

UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID-TLEMCEN

N° d'ordre : / DST/

**FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
ET DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

**LABORATOIRE RESSOURCES HYDRIQUES, MINIERES ET PEDOLOGIQUES :
CHOIX TECHNOLOGIQUE ET LEGISLATION DE L'ENVIRONNEMENT**

MEMOIRE DE MAGISTER

OPTION

Ressources en Eau dans leur Environnement

Présenté par

Kamal ZEGHID

**CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION DES EAUX
SOUTERRAINES KARSTIQUES.CAS DU BASSIN VERSANT DU
MEFFROUCHE.**

Soutenu le...../...../2013.devant les membres du jury

Mr Bensalah M	Professeur.	Univ. TLEMCEN	Président
Mme Bouanani Kamila	Maitre de conferences.	Univ. TLEMCEN	Examineur
Mr Megnounif A	Maitre de conferences	Univ. TLEMCEN	Examineur
Mme Adjim Fouzia	Professeur.	Univ. TLEMCEN	Encadreur

Dédicaces

A mes très chers parents toujours présents pour me donner un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail tout mon amour et toute ma reconnaissance.

A ma sœur et mes chers frères Mehdi (alah yrahmo), amine et yacine

A toute ma famille

A mes meilleurs amis

A tous ceux que je porte dans mon cœur

Je dédie ce mémoire



Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Madame **Adjim Fouzia née Bensaoula**, Professeur à l'université de Tlemcen, pour m'avoir accordée sa confiance en acceptant d'encadrer ce travail, pour son soutien, pour sa constante disponibilité, pour tous les conseils qu'il m'a promulgués et pour l'aide précieuse qu'il m'a fournie.

Mes vifs remerciements et mes respects les plus distingués vont à Monsieur **Bensalah Mustapha**, Professeur à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté de juger ce travail et de me faire l'honneur de présider mon jury de mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à **Madame BABA HAMED Kamila**, Maître de conférences à l'université de Tlemcen et Monsieur **Megnounif Abdeslam**, Maître de conférences à l'université de Tlemcen qui ont bien voulu examiner ce travail et faire partie du jury de ce mémoire. Je suis conscient de la reconnaissance que je dois à Mr Adjim Mohamed, Maître de conférences à l'université de Tlemcen qui a toujours répondu favorablement à toute sollicitation, et pour son suivi de la progression de travail, et qui m'a beaucoup appris en Mapinfo.

On n'oublie pas de présenter nos chaleureux remerciements à tous mes enseignants de la faculté des sciences de la terre : université de Tlemcen, aux quels je dois beaucoup pour ma formation.

Enfin, Mes remerciements sont adressés aussi aux responsables et agents de : la direction de L'Agence nationale des ressource Hydrique de la wilaya de Tlemcen **ANRH**, la direction de l'hydraulique de la wilaya de Tlemcen **DHW** et au **Cadastre** de la wilaya de Tlemcen pour leur collaboration.



بعد إجراء دراسة مراجع ضعف خرائط المياه الجوفية ، تحليل المشروع الأوروبي COST عمل 620 ودراسة الجيولوجية والهيدروولوجية لحوض المفروش قررنا تطبيق الأسلوب COP. حيث اختير لتقييم قيمة الضعف الجوهري لموارد المياه الجوفية في هذا الحوض الهيدروغرافي ، بدرجات مختلفة من الكارست.

مختصر الأسلوب COP مؤتمر الأطراف الذي يأتي من الأحرف الأولى للعوامل الثلاثة المستخدمة :

تركيز التدفقات C (بما في ذلك المنحدر وأشكال الكارستية)، طبقات O (الخصائص الجيولوجية والتربة) و الأمطار P

وكان تطبيق هذا الأسلوب لحوض المفروش ، الذي يتميز بتركيبته الجيولوجية، الغنية بالمياه الجوفية ، هذا الأخير يغطي مساحة حوالي 90 كم 2 من جبال تلمسان، مع العلم ان طبقات الكربونات الكارستية تشكل خزانات المياه الجوفية الرئيسية.

عموما، نتيجة تطبيق أسلوب مجالات الضعف هي غير متجانسة، الفئات الرئيسية للضعف هي : منخفضة جداً، منخفضة، متوسطة، المرتفعة و المرتفعة جداً.

الجزء الأكبر يلمس أجزاء الضعف المنخفضة جدا يقع في الغرب و الجنوب الغربي من الحوض ، كما أنها تمثل 34% من مساحة الحوض.

أماكن الضعف المنخفض تقع في الجزء الجنوبي من الحوض. يغطي هذا الأخير 20 ٪ من مساحة الحوض بأكمله

ومع ذلك، مناطق الضعف المعتدل تمتد على مساحة صغيرة جدا بنسبة 10 ٪ من مساحة الحوض. كما انها مجزأة

من ناحية أخرى، مناطق الضعف المرتفعة و المرتفعة جداً، تغطي تحديدا الأجزاء الشرقية و الشرقية الشمالية من الحوض. في الواقع نجدها على سطوح صخور الكربونات، مع درجة كبيرة من الكارست و حقول تسريبات و نتوءات على سطوح هذه الصخور، تغطية هتين المنطقتين على التوالي 13 و 23 ٪ من إجمالي المساحة الكلية

كلمات المفتاح: خرائط حساسية المياه الجوفية -حوض الهيدروغرافي المفروش - المياه الجوفية COST عمل 620-
الأسلوب COP - كارست

Résumé

Après avoir fait une étude bibliographique détaillée sur les méthodes de cartographie de la vulnérabilité, une analyse du projet européen COST Action 620 et une étude géologique et hydrologique du bassin versant du Meffrouche, nous avons pu constater la possibilité de l'application de la méthode COP. Elle a été sélectionnée pour évaluer la valeur de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau souterraine dans un bassin versant, avec différents degrés de karstification.

L'acronyme de la méthode COP provient des initiales des trois facteurs utilisés: Concentration de flux C (l'infiltration y compris la pente et les formes karstique), couches superposées (O) (lithologie et pédologie) et des précipitations (P).

Cette méthode a été appliquée sur le bassin versant du Meffrouche, qui par sa constitution géologique, est très riche en potentialités en eau. Ce dernier, qui couvre une superficie d'environ 90 km², fait partie des monts de Tlemcen. En effet les formations carbonatées qui constituent les principaux réservoirs d'eau souterraine sont très karstifiées.

Généralement, le résultat de l'application de la méthode COP définit une répartition des zones de vulnérabilité hétérogène dont les principales classes de vulnérabilité sont : très basse, basse, modérée, élevée et très élevée.

- La plus grande partie est dite à vulnérabilité très basse. Elle s'étend dans la partie ouest et sud ouest du bassin. Elle représente 34 % de la surface du bassin.

-La vulnérabilité est basse particulièrement dans la partie sud du bassin. Cette dernière couvre 20 % de la totalité du bassin.

Cependant, la vulnérabilité modérée s'étend sur une très faible surface soit 10 % de la superficie totale du bassin répartie en petits lambeaux.

En revanche, les zones à vulnérabilité élevée et très élevée couvrent particulièrement les parties est et nord-est du bassin. En effet ces zones correspondent particulièrement à l'affleurement des roches carbonatées, avec un degré de karstification important qui est représenté en surface par un champ de lapiez important. Ces deux zones couvrent respectivement 13 et 23% de la surface totale du bassin versant.

Mots- clés : Cartographie de la vulnérabilité –Bassin versant du Meffrouche – Eau souterraines – COST Action 620 –Méthode COP– Karst.

Abstract

After an extensive literature review on the methods of vulnerability mapping , analysis of the European project COST Action 620 and a geological and hydrological study of watershed Meffrouche , we saw the possibility of the application of COP method. It was selected to assess the value of the intrinsic vulnerability of groundwater resources in the watershed, with varying degrees of karstification .

The acronym of the COP method comes from the initials of the three factors used : Concentration of flux C (infiltration including the slope and karst forms) , layers (O) (lithology and soil) and precipitation (P).

This method was applied to the watershed Meffrouche , Its geological formation very rich in water potential . The latter, which covers an area of about 90 km² , is one of the mountains of Tlemcen . Indeed carbonate formations which are the main groundwater reservoirs very karstified .

Generally, the result of the application of the COP method defined a heterogeneous distribution of vulnerability areas, whose main classes are: very low, low, moderate, high and very high.

The greatest part is said to be very low vulnerability. It lies in the west and southwest of the basin. It represents 34% of the basin area.

The vulnerability is low, particularly in the southern part of the basin. The latter covers 20 % of the entire basin.

However, moderate vulnerability extends over a very small area or 10% of the total basin area . This area is fragmented.

In contrast, areas with high and very high vulnerability specifically cover the East and North East parts of the basin. Indeed, these areas correspond to the particular outcrop of carbonate rocks, with a high degree of karstification surface, which is represented by a large field of lapiez . These two areas cover respectively 13 and 23 % of the total catchment area.

Key words: Vulnerability mapping - Watershed Meffrouche - Underground Water - COST Action 620- COP - method Karst.

TABLES DES MATIERES

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
ملخص	
Abstract	
Table des matières	
Introduction général	
Abréviation	
Glossaire.....	
Liste des figures	
Liste des tableaux.....	
Liste des Annexes.....	
Liste des photos.....	

PARTIE I : METHODOLOGIE DE TRAVAIL

CHAPITRE I : LES SYSTEMES KARSTIQUES

Introduction.....	1
1. Définitions.....	2
2. Structure du paysage karstique.....	2
2.1. Zonation globale du karst.....	3
2.1.1. l'exokarst.....	4
a) les lapiez.....	5
b) les dolines.....	5
c) les poljés.....	6
2.1.2. L'endokarst.....	7
a) Organisation du karst profond.....	7
b) Principe d'enfoncement du niveau de base.....	7
c) Les principaux types de galeries souterraines.....	8

Tables des matières

2.1.3. Epikarst.....	9
3. Fonctionnement du système Karstique.....	10
3.1. Les sources karstiques.....	13
3.1.1. Exurgence.....	13
3.1.2. Résurgence.....	13
3.2. Schéma fonctionnel et structural du système karstique.....	16
Conclusion.....	17

CHAPITRE II :

LE BASSIN VERSANT DU MEFFROUCHE

Introduction.....	18
I. Contexte Géographique.....	19
1. Situation générale.....	19
2. Le relief	21
3. La pente.....	22
4-Pédologie.....	23
4.1. Les sols fersialitiques.....	24
4.2. Les sols typiquement lessives et podzoliques.....	24
4.3. Sol fersialitique rouge.....	24
4.4. Sol brun fersialitique.....	24
4.5. Sol fersialitique brun type terra-fusca.....	24
4.6. Terra rosa.....	24
4.7. Sol fersialitique rouge a caractère verticale.....	25
4.8. Sol fersialitique rouge et mosaïque dolomie.....	25
5. La végétation.....	26
6. Réseau Hydrographique.....	28
7. Aperçu sur la précipitation.....	29
II. Approche géologique.....	31
1. Historique des études.....	31
1.1. Barrage de Meffrouche.....	31
2. Contexte géologique.....	32

Tables des matières

3. Cadre litho-stratigraphique.....	33
3.1. La série terrigène du Callovien au Kimméridgien supérieur.....	34
3.1.1. Les Grés de Bou Médiène (Oxfordien sup – Kimméridgien sup).....	34
3.2. La série carbonatée du Kimméridgien supérieur au Berriasien basal.....	34
3.2.1. Les Calcaire de Zarifet (Kimméridgienne supérieur).....	34
3.2.2. Les Dolomies de Tlemcen (Kimméridgienne terminal).....	34
3.2.3. Les Marno-Calcaires de Raourai (Tithonien basal).....	34
3.2.4. Les Calcaire de Lato.....	36
3.2.5. Les Dolomies de Terni (Tithonien inférieur).....	36
3.3. La série tertiaire.....	36
3.3.1. Le miocène marin.....	36
4. Tectonique.....	37
III . Approche Hydrogéologique.....	40
1. Aperçu hydrogéologique du bassin versant du Meffrouche.....	40
2. Les caractéristiques hydrogéologiques des formations.....	42
2.1. Sources.....	45
3. Hydrochimie.....	45
4. Le karst couvert.....	46
4.1. Caractérisation de la couverture.....	46
5. Etude de karstification.....	47
5.1. Fracturation et fissuration (linéaments).....	48
5.1.1. La macrofracturation.....	49
5.1.2. La microfracturation.....	49
a. Dolomie de Tlemcen.....	49
b. Dolomie de Terni.....	49
5.2. Karstification.....	51
5.2.1. Exokarst.....	51
5.2.2. Endokarst.....	52
Conclusion.....	53

**CHAPITRE III :
PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES ET
LEGISLATION, EN ALGERIE**

Introduction.....	54
I. La protection des eaux souterraines.....	55
1. Principes.....	55
2. Les enjeux associés à la protection des eaux souterraines.....	55
3. Les pollutions de l'eau.....	56
3.1. La pollution chimique.....	56
3.2. La pollution microbiologique.....	56
3.3. La pollution physique.....	56
4. Les eaux souterraines.....	57
5. La protection de l'eau.....	59
5.1. Les risques courus par les eaux souterraines.....	59
5.1.1. Aspects qualitatifs.....	60
5.1.2. Aspects quantitatifs.....	60
5.2. Périmètres, secteurs et zones de protection des eaux souterraines.....	61
5.2.1. Périmètres.....	61
5.2.2. Secteurs.....	61
5.2.3. Zones de protection.....	61
a. Zone de captage (zone S1).....	62
b.Zone de protection rapprochée (zone S2).....	62
c.Zone de protection éloignée (zone S3).....	63
d.Un périmètre de protection.....	63
e.L'aire d'alimentation Zu.....	63
f.L'aire d'alimentation Zo.....	63
g.Le secteur Au.....	63
h.Le secteur Üb.....	63
II. Inventaire des textes législatifs concernant la protection des eaux Souterraines.....	64
1. Le Concept de base de protection des eaux souterraines en Algérie.....	65
2. Synthèse des textes législatifs concernant la protection des ressources en	65

eaux souterraines en Algérie.....	
2.1. La loi n° 83 -17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux.....	65
2.2. La loi n° 05-12 du 4 août 2005 relatifs à l'eau.....	66
2.3. Le décret exécutif n° 07- 399 du 23 décembre 2007.....	67
2.3.1. Le périmètre de protection immédiate.....	67
2.3.2. Le périmètre de protection rapprochée.....	67
2.3.3. Le périmètre de protection éloignée.....	67
2.4. Le décret exécutif n° 10-73 du 6 février 2010.....	68
Conclusion.....	69

**CHAPITRE IV :
VULNERABILITE A LA POLLUTION**

Introduction.....	70
1. Concept de la vulnérabilité.....	71
1.1. Origine de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.....	71
1.2. Concept de la vulnérabilité.....	71
1.2.1. La vulnérabilité intrinsèque.....	71
1.2.2. La vulnérabilité spécifique.....	71
1.3. Critères de vulnérabilité.....	72
1.3.1. Critères relatifs au sol.....	72
1.3.2. Critères relatifs à la zone non saturée.....	72
1.3.3. Critères relatifs à la zone saturée.....	73
1.3.4. Critères communs à la zone non saturée et à la zone saturée.....	73
2. Etude bibliographique des méthodes de cartographie de la vulnérabilité.....	75
2.1. Méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines.....	75
2.1. 1. Les méthodes de cartographie à index.....	75
2.1. 2. Les modèles de simulation.....	75
2.1. 3. Les méthodes statistiques.....	75
2.2. Description et comparaison des principales méthodes.....	77
2.1.1. Milieu poreux.....	79
a. La méthode DRASTIC	79

Tables des matières

b. La méthode SINTACS.....	80
c. A.V.I. (Canada).....	80
d. G.O.D. (Pays-bas).....	80
e. GLA-method (Allemagne).....	80
2.1.2. Milieu Karstique.....	81
A. Méthodes développées dans le cadre de l'action COST 620 (PI, COP).....	81
a. Méthode PI (Goldscheider, 2000).....	81
b. Méthode LEA – (approche européenne).....	82
c. Méthode COP.....	83
d. La méthode DISCO.....	83
e.Méthodes spécifiques au karst (EPIK, RISKE).....	85
1. Méthode EPIK.....	85
2. Methode RISKE.....	85
f. L'approche européenne (O.C.P.K.).....	85
g. L'approche Slovène.....	87
h. S.I.N.T.A.C.S. Pro Karst (Italie).....	87
i. VUL.K. (Suisse).....	87
Conclusion.....	88
II. Démarche méthodologique pour le choix d'une méthode de Cartographie.....	89
1. Dolomie de Tlemcen et dolomie de Terni.....	93
Conclusion.....	95

PARTIE II : APPLICATION

Introduction.....	97
I. Caractéristiques de la méthode de la COP.....	97
1. Le facteur O (couches superposées).....	99
1.1. Critère OS (sol – couverture protectrice).....	99
1.2. Critère OL (sol – couverture protectrice).....	101
1.2.1. Formation du Miocen.....	101
1.2.2. Formation limoneuse et alluvionnaire.....	102
1.2.3. Formation des grés.....	102
1.2.4. Formation Calcairo-dolomitique.....	103
1.2.5. Formation Marno-calcaire.....	103
2. Le facteur C (Concentration de flux).....	106
2.1. Scénario 1.....	106
2.1.1. Distance paraport au perte (aven) Dh.....	107
2.1.2. Distance paraport au cour d'eau avec perte (aven) Ds.....	108
2.1.3. Pente et végétation Sv.....	109
2.2. Scénario 2.....	110
2.2.1. Caractéristique du surface.....	110
3. Le Facteur P (Précipitation).....	113
3.1. Le sous-facteur [PQ].....	113
3.2. Le sous-facteur [PI].....	113
4. Indice de vulnérabilité de la méthode COP.....	115
Conclusion.....	116

RESULTATS ET RECOMMANDATIONS

Introduction.....	117
1. Résultats et interprétations.....	118
2. Recommandations.....	122
Conclusion.....	124
Conclusion générale	126
Bibliographie	129
Annexe.....	134
Photos.....	148

Introduction générale

L'eau est une denrée précieuse et indispensable à la vie. en Algérie, cette ressource est largement suffisante en termes de quantité et qualité; sa préservation est donc primordiale.

En outre, les eaux souterraines karstiques constituent la ressource principale pour l'alimentation en eau potable de la population mondiale (Goldscheider, 2002). Les roches carbonatées, avec une grande partie karstifiée, couvrent environ 7 à 12% de la surface des continents. Environ 25% de la population est alimentée entièrement ou en partie par les eaux souterraines karstiques (Ford et Williams, 1989, in Bensaoula, 2007). Dans certains pays européens, les eaux karstiques couvrent 50% des besoins en alimentation en eau potable (Goldscheider, 2002, in Bensaoula, 2007), alors que dans certaines régions elles sont les seules eaux de bonne qualité. En Algérie en général et dans la wilaya de Tlemcen en particulier, les eaux karstiques contribuent pour une large part au développement socio-économique de la population (Bensaoula, 2007). Ces ressources en eau potable constituant un enjeu très important, sont très sensibles à la pollution.

Notre travail a pour but, tout d'abord de sélectionner une méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques qui s'adapterait au bassin versant du Meffrouche. Ceci a pu être réalisé après une étude bibliographique assez poussée des différents travaux effectués dans ce domaine aussi bien à l'échelle régionale, nationale et internationale.

Le présent travail a été scindé en deux parties :

La première partie s'articule autour de quatre chapitres :

- En chapitre premier, une étude bibliographique sur les systèmes karstiques qui permet de mieux comprendre le fonctionnement de ces systèmes et par conséquent la protection de leurs ressources en eau a été effectuée.

- Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude pédologique, géologique et hydrogéologique du bassin versant du Meffrouche, qui couvre une superficie de 90 Km² et fait partie des monts de Tlemcen, où est érigé un barrage de 15Hm³. Par sa constitution géologique, le bassin versant du Meffrouche est très riche en potentialités en eau. Aussi les formations carbonatées qui constituent les principaux réservoirs d'eau souterraines sont très karstifiées.

Cette étude a été basée principalement sur les travaux de Gevin 1952, Bensaoula 2006, Felidj, 2011 ainsi qu'une étude des linéaments observés sur les photos aériennes et sur le terrain lors des nombreuses sorties sur site que nous avons effectuées. .

- Une étude bibliographique sur la protection des eaux souterraines a permis de comprendre les risques courus par les eaux souterraines karstiques ainsi qu'un aperçu sur une approche des

Introduction générale

périmètres, secteurs et zones de protection des eaux souterraines proposé par plusieurs auteurs. Une appréciation sur la législation en Algérie concernant la protection des ressources en eau, qui est assurée de manière exclusive ou conjointe par le code des eaux et les lois sur la protection de l'environnement a fait l'objet du troisième chapitre.

-En fin, une étude bibliographique des méthodes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution dédiées aux différents types de milieux aquifères est présentée au quatrième chapitre. A la fin de ce dernier l'accent est mis sur la sélection d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstique. Le choix a été porté sur la méthode C.O.P.

La deuxième partie du travail a pour objet, une application de la méthode C.O.P dans le bassin versant du Meffrouche. Ce travail a pu être mené à bien grâce à l'utilisation du SIG. Sur la base des résultats obtenus des recommandations pour des travaux futurs ont été avancées.

Enfin ce mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Abréviations

Abréviation

D.R.E. : Direction des ressources en eau

J.O.R.A.: Journal Officiel de la République Algérienne

OFEFP: Office fédéral de l'environnement, des forêts

O.F.E.G. : Office fédéral des eaux et de la géologie

S.I.G. : système d'information géographique

A.N.R.H. : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

O.N.M.: Office national de la météorologie

B.V : Bassin versant.

Glossaire

- Aven** : Ouverture naturelle, habituellement plus profonde que large, mettant en rapport les formes karstiques extérieures et profondes.
- Canyon** : Morphologie due à l'action de rivières aériennes en domaine carbonaté.
- Diaclase** : Joint perpendiculaire à la stratification
- Doline** : Dépression typique du karst superficiel de forme généralement ronde ou ovale
- Épikarst** : Partie du karst la plus proche de la surface caractérisée par un fort degré de fracturation et d'altération, où les eaux de l'infiltration peuvent être momentanément retenues en formant un petit réservoir temporaire perché.
- Gouffre** : Ouverture naturelle par laquelle s'engouffre de l'eau, donnant accès au réseau karstique souterrain.
- Griffon** : Nom donné aux différents points d'émergence des filets d'eau qui constituent une source.
- Karst** : Ensemble de formes superficielles et souterraines résultant de la dissolution de roches carbonatées (calcaires, dolomies) par l'eau rendue acide par le dioxyde de carbone. Par extension, l'ensemble de formes comparables se développant dans les roches salines (gypse, anhydrite, halite)
- Perte** : Perte d'eau par infiltration concentrée dans le sol à partir d'un canal, ou autre masse d'eau.
- Poljé** : Grande dépression isolée, pouvant atteindre plusieurs kilomètres carrés, souvent recouverte d'un remplissage sédimentaire horizontal et dont la morphologie est plate et avec des bords à pente raide.
- Résurgence** : Réapparition à l'air libre, au terme de son parcours souterrain, d'un écoulement de surface qui avait disparu par une perte en amont.
- Rivière souterraine** : Drain karstique noyé de façon permanente dont la sortie est une source karstique.

Liste des figures

Fig. 1- Carte des affleurements des ensembles karstiques (en bleu) autour de la Méditerranée (Bakalowicz et Dörfliger, 2005)	01
Fig. 2- Paysage karstique (Mangin, 1975)	03
Fig. 3- Zonation globale du karst (Monbaron, 2010)	04
Fig. 4- Types élémentaires de lapiez (Valois, 2011)	05
Fig. 5- Types élémentaires de doline (Monbaron, 2010)	06
Fig. 6- Types élémentaires de poljé (Monbaron, 2010)	07
Fig. 7- Principe d'enfoncement du niveau de base (Jeannin, 1996)	07
Fig. 8- Les principaux types de galeries souterraines (Monbaron, 2010)	08
Fig. 9- Coupe synthétique d'un aquifère karstique (Mangin, 1975)	09
Fig.10- Diagramme illustrant les composantes des systèmes karstiques (Monbaron, 2010.	12
Fig.11- Les sources rencontrées dans le karst (Monbaron, 2010)	14
Fig. 12- Les deux types de systèmes karstiques (Bakalowicz 1999)	15
Fig. 13- Schéma conceptuel de l'aquifère karstique selon une approche fonctionnelle (Mangin, 1975)	16
Fig 14-. Situation du secteur d'étude (MNT)	20
Fig 15- Position des points cotés	21
Fig 16- Carte des pentes	22
Fig 17- Carte de pédologie	23
Fig 18- Carte de couverture végétale	26
Fig 19- Carte de reseau hydrographique	28
Fig.20- Pluviométrie annuelle, station Meffrouche (1976-2011)	39
Fig.21- Pluviométrie mensuelle moyen de la Station du Meffrouche (1976-2011)	30
Fig. 22- Schéma structural de la chaine alpine de la méditerranée occidentale	32
Fig. 23- Carte géologique du bassin versant du Meffrouche (Doumergue, 1915 et Gevin, 1952).	33
Fig.24- Log lithostratigraphique synthétique des monts de Tlemcen (Extrait de Benest et al 1999)	35
Fig.25- Schéma structural de l'avant-pays tellien entre Saida et la formation Algéro-	37

Liste des figures

Marocaine (Benest, 1985)	
Fig.26- Coupes structurale N-S à travers les monts de Tlemcen (Benest, 1985)	38
Fig .27- Coupes géologiques a travers le bassin versant du Meffrouche (Gevin, 1952)	42
Fig.28- Coupe Schématique montrant la couverture du karst (Bensaoula, 2006)	47
Fig.29- Zones de linéaments dans les membres dolomie de Tlemcen et de Terni (Carte de linéaments établie sur la base des photos aériennes 1 :20 000)	48
Fig 30- Direction dominantes de la fissuration et des linéaments visibles sur photos aérienne échelles 1 :20.000	50
Fig 31- Formes exokarstique du bassin versant du Meffrouche	51
Fig. 32-Forage et sources du bassin versant	52
Fig.33- Cycle de l'eau, (OFEFP (OFEV), 2004)	57
Fig.34- Profil du sol, (OFEFP (OFEV), 2004)	58
Fig.35- Objectifs de la protection des eaux souterraines	59
Fig.36- Schéma illustrant les différents zones de protection de l'aquifère	63
Fig. 37- Modèle conceptuel du karst et des critères de la vulnérabilité intrinsèque (Bensaoula, 2006 In Zwahlen , 2004)	86
Fig.38- Première étape de la démarche : choix du fond topographique et géologique (Derni, 2011)	90
Fig.39- Deuxième étape de la démarche : le milieu aquifère (Derni, 2011)	91
Fig. 40- Démarche méthodologique pour le choix d'une méthode de cartographie des dolomies de Tlemcen et dolomies de Terni (Derni, 2011, modifié par Zeghid , 2013).	94
Fig.41- Schéma de la méthode de la COP, montrant la différenciation des facteurs C, O et P (Vias et al. 2006)	98
Fig.42- Carte du critère OS (sols)	101
Fig.43- Carte du critère OL (lithologie)	105
Fig.44- Carte du Facteur O	105
Fig.45-Critère Dh (Distance par rapport aux pertes)	107
Fig.46- Carte du critère Dh (Distance para port à la perte)	107
Fig.47- Critère Ds (Distance par rapport aux cours d'eau avec perte (aven))	108
Fig. 48- Carte du critère Ds (para port au cour d'eau avec perte (aven))	108
Fig.49- Critère Sv (Pente et végétation)	109
Fig.50- Carte du critère Sv (Pente et végétation)	109

Liste des figures

Fig.51- Caractéristique de la surface Sf	110
Fig.52- Carte de critère de la Caractéristique du surface Sf	111
Fig.53- Carte du Facteur C	112
Fig.54- Exemple de Calcule du Facteur P	113
Fig.55- Carte du facteur P	114
Fig.56-Carte de la vulnérabilité par la méthode COP du bassin versant du Meffrouche	115/ 118
Fig .57- Distribution en %, des classes de la vulnérabilité à travers le système Karstique du Meffrouche	120
Fig .58- Distribution en Surface de la vulnérabilité à travers le système Karstique du Meffrouche	120
Fig .59- Histogramme de la vulnérabilité par la méthode COP à travers le système Karstique du Meffrouche	121

Liste des Tableaux

Tableau 1- Description Lithostratigraphique et hydrogéologique des formations (Gevin, 1952)	44
Tableau 2- Caractéristique hydrodynamique du membre calcareo- dolomitique (Gevin, 1952)	45
Tableau 3- Cavités détectées dans les forages par les chutes d’outils (C.O) (Bensaoula, 2006)	53
Tableau 4- Critères de vulnérabilité (Zwahlen , 2004)	74
Tableau 5- Liste des méthodes développées pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque (Dörfliger et al, 2004)	77
Tableau 6- Critères de vulnérabilité de la méthode DRASTIC (Dörfliger et al, 2004)	78
Tableau 7- Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST 620)	81
Tableau 8- Facteur sol (méthode LEA, (Dörfliger et al, 2004))	81
Tableau 9 - Indice “COP” utilisé pour la cartographie de la vulnérabilité (Vias et al., 2002)	82
Tableau .10- Les critères de la vulnérabilité introduits dans les différents milieux aquifères.	92
Tableau. 11- Texture du sol	100
Tableau.12- indice du critère OS	100
Tableau.13- Calcule d’indice du critère OL	102
Tableau.14- indice du critère OL	104
Tableau.15- Facteur O	106
Tableau.16- Facteur C	112
Tableau.17- Facteur P	114
Tableau.18- Indice de vulnérabilité de la méthode COP	115
Tableau.19- Indice de vulnérabilité par la méthode COP	118

Liste des Annexes

Annexe 1 - Determination du critère P de la méthode PI, d'après la méthode d'Holting (1995)	134
Annexe 2 - Classes de vulnérabilité de la méthode PI	135
Annexe 3 - Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST 620)	135
Annexe 4 - Diagramme de la méthode COP, avec les différents facteurs C,O,P	136
Annexe 5 - Indice « COP » utilisé pour la cartographie de la vulnérabilité (Vias et al., 2002)	137
Annexe 6 - Indice pour OL (Vias et al., 2002)	137
Annexe 7- Composée du flux pour déterminer l'indice C selon le scénario A, $C = (dh) * (ds) * (sv)$ (Vias et al., 2002)	138
Annexe 8 - Composés du flux pour déterminer l'indice C pour le scénario B,C $C = (sf) * (sv)$ (Vias et al., 2002)	138
Annexe 9 - Critères de pondération de la méthode EPIK	139
Annexe 10 - Diagramme explicatif de la méthode RISKE (Petelet et al., 2001)	140
Annexe 11- Classification de différents critères de la méthode RISKE (Petelet et al., 2001)	141
Annexe 12- Représentation des trois paramètres pris en considération la méthode « DISCO » (Pochon et Zwahlen, 2003)	142
Annexe 13- Délimitation des zones de protection selon la méthode de cartographie multicritère « DISCO » (Pochon et Zwahlen, 2003)	143
Annexe 14 - Schéma représente la méthode d'approche européenne OCPK	144
Annexe 15 - Principe de l'approche Slovène pour la cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines (Ravbar et Goldscheider 2008)	144
Annexe 16 - Diagramme de Piper	145
Annexe 17 - Diagramme de Schoeller Berkloff	146
Annexe 18 - Diagramme de Stiff	146
Annexe 19 - Coupe litho stratigraphique des forages et sondages des environs de Terni.	147

Liste des Photos

Photo 1 - Polje de Terni	148
Photo 2 - Dolomie de Tlemcen	148
Photo 3 - Calcaire caverneux	149
Photo 4 – Doline	149
Photo 5 – Doline	150
Photo 6 - Grés de Boumedienne	150
Photo 7 - Marne de Miocène de Terni	151
Photo 8 - Ensemble Calcaro-dolomitique de Terni	151
Photo 9 - Aspect ruiniforme du Calcaire-dolomitique de Terni	152
Photo 10 - Grotte au Nord-Est du village El Meffrouche	152
Photo 11 - Résurgence en aval de Sidi hafif	153
Photo 12 - Oued El Meffrouche	153
Photo 13 - Village déversant ses eaux d'assainissements dans l'oued El Meffrouche	154
Photo 14 - Village El Meffrouche	154
Photo 15 - Barrage El Meffrouche	155

Partie I

d'un aquifère karstique et l'évaluation de ses ressources en eau à l'échelle du bassin hydrogéologique. Toutefois, la localisation des ressources et la compréhension des processus de recharge dans la zone non saturée sont plus complexes. Les études basées sur les mesures de débits souterrains, permettent de renseigner sur le fonctionnement hydrodynamique plus local du système karstique (SK) (Bakalowicz, 2010). Cependant, la structuration des écoulements entre la surface et la zone noyée reste mal connue, faute d'y avoir accès. Encore reste-il à savoir comment celui-ci fonctionne et quels sont ses liens avec la profondeur et les points d'infiltration rapide ?

1. Définitions

Le karst est un paysage résultant de processus particuliers d'érosion (la karstification). Ces processus sont commandés par la dissolution des roches carbonatées (calcaires et dolomies) constituant le sous-sol des régions concernées (Bakalowicz, 1999). C'est l'eau de pluie infiltrée dans ces roches qui assure cette dissolution. L'eau acquiert l'acidité nécessaire à la mise en solution de la roche en se chargeant de gaz carbonique (CO₂) produit dans les sols par les végétaux et les colonies bactériennes. Le paysage de surface, constitué en général de dépressions fermées (appelées dolines, pour les petites, et poljés, pour les plaines d'inondation), est associé à un paysage souterrain, dont les grottes et les gouffres parcourables par l'homme font partie (figure 0.2). Le karst est par conséquent un paysage original, créé par les écoulements d'eau souterraine. Le karst est donc également un aquifère : l'aquifère karstique.

2. Structure du paysage karstique

Les aquifères karstiques résultent du processus de la karstification ; ils possèdent une morphologie spécifique que ce soit au niveau de la surface avec la présence de dolines, de vallées sèches, de lapiez (Mangin, 1975), de gouffre ou au niveau interne du massif carbonaté avec des réseaux de conduits (cavités, grottes, siphons, ...).

Ils possèdent les caractéristiques suivantes :

- Alimentation diffuse à l'échelle du bassin d'alimentation et alimentation ponctuelle au niveau de pertes de cours d'eau ;
- Existence de vitesses d'écoulement souterrain très importantes (quelques centaines de m/h);
- Crues importantes et soudaines, de forte intensité, suivie d'une décrue rapide et d'un long tarissement ;
- Stockage temporaire au niveau d'un épikarst, zone sous-cutannée dans la partie supérieure

d'un massif carbonaté, constituant un aquifère temporaire perché, discontinu, se vidangeant rapidement ;

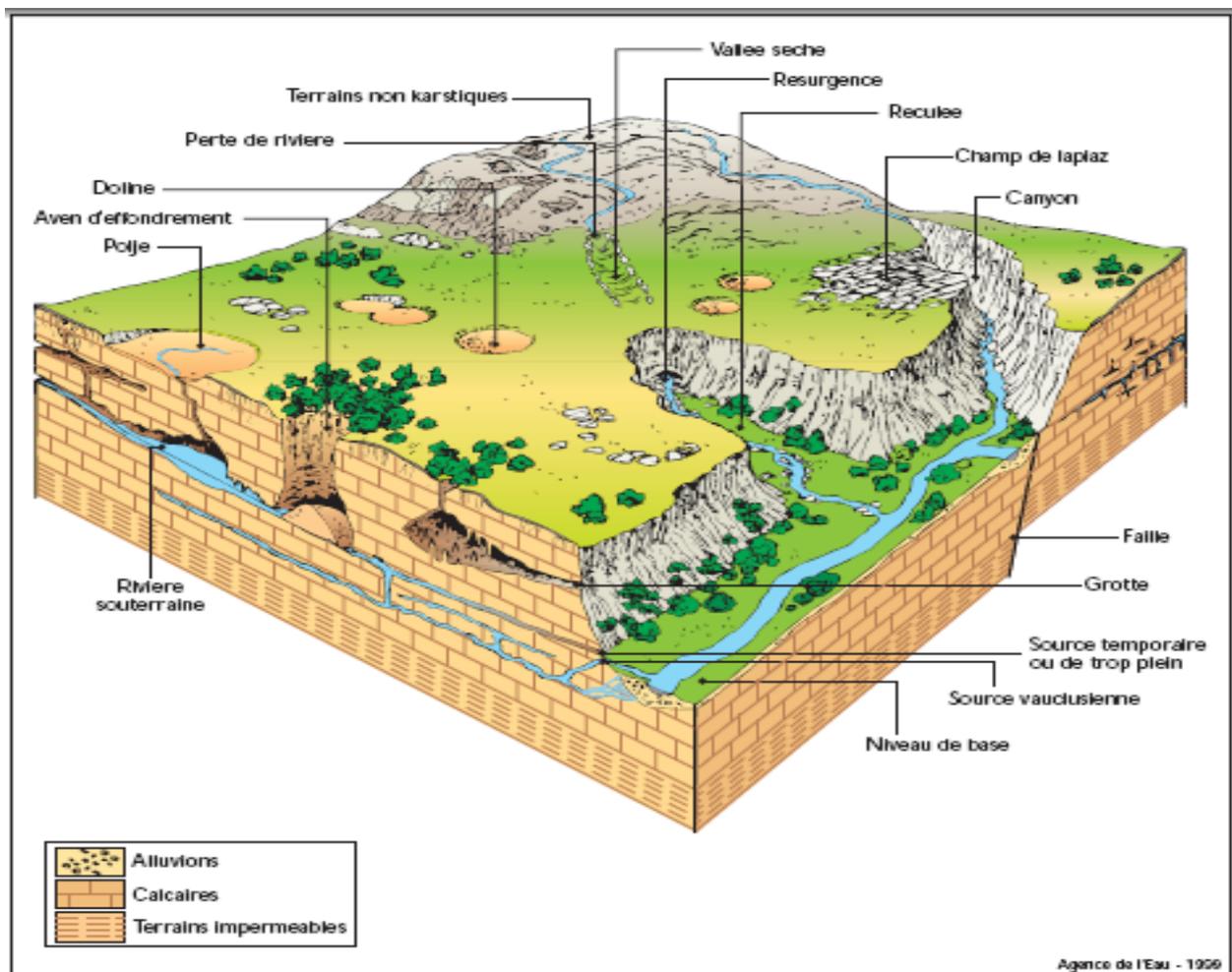


Fig. 2 - Paysage karstique (Mangin, 1975).

- L'aquifère karstique présente une organisation des écoulements souterrains, qui détermine celle des vides qu'ils créent. Dans cette organisation (figure 2), les deux fonctions classiques (stockage et drainage) sont séparées (Bakalowicz, 1999).

2.1. Zonation globale du karst

L'exokarst : les formes externes (en surface)

L'endokarst : les formes internes, les cavités souterraines

L'épikarst : zone de transition (qui reçoit l'eau) entre exo- et endo- (en sub-surface)

2.1.1. l'exokarst

Les formes d'érosion principales sont :

- les lapiés (ou lapiez, ou encore lapiaz).
- les petites dépressions fermées (dolines, ouvalas et cockpits).
- les grandes dépressions karstiques (poljés).

Les poljés, gouffres, avens et ouvalas sont également des formes superficielles remarquables par leurs dimensions car si les poljés et les ouvalas peuvent s'étaler sur de larges surfaces, les gouffres et les avens peuvent parfois atteindre des profondeurs de plusieurs centaines de mètres comme dans le système de Mammoth Cave aux Etats-Unis (Palmer, 1989).

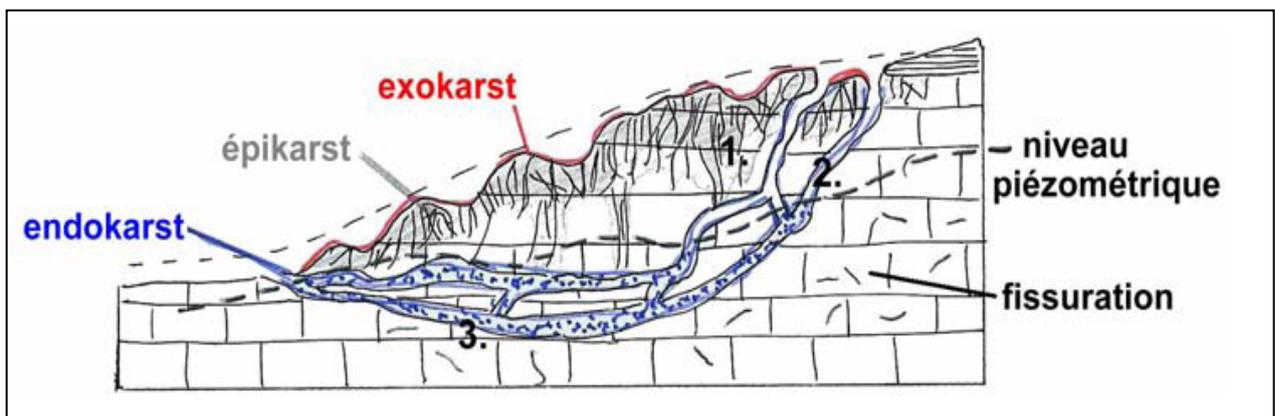


Fig. 3 - Zonation globale du karst (Monbaron, 2010).

En profondeur justement, on peut trouver des cavités de plus ou moins grandes dimensions, ainsi que des réseaux de conduits se développant parfois sur plusieurs dizaines de kilomètres linéaires et plusieurs centaines de mètres verticalement.

a) les lapiez (nom originaire des Préalpes vaudoises et chablaisiennes)

Les surfaces des plateaux calcaires sont accidentées de fissures, lapiez, avens (gouffre conduisant à un réseau souterrain), gouffre, qui sont les orifices les plus évidents permettant l'infiltration des eaux (Monbaron, 2010). Les lapiez sont des formes d'érosion résultant de la dissolution à la surface et sur les fronts des couches calcaires, donnant une typologie très variée. La surface calcaire burinée est un lapiez (qui correspond à une cavité superficielle).

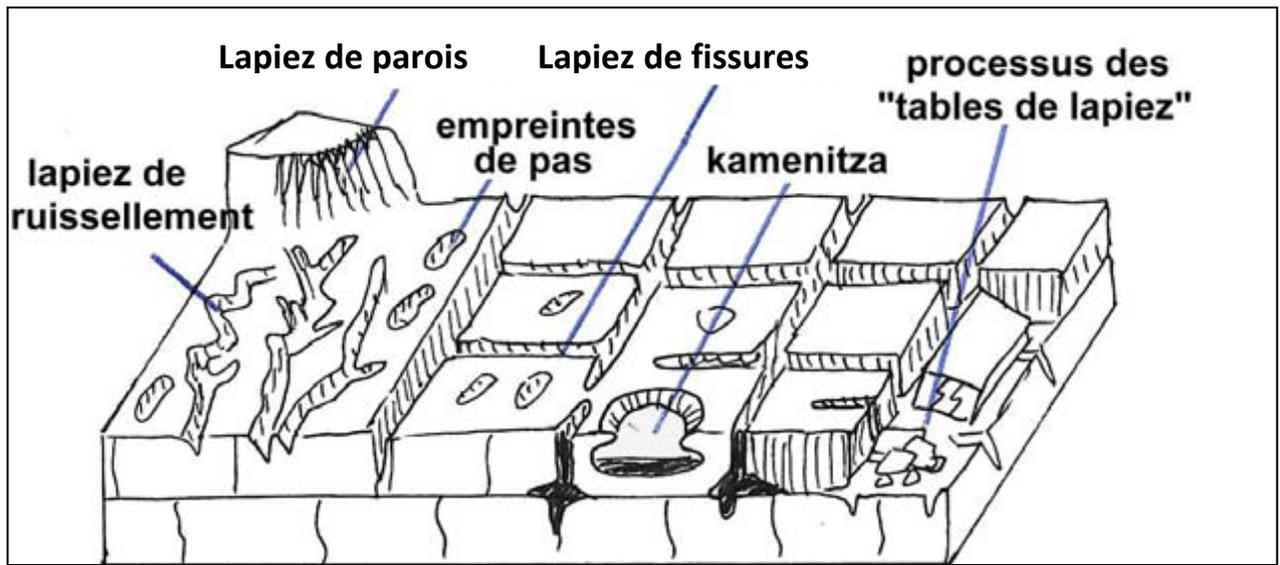


Fig. 4 - Types élémentaires de lapiez (Valois, 2011).

b) les dolines

Étymologie : du serbo-croate « dolina » = vallon, dépression fermée. Dans le Jura, on utilise souvent le terme emposieux pour parler des dolines (Monbaron, 2010).

La dissolution aboutit en surface à la formation de dolines, dépressions fermées souvent tapissées d'argile de décalcification, la terra fusca, élaborée sous climat humide tempérée, ou la terra rossa, produit de l'altération sous climat plus chaud. Plusieurs dolines coalescentes donnent naissance à un ouvala (uvala), car les dolines agrandissent leur bassin de réception et se réunissent ainsi.

Typologie :

- Selon la genèse (doline de dissolution / effondrement).
- En fonction de la présence d'une couverture non karstifiable (doline de subsidence et le soutirage enlève par infiltration le matériel dans le terrain non-karstique (phénomène de tassement)).

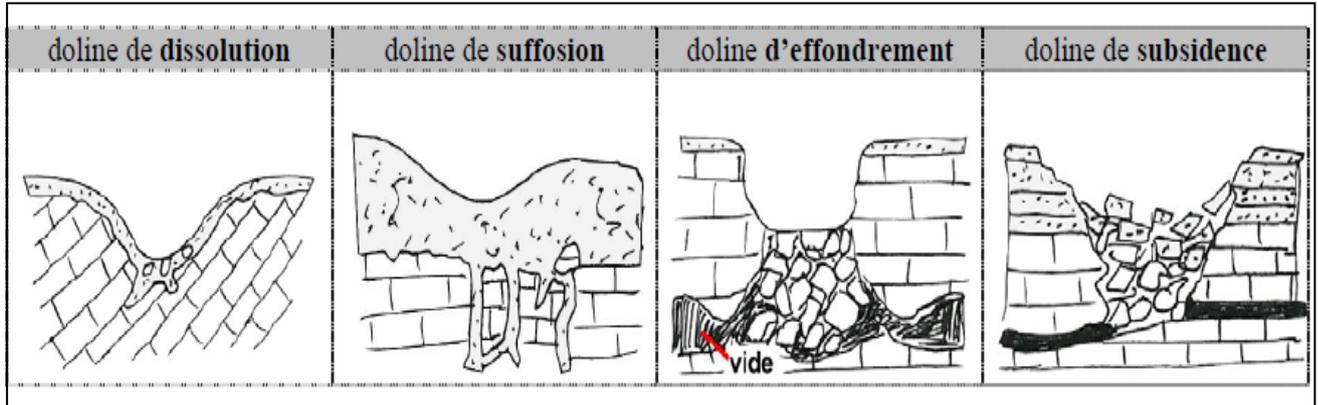


Fig. 5 - Types élémentaires de doline (Monbaron, 2010).

c) les poljés

Le poljé correspond à de vastes dépressions karstiques allongées de plusieurs kilomètres (entre 2 et plus de 400 km²), dominés par des versants abruptes et des reliefs résiduels : les hums. Le terme signifie en serbo-croate : champ (pas forcément en zone karstique), c'est à dire l'endroit où l'on peut cultiver. Il y a d'autres noms pour des formes semblables : plans (France), campo (Italie), ojos (Cuba). Les eaux superficielles se perdent dans des ponors – en lien avec un système de drainage souterrain – et ressortent à la faveur de résurgences après avoir parcouru des conduits et des galeries souterraines (Monbaron, 2010). Un poljé peut s'élargir avec l'infiltration (ponor et versant raide où disparaissent les eaux)

Typologie :

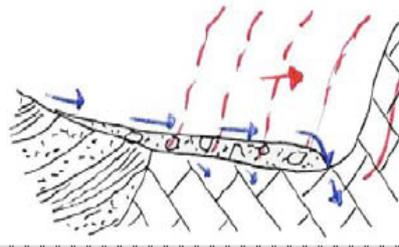
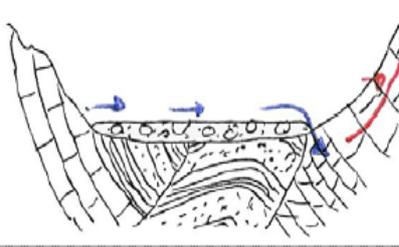
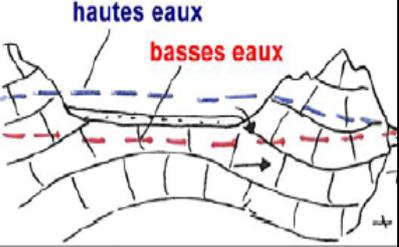
poljé de bordure	poljé structural	poljé de niveau de base
		
Présence de roches non-calcaires où se fait l'écoulement fluvial normal (<i>terra rossa</i> , alluvions, dépôts lacustres).	Mouvement <u>tectonique</u> important (plis, synclinaux, faille) a empilé des roches non-calcaires sur des roches calcaires	Le niveau des nappes phréatiques varie dans le karst. Par haut niveau, le poljé est inondé, parfois même de façon permanente (poljé-lac de Yanina (Grèce)).

Fig. 6 - Types élémentaires de poljé (Monbaron, 2010).

2.1.2. L'endokarst

a) Organisation du karst profond

- Zone d'absorption ou épikarstique
- Zone vadose
- Zone épinoyée ou épiphréatique
- Zone noyé ou phréatique (le niveau peut varier selon le climat, la saison, les précipitations (eau peut monter dans les grottes lors de précipitations), la source correspond au niveau de la zone phréatique).

b) Principe d'enfoncement du niveau de base (création de grottes, galeries, puits,...).

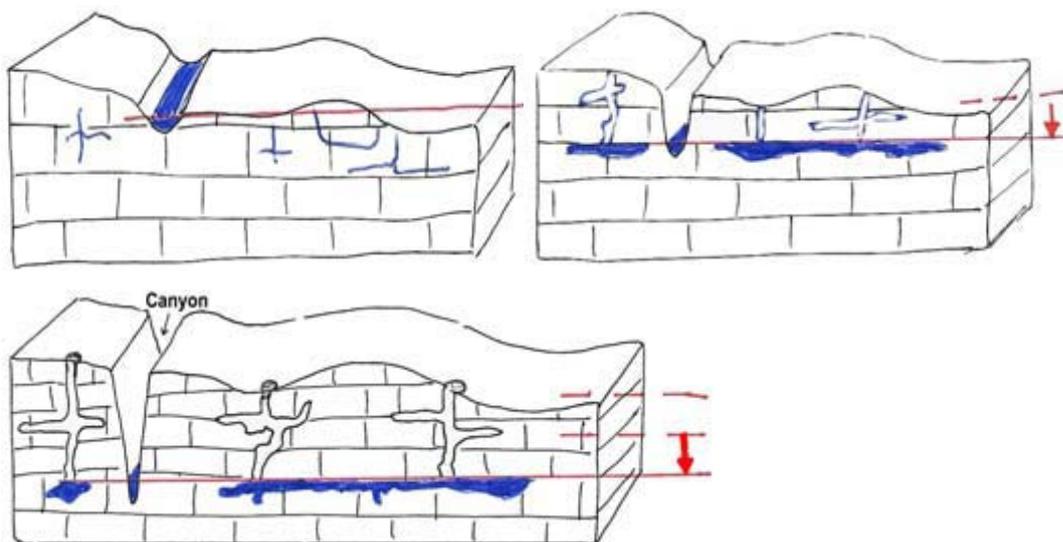


Fig. 7- Principe d'enfoncement du niveau de base (Jeannin, 1996).

c) Les principaux types de galeries souterraines

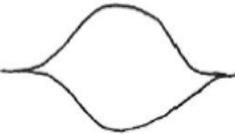
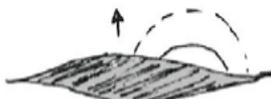
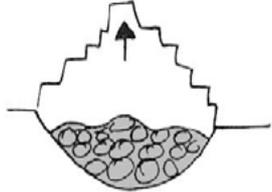
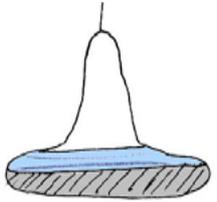
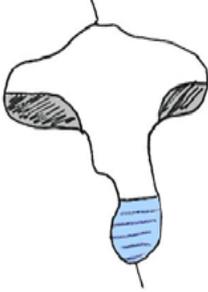
	1	2	3
A	<p>Régime noyé (= sous pression)</p> <p>Galeries syngénétiques (le long de failles, de plans de couches)</p>  <p>Roche homogène, galerie elliptique (lisse, bien nettoyé)</p>	<p>Le long d'un joint se stratification, galerie surbaissée</p> 	<p>Le long d'une diaclase, d'une faille</p> 
B	<p>Régime noyé</p> <p>Galeries paragénétiques</p>  <p>Galerie à plafond, en demi-tube (eau doit creuser vers le haut, car en dessous c'est imperméable)</p>	<p>Galerie surbaissée et en partie colmatée (galerie remplie de matériel comme en B1)</p> 	<p>Galerie à effondrement de voûte</p> 
C	<p>Ecoulement libre</p> <p>Incision et surcreusement</p>  <p>Galerie à rivière souterraine (étalement de la rivière, élargissement)</p>	<p>Galerie avec dépôts de terrasse</p> 	<p>Galerie incisée en canyon</p> 

Fig. 8- Les principaux types de galeries souterraines (Monbaron, 2010).

2.1.3. Epikarst :

Elle assure l'interface entre le karst sous-jacent et les phénomènes externes et une alimentation permanente via l'infiltration lente vers la zone noyée (Bakalowicz, 1995 ; Kiraly, 2002 ; Perrin et al., 2003). Les eaux y sont soumises à l'évapotranspiration.

Le rôle de l'épikarst et son lien avec les dolines est très bien décrit par Williams (1983) et Klimchouk (2004), en propose une définition et une classification. L'épikarst est donc la frange plus altérée du massif carbonaté où la porosité et la perméabilité sont plus fortes et plus homogènes. Ce sous-système a une fonction régulatrice car il stocke l'eau et distribue la recharge à la zone d'infiltration de manière rapide ou lente (Figure 9).

Il faut noter également que même si la majorité de la porosité de l'épikarst est souvent représentée par des fractures, on peut aussi y trouver des conduits ainsi qu'une porosité matricielle (plus forte pour les dolomies par ailleurs).

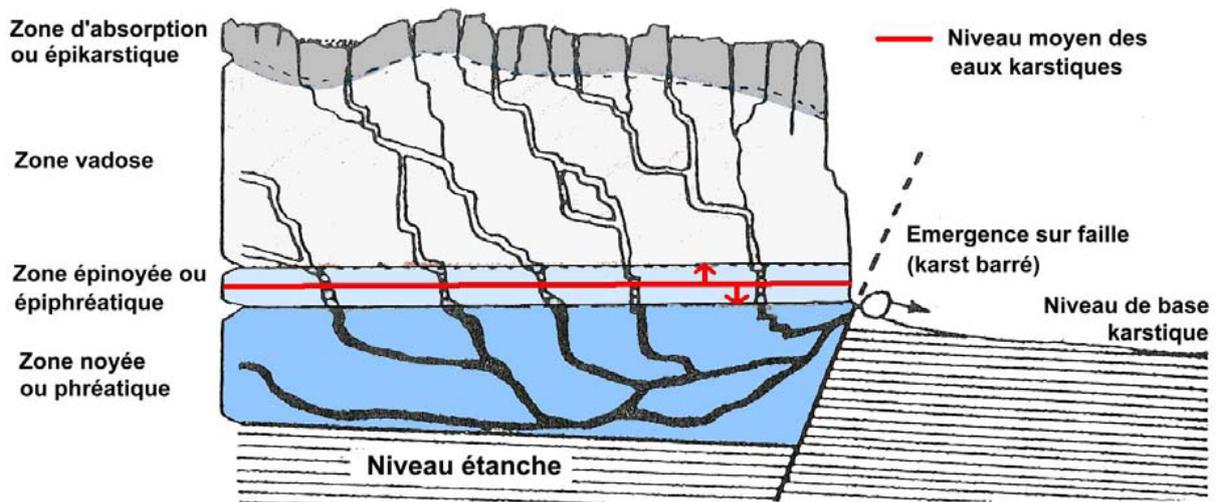


Fig. 9- Coupe synthétique d'un aquifère karstique (Mangin, 1975).

3. Fonctionnement du système Karstique

Le système karstique est défini par Mangin (1974) comme « l'ensemble au niveau duquel les écoulements de type karstique s'organisent pour constituer une unité de drainage ».

Le système karstique correspond donc au bassin hydrogéologique d'alimentation d'une source karstique ou d'un groupe de sources karstiques liées les unes aux autres.

Le système karstique peut être constitué uniquement de formations carbonatées karstifiées : il s'agit alors d'un système karstique unaire. Lorsque le système karstique comprend aussi des formations non karstiques, soumises à des écoulements de surface drainés par des pertes, il est dit binaire (Mangin, 1978).

Dans l'approche fonctionnelle, le fonctionnement des aquifères karstiques est étudié globalement, c'est à dire à l'échelle du bassin hydrogéologique en analysant les eaux à l'exutoire du système. Cela peut être d'un point de vue hydrochimique en étudiant les ions de l'eau et les isotopes (Bakalowicz, 1979 ; Plagnes, 1997 ; Emblanch, 1997), d'un point de vue hydrodynamique en étudiant les variations de débits par rapport aux entrées de pluie efficace (Mangin, 1975 ; Marsaud, 1996 ; Labat, 2000) ou encore à l'aide de modèles pluie-débit (Fleury et al., 2007 ; Moussu et al., 2011). La plupart du temps, plusieurs de ces approches sont combinées.

Au travers de nombreux travaux similaires et des observations in-situ, l'aquifère karstique proprement dit est divisé en trois zones principales : l'épikarst, la zone d'infiltration (zone non saturée) et la zone noyée (zone saturée) (Mangin, 1975, Bakalowicz, 1979).

Dans la zone noyée (Figure 9), les conduits assurent le rôle transmissif de l'aquifère, tandis que le côté capacitif est plutôt localisé dans les cavités moins bien connectées aux drains et aussi dans les fractures et la porosité inter-granulaire de la matrice rocheuse. Des études de décharge de conduits avec des traceurs ont montré des zones plus ou moins transmissives dans le réseau de drains (Morales et al., 2010). Les échanges entre conduits et matrice ont aussi fait l'objet de publications (Faulkner et al., 2009 ; Bailly-Comte et al., 2010).

La zone d'infiltration fait elle aussi l'objet d'études hydrodynamiques avec notamment des pluviomètres installés sous des stalactites pour corrélérer ce signal à celui de la pluie (Genty et Deflandre, 1998 ; Baker et Brunson, 2003 ; Arbel et al., 2010). Les auteurs ont montré un effet piston (transfert de pression entre la pluie nouvelle et les eaux plus profondes) et un mélange entre eaux d'infiltration rapide et eaux ayant un certain temps de séjour dans le système karstique. Ces phénomènes ont déjà été décrits dans la littérature à partir de l'analyse chimique à l'exutoire (Plagnes, 1997).

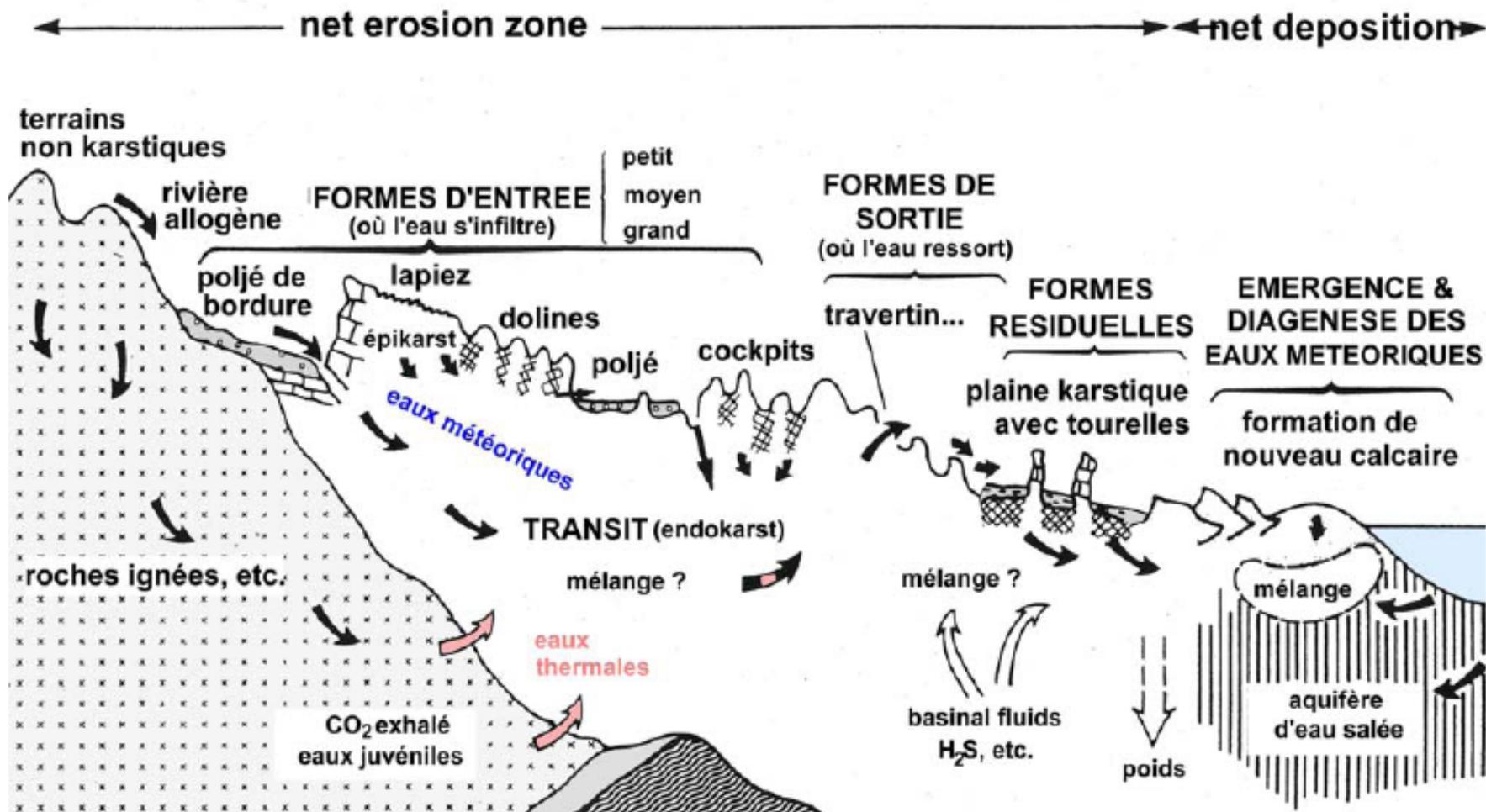


Fig.10- Diagramme illustrant les composantes des systèmes karstiques (Monbaron, 2010).

La zone d'alimentation est la partie la plus proche de la surface. Cette partie est caractérisée par un fort degré de fracturation et d'altération. Les eaux d'infiltration peuvent être momentanément retenues en formant un petit réservoir temporaire perché : l'épikarst.

Cette zone saturée temporaire et discontinue, constitue l'aquifère épikarstique .

3.1. Les sources karstiques

Dans les zones calcaires, peu de rivières se trouvent à la surface car elles s'infiltrent dans le karst par les dolines, de petites fissures... L'eau, qu'elle provienne du ruissellement des eaux de pluie infiltrées sur l'ensemble du territoire ou d'une rivière de surface, va émerger à l'extérieur par des exurgences ou des résurgences.

3.1.1. Exurgence : source, parfois à fort débit, correspondant à l'émergence d'une rivière souterraine dont l'origine n'est pas dans la perte d'une rivière aérienne, mais uniquement dans l'infiltration.

3.1.2. Résurgence : source, parfois à fort débit, correspondant à la réapparition d'une rivière aérienne ayant effectué un parcours souterrain.

Trois types de sources sont rencontrées dans le karst :

- drainage libre.
- karst barré.
- karst confiné.

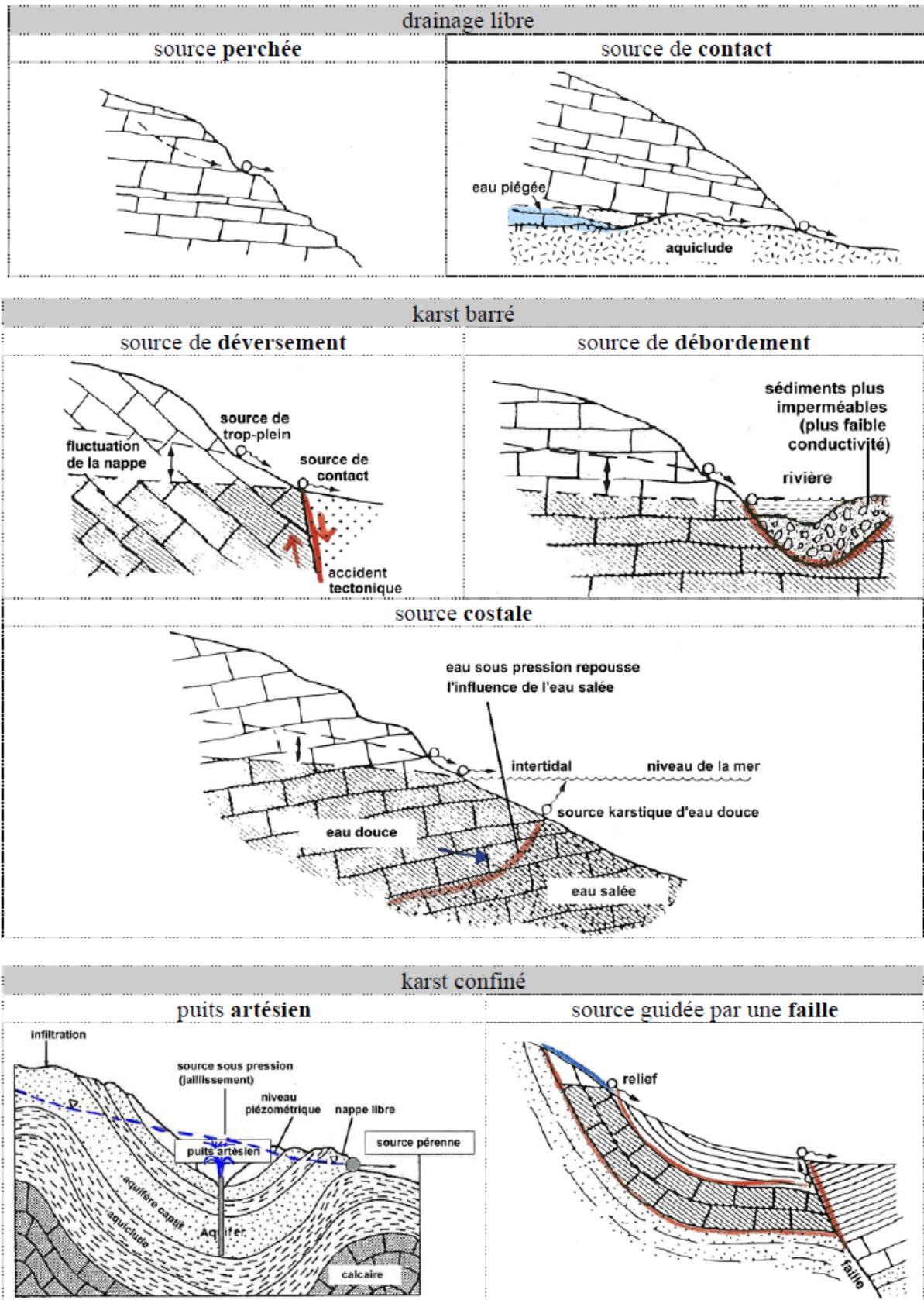


Fig.11- Les sources rencontrées dans le karst (Monbaron, 2010).

Les sorties d'eau du karst sont toujours des sites extraordinaires, ne serait-ce que parce que les massifs et les plateaux qui les dominent sont dépourvus d'eau. A la suite, l'appellation "source" est en général soigneusement évitée sous le prétexte que les sources ne peuvent qu'être alimentées par des eaux pures, filtrées naturellement. Martel ne voyait dans la plupart des sources karstiques que la résurgence d'eaux de surface engouffrées dans des pertes (Bakalowicz M, 1999).

Il les distinguait des exurgences, sources ne recevant aucune eau en provenance de pertes de rivière.

Finalement, les résurgences sont des sources de systèmes karstiques binaires, alors que les exurgences sont celles de systèmes karstiques unaires. Quant aux émergences, ce sont celles dont l'origine n'est pas connue.

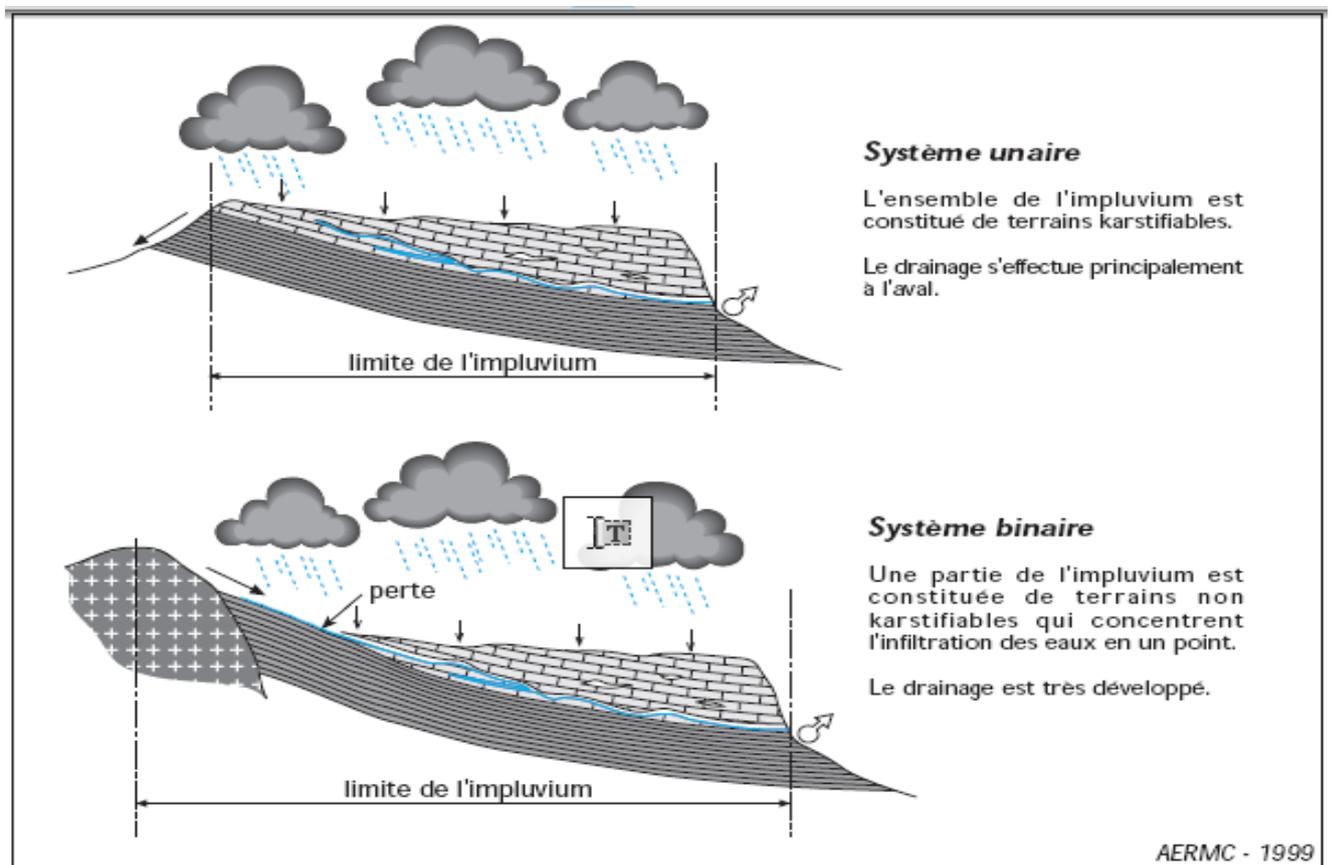


Fig. 12 - Les deux types de systèmes karstiques (Bakalowicz , 1999).

3.2. Schéma fonctionnel et structural du système karstique

Mangin (1975) a élaboré un schéma fonctionnel et structural du système karstique, ce système est divisé en deux zones principales : la zone d'infiltration (zone non saturée) et la zone noyée (zone saturée). Par la suite, en se basant sur le transfert de masses à partir des équilibres calco-carboniques et sur les différents types de karsts étudiés, Bakalowicz (1979, 2004), y a apporté quelques modifications (Figure 13).

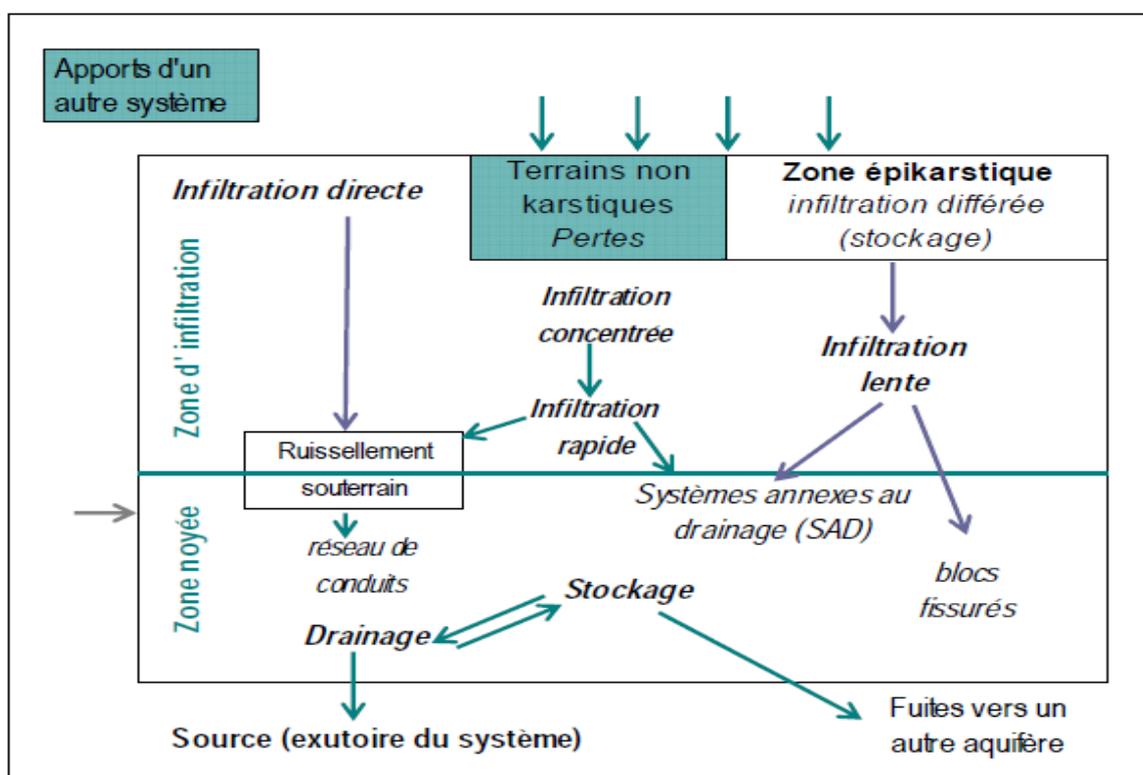


Fig. 13- Schéma conceptuel de l'aquifère karstique selon une approche fonctionnelle (Mangin, 1975)

Deux types de structure sont ainsi distingués par Mangin (1975) : un axe de drainage ou drain et les systèmes annexes au drainage (SAD). L'axe de drainage est constitué d'un ensemble de conduits, il constitue l'architecture autour de laquelle s'organise la zone noyée. En crues, les écoulements généralement turbulents y sont très rapides. En étiage, cet axe assure le drainage des SAD alors qu'il assure leur alimentation lors des périodes de hautes eaux. Ces SAD sont définis comme étant des vides de taille importante anastomosés se développant de part et d'autre de l'axe de drainage. Leur situation spatiale correspondrait aux lieux où l'infiltration est concentrée avec fort pouvoir de dissolution et ils seraient préférentiellement situés au voisinage des intersections du réseau de

fractures. Ils seraient connectés à l'axe de drainage par des conduits ou fissures de plus petites tailles.

Conclusion

En milieu karstique, développement d'un côté, et conservation de la nature de l'autre, sont inféodés à une connaissance détaillée des particularités du milieu. Les études à mener sur les systèmes karstiques nécessitent des investigations plus complexes et plus étendues dans le temps. Il est en effet nécessaire de considérer l'ensemble du bassin d'alimentation des ressources qu'il est envisagé de capter et il est souhaitable de réaliser un suivi hydrodynamique et hydrochimique au moins sur un cycle hydrologique complet.

Cette approche plus longue permet de fournir les documents d'aide à la gestion de l'espace, à l'échelle du système, en vue de protéger durablement la ressource en eau en qualité et en quantité.

L'exploitation d'eau potable ou celle de ressources d'énergies renouvelables présentent des potentiels de développement encore très intéressants dans les milieux karstiques.

Actuellement ces ressources sont largement sous exploitées car des problèmes pratiques liés à une connaissance insuffisante du milieu se posent. La localisation (prévision, détection, exploration) des réseaux de conduits karstiques est un élément clé à maîtriser pour rendre ces potentialités exploitables. C'est aussi par une connaissance approfondie des réseaux karstiques qu'il est possible de protéger les richesses du monde souterrain, y compris les eaux, contre les influences négatives du monde extérieur.

CHAPITRE II

LE BASSIN VERSANT DU MEFFROUCHE.

Introduction

La haute falaise jurassique à la quelle s'adosse la ville de Tlemcen, domine de plus de 500m la plaine de la basse Tafna qui est entaillée de profondes vallées : oued Isser ,oued Chouly et oued Zitoun (Gevin. 1952).

Parfois la coupure n'est pas continue, et les crêtes élevées amènent la fermeture des vallées, tel est le cas de l'oued Meffrouche, qui a quelque Kilomètres à l'Est de Tlemcen.

La surface du bassin versant du Meffrouche est de 90 Km², de plus, il faut préciser, fait remarquable pour les bassins de l'Algerie du Nord, que le barrage fait une alimentation souterraine, ainsi superficielle (Gevin. 1952).

Une partie importante des eaux de barrage contribue pour une large part à l'alimentation en eau potable du groupement urbain de Tlemcen. Ce bassin est constitue essentiellement des formations carbonatées d'âge jurassique. Ce dernier régularise un débit de 15 millions m³.

Par sa constitution géologique, le bassin versant du Meffrouche est très riche en potentialités en eau. En effet les formations carbonatées qui constituent les principaux réservoirs d'eau souterraines sont très karstifiées et par conséquent rendent ces eaux particulièrement vulnérables à la pollution, c'est pourquoi les aquifères karstiques nécessitent une protection particulière.

I- Contexte Géographique :

1. Situation générale

Le bassin versant de Meffrouche d'une superficie de 90 km², fait partie du Monts de Tlemcen qui sont situés au Nord-Ouest algérien, et correspondent à un vaste horst de direction SW-NE. Ils sont situés entre une zone de basses plaines et de plateaux (bassin de la Tafna) au Nord et une zone de Hautes Plaines au Sud appelées hautes plaines Oranaises (El Aricha) (Benest, 1985). Leur altitude varie entre 800 à 1400m et culminent à 1843m à Dj.Tenouchfi orienté au Nord-Est suivant son cours d'eau principal. Notre secteur d'étude se situe au Sud-Ouest de la willaya de Tlemcen entre les latitudes et les longitudes suivantes :

Latitudes : 34° 45' à 34° 52' Nord.

Longitudes : 1° 15' à 1° 25' Ouest.

Et entre les coordonnées Lambert suivantes :

X1= 133.800 X2=136,000

Y2=177.800 Y2= 179.500

Il est limité au Sud par Djebel Nador, à l'Est par Djebel Benyakoub et Djebel Tichtiouine, à l'Ouest par Djebel Gendouza, et Djebel El Koudia, au Nord par Djebel Zarifet et Beni-Moudjer (Belabaci, 2004).

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

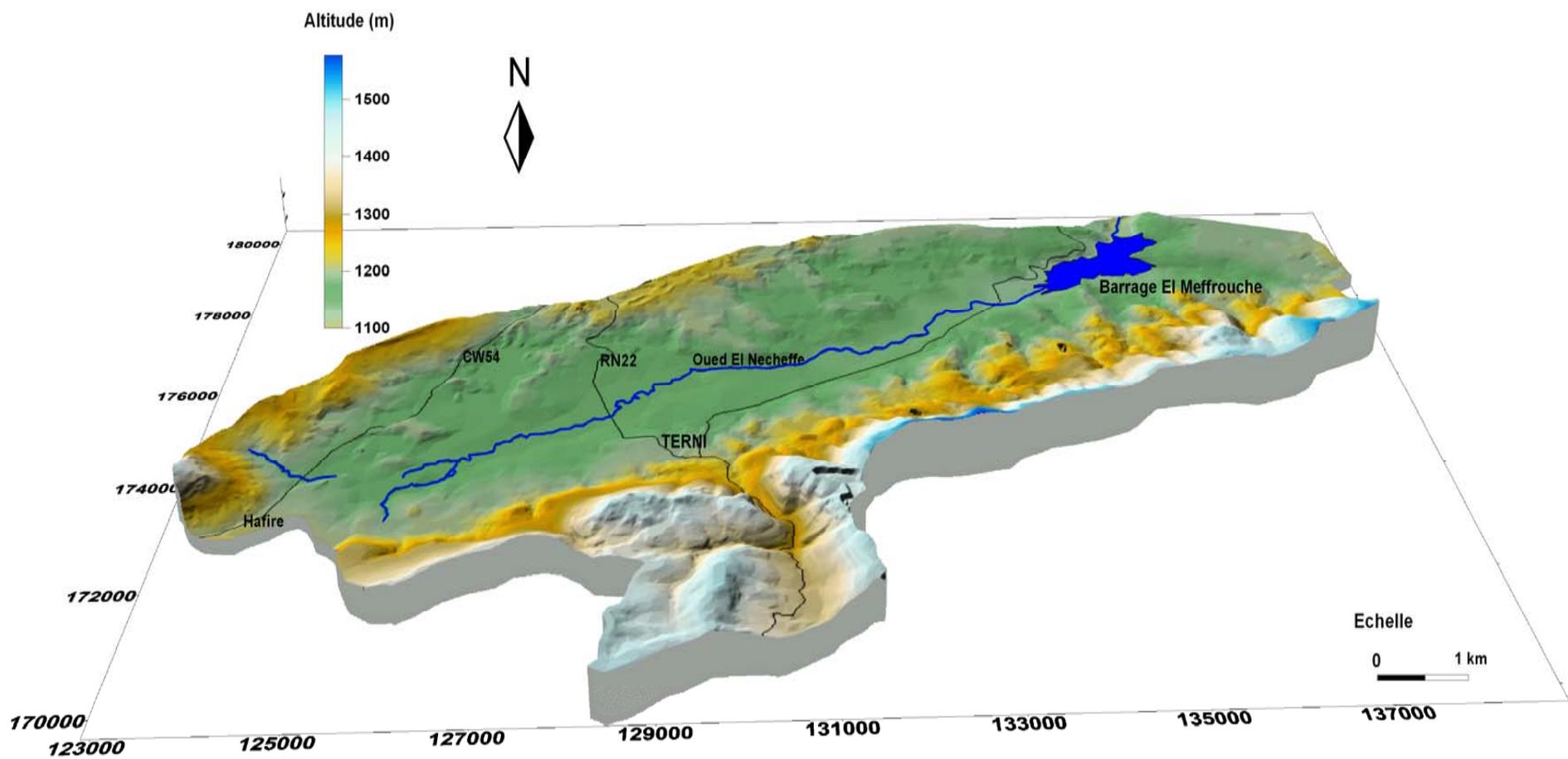


Fig 14- Situation du secteur d'étude (MNT).

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

2. Le relief :

Il a un relief très accidenté avec de fortes pentes et des altitudes moyennes entre 1200 et 1500 m avec un point culminant au Djebel Nador à 1575m (fig.15).

L'incidence du relief sur les caractéristiques hydrologiques est considérable. La durée d'imprégnation du sol par les eaux et les possibilités d'infiltration étant d'autant moins élevée que la pente est plus forte. En outre la plus part des facteurs météorologiques sont liés à l'altitude (Felidj, 2011).

Les massifs montagneux, dans le secteur d'étude, présentent une altitude qui varie entre 1150m et 1570 m.

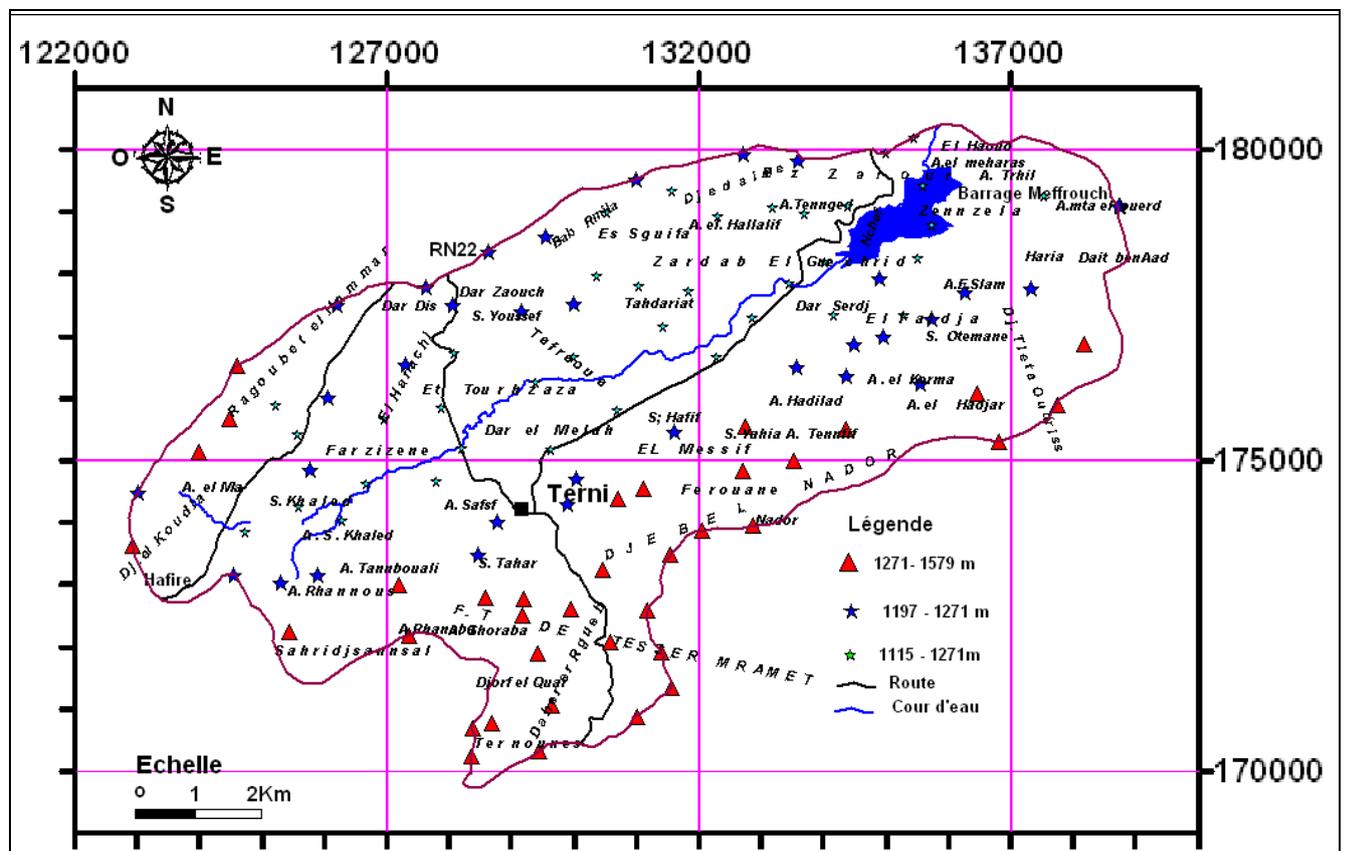


Fig 15- Position des points cotés (carte topographique de Terni 1/50000)

3. La pente

L'étude des pentes est très importante pour la détermination de l'aptitude des terrains au ruissellement et à l'infiltration. Ce facteur est présent dans la majorité des méthodes de cartographie (Felidj, 2011).

La pente du secteur d'étude présente une diminution importante lorsqu'on déplace du Sud vers le Nord (fig.16). Ceci favorise le ruissellement et par conséquent a une influence directe sur la couverture pédologique par l'effet de l'érosion.

Ainsi que, il conditionne l'action du lessivage par les eaux de surface de tout ce qu'elles peuvent charrier avec elles lorsqu'elles s'écoulent.

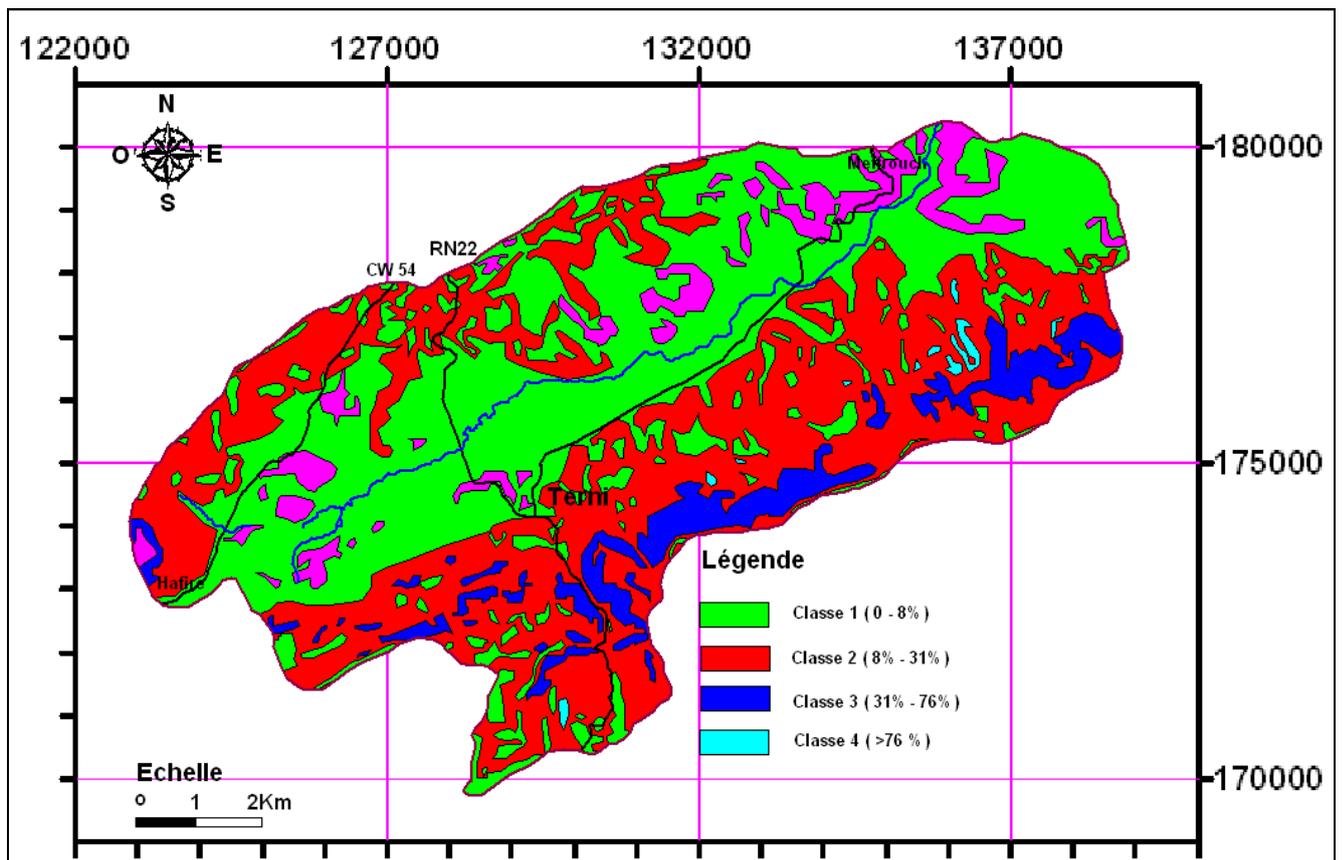


Fig 16- Carte des pentes.

On conclue que la partie sud du bassin du djebel Nador possède une forte pente, qui varie entre 31% à 76%, ceci va favoriser le déclenchement et l'accélération de l'érosion hydrique.

Cependant, en allant vers le centre du bassin, la pente présente une diminution importante jusqu'à atteinte des valeurs minimums.

4 .Pédologie:

Le sol est l'élément principal de l'environnement et règle la répartition de la végétation, il se développe en fonction de la nature de la roche-mère, la topographie et les caractéristiques du climat. Benchetrit, en 1972, précise que « quand le climat devient plus sec et les conditions de semi-aridité règnent, la pluviosité n'est pas assez forte pour modifier le complexe absorbant des profils des sols». Cette stabilité n'est que potentielle due en partie aux facteurs bioclimatiques; l'intervention anthropique rendant les sols instables a cause de l'érosion qui suit la dénudation (Felidj, 2011).

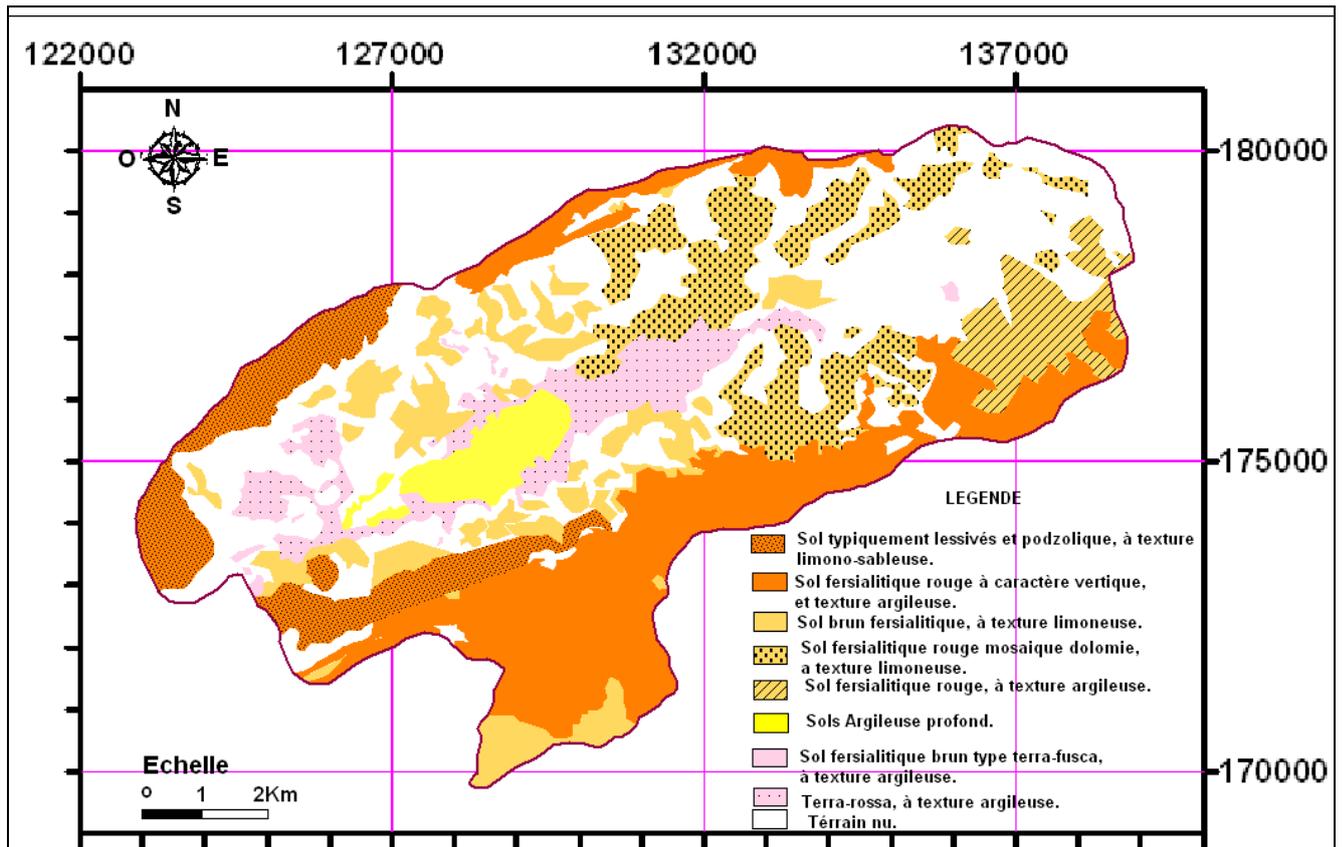


Fig 17- Carte pédologique.

Aussi, il faut noter que «les sols restent presque toujours dans les conditions climatiques méditerranéennes, sous la dépendance de la roche-mère qui leur a donné naissance en raison de leur impuissance à modifier radicalement le substratum géologique (Nahal, 1962), (Quezel et Santal, 1985).

A ce sujet, Duchaufour, 1968 précise que « sur roche-mère les sols de climat chaud sont plus riches en fer que les sols tempérés ».

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

Plusieurs études concernant les sols d'Algérie ont été réalisées par des pédologues algériens et étrangers, seulement ces études restent pour la plupart éparses, représentant une zone ou un type de sol.

Au niveau du Parc National de Tlemcen, la plupart des sols sont hétérogènes, ce sont des sols à substrat calcaire (GAOUAR, 1997). Pour les Monts de Tlemcen ; la nature de la roche-mère permet de distinguer deux grands types de sols :

4.1. Les sols fersialitiques : il s'agit de sols souvent associés au climat méditerranéen. Ce sont des sols anciens dont l'évolution aurait été accomplie sous forêts caducifoliées, en condition plus humide et plus fraîche. Leur rubéfaction correspond à une phase plus chaude à végétation sclérophylle qui a donné des sols rouges fersialitiques (terra rossa) (Dahmani, 1997).

4.2. Les sols typiquement lessives et podzoliques que l'on trouve sur les grès séquanais. Ils sont caractérisés par l'élaboration progressive d'un humus acide. Ce sont des sols limoneux et assez profonds en général.

D'après l'esquisse pédologique (GAOUAR, 1997), les types de sols rencontrés dans le territoire du Parc National de Tlemcen sont les suivants :

4.3. Sol fersialitique rouge :

C'est un sol lourd (Argileux), très pauvre en réserves d'eau, riche en bases notamment en Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , ce type de sol se rencontre à Zarifet, Ain Fezza, El Eubbad, El Meffrouche.

4.4. Sol brun fersialitique :

Prend naissance sur roche-mère calcaire sous l'influence d'un climat froid à saison sèche moins marquée. Ce sol a les caractéristiques que le précédent mêmes, mais plus humide et plus poreux (sol limoneux), il se trouve au niveau de Zarifet et Hafir (Felidj, 2011).

4.5. Sol fersialitique brun type terra-fusca :

Il s'agit d'un matériau ancien (paléosol), de couleur brun foncé et composé d'argile de décarbonatation plus ou moins lourde, riche en Mg^{2+} et en Ca^{2+} et qui aurait été formé sous l'influence d'un climat plus humide et moins chaud. On le rencontre au Sud et à l'Est du barrage El Meffrouche.

4.6. Terra rossa :

La terra rossa est bien répartie dans les dolomies en particulier dans des poches, c'est un sol lourd (Argileux), où avec le chêne kermès, à Tal Terni et au Nord-Ouest vers Béni Bahdel, elle imprime au paysage de la région un aspect typique (Gaouar, 1980).

4.7. Sol fersialitique rouge à caractère verticale:

C'est un sol qui pendant une certaine période surtout des années sèches, présente, dans les 50 premiers cm de l'horizon B, des fentes larges de 1 cm ou plus. Il est lourd (riche en argile gonflante) par rapport au sol fersialitique rouge et possède une très bonne teneur en eau. C'est un sol difficile à mettre en culture, il prend naissance sur des roches-mères calcaires (Karst) se trouve à Mansourah, plateau de Lalla Setti (Felidj, 2011).

4.8. Sol fersialitique rouge et mosaïque dolomique:

La mosaïque reflète le déséquilibre dans les sols qui sont le plus souvent peu profonds et affleurent de temps à autre la roche dolomitique, ce sol possède une texture limoneuse et par conséquent un tapis végétal très hétérogène.

5. La végétation

La végétation se caractérise par une diversité de structure, de physiologie et de composition dans les strates abusives et buissonnantes grâce à la variété géographique, géologique et climatique qu'offrent les monts de Tlemcen (Nehari, 2004).

- La chênaie dans le sud et l'ouest du bassin versant. Il s'agit d'une chênaie mixte à chêne vert et à chêne zen.

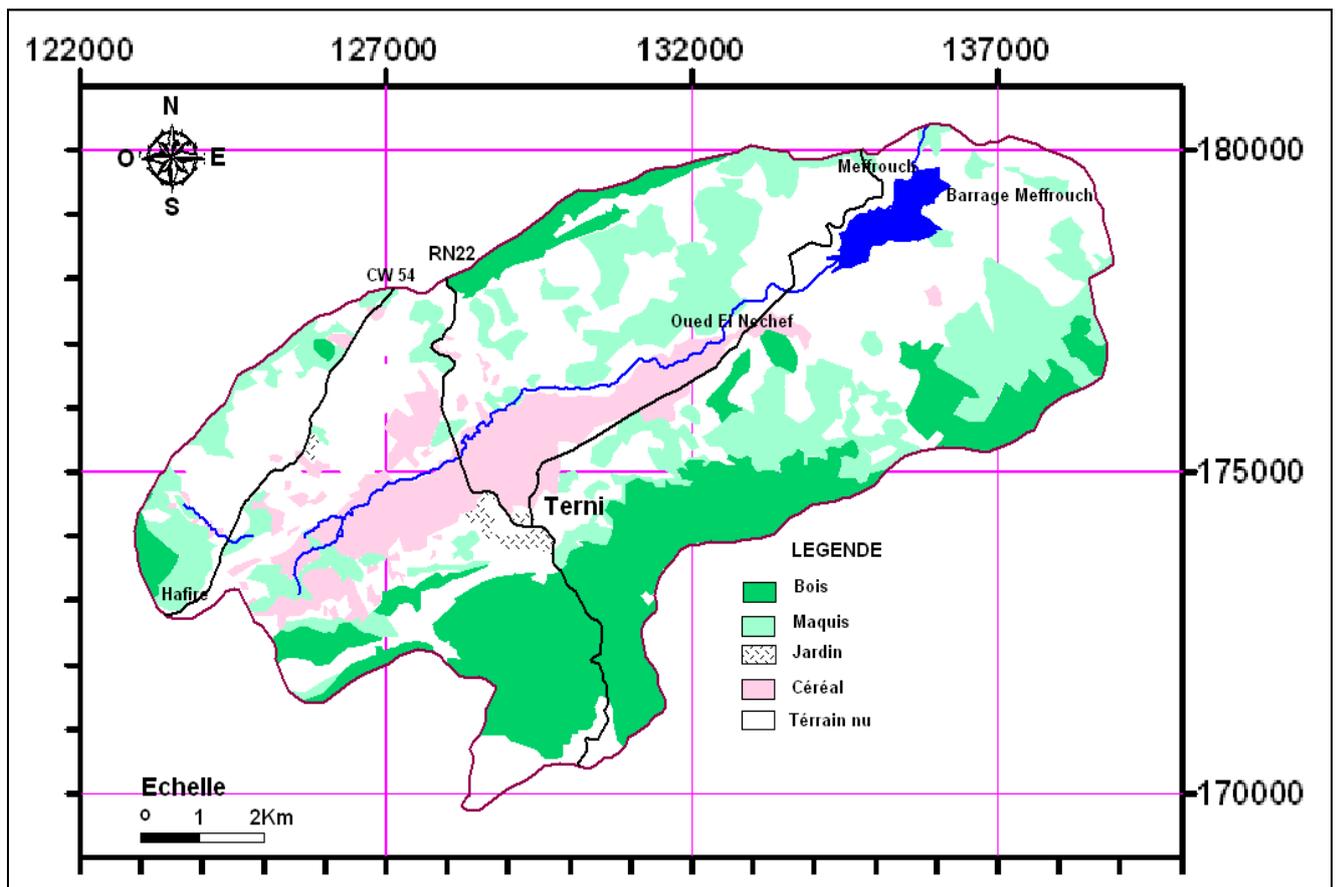


Fig 18- Carte de la couverture végétale.

5.1. La subéraie de Hafir : très hétérogène, constituée essentiellement de *Quercus suber*, *Quercus rotundifolia* et *Quercus fagénia Tlemcenienis* avec un sous bois composé surtout d'espèces caractéristiques du groupement de la chênaie mixte.

Elle se caractérise par trois groupements végétaux à base de Chêne liège, Chêne Zen et Chêne vert plus la subéraie à *Erica arborea*.

Forêt de Tlemcen (731 ha).

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

5.2. Le chêne vert : espèce dominant dans les monts de Tlemcen, représente 49% de l'ensemble des essences forestières (Nehari, 2004).

En ce qui concerne la partie des versants du bassin on peut distinguer deux principaux groupements de type zonal et azonal.

5.3.Type zonal: constitué surtout les groupements pré-forestiers et stéppiques, occupé par une série à chêne vert, à pin d'Alep, Alfa et autres plantes steppiques.

5.4. Type azonal: on trouve une végétation hydrophile .Ce type prend de l'ampleur et occupe des surfaces non négligeables avec une concurrence signalée et ou les zones pré-forestières sont occupées par les chênes sclérophylles.

-De cet aperçu, nous pouvons voir que la partie sud de notre terrain d'étude est en grande partie couverte par des forêts, ainsi que la partie nord et une partielle de la partie ouest (figuré en vert foncé). Cependant, les versants du bassin, sont couverts par un Maquis parfois dégradé, vue à la nature lithologique des couches affleurentes.

Par contre la partie centre du secteur d'étude, celle qui est figuré en rose, est constituée de terrains agricoles ou les différentes cultures sont pratiquées (saisonnière, annuelles etc ...).

6. Réseau Hydrographique

Le réseau hydrographique est composé d'un cours d'eau principal, Oued el Nechef d'une longueur de 18.25 km, et une série de tributaires dont les ramifications s'étendent vers les parties les plus hautes du bassin versant (Fig.19).

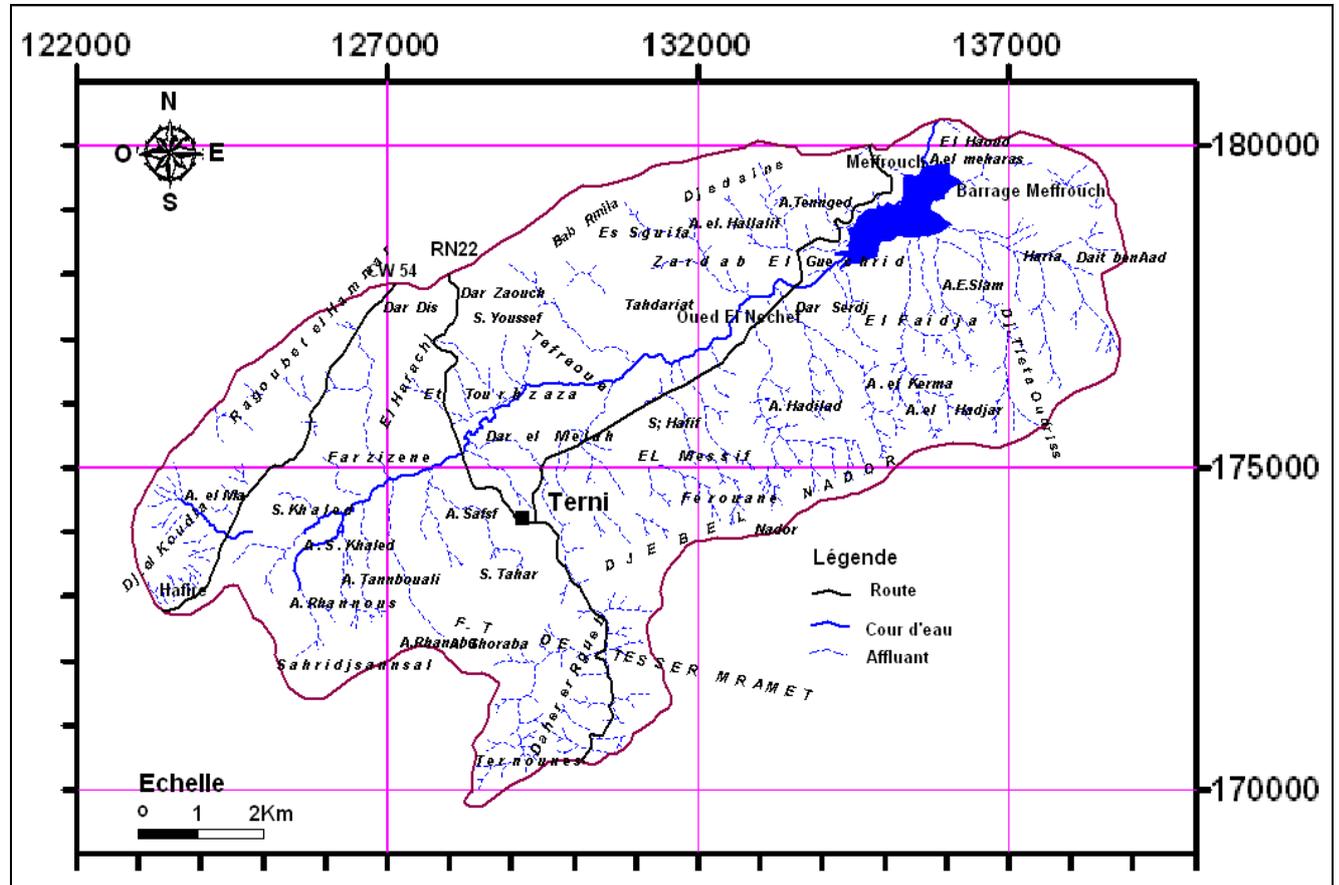


Fig 19- Carte de reseau hydrographique.

Dans la partie sud du bassin, au niveau de la forêt de Tasset mramet et à côté de la route Terni-Sebdou, le réseau hydrographique prend une forme angulaire, ceci peut être le résultat d'une tectonique cassante, qui a créé un réseau de linéaments et fissuration, que se développe par la suite un réseau hydrographique sous l'effet de l'érosion hydrique.

Cependant dans la partie sud-est du bassin et le barrage de Meffrouche au niveau de djebel Tleta Oudrisse, Djerf et Abiod et Djebel Nador jusqu'à la limite sud ouest du Oued Necheffe le réseau est parallèle, ça peut être la résultante d'une tectonique cassante qui a généré des fissures et des linéaments parallèles, à l'exception d'une partie angulaire au sud de Sidi Hafife.

Au nord du barrage et Oued Necheffe le réseau est moins dense, rarement de courtes ramifications, parfois parallèle et par endroit angulaire.

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

Par contre, dans le sud ouest du bassin, précisément dans la partie amont, on considère des affluents parallèles les uns par apport à l'autre.

7. Etude de la pluviométrie

L'étude pluviométrique effectuée, a été basée sur les données des précipitations enregistrées au niveau de la station du Meffrouche durant la période 1976-2011.

Notons que l'année 2008-2009, est la plus pluvieuse dans cette série, avec une valeur maximum enregistré de 871,1 mm, Cependant un minimum enregistré durant l'année 1983-1984 avec 246 mm. Dont la valeur moyenne de la série est de 630 mm.

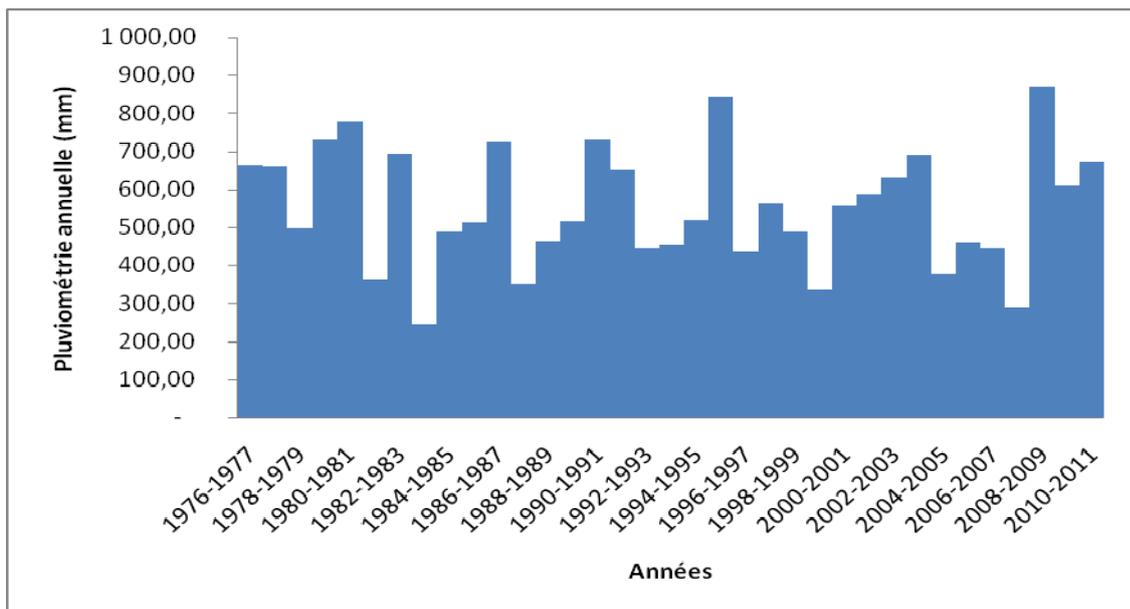


Fig.20- Pluviométrie annuelle, station Meffrouche (1976-2011)

La pluviométrie mensuelle moyenne marque deux maximums, l'un en janvier (73.2 mm), et l'autre en Mars (80.7 mm). Par contre un minimum en Juillet (3.3 mm).

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

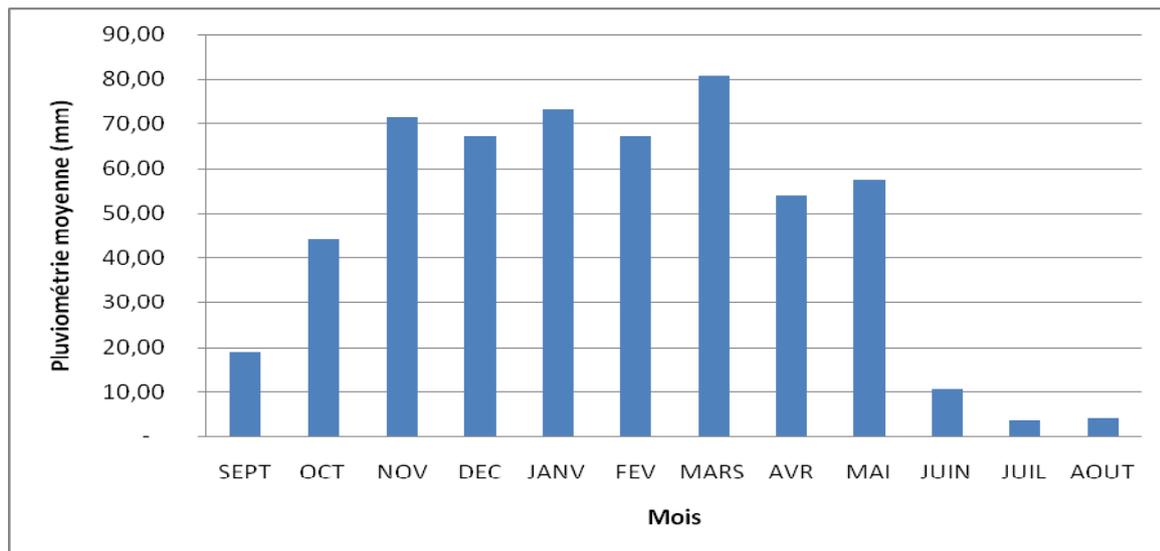


Fig.21- Pluviométrie mensuelle moyenne au niveau de la Station du Meffrouche (1976-2011)

On conclue, que la période déficitaire débute au Juin jusqu'au fin d'Aout, et la période excédentaire débute dès le mois de Octobre jusqu'au le mois de Mai (fig.21).

Cependant, dans notre étude on se basant sur deux parametres de precipitation, le premier est P_q qui correspond à la quantité de la précipitation et le second P_i , qui définit l'intensité :

7.1. Le sous-facteur [PQ]

L'année la plus humide dans la série historique de précipitation 1976-2011 est définie par 1,15 de la moyenne (630 mm), donc elle égale à 724,57mm. Aussi, dans la série d'étude, il ya douze années ou les précipitations sont supérieures ou égales à l'année la plus humide (724,57mm).Cependant le sous-facteur (PQ) correspond à la moyenne annuelle des précipitations d'une série historique des années humides (les années $\geq 724,57$ mm), dont cette moyenne égale à 783,27mm. Cette valeur est comprise entre 400 et 800 mm, donc d'après la méthode COP on prend un indice de 0.3.

7.2. Le sous-facteur [PI]

Dans la série 1976-2011, il ya douze années supérieures ou égales à l'année la plus humide (724,57mm), cependant nous avons obtenu les données journalières que pour l'année 2008-2009. Cette dernière se caractérise par avec une précipitation annuelle de 871.10 mm qui s'est faite pendant 113 jours. Par conséquent la distribution temporelle est égale à 7.70, d'après la méthode COP on prend un indice de 0.6.

II - Approche géologique

L'étude géologique joue un rôle fondamental pour le choix d'une méthodologie à la cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. Le bassin versant de Oued El Meffrouche a été étudié par plusieurs auteurs afin d'établir une description géologique détaillée de la région, ainsi que des tracés de cartes et de coupes géologiques représentant toutes les formations qui affleurent à la surface du sol et identifiant tous les horizons aquifères.

1. Historique des études

1.1. Barrage de Meffrouche

Les premiers travaux sur le bassin versant généralement fragmentaires, ont débuté :

En 1880, date d'exécution d'un barrage à environ 1500 mètres à l'amont des cascades, fut abandonnée lorsque les réalisateurs virent la première crue de septembre s'engouffrer dans les fouilles du barrage.

Entre 1910 et 1948 F.Doumergue définit les grands ensembles stratigraphiques sur les cartes géologiques, feuilles Terni, Tlemcen et Lamoricière.

Il faut attendre quelques années (1938), sous la pression démographique croissante, pour que les études reprennent avec l'idée de faire un captage bas par les forages. Mais l'existence d'une couche de marno-calcaires beaucoup plus épaisse (>80 m) que prévu (30m), a conduit à l'abandon du captage.

En 1948, dans le cadre de l'étude du barrage Meffrouche, des levés géologiques précis des environs du futur barrage à l'échelle du 1/5.000, sont exécutés par P.Gevin. Ces levés mettent en évidence la nature particulièrement faillée de la région (Bouanani, 2004).

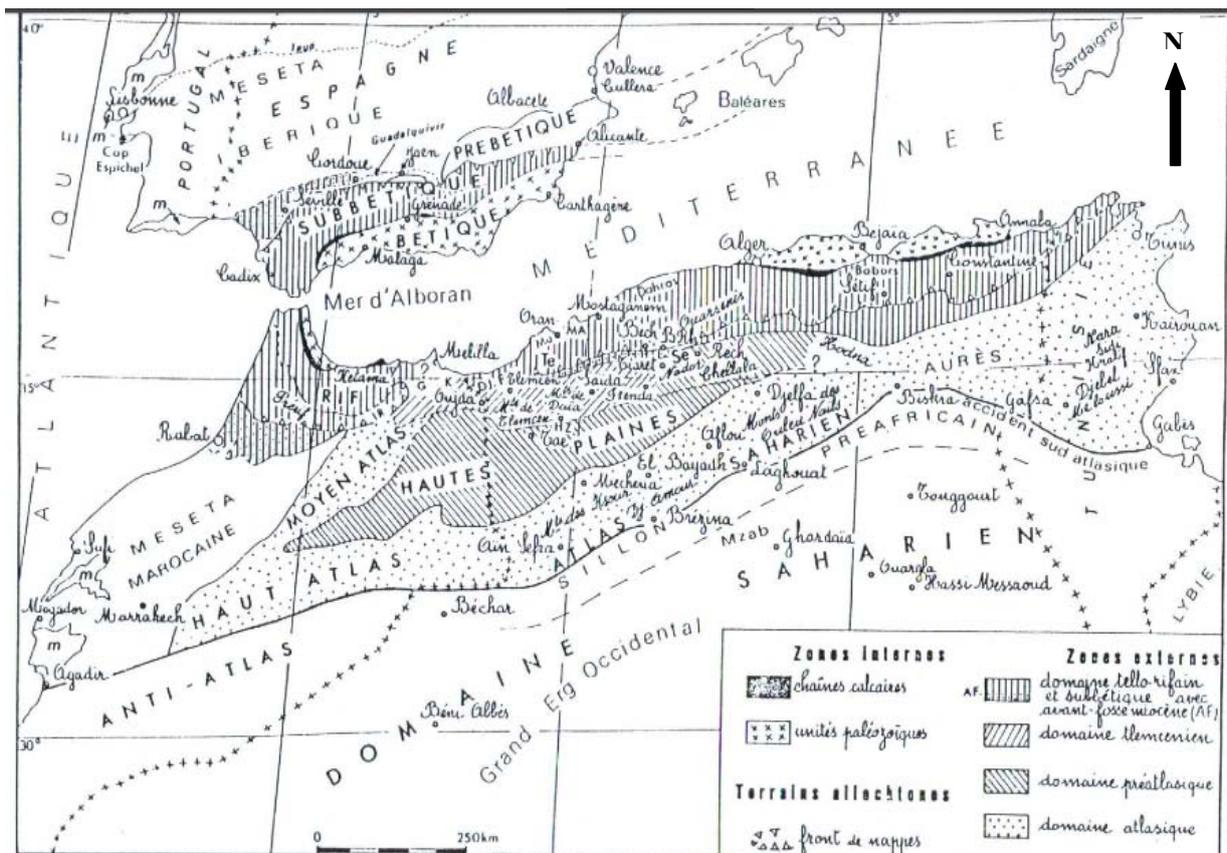
Ceux-ci mettent en Evidance la nature particulièrement faillée de la région et la présence d'une grande faille a environ 200 m en amont de la rupture des cascades qui relève les mammo-calcaires rendant ainsi possible la fermeture de la vallée sur des terrains suffisamment imperméables. La construction du barrage pouvait être envisagée, donc en 1957; le projet était établie dans sa forme définitive en ce qui concerne le corps principal du barrage. Il n'y a eu par la suite que des modifications de détails : élargissement des semelles, modifications de déversoirs et de la prise d'eau.

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

2. Contexte géologique :

Par sa situation en Afrique du nord qui englobe la partie méridionale de la chaîne alpine, l'Algérie peut être subdivisée en trois grands domaines :

- Le domaine saharien ;
- Le domaine atlasique ;
- Le domaine tello-Rifain.



**Fig. 22- Schéma structural de la chaîne alpine de la méditerranée occidentale
(Benest, 1985).**

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

3. Cadre litho-stratigraphique :

L'échelle des terrains rencontrés dans la zone du Meffrouche s'étend du Séquanien au Crétacé inférieure (Berriasien), tous étant en concordance de sédimentation. Il faut noter la présence d'un petit lambeau de terrains Miocènes (Miocène inférieure), discordant sur le socle secondaire, qui témoigne, d'une part de l'extrême avancée des rivages miocènes sur le causse jurassique, d'autre part de l'âge post-miocène inférieur de quelques-uns au moins des grands accidents ayant affecté la région (Gevin, 1952).

Les terrains quaternaires, qui n'ont qu'un rôle très limité, ne seront pas décrits.

3.1. La série terrigène du Callovien au Kimméridgien supérieur :

3.1.1. Les Grés de Bou Médiène (Oxfordien supérieur –Kimméridgien inférieure) :

Les Grés de Bou Médiène dans le secteur de Tlemcen se composent d'une alternance d'Argiles rouges ou vertes, les Grés montrant des stratifications obliques ou entrecroisées et formant fréquemment des corniches de 5 à 20 m d'épaisseur. Les intercalations carbonatées y sont rares et peu fossilifères. La plus importante, d'extension oranaise, composée des calcaires biodétritiques (10m d'épaisseur environ) indiquant un néritique tidal, est bien représentée au Sud de Tlemcen, à 50 m du sommet de la formation (Benest, 1985).

L'évolution sédimentaire de Grés de Boumédiène apparait largement dépendante de la tectonique distensive à l'origine d'une subsidence différentielle localement spectaculaire. (Gevin, 1952).

3.2. La série carbonatée du Kimméridgien supérieur au Berriasien basal :

Elles correspondent aux dépôts d'une plate-forme marine, très peu profonde, soumise à des fréquentes émergences liées aux marées. Parmi les indices de très faible profondeur on retiendra tout particulièrement la fréquence, dans certains bancs, de laminites stromatolitiques indiquant un milieu intertidal (Benest, 1985).

Les formations des monts de Tlemcen sont datées indirectement par corrélation avec la série à Ammonites des massifs de Bou Rheddou et Bechtout dans la zone sud-tellienne.

3.2.1. Les Calcaire de Zarifet (Kimméridgien supérieur) :

Ce sont des calcaires massifs parfois dolomités (épaisseur 100m environ au col de Zarifet). On y trouve en particulier des algues vertes et des foraminifères Lituolidés. Les séquences rythmiques micritiques, présentent des passées des laminites stromatolitiques intertidales avec des indices d'émergence (Fig.24).

3.2.2. Les Dolomies de Tlemcen (Kimméridgienne terminal) :

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

Cette formation (épaisseur : 200m environ) correspond aux grands escarpements dolomitique qui dominant Tlemcen et couronnent le cirque des Cascades (Doumergue, 1910 in Benest, 1985). Les Dolomies qui la composent, en grand partie, sont parfois grossièrement cristallines en raison d'une dolomitisation tardive.

Cette formation est constituée par un ensemble de dolomies cristallines, à intercalations calcaires et marneuses, qu'on divisé en trois membres :

Un membre Calcaréo-Dolomitique inférieur.

Un membre Marno-Calcaire intermédiaire.

Un membre Calcaréo-Dolomitique supérieur.

3.2.3. Les Marno-Calcaires de Raourai (Tithonien basal) :

C'est un ensemble marneux riche en Lituolidés, d'épaisseur très variable (de 75 à 150 m, près de 400 m au Djebel Raourai). Des bancs intercalés de calcaire bien visibles vers le sommet de la formation. Ils peuvent être pétris, à leur toit.

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

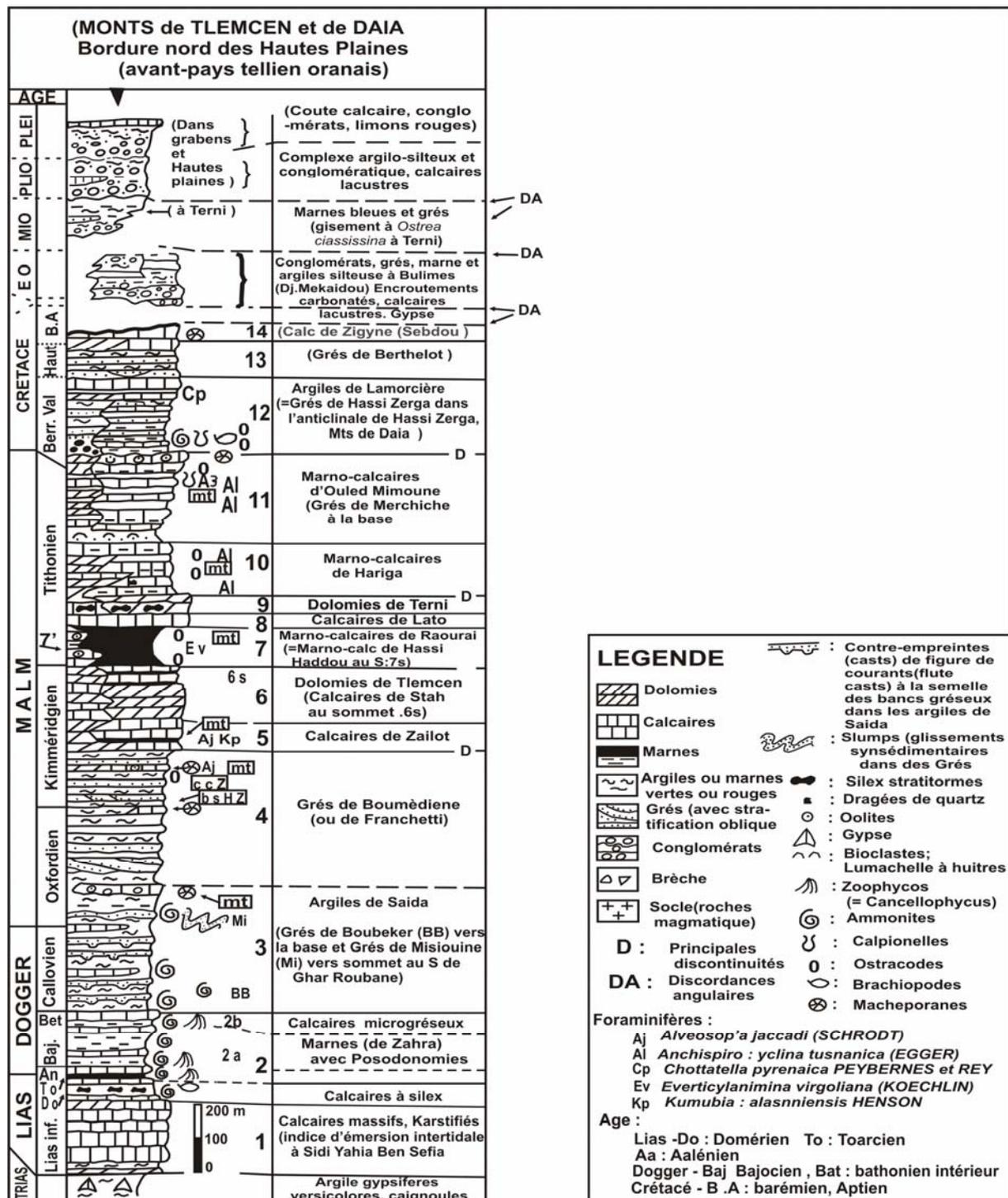


Fig.24 - Log lithostratigraphie synthétique des monts de Tlemcen

(Extrait de Benest et al, 1999).

3.2.4. Les Calcaire de Lato :

Ce sont des micrites (50 m en moyenne), parfois dolomitisées riches en Faveina.

Les bancs terminaux sont constitués de laminites stromatolitiques sombres, d'origine intertidale, marquées par la fréquence des figures de dessiccation (Benest, 1985).

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

3.2.5. Les Dolomies de Terni (Tithonien inférieur) :

Il s'agit de dolomies massives (50 m en moyenne), bien exposées sur le plateau de Terni (Doumergue, 1910) ou elles débutent par des niveaux à silex stratiformes. Cette formation, qui peut être partiellement calcaire, montre souvent des stratifications obliques et entrecroisées (accumulations d'oolites ou de Favreina), ainsi que des passées de laminites stromatolitiques.

3.3. La série tertiaire

3.3.1. Le miocène marin

L'Oligocène n'est pas connu. En revanche, le Miocène marin, bien caractérisé, est très développé au pied nord des Monts de Tlemcen ou il est discordant sur les assises souvent carbonatées et très Karstifiées du Malm. La succession particulièrement épaisse dans le sillon subsident de Maghnia-Sidi Bel Abès (plus de 600 m sous la plaine de Hennaya, est composée essentiellement de marnes bleues ou vertes, à intercalations gréseuses, attribuées à l'Helvétien ou Tortonien, à quelque kilomètres au Sud, la dépression intramontagneuse de Terni (Graben déjà différencié ; voir plus loin la phase distensive de la tectogenèse tertiaire) ou se trouve conservé un témoin de marnes serravalliennes (Doumergue, 1910 in Benest 1985).

4. Tectonique :

Dès le début de l'époque miocène, et au cours de celle-ci, corrélativement à l'édification de l'arc alpin, des mouvements importants affectant la berbérie séparent définitivement deux zones : le Tell et les hautes plaines. Cette séparation se fait par l'intermédiaire de grandes failles, qu'on peut aisément suivre sur une très grande longueur, de la frontière marocaine au cœur de l'Oranie (Gevin, 1952).

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

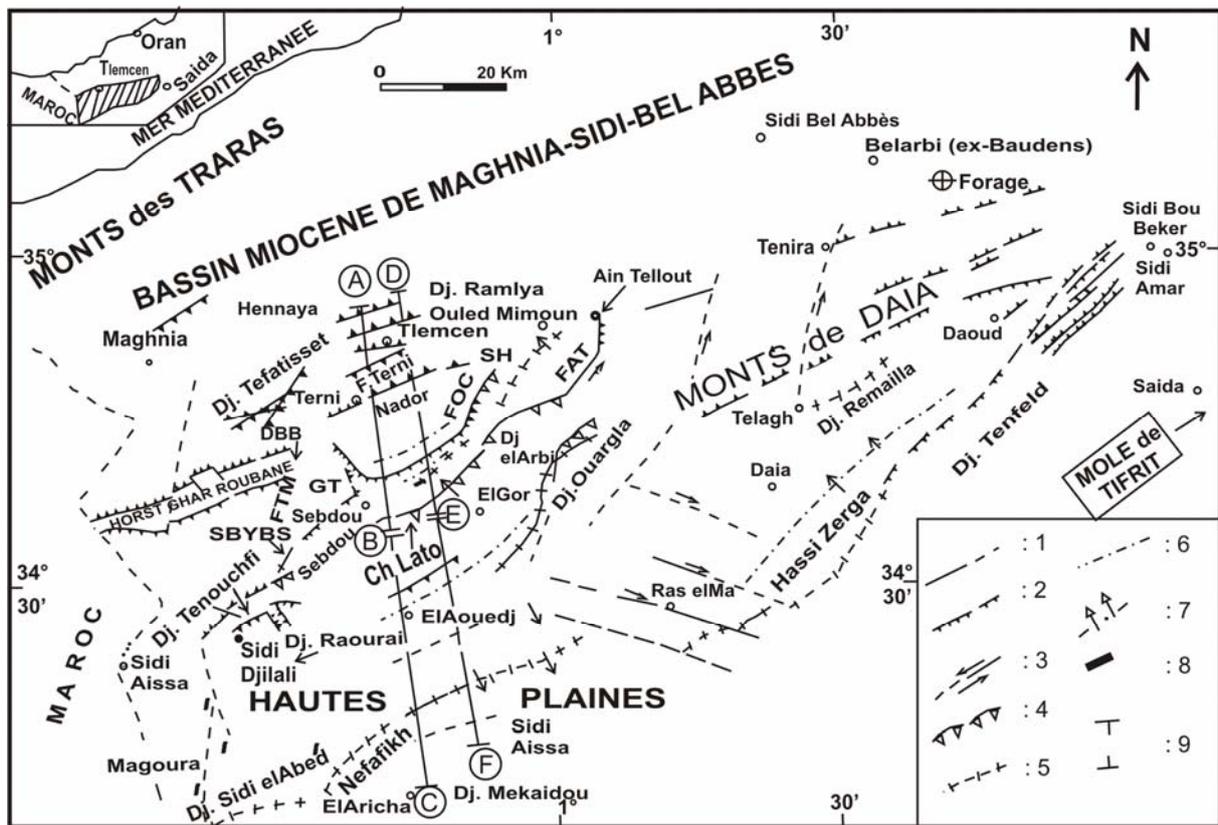


Fig.25 -Schéma structural de l'avant-pays tellien entre Saida et la frontière Algéro-Marocaine (Benest, 1985).

La zone d'étude se situe exactement à cheval sur ces deux zones. Elle est donc sillonnée par de très nombreuses failles.

Ce qui est devenu le haut pays jurassique n'est que très peu plissé. On observe tout au plus des flexions ou des mouvements de bascule liés aux accidents, très rarement des plis au sens propre du terme.

Les failles par contre sont extrêmement nombreuses, et de prime abord, rend la cartographie géologique laborieuse (Gevin, 1952).

Le complexe réseau qui coupe djebel Nador à la plaine d'hennaya , entraîne un rejet supérieur à 1000 m , surélevant aussi le cause jurassique , est grossièrement orienté Est-Ouest (Gevin, 1952).

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

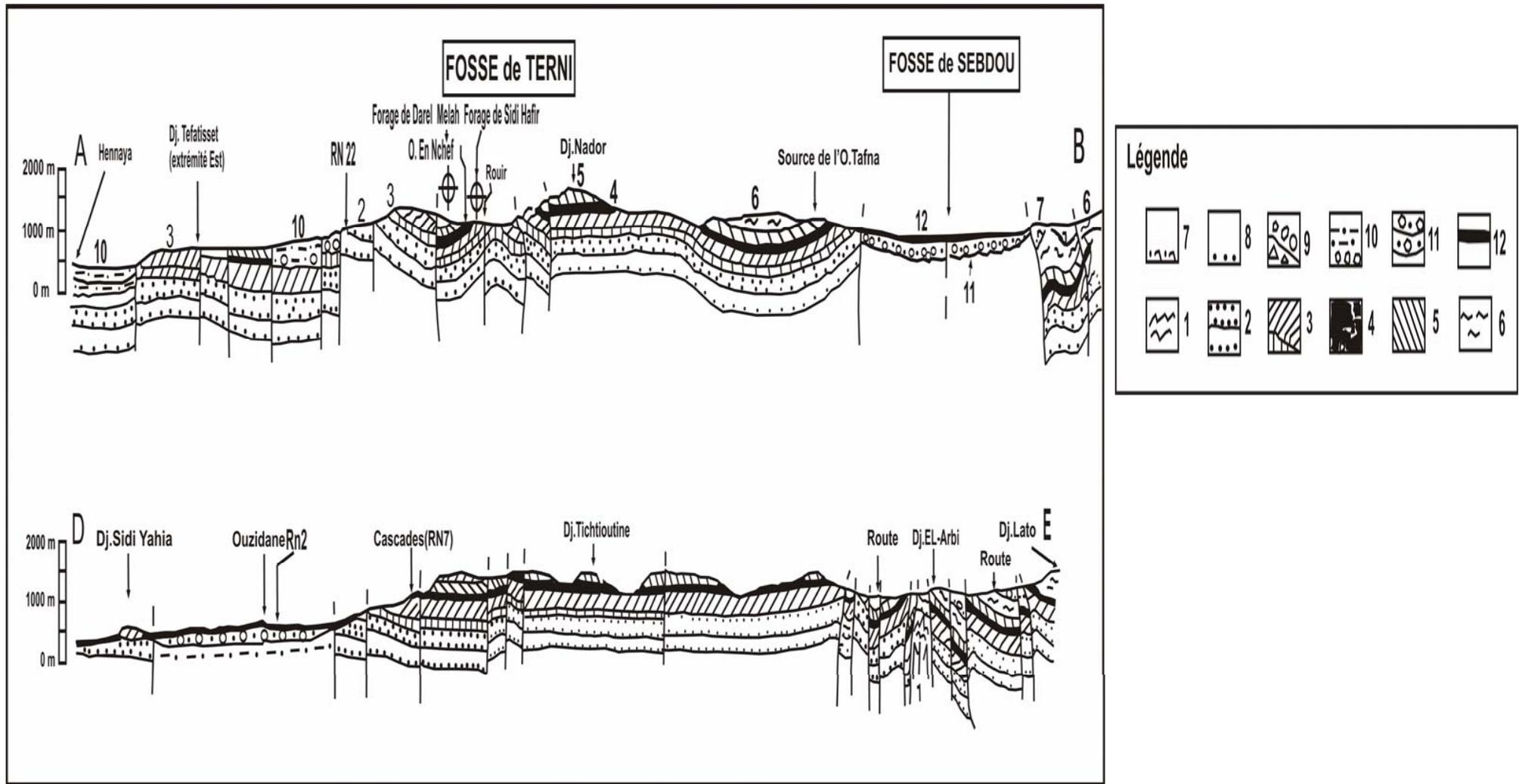


Fig.26 - Coupes structurale N-S à travers les monts de Tlemcen (Gevin, 1952).

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

Cependant, des compartimentages de direction variées (trois prédominantes) séparent des blocs indépendants, ayant joué " en escalier" ou " touches de piano.

La cuvette du Meffrouche est traversée de l'Est on allant vers l'Ouest par quatre grandes failles principales, mais de très nombreux autres accidents le sillonnent, comme en témoigne la carte géologique, qui est un véritable « puzzle » (Gevin, 1952).

L'effet de disharmonie structurale, peu accidentée étant donné l'absence de plissement, ne se manifeste que par les "pincements marneux" au contact des failles, phénomène jouant un grand rôle dans le compartimentage hydrogéologique. On peut noter en outre, la quasi-constance des « rebroussements de lèvres », ces dernières étant dans la grande majorité des cas homogènes (c'est-à-dire dans un sens correspondant à la position finale des compartiments en jeu).

III - Approche Hydrogéologique

1. Aperçu hydrogéologique du bassin versant du Meffrouche

Les deux grandes masses perméables : dolomie de Tlemcen et dolomie supérieure ‘de Terni’, constituent les principaux réservoirs aquifères. Cependant, les bancs calcaires du Kimméridgien moyen et ceux du Crétacé inférieur peuvent aussi donner naissance à des sources, mais ces dernières sont de très faible importance (Gevin, 1952).

Les grès de Séquanien ne drainent que très peu d’eau en eux-mêmes, mais grâce à des jeux de failles, il peuvent donner naissance à de belles sources qui sont en réalité alimentées par des impluvium dolomitiques ou calcaires, les grès ne jouant que le rôle « d’écran filtre »(cas d’Ain Fouara ».

Les eaux de dolomie inférieure exultent en principe au toit des grès séquaniens, sur les bancs marneux bruns, dans le bassin du Meffrouche, cette assise n’apparaît pas. Cependant un certain nombre de compartiments dolomitiques peuvent se trouver isolés par des failles, et avoir ainsi des sources autonomes. Tel est le cas, par exemple, de la source de Sidi Hafif qui est l’exutoire d’un bloc de dolomie inférieure d’environ 2.5 Km² de surface.

Le principal exutoire de la masse dolomitico-calcaire de Kimméridgien supérieur est l’Ain Meharas, dans le bassin de Meffrouche draine la quasi-totalité de cet ensemble, c’est la source de l’oued Meffrouche, celui-ci appelant Oued el Nechef en amont de cette dernière (Gevin, 1952).

Elle prend naissance dans la vallée même, un peu en amont du Cirque des cascades, à la cote 1090 m. Source de trop plein, elle possède donc une réserve souterraine intéressante du point de vue hydraulique.

Son exurgence est déterminée par un relèvement du mur imperméable (Marno-Calcaire du Kimméridgien), en relation avec la grande faille Nord du Meffrouche (F4), est par la présence d’une faille secondaire, orthogonale à cette dernière.

L’impluvium général du bassin de Oued El Meffrouche couvre 90 Km².

Nous appellerons ‘impluvium géologique’ de l’Ain Meharas, opposé à l’impluvium topographique du Meffrouche, la surface topographique qui recevant les eaux météoriques, restitue à la source les eaux infiltrées. Cette surface est nettement inférieure à l’impluvium topographique, et peut être évaluée à 50 Km².

Au point de vue hydrogéologique, nous soulignerons trois failles principales :

1° L’ain Meharas est une source de trop plein, et possède donc une réserve souterraine dont l’exploitation peut être envisagée.

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

2° Les failles jouent un grand rôle dans l'hydrogéologie de la région. Elles apparaissent la plus part du temps comme des écrans imperméables, non seulement par la grand fréquence des « pincements marneux », mais également parfois grâce aux recimentation des brèches de failles, ces dernières devaient plus imperméable que les roches elle-même (cas da la source de Sidi Bourkari).

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

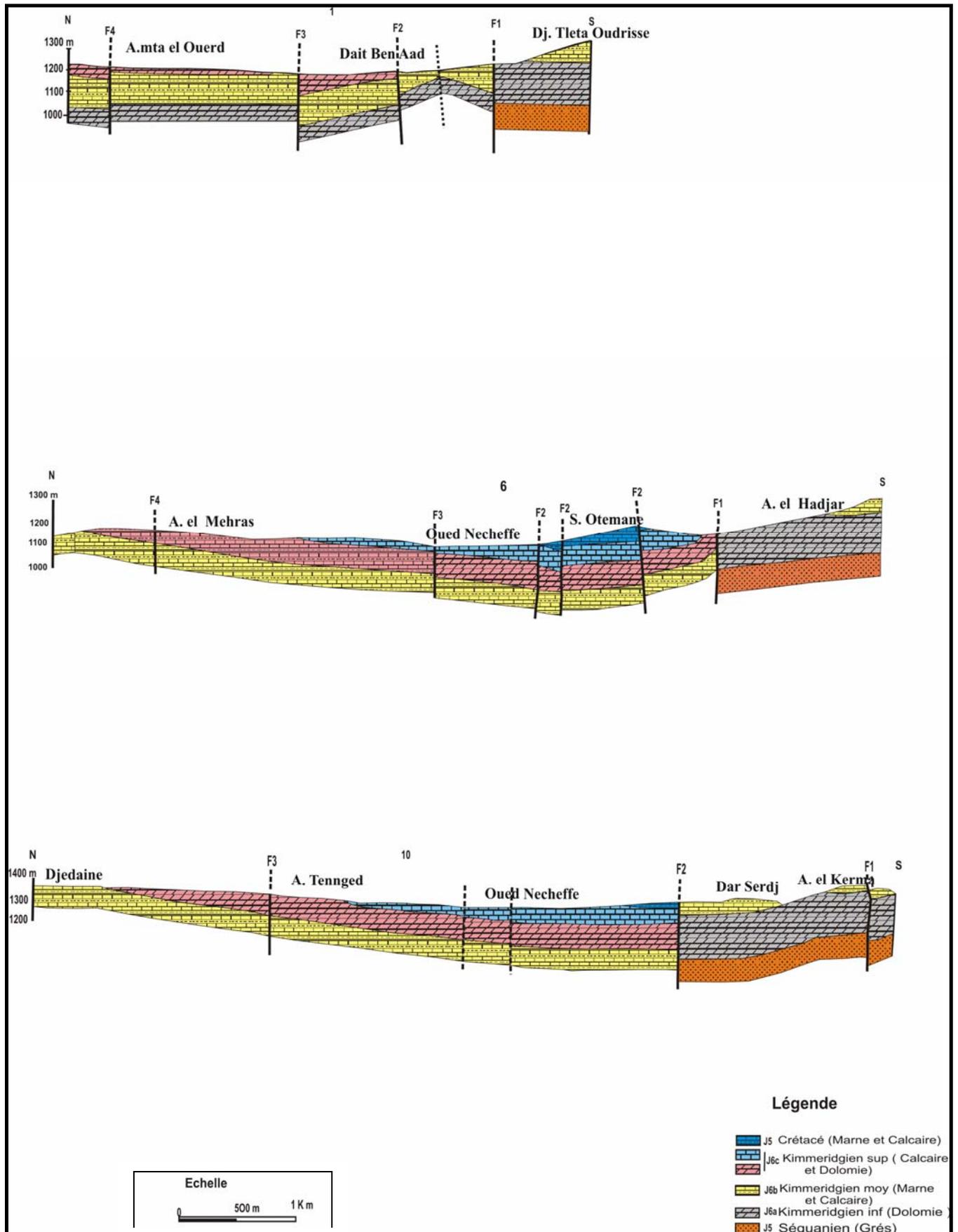


Fig .27- Coupes géologique a travers le bassin versant du Meffrouche (Gevin, 1952).

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

3° on peut schématiser la région du Meffrouche en considérant qu'elle se compose de deux gros ensembles perméables (dolomies et calcaires), séparées par des marno-calcaires imperméables.

Des essais de pompage dans la réserve dolomitico-calcaire de l'Ain Meharas ont montré, des rabattements d'une vingtaine de mètres furent opérés pendant les mois d'été dans des forages verticaux à gros diamètre (550mm), l'allure de la nappe étant surveillée à l'aide d'un réseau piézométrique. Les volumes d'eau pompés combinés au rabattement générale opéré et aux mesures de remontée, méttent en évidence qu'il allait très prudent quand la fissuration du Kimméridgien supérieure, tout au moins en dessous de la cote de l'Ain Meharas.

En effet, l'indice de vides mobilisables ainsi calculé était de l'ordre de 1 à 2 %.

Ces résultats, un peu surprennant de prime abord, sont à mettre en relation avec la continuité stratigraphique de la série jurassico-crétacé, et avec la position de la ligne de rivage miocène, qui n'entame pratiquement pas le bassin du Meffrouche (Gevin, 1952).

2. Les caractéristiques hydrogéologiques des formations :

A la lumière des connaissances acquises sur le contexte géologique du bassin versant de l'Oued el Meffrouche, il apparait que deux formations géologiques ont des propriétés aquifères (voir tableau 1).

Dans ce qui suit, elles sont passées en revue de la plus récente vers la plus ancienne en détaillant quelques propriétés hydrogéologiques :

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

Tableau 1- Description Lithostratigraphique et hydrogéologique des formations (Gevin, 1952).

Puissance	Etage	Facies	Fossiles	Perméabilité et type d'aquifère
70 à 80 m	Crétacé inférieure (Berriasien ?) Cⁱ	Calcaires jaune cristallins Marnes avec bancs calcaires Gris veinés de jaune. Lumachelles à petites ostracées	Gastéropodes. Lumachelles. Polypiers.	Faible dans l'ensemble
80 m 10 à 110 m	Kimméridgien Supérieur J^{6c}	Calcaires gris ou bleus avec minces Bancs dolomitiques. Dolomie à grains variable avec ilot Calcaires non dolomitisés Calcaires dolomitique roses.	Ostracées	Moyen Forte, Particulièrement dans la zone de battement des nappes aquifères. Aquifère fortement karstique
120 m à 130 m	Kimméridgien moyen J^{6b}	Marnes compactes, jaunes avec bancs Calcaires et marno-calcaires gris A faciès parfois sublithographique. Calcaire gris piquetés de rouge.	Lamellibranches Et gastéropodes	Très faible dans l'ensemble
180 à 20m	Kimméridgien inférieure J^{6a}	Dolomie de Tlemcen à patine rouge, grenues saccharoïdes, avec zones non consolidées sableuse. Calcaires bleus : restes de polypiers.		Forte sur tout dans les 30 première m, à partir de la surface du sol. C'est la corrosion interne de cet ensemble dolomitico-calcaire qui conséquemment a permis l'identification du grande chapeau du travertin de lalla-Seti. Aquifère karstique
300m	Séquanien J⁵	Grès avec banc marneux bruns. les Grès marneux avec lentilles faibles ou nulle. Lentille de calcaires.	Echinides dans calcaires.	Aquifère moyennement poreux, parfois fissuré

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

Les propriétés transmissives des dolomies de Tlemcen sont excellentes (Collignon, 1986). Les écoulements des eaux souterraines empruntent les directions des zones de drainage principales des points hauts vers les points bas. La morphologie et l'orientation des fissures jouent un rôle principal pour déterminer les principales caractéristiques de la circulation des eaux souterraines qui sont :

Les dolomies de Terni et les dolomies de Tlemcen (sens strict) sont irrégulièrement dolomitisées. Collignon dans sa thèse sur les monts de Tlemcen a fait remarquer que les dolomies de Tlemcen sont très perméables, elles possèdent une formation fissurée et très karstifiée en grande constitué avec les dolomies de Terni, dont elles forment l'aquifères le plus important du secteur d'étude, parfois mises en communication par des failles, (Collignon, 1986).

Ainsi que, il a constaté que les niveaux calcaires sont plus productifs que les niveaux dolomitiques en raison, en particulier de leur propriété de fissures et de chenaux.

Le tableau donne quelques valeurs de coefficients d'emménagement des dolomies de Tlemcen.

Le tableau 2 - Caractéristique hydrodynamique du membre calcareo-dolomitique (Gevin, 1952).

Massif étudié	Lithologie	Coef. Emmag.	Référence
Bassin du Meffrouche	Calcaire, dolomie	1% à 3%	Gevin (1952)

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

2.1. Sources

La structure hydrogéologique du secteur, favorise l'existence de nombreuses petites sources de faible débit (0.2 à 2 L/s). Il faut noter que certaines d'entre elles tarissent pendant la saison sèche. Nous en avons recensé plus d'une dizaine de sources (Bensaoula et al, 2004). Nous citons :

A l'ouest : A.Chmour, A.Rhannous, A.Tanbouali, A.Louha, A.Safsafa.

Au nord : A.Beida, A.El Hallalif, A.Tingad.

Au sud : A.Sidi Hafif, A.Haddad,

A l'est : A.ElHadjar, A.El Kerma.

3. Hydrochimie

L'étude des faciès hydrochimiques des eaux souterraines de la région, montre que celles-ci sont de manière générale, de faciès bicarbonatée magnésienne (voir les diagrammes en Annexe).

Ces résultats révèlent que les faciès rencontrés sont essentiellement contrôlés par la dissolution des carbonates, dus à la nature des roches rencontrées.

4. Le karst couvert

4.1. Caractérisation de la couverture

A travers le bassin versant du Meffrouche, nous avons pu observer des situations diverses où le karst se trouve couvert. Ces différentes situations sont les suivantes :

La couverture correspond à une mince couche de sol d'une épaisseur variant de quelques centimètres à 1 m, en moyenne, (épikarst).

La couverture dans certains endroits est nue, dans les deux aquifères karstiques (soit pour les dolomies de Terni et dolomies de Tlemcen).

La couverture correspond au membre calcaréo-dolomitique supérieur et aux marno-calcaires de Raourai. Ceci s'applique pour l'aquifère karstifié contenu dans les Dolomies de Tlemcen.

La couverture pour les dolomies karstifiées de Terni est constituée d'importantes couches de calcaire et de marnes d'épaisseur variable du crétacé.

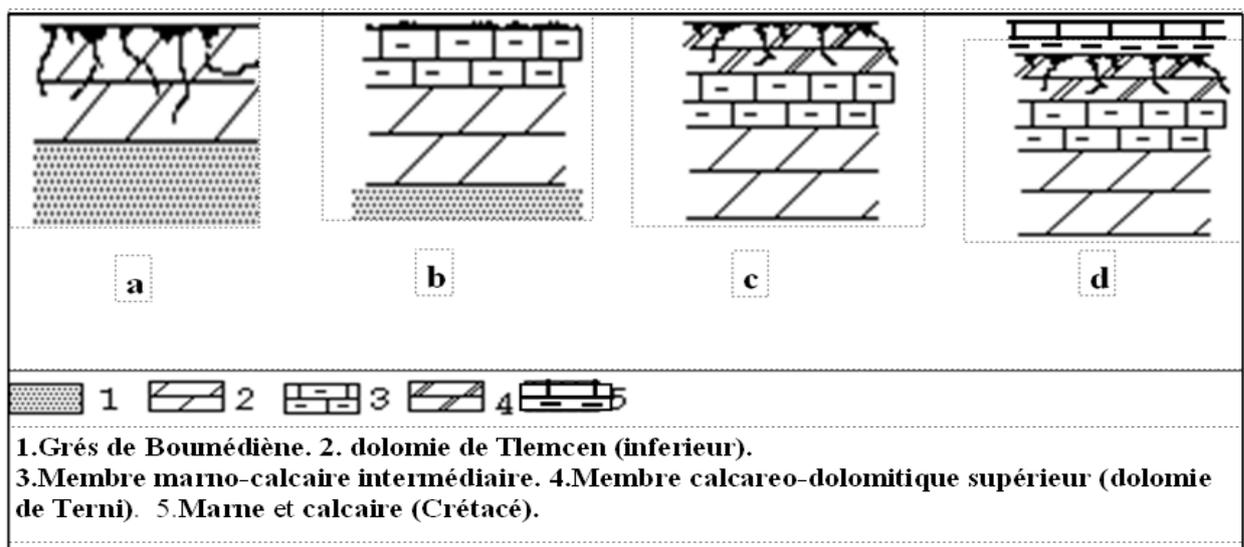


Fig.28- Caractérisation de la couverture du membre calcaréo-dolomitique (Bensaoula, 2006)

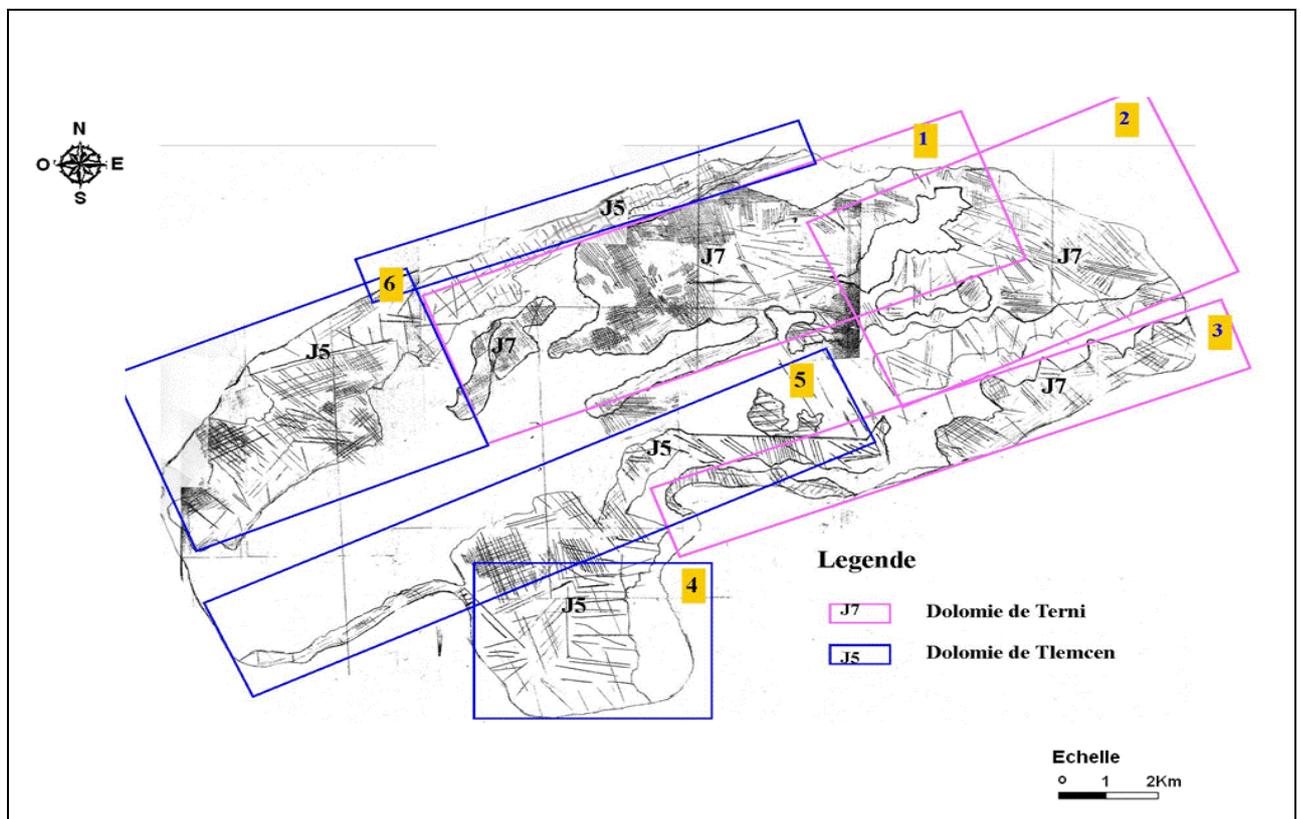
5. Etude de karstification

5.1. Fracturation et fissuration (linéaments)

Les monts de Tlemcen sont marqués par une structure de Horst et Graben d'orientation N50 à N70 (direction de la grande faille normale (Collignon, 1986)).

Le style tectonique détermine l'une des caractéristiques hydrogéologiques des monts de Tlemcen. La tectonique joue un rôle dans l'identification du karst (voir Figure 25).

Les complexes calcareo-dolmitiques qui ont permis le développement de la Karstification, on n'ignore pas que le phénomène de karstification est fortement lié à la fracturation. Cependant, le problème se pose de savoir si les directions de circulation des eaux souterraines sont déterminées ou non par les directions de fracturation.



**Fig.29- Zones de linéaments dans les membres dolomie de Tlemcen et de Terni
(Carte de linéaments établie sur la base des photos aériennes 1 : 20 000).**

Les formations calcareo-dolomitiques du Jurassique forment un karst qui par son aspect anisotrope fait que les propriétés transmissives des aquifères sont intimement lié à l'ensemble du réseau de fissuration (Adjim, 1992).

4.1.1. La macrofracturation

Nous présentons dans ce qui suit les résultats Obtenue par Gevin, 1952 :

La cuvette du Meffrouche est traversées d'Est en Ouest par quatre grandes failles principales (fig. 23), mais de très nombreux autre accidents le sillonnent , comme en témoigne la carte géologique.

4.1.2. La microfracturation :

L'étude a été abordée au niveau des formations carbonatées karstifiées : dolomie de Tlemcen et les dolomies supérieur "de Terni ", sur la base des photographies aériennes a l'échelle du 1/20.000. Le secteur a été subdivisé en six zones, dont les trois premiers sont partissent au affleurement du dolomie de Terni, et les autres au niveau des dolomie de Tlemcen, dans lesquelles les directions des linéaments se repartissent come suit (fig.30) :

a. Dolomie de Tlemcen.

- 1/ Zone 1 N060-N160 E
- 2/ Zone 2 N060-N150 E
- 3/ Zone 3 N060-N160 E

b. Dolomie de Terni

- 4/ Zone 4 N100-N170 E
- 5/ Zone 5 N070-N160 E
- 6/ Zone 6 N080-N150 E

4.2. Karstification

4.2.1. Exokarst

Au niveau du plateau de Terni, les sources apparaissent sur le long des Oued el Nechef (Ain Mahras), qui traversent les massifs au fond des vallées et au point bas des limites d'affleurement avec l'apparition d'innombrable formes exokarstiques, telle que les aven, parfois son connecter entre eux forment les dolines, au niveau de El Guechrid et N-W de Dar El Serdj, dans le Nord de la route Terni vers El Meffrouche, ainsi qu'au niveau des calcaires. Cependant dans les dolomies de Terni, on rencontre des lapiez de toutes dimensions qui pouvant aller jusqu'à une dizaine de mètres (Fig 31), ces lapiez sont, en particulier très abondants sur les reliefs de Halalif et au Nord de Zerdab et quelques formes de cavité au Nord Est du village El Meffrouche.

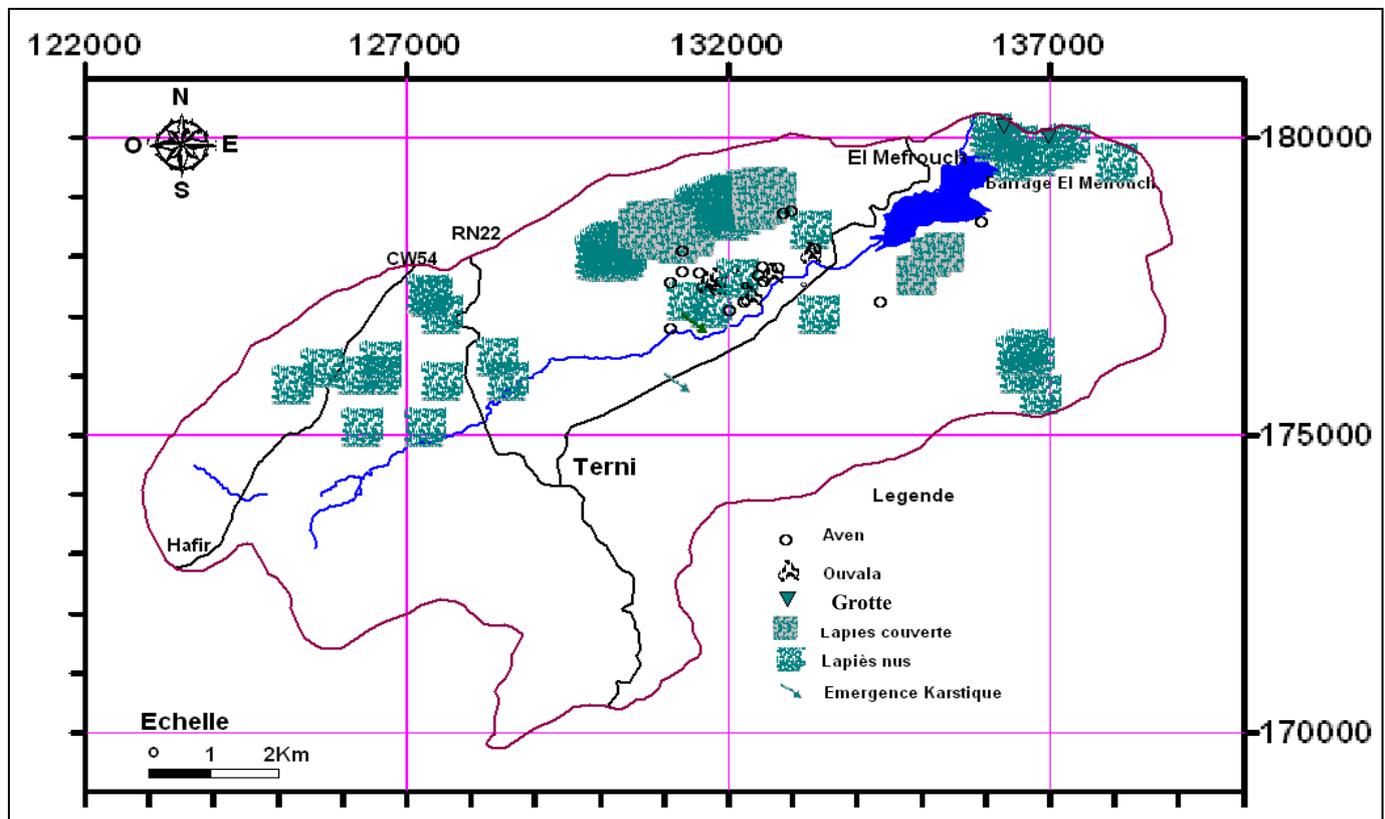


Fig 31- Formes exokarstique du bassin versant du Meffrouche.

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

4.2.2. Endokarst

Malgré le développement en surface des affleurements des roches carbonatées, il n'existe ou n'a pas été mis en évidence jusqu'à ce jour, de grottes ni de rivières souterraines dans le périmètre du secteur étudié. Nous rappelons cependant, que plus au Sud et à l'Est, dans les monts de Tlemcen, il existe des grottes dont celle d'Ain-Fezza et des rivières souterraines dont Ghar-Bou-Maaza et Ghar-El -Akhal; toutes se sont établies dans les niveaux calcaires (Collignon, 1986).

Pour l'étude de la karstification des Monts de Tlemcen, nous avons utilisé les données des forages qui ont été effectués à travers le bassin versant du Meffrouche, et qui ont été traversées les formations carbonatées karstifiées. Il s'agit des forages d'eau effectués par les services de l'hydraulique de la wilaya de Tlemcen et les services de l'ANRH (l'Agence nationale des ressources hydrauliques).

On a pu inventorier jusqu'à 5 forages réalisés à travers le bassin versant.

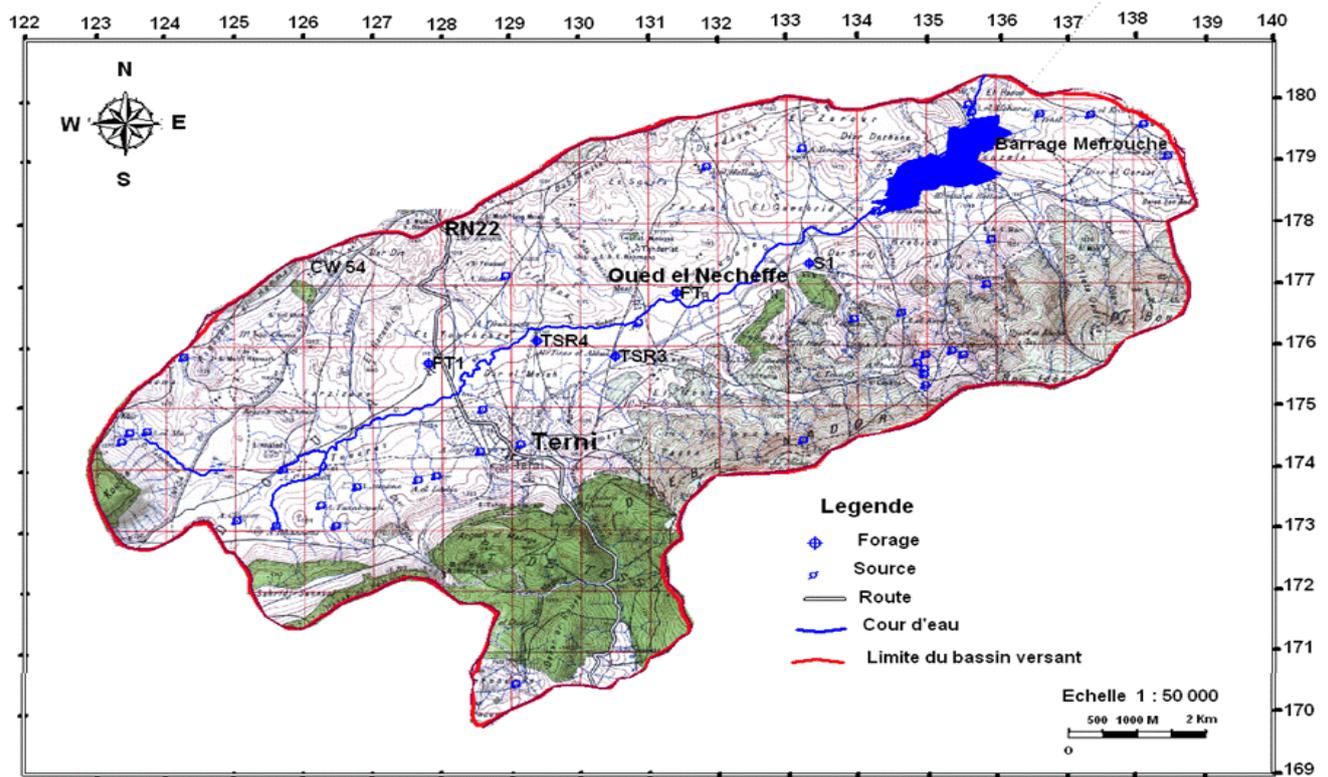


Fig. 32- Forage et sources du bassin versant.

Les cavités détectées par les chutes d'outils : sur les deux forages étudiés, ont recoupé des cavités suffisamment importantes pour engendrer des chutes libres d'outils, dont la plus importante est de 4 m (tableau 3), ainsi que, on note la présence de certaines fissurations et cavités dans les forage S1 et FT1(Fig.32), dans les formations des calcaires entre une profondeur varient entre 80m et 240 m ,

Chapitre II : Le bassin versant du Meffrouche

dont on n'a pas pu mesurer les dimensionnements de ces cavités (Bensaoula, 2006). Mais il a été confirmé par des pertes de boue au cours du forage. Cependant les pertes sont rencontrées lors des travaux de forage FT (Voire Annexes), dans la formation des dolomies sont variées entre une profondeur de 0 m à 80 m et dans les formations des calcaires entre une profondeur de 80 m à 240 m dans les forages S1 et FT1.

Tableau 3- Cavités détectées dans les forages par les chutes d'outils (C.O)
(Bensaoula, 2006).

Forage	Moyen de détection de la cavité	Cote des cavités par rapport à la surface	Longueur de la cavité (m)	Formation	Faciès de la formation
TSR3	C.O	26 à 36 (plusieurs)	0.45 à 4	Membre sup	Dolomie
TSR4	C.O	21 à 70 (plusieurs)	0.5 à 1	Membre inf	Dolomie

Conclusion

Par sa constitution géologique, le bassin versant du Meffrouche est très riche en potentialités en eau. En effet les formations carbonatées qui constituent les principaux réservoirs d'eau souterraines sont très karstifiées.

Le karst du plateau de Terni présente toutes les caractéristiques d'un karst évolué avec des cavités souterraines à maintes reprises mises en évidence par les travaux de forages. Les résultats que nous avons obtenus dans l'étude de la karstification (linéaments et chute d'outil au cours du forage), nous permettent de voir que les formes de karstification externe et interne sont présentes dans notre secteur d'étude.

Les deux grandes masses perméables : dolomie de Tlemcen et dolomie supérieure 'de Terni', constituent les principaux réservoirs aquifères. Cependant, les bancs calcaires du Kimméridgien moyen et ceux du Crétacé inférieur peuvent aussi donner naissance à des sources, mais ces dernières sont de très faible importance.

Par conséquent la karstification rend ces eaux particulièrement vulnérables à la pollution, C'est pourquoi les aquifères karstiques nécessitent une protection particulière.

CHAPITRE III

PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES ET LEGISLATION, EN ALGERIE

Introduction

L'eau est une denrée précieuse et indispensable à la vie. En Algérie, cette ressource est largement insuffisante en termes de quantité et qualité; sa préservation est donc primordiale.

A cet effet l'Algérie a depuis son indépendance adopté plusieurs politiques en établissant des textes législatifs réglementant aussi bien la mobilisation, la gestion et la protection des ressources en eau. De ces dernières, les eaux souterraines sont celles qui sont les plus délicates contrairement à ce que pense le grand public. La législation en Algérie concernant la protection des ressources en eau est assurée de manière exclusive ou conjointe par le code des eaux, les lois sur la protection de l'environnement et parfois sur la santé publique.

I- La protection des eaux souterraines

1. Principes

La législation sur la protection des eaux vise à protéger les eaux souterraines contre toute atteinte nuisible et à permettre leur exploitation durable dans le respect des équilibres écologiques. Comme les eaux souterraines sont menacées de tous côtés et qu'elles sont omniprésentes, il faut, autant que possible, respecter les objectifs écologiques qui s'y rapportent de manière générale (Muet, 2011). Il apparaît en outre nécessaire d'assurer leur protection en tenant compte de leur utilisation pour la production d'eau potable.

2. Les enjeux associés à la protection des eaux souterraines

La protection des eaux souterraines constitue, pour plusieurs raisons, une priorité de la politique environnementale de l'état :

- une fois contaminées, les eaux souterraines sont plus difficiles à 'nettoyer' que les eaux superficielles et les conséquences peuvent se prolonger pendant des décennies,
- puisque les eaux souterraines sont très utilisées pour l'alimentation en eau potable, pour l'industrie et pour l'agriculture, sa pollution peut être dangereuse pour la santé humaine et pour le bon déroulement des activités économiques,
- les eaux souterraines fournissent le débit de base de bon nombre de fleuves (elles peuvent représenter jusqu'à 90 % du débit de certains cours d'eau) et peuvent ainsi influencer la qualité des eaux de surface, elles servent de tampon dans les périodes de sécheresse et deviennent alors essentielles pour conserver les zones humides, (Marchal,2007).

3. Les pollutions de l'eau

Une eau est dite polluée lorsque sa qualité est dégradée. Plusieurs types de pollution existent provenant d'origines diverses (domestiques, agricoles, industrielles ou même naturelle).

3.1. La pollution chimique

Il s'agit de différentes substances dissoutes dans l'eau (notamment les nitrates, phosphates ou micropolluants), provenant des activités humaines. Les micropolluants sont des polluants susceptibles d'être toxiques à très faible concentration (de l'ordre du microgramme ou nanogramme par litre).

Chapitre III : Protection des eaux souterraines et législation

Ils sont essentiellement issus de l'utilisation de substances produites par l'industrie chimique. Ces substances sont présentes dans les cosmétiques, les médicaments, les peintures, les pesticides et dans bien d'autres produits de consommation, (Marchal, 2007).

3.2. La pollution microbiologique

Elle est liée aux micro-organismes, bactéries, virus et champignons pouvant se trouver dans l'eau. Ce type de pollution est fréquent et provient généralement d'une pollution par des matières fécales animales ou humaines, (Muet, 2011).

3.3. La pollution physique

Ce type de pollution peut modifier la transparence de l'eau (turbidité, en raison de matière en suspension) ou sa température.

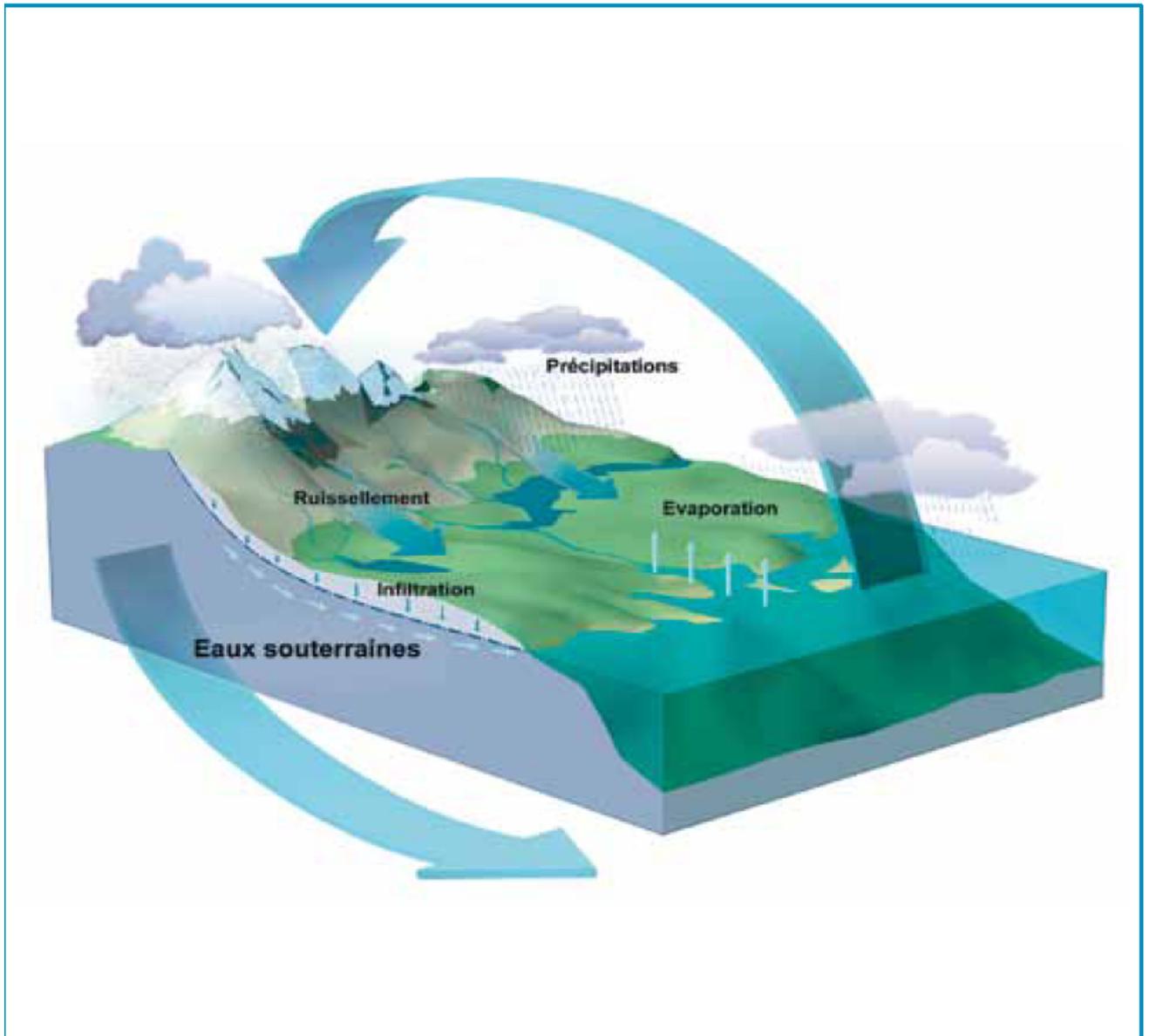


Fig.33- Cycle de l'eau, (OFEFP, 2004)

En pénétrant dans le sol, l'eau subit une filtration naturelle, car la couche supérieure du sol, l'humus, joue le rôle de protection contre les polluants en les retenant ou en les dégradant en partie. Ainsi, une grande majorité des eaux souterraines captées n'a pas besoin d'être traitée (une désinfection au chlore est suffisante).

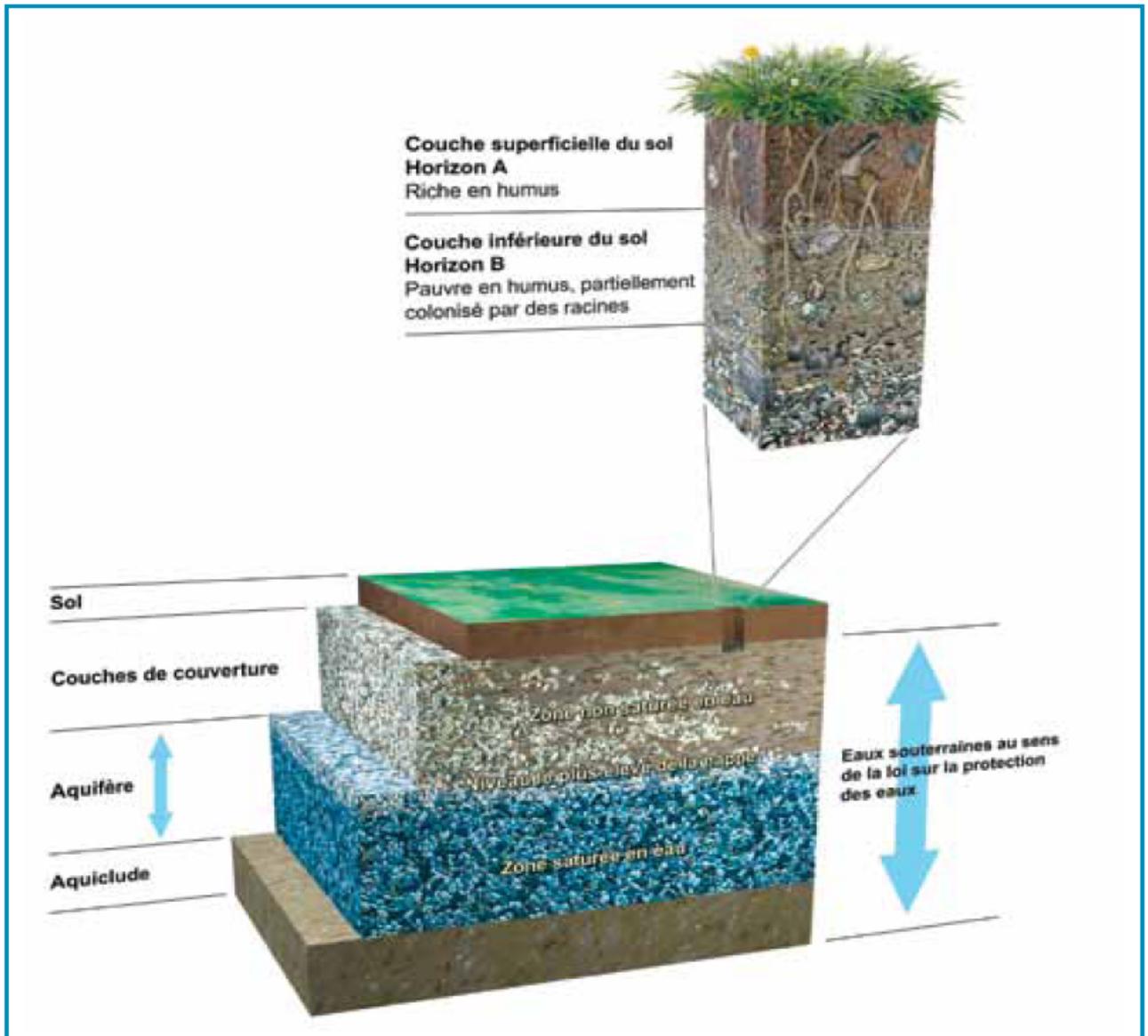


Fig.34- Profil du sol (OFEFP, 2004)

4. La protection de l'eau

Dans les pays Maghreb, l'eau potable provient à des eaux souterraines (sources et nappes phréatiques) en grande partie, est subit dans la plupart des cas uniquement une désinfection, contrairement à l'eau du lac ou du barrage, qui nécessite un traitement plus important. Des mesures de protection (normes, lois) ont été prises à partir de la fin des années 70, afin de protéger l'eau souterraine des risques causés par les activités humaines (industrie, agriculture, loisirs, ...) et garantir ainsi une eau de qualité, (El Bennoury, 2002).

Chapitre III : Protection des eaux souterraines et législation

4.1. Les risques courus par les eaux souterraines

La protection des eaux souterraines d'un point de vue qualitatif, de manière à garantir une offre suffisante en eaux de bonne qualité. Cette philosophie vise à préserver les eaux souterraines, dans un sens très large, c'est-à-dire en tenant compte de leur environnement géologique et hydrogéologique, de leur régime hydraulique et de leurs propriétés chimiques et biologiques (OFEFP (Office fédéral de l'environnement, des forêts et paysage, 2004).

Les objectifs à atteindre sont ainsi les suivants :

- Conservation des aquifères, des aquicludes et des couches de couverture, ainsi que du régime hydraulique des eaux souterraines ;
- Conservation de la qualité chimique naturelle des eaux souterraines;
- Conservation des biocénoses naturelles des eaux souterraines.

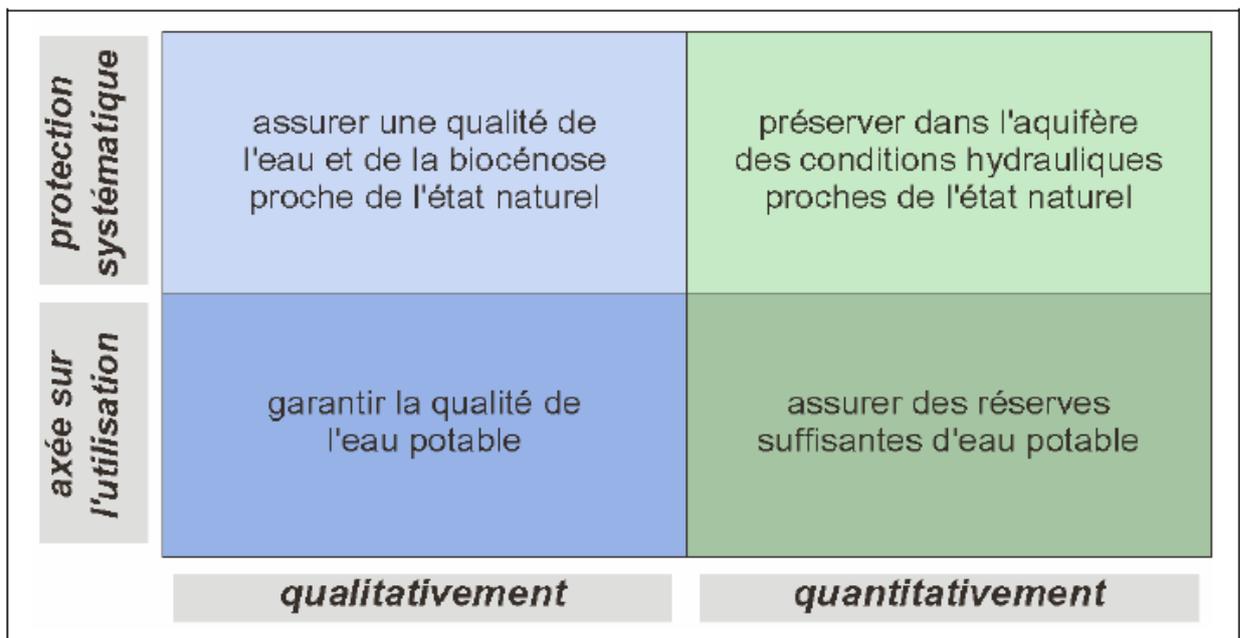


Fig.35- Objectifs de la protection des eaux souterraines (OFEFP, 2004).

4.1.1. Aspects qualitatifs

La qualité naturelle des eaux souterraines peut être modifiée ou au moins menacée par les activités humaines. En voici quelques exemples :

- Lessivage d'engrais (p. ex. nitrate) et de produits phytosanitaires (p. ex. herbicides) sur des surfaces agricoles, des jardins et des terrains de sport ;
- Épandage de purin, lors de fortes précipitations ou de gel, en dehors de la période

Chapitre III : Protection des eaux souterraines et législation

- de végétation ou, par exemple, en région karstique, à proximité de gouffres ou de dolines ;
- Infiltration dans le sous-sol des eaux de lixiviation de sites contaminés ;
- Pertes de collecteurs d'eaux usées, de fosses à purin et de réservoirs non étanches (bactéries et polluants) ;
- Entraînement de polluants atmosphériques dans le sous-sol (p.ex. solvants, nutriments, produits phytosanitaires, additifs de carburant) ;
- Accidents conduisant à des pertes de polluants dans le sous-sol.

Les polluants non ou difficilement dégradables (persistants) sont particulièrement dangereux pour les eaux souterraines, lorsqu'ils parviennent à traverser le sol et les couches de couverture (Marchal, 2007).

4.1.2. Aspects quantitatifs

Les eaux souterraines sont menacées au plan quantitatif, lorsque la capacité d'emmagasinement des aquifères et/ou leur section d'écoulement vient à être réduite et lorsque les niveaux piézométriques des nappes d'eaux souterraines sont rabattus de manière durable. De plus, l'augmentation de l'imperméabilisation des sols réduit l'alimentation des nappes d'eaux souterraines (Muet, 2011).

-Voici quelques exemples d'interventions propres à influencer le régime des eaux souterraines:

- Construction au-dessous du niveau des nappes d'eaux souterraines, notamment d'ouvrages souterrains drainants ;
- Urbanisation, avec imperméabilisation des terrains correspondants ;
- Surexploitation par suite de prélèvements dépassant à long terme l'alimentation naturelle des nappes d'eaux souterraines ;
- Extraction de sable ou de gravier, et comblement des excavations avec des matériaux inappropriés ;
- Drainage de zones agricoles, avec réduction de l'alimentation naturelle de nappes d'eaux souterraines ou rabattement durable de leur niveau piézométrique ;
- Compactage des sols par l'agriculture ;
- Etanchéification du lit de cours d'eau alimentant des nappes d'eaux souterraines par infiltration ;
- Prélèvement d'eau et de matériaux dans les cours d'eau, avec diminution du charriage, colmatage du lit et réduction des infiltrations d'eau dans le sous-sol.

4.2. Périmètres, secteurs et zones de protection des eaux souterraines

Pour une gestion efficace et durable des eaux souterraines, les départements (U.E), ont subdivisé leur territoire en périmètres, secteurs et zones de protection (OFEFP, 2004).

4.2.1. Périmètres

Les départements délimitent les périmètres de protection des eaux souterraines afin de protéger les eaux souterraines pour une utilisation future (exploitation ou alimentation artificielle).

4.2.2. Secteurs

Les secteurs de protection des eaux souterraines regroupent les secteurs particulièrement menacés: le secteur d'eau exploitable Au et l'aire d'alimentation Zu.

4.2.3. Zones de protection

Les zones de protection des eaux souterraines visent à protéger les eaux alimentant les captages d'intérêt public contre les risques de pollution. Ces zones sont subdivisées en trois catégories: S1, S2 et S3. Le règlement d'application des zones de protection régit les mesures et les restrictions d'utilisation du sol pour les différentes zones S 3.

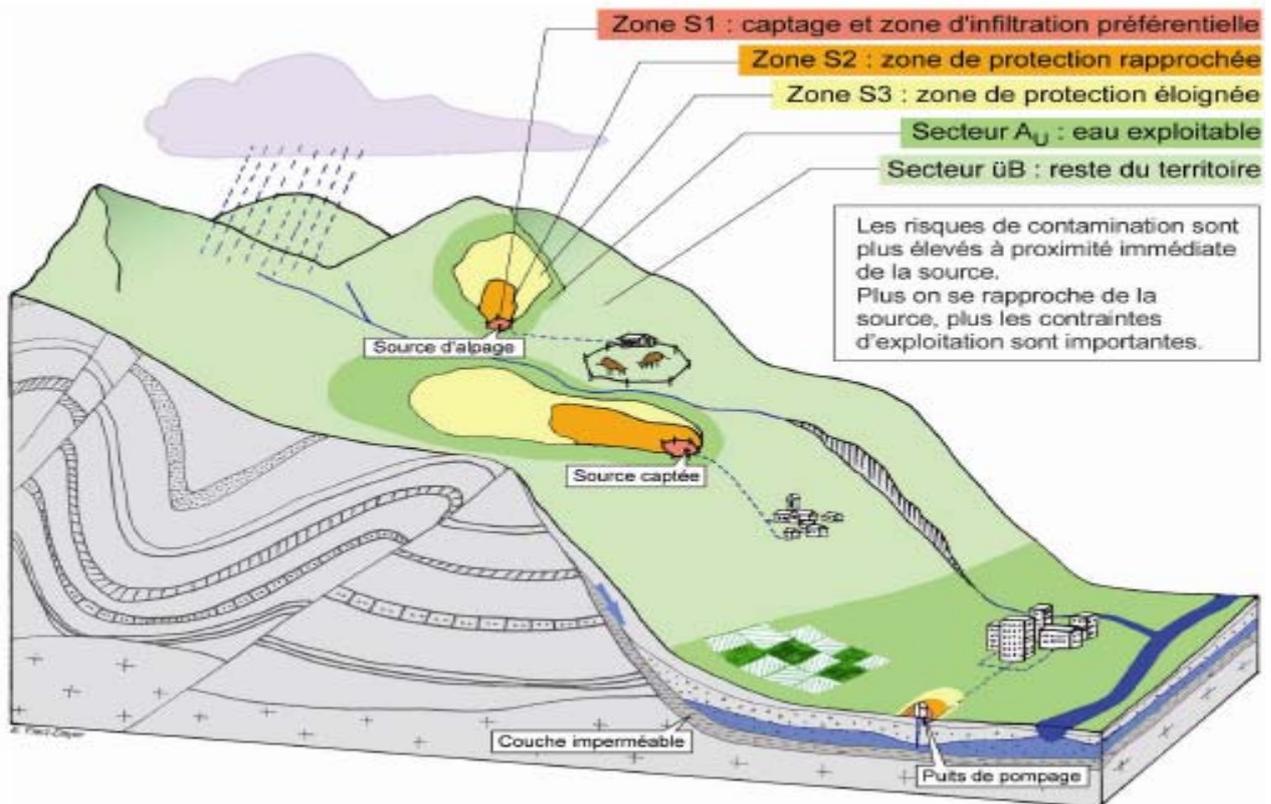


Fig.36- Schéma illustrant les différents zones de protection de l'aquifère (OFEFP, 2004)

a. Zone de captage (zone S1) :

Elle comprend le captage lui-même et les terrains directement environnants.

Elle devrait appartenir au détenteur du captage et être clôturée. Elle doit empêcher:

- La pénétration directe de polluants dans le captage;
- La dégradation ou la destruction des installations.

En milieu karstique ou dans les roches fissurées, les parties les plus vulnérables du bassin d'alimentation sont également classées en zone S1.

b. Zone de protection rapprochée (zone S2) :

Elle a la fonction d'une zone tampon entre la zone S1 et la zone S3. Elle est délimitée de telle sorte que l'eau souterraine mette au moins dix jours pour la traverser. Elle doit empêcher :

- L'arrivée au captage de germes et de virus pathogènes, ainsi que de liquides pouvant polluer les eaux, comme l'essence ou le mazout;
- La pollution des eaux souterraines par suite de l'exécution de fouilles ou de travaux, ainsi que l'affaiblissement de la capacité de filtration naturelle du sol et du sous-sol;
- L'arrivée au captage de polluants en fortes concentrations;
- La création de barrages souterrains modifiant les écoulements.

c. Zone de protection éloignée (zone S3) :

Elle a la fonction d'une zone tampon entre la zone S2 et le secteur Au. Elle est délimitée de telle sorte que l'eau souterraine mette au moins vingt jours pour arriver jusqu'au captage. Elle constitue une protection contre les installations et activités qui présentent un risque important pour les eaux souterraines.

En cas de danger critique (p. ex. en cas d'accident impliquant des marchandises dangereuses), elle permet de disposer de suffisamment d'espace et de temps pour intervenir et pour prendre les mesures d'assainissement nécessaires.

d. Un périmètre de protection : des eaux souterraines peut être délimité autour de sources non captées présentant un intérêt pour l'approvisionnement futur. L'utilisation du sol et les autres activités exécutées dans ce périmètre doivent satisfaire à la quasi-totalité des exigences fixées pour la zone de protection rapprochée (zone S2).

Chapitre III : Protection des eaux souterraines et législation

e. L'aire d'alimentation Zu (non mentionnée dans la figure) : est précisée lorsque les zones de protection ne suffisent pas à garantir la qualité des eaux prélevées par un captage. L'aire d'alimentation Zu couvre la zone où se forme environ 90% des eaux du sous-sol parvenant au captage considéré et fait l'objet de mesures de protection et d'assainissement spécifiques.

f. L'aire d'alimentation Zo (non mentionnée dans la figure) : est destinée à protéger la qualité des eaux superficielles qui ont une utilisation particulière. Elle couvre le bassin d'alimentation duquel provient la majeure partie de la pollution des eaux superficielles.

g. Le secteur Au : de protection des eaux s'étend à l'ensemble des eaux souterraines potentiellement exploitables pour l'approvisionnement en eau potable et englobe les zones attenantes nécessaires à leur protection.

h. Le secteur üB : de protection des eaux englobe le reste du territoire. La législation sur la protection des eaux concerne aussi ce secteur puisque toutes les dispositions de protection générale – notamment le principe de diligence et l'interdiction de polluer les eaux – doivent y être appliquées.

II- Inventaire des textes législatifs concernant la protection des eaux souterraines :

L'Algérie a adopté plusieurs textes législatifs qui ont permis d'organiser le secteur de l'eau. Nous citons dans ce qui suit les principaux textes :

- La loi n° 83-17 du 16 Juillet 1983 portant code des eaux (J.O.R.A. N°30, 1983).
- Le décret n° 84-05 du 2 Janvier 1984 relatif à la mise en œuvre de l'article 143 de la loi n° 83-17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux. (J.O.R.A. 23eme année n°1, 1984).
- L'ordonnance n°96-13 du 28 Moharram 1417 correspondant au 15 juin 1996 modifiant et complétant la loi n°83-17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux (J.O.R.A. N° 37, 1996).
- Le décret exécutif n°98-348 du 17 Rajab 1419 correspondant au 7 novembre 1998 fixant les conditions et modalités d'application de l'article 143 de la loi n°83-17 du 16 juillet 1983, modifié et complété, portant code des eaux. (J.O.R.A. N°83, 1998).
- La loi n° 03/10 du 19 Joumada el Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre de développement durable. (J.O.R.A. N° 43, 2003).
- La loi n°05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau. (J.O.R.A. N° 60, 2005).
- Le décret exécutif n° 07-399 du 14 Dhou Elhidja 1428 correspondant au 23 décembre 2007 relatif au périmètre de protection qualitative des ressources en eau. (J.O.R.A. N° 80, 2007).
- L'ordonnance n° 09-02 du 29 Rajab 1430 correspondant au 22 juillet 2009 modifiant et complétant la loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau. (J.O.R.A. N° 44, 2009).
- Le décret exécutif n° 10-73 du 21 Safer 1431 correspondant au 06 février 2010 relatif à la protection quantitative des nappes aquifères. (J.O.R.A. N° 11, 2010).

1. Le Concept de base de protection des eaux souterraines en Algérie:

Les méthodes appliquées pour la mise en évidence des zones sensibles à la pollution et par conséquent le dimensionnement des zones de protection sont basées sur certains critères qui peuvent influencer sur la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine, dont les plus importants (Derni, 2011) :

- Le type de la nappe.
- L'épaisseur de la zone non saturée.
- La nature géologique de la roche réservoir et son pouvoir filtrant.

Chapitre III : Protection des eaux souterraines et législation

- La vitesse d'écoulement des eaux souterraines.
- La nature géologique et l'épaisseur des couches de couverture.

L'Algérie a adopté plusieurs politiques concernant la protection des ressources en eau souterraine. Généralement elles sont matérialisées par le code des eaux mais aussi par le code de la protection de l'environnement et le code de la santé publique.

2. Synthèse des textes législatifs concernant la protection des ressources en eaux souterraines en Algérie :

En résumé, il en ressort que quatre principaux textes législatifs concernant le secteur de l'eau en Algérie, prévoient la protection des ressources en eau :

- Loi n° 83-17 du 16 Juillet 1983 portant code des eaux
- Loi n°05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative l'eau.
- Décret exécutif n° 07-399 du 14 Dhou Elhidja 1428 correspondant au 23 décembre 2007 relatif au périmètre de protection qualitative des ressources en eau.
- Décret exécutif n° 10-73 du 21 Safer 1431 correspondant au 06 février 2010 relatif a la protection quantitative des nappes aquifères.

2.1. La loi n° 83 -17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux

Elle a abordé la protection des eaux souterraines à travers les articles 109 jusqu'à l'article 124. La protection des ressources en eau est assurée par des périmètres de protections qualitatives et quantitatives. Elle a défini le périmètre de protection comme un contour délimitant un domaine géographique dans lequel sont interdites ou réglementées toutes les activités à l'intérieur des périmètres de protection qui peuvent polluer les ressources en eaux souterraines concernant notamment :

- L'exécution des puits et forages.
- L'exploitation des carrières.
- L'installation de canalisation, réservoirs et dépôts d'hydrocarbure.
- L'installation de canalisations des eaux usées de toutes natures.
- L'établissement de toutes constructions.
- L'épandage de fumier, engrais et tous produits destinés à la fertilisation des sols et à la protection des cultures.
- Les dépôts d'ordures, immondices, détritiques radio-actifs, d'une manière générale, tout produit et matière susceptibles d'altérer la qualité de l'eau.

Chapitre III : Protection des eaux souterraines et législation

La protection des ressources en eau souterraine doit faire l'objet aussi bien d'une protection qualitative de tous les captages de sources, puits ou forages ainsi que toutes les parties vulnérables des nappes souterraines que d'une protection quantitative des nappes surexploitées ou menacées de l'être, à l'intérieur desquelles sont :

-Interdites toutes réalisations de travaux de fonçage de puits ou forages ou toute modification des installations existantes destinées à augmenter les débits prélevés.

-Soumis à autorisation, les travaux de remplacement de réaménagement des installations hydrauliques existantes, sans augmentation des volumes d'eau prélevés.

2.2. La loi n° 05-12 du 4 août 2005 relatifs à l'eau

Elle a pour objet de fixer les principes et les règles applicables pour l'utilisation, la gestion et le développement durable des ressources en eau en tant que bien de la collectivité nationale (J.O.R.A. N° 60, 2005).

Les articles 38 à 52 ont adopté la protection des ressources en eau souterraines soit qualitative ou quantitative. Il est établi autour des ouvrages et installations de mobilisation, de traitement et de stockage d'eau souterraine ou superficielle ainsi que de certaines parties vulnérables des nappes aquifères et des oueds, une zone de protection qualitative. La loi a déterminé les règlements et les interdictions de toutes activités à l'intérieur de cette zone, telles que :

Le déversement ou rejet d'eaux usées de toute nature dans les ouvrages de captages des eaux souterraines.

Le dépôt ou enfouissement de matières insalubres susceptibles de polluer les eaux souterraines.

L'introduction de toutes matières insalubres dans les ouvrages de captage des eaux souterraines.

Le dépôt ou l'enfouissement de cadavres d'animaux dans les oueds, lacs, étangs et à proximité des ouvrages de captages des eaux souterraines (Derni, 2011).

Aussi, tout établissement et toute unité industrielle dont les rejets sont reconnus polluants doit impérativement :

Prévoir des installations d'épuration appropriées.

Mettre en conformité leurs installations ou les procédés de traitement de leurs eaux résiduaires par rapport aux normes de rejet telles que fixées par voie réglementaire.

2.3. Le décret exécutif n° 07- 399 du 23 décembre 2007

Il est relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eaux. Il a pour objet de fixer les conditions et les modalités de création et de délimitation des périmètres de

protection qualitative des ressources en eau, la nomenclature des périmètres de protection ainsi que les mesures de réglementation d'activités dans chaque périmètre de protection qualitative. La protection qualitative des ressources en eaux des eaux souterraines est assurée par :

- Le périmètre de protection immédiate.
- Le périmètre de protection rapprochée.
- Le périmètre de protection éloignée.

2.3.1. Le périmètre de protection immédiate :

Ce périmètre a la fonction d'empêcher la détérioration des ouvrages de captages de prélèvement et d'éviter le déversement ou les infiltrations de substances polluantes à l'intérieur ou à une proximité immédiate d'ouvrage de captage. Son étendue est constituée par les terrains d'emprise des ouvrages et installations de mobilisation de traitement et de stockage de l'eau (J.O.R.A. N° 80, 2007).

2.3.2. Le périmètre de protection rapprochée :

A pour but d'empêcher la dégradation de la qualité de l'eau par migration souterraine ou superficielle de substances dangereuses toxiques ou indésirables. s'étend depuis la limite du premier périmètre de protection jusqu'à une distance déterminée sur la base du temps de migration souterraine ou superficielle des substances dangereuses, toxiques ou indésirables. Son étendue est déterminée par le temps de migration entre le lieu d'émission de la pollution et le point de prélèvement de la ressource en eau. Pour les eaux souterraines c'est la zone d'appel (J.O.R.A. N° 80, 2007).

2.3.3. Le périmètre de protection éloignée :

Qui a pour but de prolonger le périmètre de protection rapprochée pour renforcer la protection contre les risques de pollution chronique, diffuse ou accidentelle. Il s'étend depuis la limite de la zone 2 jusqu'à la limite du bassin versant pour les ressources superficielles ou du bassin d'alimentation pour les ressources en eaux souterraines (J.O.R.A. N° 80, 2007).

Le décret exécutif n° 07-399 a fixé les conditions et les modalités de création et de délimitation des périmètres de protection en deux sections :

- Les champs d'application
- La procédure d'instauration des périmètres de protection qualitative.

Autour des parties vulnérables des nappes d'eau souterraine ou des oueds, la protection est assurée

Chapitre III : Protection des eaux souterraines et législation

exclusivement par l'établissement d'un périmètre de protection rapprochée ou d'un périmètre de protection éloignée.

Le décret exécutif a exigé une étude technique pour délimiter les périmètres de protection qualitative autour :

- Des ouvrages et l'installation de mobilisation des eaux souterraines ainsi que de certaines parties vulnérables de nappes d'eaux souterraines.
- Des ouvrages et installation de mobilisation des eaux superficielles ainsi que de certaines parties *vulnérables d'oueds.
- Des stations de traitement d'eau, des usines de dessalement d'eau de mer, des stations de déminéralisation d'eau saumâtre ainsi que des réservoirs de stockages d'eau.

2.4. Le décret exécutif n° 10-73 du 6 février 2010

Ce décret a pour objet de fixer les modalités de délimitation de périmètre de protection quantitative des nappes aquifères ainsi que les conditions spécifiques d'utilisation de leurs ressources en eau.

L'objet d'un dispositif de protection quantitative est d'assurer la préservation des ressources soit par des prélèvements d'eau raisonnables par rapport à la capacité renouvelable de l'aquifère soit par l'évitement de la surexploitation de la nappe aquifère.

Conclusion

- Vue dans la perspective d'une exploitation future, la protection des eaux souterraines passe par la délimitation des secteurs particulièrement menacés, (y compris les aires d'alimentation).

Ces mesures d'organisation du territoire sont assorties de restrictions graduelles des mesures de protection et des droits d'utilisation. Lorsque les eaux souterraines sont exploitées pour la production d'eau potable ou qu'elles sont destinées à cet usage, leur qualité doit satisfaire aux exigences fixées dans la législation sur les denrées alimentaires.

Par contre, si l'autorité constate que les eaux souterraines sont polluées, elle doit :

- Déterminer et évaluer la nature et l'ampleur de la pollution;
- En déterminer les causes;
- Apprécier l'efficacité des mesures possibles;
- Veiller à ce que les mesures nécessaires soient prises en vertu des prescriptions légales correspondantes.

Cependant, la réglementation de l'eau en Algérie a connu une évolution positive depuis l'indépendance jusqu'au moment actuel. Les différentes lois et décrets établis que nous avons cités plus haut ont tracé les grandes lignes de la protection des ressources en eau sans pour autant donner des précisions sur les méthode(s) de cartographie de la vulnérabilité, aussi que, la détermination des périmètre de protection dans les milieux karstiques (restrictions graduelles des zones de protection), ainsi que l'application de ces législation reste loin d'être strictement.

En fin, la législation concernant la protection des eaux souterraines a pour objet la mise en disponibilité d'une eau propre et potable pour le citoyen. Mais elle reste insuffisante sans l'utilisation des outils nouveaux qui permettraient d'assurer une meilleure protection contre la pollution. Dont la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines reste l'un de ces outils.

CHAPITRE IV

VULNERABILITE A LA POLLUTION

Introduction

Le domaine karstique est particulièrement étendu sur le bassin Méditerranéen. La ressource en eau que renferment ces aquifères est considérable, mais difficile à cerner ; leur exploitation est certainement très modeste en regard des volumes en jeu, du fait essentiellement d'un manque de connaissance, de certaines difficultés d'exploitation et de gestion et de leur particulière sensibilité à la pollution. Cette sensibilité doit cependant être relativisée, car ces aquifères présentent l'avantage de se renouveler très rapidement.

Cette ressource est souvent dans certaines régions l'unique recours possible pour l'alimentation en eau des populations. Son intérêt se trouve renforcé du fait de l'augmentation générale des besoins en eau. Toutefois, l'occupation croissante des zones karstiques, conjuguée à leur vulnérabilité, impose la mise en place de politiques de protection adaptées, (Pranville et al, 2007).

L'eau souterraine est considérée comme polluée lorsqu'elle contient des substances autres que celles liées à la structure naturelle des terrains où elle a séjourné et en particulier, lorsque les concentrations des constituants dissous ou en suspension dépassent les concentrations maximales admissibles fixées par les standards nationaux et internationaux.

I-Vulnérabilité à la pollution

1. Concept de la vulnérabilité

1.1. Origine de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur un modèle « origine-écoulements-cible ». Dans le cadre de la cartographie de la vulnérabilité, on suppose que la contamination prend place au niveau de la surface (abstraction faite de fuites de réseau d'assainissement enterré par ex.) : c'est l'origine (Zwahlen, 2004). Le terme écoulements correspond au trajet du contaminant de son point d'origine à travers le système (zone non saturée et/ ou zone saturée jusqu'au point d'eau) jusqu'à la cible à protéger. La cible est quant à elle l'eau souterraine qui fait l'objet d'une protection: pour la protection de la ressource, il s'agit de la surface des eaux souterraines (interface entre la zone non saturée et la zone saturée) et pour la protection d'une source, il s'agit du captage d'eau (forage, exutoire) (COST 620).

1.2. Concept de la vulnérabilité

« La vulnérabilité à la contamination est définie comme étant la protection naturelle contre la contamination ».

Le concept est basé sur l'hypothèse suivante : l'environnement physique fournit une protection naturelle des eaux souterraines vis-à-vis des impacts anthropiques, essentiellement les contaminants pouvant pénétrer l'environnement souterrain (Dörfliger et al, 2004, In Vrba & Zaporozec, 1994).

La vulnérabilité est une propriété relative, non mesurable et sans dimension. Il faut distinguer la vulnérabilité intrinsèque (naturelle) de la vulnérabilité spécifique, La première ne dépend que des propriétés naturelles du milieu, alors que la seconde intègre en plus les propriétés mêmes du contaminant (Bakalowicz, 1999).

La vulnérabilité a été définie dans le cadre de l'action européenne COST 620 (COST ACTION 620, 2003) – Vulnerability and Risk mapping for the Protection of Carbonate (karst) aquifère :

1.2.1. La vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines aux contaminants prend en considération les caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu (Albinet et Margat, 1975), mais est indépendante de la nature des contaminants et des scénarios de contamination.

1.2.2. La vulnérabilité spécifique considère les propriétés d'un contaminant en particulier ou d'un groupe de contaminants en plus de la vulnérabilité intrinsèque du milieu.

La caractérisation de la vulnérabilité est une approche qualitative et non quantitative ; cette dernière correspondrait à modéliser l'aquifère karstique. L'inconvénient d'utiliser une approche qualitative est le suivant : une propriété non précisément définie, ne peut être déduite sans ambiguïté de

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

quantité mesurée. La question de la validation reste problématique (Dörfliger et al, 2004) .

1. 3. Critères de vulnérabilité

Plusieurs facteurs agissent sur la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine, ces facteurs sont présents dans le sol, la zone non saturée et la zone saturée.

1.3.1. Critères relatifs au sol

a. La topographie :

c'est un critère qui contribue dans la détermination de la pente des terrains et l'évaluation de la vitesse d'écoulement des eaux superficielles (Derni, 2011).

b. La couverture pédologique :

La nature, l'épaisseur, la texture la teneur en argile et en matière organique influent sur le transfert des polluants dans la nappe d'eau souterraine.

1.3.2. Critères relatifs à la zone non saturée:

a. L'épaisseur de la Z.N.S :

C'est l'horizon entre la surface topographique et la nappe d'eau souterraine, c'est la partie de transit d'un polluant vers les eaux souterraines.

b. L'amplitude de battement de la nappe :

Si le battement de la nappe est significatif, il devient donc un critère de vulnérabilité.

c. La perméabilité verticale de la Z.N.S :

Plus la perméabilité verticale est importante plus le temps de transfert d'un polluant vers la nappe est important (Ravbar N. et Goldscheider, 2007).

d. La structure de la Z.N.S :

La nature, la texture, la teneur en argile et en matière organique de la Z.N.S peut réduire la contamination des eaux souterraines par la pollution.

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

1.3.3. Critères relatifs à la zone saturée :

a- Le type de nappe : une nappe libre est plus vulnérable à la pollution qu'une nappe captive naturellement protégée par un toit imperméable ou peu perméable.

b. Les paramètres hydrodynamiques : perméabilité, transmissivité, coefficient d'emménagement et gradient hydraulique déterminent le temps de résidence d'un contaminant dans la nappe.

c. La piézométrie : Conditionne l'évolution des processus hydrodynamiques des phénomènes tels que la drainance peuvent s'inverser.

d. La direction et le sens d'écoulement : déterminent le trajet d'un polluant dans la nappe d'eau souterraine.

e. Le type du système hydrogéologique : à partir de la réactivité aux impulsions pluviométriques du système, et donc de son caractère transmissif, la vulnérabilité du système peut être évaluée (Zwahlen, 2004, In Cazaux, 2007).

f. Les relations nappe-cours d'eau : l'alimentation des nappes d'eau souterraine par les cours d'eau superficiels ou par le drainage en sens contraire donne une idée sur la possibilité de contamination à la pollution.

g. L'épaisseur de l'aquifère : détermine la réserve d'eau dans l'aquifère. Plus la réserve est importante, plus la dilution du polluant est assurée.

1.3.4. Critères communs à la zone non saturée et à la zone saturée

a. La fracturation : la fracturation augmente la vitesse d'infiltration des polluants.

b. La recharge : c'est le volume d'eau atteignant la nappe d'eau souterraine et dépend de la pluie efficace s'infiltrant dans le sol puis dans la zone non saturée (Dörfliger et al, 2004).

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

Tableau 0.4- Critères de vulnérabilité (Zwahlen , 2004)

VULNERABILITE INTRINSEQUE		
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée (ZS)
Topographie (pente)	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe (libre ou captive)
Pédologie (perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols)	Temps de transfert (perméabilité verticale)	Temps de résidence (dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères)
Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)		Relation eaux souterraines/eaux superficielles
	Structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile)	Piézométrie (sens et direction d'écoulement et évolutions selon la période du cycle hydrologique)
	Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)
		La recharge (recharge annuelle nette).
		Type de système hydrogéologique (caractères plus ou moins capacitif et transmissif)
	Battement de nappe	
Fracturation (directions et densité)		

2. Etude bibliographique des méthodes de cartographie de la vulnérabilité

2.1. Méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, 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 (Gogu et Dassargues, 1998, In Dorni, 2011).

La vulnérabilité des eaux souterraines est déterminée à partir de différentes méthodes de cartographie. On distingue parmi ces méthodes, notamment les méthodes de cartographie à index. Ces méthodes sont les suivantes :

2.1. 1. Les méthodes de cartographie à index : elles sont basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres (sols, géologie, profondeur de la nappe,...) d'une région en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. Dans les premières méthodes tous les paramètres avaient le même poids, leur importance relative vis-à-vis de la vulnérabilité n'était donc pas prise en compte. Ces méthodes se veulent plus quantitatives (Assi , 2007, In Zwahlen , 2004).

2.1. 2. Les modèles de simulation : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques qui représentent les processus couplés qui régissent les transports de contaminants. Cette catégorie comprend les méthodes basées sur les modèles simples de transport ainsi que les solutions analytiques ou numériques pour des modèles en une dimension de transport de contaminants à travers la zone non saturée, ou encore des modèles couplés saturé-insaturé, multiphase, à deux ou trois dimensions.

2.1. 3. Les méthodes statistiques : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractérisations sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude.

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

2.2. Description et comparaison des principales méthodes

Les définitions généralement reconnues de l'A.I.H. en 1994 (Dörfliger et al, 2004, In Vrba et Zaporozec, 1994) et de l'Action européenne COST 620 permettent les considérations suivantes:

- Les méthodes développées pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque sont des méthodes de cartographie multicritères.
- La vulnérabilité des eaux souterraines est une propriété relative, non mesurable et sans dimension.
- Pour les différentes méthodes, de nombreux facteurs (liste ci-dessous) peuvent intervenir et être ensuite manipulés (Zwahlen, 2003), cartographiés et indexés selon différents critères que chacune des méthodes préconise d'employer (tableau 1) :

-Recharge par les eaux météoriques,

-Modalités d'Infiltrations,

-Propriétés du sol,

-Géochimie des eaux,

-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.

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

Tableau 0.5- Liste des méthodes développées pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque (Dörfliger et al, 2004) .

Acronymes/Nom de la méthode	Référence	Type d'aquifère Préconisé	Interprétations des critères de l'approche européenne pris en compte	Cible
« AVI »	Van Stempvoort D. et al., 1993	Poreux	O	Ressource
« COP »	Vias J.M. et al., 2002	Karst	O, C & P	Ressource
« DRASTIC »	Aller et al., 1987	Poreux	C, O & P	Ressource
« EPIK »	Doerfliger N., 1996 Doerfliger N. et Zwahlen F., 1996	Karst	C, O & K	Ressource/Source
« GOD »	Foster S.D.D., 1987	Poreux	O & K	Ressource
« GLA method »	Hölting B. et al., 1995	Poreux	O	Ressource
« LEA »	Dunne S., 2003	Karst	O & C	Ressource
« PI-méthode »	Goldsheider N. et al., 2002	Karst	O, P & C	Ressource
« REKS »	Malik P. et Svasta J., 1999	Karst	O & K	Ressource/Source
« RISKE »	Petelet-Giraud E. et al., 2000	Karst	O, C & K	Ressource/Source
« RISKE 2 »	Plagnes V. et al., 2006	Karst	O, C & K	Ressource/Source
« SINTACS »	Civita M. et De Maio M., 1998-2000	Poreux	C, O & P	Ressource
« SINTACS Pro Karst »	Cucchi F. et al., 2007	Karst	C, O, P & K	Ressource/Source
« VULK »	Jeannin P.Y. et al., 2001	Karst	O & K	Ressource/Source
DISCO				
APP. Slovène				

NB : C,O,P et K C Critères de la vulnérabilité intrinsèque (voire figure 37)

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

2.1.1. Milieu poreux

a. La méthode DRASTIC : a été développée par l'EPA aux Etats-Unis en 1985 et Aller et al. En 1987 afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines. Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur 7 paramètres :

Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the vadose zone and hydraulic Conductivity (Dörfliger et al, 2004) .

Chaque paramètre est cartographié avec un index allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération est ensuite appliqué aux différents paramètres afin de relativiser leur importance respective en terme de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des 7 paramètres selon la formule suivante :

$$D_i = \sum_{j=1}^{j=7} (W_j R_j)$$

Avec D_i : index de vulnérabilité global d'une unité Cartographique.
 W_j : facteur de pondération du paramètre j
 R_j : index du paramètre j

La méthode propose deux systèmes de pondération suivant les conditions d'utilisation du sol : utilisation normale et avec une activité agricole importante (pesticides).

Tableau 0.6- Critères de vulnérabilité de la méthode DRASTIC
 (Dörfliger et al, 2004).

Paramètre	Facteur de pondération "normal"	Facteur de pondération "pesticides"
Depth to water (profondeur jusqu'à la nappe phréatique)	5	5
Net Recharge (recharge nette)		4
Aquifer media (type d'aquifères)		3
Soil media (nature du sol)		5
Topography (topographie)		3
Impact of the vadose zone (impact de la zone non saturée)		4
Hydraulic Conductivity (conductivité hydraulique)		2

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser les zones à risque, plus l'index de vulnérabilité est élevé, plus le potentiel de contamination de l'eau souterraine est élevé.

Cette méthode est principalement utilisée pour la cartographie à grande échelle (région, état) aux Etats-Unis. Son efficacité reste encore à prouver à cause de ces limites.

b. La méthode SINTACS : est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus petite échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Ravbar et Goldscheider, 2007).

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 :

Soggiacenza (Profondeur à la nappe), Infiltrazione (Infiltration), Azione del Non Saturo (Fonction de la zone non saturée), Tipologia della Copertura (sol), Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero (Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère), Conducibilità Idraulica (conductivité hydraulique), et Acclività della Superficie Topografica (Pente moyenne de la surface topographique).

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des classes de pondération différentes selon les situations. L'index de vulnérabilité I_v est calculé selon la formule suivante :

$$I_v = \sum P(1,7) W(1,n)$$

Avec : $P(1,7)$: index des paramètres 1 à 7

$W(1,n)$: poids correspondant à chaque classe, il varie de 1 à n

Les index résultant de cette méthode sont divisés sous forme de pourcentage et ensuite divisés en intervalles qui ont été définis sur la base de 500 tests, et groupés en six classes de vulnérabilité. SINTACS utilise donc les 7 mêmes paramètres que DRASTIC mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération. L'utilisateur code les données d'entrée de la méthode en fonction des situations locales de chaque cellule avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivant les conditions.

La différence principale entre DRASTIC et SINTACS sont les valeurs des index, la sélection des classes de pondération et la stratégie de leur combinaison.

c. A.V.I. (Canada): Aquifer Vulnerability Index.

Cette méthode cherche à évaluer le temps de transport d'éventuels contaminants en fonction de l'épaisseur de la Z.N.S. Elle a été appliquée en 2005 en étant comparée à l'application de

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

la méthode GOD (Dörfliger et al, 2004, In Vías et al, 2002).

d. G.O.D. (Pays-bas): Groundwater occurrence, Overlying lithology, Depth to groundwater.

Cette méthode a été appliquée à l'aquifère de Torremolinos dans le sud de l'Espagne (Vías J.M. et al., 2005).

e. GLA-method (Allemagne) : Geologisches Landesamt (méthode dont les principes sont en partie repris de PI-méthode).

2.1.2. Milieu Karstique

- Méthodes développées dans le cadre de l'action COST 620 (PI, COP)

a. Méthode PI (Goldscheider, 2000) :

Cette méthode a été développée dans le cadre de l'action COST620 et cofinancée par le BGR, à l'université de Karlsruhe (Allemagne). Cette méthode a été appliquée à 12 systèmes karstiques dans 7 pays européens. Le concept général est le suivant: c'est une méthode orientée Système d'Information Géographique, qui est basée sur le concept « origine-écoulement-cible » ; la cible est la surface piézométrique et non la source ou le captage. C'est une méthode de caractérisation de la vulnérabilité de la ressource et non du captage de la source (Zwahlen, 2004).

Cette méthode repose essentiellement sur la caractérisation spatiale de deux critères: **P** pour la couverture Protectrice et **I** pour les conditions d'infiltration. Le premier critère P est subdivisé en 5 classes, de 1 faible degré de protection à 5 fort degré de protection.

La méthode d'Höltling est une méthode intégratrice ; elle détermine une valeur d'indice pour 5 classes différentes, en considérant d'une part l'épaisseur des formations, la nature du sol, la recharge (quantité en mm), la lithologie et l'intensité de fracturation.

Le critère **I** caractérise les conditions d'infiltration : la valeur de I est comprise entre 1 et 0, avec $I = 1$ correspondant à une infiltration diffuse, $0 < I < 1$ pour des écoulements latéraux de surface et de subsurface, et $I = 0$ correspond à une infiltration ponctuelle.

La caractérisation repose sur la prise en compte de concepts hydrologiques tels que l'existence d'écoulement latéral, d'écoulement Hortonien et d'écoulement préférentiel via une perte ou un gouffre.

Le Facteur de protection Π résultant est la multiplication de l'indice des critères P et I, soit $P * I$; $\Pi > 1$ ou $\Pi = 1$ signifie un degré de protection très faible, une vulnérabilité extrême à la pollution ; $\Pi = 5$ signifie un fort degré de protection et une très faible vulnérabilité (Dörfliger et al, 2004) .

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

Tableau 0.7- Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST 620).

	Carte de vulnérabilité		Carte P		Carte I	
	Description	π - facteur	Description	P- facteur	Description	I-Facteur
Rouge	Extrême		Très faible	1	Très élevée	0.0-0.02
Orange	Haute		Faible	2	Elevée	0.4
Jaune	Modérée	> 2-3	Modérée	3	Modérée	0.6
Vert	Faible	> 3-4	Elevée	4	Faible	0.8
Bleu	Très faible	> 4-5	Très élevée	5	Très faible	1.0

b. Méthode LEA – (approche européenne) cette méthode est basée sur deux facteurs, à savoir la couverture protectrice et les conditions d'infiltration, donnant un cadre plutôt que des schémas d'évaluation de la vulnérabilité. Une des différences avec la méthode PI, est qu'elle n'a pas recours à l'usage d'indice numérique (illustration 0.1).

Tableau 0.8- Facteur sol (méthode LEA, (Dörfliger et al, 2004))

Couverture protectrice	vulnérabilité	Temps de transfert estimé
Roche calcaire karstique dénudée ou sol très fin, pelliculaire	Extrême	Instantanée – quelques heures
Sol, dépôt < 3 m épaisseur	Très élevée	Quelques heures, < 1 jour
Limons 1-3 m épaisseur, dépôts fins	Elevée	Jours - < 1 mois
Argiles > 1 m, limons > 4 m	Modérée	> 1 mois
Argiles > 2 m, limons > 40 m	Faible	> 1 an
Argiles > 12 m épaisseur	Très faible	10 ans

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

c. Méthode COP

Cette méthode, conçue comme devant être un outil pratique et utile, est une méthode détaillée, décrivant les facteurs, leur caractérisation, indice et pondération ; elle a été développée dans le cadre de l'action COST 620 par le groupe d'hydrogéologie de l'université de Malaga(Dörfliger et al, 2004) , avec le soutien financier du ministère espagnol de la recherche et de la science, ainsi que des groupes de recherche d'Andalousie. Les facteurs O, C et P de l'approche européenne de cartographie de la vulnérabilité ont été caractérisés, classifiés considérant les résultats des réflexions des groupes de travail et leur combinaison et pondération déterminées. La définition des classes de vulnérabilité a été établie. La méthode développée a été testée sur deux sites dans le Sud de l'Espagne ; les cartes de vulnérabilité résultante doivent encore faire l'objet d'investigation de validation à l'aide d'essais de traçage artificiels et l'utilisation d'autres outils hydrogéologiques.

Cette méthode, avec ces trois facteurs, C, O et P, (Dörfliger et al, 2004) .est une méthode de caractérisation de la ressource et non d'une source ou d'un captage ; pour la caractérisation de la vulnérabilité d'une source, le recours à un paramètre supplémentaire K est nécessaire.

Les trois facteurs de la méthode « COP » sont :

- C - concentration du flux en distinguant la recharge par les pertes, avens (scenario A) du reste du bassin d'alimentation (scenario B),
- O- formations superficielles de couverture résultant du croisement entre épaisseur, nature de la couverture (sol et formations lithologiques)
- P - Précipitation obtenue en croissant les notions de quantité et d'intensité

L'indice COP est obtenu à partir de la relation suivante :

$$\text{COP-indice} = (\text{C résultat}) * (\text{O résultat}) * (\text{P résultat}).$$

Tableau 0.9 - Indice "COP" utilisé pour la cartographie de la vulnérabilité (Vias et al., 2002).

COP indice	Classe de vulnérabilité
[0-0.5]	Très élevée
[0.5-1]	Elevée
[1-2]	Modérée
[2-4]	Faible
[4-15]	Très faible

Le principe de cette méthode est expliqué dans l'annexe.

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

d. La méthode DISCO (DISCONTINUITE – COUVERTURE PROTECTRICE) est une méthode pour la délimitation des zones de protection dans les aquifères fissurées fortement hétérogènes, en présence d'une circulation d'eau très rapide dans les fissures. La méthode DISCO basée sur trois paramètres fondamentaux (DERNI, 2011, In Zwahlen, 2004):

1. Paramètre discontinuité : caractérise le transit de l'eau dans les aquifères fissurés entre le point d'infiltration de l'eau jusqu'à l'ouvrage de captage. Il peut être évalué d'une part sur la base d'observations de terrain (extension, ouverture, fréquence, orientation...etc.) et d'autre part à partir des résultats d'essais de traçage. Ce paramètre est défini sous quatre classes.

2. Paramètre couverture protectrice : basés sur l'effet protecteur de la couche géologique surmontant l'aquifères (sol, alluvions...etc.).

3. Paramètre ruissellement : c'est le phénomène d'écoulement des eaux superficielles avant l'infiltration. Il dépend de la pente des terrains ainsi que le type du cours d'eau (permanent ou temporaire).

La procédure d'application de cette méthode se déroule en quatre étapes:

- Evaluation du paramètre discontinuité et couverture protectrice sur le bassin d'alimentation sous forme des polygones présentant des propriétés homogènes.
- Calcule du facteur de protection intermédiaire pour chaque polygone élémentaire du bassin d'alimentation. Pour ce faire, on pondère et additionne les valeurs des paramètres « discontinuités» et « couverture protectrice » (Dörfliger et al, 2004, In Pochon et zwahlen, 2003).
- Le paramètre ruissellement ; on le prend en considération faible ou très faible, pour déterminer le facteur de protection final F.
- A la base d'une relation d'équivalence entre les valeurs des facteurs de protection finale et les zones S1, S2 et S3 en délimitant les zones S.
- La délimitation des zones de protection est effectuée sur la base d'une relation d'équivalence entre la valeur du facteur de protection final F et les zones S (toutes les procédures sont détaillées en annexe).

e. Méthodes spécifiques au karst (EPIK, RISKE) :

1. Méthode EPIK

La méthode EPIK a été développée spécifiquement pour évaluer la vulnérabilité des aquifères karstiques en Suisse dans le but de délimiter des périmètres de protection à partir d'une carte de vulnérabilité (Doerfliger, 2004) pour l'OFEFP4 (Ravbar et Goldscheider, 2007). Cette méthode permet de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis à vis de tout type de contaminants.

La méthode EPIK prend en compte 4 paramètres :

Epikarst, Protective Cover (couverture protectrice : sol), Infiltration Conditions (conditions d'infiltration), Karst network development (développement de la karstification). Ces critères correspondent à quatre aspects spécifiques de l'organisation des écoulements en milieu karstique. La méthode EPIK permet donc d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines en milieu karstique aux influences naturelles et anthropogènes de manière globale et rigoureuse.

2. Méthode RISKE

La méthode RISKE est une méthode multicritère de type Point Count Système Models (PCSM) ou méthode à index avec pondération des critères. Elle a pour but d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Cette approche est dérivée de la méthode EPIK développée en Suisse par Doerfliger (1996) pour "évaluer la sensibilité des eaux souterraines des régions karstiques aux influences naturelles et anthropiques de manière globale et rigoureuse".

La méthode RISKE prend en compte 5 critères qui permettent de définir l'architecture de l'aquifère et l'organisation des écoulements dans le milieu karstique : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification et Epikarst .

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

f. L'approche européenne (O.C.P.K.):

L'approche européenne de la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque est abordée dans le rapport final « COST, action 620 » (Zwahlen F., 2004). Nous allons reprendre ici les lignes essentielles de ce rapport. Il sera alors plus facile de remplacer la méthode « RISKE 2 » à l'échelle européenne de réflexion.

L'objectif de COST 620 était de développer de nouveaux outils qui puissent assister les décisions en termes d'aménagement des zones karstiques européennes et de protection de leur ressource en eau (Derni, 2011).

La construction de cette action est l'œuvre d'une concertation entre des spécialistes d'horizons scientifiques différents. Hydrogéologues, géomorphologues, chimistes et microbiologistes environnementalistes se sont alors réunis face à un premier constat :

L'approche européenne(OCPK) utilise quatre critères pour déterminer la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère karstique. Ces facteurs correspondent aux paramètres naturels intrinsèques d'un système karstique aquifère (Bensaoula, 2006), (figure 37).

« **O** » pour « Overlying layers » : caractérise par un suivi vertical les couches successives de couvertures dans la zone saturée, celles-ci pouvant être définies comme protectrices ou vulnérables vis-à-vis de l'infiltration.

« **C** » pour « Concentration of flow » : distingue les surfaces de ruissellement (plus ou moins prononcé), des zones d'infiltration directe préférentielle.

« **P** » pour « Précipitation régime » : fait intervenir un facteur externe au système, il est question du régime de précipitations.

« **K** » pour « Karst network développement » : rend compte du degré de fonctionnalité du système karstique, notamment de son réseau de drainage de la zone saturée.

Les critères C, O et K demeurent des critères internes au système, tandis que P est un critère externe.

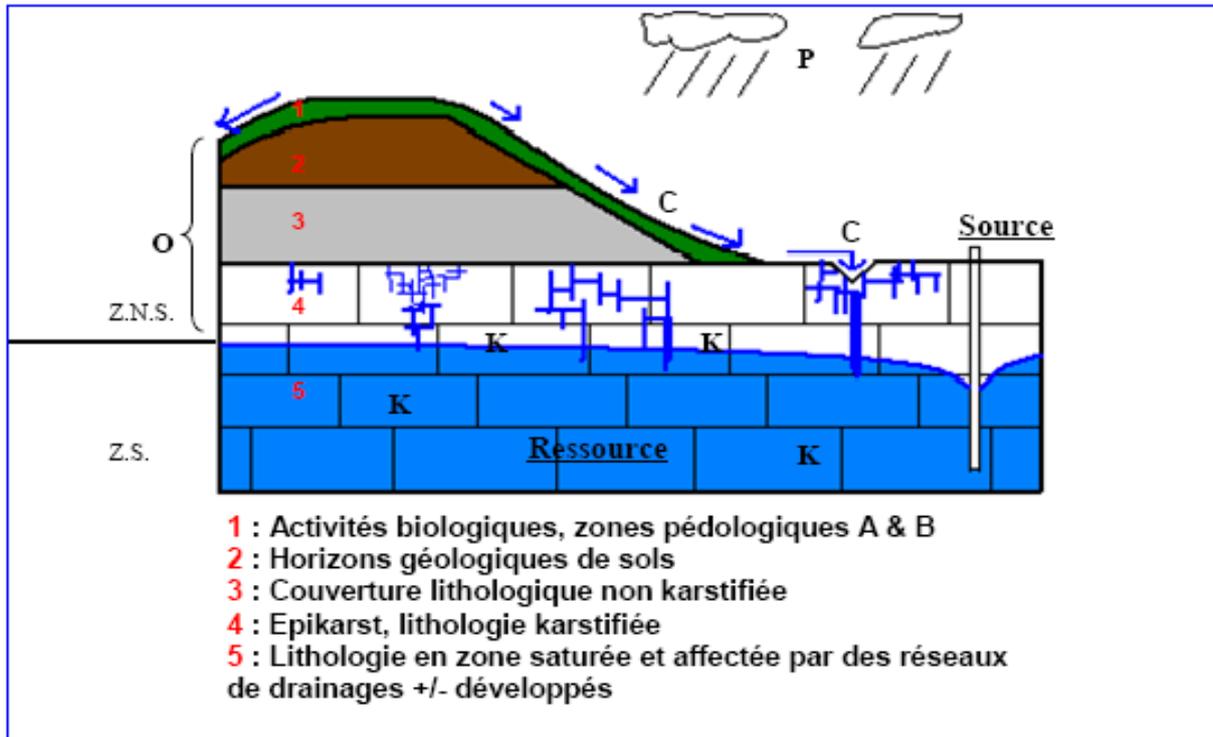


Fig. 37- Modèle conceptuel du karst et des critères de la vulnérabilité intrinsèque

(Zwahlen , 2004 in Bensaoula, 2006).

g. L'approche Slovène:

L'approche Slovène est basée sur la méthode C.O.P et une adaptation intégrale de l'approche européenne (O.C.P.K). C'est une méthode qui a été élaborée par Ravbar N. en 2007 avec succès dans différents secteurs karstiques en Slovénie. Par conséquent, elle a été modifiée, complétée et prolongée pour la cartographie de vulnérabilité des sources, (Le principe de cette méthode est expliqué dans l'annexe) (Zwahlen , 2004).

Le facteur **O** indique l'efficacité des couches couvrant la surface des eaux souterraines pour la protéger contre toute contamination potentielle. L'évaluation du facteur **O** tient compte donc du temps de séjour et de transfert de l'eau et/ou du contaminant à travers la zone non saturée, les principaux facteurs considérés étant l'épaisseur, la porosité et la perméabilité de chaque couche. Le facteur de **C** distingue des secteurs de différents états d'infiltration, il identifie l'existence des recharges allogènes. L'évaluation du facteur **C** est basée sur le zonage des secteurs de recharge. Le facteur **P** est caractérisé par le régime de précipitation qui influe sur le taux d'infiltration, l'écoulement des eaux souterraines ainsi que le transport des contaminants dans les couches aquifères.

Chapitre IV : Vulnérabilité à la pollution

Le facteur **P** considère la quantité et l'intensité des événements de précipitation basé sur la quantité quotidienne de précipitation pendant au moins une période de 30 ans (Ravbar et Goldscheider, 2007, In DERNI, 2011).

h. S.I.N.T.A.C.S. Pro Karst (Italie) : Soggiacenza (profondeur de la nappe), Infiltrazione (Infiltration), Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée), Tipologia della Copertura (Sol), Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero (caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère), Conducibilità Idraulica (conductivité hydraulique), Acclività della Superficie Topografica (pente moyenne de la surface topographique). L'évolution de cette méthode au milieu karstique préconise d'intégrer les morphologies karstiques de surface et données hydrogéologiques ainsi que l'adaptation du critère C pour le karst. Récemment appliquée en Italie dans la région de Veneto, sur le plateau karstique de la commune de Sette (Dörfliger et al , 2004 , In Cucchi . et al., 2007).

i. VUL.K. (Suisse): Vulnerability, Karstic network development.

Conclusion

Les différentes méthodes de caractérisation de la vulnérabilité qu'elles soient généralistes ou spécifiques au karst ont certains paramètres en commun, tels que l'infiltration (y compris la pente) et la couverture protectrice. Les méthodes SINTACS et DRASTIC comprennent le plus de paramètres à caractériser. Tous ces paramètres ne sont pas pertinents et faciles à déterminer dans un milieu hétérogène de type karstique.

La méthode « COP » est similaire à la méthode « PI », intégrant la recharge comme paramètre à part entière. Les paramètres utilisés sont relativement simples à obtenir et la méthode est applicable de manière aisée. Par contre, le nombre important de calcul de valeurs d'indice, nécessite d'effectuer les compilations des cartes à l'aide d'un système d'information géographique traitant des images « RASTER ». Cette méthode a été utilisée dans le cadre de l'action COST 620.

Cependant, les méthodes proposées dans le cadre de l'action européenne reposent a priori sur peu de paramètres, mais en fait, ce sont des paramètres intégrateurs. La lisibilité de la méthode n'est pas facilitée de la sorte.

Les critères retenus doivent satisfaire les conditions suivantes :

- Pertinence : chaque critère doit décrire ou caractériser physiquement un volume de l'aquifère pouvant avoir une incidence sur la vulnérabilité de la ressource et/ou de la source.
- Indépendance : indépendance des critères retenus, les uns entre les autres, c'est à dire ne pas caractériser une partie de l'aquifère ou le même fonctionnement. Plus le nombre de critère sera important, plus ils seront susceptibles d'être interdépendants.
- Faisabilité : facilité pour déterminer le critère sur le site d'étude, de manière qualitative ou semi-quantitative.

II- Démarche méthodologique pour le choix d'une méthode de cartographie :

Le bassin versant de Meffrouche est caractérisé par un milieu aquifère karstique. Il fait partie des bassins versant de la Tafna, il est constitués par des formations carbonatées qui sont largement karstifiées à savoir les dolomies de Tlemcen et les dolomies de Terni. Les cartes topographiques et géologiques sont deux outils indispensables pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, sont le support technique, sur lequel on trace les cartes de vulnérabilité. Ainsi que, le choix de l'échelle de la cartographie se fait selon l'objectif de cette dernière, aussi que leur disponibilité (fig.38) :

Les cartes à petites échelles sont des cartes à échelle régionale, elles sont disponibles pour la totalité du bassin (topographique et géologique au 1/50 000 et 1/25000). Tandis que, pour la géologie, on a fait une combinaison entre la carte du Doumergue et Gevin.

Les photos aériennes du bassin à l'échelle 1/20 000, sont disponibles pour une grand partie du bassin (Consultées au niveau du cadastre et de l'université).

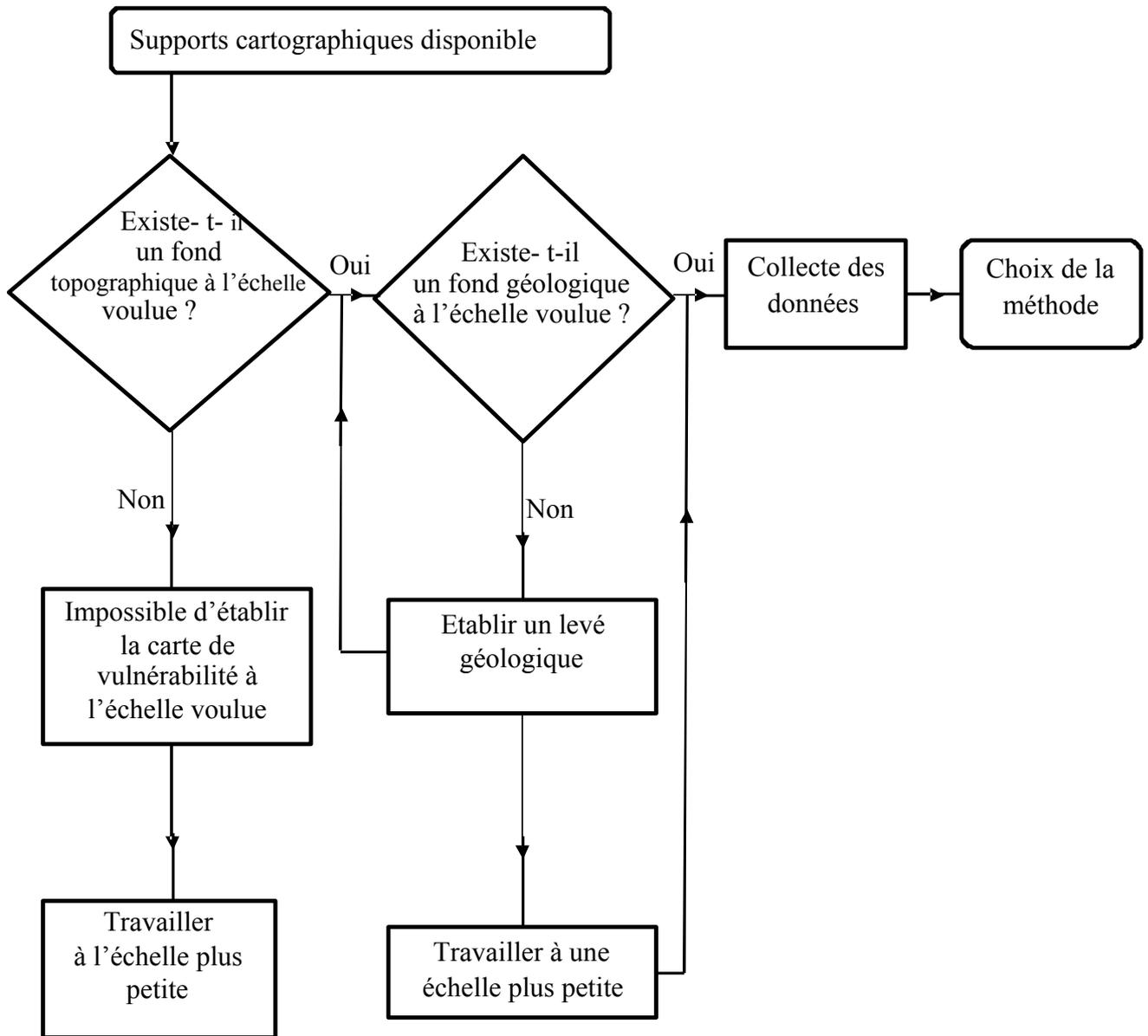


Fig.38- Première étape de la démarche : choix du fond topographique et géologique (Derni, 2011).

Le choix d'une méthodologie de cartographie est basé sur la nature et le type du milieu aquifère (Zwahlen , 2004), ainsi que toutes les données disponibles forment les critères de base de la cartographie.

L' organigramme établi ci dessous nous a permis de choisir une ou plusieurs méthodes de la cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines selon le type du milieu aquifère (fig. 39):

- 1- Collecte des données nécessaires à la cartographie.
- 2- Analyses et traitements des informations basées sur les différents critères de vulnérabilité.
- 3- Choix d'une méthode de cartographie selon le type de l'aquifère ainsi que les critères de base disponibles.

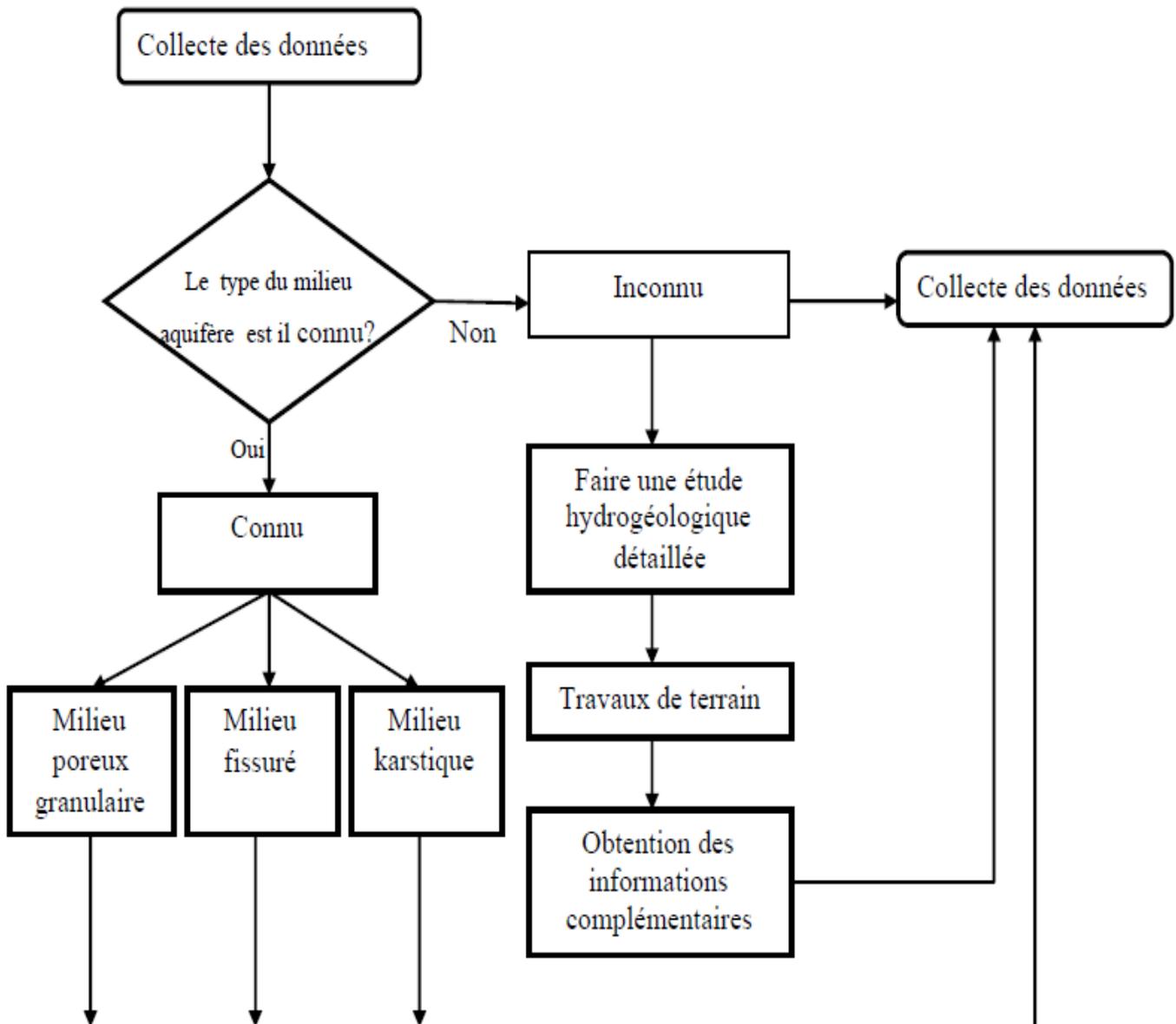


Fig.39- Deuxième étape de la démarche : le milieu aquifère (Derni, 2011).

Tableau .10- Les critères de la vulnérabilité introduits dans les différents milieux aquifères du bassin versant du Meffrouche.

Formation hydrogéologique	S	Inf	K	EpA	Tn	Pn	EpZNS	T	P	N ZNS	C.P	P.A	Ep	F	Type du milieu
Les dolomies de Terni	+	-	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+	Karstique
Les dolomie de Tlemcen	+	-	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+	Karstique

Ep : Epikarst **S** : Sol **Inf** : Infiltration **K** : Karstification **Tn** : Type de la nappe **Pn** : Profondeur de la nappe **Ep ZNS** : Epaisseur de la zone non saturée **T** : Topographie **P** : Perméabilité **N. ZNS** : Nature de la zone non saturée **C.P** : Couverture pédologique **P.A** pression artésienne **F** : Fissuration, **EPA** : Epaisseur de l'aquifere.

1. Dolomie de Tlemcen et dolomie de Terni:

Ce sont les plus importants aquifères du bassin versant du Meffrouche, les dolomies de Tlemcen affleurent dans djebel El Nador, et sur la partie ouest et sud du bassin.

Cependant, Les dolomies de Terni affleurent au niveau de la partie Est du bassin, près du barrage Meffrouche et au nord est du bassin.

Ces deux formations sont fortement karstifiées, elles forment les aquifères les plus karstifiées de l'ouest algérien (Bensaoula, 2004).

La karstification et l'épikarst sont déterminées au niveau des forages d'eau (perte de la boue, Chute d'outil), carrières et l'affleurement au niveau de la surface...etc (Bensaoula, 2004).

Ces formations sont bien représentées dans les cartes géologiques 1/50 000 et 1/25000 de Terni.

A cet effet, dans ces affleurements la cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines est très importante où l'aquifère est caractérisé par une nappe d'eau libre. Par contre les nappes captives sont moins vulnérables à la pollution parce qu'elles sont couvertes par un toit imperméable (Bensaoula, 2004., In Darni, 2011).

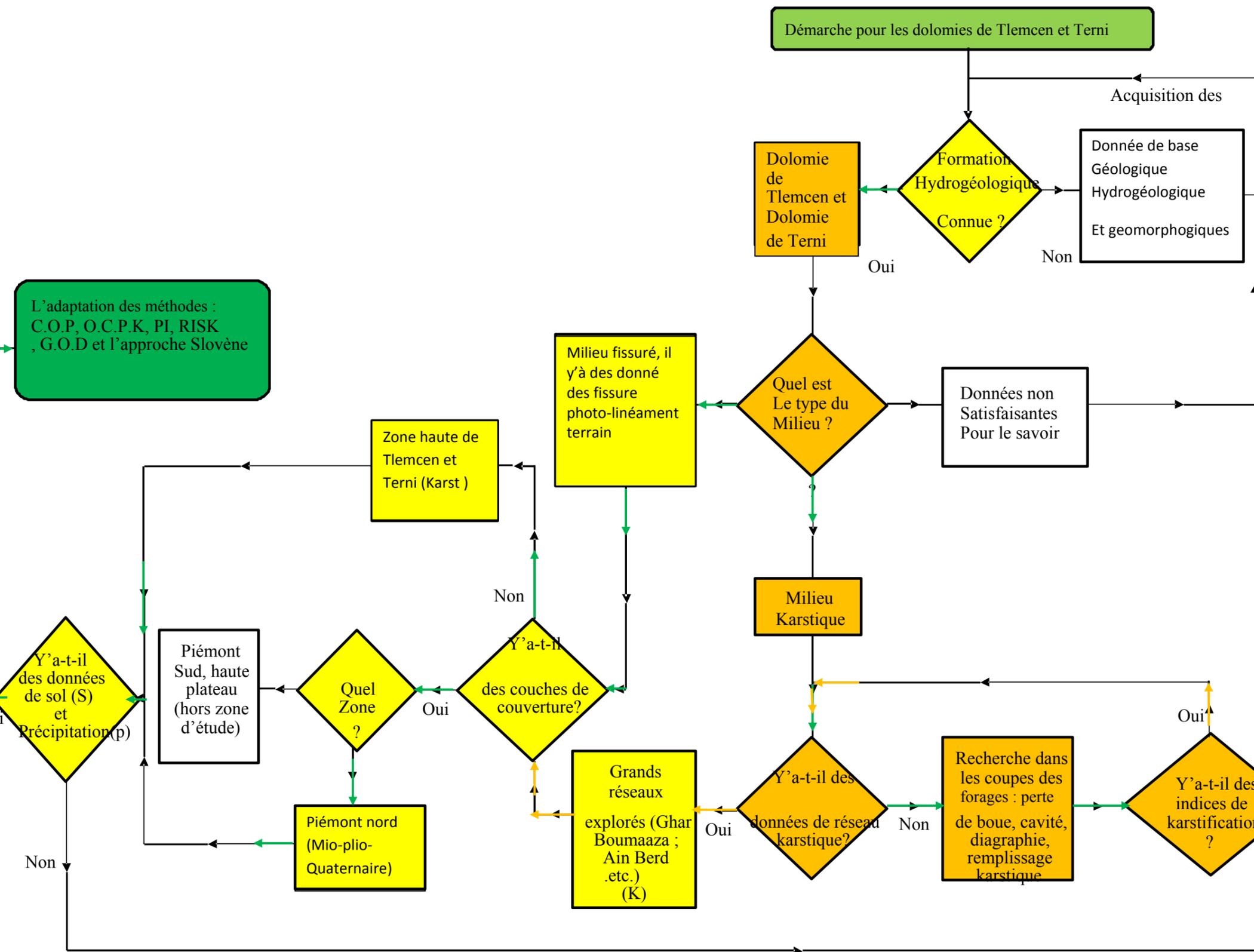
En revanche, dans notre étude on considère certains niveaux de l'aquifère de dolomie de Tlemcen est captive, car ils sont couverts par une formation de marno-calcaire de Raourai.

La carte topographique est à moyenne échelle (1/50 000 et 1/25 000) couvrant la totalité du bassin et ne pose aucun problème pour la détermination des pentes du terrain.

Plusieurs méthodes de la cartographie de vulnérabilité à la pollution peuvent être adaptées pour ces formations telles que : la méthode COP, OCPK (approche européenne), approche Slovène, EPIK, RISK et RISK2, et GOD.

Par conséquent La méthode COP est la plus adéquate, car elle répond bien aux conditions des bassins versants en milieu karstique dans le bassin méditerranéen, c'est une méthode développée dans le cadre du projet européen COST action 620, elle a été appliquée dans la région de Sierra Líbar en Espagne avec la méthode PI à fin de cartographier la vulnérabilité des eaux karstiques. Cependant, après validation de la carte de Sierra Líbar, il est apparu que la méthode COP est la plus adéquate à être appliquée.

Fig. 40- Démarche méthodologique pour le choix d'une méthode de cartographie des dolomies de Tlemcen et dolomies de Terni (Derni, 2011, modifié par Zeghid ,



Conclusion :

Les différentes méthodes de cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines ont été élaborées dans des conditions climatiques, géologiques et hydrogéologiques différentes de celle de l'Algérie (pays Méditerranée).

Le développement d'une méthodologie de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques pouvant servir de base pour la délimitation des périmètres de protection.

La méthode COP a été sélectionnée, c'est une méthode développée dans le cadre du projet européenne COST action 620, elle a été appliquée dans la région de Sierra Líbar en Espagne, avec la méthode PI afin de cartographier la vulnérabilité des eaux karstiques.

Après avoir fait l'étude géologique, hydrogéologique, et pédologique du bassin versant, on a constaté que le bassin possède les mêmes caractéristiques que le bassin versant de Sierra Líbar.

Cette méthode comprend 3 critères (O (superposition des couches géologiques, C (concentration des débits superficiels), P (précipitation)), permettant de caractériser la sensibilité du système karstique aux contaminations ; ces critères reflètent au mieux la structure et le fonctionnement des systèmes. Cependant, la méthode proposée comprend trois étapes, permettant d'aboutir à une carte de vulnérabilité globale d'un bassin d'alimentation reconnu. La méthode est appliquée sur un système karstique pour lequel un minimum de connaissance est requis.

Aussi, la méthode COP représente un important pas en avant dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans les aquifères karstiques, notamment en pays Méditerranéen.

Enfin, ces cartes peuvent mettre en évidence toutes les zones à risques et constituent un document de base lors d'établissement des plans de développement d'aménagement.

La carte de vulnérabilité constitue un outil indispensable sur lequel l'hydrogéologue pourra fonder et argumenter sa délimitation des périmètres de protection.

Partie II
Application

PARTIE II

APPLICATION

Introduction

La méthode COP établit des lignes directrices détaillées, tableaux et formules pour évaluer la vulnérabilité à la base des variables, paramètres et facteurs à utiliser par l'approche européenne proposée par COST Action 620 (Daly et al 2002., Zwahlen 2004, in Andreo et al. 2005). Ce procédé peut être appliqué en utilisant des données géo-environnementales disponibles, certains travaux sur le terrain, mais avec une grande entrée de système d'information géographique (SIG) (Andreo et al. 2005).

Cette méthode est appliquée sur le bassin versant du Meffrouche, qui couvre une superficie d'environ 90 km², dans les monts de Tlemcen, au Sud-ouest de la willaya, avec une pluviométrie moyenne de 630 mm. Il est composé de deux aquifères calcaro-dolomitique, celle de dolomie de Tlemcen avec une épaisseur varier entre 20 m à 180 m, est recouverte par une formation de marno-calcaire de Raourai (Fig.27), ainsi qu'un second système aquifère défini par un ensemble calcaréo-dolomitique (Dolomie de Terni), surmonté par une formation de marno-calcaire du Crétacé.

I- Caractéristiques de la méthode COP

L'acronyme de la méthode COP provient des trois initiales des facteurs utilisés: Concentration de flux (C), couches superposées (O) et précipitations (P), (Fig. 41). La base conceptuelle de cette méthode, selon l'approche européenne (Daly et al 2002.; Goldscheider et Popescu 2004), est d'évaluer la nature de la protection des eaux souterraines, déterminé par la propriétés des sols sus-jacents et la zone non saturée, ainsi que, estimer la façon dont cette protection peut être modifiée par le processus d'infiltration - diffuse ou concentrée - (facteur C) et les conditions climatiques (facteur P - précipitations).

PARTIE II : Application

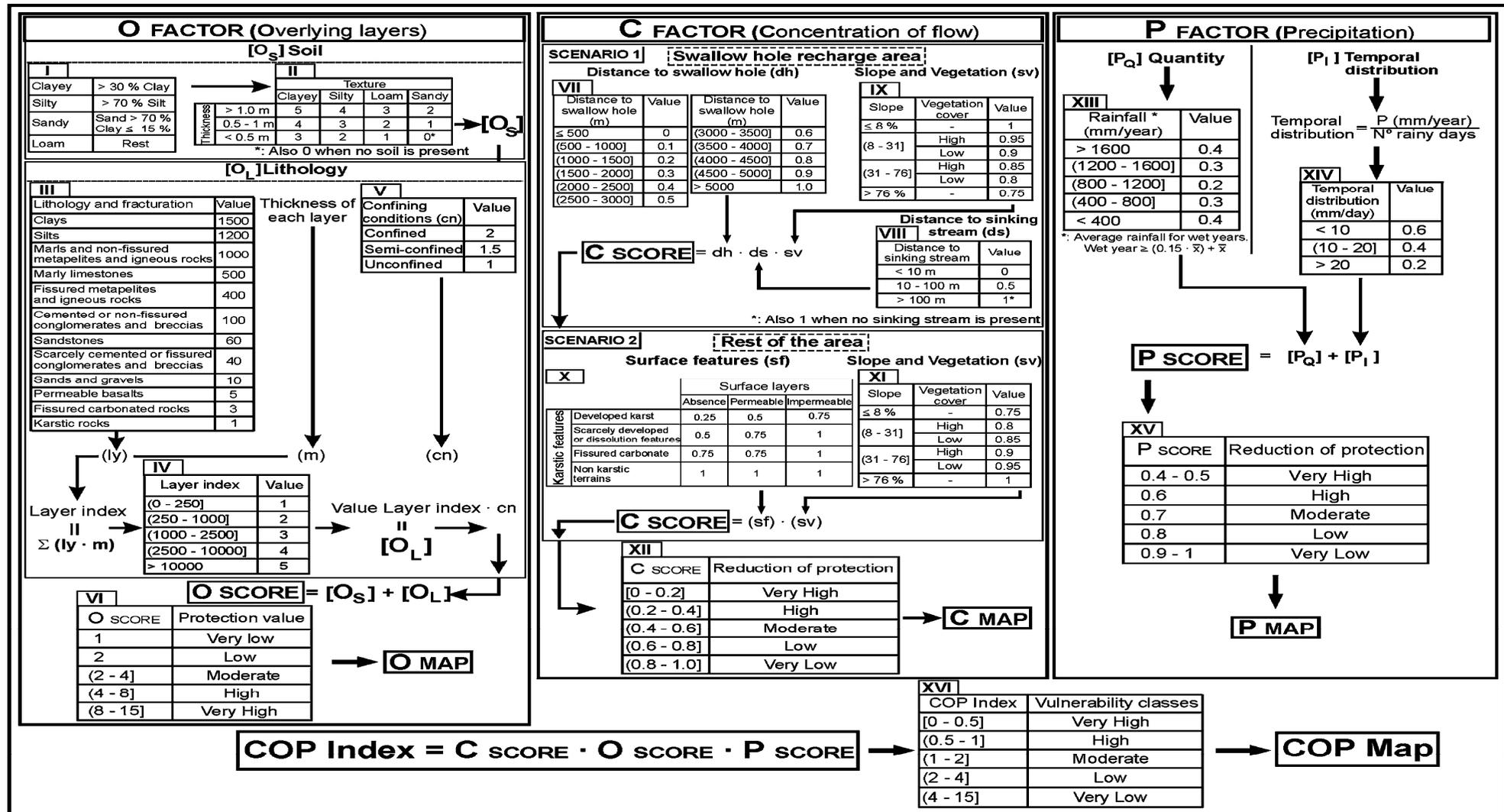


Fig.41- Schéma de la méthode de la COP, montrant la différenciation des facteurs C, O et P (Vias et al. 2006).

1. Le facteur O (couches superposées)

Le facteur O examine la protection prévue à l'aquifère par les propriétés physiques de l'épaisseur de l' couches au-dessus de la zone saturée (Daly et al. 2002), a proposé la subdivision en quatre couches: le sol , sous-sol, les roches non karstique et rochers karstiques insaturés. Dans le projet de la méthode COP seulement deux couches avec d'importants rôles hydrogéologiques ont été utilisés dans le but d'évaluer le facteur O : Les sols [OS] et les couches lithologiques de la zone non saturée [OL], (Vias et al. 2006).

Le sous-facteur des sols [OS] traite biologiquement, les processus d'atténuation du sous-sol et par conséquent, lorsqu'il est présent, doit être pris en compte dans la cartographie de la vulnérabilité.

Plusieurs paramètres sont considérées dans l'évaluation du sous-facteur de sol (Tableaux 0.9) la texture, la distribution de la taille des grains et l'épaisseur, le dernier étant très variable dans les régions méditerranéennes.

1.1. Critère OS (sol – couverture protectrice)

Les formations pédologiques forment une couverture protectrice au-dessus des couches aquifères. Il est donc important d'évaluer le pouvoir protecteur et /ou régulateur de ces horizons vis à vis de polluants potentiels (Andreo et al. 2005).

D'une manière générale, les sols ne sont pas très développés en région karstique et quand ils sont présents, ils sont très hétérogènes dans l'espace. Leurs natures et leurs épaisseurs sont fortement influencées par la nature du substratum (calcaires, calcaires marneux et dolomie), ainsi que par la morphologie (hétérogénéité des sols au sein d'une doline, par exemple), (Vias et al. 2006).

Même si l'on ne dispose que peu d'information sur les sols, le paramètre le plus facilement accessible est l'épaisseur, soit à partir des cartes de sol ou directement par des mesures à la tarière à main sur le terrain (Dörfliger et Jauffret, 2004).

Les indications pédologiques peuvent être obtenues grâce aux cartes pédologiques ou aux études pédologiques régionales.

Paramètres essentiels définis par sa texture d'une part, à partir des teneurs en argile, limon et sable, et l'épaisseur d'une autre part.

La carte du sol (couverture protectrice) a été établie en considérant d'une part l'étude menée par Flidj en 2011 sur le Parc national de la wilaya de Tlemcen et d'autre part par des vérifications et des mesures ponctuelles sur le terrain, nous avons choisi 4 classes :

- Classe 1 : texture à dominante d'argile.
- Classe 2 : texture à dominante de limon.

PARTIE II : Application

- Classe 3 : texture à dominante de sable.
- Classe 4 : reste.

Tableau. 11- Texture du sol

Sol (Texture)	Pourcentage
Argileux	30 % Argile
Limoneux	70 % Limon
Sableux	Sable > 70% Argile < 15%
Reste	Reste

Pour obtenir les classes du critère OS, il suffit de croiser le paramètre, nature de sol avec l'épaisseur, selon la matrice suivante :

Tableau.12- indice du critère OS

Epaisseur		Texture			
		Argileuse	Limoneuse	Sableuse	Reste
	➤ 1.0 m	5	4	3	2
	0.5 – 1.0 m	4	3	2	1
	< 0.5 m	3	2	1	0*

0* : absence du sol ou sol nu

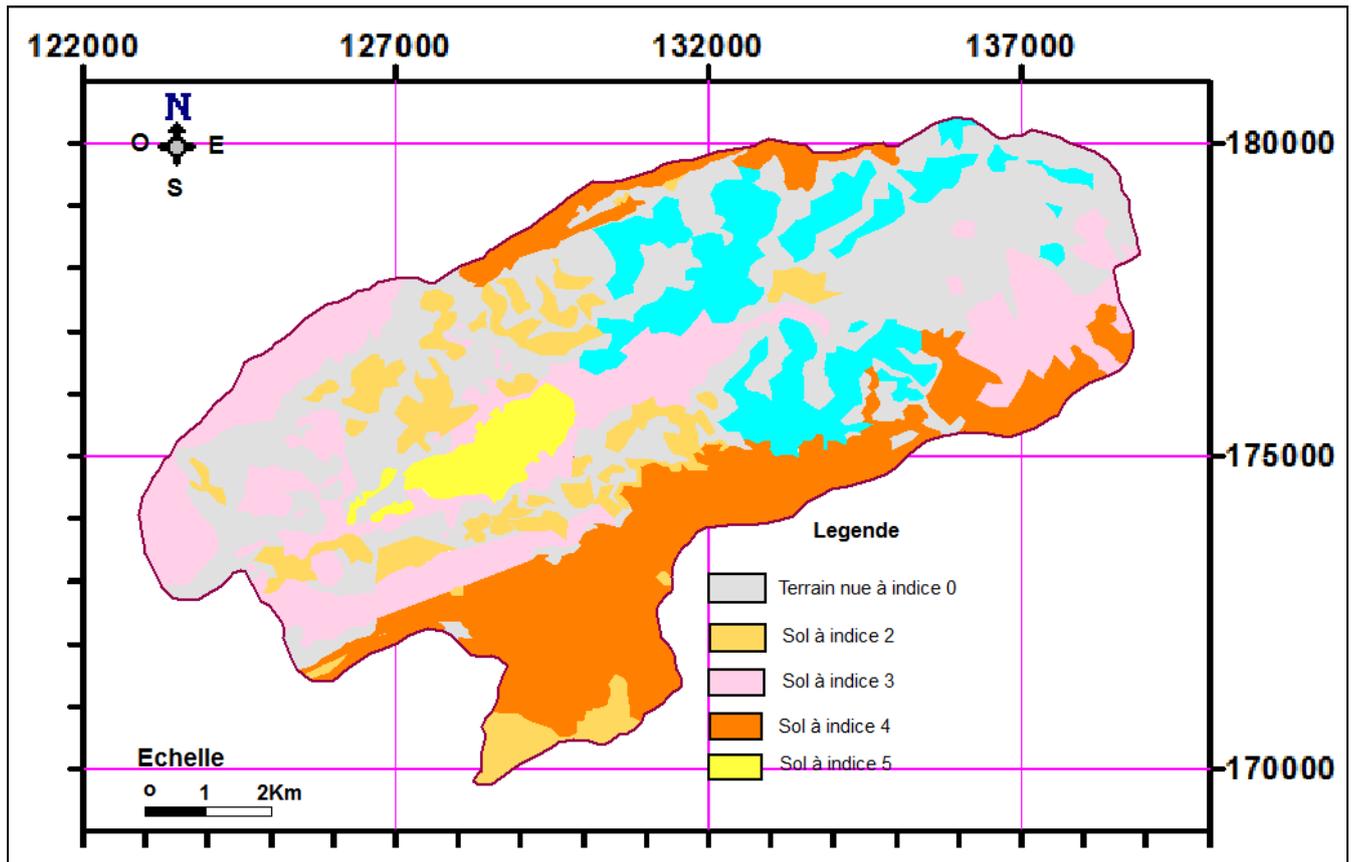


Fig.42- Carte du critère OS (sols)

1.2. Critère OL (Lithologie – Couverture protectrice)

Le sous-facteur, lithologie [OL] reflète la capacité d'atténuation de chaque couche à l'intérieur de la zone insaturée. Les critères d'évaluation pour sa quantification sont : le type de roche (qui détermine sa caractéristique hydrogéologique, notamment la porosité effective et la conductivité hydraulique, le degré de fracturation (l_y) et l'épaisseur de chaque couche (m), ainsi que les conditions de confinement (cn) (Tableaux 13). La sommation successive des produits à partir de la multiplication de l'épaisseur et la lithologie de chaque couche, nous a conduit à obtenir un index qui est associé à la protection ($\text{Layer Index} = \sum (L_y \cdot m)$). L'indice peut être multiplié par une valeur (cn), afin de déduire les aquifères (optionnel): captif (*2), semi-captif (* 1.5) et libre (*1).

Le concept de l'ajout des couches est basée sur la méthode AVI (Van Stempvoort et al. 1993) et la méthode PI (Goldscheider et al. 2000).

1.2.1. Formation du Miocène

Il s'agit d'une formation marneuse à texture argileuse, d'une épaisseur variable, qui varie entre 5m et 15 m, pour un scénario pessimiste, on prend une épaisseur de 5m, ainsi on suppose que cette couche est concordante sur les Marno-calcaires de Raourai, et l'ensemble repose sur les dolomie de Tlemcen (la somme est égale a 67520, alors on affecte un indice de 5), ainsi on a un aquifère captif, $cn=2$, l'ensemble donne un résultat de 10 (d'après la méthode COP).Couleur blanc du figuré.

1.2.2. Formation limoneuse et alluvionnaire

Alluvions anciens correspond a un dépôt limoneux, présentent une mince épaisseur, on prend 1m pour un scénario pessimiste, cette formation repose sur les Marno-calcaires de Raourai, puis l'ensemble recouvre les dolomies de Tlemcen (la somme est égale a 61220), alors on affecte un indice de 5, ainsi on a un aquifère semi-captif, $cn=1,5$, l'ensemble donne un résultat de 7,5 (d'après la méthode COP).Couleur marron du figuré.

1.2.3. Formation de grés

Une formation de grés, présente une épaisseur qui varie entre 50 m et 300 m, dont on prend une épaisseur de 50 m pour un scénario pessimiste. Alors que cette formation forme la base de notre série sédimentaire, on suppose qui est indépendance avec d'autre couches, aussi on prend un indice de 60 qui correspond au grés (d'après la méthode COP).

On obtient une somme de $3000 = 60 \times 50$, alors on affecte un indice de 4, cette aquifère est considérée semi-captif, $cn = 1.5$, l'ensemble donne un résultat de 6 (d'après la méthode COP).couleur rouge brique du figuré.

1.2.4. Formations Calcaire-dolomitiques (dolomie de Tlemcen et dolomie de Terni)

Cette un ensemble calcaire-dolomitique (dolomie de Tlemcen et dolomie de Terni), pour un scénario pessimiste, on prend une épaisseur de 20 m, ainsi on considère que les deux formations sont indépendantes, avec une partie saturée en eau d'une épaisseur de 10 m, soit une somme de $30=(1 \times 10)+(1 \times 20)$, ainsi on considère que les deux formations sont karstifiées et perméables, ainsi que chaque ensemble contienne deux niveaux, l'un saturée et l'autre insaturée en eau (indice 1 et $cn =2$ qui correspond a une aquifère libre), dont on prend que la partie qui est affleure en surface dans les deux formation, (dolomie de Tlemcen couleur grés et dolomie de Terni (couleur rose du figuré).

1.2.5. Formation Marno-calcaire

Deux formations de Marno-calcaire l'une de Raourai et l'autre de Crétacé, d'une épaisseur varie entre 70 m et 130 m, on prend une épaisseur de 70 m, tandis que la formation du Raourai possède une épaisseur de 120 m, dont cette couche recouvre les dolomie de Tlemcen (la somme est égale a $60020 = 500 \times 120 + (10+10)$, on affecte un indice de 5), ainsi la formation du crétacé possède une épaisseur de 70 m, dont cette couche repose sur les dolomie de Terni (la somme est égale a $35010 = 500 \times 70 + (5+5)$, alors on affecte un indice de 5). On considère que les deux aquifères sont semi-captif (cn=1.5), l'ensemble donne un résultat de 7.5 (d'après la méthode COP). (Marno-calcaire de Raourai (couleur jaune) et Marno calcaire de Crétacé (couleur bleue).

Le paramètre "cn" est le coefficient de aweighting pour l'indice de la couche similaire à la méthode GOD (Foster, 1987) et la méthode PI (Goldscheider et al. 2000). Les valeurs attribuées pour le paramètre "cn" (Fig. 1 - Tableau V) donnent une protection à l'aquifère.

Tableau.14- indice du critère OL

Formation	Indice 1	Layer indice $\Sigma (Ly \cdot m)$	Indice 2	cn	Indice 2 * cn	Indice OL
Marne (argile)	1500	67520	5	2	10	10
Limon et alluvion	1200	61220	5	1,5	7.5	7.5

PARTIE II : Application

Grès	60	3000	4	1.5	6	6
Calcaire et Dolomie	1	30	1	1	1	1
Marno-Calcaire de Raourai	500	60020	5	1.5	7.5	7.5
Marno-Calcaire de Crétacé	500	35010	5	1.5	7.5	7.5

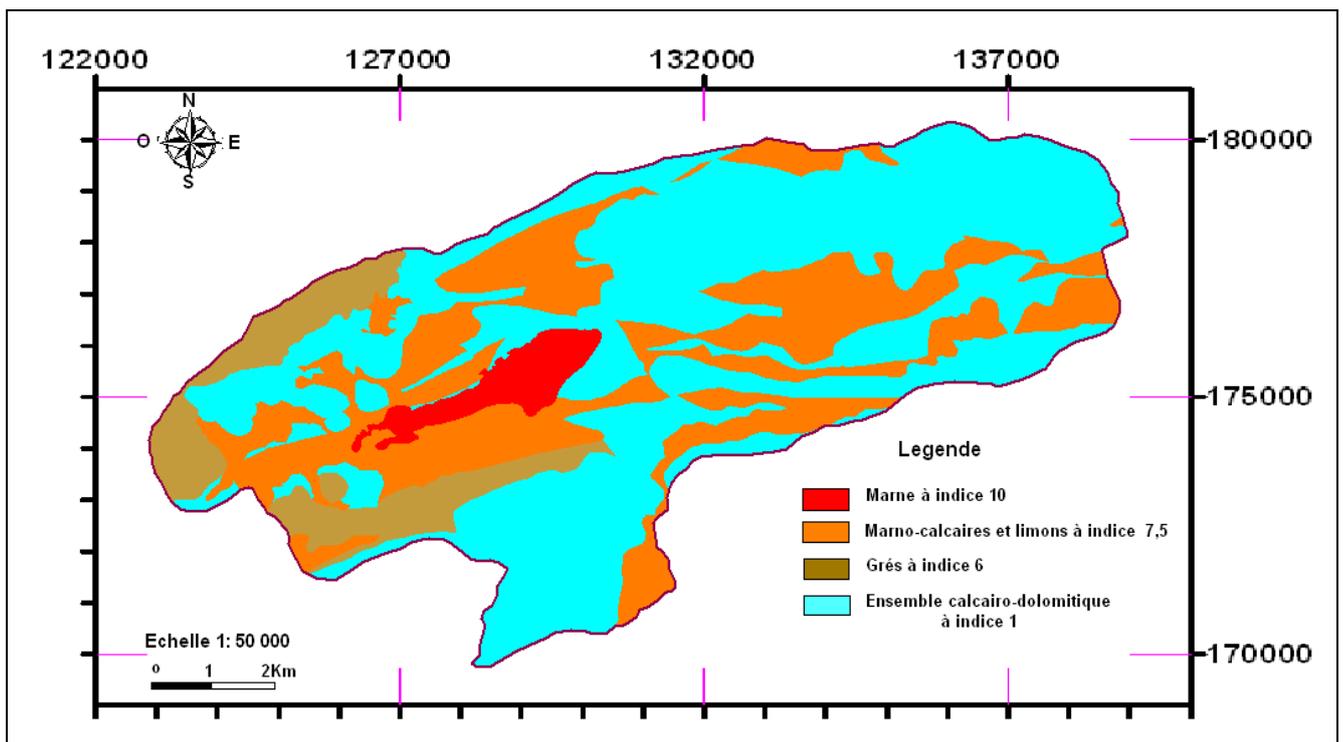


Fig.43- Carte du critère OL (lithologie)

Facteur O

On obtient le facteur O par la sommation des deux cartes OS et OL, suivant la formule suivante :

$$\text{Facteur O} = \text{OS} + \text{OL}$$

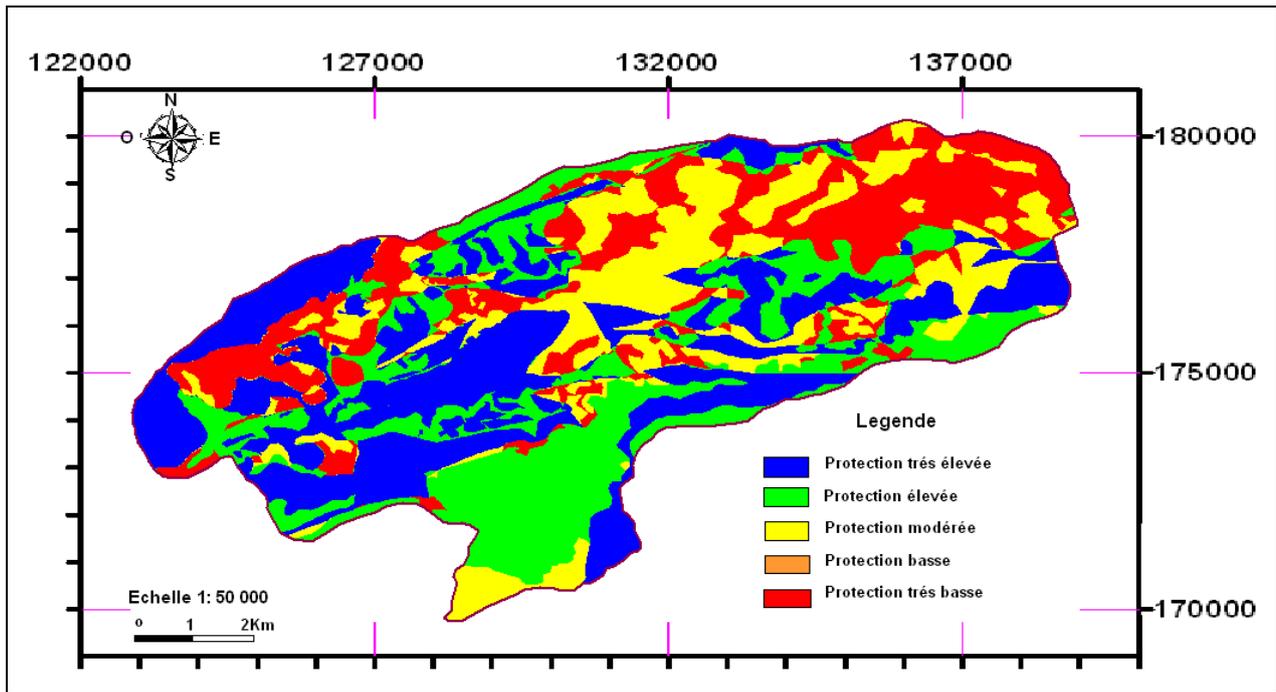


Fig.44- Carte du Facteur O

Tableau.15- Facteur O

Zone	Facteur O	Efficacité de la protection
	1	Très basse
	2	Basse
	(2 – 4)	Modérée
	(4 – 8)	Elevée
	(8 – 15)	Très élevée

2. Le Facteur C (Concentration de flux)

Le facteur C décrit la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination où a l'infiltration à travers la zone insaturée. Le coefficient C est un modificateur du facteur S (couches sus-jacentes), il représente le potentiel pour l'eau de contourner la protection offerte par les couches supérieures (Daly et al. 2002). Le facteur C représente le degré de précipitation au niveau ou à proximité d'affleurement de l'aquifère, ainsi, il est concentrée dans un gouffre, en évitant la zone non saturée. Ceci est basé sur la méthode PI (Goldscheider et al. 2000) et la méthode EPIK (Doerfliger et Zwahlen, 1998). Deux scénarios peuvent être différenciés (Fig.41)

2.1. Scénario 1:

Ceci décrit la situation dans un bassin recouvert par une couche de faible perméabilité, où le ruissellement s'écoule soit dans un gouffre ou dans une région d'infiltration concentrée telle que le pied d'une pente.

L'évaluation du facteur C dans ce scénario désigne quatre variables : la distance de la zone de recharge (aven) par rapport à la perte d'hirondelle (dh), le courant d'amortissement (ds), l'influence de la pente (s) et la végétation (v). La vulnérabilité de l'aquifère diminue avec l'augmentation de la distance entre la zone de recharge et le gouffre ou le flux d'amortissement (Tableaux0.9) (Vias et al. 2006). L'évaluation de la couverture végétale (v) indique le pourcentage de la couverture de la zone clientèle qui est la plus probable d'affecter un régime infiltration-ruissellement (Tableaux0.9). Cependant une faible couverture végétale présente moins de 20 à 30% de la surface donnée. Quatre gammes des cartes topographiques pente (s) sont positivement corrélées avec les eaux de ruissellement. La combinaison de la pente et la végétation fourni une valeur pour le paramètre de la pente et la végétation (sv) (Tableau0.9), (Vias et al. 2006).

Le score C, dans ces conditions de recharge, est obtenue par la multiplication des valeurs de la pente, la végétation (sv) , les distances de la zone de recharge (dh) et le courant d'amortissement (ds).

2.1.1. Distance par rapport aux pertes (aven) Dh

Zone	Distance	Indice	Zone	Distance	Indice
	≤ 500 m	0		[2500-3000 m]	0.5
	[500-1000 m]	0.1		[3000-3500 m]	0.6
	[1000-1500 m]	0.2		[3500-4000 m]	0.7
	[1500-2000 m]	0.3		[4000-4500 m]	0.8
	[2000-2500 m]	0.4		[4500-5000 m]	0.9
				➤ 5000 m	1

Fig.45-Critère Dh (Distance par rapport aux pertes)

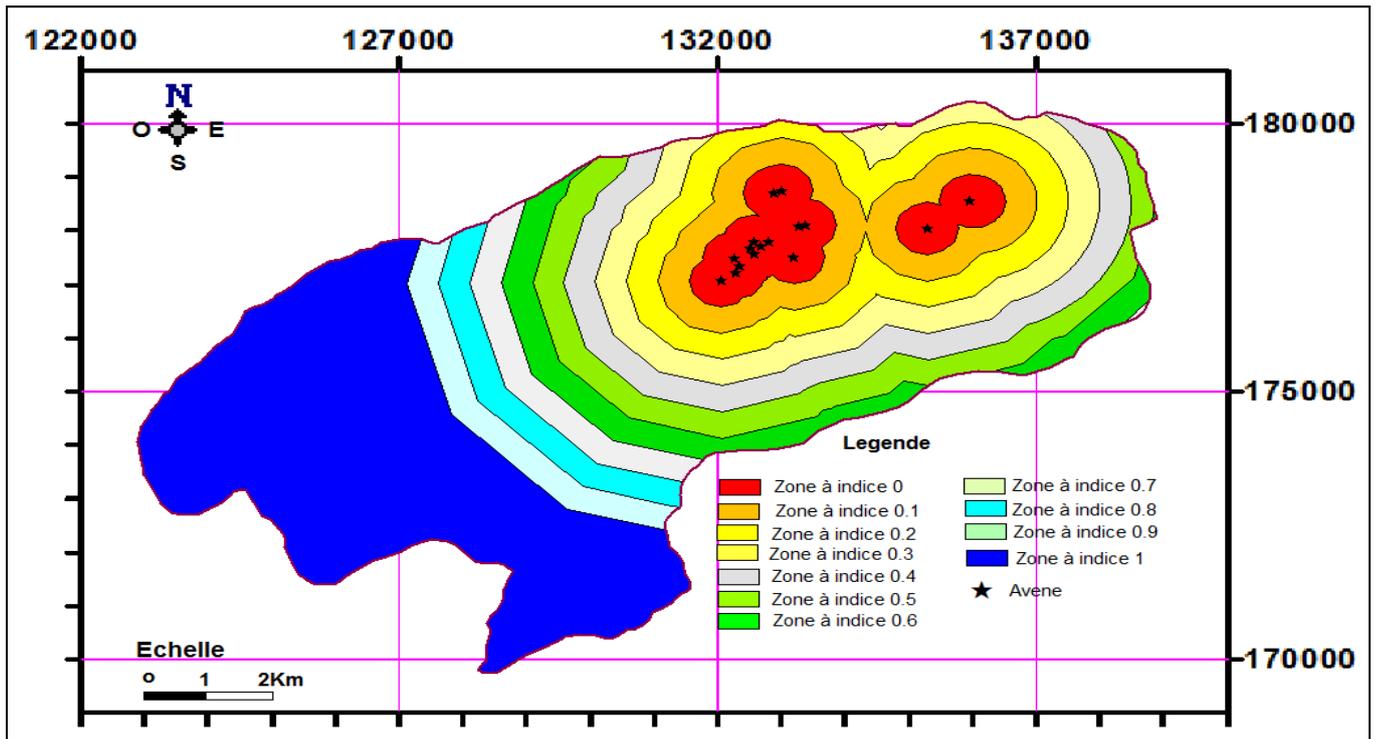


Fig.46- Carte du critère Dh (Distance par rapport à la perte)

2.1.2. Distance par rapport au cours d'eau avec perte (aven) Ds

Elle est définie par une distance entre un affluent et une perte (Distance to sinking stream), ainsi on suppose que les affluents indépendants non connectés au réseau hydrographique mais communiquant avec une perte constituent une situation qui permet l'infiltration des eaux.

Zone	Distance	Indice
	< 10 m	0
	[10-100 m]	0.5
	>100 m	1

Fig.47- Critère Ds (par rapport aux cours d'eau avec perte (aven))

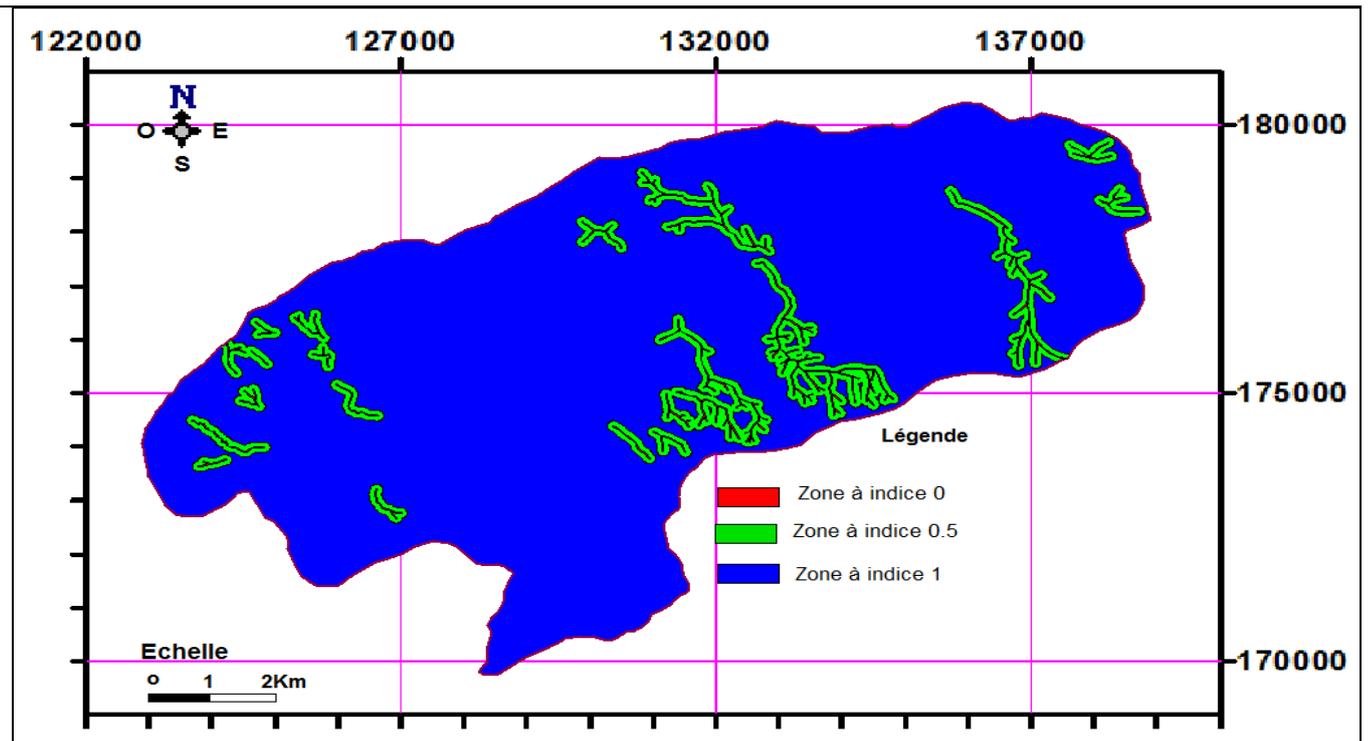


Fig. 48- Carte du critère Ds (par rapport au cours d'eau avec perte (aven))

2.1.3. Pente et végétation Sv

Zone	Pente	Couvert végétal	Indice
	$8 \% < P < 31 \%$	Faible	0.9
	$31 \% < P < 76 \%$	Faible	0.8
	$31 \% < P < 76 \%$	Elevé	0.85
	$8 \% < P < 31 \%$	Elevé	0.95
	$P \leq 8 \%$	-	1

Fig.49- Critère Sv (Pente et végétation)

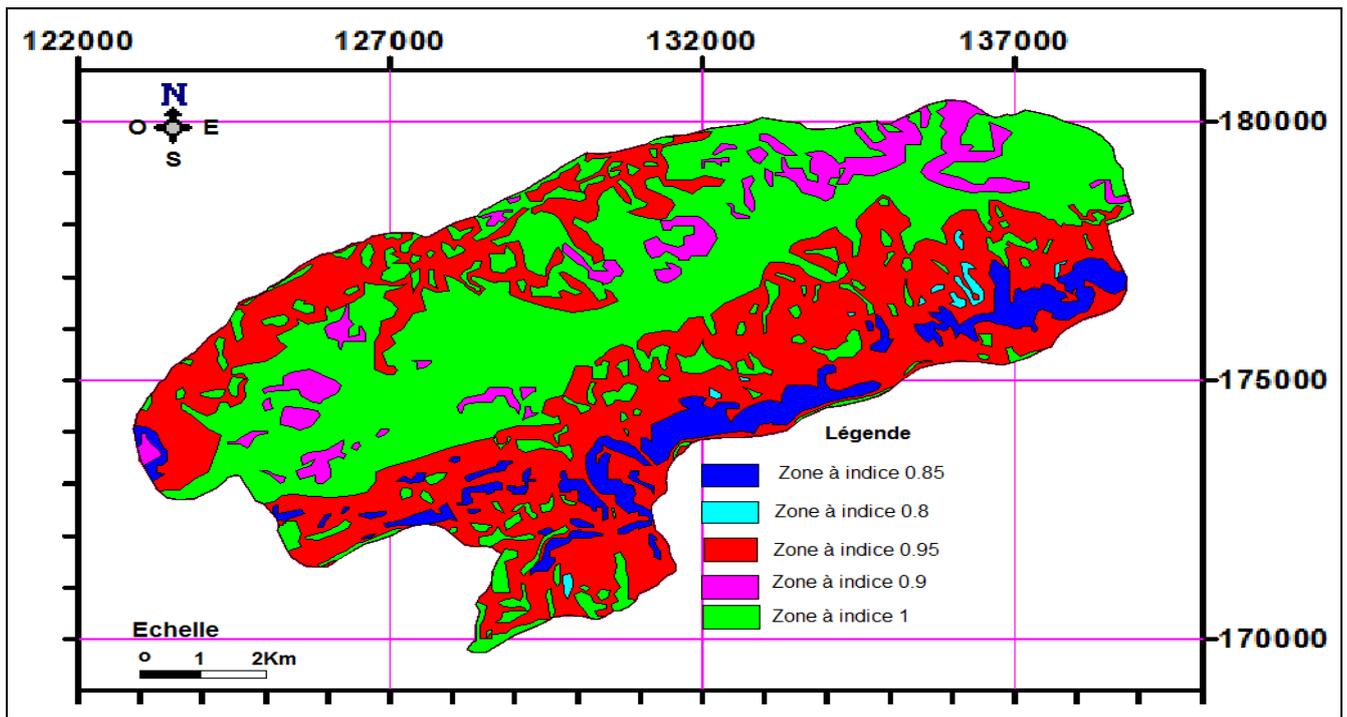


Fig. 50- Carte du critère Sv (Pente et végétation)

2.2. Scénario 2 :

Ceci décrit la situation dans les zones où la recharge est autogène, mais pas aussi une infiltration concentrée par l'intermédiaire d'une perte au pied d'une pente. Le score C dans cette situation est évalué par la combinaison de trois variables: les caractéristiques de surface (sf), la pente (s) et la végétation (v).

Pour obtenir le score C dans le scénario 2, la pente et la végétation (sv), sont pondérées par la surface caractéristique (sf). Par exemple, la protection naturelle donnée par le facteur O est ignorée dans les zones qui possèdent une infiltration concentrée avalée par des pertes, (Vias et al. 2006).

2.2.1. Caractéristique de la surface Sf

PARTIE II : Application

Zone	Etat du Karst	Formation couverte	Indice
	Formation karstique	Absent	0.25
	Dolomie fissuré	Absent	0.75
	Calcaire fissuré	Absent	0.75
	Calcaire fissuré	Imperméable	1
	Dolomie fissuré	Imperméable	1
	Formation non karstique	-	1

Fig.51- Caractéristique de la surface Sf

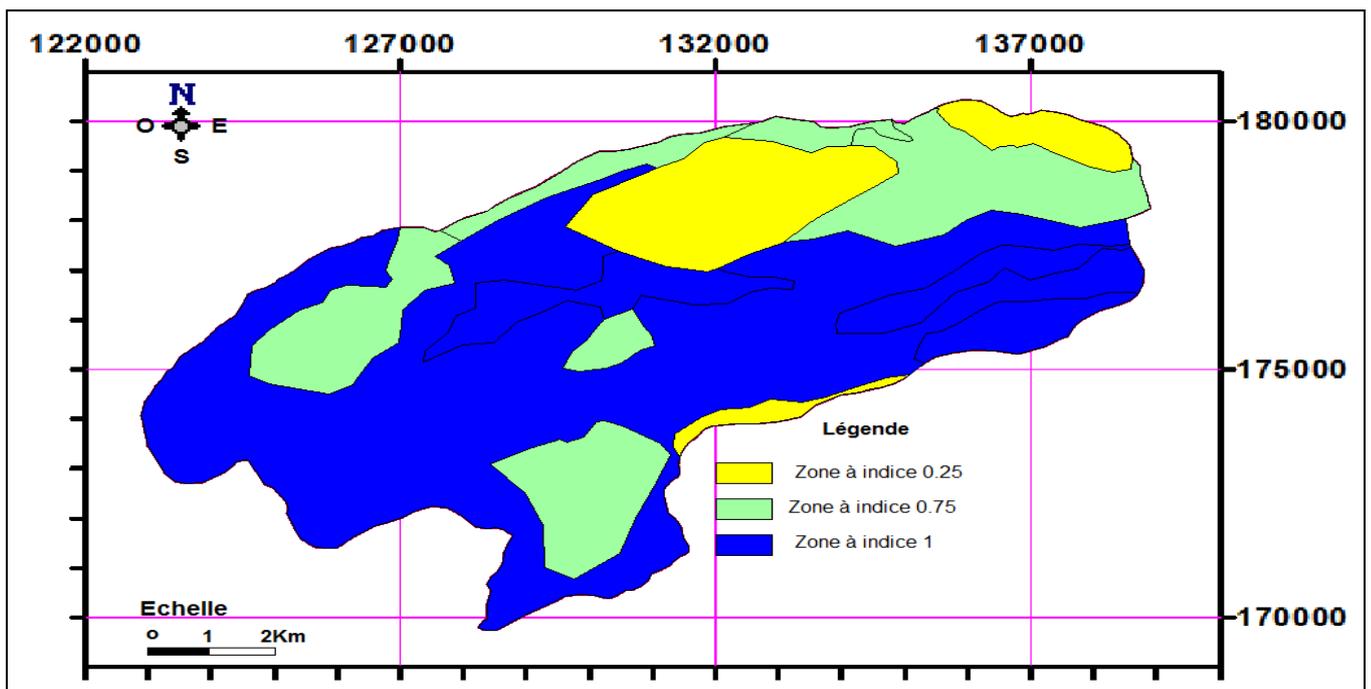


Fig.52- Carte de critère de la Caractéristique du surface Sf

Facteur C

Scenario 1 : Facteur C = $D_h \times S_V \times D_s$

Scenario 2 : Facteur C = $C_f \times S_V$

Dans les deux scenarios, on prend le cas le plus sévère, donc on figure les zones à haute vulnérabilité (protection très basse).

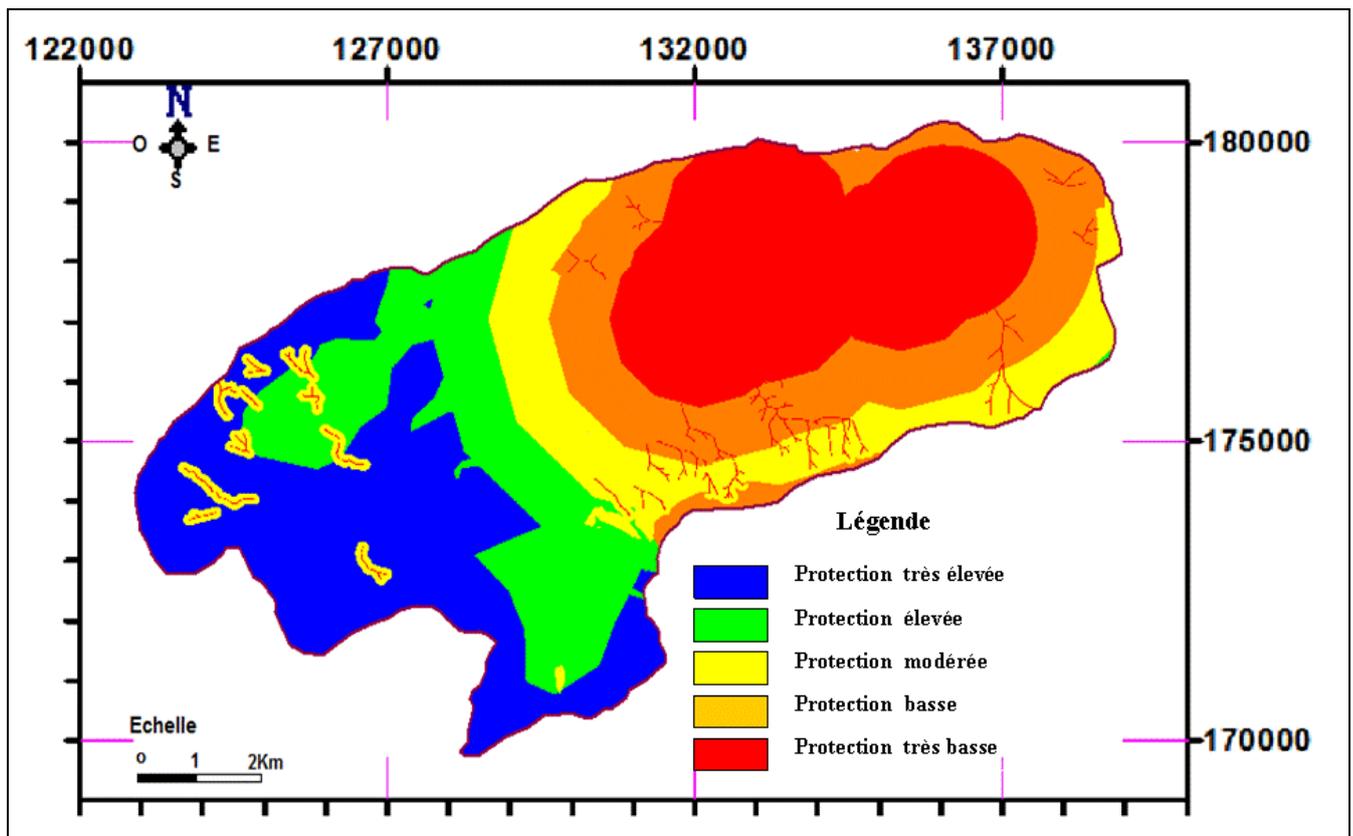


Fig.53- Carte du Facteur C

Tableau 16 - Facteur C

Zone	Facteur O	Efficacité de la protection
	[0 – 0.2]	Très basse
	[0.2 – 0.4]	Basse
	[0.4 – 0.6]	Modérée
	[0.6 – 0.8]	Elevée

	[0.8 – 1]	Très élevée
--	------------	-------------

3. Le Facteur P (Précipitation)

Le facteur P est évalué par deux sous-facteurs: Quantité de précipitation [PQ] et la distribution temporelle de précipitation [PI].

Le sous-facteur [PQ] (Figure 41), décrit l'effet de la quantité de pluie et la recharge annuelle sur la vulnérabilité des eaux souterraines. Il correspond à la moyenne annuelle des précipitations d'une série historique des années humides (Vias et al. 2006).

Le sous-facteur [PI] décrit la répartition temporelle des précipitations dans une certaine période de temps, donc c'est un indice de l'intensité des précipitations. Ce sous-facteur permet une comparaison entre les zones, où les conditions d'intensité des précipitations sont très variables.

Des valeurs plus élevées du facteur P (Tableau 09) indiquent un faible impact sur le niveau de protection offert par le facteur O.

3.1. Le sous-facteur [PQ]

Le sous-facteur (PQ) correspond à la moyenne annuelle des précipitations d'une série historique des années humides (les années dont la pluviométrie est $\geq 724,57\text{mm}$). Cette moyenne est égale à 783,27mm. Cette valeur est comprise entre 400 et 800 mm, ce qui correspond a un indice de 0.3.

3.2. Le sous-facteur [PI]

Dans la série 1976-2011, il ya douze années supérieures ou égales à l'année la plus humide (724,57mm) , cependant nous avons obtenu les données journalières que pour l'année 2008-2009. Cette dernière se caractérise par avec une précipitation annuelle de 871.1 mm qui s'est faite pendant 113 jours. Par conséquent la distribution temporelle est égale à 7.70, d'après la méthode COP on prend un indice de 0.6.

D'où le Facteur P = Pq + Pi

Donc : Facteur P = 0.3+0.6 = 0.9

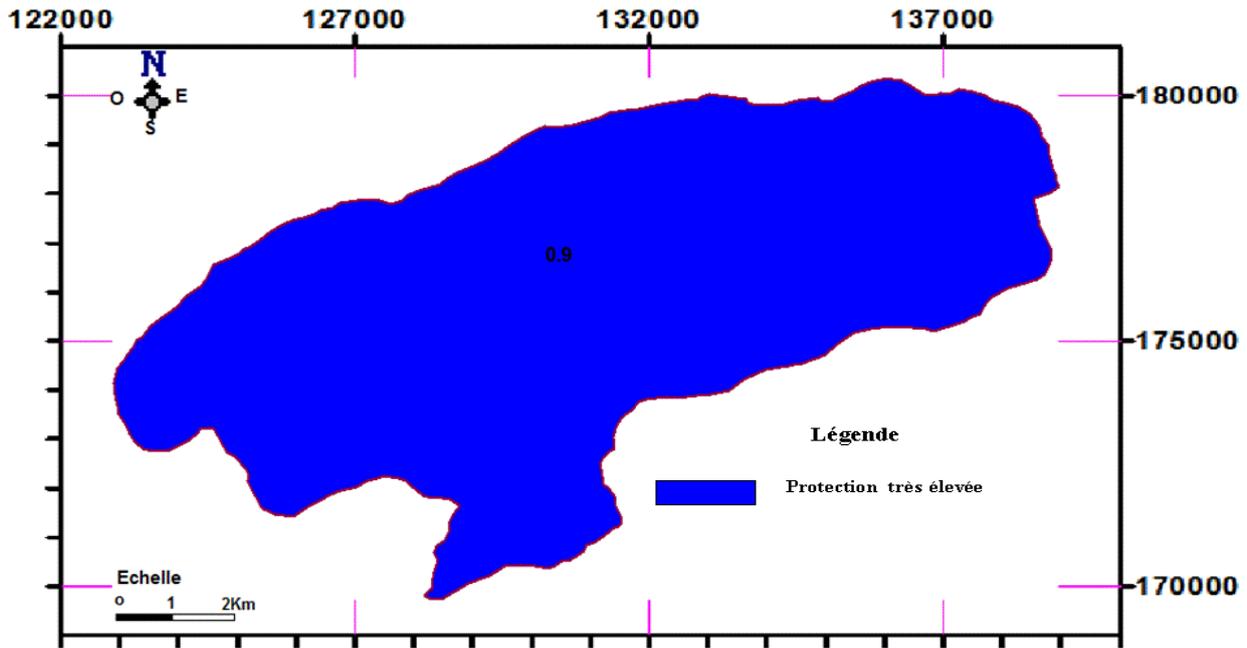


Fig.55- Carte du facteur P

Tableau.17- Facteur P

4. Indice de vulnérabilité de la méthode COP

Les facteurs de la méthode COP sont combinés pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque d'une ressource en eau d'un aquifère karstique, suivant la formule :

$$\text{Indice COP} = C \cdot O \cdot P$$

Les présentations numériques finales des facteurs C, O et P (C, O et P scores) sont multipliés, car chaque facteur, est considéré comme un impact sur l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères karstiques.

Dans la méthode COP, les indices de la vulnérabilité varient entre 0 et 15 (Tableau 18). Suite à la

Zone	Facteur P	Efficacité de la protection
	[0.4 – 0.5]	Très basse
	0.6	Basse
	0.7	Modérée
	0.8	Elevée
	[0.9 – 1]	Très élevée

proposition faite par Vrba et Zaporozec (1994), les valeurs de cet indice sont regroupés en cinq classes de vulnérabilité (très élevé, élevé, modéré, basse et très basse).

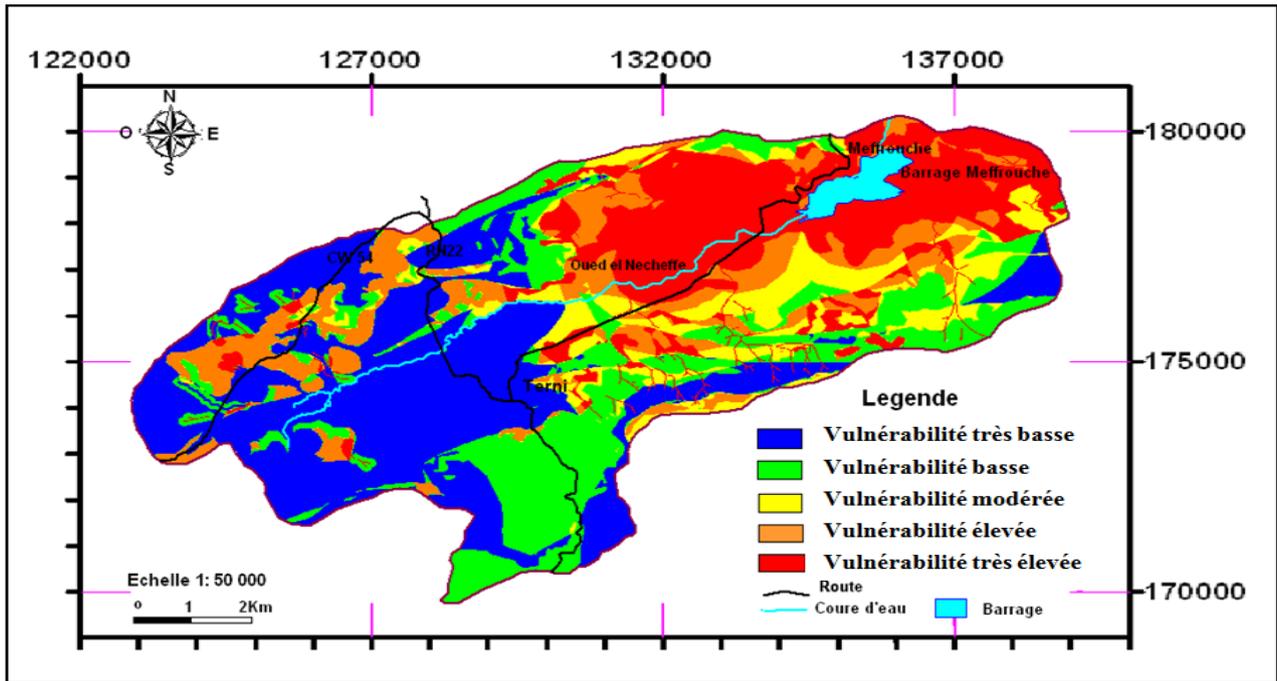


Fig.56- Carte de la vulnérabilité par la méthode COP du bassin versant du Meffrouche

Tableau.18- Indice de vulnérabilité de la méthode COP

Zone	Indice C O P	Classe de vulnérabilité
	[0 – 0.5]	Très élevée
	[0.5 – 1]	Elevée
	[1 – 2]	Modérée
	[2 – 4]	Basse
	[4 – 15]	Très basse

Conclusion

La méthode COP a été conçue pour évaluer la valeur intrinsèque de la vulnérabilité des ressources en eau souterraines des aquifères carbonatés, avec différents degrés de karstification. Elle tient compte de trois facteurs:

C (concentration de l'écoulement), O (couches superposées) et P (précipitation). Le coefficient C

PARTIE II : Application

prend en compte les caractéristiques de l'aquifère carbonaté (karst), lui-même, tandis que le facteur O et le facteur P peut être appliquée à n'importe quel autre aquifère. Mais le facteur O reflète la capacité de la protection naturelle des couches de recouvrement au-dessus la zone saturée à un contaminant conservateur. Le facteur C et le facteurs P sont utilisés en tant que modificateurs du degré de protection fourni par les couches sus-jacentes.

Les valeurs les plus faibles du facteur O (plus grande vulnérabilité) correspondent aux zones où les carbonates affleurent, ainsi que la où le sol est peu développé ou absent. Une vulnérabilité modérée correspond à des valeurs élevées de protection, issus de score du facteur O plus élevés, soit en raison de la présence d'une lithologie à faible perméabilité. Cependant, la vulnérabilité est très faible au niveau des affleurements des dépôts mio-quaternaires au centre du bassin et aux endroits où les sols sont développés.

Les limites de l'intervalle pour les classes de vulnérabilité très élevée et élevée sont affectés principalement en fonction de l'influence du facteur C sur les roches carbonatées où le paysage karstique est développé (abondances des formes karstique) et dans une moindre mesure du facteur P. Cependant, la vulnérabilité très faible correspond à des zones dans les quelles, les facteurs C et P sont peu influents sur la protection. Les classes modérée et faible se réfèrent aux zones où la protection potentielle est faible à moyenne, où les facteurs C et P n'ont pas une influence décisive sur la vulnérabilité.

RESULTATS ET RECCOMANDATIONS

Le bassin versant du Meffrouche couvre une superficie d'environ 90 km², dans les monts de Tlemcen, au Sud-ouest de la willaya, avec une pluviométrie moyenne de 635 mm. Il est composé de deux aquifères calcaro-dolomitique , celle des dolomies de Tlemcen avec une épaisseur comprise entre 20 m à 180 m, recouverte par la formation de marno-calcaire de Raourai (Fig.23), ainsi qu' un second système aquifère définie par un ensemble calcaro-dolomitique (dolomie de Terni), elle est couvert par une formation de marno-calcaire du Crétacé.

Dans le nord Est de la zone étudiée, on note la présence des formes de relief karstique, y compris les lapiazs, avens et dolines, avec quelques grottes à l'Est du bassin.

En effet, le karst du plateau de Terni présente toutes les caractéristiques d'un karst évolué avec des cavités souterraines à maintes reprises mises en évidence par les travaux de forages (Bensaoula, 2006)

En revanche, la méthode COP a été sélectionnée, pour évaluer la valeur de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau souterraine dans le bassin versant du Meffrouche.

1. Résultats et interprétations

La méthode COP a été conçue pour évaluer la valeur de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau souterraine en aquifères carbonatée avec différents degrés de karstification et peut être utilisée avec succès pour tenir compte à la fois des flux diffus et les systèmes de conduite, sous différentes conditions climatiques (en particulier dans les pays méditerranéens).

Les cartes de vulnérabilité établies par la méthode COP, dans le bassin versant du Meffrouche montre une forte vulnérabilité dans la partie Nord Est du bassin (Fig.56), en raison de la présence des formes karstiques telle que les avens, dolines et un degré de karstification important qui est représenté en surface par un champ de lapiez. De plus, ces formes favorisent l'infiltration rapide à partir de la surface vers la zone saturée (Andreo et al. 2005). Dans l'affleurement des roches carbonatées, le facteur O détermine une vulnérabilité très élevée dans les zones nues où l'épaisseur de la zone non saturée est inférieure à 20 m, comme dans le bord Nord-Est de l'aquifère (Fig.49).

En effet, Le facteur C détermine la vulnérabilité élevée dans les zones où les processus d'infiltration sont dominants plutôt que le ruissellement, c'est à dire les zones où les reliefs

Conclusion générale

karstiques ne sont pas couvert par des couches ou des zones imperméables où le karst est très développé et la pente / végétation favorise l'infiltration. La carte montre de petites zones à vulnérabilité élevée dans le Nord-Ouest du bassin et le Sud-Est du barrage. Les avens et les dolines au sein de l'aquifère sont jugés par une vulnérabilité très élevés. Les zones à vulnérabilité très basse correspondent aux affleurements de Marne du Miocène et les limons a Terni, où ces formations à faible perméabilité favorisent le ruissellement vers l'aval du bassin.

Aussi, au niveau de la partie ouest et sud-ouest du bassin (Fig.56), la vulnérabilité est plus faible, principalement en raison de l'absence de phénomène de karstification, qui diminue l'influence de la protection du facteur C fourni par le facteur dominant O.

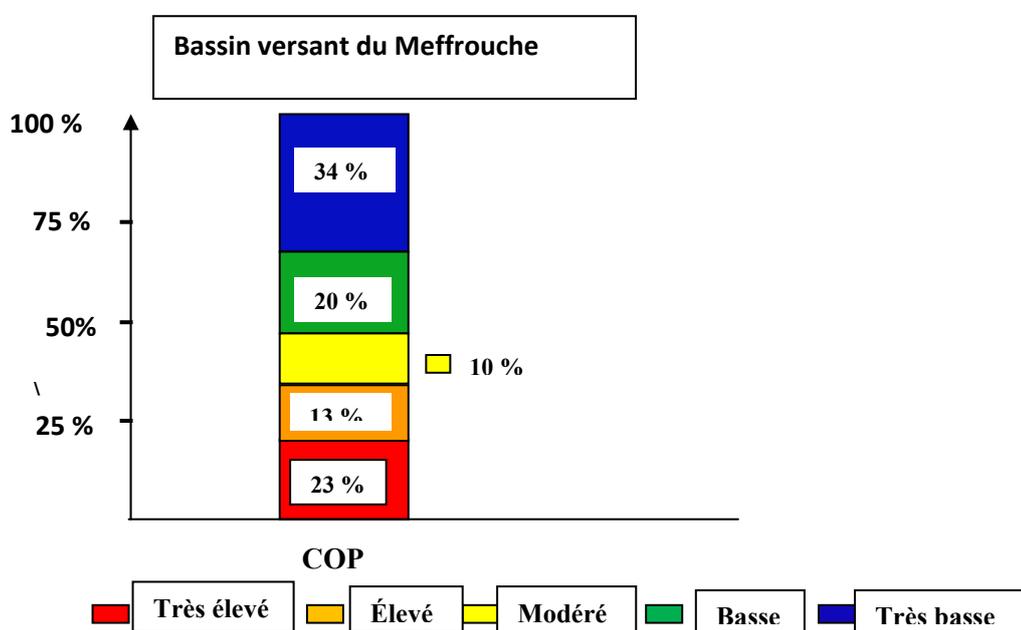


Fig .57- Distribution en %, des classes de la vulnérabilité à travers le bassin versant du Meffrouche.

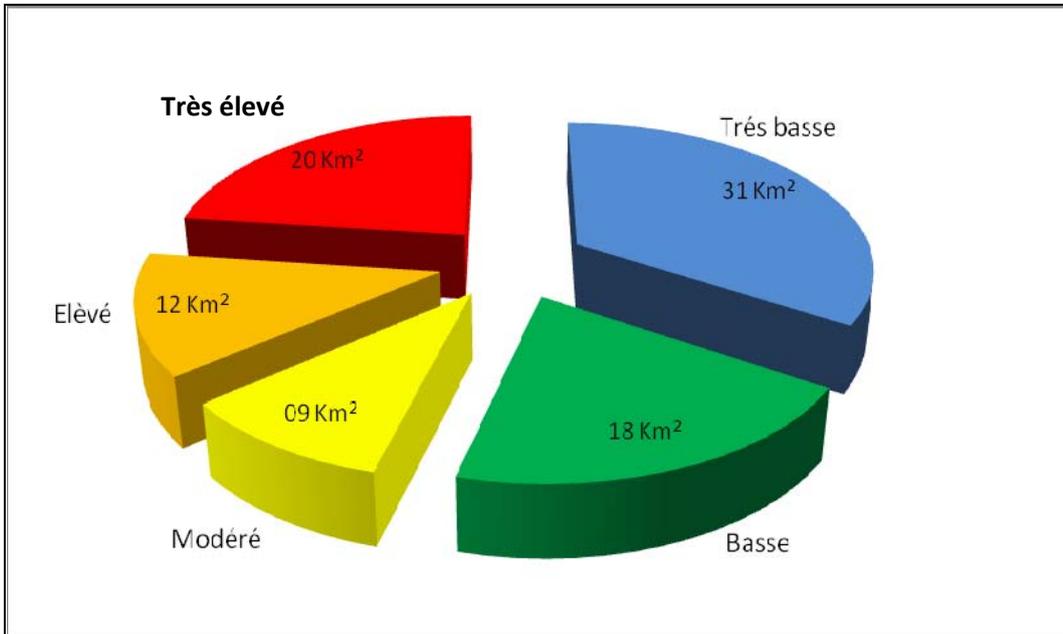


Fig .58- Distribution en Surface de la vulnérabilité à travers le bassin versant du Meffrouche.

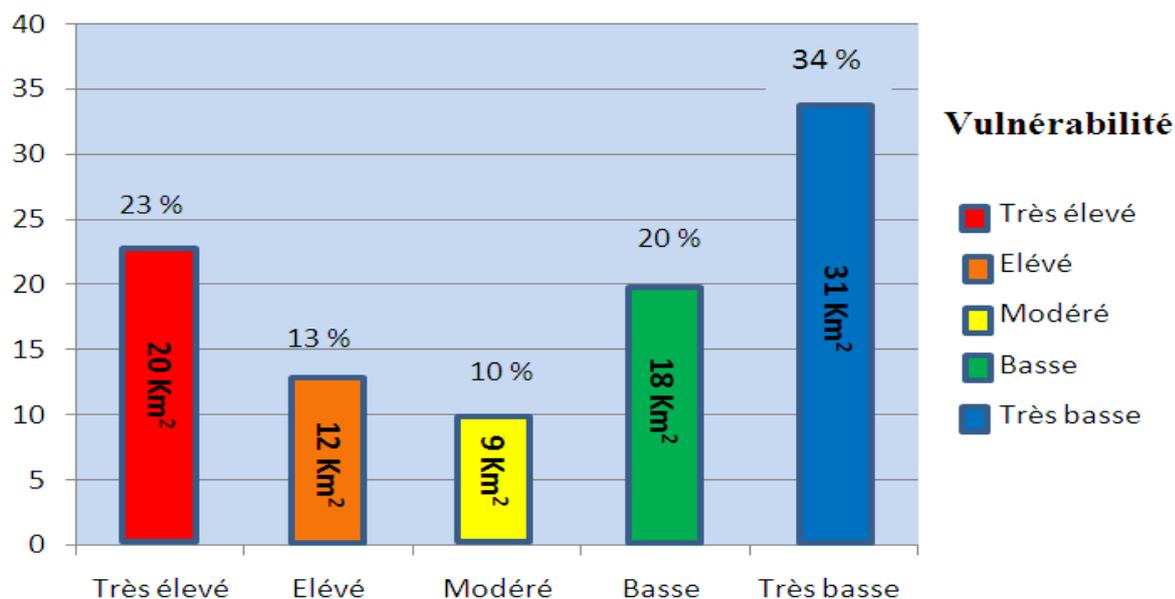


Fig .59- Histogramme de la vulnérabilité par la méthode COP à travers le système Karstique du Meffrouche.

En outre la distribution des classes de la vulnérabilité dans le bassin d'étude illustre 5 importantes classes :

La première classe de très basse vulnérabilité, elle occupe une superficie de 31 Km², représente 34 % de la surface totale du bassin versant (90 Km²).

Une seconde classe correspond à une vulnérabilité très élevée, qui est présentée une surface de 20 Km², avec un pourcentage de 23%.

Tandis qu'une vulnérabilité basse, avec un taux de 20 % (18 Km²) de la surface totale du bassin.

Ainsi que, une vulnérabilité élevée possède une superficie de 12 Km² (13 %), elle présente une répartition aléatoire dans le bassin.

Enfin, la cinquième classe qui correspond à une vulnérabilité modérée, elle présente une superficie de 9 Km², qui totalise 10 % de la superficie totale du bassin.

2. Recommandations

Une grande vulnérabilité au Nord Est du bassin, en raison de la présence des formes karstiques telle que les avens, dolines et un degré de karstification important qui est représenté en surface par un

Conclusion générale

champ de lapiez. Ces formes favorisent l'infiltration rapide à partir de la surface vers la zone saturée (Andreo et al. 2005), dans cette zone, il est préconisé aux propriétaires et exploitants, à procédé aux actions suivantes:

- Travail du sol, gestion des résidus de culture, apports de matière organique favorisant l'infiltration de l'eau et limitant le ruissellement;
- Gestion des intrants, notamment des fertilisants, des produits phytosanitaires et de l'eau d'irrigation ;
- Maintien ou création de haies, talus, murets, fosses d'infiltration et aménagements ralentissant ou déviant l'écoulement des eaux ;
- Restauration ou entretien d'un couvert végétal spécifique ;
- Réduction des volumes d'eau d'irrigation ou interdiction de l'irrigation;
- Gestion ou aménagement d'un système de drainage;
- Façons de travailler le sol limitant au minimum les écoulements dans le sens de la perte.
- Etablissement d'un périmètre de protection des captages d'eau (source, forage), dans les zones à vulnérabilité élevée ;
- Interdiction de toute sorte d'élevage et pâturage, dans les zones à haute vulnérabilité.
- Surveillances qualitatives et périodiques de l'eau, afin de limiter les risques de pollution.
- Préparation à des Scénaris pessimistes.
- Etablir un plan d'actions prévisionnelles en cas d'une pollution ponctuelle ou diffuse.
- Prise en considération les zones à haute vulnérabilité dans l'établissement des plans d'aménagement (P.D.A.U).
- Maintien de surfaces en herbe, en bordure des cours d'eau ou de la perte (Aven, champ de lapiez)
- Interdiction de toute sorte de rejet d'eau eau usée dans les zones à très haute vulnérabilité.
- Réalisation de stations d'épuration des eaux d'assainissements en amont du barrage afin d'éliminer la contamination des eaux de ce dernier.

Conclusion générale

Le risque réel de nuisance sur la qualité des eaux souterraines du bassin du Meffrouch dépendra donc ensuite de l'aléa réel présent. Des actions devront être menées pour écarter le risque de pollution des eaux de surface qui peuvent s'infiltrer dans le karst.

Conclusion

La méthode COP a été conçue pour évaluer la valeur de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau souterraine des aquifères carbonatés avec différents degrés de karstification et sous différentes conditions climatiques (en particulier dans les pays méditerranéens).

En outre, la méthode COP a établi les lignes directrices détaillées, tableaux et les formules pour évaluer la vulnérabilité à la base des variables, paramètres et facteurs à utiliser par l'approche européenne proposée par COST Action 620 (Daly et al 2002; Zwahlen 2004). Ce procédé peut être appliqué en utilisant des données géo-environnementales disponibles, certains travaux sur le terrain, mais avec une grande entrée de système d'information géographique (SIG).

En revanche, là où la vulnérabilité est très élevée, nous la trouvons dans l'affleurement des roches carbonatées, parfois ces derniers parachèvent par des pertes (avens et dolines) dolines et un degré de karstification important qui est représenté en surface par un champ de lapiez, cette vulnérabilité repartie dans la partie extrême Est et le centre du bassin, barrage et au village du Meffrouche, dont cette dernière totalise 23%.

Tandis que, la vulnérabilité élevée situé dans le Nord-Nord Ouest du bassin, il ya une autre partie qui contour la vulnérabilité très élevée, elle s'étend sur 13% de la surface du bassin, avec laquelle, elle est repartie en fragments des sillons dans la classe précédente.

Finalement, la méthode COP représente une importante pas en avant dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans les aquifères karstiques, notamment en pays Méditerranée.

Conclusion générale

En Algérie, en général et dans la wilaya de Tlemcen en particulier, les eaux karstiques contribuent pour une large part au développement socio-économique de la population (Bensaoula, 2007). Ces ressources en eau potable constituant un enjeu très important, sont très sensibles à la pollution.

De plus, la législation concernant la protection des eaux souterraines a pour objet la mise en disponibilité d'une eau propre et potable pour le citoyen. Mais elle reste insuffisante sans l'utilisation des outils nouveaux qui permettraient d'assurer une meilleure protection contre la pollution. La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines reste l'un de ces outils.

Par sa constitution géologique, le bassin versant du Meffrouche est très riche en potentialités en eau. Les formations carbonatées qui constituent les principaux réservoirs d'eau souterraines sont très karstifiées et par conséquent particulièrement vulnérables à la pollution. C'est pourquoi ils nécessitent une protection particulière.

En effet, le karst du plateau de Terni présente toutes les caractéristiques d'un karst évolué avec des cavités souterraines à maintes reprises mises en évidence par les travaux de forages (Bensaoula, 2006).

La méthode COP a été sélectionnée, après avoir fait une étude bibliographique des méthodes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution dédiées aux différents types de milieux aquifères (en particulier dans les pays méditerranéens), pour évaluer la valeur de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau souterraine dans le bassin versant du Meffrouche.

Ainsi, les cartes de vulnérabilité établies par la méthode COP, dans le bassin en question, montre une forte vulnérabilité dans sa partie Nord Est (Fig.49), en raison de la présence des formes karstiques telle que les avens, dolines et un degré de karstification important qui est représenté en surface par un champ de lapiez. Il faut noter que le barrage du Meffrouche se localise dans cette zone. Les eaux qui y sont mobilisées (aussi bien superficielles que souterraines) sont sérieusement menacées de pollution.

Malgré cela, une étude pédologique détaillée est indispensable par la suite, car la couverture pédologique joue un rôle important dans la protection des aquifères karstiques.,

Les faits nous amènent à conclure que, la carte de vulnérabilité obtenue par la méthode COP représente un important pas en avant dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans les aquifères karstiques, notamment en pays méditerranéens.

Conclusion générale

Finalement, les cartes de vulnérabilité constituent un outil indispensable sur lequel l'hydrogéologue pourra fonder et argumenter sa délimitation des périmètres de protection. Comme le résultat de la méthode COP est susceptible d'être pratique et utile pour les élaborateurs des plans d'aménagement urbain au risque associée aux effondrements karstiques par soutirage et pour les décideurs d'exécution de la protection des eaux souterraines par le risque de la détérioration de la qualité des eaux souterraines sous l'action de déversement des eaux d'assainissement et usées dans les zones a grande vulnérabilité.

Bibliographie

- Albinet M. et Margat J. (1975) :** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine; actes du colloque de Moscou, Aout 1971 : IAHS- AISH, publ. No . 103.
- Assi A. (2007):** Vulnerability Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers (Ramallah-Al Bireh District), House of Water and Environment, Palestine, 34p.
- Bakalowicz M. (1979) :** Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse d'Etat, Univ. Paris VI, 257 p.
- Bakalowicz M. (1995):** La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement. Hydrogéologie, 4: 3-21p.
- Bakalowicz M. (1999) :** Connaissance et gestion des ressources en eau souterraines dans les régions karstiques. Guide technique n°3, Lyon, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 44 p.
- Bakalowicz M. et Dörfliger N. (2005) :** Ressources en eau du karst : un enjeu pour le bassin Méditerranéen. Géosciences - l'eau souterraine, BRGM 2, 26-31p.
- Bakalowicz M. (2010) :** Karst et ressources en eau souterraine : un atout pour le développement des pays méditerranéens, Sécheresse en ligne 21, 6p.
- Belabaci A. (2004) :** Etude des petits aménagements hydro-agricole dans le bassin versant de Meffrouche, Mémoire d'Ingénieur, Univ. Tlemcen, 117p.
- Benest M. (1985) :** Evolution de la plate forme de l'ouest Algérien et du Nord-Est Marocain au cours du jurassique supérieur et au début du Crétacé : Stratigraphie milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. Thèse de Doctorat. Géol, Univ. Lyon. Fasc 1, 367p, 107 fig.
- Benest M., Bensalah M., Bouabdellah H. et Ouardas T. (1999):** La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine Tlemecénien (Avant pays Tellien d'Algérie occidentale): Stratigraphie, paléoenvironnement, dynamique sédimentaire et tectonique - genèse alpine. Bulletin du service géologique de l'Algérie, vol.10, no2.
- Bensaoula F. (1992) :** carte hydrogéologique d'oued Mimoun à la 1/50000 et notice explicative (Algérie). Thèse de magister, Univ. Oran, 359p, 107 fig.
- Bensaoula F. (2004) :** Ressources en eau et développement agricole dans le plateau de Terni (Monts de Tlemcen nord-ouest algérien),7P.
- Bensaoula F., Bensalah M. et Adjim M. (2005):** Les forages récents dans les aquifères karstiques des Monts de Tlemcen. Laryss journal, recherche 2004- 2005, n° 04, Juin 2005, pp.7-15.

Bibliographie

- Bensaoula F. (2006)** : Karstification et vulnérabilité des eaux karstiques. Mise en point d'outils pour leur protection (Application aux Monts de Tlemcen – Ouest Oranais). Thèse de doctorat d'état, Univ, Tlemcen, 183 p, 121 fig.
- Bensaoula F. (2007)** : Etude de la karstification à partir des données de forage : le cas des Monts de Tlemcen (Algérie). *Karstologia* n° 49, 2007. 15-24p.
- Bensaoula F., Adjim M. et Bensalah M. (2007)** : L'importance des eaux karstiques dans l'approvisionnement en eau de la population de Tlemcen. *Larhyss Journal* n° 06, Décembre 2007, 57-64 pp.
- Collignon B. (1986)** : Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des monts de Tlemcen. Tome 2 : les forages hydrauliques dans les roches karstiques. Thèse de Doctorat, Univ, Aviron, 288p.
- DE RNI S. (2011)** : Reflexion sur les critères de choix d'une méthodologie pour la cartographie de vulnérabilité a la pollution des eaux souterraines : cas du bassin versant de la Tafna. Mémoire de Magistère. Univ, Tlemcen 134 p, 35 fig.
- Derruau. (1983)** : Précis de géomorphologie. Livre, 7eme Édition, Masson, 63 Fig, 514p
- Dörfliger N., Jauffret D. et Loubier S. (2004)** : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté. Rapport « final » BRGM/RP-53576-FR, Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2003 - PSP03FRC09, 144P.
- Dorfliger N. et Plagnes V. (2009)** : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. BRGM RP-57527-FR, 105 pp, 55 ill.
- Dorfiger N. (2011)** : Influence du contexte méditerranéen sur la structure et le fonctionnement des aquifères karstiques de la gestion quantitative à la caractérisation de la vulnérabilité par approche multi-paramètres, synthèse des travaux de recherche en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Université Montpellier 2. Ecole doctorale :SIBAGHE, 238p.
- Doumergue. (1915)** : Carte géologique de terni 300 à échelle 1/25000.
- El Bennoury A. (2002)** : Protection des captages d'eau souterrain destinés à l'alimentation humaine. *Revue H.T.E. N° 122 Service eau et environnement –SCET – Maroc*, 6p.
- Felidj M. (2011)** : Contribution à l'étude des plantes Aromatiques et Médicinales du parc national de Tlemcen : Taxonomie, Ecologie et caractéristique chimiques. Thèse de doctorat d'état, Univ, Tlemcen, 179 p.
- FORD D. et WILLIAMS P. (2007)**: *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, 562 p.

Bibliographie

- Gevin P. (1952)** : Eléments de technologie des barrages Algériens et de quelques ouvrages annexes, le projet de barrage sur l'oued Meffrouche. Tome 1, La géologie et les problèmes de l'eau en l'Algérie, 19p.
- Guardia P. (1975)** : Géodynamique de la Marge Alpine du continent Africain d'après l'étude de l'Oranie nord Occidentale, Relations structurales et paléogéographiques entre le rif externe, le tell et l'avant pays atlasique. Thèses, Univ, Nice, 257 pages, 5 planches, 141 figures.
- Goldscheider N., Klute M., Sturm S. et Hötzl H. (2000)** : The PI method – a GIS- based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. – Z. angew. Geol., 46 (2000) 3: 157-166; Hannover.
- Goldscheider N. (2005)**: Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. Hydrogeol J 13, 555–564P.
- Grégory D. (2011)** : Cavités et remplissages de la nappe karstique de Charente (bassin de la Touvre, La Rochefoucauld), Thèse de Doctorat, Univ. Michel de montaigne. Bordeaux 3 , 317P.
- Jeannin P. (1996)** : Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques, Thèse Doctorat. Univ, NEUCHATEL, 237P.
- Journal Officiel de la République Algérienne 23eme année n° 01 du 03/01/1984**, Décret n° 84-05 du 02 Janvier 1984 relatif à la mise en œuvre de l'article 143 de la loi n° 83-17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux.
- Journal Officiel de la République Algérienne N° 37 du 16/06/1996**, ordonnance n°96-13 du 28 Moharram 1417 correspondant au 15 juin 1996 modifiant et complétant la loi n°83-17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux.
- Journal Officiel de la République Algérienne N° 83 du 08/11/1998**, décret exécutif n°98- 348 du 17 Rajab 1419 correspondant au 7 novembre 1998 fixant les conditions et modalités d'application de l'article 143 de la loi n°83-17 du 16 juillet 1983, modifié et complété, portant code des eaux.
- Journal Officiel de la République Algérienne N° 43 du 20/07/2003**, Loi n° 03/10 du 19 jourmada el Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre de développement durable.
- Journal Officiel de la République Algérienne N° 60 du 04/09/2005**, loi n°05-12 du 28 Jourmada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau.
- Marchal J-P. (2007)** : Eaux destinées à la consommation humaine. Guide pour la protection des captages publics, Départements du Gard et de l'Hérault. BRGM/RP-55699-FR ; 155P.

Bibliographie

- Kedari F. et Lalem I. (2001) :** Etude des travertins des sources karstiques anciennes et actuelles dans les monts de Tlemcen. Mémoire d'Ingénieur, Dpt. Sc.Ter, Univ. Tlemcen , 41fig, 107p.
- Kerrouche A. et Guenchi L. (2007) :** Inventaire des sources captés du grand Tlemcen .Etude hydrogéologique et hydrochimique. Mémoire d'Ingénieur, Dpt. Sc. Ter, Univ. Tlemcen , 24fig, 67p.
- Mangin A. (1975) :** Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de Doctorat, Univ. Dijon, 298 p.
- Marsaud B. (1996) :** Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse de Doctorat, Univ. Orsay Paris Sud, Document BRGM n° 268, 305 p.
- Marin I., Dörfliger N.et Andreo B. (2011):** Comparative application of two methods (COP andPaPRIKa) for groundwater vulnerability mapping in Mediterranean karst aquifers (France and Spain).Environ. Earth. Sc., 15 p, published on line on 21st April 2011.
- Monbaron M. (2010) :** Cours pédagogique de Géomorphologie générale : 97-112 PP.
- Nehari K. (2004) :** Contribution à l'étude de la vulnérabilité à la pollution des aquifère de la région de Tlemcen, Mémoire d'Ingénieur, Dpt. Hydr , Univ. Tlemcen, 117p.
- OFEFP (2004) :** Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 24P.
- OFEFP (2002) :** Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication. L'environnement pratique, Instructions, 15p.
- Muet P. et Edith V. (2011) :** Stratégies de protection des ressources karstique utilisées pour l'eau potable, guide pratique. Agence de l'eau, Adour-Garonne, 84P.
- Pranville J., Plagnes V., Rejba F.et Tremoulet J.(2007) :** Cartographie de vulnérabilité des eaux souterraines de la partie sud de Causs de Gramat. Université Pierre et Marie Curie. Paris 6, UMR Sisyphe, 143p, 68 fig.
- Ravbar N. et Goldscheider N. (2007):** Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia, ACTA CARSOLOGICA 36/3, 397-411, POSTOJNA 394-411p
- Ravbar N. et Goldscheider N. (2009):** Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. Hydrogeol J 17, 725–733P.
- RODET J. (1981) :** Contribution à l'étude du karst de la craie. L'exemple normand et quelques comparaisons. Thèse 3ème cycle, Uni. Paris 1, Institut de Géographie, 230 p.
- Roger C. (1984) :** Géomorphologie, Livre, Armand colin, 65fig, 437p.

Bibliographie

Schnebelen N. et al. (2002) : gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise . Rapport BRGM/RP - 51178-FR.

Valois R. (2011) : Caractérisation structurale de morphologies karstiques superficielles et suivi temporel de l'infiltration à l'aide des méthodes électriques et sismiques. Thèse Doctorat. Univ. PARIS 6, 226P.

Vías J.M., Andreo B., Perles M., Carrasco F., Vadillo I. et Jiménez P. (2002): Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. Karst and Environment, 75-83P.

Vincent M., Stéphanie P. et Annabel G. (2005) : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-calais. Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2004PSP04NPC35, 113p.

Vrba J. et Zaporozec A. (1994): Guide book on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contributions to Hydrogeology (IAH), 16: 131 p.; Hannover.

Zhou W., Beck F. et Stephenson J. (1999): Investigation of ground water flow in karst areas using component separation natural potential measurements. Environmental Geology, 37, 19-25P.

Zwahlen F. (2004): Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karts) Aquifers COST Action 620. European commission, directorate-general XII Science, research and development, Brussels, Luxembourg, 297p.

Directions :

ANRH de Tlemcen (2012-2013) : Données météorologiques de la station de Meffrouche .

Cadastre de Tlemcen (2011-2012) : Photos aériennes du bassin versant du Meffrouch.

DRE de Tlemcen (2012-2013) : Forage des environs de Terni et analyses physico-chimiques des eaux de sondages .

Annexes

1- Méthode PI

T – Sol superficiel

eFC[mm] jusqu'à 1m épaisseur	T
> 250	750
> 200-250	500
>140-200	250
>90-140	125
>50-90	50
<50	0

Recharge – R

Recharge [mm/an]	R
0-100	1,75
>100-200	1,50
>200-300	1,25
>300-400	1,00
>400	0,75

S -Sous-sol

Type de sous-sol (distribution de la taille des grains)	S
Argile	500
Argile, faiblement silteuses	400
Faiblement argilo-sableux	350
Silteux-argileux, limoneux argileux	320
Limoneux argileux	300
Argileux silteux, argileux sableux	270
Silteux limoneux	250
Faiblement argilo-limoneux, argilo-silteux-limoneux	240
Très limoneux silteux, limono-silteux	220
Très argilo-sableux, sablo-silto-limoneux, faiblement sablo-limoneux, limoneux silteux, argilo-silteux	200
Limoneux sableux, faiblement limoneux silteux	180
Faiblement argilo-silteux, sablo-limono-silteux, silt, très sablo-limoneux	160

S -Sous-sol

Type de sous-sol (distribution de la taille des grains)	S
Très argilo-sableux, argilo-sableux, limoneux-silteux-sableux	140
Sablo-silteux, très limono-sableux	120
Limono-sableux, très silto-sableux	90
Sableux faiblement argileux, sable silteux, gravier et sable argileux	75
Sable faiblement limoneux, gravier sablo-silteux	60
Sable faiblement silteux, sable faiblement silteux avec graviers	50
Sable	25
Sable avec graviers, gravelo-sableux	10
Graviers, graviers avec brèches	5
Matériel volcanique non consolidé (pyroclastique)	200
Tourbe	400
Sapropèle	300

Lithologie – L

Lithologie	L
Argiles, mames, silts	20
Grès, quartzite, roche volcanique, plutonite, métamorphites	15
Grès poreux, roche volcanique poreuse	10
Conglomérat, brèches, calcaire, roche dolomitique, roche gypsifère	5

Fracturation – F

Fracturation	F
Non jointifs	25
Faiblement jointifs	4
Faiblement karstifié, phénomènes karstiques colmatés	1
Karstifié modéré ou phénomènes karstiques non colmatés	0,5
Fortement fracturé ou fortement karstifié et non colmaté	0,3
Epikarst développé, non colmaté	0
Non connu	1

Épaisseur de chaque strate [m] – M

Bedrock – B

$$B = L * F$$

Pression artésienne – A
1500 points

Annexe 1 : Détermination du critère P de la méthode PI, d'après la méthode d'Holting (1995)

Annexes

Le résultat de P peut être classé en 5 classes de vulnérabilité comme il est exprimé dans le tableau ci-dessous (Hörling, 1995)

Résultat P	Efficacité de la protection	P-facteur
0-10	Très bas	1
> 10-100	Bas	2
> 100-1000	Modérée	3
> 1000-10000	Elevée	4
> 10000	Très élevée	5

Annexe 2: Classes de vulnérabilité de la méthode PI

La méthode d'Hörling est une méthode intégratrice ; elle détermine une valeur d'indice pour 5 classes différentes, en considérant d'une part l'épaisseur des formations, la nature du sol, la recharge (quantité en mm), la lithologie et l'intensité de fracturation.

Le critère **I** caractérise les conditions d'infiltration : la valeur de I est comprise entre 1 et 0, avec $I = 1$ correspondant à une infiltration diffuse, $0 < I < 1$ pour des écoulements latéraux de surface et de subsurface, et $I = 0$ correspond à une infiltration ponctuelle.

La caractérisation repose sur la prise en compte de concepts hydrologiques tels que l'existence d'écoulement latéral, d'écoulement Hortonien et d'écoulement préférentiel via une perte ou un gouffre.

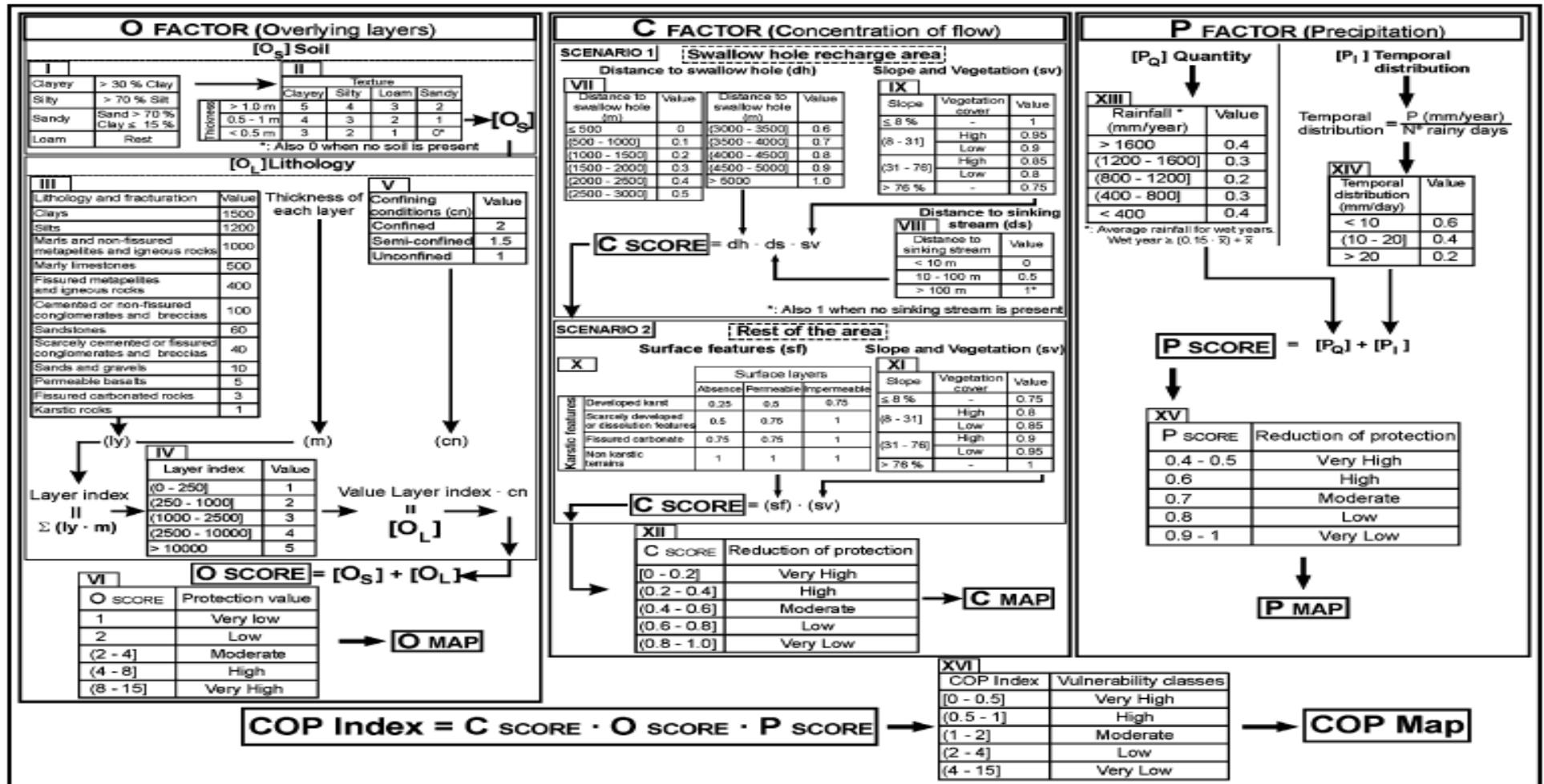
Le Facteur de protection Π résultant est la multiplication de l'indice des critères P et I, soit $P * I$; $\Pi > 1$ ou $\Pi = 1$ signifie un degré de protection très faible, une vulnérabilité extrême à la pollution ; $\Pi = 5$ signifie un fort degré de protection et une très faible vulnérabilité (Dörfli et al, 2004) .

	Carte de vulnérabilité		Carte P		Carte I	
	Description	π - facteur	Description	P- facteur	Description	I-facteur
Rouge	Extrême	0-1	Très faible	1	Très élevée	0.0-0.02
Orange	Haute	> 1-2	Faible	2	Elevée	0.4
Jaune	Modérée	> 2-3	Modérée	3	Modérée	0.6
Vert	Faible	> 3-4	Elevée	4	Faible	0.8
Bleu	Très faible	> 4-5	Très élevée	5	Très faible	1.0

Annexe 3: Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST 620)

Annexes

2- Méthode COP



Annexe 4: Diagramme de la méthode COP, avec les différents facteurs C,O,P (Zwahlen., 2004)

Annexes

L'indice COP est obtenu à partir de la relation suivante :

$$COP-induce = (C \text{ résultat}) * (O \text{ résultat}) * (P \text{ résultat}).$$

COP indice	Classes de vulnérabilité
[0-0.5]	Très élevée
[0.5-1]	Elevée
[1-2]	Modérées
[2-4]	Faible
[4-15]	Très faible

Annexe 5: Indice « COP » utilisé pour la cartographie de la vulnérabilité (Vias et al., 2002)

Lithologie et fracturation	Valeur « formations » V « f »	Indice « formations » I « f » (= V « f » * épaisseur (m))	Valeur de O _L
Argiles	1500	[0-250]	1
Silt	1200	[250-1000]	2
Marnes et métapellites and roches ignées non fissurées	1000	[1000-2500]	3
Calcaires marneux	500	[2500-10000]	4
Métapellites et roches ignées fissurées	400	[> 10000]	5
Conglomérats et brèches cimentées non fissurés conglomerates and breccias	100		
Grès	60		
Conglomérats et brèches faiblement cimentés ou fissurés	40		
Sable et graviers	10		
Basaltes perméables	5		
Roches carbonatées fissurées	3		
Roches karstifiées	1		

Annexe 6 : Indice pour OL (Vias et al., 2002)

Annexes

Distance à la perte (m)	Valeurs de dh	Pente	Végétation	Valeur Sv	Distance au cours d'eau avec pertes	Valeurs ds
>= 500m	0	< = 8 %	-	1	< 10 m	0
[500-1000]	0.1	8-31 %	Yes	0.95	10-100 m	0.5
[1000-1500]	0.2	8-31 %	No	0.9	> 100 m	1*
[1500-2000]	0.3	31-76 %	Yes	0.85		
[2000-2500]	0.4	31-76 %	No	0.8	* même s'il n'y a pas de cours d'eau avec une perte	
[2500-3000]	0.5	>76 %	-	0.75		
[3000-3500]	0.6					
[3500-4000]	0.7					
[4000-4500]	0.8					
[4500-5000]	0.9					
> 5000	1.0					

**Annexe 7: Composée du flux pour déterminer l'indice C selon le scénario A,
C= (dh)*(ds)*(sv) (Vias et al., 2002)**

	Formations superficielles			Pente	Végétation	Valeur
	Absence	Perméable	Imperméable			
Phénomènes karstiques				< = 8 %	-	0.75
Karst développé	0.25	0.5	0.75	8-31 %	Oui	0.8
Objets karstiques peu développés ou objets de dissolution	0.5	0.75	1	8-31 %	Non	0.85
Karst fissuré	0.75	0.75	1	31-76 %	Oui	0.9
Absence de phénomènes karstiques	1	1	1	31-76 %	Non	0.95
				> 76 %	-	1
	Sf					Sv

**Annexe 8: Composés du flux pour déterminer l'indice C pour le scénario B, C=(sf)*(sv)
(Vias et al., 2002)**

Annexes

Méthode EPIK et RISKE

La protection selon la formule suivante :

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l$$

Avec : $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficients de pondération de chacun des critères
 E_i, P_j, I_k, K_l : valeur de chacun des critères indexés

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs des critères indexés de la méthode EPIK, la valeur la plus basse correspondant à la situation la plus vulnérable :

Epikarst			Protective cover				Infiltration conditions				Karst development		
E ₁	E ₂	E ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	I ₁	I ₂	I ₃		K ₁	K ₂	
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3		1	2	

Le tableau ci-dessous récapitule les facteurs de pondération appliqués aux critères de la méthode EPIK, le facteur le plus important est appliqué au critère qui contribue principalement à la valeur du facteur de protection :

Critère	E	P	I	K
Facteur de pondération	α	β	γ	δ
Poids relatif	3	1	3	2

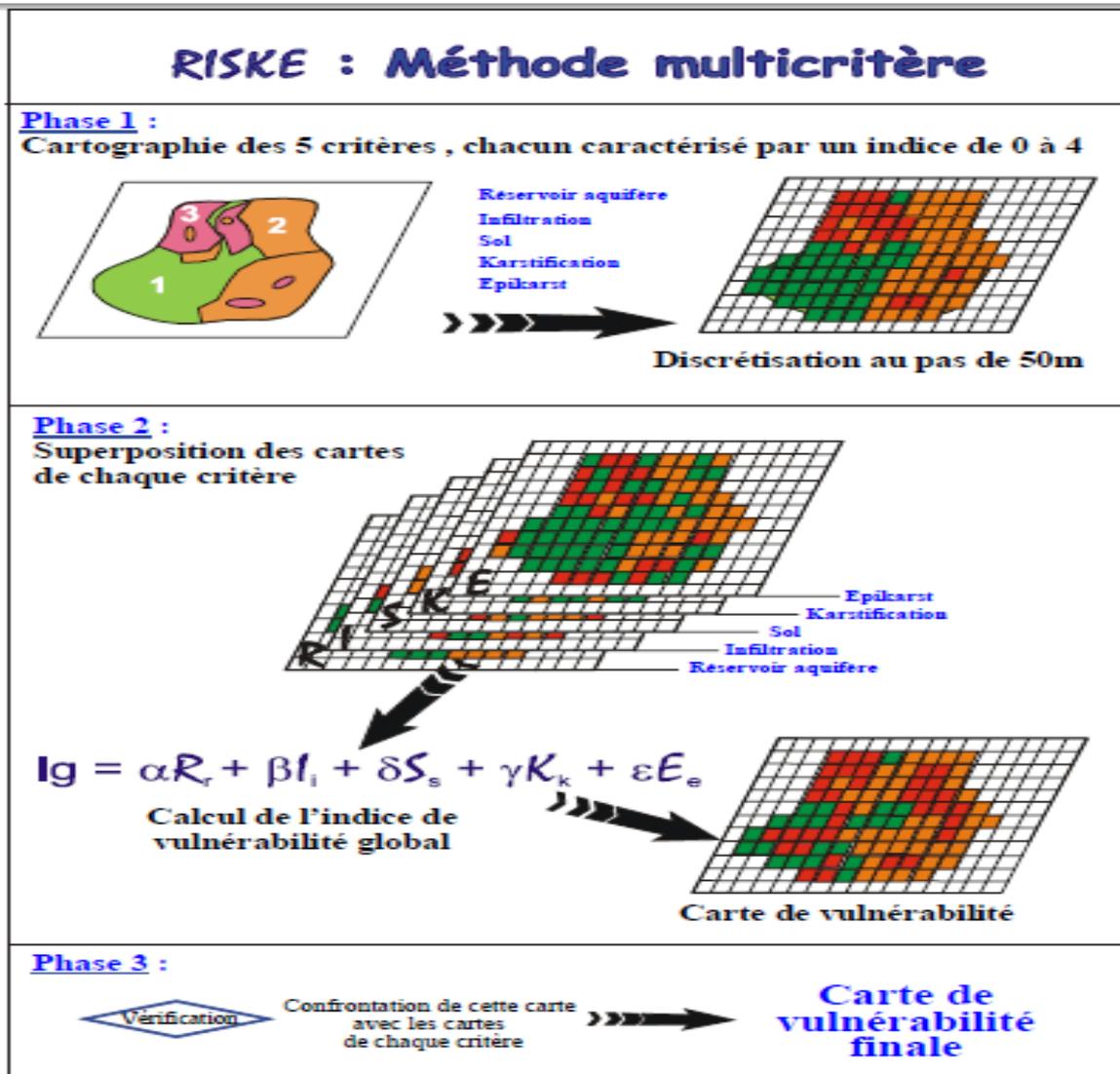
Le facteur de protection F est calculé en tous points du bassin d'alimentation, plus la valeur du facteur F est élevée, plus le pouvoir de protection est important.

Les valeurs de F sont comprises entre 9 et 34, elles sont regroupées en 4 classes de vulnérabilité :

- S1** : Vulnérabilité très élevée (F entre 9 et 19)
- S2** : Vulnérabilité élevée (F entre 20 et 25)
- S3** : Vulnérabilité moyenne (F entre 26 et 34)

La vulnérabilité est faible quand $F > 25$ avec des critères tels qu'un sol de faible perméabilité d'une épaisseur supérieure à 8 m combiné à des localisations en bas de pente jouant le rôle de collecteur des eaux.

Annexe 9: Critères de pondération de la méthode EPIK



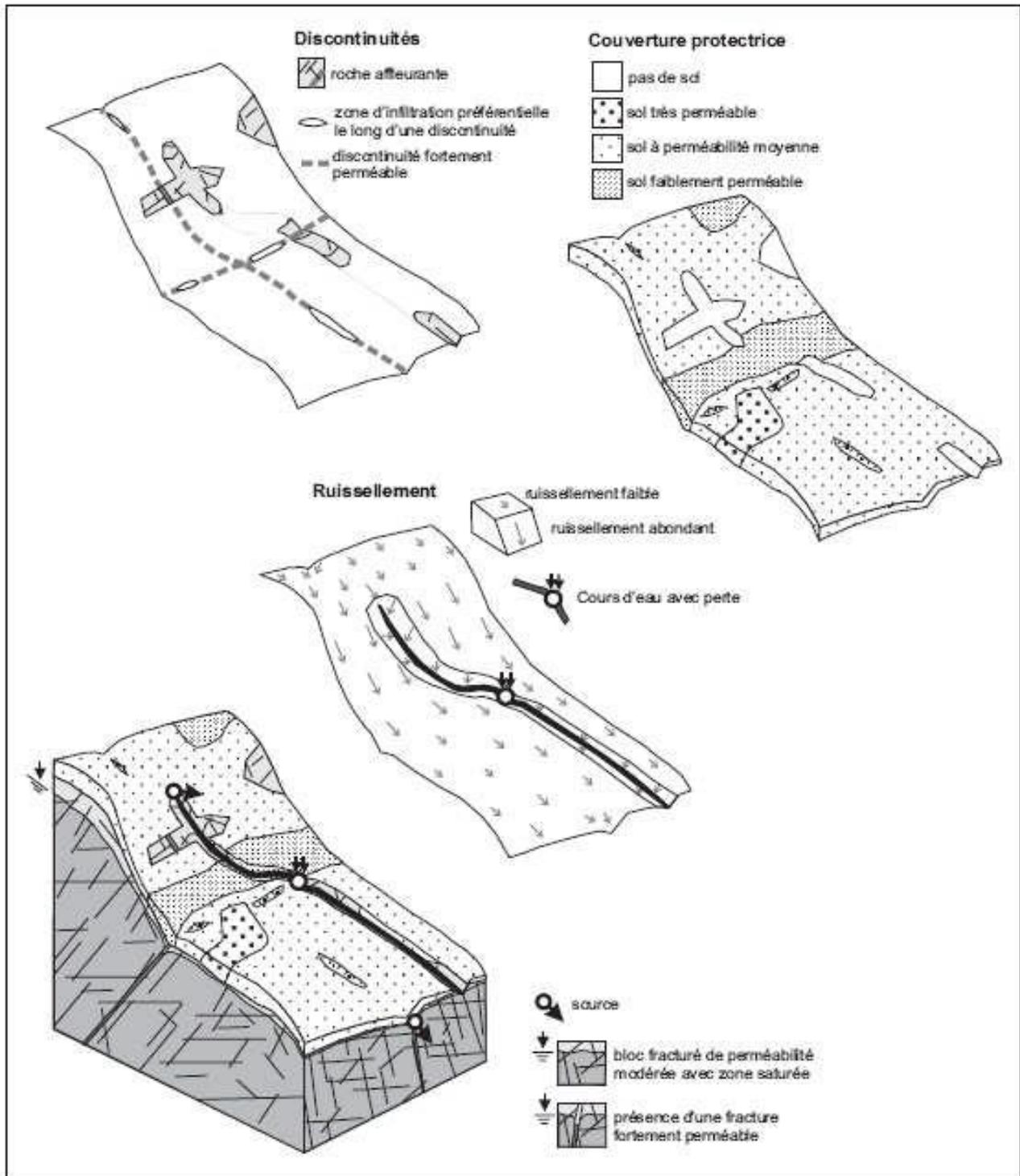
Annexe 10 : Diagramme explicatif de la méthode RISKE (Petelet et al., 2001)

Annexes

Critères		Caractéristiques							Index	Poids		
R	Roche aquifère	R ₀	Marnes							0	0.1	
		R ₁	Marno-calcaires							1		
		R ₂	Calcaires marneux							2		
		R ₃	Calcaires et dolomies massifs en gros bancs non fracturés, Calcaires en petits bancs avec fracturation homogène							3		
		R ₄	Calcaires en gros bancs massifs fracturés							4		
I	Infiltration	I ₀	Pente très forte > 50%							0	0.4	
		I ₁	Pente forte (15 et 50%)							1		
		I ₂	Pente moyenne (5 et 15%)							2		
		I ₃	Pente faible (0-5%), zones cultivées (sol travaillé perpendiculairement à la pente)							3		
		I ₄	Bassin versant alimentant une perte							4		
S	Sol (Horizon protecteur)	Sol sur matrice nue ou avec un horizon géologique faiblement protecteur (éboullis, alluvions)				Sol sur horizon géologique important de faible conductivité hydraulique (argiles, argiles marnieuses, conglomérats et brèches massifs)				0.1		
		Nature de sol inconnue	Nature * de sol connue			Nature de sol inconnue	Nature * de sol connue					
			1	2	3		1	2	3			
		S ₀	-	-	-	-	Couverture protectrice >5m (avec sol ou non)				0	
		S ₁	Epaisseur >100 cm	Epaisseur >100 cm	-	-	Couverture protectrice 1-5m ou <1m avec un sol de texture inconnue ou de type 1 >20cm				1	
		S ₂	Epaisseur 20-100 cm	Epaisseur 20-100 cm	Epaisseur >100 cm	-	Epaisseur 0-20 cm	Epaisseur 0-20 cm	Epaisseur 20-100 cm		-	2
S ₃	Epaisseur 0-20 cm	Epaisseur 0-20 cm	Epaisseur 20-100 cm	Epaisseur >100 cm	Absence totale de sol	Absence totale de sol	Epaisseur 20-100 cm	Epaisseur 0-100 cm	3			
S ₄	Absence totale de sol	Absence totale de sol	Epaisseur 0-20 cm	Epaisseur 0-100 cm	-	-	-	-	4			
K	Karstification	K ₀	Aquifère peu ou pas fissuré							0	0.2	
		K ₁	Aquifère fissuré mais non karstifié							1		
		K ₂	Réseau mal karstifié ou mauvaise connection avec la surface							2		
		K ₃	Réseau karstique bien développé, présence d'un drain collecteur de petite taille connu (ou présumée d'un gros) connecté avec la surface. Traçage à circulation rapide							3		
		K ₄	Réseau karstique bien développé, présence d'un gros collecteur connecté avec la surface. Traçage à circulation rapide							4		
E	Epikarst	E ₀	Zone sans modèle karstique identifié							0	0.2	
		E ₁	Zone sans modèle karstique net							1		
		E ₂	Lapiez, vallées sèches (+ bassin versant les alimentant)							2		
		E ₃	Dolines et ouvalas							3		
		E ₄	Avens							4		

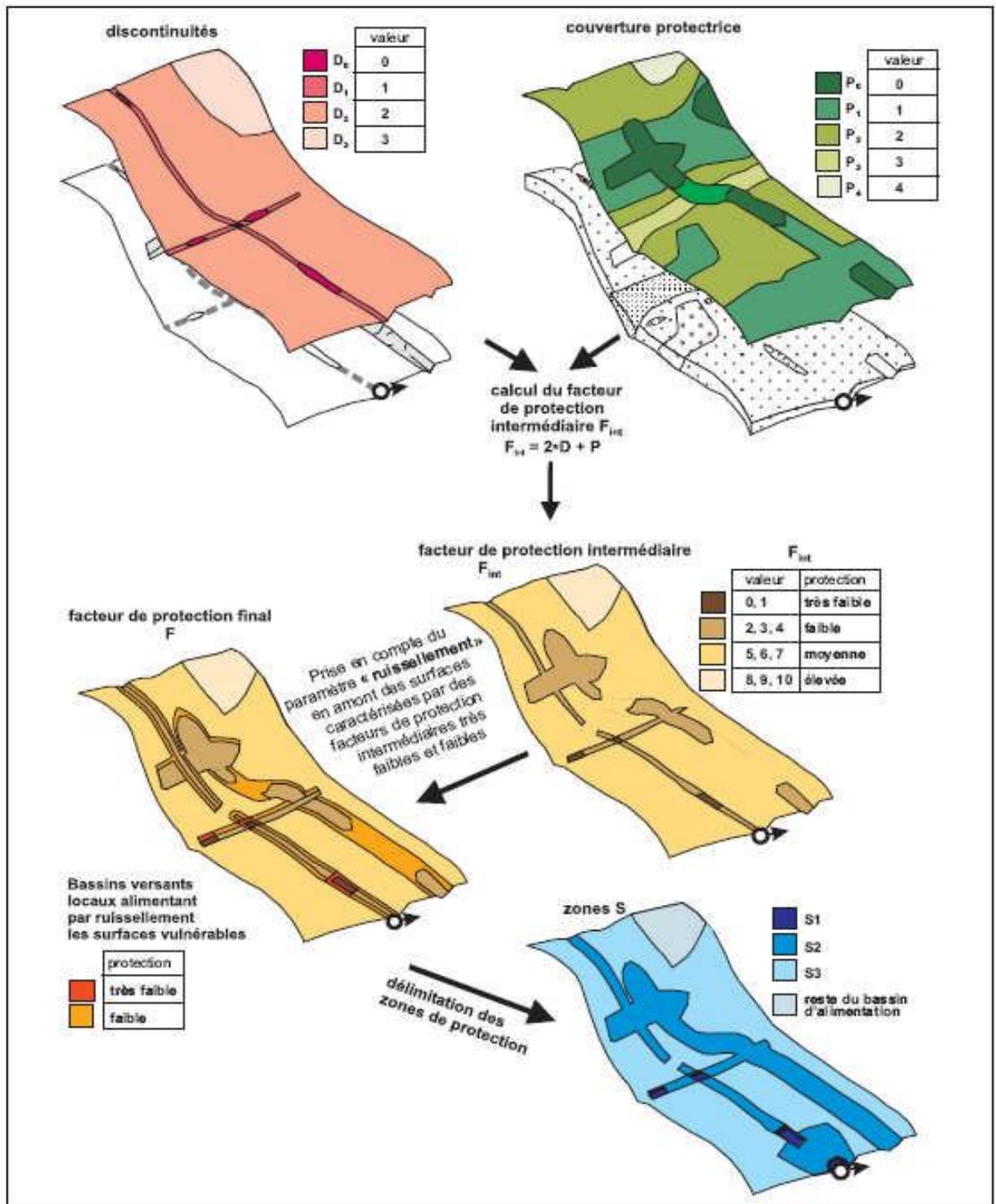
Annexe 11: Classification de différents critères de la méthode RISKE (Petelet et al., 2001)

Annexes



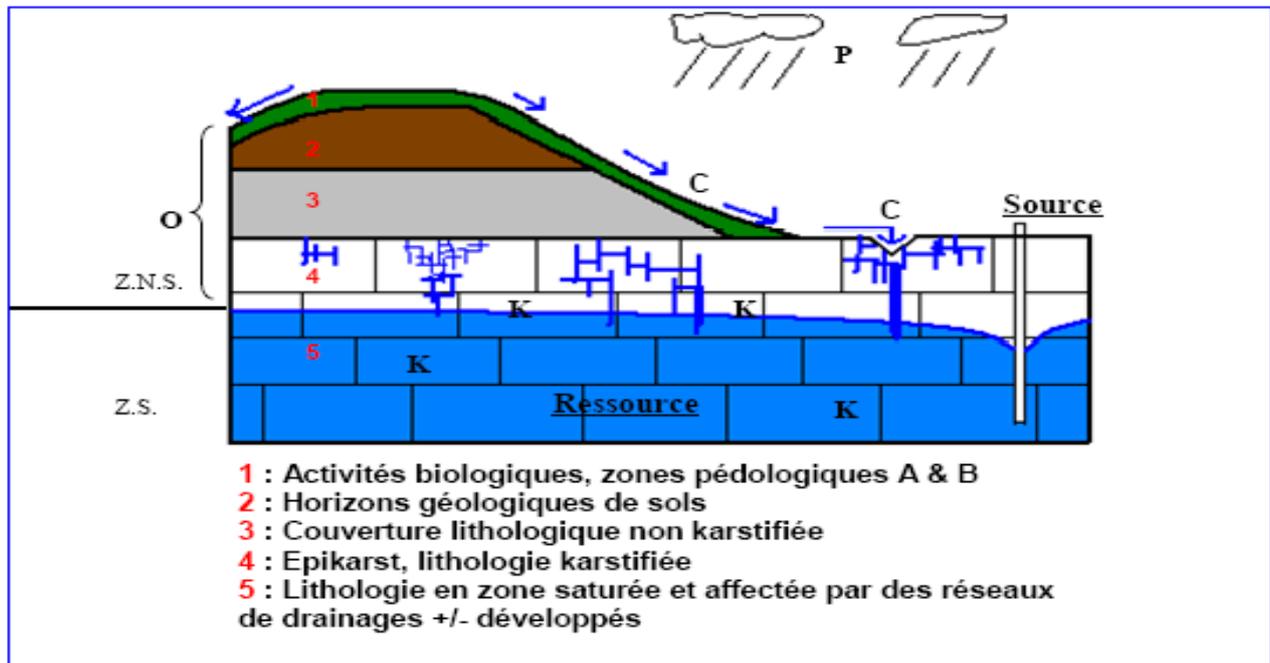
Annexe 12: Représentation des trois paramètres pris en considération la méthode « DISCO » (Pochon et Zwahlen, 2003)

Annexes



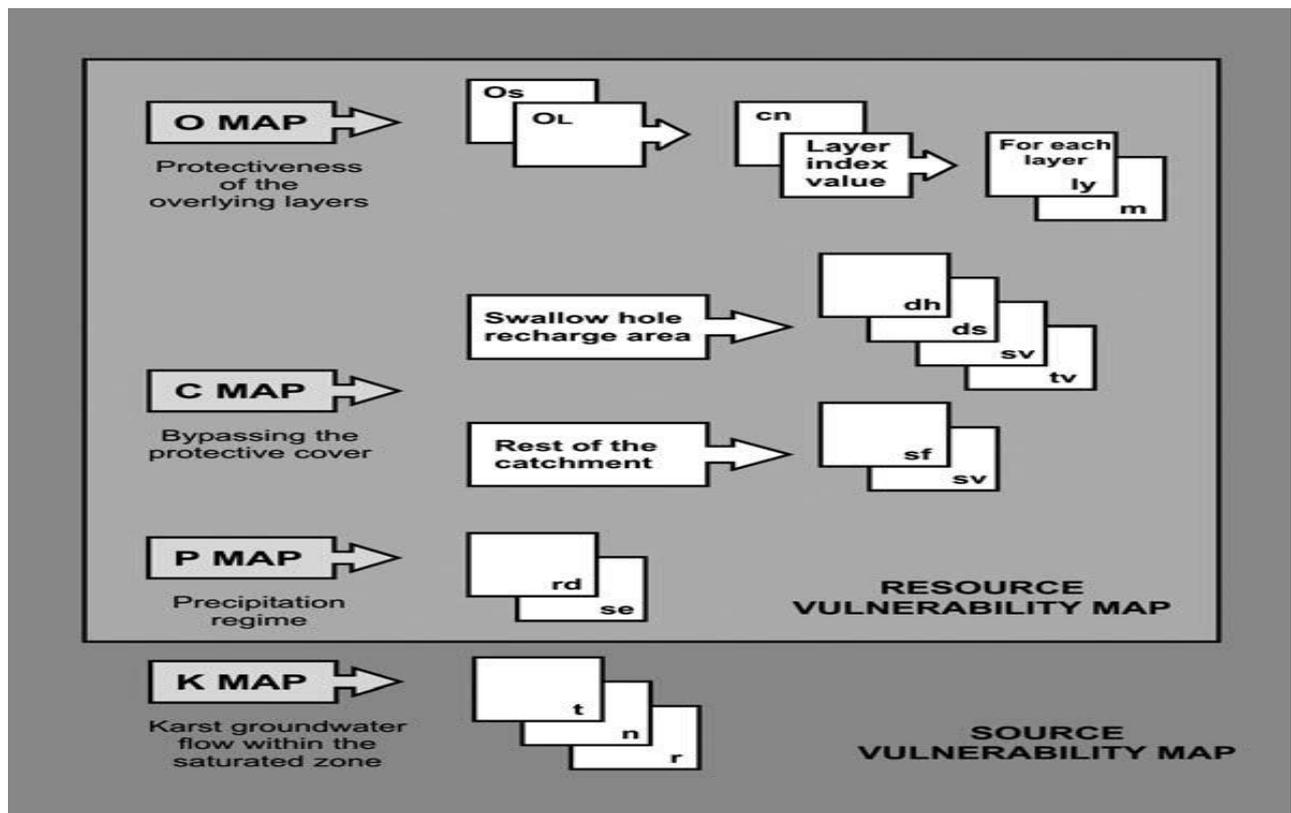
Annexe 13: Délimitation des zones de protection selon la méthode de cartographie multicritère « DISCO » (Pochon et Zwahlen, 2003)

Annexes



Annexe 14 : Schéma représente la méthode d’approche européenne OCPK

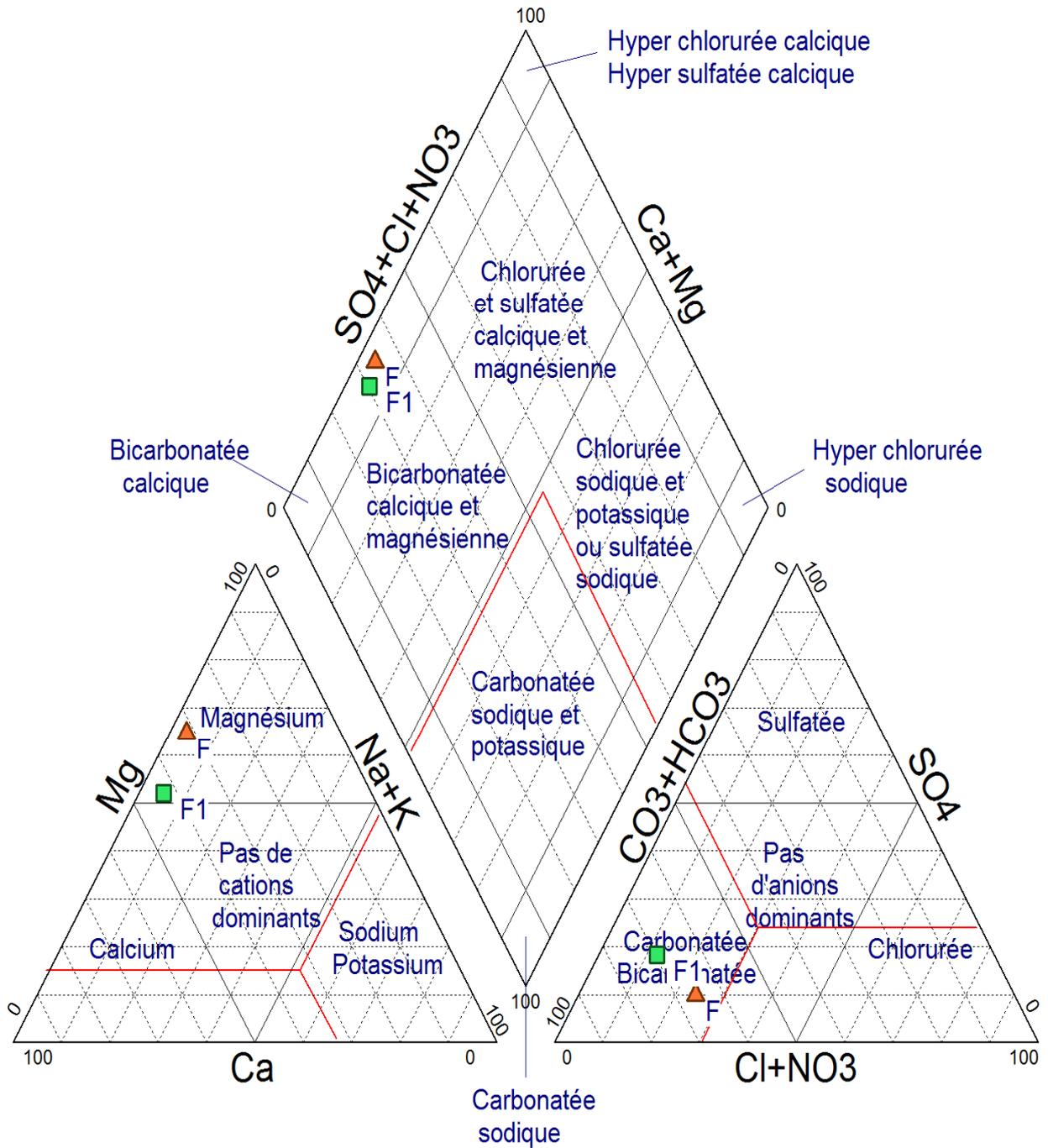
(Bensaoula., 2006)



Annexe 15 : Principe de l’approche Slovène pour la cartographie de vulnérabilité

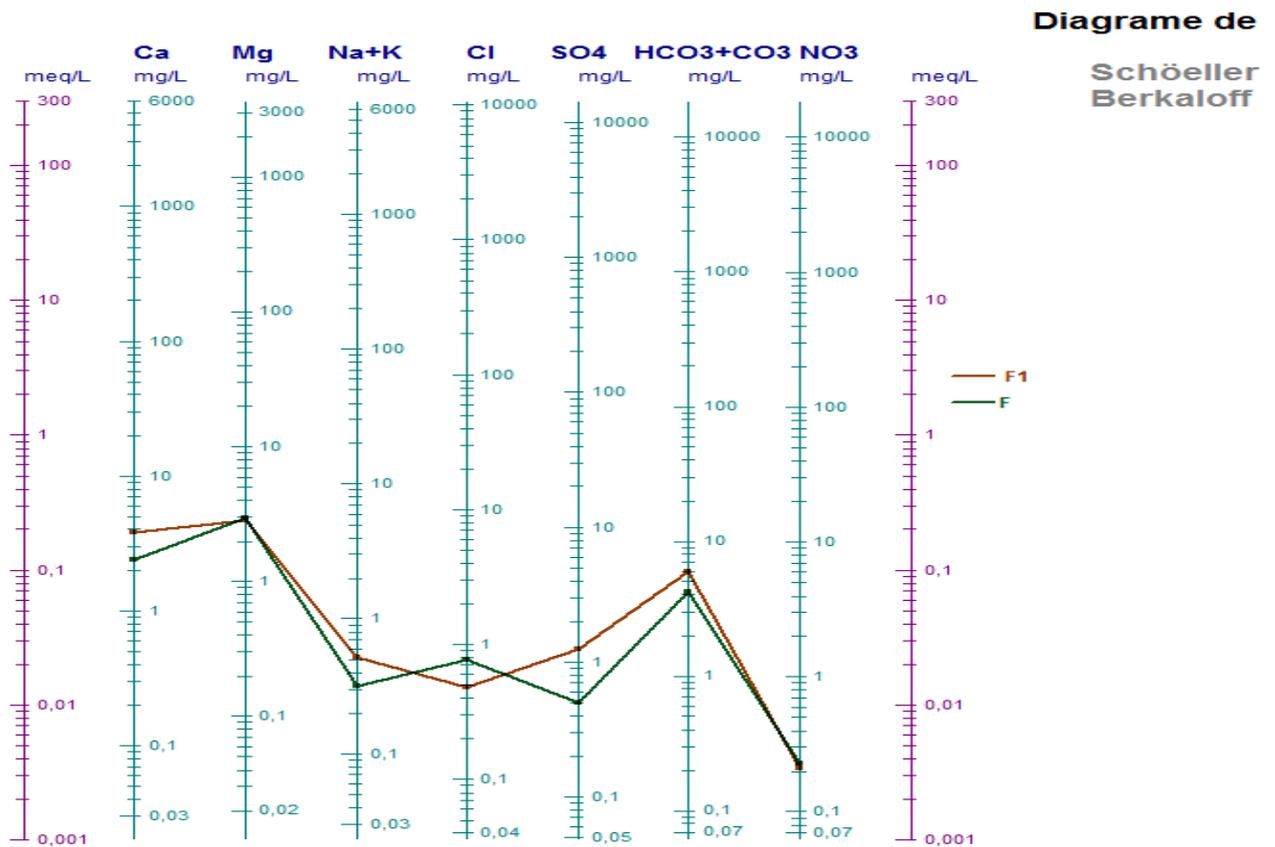
à lapollution des eaux souterraines (Ravbar et goldscheider 2008)

Diagramme de Piper



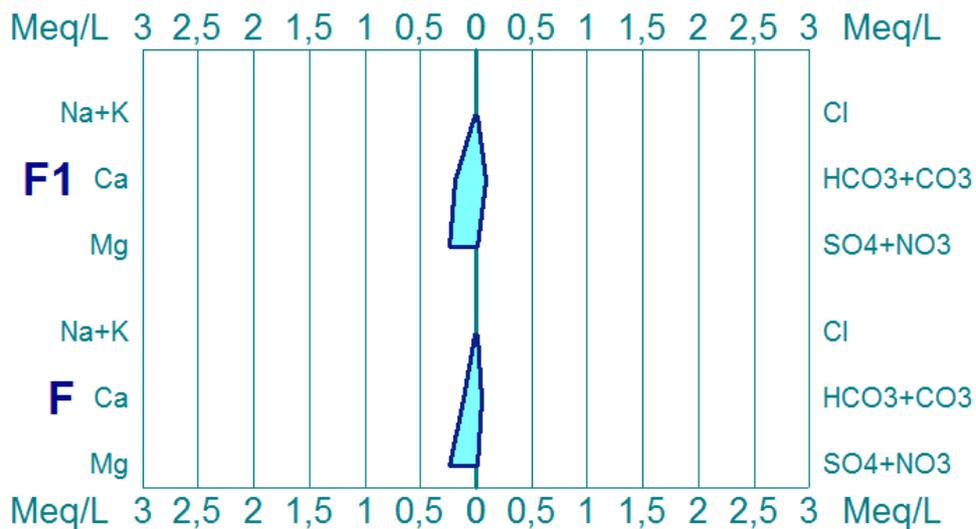
Annexe 16 : Diagramme de Piper d'analyse chimique des forage F et F1

Annexes

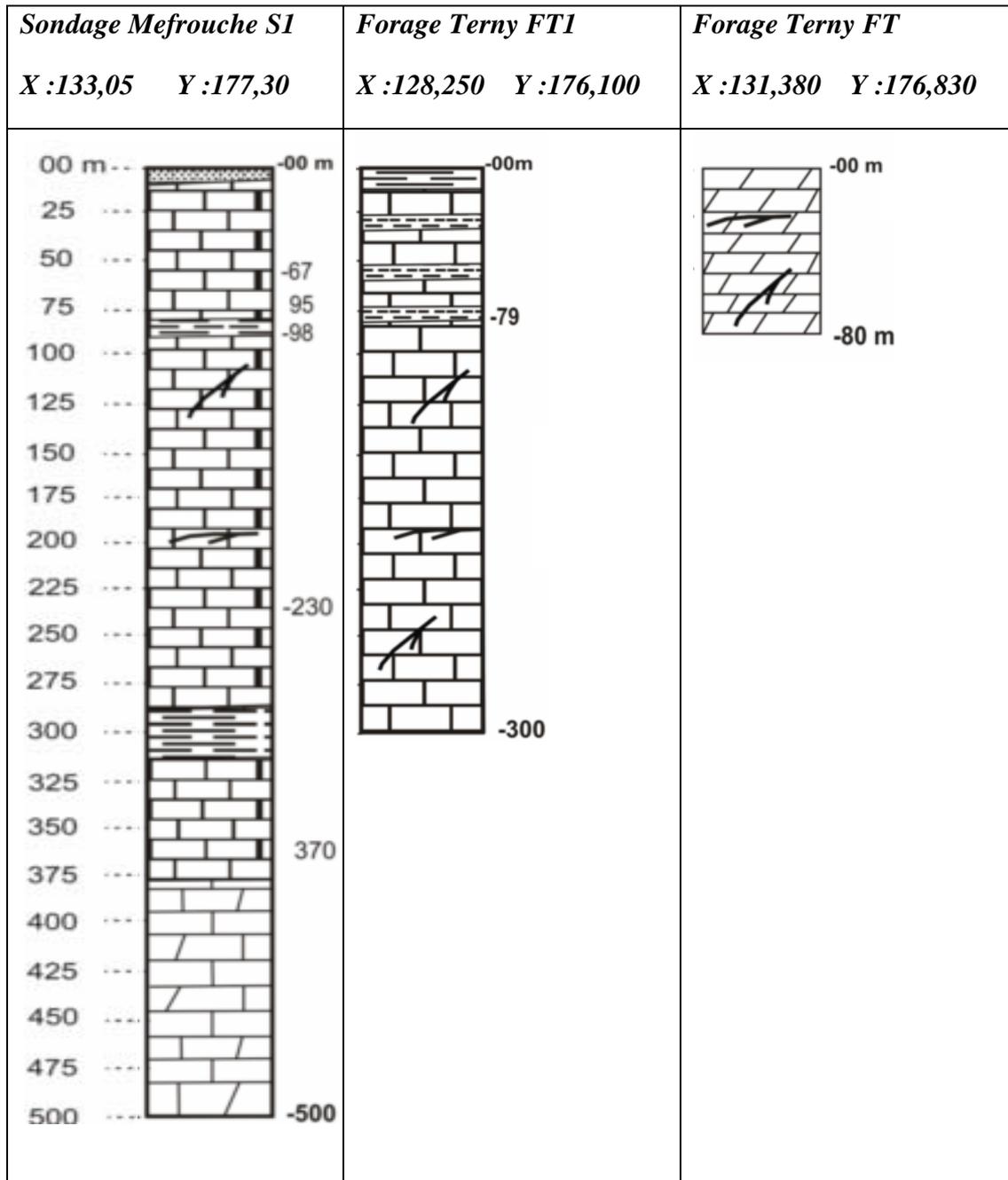


Annexe 17 : Diagramme de Schoeller Berkaloff d'analyse chimique des forage F et F1

Diagramme de Stiff



Annexe 18 : Diagramme de Stiff d'analyse chimique des forage F et F1



Annexe 19 : Coupe litho stratigraphique des forages et sondages des environs de Terni (DRE Tlemcen).

Photos



Photo 1 : Polje de Terni



Photo 2 : Dolomie de Tlemcen

Photos



Photo 3 : Calcaire caverneux



Photo 4 : Doline

Photos



Photo 5 : Epikarst



Photo 6 : Grés de Boumedienne

Photos



Photo 7 : Marne de Miocène de Terni



Photo 8 : Ensemble Calcaro-dolomitique de Terni

Photos



Photo 9 : Aspect ruiniforme du Calcaire-dolomitique de Terni



Photo 10 : Grotte au Nord-Est du village El Meffrouche

Photos



Photo 11 : Résurgence en aval de Sidi Hafif



Photo 12 : Oued El Meffrouche

Photos



Photo 13 : Village deversant ses eaux d'assainissement dans l'oued

El Meffrouche



Photos

Photo 14 : Village El Meffrouche



Photo 15 : Barrage El Meffrouche

RESUME

Après avoir fait une étude bibliographique détaillée sur les méthodes de cartographie de la vulnérabilité, une analyse du projet européen COST Action 620 et une étude géologique et hydrologique du bassin versant du Meffrouche, nous avons pu constater la possibilité de l'application de la méthode COP pour l'étude de cartographie de la vulnérabilité dans un milieu karstique.

Généralement, le résultat de l'application de la méthode COP définit une répartition des zones de vulnérabilité hétérogène dont les principales classes de vulnérabilité sont : très basse, basse, modérée, élevée et très élevée.

La plus grande partie est dite à vulnérabilité très basse. Elle s'étend dans la partie Ouest et Sud Ouest du bassin. Elle représente 34 % de la surface du bassin.

La vulnérabilité est basse particulièrement dans la partie Sud du bassin. Cette dernière couvre 20 % de la totalité du bassin. Cependant, la vulnérabilité modérée s'étend sur une très faible surface soit 10 % de la superficie totale du bassin. Cette surface est morcelée.

En revanche, les zones à vulnérabilité élevée et très élevée couvrent particulièrement les parties Est et Nord-Est du bassin. En effet ces zones correspondent particulièrement à l'affleurement des roches carbonatées, avec un degré de karstification important qui est représenté en surface par un champ de lapiez important. Ces deux zones couvrent respectivement 13 et 23% de la surface totale du bassin versant.

Mots- clés : Cartographie de la vulnérabilité –Bassin versant du Meffrouche – Eau souterraines – COST Action 620 –Méthode COP– Karst.

ABSTRACT

After an extensive literature review on methods of vulnerability mapping, analysis of the European project COST Action 620, a geological and hydrological study of watershed Meffrouche, we saw the possibility of the application of COP method for study vulnerability mapping in a karst environment.

Generally, the result of the application of the COP method defined distribution areas heterogeneous vulnerability whose main classes of vulnerability are: very low, low, moderate, high and very high.

The greatest part is said to be very low vulnerability. It lies in the west and southwest of the basin. It represents 34% of the basin area.

The vulnerability is low, particularly in the southern part of the basin. The latter covers 20 % of the entire basin. However, moderate vulnerability extends over a very small area or 10% of the total basin area. This area is fragmented.

In contrast, areas with high and very high vulnerability specifically cover the East and North East parts of the basin. Indeed, these areas correspond to the particular outcrop of carbonate rocks, with a high degree of karstification surface, which is represented by a large field of lapiez. These two areas cover respectively 13 and 23 % of the total catchment area.

Keywords: Vulnerability Mapping - Watershed Meffrouche - Underground Water - COST Action 620- COP - method Karst.