58,00	102,00	6,00	170,00	116,00	120,00	0,00	142,00	12,00	0,00	1,00	4,00
1995-1996	100,00	9,00	48,00	55,10	219,00	25,00	10,70	32,20	3,00	19,00	0,00	12,00
1996-1997	38,00	95,00	49,00	102,00	65,00	192,00	59,30	92,00	46,40	14,00	1,00	4,00
1997-1998	69,00	190,00	174,00	148,20	66,00	13,30	18,00	34,20	7,00	27,00	0,00	4,00
1998-1999	25,00	81,00	26,00	198,00	55,10	82,00	104,20	43,00	57,30	129,20	11,00	0,00
1999-2000	29,50	25,00	106,10	238,00	116,70	116,00	72,40	32,00	15,00	4,00	1,00	8,00
2000-2001	18,00	52,00	36,70	102,00	61,00	20,00	21,00	16,00	116,00	43,00	0,00	5,00
2001-2002	65,00	2,00	103,00	95,00	150,00	87,00	11,00	48,00	28,00	0,00	0,00	5,00
2002-2003	35,90	85,00	244,00	215,00	47,50	121,60	21,40	59,10	10,10	1,00	22,10	30,60
2003-2004	114,00	47,00	37,00	169,00	276,00	114,00	35,00	99,00	14,00	2,00	0,00	0,00
2004-2005	55,50	26,20	285,80	165,40	159,30	182,00	65,20	101,40	6,80	99,00	0,30	64,40
2005-2006	34,40	25,50	90,30	181,00	127,10	58,00	41,10	15,40	7,80	8,50	9,00	1,00
2006-2007	29,00	65,00	24,10	229,00	23,30	56,00	141,00	62,00	24,00	33,00	2,00	6,00
2007-2008	50,00	74,00	96,00	144,00	32,00	24,00	171,00	14,60	60,00	4,30	1,00	0,30
2008-2009	81,00	67,10	84,00	119,00	251,00	110,00	90,00	107,00	59,80	0,00	2,00	8,00
2009-2010	203,00	83,30	119,00	137,00	133,00	54,80	85,00	28,50	78,00	28,60	0,40	5,00
2010-2011	21,00	164,00	164,30	79,30	57,40	54,60	75,80	48,40	39,90	8,80	7,90	0,00
2011-2012	33,60	125,20	64,10	125,00	56,50	192,30	72,20	117,40	1,80	1,10	0,40	51,90
2012-2013	62,60	28,50	72,10	68,00	132,20	200,10	69,80	45,00	52,40	14,10	2,60	50,80
2013-2014	89,90	82,40	215,70	53,90	92,00	48,10	175,10	14,60	11,10	6,60	0,00	0,00

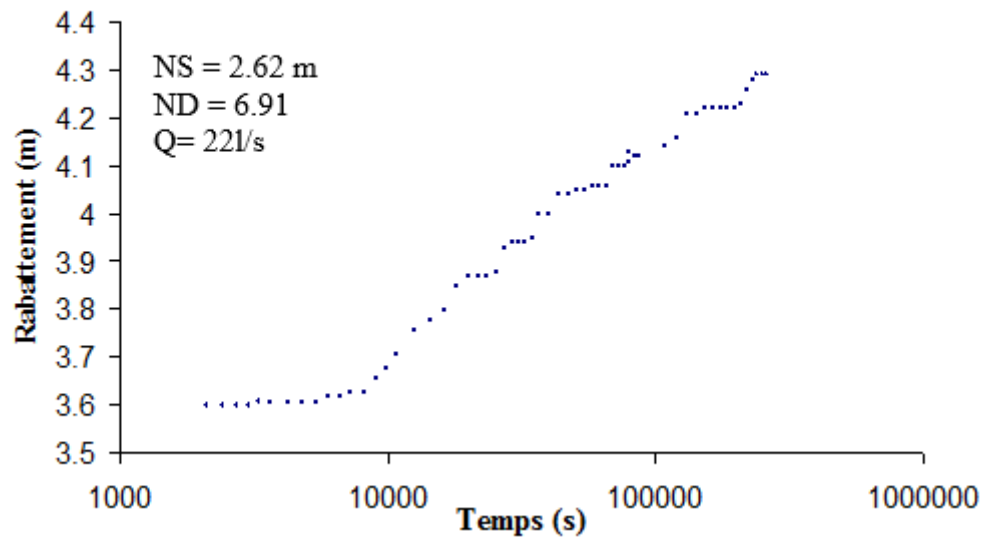
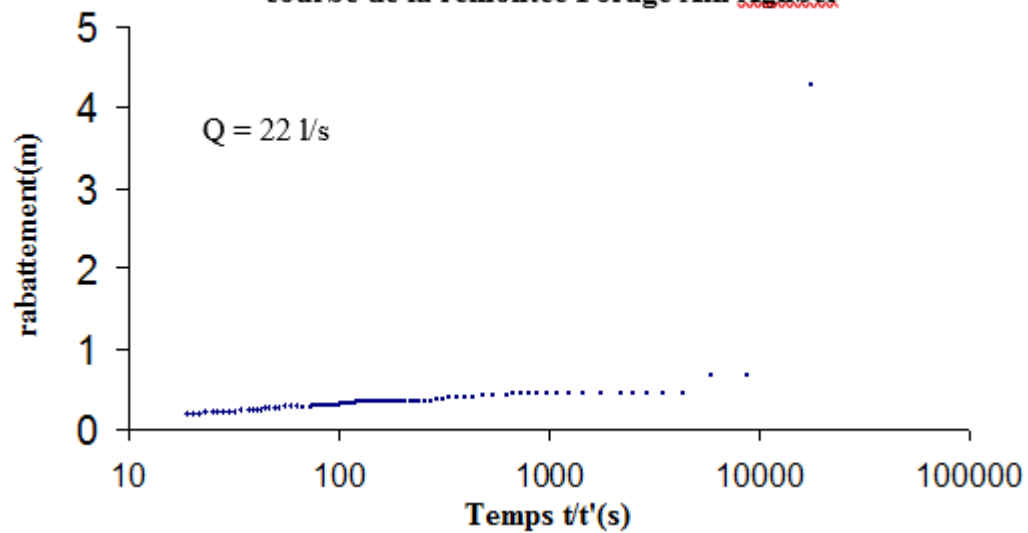
t(s)	t'(s)	ND(m)	D(m)	t'(s)	t(s)	ND(m)	D(m)
259200	0	6.91	4.29	2160	261360	2.98	0.36
259215	15	6.91	4.29	2220	261420	2.97	0.35
259230	30	3.32	0.70	2280	261480	2.97	0.35
259245	45	3.32	0.70	2340	261540	2.96	0.35
259260	60	3.32	0.48	2400	261660	2.96	0.34
259275	75	3.32	0.47	2460	261720	2.96	0.34
259290	90	3.10	0.47	2520	261780	2.96	0.34
259305	105	3.10	0.47	2580	261840	2.96	0.34
259320	120	3.09	0.47	2640	261900	2.95	0.33
259350	150	3.09	0.47	2700	261960	2.95	0.33
259380	180	3.09	0.47	2760	262020	2.95	0.33
259410	210	3.09	0.47	2820	262080	2.95	0.33
259440	240	3.09	0.47	2880	262140	2.95	0.33
259470	270	3.09	0.47	2940	262200	2.95	0.33
259500	300	3.09	0.47	3000	262260	2.94	0.32
259530	330	3.08	0.46	3060	262320	2.94	0.33
259560	360	3.08	0.46	3120	262830	2.94	0.33
259590	390	3.07	0.45	3180	262440	2.94	0.33
259620	420	3.07	0.45	3240	262500	2.93	0.31
259680	480	3.06	0.44	3300	262560	2.93	0.31
259740	540	3.05	0.43	3360	262620	2.93	0.31
259800	600	3.04	0.42	3420	262680	2.93	0.31
259860	660	3.03	0.41	3480	262740	2.93	0.31
259920	720	3.03	0.40	3540	262800	2.92	0.31
259980	780	3.02	0.40	3600	262800	2.92	0.30
260040	840	3.00	0.39	3900	263100	2.91	0.31
260100	900	3.00	0.38	4200	263400	2.91	0.31
260160	960	3.00	0.38	4500	263700	2.91	0.29
260220	1020	3.00	0.38	4800	264000	2.90	0.29
260280	1080	3.00	0.38	5100	264900	2.89	0.28
260340	1140	3.00	0.38	5400	265200	2.88	0.27
260400	1200	3.00	0.38	5700	265500	2.87	0.26
260460	1260	3.00	0.37	6000	265800	2.87	0.26
260520	1320	3.00	0.37	6300	266100	2.87	0.25
260540	1380	3.00	0.37	6600	266400	2.87	0.25
260640	1440	2.99	0.37	6900	267600	2.86	0.25
260700	1500	2.99	0.36	7200	268200	2.86	0.24
260760	1560	2.99	0.36	7800	268800	2.85	0.24
260820	1620	2.99	0.36	7800	269400	2.85	0.23
260880	1680	2.99	0.36	8400	270000	2.85	0.23
260940	1740	2.99	0.36	9000	270900	2.84	0.23
261000	1800	2.99	0.36	9600	272700	2.84	0.22
261060	1860	2.99	0.36	10200	271800	2.84	0.32
261120	1920	2.99	0.36	10800	270900	2.84	0.32
261180	1980	2.99	0.36	11700	271800	2.83	0.20
261240	2040	2.98	0.36	12600	272700	2.82	0.20
261300	2100	2.98	0.36	14400	273700	2.82	0.20

Résultats du pompage d'essais (72h), de la remontée du forage Ain Aghbel

t(s)	ND(m)	D(m)	t(s)	ND(m)	D(m)
2100	6.22	3.60	39600	6.62	4.00
2400	6.22	3.60	43200	6.66	4.04
2700	6.22	3.60	46800	6.66	4.04
3000	6.22	3.60	50400	6.67	4.05
3300	6.23	3.61	54000	6.67	4.05
3600	6.23	3.61	57600	6.68	4.06
4200	6.23	3.61	61200	6.68	4.06
4800	6.23	3.61	64800	6.68	4.06
5400	6.23	3.61	68400	6.72	4.10
6000	6.24	3.62	72000	6.72	4.10
6600	6.24	3.62	75600	6.72	4.10
7200	6.25	3.63	79200	6.73	4.11
8100	6.25	3.66	82800	6.73	4.12
9000	6.28	3.68	86400	6.74	4.12
10800	6.30	3.71	97200	6.74	4.13
12600	6.33	3.76	108000	6.75	4.14
14400	6.38	3.78	129600	6.76	4.16
16200	6.40	3.80	140400	6.78	4.21
18000	6.42	3.85	151200	6.83	4.21
19800	6.45	3.87	162000	6.83	4.22
21600	6.47	3.87	172800	6.84	4.22
23400	6.47	3.87	162000	6.84	4.22
25200	6.47	3.88	172800	6.84	4.22
27000	6.50	3.93	183600	6.85	4.22
28800	6.55	3.94	194400	6.88	4.23
30600	6.55	3.94	216000	6.90	4.26
32400	6.55	3.94	226900	6.91	4.28
34200	6.57	3.95	284400	6.91	4.28
36000	6.62	4.00	259400	6.91	4.28

Résultats du pompage d'essais de la descente (72h), du forage de Ain Aghbel



courbe de descente (72h) forage Ain Aghbel**courbe de la remontée Forage Ain Aghbel**

$$2.3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$K_r = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Temps de pompage (s)	ND (m)	Rabattement (m)	Temps de pompage (s)	ND (m)	Rabattement (m)
0	5.45	0	23400	9.10	3.65
240	7.60	2.15	25200	9.10	3.65
540	7.99	2.54	27000	9.10	3.65
720	8.10	2.65	28800	9.11	3.66
960	8.25	2.80	30600	9.11	3.66
1200	8.40	2.95	32400	9.11	3.66
1500	8.57	3.12	34200	9.12	3.67
1800	8.60	3.15	36000	9.12	3.67
2100	8.70	3.25	39600	9.12	3.67
2400	8.76	3.31	43200	9.12	3.67
2700	8.79	3.34	46800	9.13	3.68
3000	8.83	3.38	50400	9.13	3.68
3300	8.89	3.44	54000	9.14	3.69
3600	8.93	3.48	57600	9.14	3.69
4200	8.95	3.50	61200	9.14	3.69
4800	8.96	3.51	64800	9.15	3.70
5400	8.97	3.52	68400	9.15	3.70
6000	8.99	3.54	72000	9.15	3.70
6600	9.01	3.56	75600	9.16	3.71
7200	9.03	3.58	79200	9.16	3.71
8100	9.04	3.59	82800	9.17	3.72
9000	9.05	3.60	86400	9.17	3.72
9900	9.06	3.61	97200	9.18	3.73
10800	9.06	3.61	108000	9.18	3.73
12600	9.07	3.62	118800	9.19	3.74
12600	9.08	3.63	129600	9.20	3.75
14400	9.09	3.64	130600	9.22	3.77
16200	9.09	3.64	140400	9.23	3.78
18000	9.09	3.64	151200	9.25	3.80
21600	9.10	3.65	172800	9.25	3.80

NS=5.45 m

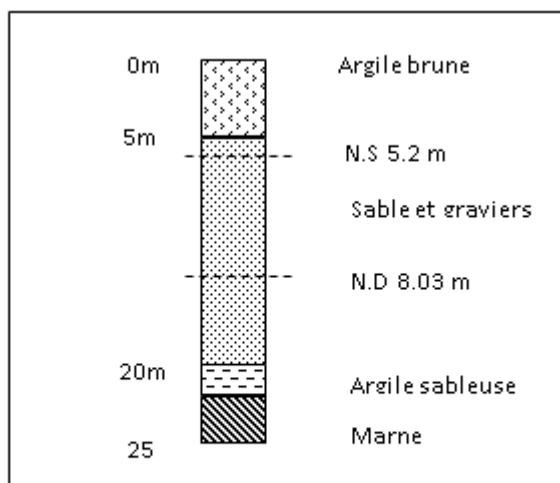
Q = cte.=20l/s

Résultats du pompage d'essai de la descente (48h), du forage GR1

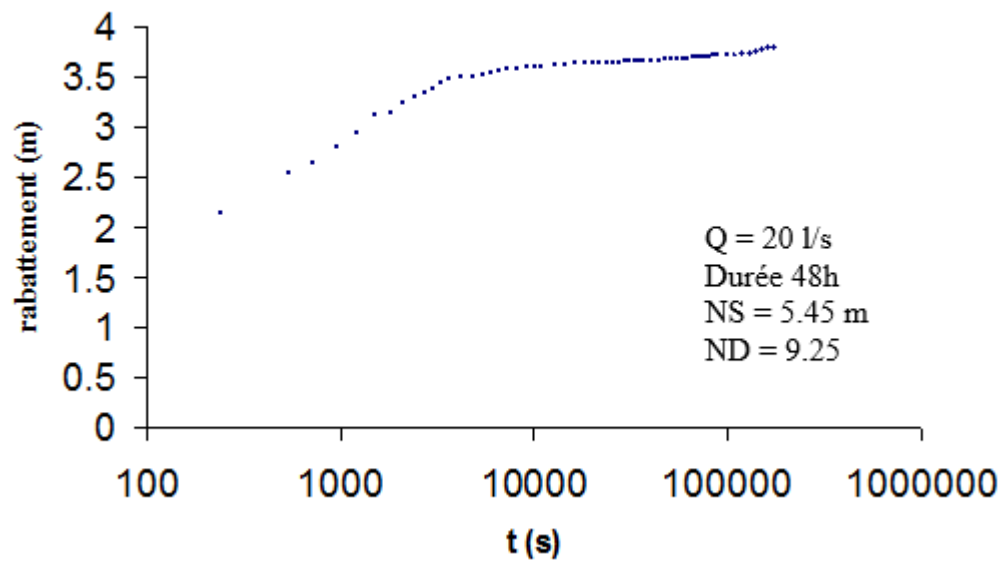
Temps de remontée t'(s)	T=t'+T	Niveau dynamique (m)	Rabattement (m)
0	172800	9.25	3.80
60	172860	7.70	2.25
120	172920	6.75	1.30
180	172980	5.86	0.41
240	173040	5.68	0.23
300	173100	5.55	0.10
360	173160	5.53	0.08
480	173280	5.50	0.05
660	173460	5.49	0.04
780	173580	5.48	0.03
900	173700	5.48	0.03
1020	173820	5.48	0.03
1140	173940	5.48	0.03
1320	174120	5.48	0.03
1500	174300	5.47	0.02
1620	174420	5.47	0.02
1740	174540	5.47	0.02
1800	174600	5.47	0.02
2100	174660	5.47	0.02
2040	174900	5.47	0.02
2070	175200	5.47	0.02
3000	175500	5.46	0.01
3300	175800	5.46	0.01
3600	176100	5.46	0.01
4500	176400	5.46	0.01
5700	178500	5.46	0.01
7200	180000	5.45	0.00

NS =5.45m

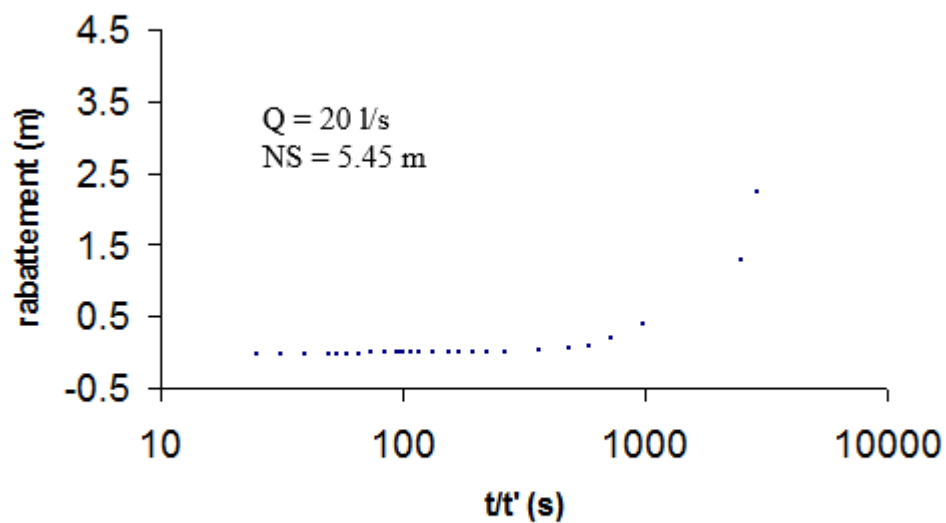
Résultats de pompage d'essais de la remontée (48h), du forage GR1



Courbe de la descente forage GR1



courbe de remontée Forage GR1



$$T_m = 3.05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$K_m = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$