

Tables des matières

Dédicace

Remerciements

Résumer

Tables des matières

Abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Table des matières

CHAPITRE I : Synthèse sur les textes législative concernant la protection des ressources en eau, en Algérie.....	90
I.1. Introduction :.....	1
I.2. Principaux textes législatifs sur l'eau en Algérie :.....	1
I.3. Synthèse des grandes lignes législatives relatives à la protection des eaux souterraine en Algérie :.....	3
I.3.1. Loi n° 83-17 du 16 Juillet 1983 portant code des eaux :.....	3
I.3.2. Décret exécutif n° 04-196 du 15 Juillet 2004 :.....	4
I.3.3. La loi n° 05-12 du 4 août 2005 relatifs à l'eau :.....	4
I.3.4. Le décret exécutif n° 07- 399 du 23 décembre 2007 :	5
I.3.5. Le décret exécutif n° 10-73 du 6 février 2010	6
I.4/ Comparaison avec les réglementations étrangères :	7
I.5. Conclusion :	8
Chapitre II : Généralités sur les eaux souterraines dans le karst	9
II.1. Introduction	9
II.2. Etymologie & histoire	9
II.3. Les formes karstiques :	9
II .3.1. L'Exokarst :	9

II .3.1.1. Les Lapiés	9
II. 3.1.2. Couloirs :	10
II .3.1.3. Dolines	10
II .3.1.4. Poljé.....	11
II.3.1.5. Canyons, reculées, vallées aveugles ou à éclipses	11
II .3.2. Endokarst	12
II .3.2.1. Les avens	12
II .3.2.2. Les pertes.....	12
II .3.2.3. Les stalactites	12
II.3.2.4. Les stalagmites	12
II.4. Les eaux souterraines karstiques	13
II.4.1. La zone d'infiltration :	13
II.4.2. La zone noyée	13
II.5. les sources karstiques.....	14
II.6. Conclusion	14
Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution dans un système Karstique et établissement des périmètres de protection (étude bibliographique)	15
III.1. Les différentes méthodes de cartographie de vulnérabilité à la pollution des systèmes Karstique :	15
III.2. Concept de vulnérabilité spécifique et Vulnérabilité intrinsèque :	16
III.3. Vulnérabilité des aquifères karstiques - Spécificités et analogies :.....	16
III.3.1. Définition de la vulnérabilité	16
III.3.2. Vulnérabilité intrinsèque :	16
III.3.3. Vulnérabilité spécifique :.....	17
III.4. Classification des méthodes existantes	17
III.4.1. La méthode multicritère, méthode EPIK :.....	20
III.4.2. La méthode PI :.....	22
III.4.3. La méthode RISK :	24

III.4.4. La méthode RISKE 02 :	25
III.4.5. L'approche européenne, Facteurs développés dans le cadre de l'action COST 620 :	26
III.4.6. Méthode COP	27
III.4.7. Méthode LEA :	28
III.4.8. La méthode PaPRIKA :	28
III.5. Délimitation des périmètres de protection en milieu karstique :	29
III.5.1. Présentation de la typologie des captages à protéger dans un système karstique :	29
III.5.2. Les périmètres de protection :	31
III.5.2.1. L'étendue du périmètre de protection :	31
III.5.3. Les types des périmètres de protection :	33
III.5.3.1. Le périmètre de protection immédiate (PPI) :	33
III.5.3.2. Le périmètre de protection rapprochée (PPR)	34
III.5.3.3. Le périmètre de protection éloignée (PPE).....	35
III.6. Conclusion :	36
Chapitre IV : Aperçu général sur la zone d'étude (système karstique de Ghar Boumâaza) : ..	37
IV.1. Présentation générale de la zone d'étude :	37
IV.2. Aperçu sur le climat de la zone :	38
2.1. Les précipitations :	39
2.2. Les températures :	40
2.3. Les vents :	40
IV.3. Contexte hydrologique :	40
IV.4. La géologie.....	44
IV.4.1. Cadre général.....	44
IV.4.2. Contexte géologique du secteur étudié :	45
IV.4.3. Lithostratigraphie	46
IV.4.3.1. Les Dolomies de Terny.....	47

IV.4.3.2. Les marno-calcaires de Hariga	47
IV.4.3.3. Les marno-calcaires d'ouled Mimoun	47
IV.4.3.4. Les Grès de Merchiche :	48
IV.5. Contexte hydrogéologique :	49
IV.5.1. Propriétés hydrogéologiques des formations :	49
IV.5.1.1. Les formations à fort potentiel aquifère :	49
IV.5.1.2. Les formations à faible potentiel aquifère :	50
IV.6. Contexte pédologique :	53
IV.6.1. Sol fersialitique rouge :	53
IV.6.2. Sol brun fersialitique :	54
IV.6.3. Sol fersialitique brun type terra-fusca :	55
IV.6.4. Sol fersialitique rouge à caractère vertique :	55
6.5. Sol fersialitique rouge et mosaïque dolomie	55
IV.7. Etude de la Karstification :	56
IV.7.1. Karstification révélé par la prospection de terrain :	56
IV.7.2. Karstification révélé en profondeur :	57
IV.7.2.1. Karstification révélée par forage :	57
IV.7.2.2. Karstification révélée par l'exploration spéléologique (le réseau spéléologique de Ghar Boumâaza, 18600 m) :	58
IV.8. Les Points d'eau :	60
IV.8.1. Les sources :	60
IV.8.2. Les Forages :	61
IV.8.3. Les puits :	61
IV 9. L'occupation du sol :	61
IV.9.1. Parc logement et population :	61
IV.9.2. L'état d'alimentation en eau potable :	62
IV.9.3. L'état d'assainissement dans la région d'étude :	63

IV.9.4. Agriculture :	65
IV.9.5. Elevage :	66
IV.9.6. Foret :	68
IV.9.7. Infrastructures routières :	69
IV.9.8. Les Carrières :	69
IV.9.9. Les installations militaires :	70
IV.10. Conclusion :	71
Chapitre V : Application sur la zone d'étude (Choix de la méthode, Carte de vulnérabilité et risque, périmètre de protection)	72
V.1. Choix de la méthode :	72
V.2. Cartographie de la vulnérabilité selon la méthode RISK :	73
V.2.1. Critère « R » Roche aquifère :	73
V.2.2. Critère « I » infiltration :	74
V.2.3. Critère de sol « S » : Sol et couverture protectrice	77
V.2.4. Critère « K » Karstification :	79
V.2.5. La carte de vulnérabilité finale :	80
V.3. Inventaire des activités potentiellement polluantes, hiérarchisation et cartographie des aléas :	84
V.3.1. Cartographie des pressions polluantes.	85
V.3.2. Hiérarchisation des pollutions potentielles :	86
V.3.3. Pondération des aléas (Indice de danger) :	86
V.4. Cartographie du risque de pollution :	90
V.5. Recommandations :	94
V.6. Conclusion :	95
Conclusion générale.	97
Bibliographie.	98
Annexe.	103

Abréviation

Liste d'abréviation :

ANRH : Agence national des ressources hydraulique

AEP : Alimentation en eau potable

AS : agglomération secondaire

APC : Assemblé populaire communale.

AERMC : Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.

CW : Chemin de wilaya

DRH : Direction des ressources Hydrique.

OFEFP : Office fédéral de l'environnement des forets et du paysage.

RN : Route nationale

SIG : système d'information géographique.

UE : Union européenne.

USA : Etats unis d'Amérique

Liste des figures

Figure II.1 : Quelques formes courantes de lapiés.....	10
Figure II.2 :Structure des dolines.....	11
Figure II.3 : Cours d'eau aériens des zones karstiques.....	12
Figure III.1 : Illustration de la méthode PI	23
Figure III.2 : Modèle OTC selon l'Approche européenne.....	26
Figure III.3 : Bassin hydrogéologique, et bassin d'alimentation du captage.....	33
Figure III.4 : Exemple de tracé de périmètres de protection dans le cas d'un captage d'eau souterraine.....	36
Figure IV.1 : Périmètre de système karstique de GharBoumaaza.....	38
Figure IV.2 : Variations annuelle de la pluviométrie de l'année (1976, 2014).....	39
Figure IV.3 : Température de station Mefrouche.....	40
Figure IV.4 : Réseau hydrographique du système karstique de GharBoumaaza. (Extrait de la carte Terni 1/50000).....	42
Figure IV.5 : Variabilité des débits des sources du système karstique de Ghar Boumaza.....	43
Figure IV.6 : Evolution du débit des sources de la Tafna avec la pluviométrie (1999-2001).....	44
Figure IV.7 : Situation de notre zone au niveau des monts de Tlemcen, Cadre géologique régionale (extrait de carte géologique de l'Algérie au 1/500000).....	45
FigureIV.8 : carte géologique de la zone d'étude. (Extrait de carte géologique de l'Algérie au 1/200000).....	46
Figure IV.9 : Log litho-stratigraphique synthétique de la région étudier (d'après Benest et al. 1999, modifié).....	47
Figure IV.10 : Coupe géologique à travers le Djebel Bouchiba- plateau de Merchiche.....	48
Figure IV.11 : Extrait de la carte hydrogéologique de Tlemcen 1/200000.....	52
Figure IV.12 : Sol fersialitique rouge (localité Ouled Bounouar).....	54
Figure IV.13 : Sol brun fersialitique (Foret Tesser Mramet).....	54
Figure IV.14 : Sol rouge fersialitique à caractère vertique.....	55

Figure IV.15 : Hassi Lebyéd.....	56
Figure IV.16 : Le réseau souterrain de Ghar Boumaaza.....	59
Figure IV.17 : Fosse septique (Sehb).....	64
Figure IV.18 : Collecteur d'assainissement des localités Sehb et Ouled Bounoire.....	65
Figure IV.19 : Aménagement des terrains rocheux plateau Tit Mokran.....	66
Figure IV.20 : Rejet d'élevage utilisé pour les vergers de Heblat à proximité d'Ain Taga....	67
Figure IV.21 : Carte d'occupation du sol Actuel par rapport au réseau souterrain de Ghar Boumaaza.....	70
Figure V.1 : Méthodologique pour le choix d'une méthode de cartographie des dolomies de Tlemcen.....	72
Figure V.2 : Indice de vulnérabilité selon le critère Roche aquifère.....	74
Figure V.3 : courbe des niveaux de la zone d'étude.....	75
Figure V.4 : Indice de vulnérabilité selon le critère d'infiltration.....	76
Figure V.5 : Indice de vulnérabilité selon le critère de Sol.....	78
Figure V.6 : Indice de vulnérabilité selon le critère de Karstification.....	80
Figure V.7 : Carte finale de la vulnérabilité selon la méthode RISK.....	82
Figure V.8 : Procédure de superposition des cartes R, I, S et K.....	83
Figure V.9 : La carte d'aléas non classé.....	88
Figure V.10 : Carte d'aléa classé.....	89
Figure V.11 : Carte de risque dans le système karstique de Ghar Boumâaza.....	91
Figure V.12 : Bir Dar Maamer, et Ain l'Kbira fermer pour cause de pollution.....	93
Figure V.13 : abreuvoir pour le bétail, localité Ouled Bounouar.....	94

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Dimensions des périmètres de protection des captages dans différents pays.....	8
Tableau III.1 : Les différentes méthodes de cartographie de vulnérabilité dans le milieu karstique.....	19
Tableau III.2 : Les Critère de la méthode EPIK.....	21
Tableau III.3 :Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI.....	23
Tableau III.4 : les 5 classes de vulnérabilité selon l'indice global Ig.....	24
Tableau III.5 :Reclassification des valeurs d'Ig en classes de vulnérabilité.....	26
Tableau III.6 :Indice COP utilisé pour la cartographie de la vulnérabilité.....	28
Tableau III.7 :Couverture protectrice liée à la vulnérabilité et classe de temps de transit estimatif.....	28
Tableau III.8 : Classification typologique des captages.....	30
Tableau IV.1 : LOG Hydrogéologique	51
Tableau IV.2 :Cavités détectées dans les forages par les chutes d'outils dans la commune de Terni.....	57
Tableau IV.3 : Inventaire des sources de la zone étudiée (prospecté sur le terrain).....	60
Tableau IV.4 :Répartition spatiale de population et logements.....	62
Tableau IV.5 :Récapitulatif des besoins en eau et capacité de stockage – AS SEHB.....	62
Tableau IV.6 :Situation d'approvisionnement en eau dans notre zone d'étude.....	63
Tableau IV.7 :Etat des réseaux d'assainissement.....	64
Tableau IV.8 : Répartition d'élevage dans le système karstique de GharBoumâaza.....	68
Tableau IV.9 :Exploitation minière.....	69
Tableau V.1 : Classe de critère de Roche aquifère.....	73
Tableau V.2 :Classes de critère d'infiltration I.....	76



Tableau V.3 : Classe de nature de sol selon la texture et la proportion de cailloux.....	77
Tableau V.4 : Classe de critère Sol.....	78
Tableau V.5 : Classe de critère de karstification.....	79
Tableau V.6 : Les classes de vulnérabilité selon la méthode RISK.....	81
Tableau V.7 : Répartition de vulnérabilité dans le système karstique de GharBoumâaza.....	82
Tableau V.8 : Catégorie des risques selon le COST 620.....	85
Tableau V.9 : Catégories des risques selon notre zone d'étude.....	85
Tableau V.10 : Le poids des Aléas de notre région d'étude.....	86
Tableau V.11 : L'indice d'aléa Hi et les classes de Hi.....	87
Tableau V.12 : classe de risque.....	90
Tableau V.13 : Répartition du risque de pollution des eaux souterraines dans le système karstique de Ghar Boumâaza.....	91
Tableau V.14 : Qualité des principaux points d'eau destiné pour l'alimentation en eau potable	93

Introduction générale :

De Karst, nom allemand de la zone des plateaux calcaires du nord-ouest de la péninsule balkanique entre la Carniole et l'Istrie (**Bakalowicz, 2002**), répartie en nombreux endroits sur la planète, les formations sédimentaires carbonatées qui affleurent peuvent receler des aquifères karstiques. Ces zones de circulations souterraines des eaux peuvent alors constituer des réservoirs potentiels en eaux, notamment pour l'alimentation en eau potable (**Pranville et al, 2007**)

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 & Williams 1989, Drew et Hotzl 1999 in Bensaoula, 2006**). Ces eaux souterraines sont, pour beaucoup de pays méditerranéens, une ressource en eau essentielle, sinon même unique.

En Algérie, et précisément au niveau régional, les Monts de Tlemcen constituent l'un des massifs carbonatés karstiques les plus importants de l'Algérie du nord. Ils contiennent d'importants aquifères contenus dans les formations calcaréo-dolomitiques du Jurassique supérieur. Ces dernières sont largement karstifiées (**Bensaoula et al, 2007**).

Les Monts de Tlemcen ont longtemps été appelés le château d'eau naturel de l'ouest algérien. Ils s'étendent sur une superficie de 3000 Km² et occupent la partie centrale de la wilaya de Tlemcen. Ils sont très arrosés, entre 500 à 800 mm par an (**Bensaoula, 2006**).

Situé au niveau des monts de Tlemcen, le système karstique de Ghar Boumaaza, caractérisé par une superficie de 11300 ha, est un réseau souterrain spectaculaire. C'est un des plus longs réseaux spéléologiques en Afrique (18600 m). Il a fait l'objet de notre étude.

Le système de Ghar Boumaza est drainé par plusieurs sources dont la plus importante est A.Tagga. Ces dernières ainsi que des puits et un seul forage constituent les points d'eau d'approvisionnement en eau potable de la population locale. L'augmentation des besoins en eau amène à envisager le développement de l'exploitation de ces ressources. Toutefois, l'occupation croissante des zones karstiques, conjuguée à leur vulnérabilité, impose la mise en place de politiques de protection adaptées. Malheureusement, la protection de ces ressources est encore très peu répandue en Algérie, on pourrait même dire quasi-inexistante. Pour garantir un approvisionnement en eau potable, de bonne qualité, à la population de la région, il est indispensable d'établir des périmètres de protection, comme le prévoit le Code de l'Eau.

Pour la détermination des périmètres de protection des captages, il a fallu élaborer une cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. Les principes adoptés se basent sur des guides conçus et appliqués dans d'autres pays particulièrement la France.

L'objectif principal de notre travail est de contribuer à l'établissement de périmètres de protection des eaux souterraines dans le système karstique de Ghar Boumaza.

Le chapitre I a consisté en une synthèse des textes législatifs régissant la gestion des ressources en eau en Algérie.

Dans le chapitre II nous présentons le milieu karstique avec ses principales caractéristiques physiques à savoir les différentes formes superficielles et souterraines (endokarst, exokarst) et hydrologiques.

Le chapitre III consiste en une étude bibliographique sur la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque en milieu karstique. Ainsi, nous passons en revue les principales méthodes de cartographie ainsi que la méthodologie de travail pour l'établissement d'un périmètre de protection.

Dans le chapitre IV nous présentons notre zone d'étude (système karstique de Ghar Boumaza). Ainsi les contextes géographiques, géologiques, climatiques et pédologiques sont abordés afin de mieux caractériser le système de Ghar Boumaza. Après cela les données sur la population ainsi que l'occupation des sols sont inventoriées et présentées.

Le chapitre VI est consacré au choix et à l'application de la méthode RISK pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution. Après cela la cartographie du risque de pollution est effectuée selon le COST 620 et les zones les plus menacées sont mises en évidence. Enfin des recommandations pour l'établissement de périmètres de protection terminent ce chapitre.

Enfin une conclusion clôture le présent mémoire.

CHAPITRE I : Synthèse sur les textes législatifs concernant la protection des ressources en eau en Algérie

I.1.Introduction :

L'eau est une ressource naturelle à la base de la vie et une denrée essentielle à la majeure partie des activités économiques de l'homme.

Les nécessités du développement social et économique imposent de recourir à l'aménagement de l'eau pour satisfaire les besoins des populations qui sont en continuelle croissance, ce qui rend le processus de gestion de l'eau fort complexe et de mise en œuvre difficile.

Pour faire face à cette situation, il est indispensable de disposer notamment d'instruments juridiques efficaces, en vue d'organiser la répartition et le contrôle de l'utilisation des ressources en eau et d'en assurer également la protection et la conservation (**Chareb-Yssaad, 2014**).

I.2.Principaux textes législatifs sur l'eau en Algérie :

La législation de l'eau est l'ensemble des lois intervenant dans la réglementation du service de l'eau.

Depuis l'indépendance, l'Algérie a adopté un ensemble de lois et des textes législatifs intervenant dans la réglementation du service de l'eau.

Les principaux textes sont :

- Loi n° 83-17 du 16 Juillet 1983, Portant code des eaux(J.O.R.A. N°30, 19 Juillet 1983).
- 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(J.O.R.A. N° 1 du 03 Janvier 1984).
- Ordonnance n° 96-13 du 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 du 16 Juin 1996).
- Décret exécutif n° 98-348 du 07 Novembre 1998.Fixant les conditions et modalités d'application de l'article 143 de la loi n° 83-17 du 16 juillet 1983, modifiée et complétée, portant code des eaux(J.O.R.A.N° 83 du 08 Novembre 1998).).

- Loi n° 03-10 du 19 Juillet 2003. Relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable (J.O.R.A. N° 43 du 20 Juillet 2003).
- Décret exécutif n° 04-196 du 15 Juillet 2004. Relatif à l'exploitation et la protection des eaux minérales naturelles et des eaux de source (N° 45 du 18 Juillet 2004).
- Loi n° 05-12 du 04 Août 2005. Relative à l'eau (J.O.R.A. N° 60 du 04 Septembre 2005).
- Décret exécutif n° 07-399 du 23 Décembre 2007. Relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau (J.O.R.A. N° 80 du 26 Décembre 2007).
- Ordonnance n° 09-02 du 22 Juillet 2009. Modifiant et complétant la loi n° 05-12 du 28 Joumada El Oula 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau. (J.O.R.A. N° 44 du 26 Juillet 2009).
- Décret exécutif n° 10-73 du 06 Février 2010. Relatif à la protection quantitative des nappes aquifères (J.O.R.A. N° 11 du 10 Février 2010).
- Décret exécutif n° 12-187 du 25 Avril 2012. Modifiant et complétant le décret exécutif n° 04-196 du 27 Joumada El Oula 1425 correspondant au 15 juillet 2004 relatif à l'exploitation et à la protection des eaux minérales naturelles et des eaux de source (J.O.R.A. N° 25 du 29 Avril 2012).
- Décret exécutif n° 13-298 du 18 Août 2013. Complétant le décret exécutif n° 04-196 du 27 Joumada El Oula 1425 correspondant au 15 juillet 2004 relatif à l'exploitation et à la protection des eaux minérales naturelles et des eaux de source (J.O.R.A. N° 43 du 28 Août 2013).
- Décret exécutif n° 15-207 du 27 Juillet 2015. En application des dispositions de l'article 14 de 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 du développement durable, le présent décret a pour objet de fixer les modalités d'initiation et d'élaboration du plan national d'action environnementale et du développement durable (P.N.A.E.D.D.) (J.O.R.A. N° 42 du 05 Août 2015).

I.3. Synthèse des grandes lignes législatives relatives à la protection des eaux souterraines en Algérie :

La protection des eaux souterraines constitue pour plusieurs raisons, une priorité majeure qui nécessite des politiques concernant la gestion, le développement durable et la conservation de ces ressources en eau en tant que bien de la collectivité nationale.

Les principaux textes législatifs régissant la protection des eaux sont comme suit :

I.3.1. Loi n° 83-17 du 16 Juillet 1983 portant code des eaux :

Cette loi a tracé les grandes lignes concernant la protection des ressources en eau souterraine. Elle a abordé la protection des eaux souterraines dans le chapitre 03 à travers les articles 109 jusqu'à l'article 124. L'article 110 a défini le périmètre de protection comme un contour délimitant le domaine géographique à l'intérieur duquel est interdit ou réglementée toute activité susceptible de porter atteinte à la conservation qualitative des ressources en eaux. Les activités pouvant faire l'objet d'interdiction ou de réglementation à l'intérieur des périmètres de protection sont mentionnées dans l'article 111 :

- 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.

La protection des eaux souterraines doit faire l'objet d'une protection qualitative des barrages, puits ou forage et aussi une protection quantitative pour les nappes surexploitées.

Il peut être institué des périmètres de protection immédiate ou rapproché, autour des ouvrages de mobilisation, réservoirs enterrés ou semi-enterrés, stations de traitement ou de pompage d'eau, destinés à la consommation humaine, où sont interdites, outre toutes les activités citées à l'article 111 et les activités suivantes :

- La circulation des véhicules automoteurs,
- L'installation de stations de service de distribution de carburant,

- Toute activité sur les plans d'eau, telle que pêche, chasse, navigation, lavage et nettoyage,
- Toute autre activité susceptible d'altérer la qualité des eaux.

Soumis à autorisation, les travaux de remplacement de réaménagement des installations hydrauliques existantes, sans augmentation des volumes d'eau prélevés. Dans les zones où les ressources en eaux souterraines sont surexploitées et en vue d'assurer la conservation des débits d'exploitation ou à la mise hors service d'un certain nombre de points de prélèvement, le comptage de l'eau est obligatoire.

Toute implantation d'activité à l'intérieur des périmètres de protection rapprochés ou éloignés est soumise à l'accord préalable de l'administration (J.O.R.A. N°30,1983).

I.3.2.Décret exécutif n° 04-196 du 15 Juillet 2004 :

Cette loi va montrer la nécessité des périmètres de protection contre la pollution comme suit :

Il est institué autour de chaque point d'eau minérale naturelle ou d'eau de source un périmètre de protection qualitative.

Si de nouvelles circonstances en font reconnaître la nécessité, ces périmètres de protection des eaux minérales naturelles ou des eaux de source peuvent être modifiés et étendus selon les modalités et procédures qui ont prévalu pour leur délimitation initiale.

Aucun sondage ou travaux souterrains de quelque nature que ce soit ne peuvent être effectués sans l'information et l'approbation de la commission permanente(J.O.R.A. N°45,2004).

I.3.3. La loi n° 05-12 du 4 août 2005 relatifs à l'eau :

Elle a pour objectif 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, et elle a à assurer et réglementer la protection des ressources par :

- **des périmètres de protection quantitative ;**
- **des périmètres de protection qualitative ;**

Des périmètres de protection quantitative : Pour les nappes aquifères surexploitées ou menacées de l'être, il est institué des périmètres de protection quantitative en vue d'assurer la préservation de leurs ressources en eau.

Des périmètres de protection qualitative : 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 comprenant, selon les nécessités de prévention des risques de pollution :

- **Un périmètre de protection immédiat :** dont les terrains doivent être acquis par l'Etat et protégés par une personne physique ou morale chargée de l'exploitation des ouvrages et installations concernés ;
- **Un périmètre de protection rapproché :** à l'intérieur duquel sont interdits ou réglementés les dépôts, activités ou installations susceptibles de polluer les eaux, de façon chronique ou accidentelle ;
- **Un périmètre de protection éloigné :** à l'intérieur duquel sont réglementés les dépôts, activités ou installations visés à l'alinéa précédent (J.O.R.A. N°60,2005).

I.3.4. Le décret exécutif n° 07- 399 du 23 décembre 2007 :

Ce décret pour objet de fixer les conditions et les modalités de récréation et de délimitation des périmètres de protection qualitative des ressources en eau, ainsi que les mesures de réglementation d'activités dans chaque périmètre de protection qualitative. Donc selon les nécessités de prévention des risques de pollution, la protection qualitative des ressources en eau est assurée par trois types de périmètres de protection :

- **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.
- **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. Il 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.

- **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. Le chapitre II du même décret exécutif a fixé les mesures de réglementation des activités à l'intérieur du périmètre de protection qualitative.

Autour des parties vulnérables des nappes d'eau souterraine ou des oueds, la protection est assurée exclusivement par l'établissement d'un périmètre de protection rapprochée ou d'un périmètre de protection éloignée.

Le décret exécutif a défini les procédures d'instauration des périmètres de protection qualitative des ressources en eaux souterraines, ainsi que toutes les parties ou les personnes chargées de la création et de la surveillance de ces périmètres.

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 (J.O.R.A. N°80,2007).

I.3.5. Le décret exécutif n° 10-73 du 6 février 2010

Le présent décret a pour objet de fixer les modalités de délimitation des périmètres de protection quantitative des nappes aquifères ainsi que les conditions spécifiques d'utilisation de leurs ressources en eau. Donc sur cette base toute nappe aquifère, dont le bilan

hydrogéologique fait ressortir un déséquilibre chronique entre les prélèvements d'eau et les capacités renouvelables de l'aquifère, traduisant soit une situation de surexploitation, soit une évolution pouvant conduire à une situation de surexploitation, fait l'objet d'un dispositif de protection quantitative (J.O.R.A. N°11,2010).

I.4/ Comparaison avec les réglementations étrangères :

L'analyse des législations et réglementations étrangères montre que le modèle de l'Allemagne fédérale a été repris dans pratiquement tous les pays qui disposent d'une législation sur la protection des captages (voir tableau I.1).

On note que, dans la plupart des pays le critère retenu pour déterminer le périmètre de protection rapprochée est un temps de transfert d'au moins 50 jours. Par contre, en France aucune indication n'est donnée pour le dimensionnement des périmètres, c'est le même cas de l'Algérie. On notera également que les servitudes imposées dans les différentes zones sont plus strictes en Allemagne et en Suisse.

Il est à souligner qu'en Allemagne et en Suisse, il est possible d'interdire certaines activités en zone éloignée, alors qu'en France et en Algérie on ne peut que réglementer certaines activités dans le périmètre de protection éloignée.

Certains pays ont encore une législation insuffisante concernant la protection des captages mais certains travaillent à l'élaboration d'une réglementation le cas d'Italie par exemple. A noter également l'ambitieux programme mis en place aux Etats-Unis depuis 1986 et le fait que dans ce pays, l'Environmental Protection Agency (EPA), donc l'Etat, participe au financement de la protection des captages (**Lallemand-Barrès et Roux, 1999**).

Tableau I.1 : Dimensions des périmètres de protection des captages dans différents pays. (**Lallemand-Barrès et Roux, 1999**)

République Fédérale d'Allemagne	France	Suisse	Etats-Unis	Pays-Bas
Zone 1 autour de puits 10-100 m	Protection immédiate 10 à 20 m	Zone 1 5-20 m	Zone 1 30 m	Autour du puits
Zone 2 : zone de protection rapprochée 50 jours	Protection rapprochée	Zone 2 10 jours > 100m	Zone 2 50 jours (165 m)	« catchment ares » (>30m, 50 à 60 jours)
Zone 3 A Zone de protection éloignée 2 km	Protection éloignée	Zone 3 > 200 m	Zone 3, 15 ans minimum	Zone de protection de 10 ans

I.5. Conclusion :

Consciente des défis à relever dans la gestion et la protection des ressources en eau et de la nécessité de mettre en œuvre une nouvelle politique dans ce secteur, l'Algérie a déployé beaucoup d'efforts depuis l'indépendance, en élaborant et en mettant en application de nombreux textes législatifs à savoir des lois et des décrets afin de mieux gérer toutes les activités qui pourraient porter atteinte à la qualité des ressources en eau..

La mise en œuvre de ces dispositions législatives et réglementaires applicable à la protection des captages nécessite une démarche structurée des services de l'état.

En outre, certaines implantation et activités sont soumises à une autorisation ou peuvent faire l'objet de prescription particulière.

Par contre, l'application et l'établissement des procédures relatives aux zones de protection ne sont pas bien encore maîtrisées. De même les instruments juridiques et législatifs ne sont pas bien développés, et même la mise en place de ces zones sur le terrain nécessite encore des efforts colossaux à accomplir.

Chapitre II : Généralités sur les eaux souterraines dans le karst

II.1. Introduction

Le karst fascine les amateurs et les professionnels par ses formes très diversifiées, qui débutent à la surface, et qui se prolongent à des profondeurs vertigineuses encore vierges de toute exploration. De nombreuses communautés scientifiques tentent encore de percer ses secrets et de proposer des clés pour expliquer le fonctionnement passé et actuel d'un système karstique. Outre ses expressions morphologiques remarquables, ses ressources en eau potable en font un enjeu très important, notamment dans la région méditerranéenne où ce type d'aquifère est très présent et les besoins en eau potable conséquents (**Valois, 2011**).

II.2. Etymologie & histoire

De *karst*, nom allemand de la région des plateaux calcaires de Slovénie dont le nom slave est *Kras*.

Le Karst c'est 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) (**Bakalowicz, 2002**).

II.3. Les formes karstiques :

II .3.1. L'Exokarst :

II .3.1.1. Les Lapiés

Généralement en système karstique Les formes de surface sont représentées par des lapiés, aussi appelé le lapiaz, lapiez ou *Karren*, mot d'origine jurassienne. Leur profondeur varie de quelques millimètres à plus d'une dizaine de centimètres. Ils se développent plus dans les calcaires que dans les dolomies. Ils sont profonds dans les calcaires purs (**Bensaoula, 2007**).

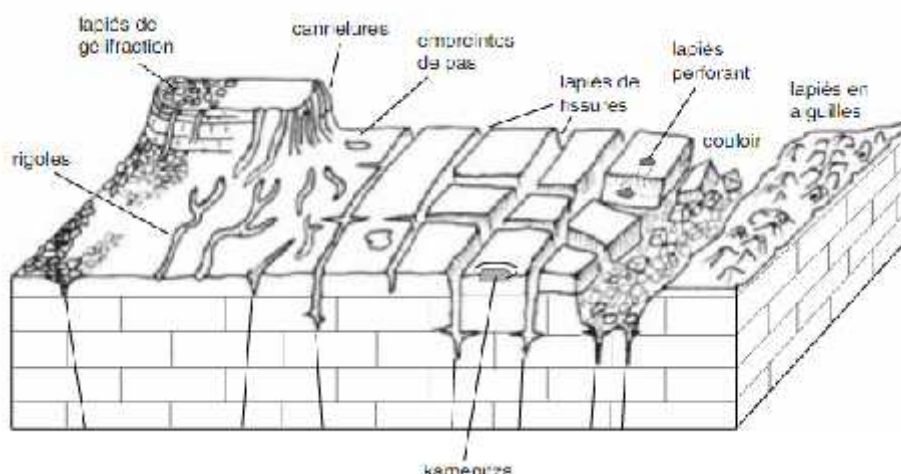


Figure II.1 : Quelques formes courantes de lapiés (Gilli, 2011).

II. 3.1.2. Couloirs :

Un important élargissement des lapiés des fissures ou de rigoles peut donner naissance à des couloirs profonds dans lesquels la progression humaine est possible. Des formes spectaculaires sont connues à Madagascar dans les secteurs du Bemaraha et de l'Ankarana, où les couloirs sont profonds de plusieurs dizaines de mètres. Certains couloirs peuvent résulter de la disparition du plafond d'une grotte, d'autres sont associés à des filons de basalte qui traversent le calcaire et favorisent la dissolution (Gilli, 2011).

II .3.1.3. Dolines

Les dolines sont une composante essentielle des reliefs karstiques tant sur le plan morphologique que sur le plan hydrologique. Ce sont des dépressions fermées plus ou moins circulaires, d'aspect et de taille variables. Elles ponctuent la surface des zones karstiques et leur densité est parfois telle, qu'elles peuvent être coalescentes. Elles forment une multitude de petits bassins endoréiques qui recueillent l'eau de précipitations formant ainsi de véritables entonnoirs naturels. Le fond des dolines est souvent occupé par des sols plus ou moins épais. Dans les zones karstiques du monde méditerranéen, elles constituent souvent les seules zones cultivables au milieu de champs de lapiés où la roche à nu est stérile (Gilli, 2011).

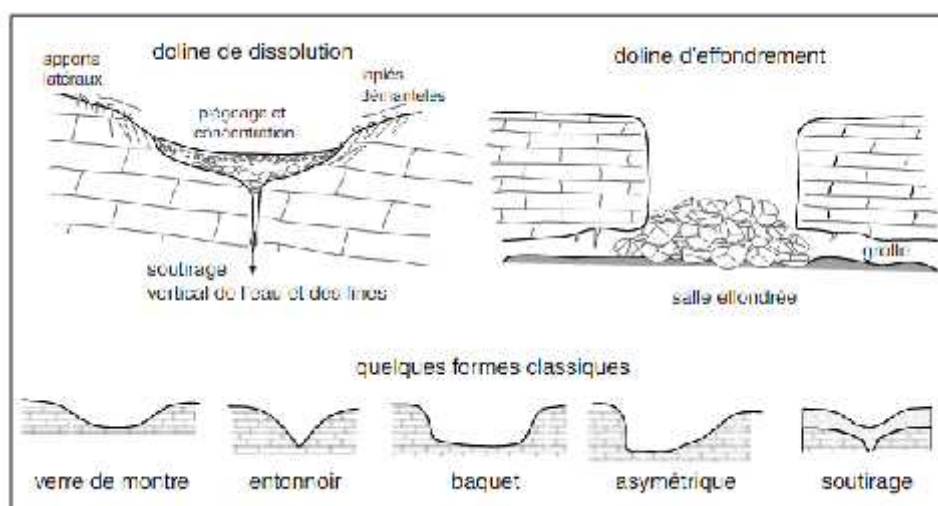


Figure II.2 : Structure des dolines (Gilli, 2011)

II .3.1.4. Poljé

Le *poljé* (en slave, plaine) est une vaste dépression fermée, allongée et à fond plat, dominée par des versants rocheux très escarpés (**Bensaoula, 2006**).

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 in Dorni, 2010**).

II.3.1.5. Canyons, reculées, vallées aveugles ou à éclipses

Les zones karstiques peuvent être parcourues par des cours d'eaux aériens, plus ou moins connectés avec les écoulements souterrains. Les canyons, comme ceux du Verdon ou du Tarn, sont des gorges étroites qui entaillent la masse calcaire. Il s'agit le plus souvent de cours d'eaux puissants, d'origine allochtone, qui peut entailler la masse calcaire sans s'y perdre totalement. Ils peuvent recouper des circulations souterraines et constituer alors le niveau de base de ces derniers, mais ils peuvent aussi être perchés au-dessus des nappes karstiques qu'ils alimentent alors partiellement par leurs pertes diffuses. Les reculées sont des vallées qui naissent d'un cirque calcaire au pied duquel jaillit une source comme à la Loue (Doubs), à Fontaine de Vaucluse ou au cirque d'Archiane dans le Vercors. Les vallées aveugles sont des cours d'eau allogènes qui après un parcours aérien dans des gorges calcaires butent sur un cirque où ils se perdent en totalité. Les vallées à éclipses sont une

forme qui regroupe reculée et vallée aveugle. Lorsque les calcaires sont peu épais, et les écoulements proches du substratum imperméable, des portions de vallées actives, entre des zones à parcours souterrain, peuvent s'observer comme au Parc de Rakov (Slovénie). Leur genèse est liée à l'effondrement des voûtes des grottes sur de longues distances (Gilli, 2011).

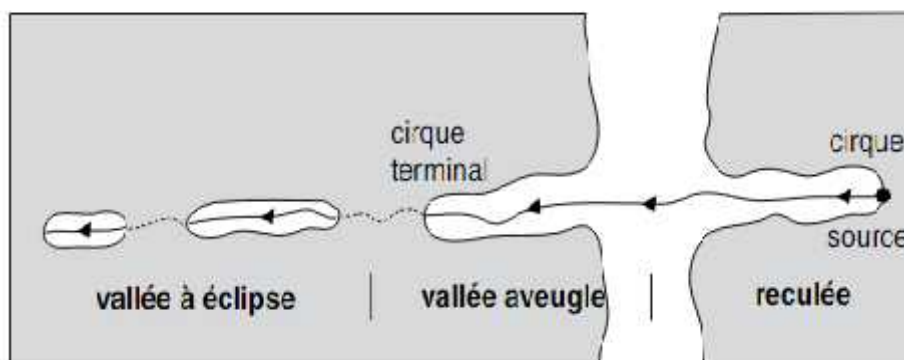


Figure II.3 : Cours d'eau aériens des zones karstiques (Gilli ,2011).

II .3.2. Endokarst

II .3.2.1. Les avens

Ce sont des gouffres caractéristiques des régions karstiques. Ils sont le plus souvent formés par l'effondrement de la voûte d'une cavité souterraine au cours de la dissolution du calcaire. Un aven communique généralement avec une grotte souterraine et tout un réseau de galeries [1].

II .3.2.2. Les pertes

Une perte est une ouverture par laquelle un cours d'eau devient souterrain après un trajet à l'air libre. Il ressortira par une résurgence [1].

II .3.2.3. Les stalactites

Lorsqu'une goutte d'eau suinte au plafond d'une cavité, le dégazage qui se produit entraîne un dépôt de carbonate de calcium. Un petit tube va ainsi se former qui s'allonge et grossit au fur et à mesure de l'arrivée de l'eau à l'air libre [1].

II.3.2.4. Les stalagmites

Lorsqu'une goutte d'eau tombe du plafond d'une grotte ou de l'extrémité d'une stalactite, elle contient encore du carbonate de calcium en dissolution. Lorsqu'elle arrive sur le sol, elle produit des éclaboussures qui déposent de fines particules minérales. Au point d'impact se crée alors une sorte de bosse qui, par accroissement progressif de son sommet, donnera une stalagmite [1].

II.4. Les eaux souterraines karstiques

L'étude du comportement hydrodynamique et géochimique des eaux de systèmes karstiques a permis en particulier d'entrer dans le détail des mécanismes d'écoulement dans la zone d'infiltration et dans la zone noyée.

II.4.1. La zone d'infiltration :

On distingue différents types d'infiltration :

- L'infiltration différée par un stockage à proximité de la surface dans l'épikarst où l'eau est soumise aux processus biogéochimiques associés à l'évapotranspiration, intervenant dans les sols ; cette infiltration s'oppose à l'infiltration directe, non soumise à ces processus.
- L'infiltration lente par laquelle un mélange d'air et d'eau parcourt les fines fissures et la porosité de la roche à l'origine de la dissolution de la roche carbonatée près de la surface.

L'infiltration rapide, qui correspond à un ruissellement souterrain parcourant les fractures les plus larges, et les plus élargies par dissolution, responsable de la dissolution en profondeur, alimentée, d'une part, par des rivières s'écoulant sur des terrains non karstiques, se perdant au contact des calcaires, d'autre part, par l'arrivée d'eau d'infiltration dans les dépressions fermées connectées à des conduits. Ces dernières constituent en général les points d'absorption des eaux de « débordement » de l'épikarst. (**Bakalowicz, 2010**)

II.4.2. La zone noyée

Elle assure les fonctions suivantes :

- Une fonction de drainage, assurée par un réseau de conduits hiérarchisé, écoulant très rapidement vers la source les eaux stockées dans la zone noyée, ainsi que les eaux reçues directement de la surface, surtout par les pertes.
- Une fonction de stockage, assurée par des vides karstiques parfois importants, les systèmes annexes au drainage, et par des zones fissurées, alimentant le réseau de drainage et recevant des eaux d'infiltration rapide.

Selon Bakalowicz (2010) le karst est un milieu qui présente des caractères très originaux. Nous citons dans ce qui suit quelques-uns de ces caractères :

La concentration des écoulements est à l'origine de sources au débit remarquable,

permettant une exploitation en site unique de grands débits.

- Le temps de séjour et de transit des eaux souterraines dans le karst, globalement court, ne permet pas de filtration, ni d'autoépuration efficace.
- Les conditions d'écoulement régnant dans l'aquifère karstique favorisent le transport très rapide de pollutions depuis la surface ou depuis certains points particuliers de l'aquifère (cavités naturelles).
- Ce dernier caractère a fait considérer l'aquifère karstique, dans son ensemble, comme un milieu très vulnérable aux pollutions et à toutes les modifications subies par la surface (variations climatiques, changements de pratiques culturales, modifications du couvert végétal, etc.) (**Bakalowicz, 2010**).

II.5. les sources karstiques

Dans les zones calcaires, peu de rivières se trouvent à la surface car elles s'infiltrant 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.

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.

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

II.6. Conclusion

Le karst est un environnement particulier et encore mal connu, ce qui pose un problème tant pour sa protection que pour son développement, qui nécessite souvent des études minutieuses, adaptées et personnalisées, dans le but de gestion équilibrée, orientée vers une préservation durable de la ressource, en qualité et en quantité.

Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution dans un système Karstique et établissement des périmètres de protection (étude bibliographique)

III.1. Les différentes méthodes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution des systèmes Karstiques :

Les ressources en eaux souterraines des aquifères karstiques sont importantes pour l'approvisionnement en eau dans plusieurs régions.

Dans ces régions, les activités agricoles et forestières sont fréquentes et dans de nombreux cas, l'industrie et le tourisme jouent un rôle prépondérant quant au développement économique de la région. Du point de vue de leur qualité, les eaux des aquifères karstiques, peuvent être altérée à la suite des périodes de crues par une augmentation de la turbidité ou de la teneur en matière organique. D'autre part, les ressources en eau en milieu karstique sont sensibles aux impacts anthropogènes. Par conséquent, elles sont généralement considérées comme vulnérables (**Lorienne, 2014**).

L'appréciation de la vulnérabilité dans un milieu karstique est souvent complexe en raison de l'hétérogénéité du système (**Marchal, 2007**).

Cette vulnérabilité qui s'explique notamment par la structure fortement hétérogène des aquifères karstiques, avec d'une part une alimentation de surface soit diffuse soit concentrée, et d'autre part soit des perméabilités très élevées dans les conduits souterrains, soit des perméabilités faibles dans les blocs peu perméables. Cette "double dualité" se manifeste par un comportement hydrodynamique tout à fait caractéristique : les crues, dues à d'importantes infiltrations concentrées dans des zones très perméables, sont rapides et violentes. Les processus de filtration ou d'auto-épuration des polluants n'ont pas le temps de se développer, comme c'est le cas dans les aquifères à porosité d'interstices (**Lorienne, 2014**).

Une analyse croisée de la cartographie des risques de pollutions et de la vulnérabilité intrinsèque serait souhaitable, mais ne peut être réalisée systématiquement. Les méthodes d'analyse multicritère de la vulnérabilité adaptées aux systèmes karstiques, telles que EPIK (développée en Suisse), RISKE ou RISK (dérivées de EPIK), sont encore très peu utilisées. La méthode DRASTIC n'est pas adaptée pour ce type de préoccupation. Elle permet

seulement de hiérarchiser les sites les uns par rapport aux autres en termes de vulnérabilité (Marchal, 2007).

III.2. Concept de vulnérabilité spécifique et Vulnérabilité intrinsèque :

Le concept de vulnérabilité peut se définir à 3 niveaux :

- Aptitude d'un système d'eaux souterraines à être contaminé ;
- Intégration de l'aptitude des eaux souterraines à propager et à conserver la contamination ;
- Prise en considération des caractéristiques polluantes du contaminant, ce qui fait appel aux concepts de normes et de seuils de toxicité (Lafrance et al, 1989)

La distinction entre vulnérabilité intrinsèque et spécifique a été introduite en 1993 par l'US Committee Techniques for Assessing Groundwater Vulnerability qui les définit de la façon suivante : (i) Vulnérabilité intrinsèque : elle se réfère à la vulnérabilité déterminée sans considération des attributs et du comportement de polluants particuliers, (ii) Vulnérabilité spécifique : elle est utilisée lorsque la vulnérabilité se réfère à un polluant particulier, une classe de contaminant ou à une activité humaine particulière (Darou, 2013).

III.3. Vulnérabilité des aquifères karstiques - Spécificités et analogies :

III.3.1. Définition de la vulnérabilité

La vulnérabilité d'un aquifère est la possibilité qu'a un contaminant de percoler et de diffuser depuis la surface jusqu'au réservoir d'eau dans des conditions naturelles.

III.3.2. Vulnérabilité intrinsèque :

Terme utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités humaines. Elle se définit comme un déficit de protection ou de défense naturelle de l'eau souterraine contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales. Son évaluation s'apprécie par le croisement de deux critères :

- La facilité et la rapidité suivant lesquelles des matières polluantes d'origine superficielle peuvent atteindre l'eau souterraine et dégrader ses qualités (caractéristiques du sol et de la zone comprise entre le sol et l'aquifère, présence d'une couverture imperméable, lithologie dominante) ;

- La difficulté et la lenteur de la régénération des qualités de l'eau souterraine, de l'effacement de l'impact après arrêt du fait polluant, qui dépend davantage des conditions hydrodynamiques de l'aquifère - à l'instar du « pouvoir auto-épurateur » d'un cours d'eau (recharge de l'aquifère, temps de renouvellement, types d'écoulement, perméabilité, échanges avec les cours d'eau et les zones humides, alimentation par des masses d'eau voisine) (**Muet et Vier, 2011**).

III.3.3. Vulnérabilité spécifique :

Terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un contaminant particulier ou à un groupe de contaminants. Elle prend en compte les propriétés des contaminants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque (**Muet et Vier, 2011**)

Il faut souligner que la vulnérabilité d'un aquifère karstique n'est en rien comparable à celle d'un aquifère de milieu poreux ou de milieu fissuré où seules l'adsorption, la dilution et la dispersion sont à prendre en compte.

En revanche, sur le plan de la structure, du fonctionnement et de la vulnérabilité, il apparaît une certaine analogie entre aquifère karstique et cours d'eau de surface. Cette analogie comporte toutefois une limite importante : les écoulements sont souterrains donc invisibles et beaucoup plus complexes à connaître et surtout, ils se développent dans les trois dimensions du réservoir aquifère. La localisation géographique et la hiérarchisation des zones vulnérables sont donc difficiles à déterminer (**Muet et Vier, 2011**).

III.4. Classification des méthodes existantes

La classification des méthodes d'estimation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines peut se faire de multiples façons en fonction :

- du type de vulnérabilité étudiée : intrinsèque ou spécifique ;
- de l'objet étudié : source ou ressource ;
- du contexte géologique : poreux, karstique, fissuré ou autre ;
- du contexte géographique : pays, environnement naturel, climat ;
- du résultat souhaité : carte de vulnérabilité générale, zones de protection d'une source ou estimation de la vulnérabilité en un point donné (**Lorienne, 2014**).

- du type de concept et des techniques utilisées : méthodes empiriques utilisant des paramètres et indices superposables, méthodes mathématiques – numériques par modélisation ou méthodes prévisionnelles par analyse statistique (**Lorienne, 2014**).

Tableau III.1 : Les différentes méthodes de cartographie de vulnérabilité dans le milieu karstique (Lorienne, 2014) (Modifier).

	Type de vulnérabilité	Objet Etudié	Géologie	Géographie	Auteur	Résultat souhaité	Concept et Techniques	Remarques
EPIK	Intrinsèque	Source	Karst	Suisse	Doerflinger Et Zwahlen	Zones de protection	Paramètres et indices superposables	Largement utilisée hors Suisse
COST-620 et UE approche	Intrinsèque	Source ou ressource	Karst + autre	Europe	COST 620	Base pour les méthodes résultantes (PI, COP)	Paramètres et indices superposables	Flexible et adaptable
COP	Intrinsèque	Ressource	Karst	Méditerranée	Viàs et al. 2002	Cartes de vulnérabilité	Paramètres et indices superposables	Aussi applicable ailleurs en UE
PI	Intrinsèque	Ressource	Karst	Allemagne	Goldsheider Et al. 2002	Cartes de vulnérabilité	Paramètres et indices superposables	/
RISK	Intrinsèque	Source ou ressource	Karst	Suisse	Petelet-Guiraud Et al.1999, 2000	Cartes de vulnérabilité	Paramètres et indices superposables	/
RISK02	Intrinsèque	Source ou ressource	Karst	Suisse	V.Plagnes et al. 2006 2007	Cartes de vulnérabilité	Paramètres et indices superposables	/
PaPRIKa	Intrinsèque	Source	Karst	France	/	Cartes de vulnérabilité et Périmètres de protection	Paramètres et indices superposables	L'évolution de la méthode EPIK
LEA	Intrinsèque	Ressource	Karst	Angleterre & Pays de Galles	Dune.1998, 2002	Cartes de vulnérabilité	Paramètres et indices superposables	/

III.4.1. La méthode multicritère, méthode EPIK :

La méthode multicritère EPIK a été établie pour cartographier de manière générale la vulnérabilité des aquifères karstiques et plus spécifiquement celle des bassins d'alimentation des sources ou captages en milieu karstique (**OFEFP, 1998**).

Elle a été développée aussi dans le but de délimiter les périmètres de protection des captages, conformément à la législation Suisse, à partir d'une base cohérente et rigoureuse.

Un des avantages de cette méthode est de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis-à-vis de tout type de contaminant (**Derni, 2010**).

Basée sur l'organisation spécifique des écoulements dans les aquifères karstiques, cette méthode prend en compte 4 critères :

- développement de l'**E**pikarst,
- importance de la couverture **P**rotectrice.
- conditions d'**I**nfiltration.
- développement du réseau **K**arstique.

La délimitation des zones de vulnérabilité par la méthode EPIK se fait par le calcul du Facteur de Protection F pour lequel quatre critères ont été sélectionnés (Tableau III.2). Il s'agit du développement de l'**E**pikarst (E), de l'importance de la couverture protectrice (P), des conditions d'infiltration (I) et du développement du réseau karstique (K).

Tableau III.2 : Les Critère de la méthode EPIK (OFEFP, 1998)

Morphologie karstique observée (en relation avec l'épikarst)	E1	Gouffre, aven, ponor, embut, doline, lapiez, relief uniforme, cuevas	
	E2	Zones intermédiaires situées dans les alignements de dolines, ouvalas, vallées sèches, canyons, poljes	
	E3	Le reste du bassin versant	
Absence de morphologie karstique			
		A. Sol reposant directement sur les formations calcaires ou sur des formations détritiques de très grande conductivité hydraulique (éboulis, moraines latérales)	B. Sol reposant sur > de 20 cm de formation géologique de faible conductivité hydraulique (K) (argiles, limons)
Absence de ouverture protectrice	P1	0-20 cm de sol	
	P2	20-100 cm de sol	20-100 cm de sol et de formation de faible K.
	P3	> 1m De sol	> 1m de sol et de formation de faible K.
Couverture protectrice importante	P4		Formation de très faible K > 8m, ou d'épaisseur > 6m avec > 1m de sol
Infiltration concentrée	I1	Perte – lits et berges des cours d'eau alimentant une perte – écoulements superficiels s'infiltrant – secteurs du bassin versant d'un cours d'eau comprenant des systèmes de drainage artificiel	
	I2	Secteur du bassin versant d'un cours d'eau non drainé artificiellement, et dont la pente est > 10% pour les surfaces cultivées et > 25% pour les prairies et les pâturages	
	I3	Secteur du bassin versant d'un cours d'eau dont la pente est < 10% pour les zones cultivées et <25% pour les prairies et pâturages. En dehors du bassin versant d'un cours d'eau, zones de pieds de pente collectant les eaux de ruissèlement et pentes prononcées (> 10% pour les zones cultivées et > 25% pour les prairies et pâturages) dont les eaux de ruissèlement alimentent ces zones	
Infiltration diffuse	I4	Le reste du bassin d'alimentation	
Réseau karstique bien développé	K1	Réseau karstique bien développé à conduits décimétriques à métriques très peu colmatés et bien connectés entre eux	
Réseau karstique mal développé	K2	Réseau karstique mal développé, à drains ou conduits mal connectés ou colmatés, ou encore de dimension décimétrique et inférieure	
Aquifère mixte ou fissuré	K3	Exutoire en milieu poreux avec un effet protecteur possible – aquifère fissuré non karstique	

La combinaison des quatre critères indexés décrits précédemment permet de déterminer la valeur du facteur de protection F en tout point du bassin d'alimentation. Le calcul est effectué de la manière suivante :

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

Avec F = valeur du facteur de protection

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficient: de pondération de chacun des critères

E_i, P_j, I_k, K_l : valeur de chacun des critères indexés (**OFEFP. 1998**).

III.4.2. La méthode PI :

La méthode PI est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines karstiques. Elle a été développée en Allemagne par (Goldsheider et al, (2000)), ensuite modifiée pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines dans les régions semi-aride (**Bencherki, 2008**), 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. Elle repose essentiellement sur la caractérisation spatiale de deux critères :

P, pour la couverture Protectrice, et I pour la condition d'infiltration.

Le critère P : est subdivisé en 5 classes, de 1 faible degré de protection à 5 forts degrés de protection. La détermination des classes de ce critère repose sur une méthode développée par Holting en Allemagne. (**Dörfliger et al, 2004**)

$$Pts = [T + (\sum Si * Mi + \sum Bi * Mi)] * R + A$$

Avec :

T : (couverture pédologique) Pour une épaisseur donnée, est attribuée une valeur de T.

M : épaisseurs de chaque strate

S : sous-sol

R : recharge (mm/an)

B : substrat rocheux

A : pressions artésiennes.

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.

Le facteur de protection JI résultant est la multiplication de l'indice des critères P et I, soit $P \cdot I$, $J I > \text{ou} = 1$ signifie un degré de protection très faible, une vulnérabilité extrême à la pollution ; $J I = 5$ signifie un fort degré de protection et une très faible vulnérabilité

Tableau III.3 : 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	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

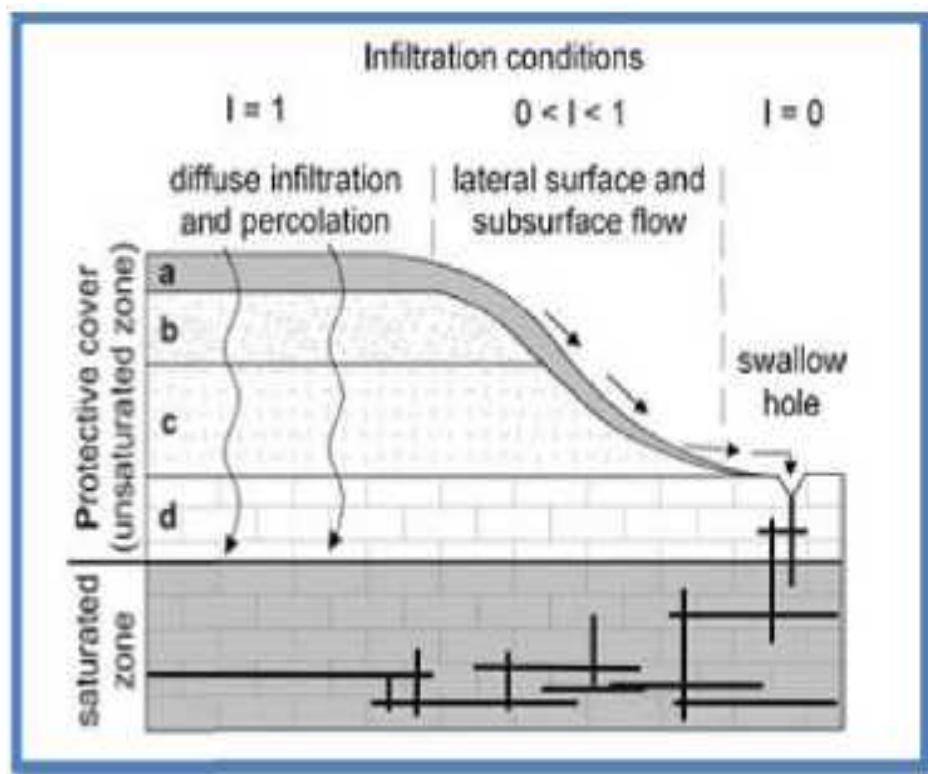


Figure III.1 : Illustration de la méthode PI (Goldscheider, 2005 in Fellah 2012)

III.4.3. La méthode RISK :

La méthode RISK est une méthode de cartographie multicritères de la vulnérabilité des surfaces contribuant à la recharge de l'aquifère. Elle fournit une cartographie hiérarchisée en 5 classes de vulnérabilité (**Dörfliger et Mettetal, 2005**).

La méthode RISK prend en compte 4 critères qui permettent de définir l'architecture de l'aquifère et l'organisation des écoulements dans le milieu karstique :

- **R** pour la roche aquifère
- **I** pour les conditions d'infiltration
- **S** pour le sol et la couverture protectrice
- **K** pour le degré de développement de la karstification.

Chaque critère est réparti en différentes classes, de 0 à 4, du moins vulnérable au plus vulnérable. Un facteur de pondération est attribué à chaque critère. Il traduira l'importance relative des critères entre eux (**AERMC, 2013**). Le calcul de l'indice global de vulnérabilité pour la méthode RISK est effectué selon la formule suivante :

$$I_g = \alpha K_i + \beta R_j + \delta I_k + \gamma S_l$$

I_g : Indice global de vulnérabilité

$\alpha, \beta, \delta, \gamma$: Poids de chacun des critères

K_i, R_j, I_k, S_l : Valeur des critères indexés

Tableau III.4 : les 5 classes de vulnérabilité selon l'indice global I_g (**AERMC, 2013**).

Reclassification I_g	Indice	Vulnérabilité
3,2 - 4	4	Très élevée
2,4 - 3,19	3	Élevée
1,6 - 2,39	2	Modérée
0,8 - 1,59	1	Faible
0 - 0,79	0	Très faible

III.4.4. La méthode RISKE 02 :

La méthode de cartographie R.I.S.K.E.2 est une dérivée de la méthode suisse EPIK et de la méthode RISKE. C'est une évolution de cette dernière laquelle apporte même une amélioration sur la définition des 5 critères, elle détermine la capacité qu'aurait une goutte d'eau à s'infiltrer au sein de l'aquifère jusqu'à la ressource puis, à atteindre la source et permet d'évaluer les zones favorables à l'infiltration contre la pollution (**Pranville J. et al, 2007 in Fellah, 2012**) Cette méthode prend en compte les phénomènes exo-karstiques tels que les dolines, avens et pertes (**AERMC, 2013**) ; L'objectif est d'établir la variabilité des modalités d'infiltration vers la ressource et la source et les évolutions méthodologiques qui ont mené de «RISKE » à « RISKE 2 » concernant les critères S, E, I et K (**Fellah, 2012**) :

- Dans RISKE, le critère E permettait de cartographier les morphologies karstiques de surface. Dans RISKE 2, il qualifie la présence ou non d'un épikarst pouvant constituer un aquifère temporaire de stockage en subsurface. Les caractéristiques physiques et spatiales (épaisseur, fracturation, remplissage, continuité latérale) de l'épikarst seront prises en compte dans la définition du nouveau critère E.
- Les critères S (Sol) et E (Epikarst) sont englobés au sein d'un même critère de protection P. Des combinaisons entre les indices de E et S donneront des valeurs d'indices pour P.
- Le critère I distinguera les zones d'infiltration (infiltration diffuse / infiltration Ponctuelle). Pour cela, une étude des pentes (déjà utilisées pour « RISKE ») et de la morphologie karstique de surface (auparavant définie dans le critère E) sera couplée.

Alors, l'abréviation pourrait se notifier RIPK dans le cadre du calcul de l'indice global de vulnérabilité « Ig ».

$$I_g = r R_{0-4} + i I_{0-4} + p P_{0-4} + k K_{0-4}$$

Ce calcul est soumis à deux premières conditions :

$$I \geq r > p \geq k \geq 0.1 \text{ et } \Sigma (\text{indices de pondération}) = 1$$

Le tableau III.5 représente les cinq classes de vulnérabilité à partir de la plus faible à la plus élevée.

Tableau III.5 : Reclassification des valeurs d'Ig en classes de vulnérabilité (pranville J. et al 2007 in Fellah 2012).

Ig	Indices de vulnérabilité
0 - 0,79	0
0,8 - 1,59	1
1,6 - 2,39	2
2,4 - 3,19	3
3,2 - 4	4

III.4.5. L'approche européenne, Facteurs développés dans le cadre de l'action COST 620 :

L'approche européenne de la protection des ressources en eau, formulée dans le cadre du projet COST 620, est une approche généraliste de l'estimation de la vulnérabilité des ressources en eau. Comme proposé par Goldscheider et al. (2004), l'approche européenne se base sur un modèle conceptuel général, simple mais extrêmement pratique « OTC » Origine-Trajet-Cible.

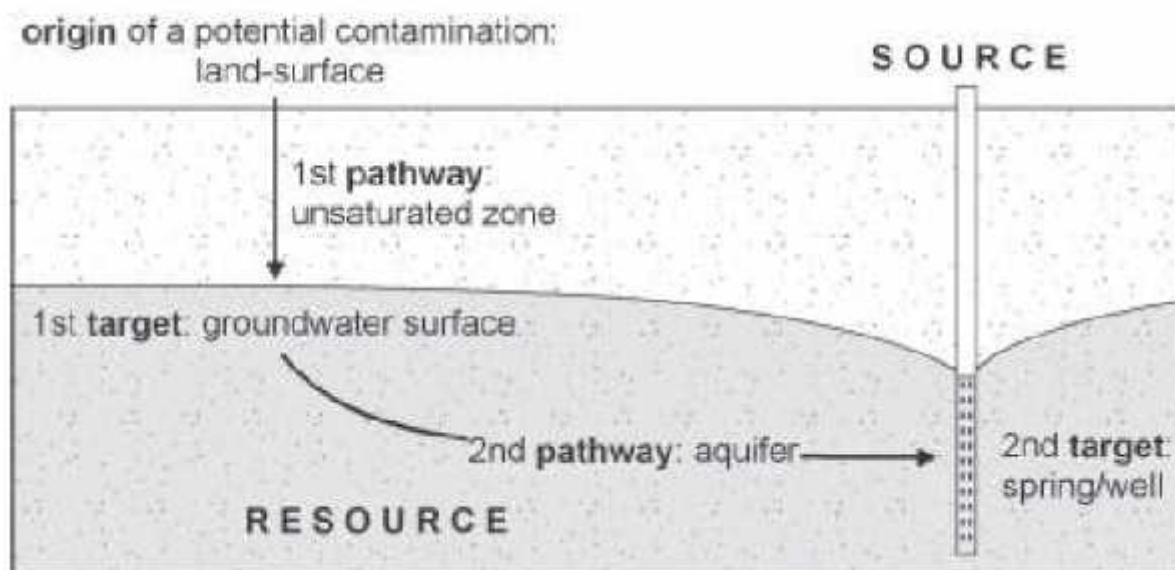


Figure III.2 : Modèle OTC selon l'Approche européenne (COST 620).

Le modèle conceptuel OTC, adapté par l'approche européenne, considère trois groupes de facteurs généraux (facteurs O, C et p) plus un facteur spécifique au karst, le facteur K.

Facteur O, couches protectrices superficielles : Le facteur O est lié au type et épaisseur du sol, du sous-sol et des formations géologiques de la zone non saturée.

Facteur C, concentration de l'écoulement : Le facteur C représente la concentration du ruissèlement de surface et de l'eau en subsurface, Cette concentration ayant lieu, soit en des endroits spécifique (perte, failles).

Facteur P, régime de précipitations : Le facteur P est en relation avec la quantité annuelle de précipitations, mais également avec le régime des évènements pluvieux.

Facteur K, développement du réseau karstique : Le facteur K décrit, de façon plus spécifique, le degré de développement du réseau karstique et son influence sur l'écoulement de l'eau en milieu saturé.

III.4.6. Méthode COP

Cette méthode a été développée dans le cadre de l'action COST 620 par le groupe d'hydrogéologie de l'université de Malaga, dans le sud de l'Espagne dans la région de Torremolinos (**Pranville et al, 2007**)

Cette méthode, avec ces trois facteurs, C, O et P, 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 » :

C, concentration du flux en distinguant la recharge par les pertes, avens.

P, précipitation obtenue en croissant les notions de quantité et d'intensité.

O, formation superficielles de couverture résultant du croisement entre épaisseur nature de la couverture (sol et formation lithologique) (**Dörfliger et al, 2004**).

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

$$COP \text{ (Indice)} = (C \text{ résultat}) * (O \text{ résultat}) * (P \text{ résultat})$$



Tableau III.6 : Indice COP utilisé pour la cartographie de la vulnérabilité (Dörfliger et al, 2004)

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

III.4.7. Méthode LEA :

Approche européenne (Angleterre & Pays de Galles) : Localised European Approach (EARMC, 2013).

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. (Dörfliger, Jauffret, Loubier, Petit, 2004).

Tableau III.7 : Couverture protectrice liée à la vulnérabilité et classe de temps de transit estimatif (COST 620)

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

III.4.8. La méthode PaPRIKA :

PaPRIKA dont l'acronyme signifie « Protection des aquifère karstique basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et le degré de Karstification »,

C'est une méthode multicritère de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque à index avec système de pondération dont les critères sont sélectionnés en fonction des caractéristique et de fonctionnement des aquifère karstiques. Cette méthode a été évaluée à partir de la méthode

EPIK en passant par RISKE et RISKE2. Les cibles de cette méthode sont d'une part la ressource et d'autre part le captage (**Dörfliger et Plagnes, 2009**).

III.5. Délimitation des périmètres de protection en milieu karstique :

Comme pour tous les autres types d'aquifères, la délimitation des périmètres de protection n'a pas pour objectif de protéger la ressource (**Marchal, 2007**) mais de préserver les points de prélèvement des risques de pollution provenant des activités exercées à proximité (**Muet et Vier, 2011**).

En conséquence, le périmètre de protection rapprochée n'a pas à couvrir la totalité de la zone d'affleurement des calcaires, voire même l'aire d'alimentation du captage. Cependant, la délimitation des périmètres de la protection efficace est souvent difficile à atteindre dans ce contexte.

La délimitation des périmètres de protection rapprochée des captages en aquifères karstiques est souvent difficile, en raison de l'hétérogénéité géologique du milieu. Cependant, la taille de ces périmètres doit être compatible avec l'application des prescriptions. Une dimension raisonnable doit être proposée au regard de ces prescriptions, le traitement de l'eau avec éventuellement un dispositif d'alerte venant alors compléter le dispositif de protection de l'eau distribuée (**Marchal, 2007**).

Afin de justifier des limites du périmètre de protection rapprochée, il serait nécessaire de pouvoir évaluer le temps de transit. Cela est possible lorsque des traçages ont été réalisés et validés. Cependant, les temps de transit connus concernent des relations entre des pertes et des sorties d'eau. Or, le système karstique ne se résume pas aux secteurs drainants du karst noyé (**Marchal, 2007**).

Dans ce contexte hétérogène, plusieurs secteurs discontinus du périmètre de protection rapprochée peuvent être définis. Les prescriptions qui seront proposées peuvent aussi être modulées et graduées en fonction d'un degré de vulnérabilité différent en fonction de nature lithologique, du recouvrement, des conditions structurales, ou encore des temps de transfert (**Marchal, 2007**).

III.5.1. Présentation de la typologie des captages à protéger dans un système karstique :

Une typologie des captages en aquifère karstique a été établie sur la base de l'analyse bibliographique et de la consultation des experts nationaux ; elle a pour objectif de tenter

d'identifier des stratégies de protection différentes en fonction des types de captages. Il est apparu que les captages en karst pouvaient être classés en un nombre réduit de types.

Trois types de captages ont été définis en fonction de 2 critères simples, facilement identifiables dès les premières approches (**Cadilhac et Dugleux, 2006**).

- la position du captage par rapport à la structure du système karstique. Elle permet de distinguer les captages (gravitaires, par pompage ou par forage) places sur les axes de drainage (source, galeries en amont des sources) et les captages (le plus souvent forages) dans les systèmes annexes au drainage (**Muet et Vier, 2011**).
- La superficie de l'impluvium du système karstique capte, directement proportionnelle aux débits moyens de la source exutoire du système. Un seuil de l'ordre 10 km² est proposé.

Tableau III.8 : Classification typologique des captages (Muet et Vier, 2011).

CRITÈRES		SUPERFICIE DE L'AIRE D'ALIMENTATION	
		< 10 km ² / débit moyen annuel faible	> 10 km ² / débit moyen annuel fort
POSITION DU CAPTAGE	Captage de source, forage sur axe de drainage, pompage en source	Type A • Souvent systèmes karstiques peu évolués ou peu fonctionnels pour avoir un débit suffisant en étiage • Surfaces à protéger plus réduites • Meilleure maîtrise du foncier • Motivation plus importante car périmètre à proximité de la zone alimentée • Etudes hydrogéologiques préalables plus simples et moins coûteuses Stratégie de protection simple	Type B • Surfaces à protéger plus ou moins importantes et souvent éloignées du captage • Vitesses de transit pouvant être élevées (vulnérabilité) • Difficulté de motivation car protection loin de la population alimentée • Etudes hydrogéologiques préalables, longues et complexes • Nécessité d'une forte expertise du bureau d'études et de l'hydrogéologue agréé Stratégie de protection de plus difficile à définir, fonction des résultats des études préalables (fonctionnalité, vulnérabilité,...)
	Forage hors des principaux axes de drainage	Type C • Aire d'alimentation souvent réduite, pas ou peu d'influence des sources de pollution lointaines • Surface à protéger souvent réduite par rapport au type B (dépend du débit de pompage) • Meilleure maîtrise du foncier • Motivation plus importante car périmètre à proximité de la population alimentée • Etudes préalables différentes des autres types, principalement basées sur les pompages d'essai Stratégie de protection différente des types A et B	

Type A : Ces captages concernent le plus souvent des sources à faible débit dont le débit d'étiage est néanmoins suffisamment soutenu pour qu'il présente un intérêt pour l'approvisionnement en eau potable de la collectivité. Cette caractéristique induit généralement une vulnérabilité assez faible.

De plus, la taille réduite du bassin d'alimentation rend plus simples et moins coûteuses les études hydrogéologiques préalables. La protection est plus facile à mettre en place. La collectivité maîtrise mieux le foncier et la mobilisation des acteurs locaux est souvent meilleure car les personnes concernées par les mesures de protection sont aussi celles qui consomment les eaux captées.

Type B : Ces captages représentent la grande majorité des ouvrages actuellement protégés ou en cours de protection. Ils nécessitent des études hydrogéologiques préalables spécifiques, souvent lourdes. Les stratégies de protection pour les captages de type B se situent entre celles utilisées pour les eaux de surface et celles employées pour les milieux hétérogènes de type fissures.

Type C : Ces captages sont certainement les moins nombreux car l'idée selon laquelle il peut exister des réserves exploitables importantes entre les drains est récente. Ces captages ont pourtant beaucoup d'avantages puisqu'ils présentent généralement des aires d'alimentation moins grandes et permettent donc des stratégies de protection plus simples. De plus, la qualité des eaux est souvent plus stable (**Muet et Vier, 2011**).

III.5.2. Les périmètres de protection :

III.2.2.1. L'étendue du périmètre de protection :

La notion de périmètre de protection concerne uniquement les captages publics, est uniquement fondé sur des considérations d'ordre hydrogéologique et sur les conditions d'exploitation de l'ouvrage à protéger.

L'étendue des périmètres de protection n'a pas, théoriquement, à s'adapter aux conditions environnementales, ni aux critères économiques.

Par contre l'évaluation de périmètre est relative aux risques de dégradation de la qualité de l'eau, qui va préciser les dispositions à prendre concernant les activités existantes à l'intérieur du périmètre de protection qu'il aura défini et justifié sur des critères hydrogéologiques.

Pour définir les périmètres de protection des captages, il faut tenir en compte les zones suivantes :

L'aire d'alimentation du captage (AAC) qui correspond à la partie de la nappe qui alimente le captage (**Marchal, 2007**). Les aires d'alimentation de captage visée par ce dispositif correspondent ainsi aux surfaces sur lesquelles l'eau qui s'infiltre ou ruisselle participe à

l'alimentation de la ressource en eau dans laquelle se fait le prélèvement (**Vernoux et al, 2007**). Elle peut éventuellement être assimilée au périmètre de protection éloignée (**Marchal, 2007**).

Le bassin d'alimentation du captage (BAC), correspondant à l'extension en surface de la portion de la nappe éventuellement étendue aux zones de bordure et/ou diminuées des zones imperméables. Le BAC peut être plus vaste que l'AAC en particulier pour les systèmes karstiques binaires comprenant un aquifère karstique et un bassin de surface drainé par des pertes. A l'inverse, l'AAC peut être de dimension plus réduite que le BAC si la nappe est captive ;

Dans le cas simple, le bassin d'alimentation concerne un seul aquifère et correspond à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage. C'est ce que montre la figure, en considérant que la surface située entre la crête topographique et la crête piézométrique est infiltrant (schéma 1). Si cette surface étant imperméable, le bassin d'alimentation du captage serait plus réduit et à l'inverse le bassin d'alimentation de la source serait plus étendue (schéma 2) (**Vernoux et al, 2007**).

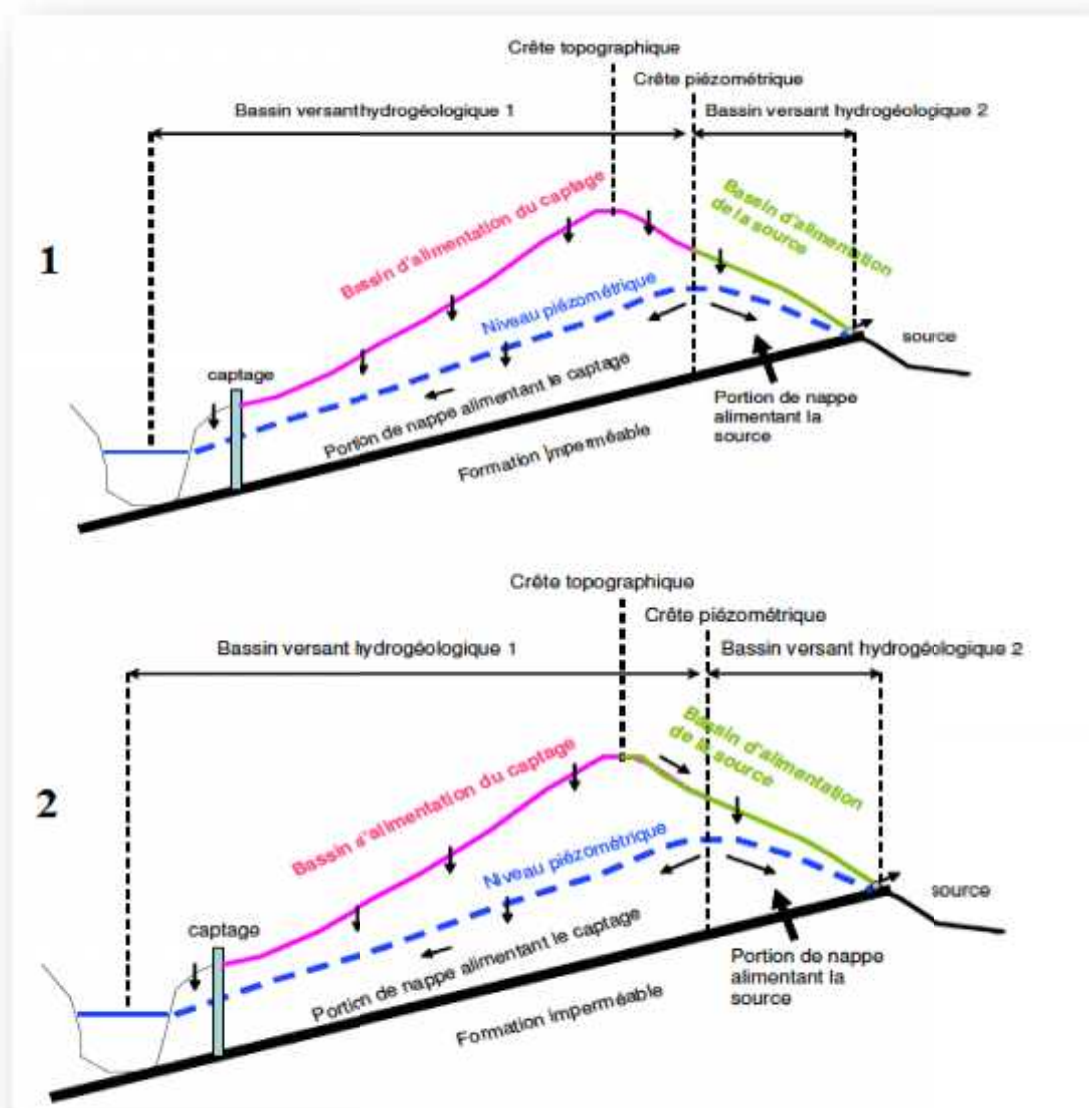


Figure III.3 : Bassin hydrogéologique, et bassin d'alimentation du captage (Vernoux et al, 2007).

III.5.3. Les type des périmètres de protection :

Comme pour tous les autres types d'aquifères, la délimitation des périmètres de protection n'a pas pour objectif de protéger la ressource, mais de préserver les points de prélèvement des risques de pollution provenant des activités exercées à proximité (Marchal, 2007).

III.5.3.1. Le périmètre de protection immédiate (PPI) :

La délimitation des **périmètres de protection immédiate** en milieu karstique obéit aux mêmes considérations que la protection dans tout autre type de milieu.

Le périmètre de protection immédiate doit couvrir au minimum le captage et ses annexes (drains, galeries, bâti de protection, dalle bétonnée,...), ainsi que les installations nécessaires à l'exploitation de l'ouvrage, si elles sont à proximité de celui-ci. Il doit en outre permettre un accès aux infrastructures pour toutes les personnes chargées du maintien et de la surveillance, mais aussi à la mise en place du matériel de reconditionnement de l'ouvrage (notamment matériel de forage). Ce périmètre doit, dans la mesure du possible, correspondre à des limites parcellaires. La taille de ce périmètre est liée à son objectif de protection immédiate.

A noter cependant que le périmètre de protection immédiate peut concerner un ou plusieurs sites satellites très localisés et dont les relations directes avec le captage étudié ont été mises en évidence par traçages notamment **(Marchal, 2007)**.

III.5.3.2. Le périmètre de protection rapprochée (PPR)

Le périmètre de protection rapprochée a pour but de protéger efficacement le captage vis-à-vis de la migration souterraine des substances polluantes. Il constitue une zone tampon autour du captage dans laquelle va s'appliquer une réglementation spécifique complémentaire à la réglementation générale qui s'applique au reste du territoire. Les critères de délimitation de ce périmètre sont basés sur les paramètres hydrogéologiques locaux et sur les conditions d'exploitation de l'ouvrage **(Marchal, 2007)**.

L'étendue du périmètre de protection rapprochée intègre tout ou partie de la zone d'appel du captage, et doit être calculée de manière à assurer un temps de transfert des pollutions accidentelles et ponctuelles jusqu'au captage suffisamment long pour que puisse être déclenchée l'alerte et que les mesures soient prises pour stopper la contamination, voire modifier ou arrêter le fonctionnement de l'ouvrage en cause. **(Marchal, 2007)**.

Afin de justifier des limites du périmètre de protection rapprochée, il serait nécessaire de pouvoir évaluer le temps de transit. Cela est possible lorsque des traçages ont été réalisés et validés. Cependant, les temps de transit connus concernent des relations entre des pertes et des sorties d'eau. Or, le système karstique ne se résume pas aux structures drainantes du karst noyé. Dans ce contexte hétérogène, plusieurs secteurs discontinus du périmètre de protection rapprochée peuvent être définis. Les prescriptions qui seront proposées peuvent aussi être modulées et graduées en fonction d'un degré de vulnérabilité différent en fonction de la nature lithologique, du recouvrement, des conditions structurales, ou encore des temps de transfert **(Marchal, 2007)**.

En outre, l'étendue du périmètre de protection rapprochée doit être telle que les phénomènes de fixation, dégradation et dispersion des substances polluantes dans les terrains et dans les eaux réduisent les concentrations mesurées au captage et les maintiennent à un niveau acceptable pour la santé publique. Cette approche peut être prise en compte si la taille du PPR reste économiquement et techniquement acceptable (**Marchal, 2007**).

III.5.3.3. Le périmètre de protection éloignée (PPE)

Le périmètre de protection éloignée correspond théoriquement à la totalité de l'aire (ou zone) d'alimentation de l'ouvrage et permet d'attirer l'attention sur la présence d'une ressource captée pour l'alimentation en eau potable et donc sur la nécessité de vigilance pour que les activités existantes et futures ne portent pas préjudice à la qualité des eaux souterraines captées.

Sa définition repose sur la délimitation de l'aire d'alimentation du captage à l'intérieur de laquelle les lignes de courant sont orientées vers l'ouvrage utilisé.

L'étendue des aires d'alimentation des captages peut être importante. Dans ce cas, le périmètre de protection éloignée ne recouvre pas obligatoirement la totalité de ces aires, mais est plus limité dans l'espace, avec en parallèle la mise en place d'un dispositif d'alerte complémentaire et d'un traitement adapté (**Marchal, 2007**).

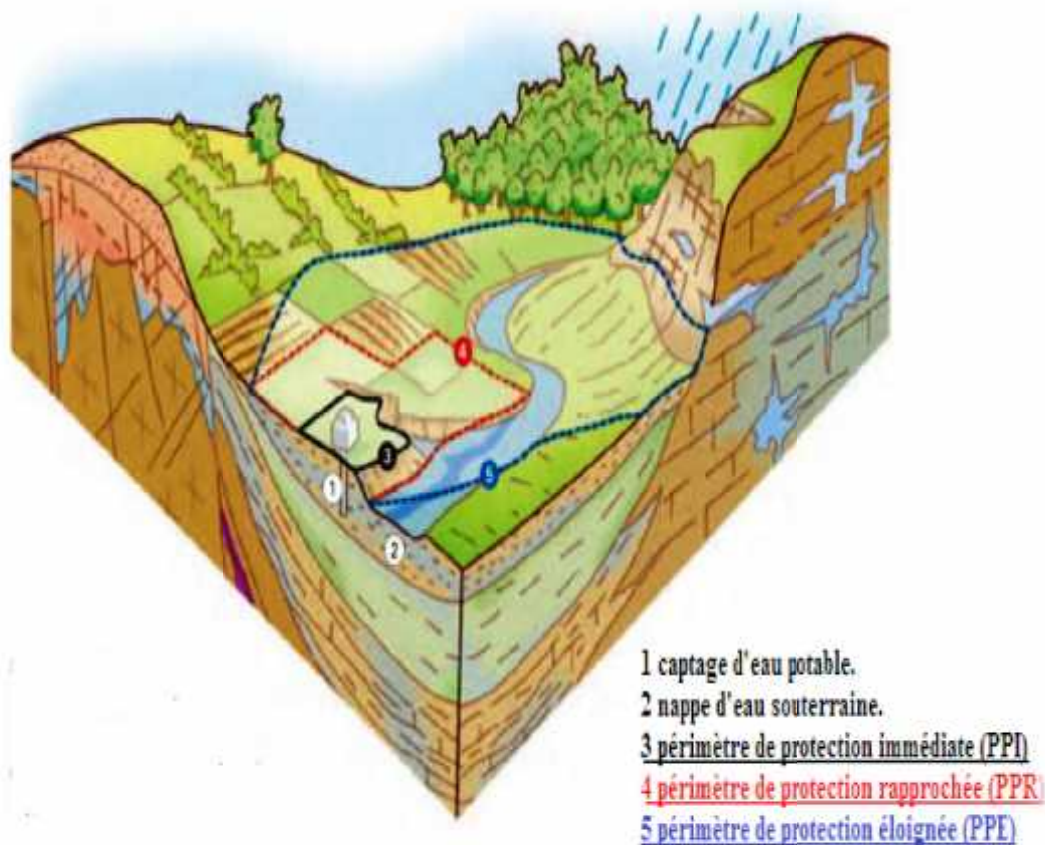


Figure III.4 : Exemple de tracé de périmètres de protection dans le cas d'un captage d'eau souterraine [2].

III.6. Conclusion :

Différentes méthodes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines ont été élaborées par différents auteurs et pour des contextes hydrogéologiques très diversifiés. Les cartes obtenues constituent des outils d'aide à la décision dans toute étude de l'aménagement du territoire. L'attribution des différents indices pour chacun des critères de ces méthodes nécessite une bonne maîtrise des concepts de l'hydrogéologie karstique ainsi qu'une approche naturaliste sur le terrain. Ce chapitre donne les concepts de cartographie de la vulnérabilité des systèmes karstiques afin de poser des bases communes pour la délimitation des périmètres de protection : Périmètre Immédiat, Périmètre rapproché, périmètre éloigné.

Chapitre IV : Aperçu général sur la zone d'étude (système karstique de Ghar Boumâaza) :

IV.1. Présentation générale de la zone d'étude :

Ghar Boumâaza, zone karstique, se situe sur une colline couverte d'une végétation clairsemée. Du côté gauche de la route nationale 22, reliant Tlemcen à Sebdou, l'on peut observer son entrée, une grande ouverture creusée dans la roche qui donne, vers l'extérieur, sur un oued et, vers l'intérieur, sur une rivière souterraine appelée la Tafna. Celle-ci dont une partie est souterraine **est** assez régulière en dimensions et en pente, cependant ses rives ne sont pas parallèles comme celles d'un fleuve.

Ghar Boumâaza est limité au Nord par Djebel Nador haut de 1579 m et l'Oued Essafssaf, à l'Ouest par la forêt de Daher El Berhal, à l'Est par la forêt de Merchiche et au sud par El Hebalet et Sebdou.

Administrativement, le système karstique de Ghar Boumâaza, avec une superficie de 11300ha, appartient à la commune de Terny et d'A.Ghoraba dans la daïra de Mansourah, Wilaya de Tlemcen (Voir figure 01).

L'ensemble des établissements qui existent sur le système sont : Tal Terny, Sehb, Oulad Bounouar, Merchiche, se caractérise par son exposition Sud, en contact avec les communes agro-pastorales. L'élément commun étant l'alignement des centres agglomérés le long de l'axe routier (RN n°22), où l'on trouve successivement Tal Terny, Sehb, Ouled Bounouar, Merchiche. Seul, Dar Maamar échappe à cette organisation **(Taamir, 2013)**.

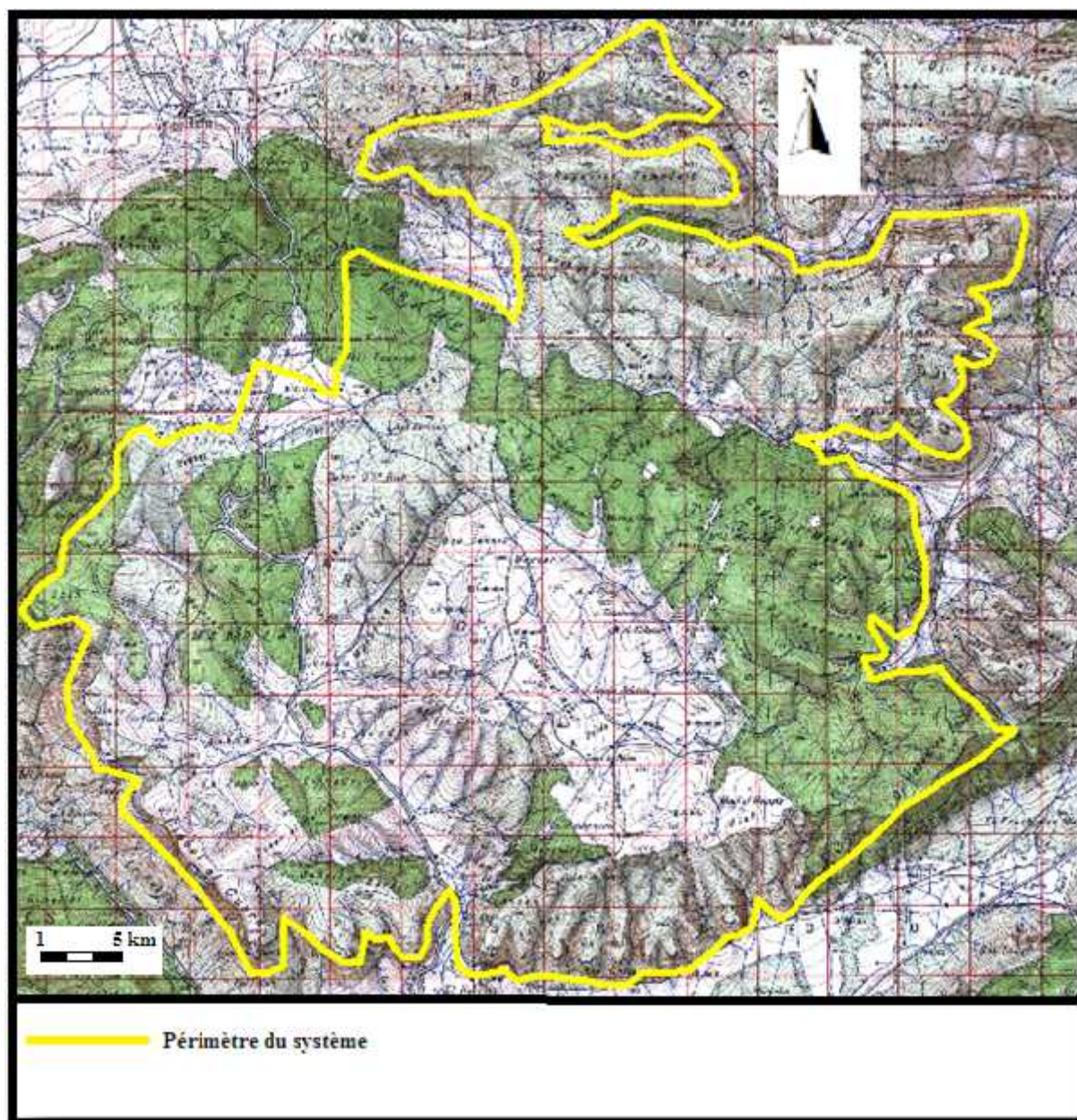


Figure IV.1 : Périmètre de système karstique de Ghar Boumâaza. (Extrait de la carte Terny 1/50000).

IV.2. Aperçu sur le climat de la zone :

La zone d'étude de système karstique de Ghar Boumâaza jouit d'un climat méditerranéen semi-aride frais, nuancé par les influences continentales. Globalement, le climat est assez rude en hiver avec des périodes d'enneigement dépassant les 21 jours.

2.1. Les précipitations :

Le régime saisonnier des précipitations dans la région est caractérisé par une abondance pluviale en hiver et au printemps, avec une sécheresse estivale remarquable.

L'étude pluviométrique effectuée, a été basée sur les données des précipitations enregistrées au niveau de la station du Meffrouche pour la période de 1976 jusqu'à 2014. Vu que la station pluviométrique de Merchiche qui se trouve dans le système est en arrêt.

La station Meffrouche représente la partie amont et la plus élevée du bassin de Ghar Boumâaza

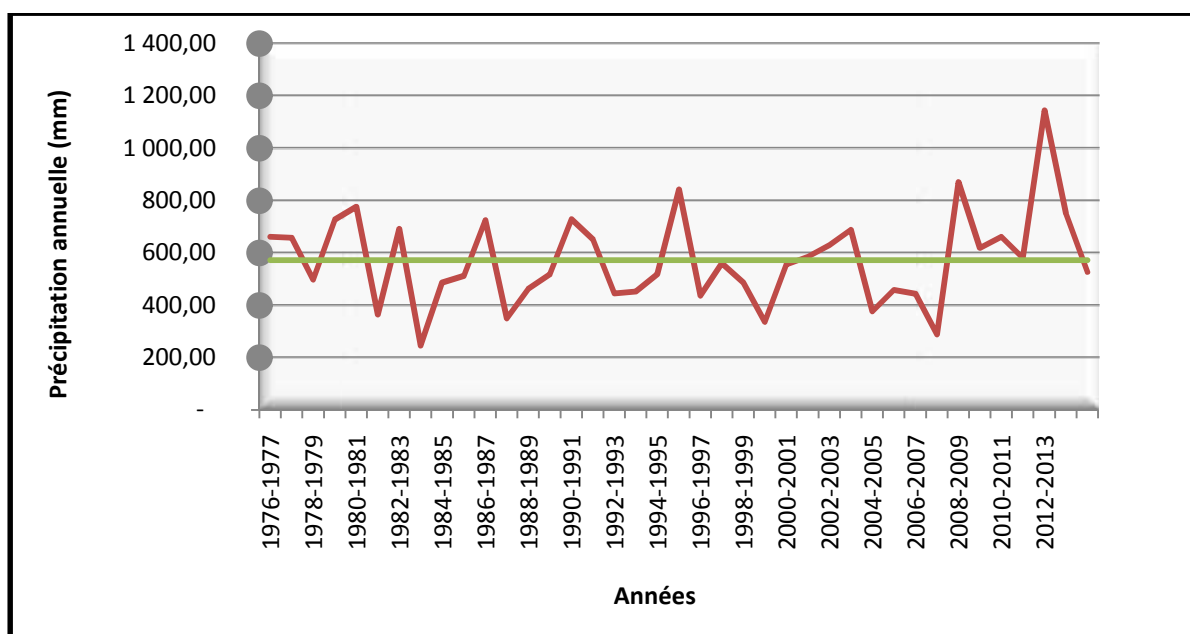


Figure IV.2 : Variabilité annuelle de la pluviométrie au niveau de la station du Meffrouch (1976- 2014).

Cette courbe représente une variation des précipitations annuelles de la pluviométrie au cours de la période allant de 1976 jusqu'à 2014.

On constate qu'il y a une irrégularité dans la répartition des précipitations.

Ainsi, la moyenne enregistrée en 38 ans (1976 –2014) est de 587,37 mm/an. Alors, l'année la plus pluvieuse était 2013 avec un total de 1 144,90mm. Par contre l'année la plus sèche a été observée en 1983 avec un total de 246 mm.

L'étude de la pluviométrie permet d'évaluer deux critères des bases introduites dans les méthodes de la cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : le paramètre infiltration et le paramètre de ruissellement (**Derni, 2010**).

2.2. Les températures :

Les températures les plus basses sont enregistrées au mois de janvier avec une moyenne de 6,5°C, alors que les températures les plus élevées, se situent au mois d'Août (25 °C) (voir figure IV.3). Ainsi, notre région subit deux régimes : un semestre continental, très froid, s'étend de novembre à avril, et un semestre sec et chaud avec une température maximale.

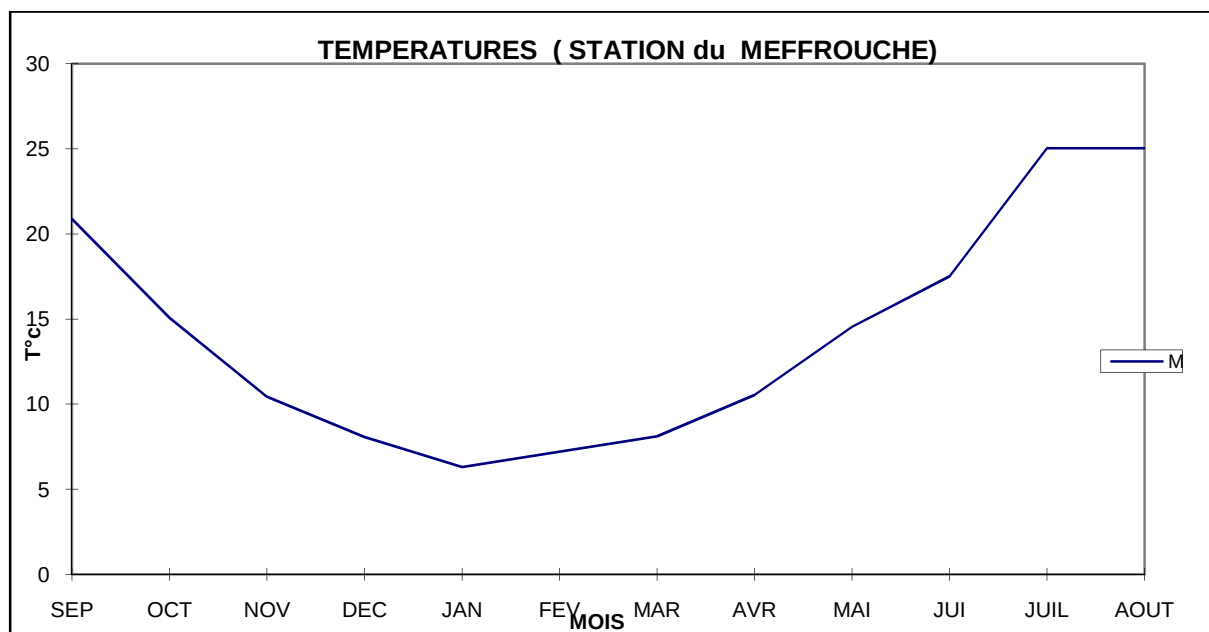


Figure IV.3 : variation des températures moyennes mensuelles (station du Mefrouche).

2.3. Les vents :

Notre zone d'étude est le siège des vents de différentes directions, avec une fréquence de 17 % pour ceux du Nord et 13 % pour ceux de l'Ouest. La fréquence des vents, dits calmes, avoisine les 34 %. D'une manière générale, la vitesse moyenne, annuelle des vents, varie entre 2,4 et 3,5 m/s avec une moyenne de 2,95 m/s (**Taamir, 2013**).

IV .3. Contexte hydrologique :

Sur le plan hydrographique, le système karstique de GharBoumâaza (source de la Tafna), occupe une grande partie du territoire sud de la commune de Terny, le sous bassin de GharBoumâaza constitue la source principale de la Tafna avec un réseau souterrain de 18.5 km. A l'aval de cette grande grotte, la source d'Ain Taga alimente les jardins de Hebalet puis s'oriente vers l'Ouest pour former le cours d'eau de la Haute Tafna (voir figure IV.4). Ce

dernier d'importance régionale (B.V= 7245 Km²) reçoit la quasi-totalité des affluents de la wilaya de Tlemcen avant de se jeter à Rachgoun.

Vers la direction de l'Est, se trouve un chevelu hydrographique assez dense du bassin versant d'Oued Chouly, qui prend naissance dans les hauteurs de Tal Terny (Taamir, 2013).

Le réseau hydrographique est sous formes de ravins encaissés ou l'écoulement est intermittent. L'eau provenant des pluies qui tombent sur le plateau dolomitique de Terny au Sud et au Sud-Est de Djebel Nador, pénètre par des crevasses à travers les strates calcaires. Une bonne partie de l'eau de la rivière souterraine se perd avant d'arriver au porche, mais à l'occasion de grandes crues elle s'écoule par l'ouverture sous la forme d'un torrent large et rapide qui dévale en petites cascades à Hebalet. L'émergence de Ghar Boumâaza qui se fait à partir d'Ain Taga à 500 m à l'aval constitue la principale source permanente de la région avec un débit de 35 l/s (**Benoit et Collignon 1987 in Boumezbou et Ameer, 2003**).

L'étude de la densité de drainage de notre réseau hydrographique à donner une valeur de 3.03 km/km². Obtenue comme suit :

$Dd = \Sigma L / A$, avec :

Dd : densité de drainage en km/km²

L : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km ; L=344.18 Km

A : aire du bassin en km² ; A=113.6 Km²

La valeur de la densité de drainage élevée Dd= 3.03, indique que le système est bien drainé.

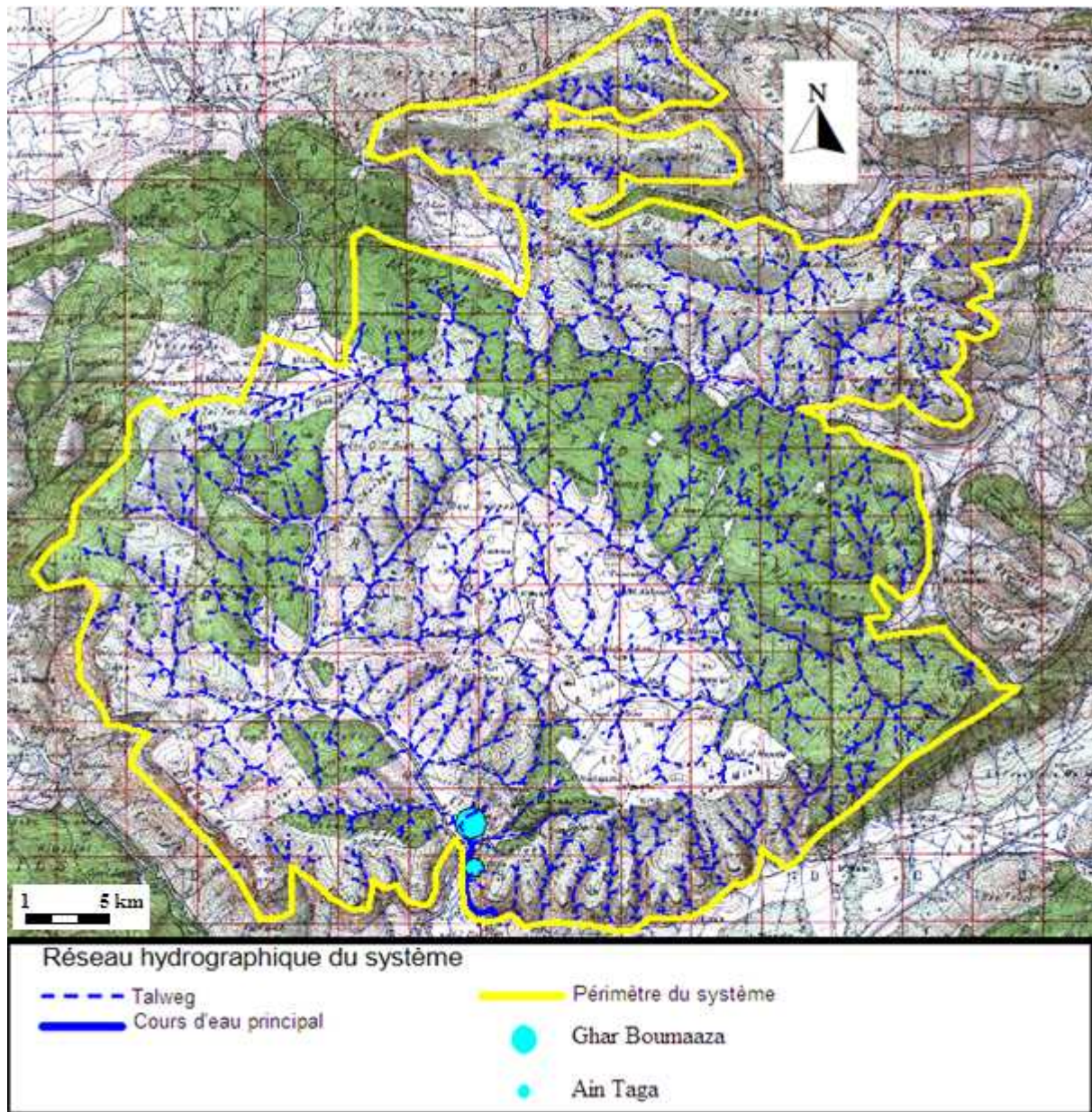


Figure IV.4 : Réseau hydrographique du système karstique de Ghar Boumâaza. (Extrait de la carte Terny 1/50000)

Des mesures de débit et des prélèvements d'échantillons d'eau sont effectués mensuellement par les services de l'ANRH, pour les sources de la Tafna : GharBoumâaza, Ain Taga et Ain Hassi El Kelb. Des débits sont enregistrés à la sortie du réseau souterrain de GharBoumâaza où l'écoulement se fait à l'occasion de grosses pluies. Les variations de débit sont parfois spectaculaires : 90 l/s à 12,3 l/s à Ain Hassi El Kelb, 4000 l/s à 0 l/s à Ghar Boumâaza, 45 l/s à 2,8 l/s à Ain Taga (Figure IV.5). Les crues sont rapides et violentes. La mise en charge se fait quelques heures après les précipitations (Bensaoula, 2008).

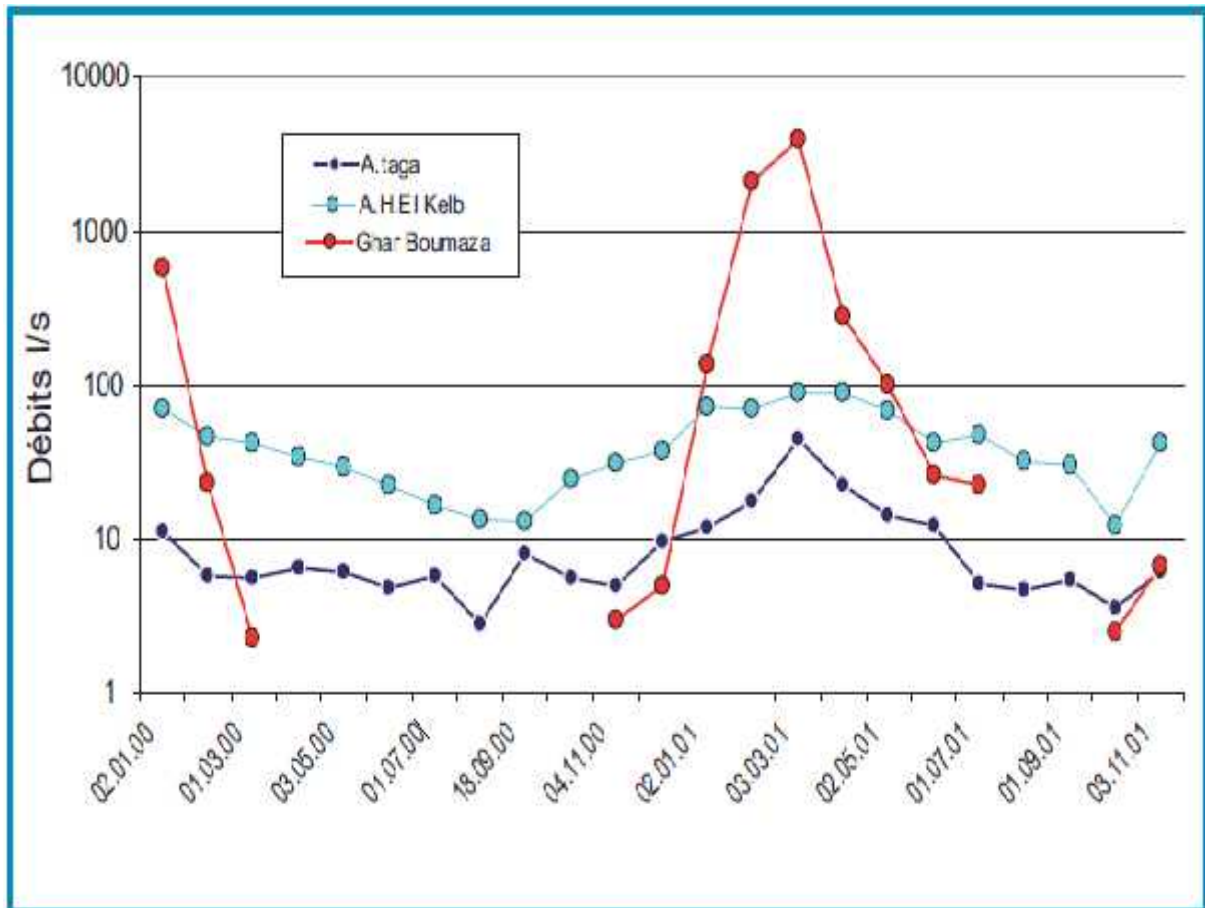


Figure IV.5 : Variabilité des débits des sources du système karstique de Ghar Boumâaza : l'échelle logarithmique est choisie pour pouvoir visualiser les grandes amplitudes de débits de Ghar Boumâaza par rapport aux deux autres sources (**Bensaoula, 2008**).

Le système connaît des amplitudes de débits très importantes bien corrélées aux précipitations. Il faut noter que les mesures, étant mensuelles ne permettent pas de voir l'évolution des débits avec précision (figure IV.6) (**Bensaoula, 2008**).

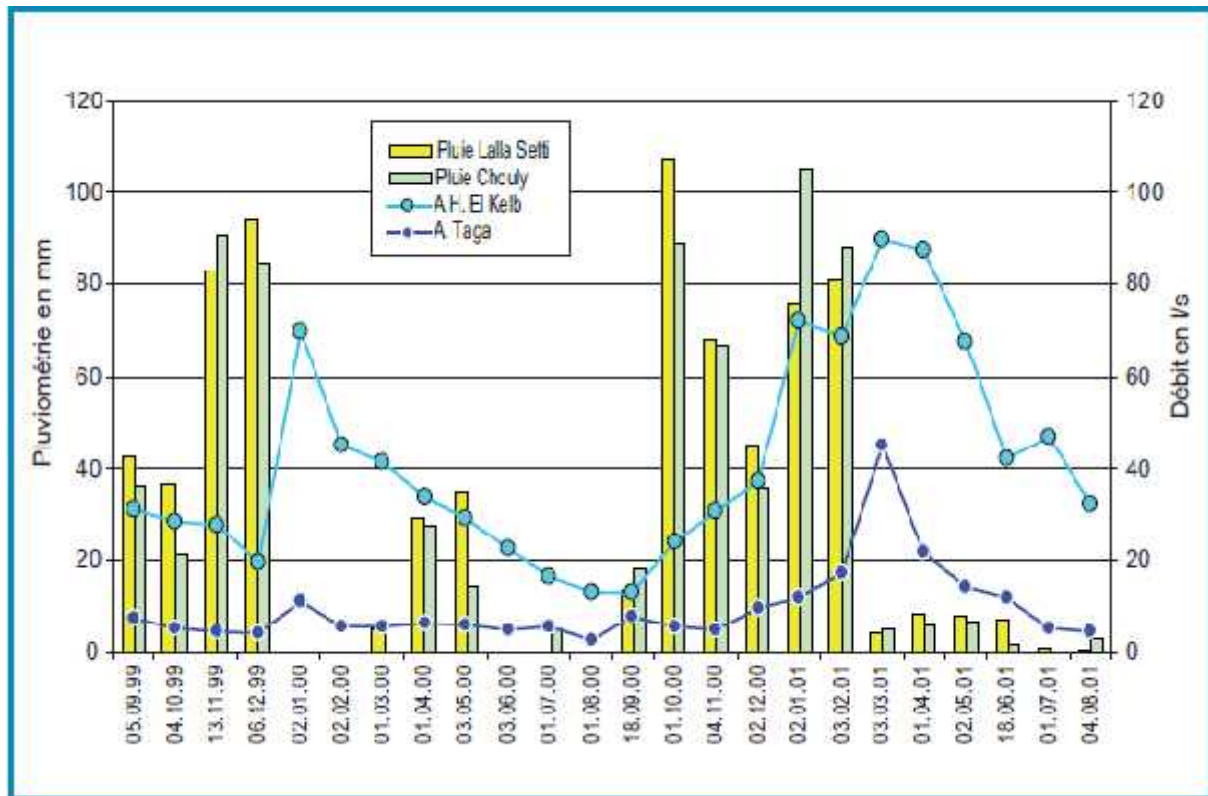


Figure IV.6 : Evolution du débit des sources de la Tafna avec la pluviométrie (1999-2001).

(Bensaoula, 2008)

IV.4. La géologie

IV.4.1. Cadre général

Les monts de Tlemcen sont constitués essentiellement de formations d'âge jurassique supérieur et crétacé inférieur. Les calcaires et dolomies du Kimméridgien et du Tithonien forment plus de 80% des parties sommitales des plateaux. Au Sud et au Nord, ces formations sont masquées par une sédimentation tertiaire épaisse représentée par des dépôts fluviaux éocènes sur le revers sud et par des marnes miocènes et des dépôts continentaux du Plio-Quaternaire au Nord, (voir extrait de la carte géologique de l'Algérie au 1/500000) en figure, ci- après : **(Bensaoula, 2006)**

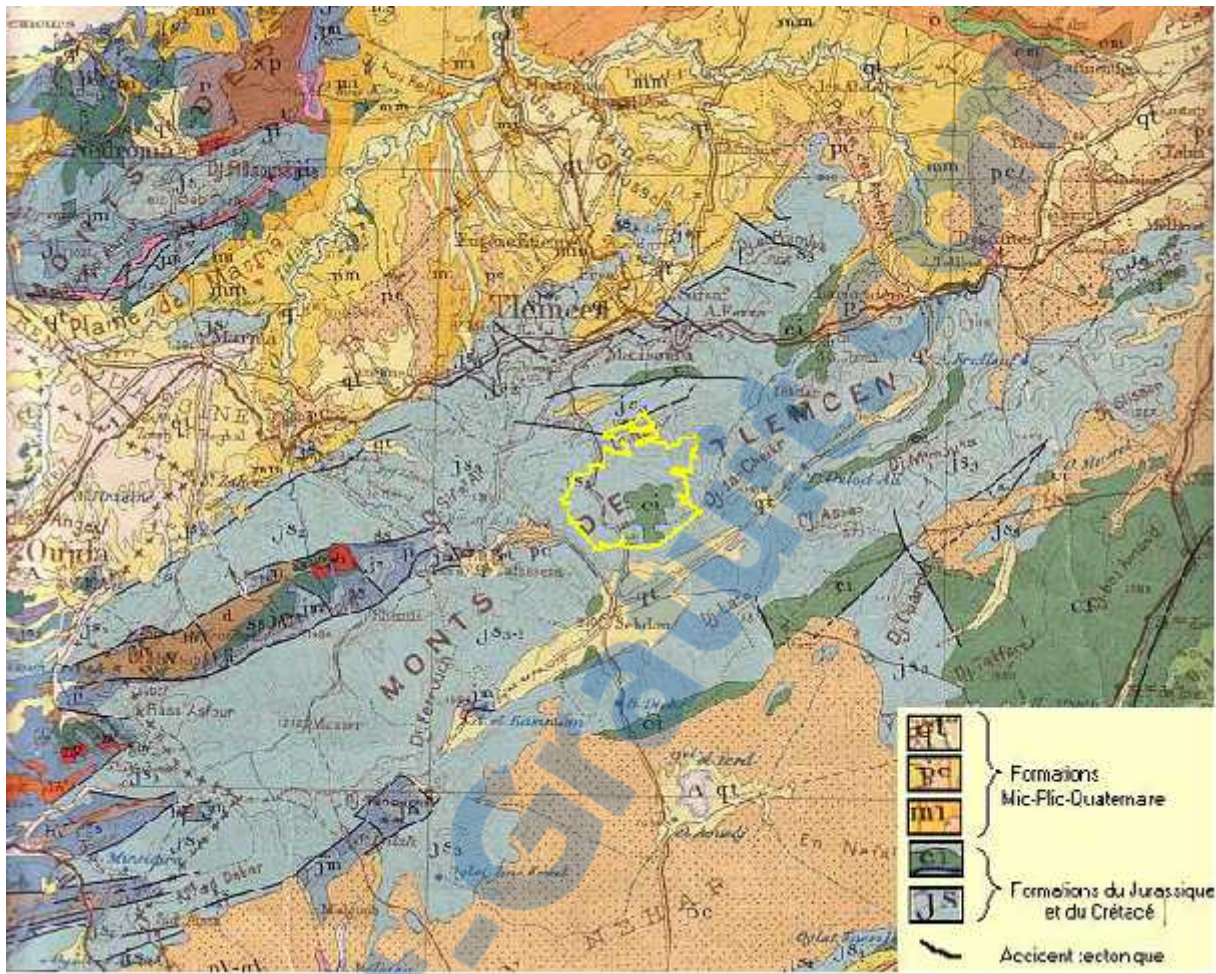


Figure IV.7 : Cadre géologique régionale de Ghar Boumâaza au niveau des monts de Tlemcen (extrait de carte géologique de l’Algérie au 1/500000) (Bensaoula.2006)

IV.4.2. Contexte géologique du secteur étudié :

GharBoumâaza est un système karstique présentant la particularité d’être limité entièrement par des terrains imperméables (Figure IV.8) (Bensaoula.2006).

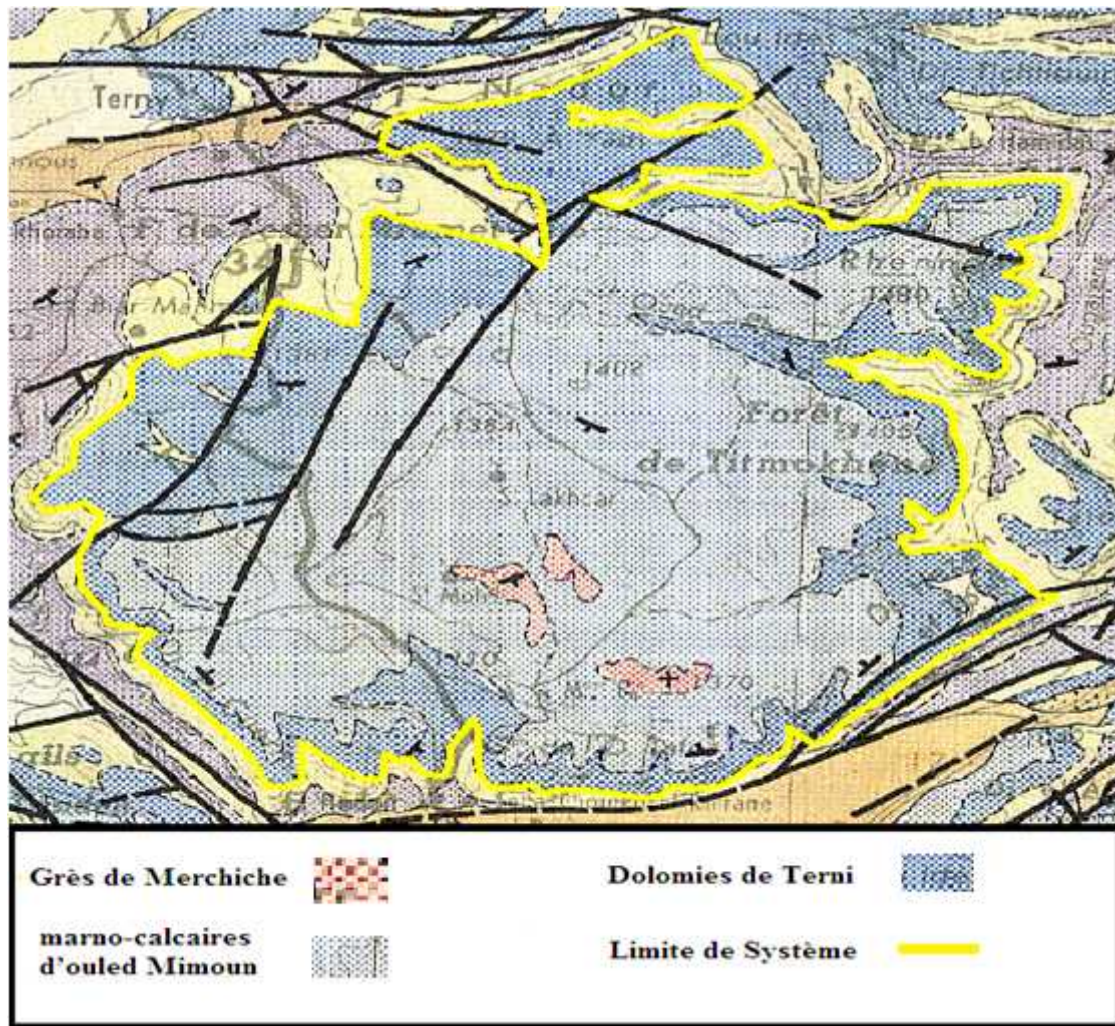


Figure IV.8: carte géologique de la zone d'étude. (Extrait de la carte géologique du Telagh, au 1/200000 par Auclair et Biehler).

IV.4.3. Lithostratigraphie

La succession litho-stratigraphique de la figure IV.9, ci-dessous, montre la série des formations de notre zone d'étude, les Dolomies de Terni et une partie des marno-calcaires de Hariga (qui est parfois dolomitisés) constituent le membre calcaréo-dolomitique supérieur (Bensaoula, 2006).

Ces formations présentent un changement de faciès latéral, une variation d'épaisseur ainsi qu'une dolomitisation très irrégulière, à travers les Monts de Tlemcen d'après les travaux de Benest M (1983), Collignon B(1986), et Bensaoula, (2006). La description des formations qui suit est principalement inspirée des travaux de Benest, 1985 in Bensaoula 2006).

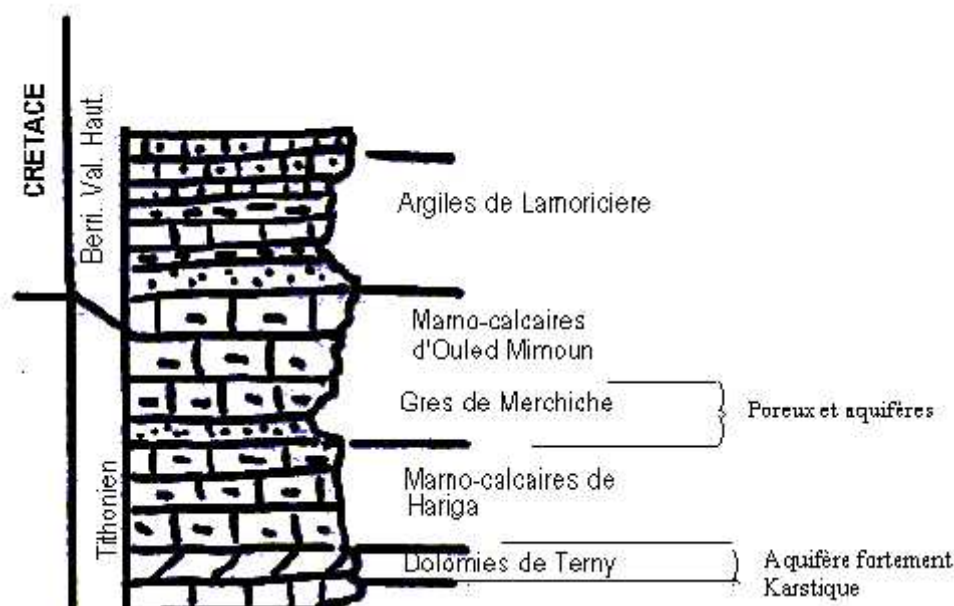


Figure IV.9 : Log litho-stratigraphique synthétique de la région étudiée (d'après Benest et al. 1999, modifié). (Bensaoula, 2006)

IV.4.3.1. Les Dolomies de Terny

Correspondent à la corniche au-dessus des calcaires du Lato, leur épaisseur est d'environ 50 dans la zone de Sebdou. Dans une grande partie des Monts de Tlemcen, les Dolomies de Terny peu fossilifères montrent un faciès constant. On observe à la base un horizon riche en silex et en stromatolitescolumnaires recristallisées. Sur la bordure méridionale des Monts de Tlemcen et de Daia, ainsi que les hautes plaines Oranaïses. Cette formation dolomitique ne peut être séparée des calcaires du Lato également dolomitisés.

IV.4.3.2. Les marno-calcaires de Hariga

La limite de ces marno-calcaires est difficile à déterminer lorsque les premières assises de la formation sont calcaires et entièrement atteintes par la dolomitisation. La limite supérieure est facile à préciser. Elle correspond à la semelle du premier banc gréseux des grès du Merchiche. (Bensaoula, 2006)

IV.4.3.3. Les marno-calcaires d'ouled Mimoun

La coupe type observable (Benest, 1985) sur le flanc septentrional très redressé de l'anticlinal d'Ouled Mimoun, montre des couches localement renversées dans la partie inférieure au niveau de Bled El Gliaa. La formation dans la région d'Ouled Mimoun atteint une épaisseur de 500 à 700 m. A la base on note l'existence de bancs gréseux. La série est attribuée au Tithonien supérieur et Berriasien inférieur (Bensaoula, 2006).

IV.4.3.4. Les Grès de Merchiche :

dans leurs localités type, admettent des intercalations micritiques et marneuses assez pauvres en dasycladacées mais riches en lituolidés, parmi ces derniers, on distingue des formes tout à fait comparables à celle que L. Hottinger a décrites et figurées au Maroc oriental sous le nom de *Pseudocyclammia* (*Streptocyclammia*) gr. pravula-muluchensis (Benest, 1985).

La coupe géologique réalisée dans le synclinal de Merchiche par Benest (voir figure IV.10), montre que les Dolomies de Terny (100 m) reposent sur les marno-calcaires de Raourai et sont surmontées par la formation des marno-calcaires de Hariga (195 m environ, Benest 1985). Cette dernière est très micritique et très peu marneuse. Elle est surmontée à son tour par les Marno-calcaires d'Ouled Mimoun qui débute par les grès de Merchiche (52 m). En tout, une série de couches de 347 m d'épaisseur repose sur la série calcaréo-dolomitique de Terny et de Hariga. Benest, 1985, y a mesuré un pendage de 5° vers le nord.

Les galeries se sont creusées dans le membre calcaréo-dolomitique supérieur ou dolomie de Terny du Tithonien et les marno calcaires de Hariga (avec très peu de marnes) difficiles à séparer à cause de la dolomitisation (Bensaoula, 2006).

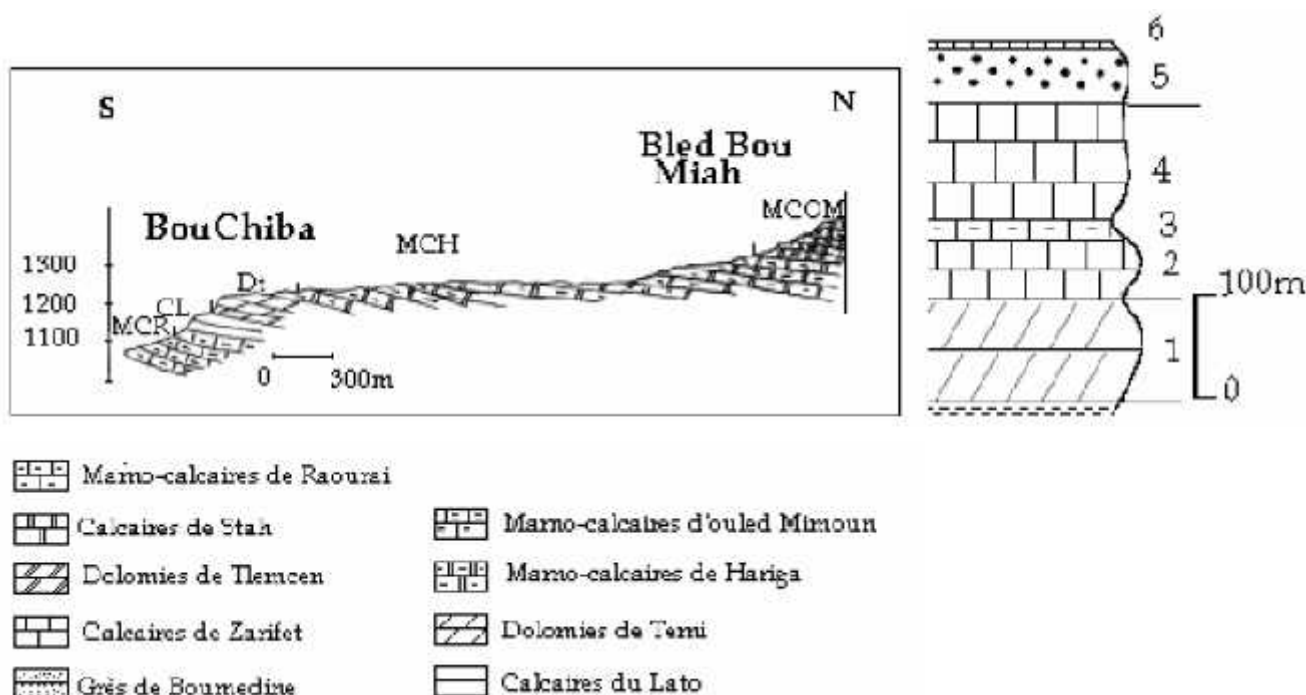


Figure IV.10 : Coupe géologique à travers le Djebel Bouchiba- plateau de Merchiche (MCR : marno calcaires de Raourai, CL : calcaires du Lato, Dt : Dolomies de Terny (dolomies, 1),

MCH : Marno calcaires de Hariga (2(pelmicrite), 3(marno-calcaire), 4(micrite)), MCOM : marno calcaires d'Ouled Mimoun (5(grès), 6(marnes et calcaires)). (D'après Benest, 1985, modifié) (Bensaoula, 2006).

L'étude géologique est une démarche indispensable pour la détermination des critères de base pour la cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, ainsi la carte géologique est le support technique sur lequel nous avons tracé la limite de notre système.

IV.5. Contexte hydrogéologique :

A la base des connaissances acquises sur le contexte géologique de notre zone d'étude, il apparaît que deux formations géologiques ont des propriétés aquifères : les Dolomies supérieurs de Terny (aquifère fortement karstique) et les Grès de Merchiche (poreux et aquifère), ces deux grandes masses perméable (voir Figure IV.11) constituent les principaux réservoirs aquifères (**Energoprojekt-Hidroizenjering, 2009**).

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 Terny et les dolomies de Tlemcen sont irrégulièrement dolomitisées fortement karstifiées et constituent les principaux réservoirs de la région.

IV.5.1. Propriétés hydrogéologiques des formations :

IV.5.1.1. Les formations à fort potentiel aquifère :

Représentées par les formations calcaréo-dolomitiques (dolomie de Tlemcen et de Terny), les formations gréseuses (grès de Merchiche) et les formations du plio-Quaternaire.

Les Dolomie de Terny :

Sont moins karstifiées que les dolomies de Tlemcen, sont plus micritiques et présentent de nombreuses passées stromatolithiques qui doivent faciliter les phénomènes de dissolution (**Ablaoui et Mentari, 2001**).

Les dolomies de Terny, ayant une structure granulaire avec pelleteïdes, sont plus homogènes. Cette formation donne naissance à une importante source dans cette région ; Ain Taga qui draine pratiquement toutes les eaux de ce niveau.

Les grès de Merchiche :

C'est une formation gréseuse de plus de 50m d'épaisseur. Elle est poreuse et aquifère. Elle est drainée par plusieurs petites sources dont Huissilabiyed.

IV.5.1.2. Les formations à faible potentiel aquifère :

Représentées par des formations de natures lithologiques variées, ou les séries à dominance argileuse ou marneuse occupent une place prépondérante.

Ces formations présentent une faible perméabilité d'interstice et/ ou de fissure, il n'y existe donc pas d'aquifères notables.

Marno-calcaires de Hariga et d'Ouled Mimoun :

Même si les niveaux calcaires présentent une certaine perméabilité horizontalement parlant, ils sont imperméables dans le sens vertical.

Argile de Lamoricière :

Ces argiles ne recèlent aucune réserve aquifère .

Tableau IV.1 : Log hydrogéologique (Ablaoui et Mentari, 2001)

Formations	TERRAINS			LITHOLOGIE	HYDROGEOLOGIE
	Karstique	Non Karstique	Peu ou pas perméable		
Argile de Lamoricière			-	Argiles avec des passées gréseuses.	Très faible perméabilité ou presque nulle.
Marno-calcaires d'Ouled Mimoun			-	Grès, calcaires et marnes souvent biodétritiques.	Très faible perméabilité ou nulle
Grès de Merchiche		-		Formation gréseuse de plus ou moins faible épaisseur.	Perméabilité mixte.
Marno-calcaires de Hariga			-	Alternance de marnes et calcaires.	Très faible perméabilité ou nulle dans l'ensemble.
Dolomies de Terny Calcaire de Lato	-			Dolomies vacuolaire à patine rousse avec des stratifications obliques.	Très karstifiées et donnent naissance à une importante source : Ain Taga qui draine pratiquement toutes les eaux des dolomies de Terny
Marno calcaire de Raourai			-	Alternance de marnes grises verdâtres et de calcaires.	Très faible perméabilité dans l'ensemble.

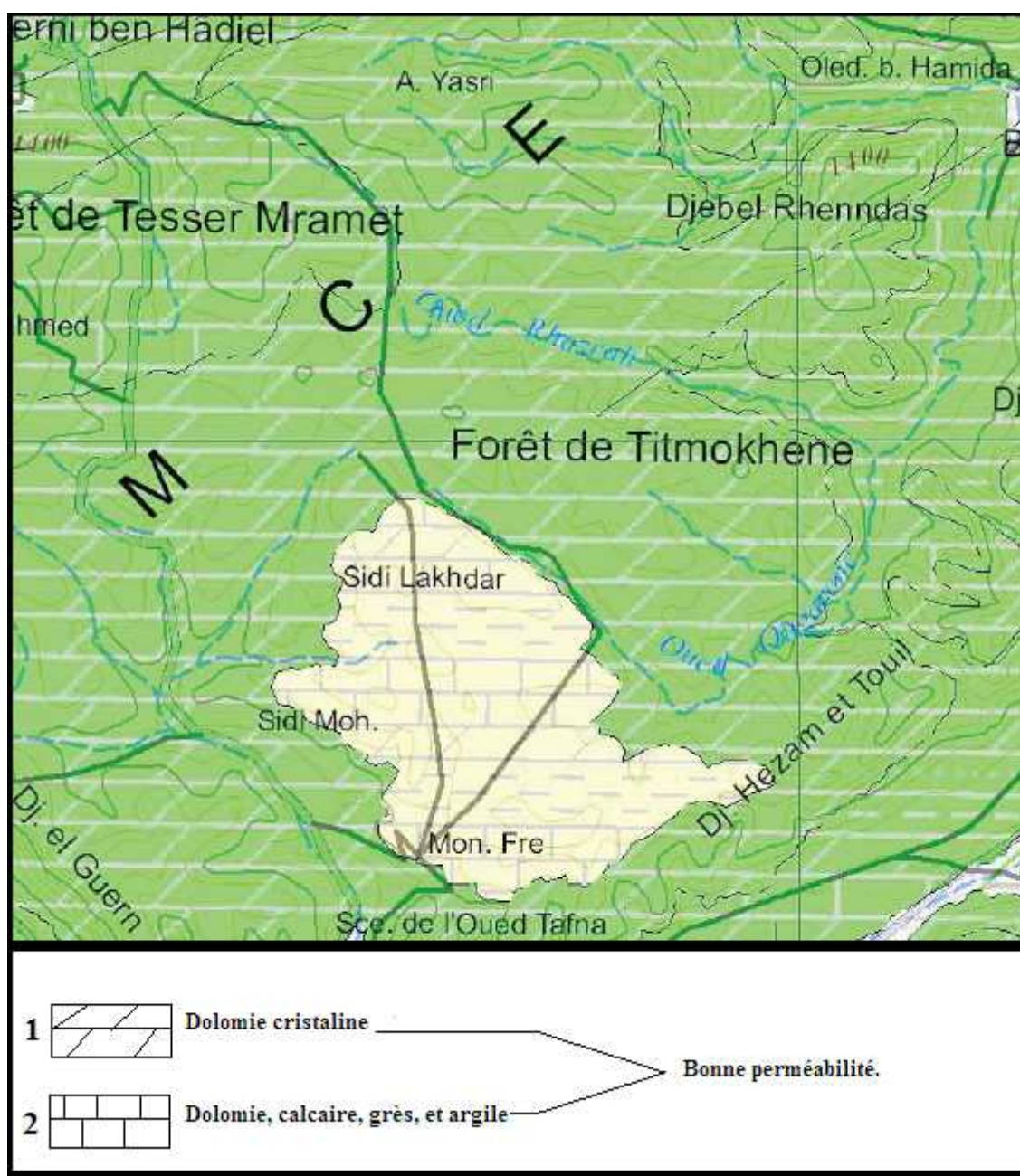


Figure IV.11 : Extrait de la carte hydrogéologique de Tlemcen 1/200000 (Carte hydrogéologique) (Energoprojekt-Hidroizenjering, 2009)

IV.6. Contexte pédologique :

La détermination de la valeur agro-pédologique des sols à travers notre région d'étude est très difficile, les études dans ce domaine sont inexistantes dans le périmètre de notre zone d'étude. Pour ce fait on sait baser sur la répartition de la végétation, la géologie de la région et sur l'analogie des travaux pédologiques réalisés à travers le secteur de parc national de Tlemcen par exemple la Forêt de Zarifet et le sud de barrage Meffrouche (limite nord de notre système).

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 de 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 » (**Felidji, 2011**).

Cette stabilité n'est que potentielle due en partie aux facteurs bioclimatiques ; l'intervention anthropique rendant les sols instables à cause de l'érosion qui suit la dénudation.

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 Santa, 1985 in **Felidji, 2011**).

Au niveau de notre région d'étude (système Karstique de GharBoumâaza), la plupart des sols sont hétérogènes, ce sont des sols à substrat calcaire. Pour notre système, la nature de la roche-mère permet de distinguer ces types de sols :

IV.6.1. Sol fersialitique rouge :

C'est un sol lourd très pauvre en réserves d'eau, riche en bases notamment en Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} (**Felidji, 2011**).



Figure IV.12 : Sol fersialitique rouge (localité OuledBounouar) **(Benazzouz et Khatir. 2016)**

IV.6.2. Sol brun fersialitique :

Prend naissance sur roche-mère calcaire sous l'influence d'un climat froid à saison sèche moins marqué. Ce sol a les mêmes caractéristiques que le précédent, mais plus humides et plus poreux.



Figure IV.13 : Sol brun fersialitique (Foret TesserMramet) **(Benazzouz et Khatir. 2016)**

IV.6.3. Sol fersialitique brun type terra-fusca :

Il s'agit d'un matériau ancien (paléosol), de couleur brun 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 de Barrage Mefrouche

IV.6.4. Sol fersialitique rouge à caractère vertique :

C'est un sol qui pendant une certaine période surtout des années sèches, présente, dans les 50 premiers cm de l'horizon, des fentes larges de 1 cm ou plus. Il est lourds (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) (Felidji, 2011).



Figure IV.14 : Sol rouge fersialitique à caractère vertique (Benazzouz et Khatir. 2016)

6.5. Sol fersialitique rouge et mosaïque dolomie : La mosaïque reflète le déséquilibre dans les sols qui sont le plus souvent peu profonds et affleure de temps à autre la roche dolomitique, et par conséquent un tapis végétal très hétérogène (Felidji, 2011).

IV.7. Etude de la Karstification :

Dans notre présent travail, nous nous sommes intéressés bien particulièrement aux formations carbonatées karstifiées et afin de mettre en évidence tous les indices de karstification disponibles au niveau de secteur étudié.

IV.7.1. Karstification révélé par la prospection de terrain :

Nous nous sommes intéressés à toutes sortes de cavités et gouffres afin de révéler l'indice de karstification, ceci a fait l'objet d'une investigation approfondie et un énorme travail du terrain à travers le secteur d'étude.

Les gouffres prospectés qui peuvent dépasser 100 m de profondeur n'ont jusqu'à ce jour pas permis de rejoindre les importantes rivières souterraines malgré les quelques campagnes spéléologiques. Au contraire ils sont encombrés de sédiments, de sable dolomitique et semblent correspondre à des phases anciennes de creusement (**Bensaoula. 2006**), Il ya même qui se sont effondré comme c'est le cas de Hassi Sehb Derias. Environ 4 km plus loin on trouve Hassi Labyad (voir, figure IV.15) au sommet d'une colline ($Z = 1365\text{m}$), avec une profondeur de 4m et un diamètre de 3m. Cette cavité est supposée être le résultat d'un effondrement.



Figure IV.15 : HassiLabyad. (Benazzouz et Khatir.2016).

Dans la région de Tizi Mali à la limite nord du notre système se trouve le gouffre de « Bir Khadous » dont l'accès nous a été impossible.

IV.7.2. Karstification révélé en profondeur :

Dans cette partie nous nous sommes particulièrement intéressés à la karstification du membre carbonaté supérieur « dolomie de Terny » révélé par forage et au fameux réseau souterrain de GharBoumâaza. Ce dernier révèle un excellent indice de karstification.

IV.7.2.1. Karstification révélée par forage :

Dans les forages au rotary, les pertes totales de boue sont l'indice d'une karstification révélés par des forages profond. L'enregistrement des côtes de pertes permet de repérer les niveaux fissurés et karstifiés (**Bensaoula, 2007**). Cet auteur a distingué trois différents aspects de cette karstification :

- une fissuration importante, qui se traduit par des pertes totales de boue au cours du forage (**Bensaoula, 2007**), Comme l'indique le forage qui existe dans notre zone d'étude forage « SEHB TAL-TERNY » : une perte totale du fluide de forage et pas de remonté de cutting. (**DRH**), cette perte de boues constituent donc un excellent indicateur des niveaux fissurés les plus perméables (que l'on cherche à capter). (Voir Annexe 01)
- des cavités importantes, qui se traduisent par des chutes libres d'outils de forage, Elles sont décelées au cours du forage par la descente libre de l'outil de forage, les chutes libres d'outil de forage les plus spectaculaires atteignent 4 mètre, elles ont été rencontrées dans plusieurs forage au niveau des monts de Tlemcen. On prend l'exemple des forages de Terny (Tableau IV.2) (**Bensaoula, 2007**).

Tableau IV.2 : Cavités détectées dans les forages par les chutes d'outils dans la commune de Terny (**Bensaoula, 2007**).

Forage	Cote des cavités par rapport à la surface du sol (m)	Longueur de la cavité en m	Formation	Faciès de la formation
TSR3 (Terny)	26 à 36 (plusieurs)	0.45 à 4.00 m	Membre sup	Dolomie
TSR4 (Terny)	21 à 70 (plusieurs)	0.50 à 1.00 m	Membre inf	Dolomie

- Des cavités comblées d'un remplissage karstique, qui sont décelées grâce aux enregistrements de diagraphies et à l'étude des déblais. **(Bensaoula, 2007).**

Ces cavités nous amènent à un aspect important de la karstification profonde : Les cavités de grande taille et les réseaux spéléologiques.

IV.7.2.2. Karstification révélée par l'exploration spéléologique (le réseau spéléologique de GharBoumâaza, 18600 m) :

GharBoumâaza dans les monts de Tlemcen est le plus long réseau spéléologique en Afrique (Figure IV.16). Il est situé dans un synclinal dans les formations carbonatées du Titonien (formation calcaires dolomitiques) à une trentaine de kilomètres au sud de la ville de Tlemcen. Le réseau karstique a été exploré par plusieurs équipes spéléologiques depuis 1930. **(Collignon, 1987 in Bensaoula, 2008)**

Le réseau souterrain de GharBoumâaza (ou Tafna souterraine) se trouve dans le synclinal de Merchiche. Il a été exploré par plusieurs équipes spéléologiques, depuis 1930. Le premier levé topographique complet jusqu'au premier siphon a été dressé en 1949 par J. Birebent. En décembre 1982, B. Collignon et d'autres franchissent le siphon et 2 km de plus sont explorés. En 1983, la même équipe et d'autres, topographient encore 2500 m (spéléologie algérienne 1982-83). En 1984, une autre expédition permet encore d'explorer d'autres parties du réseau. La longueur finalement topographiée est de 18400 m avec 50 m de dénivelé **(Collignon 1991 in Bensaoula 2006).**

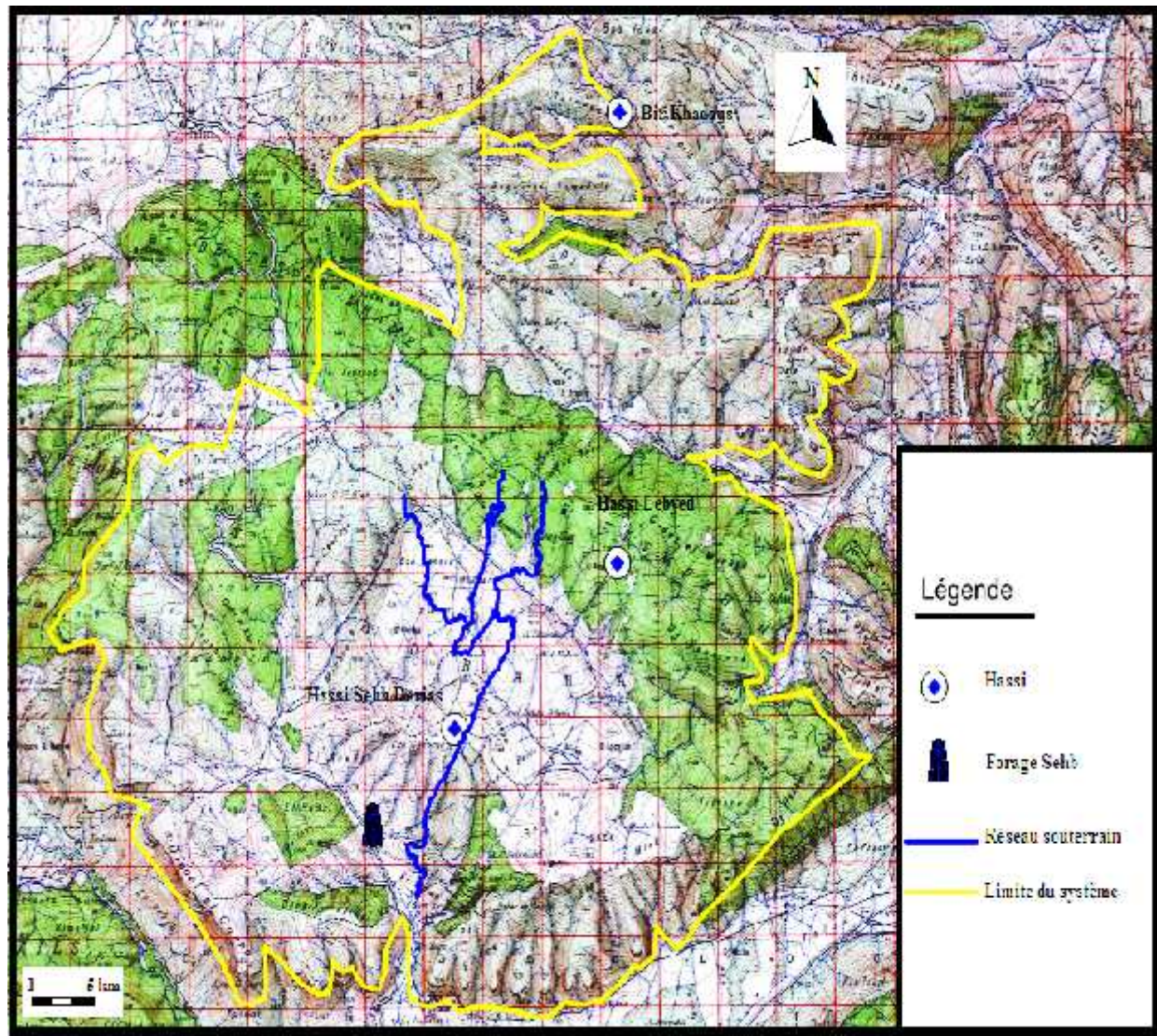


Figure IV.16 : Le réseau souterrain de Ghar Boumâaza (Bensaoula, 2008).

L'étude de la karstification est très importante pour la cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines dans les zones karstiques, l'application de la majorité des méthodes ne peut se faire sans ces données.

IV.8. Les Points d'eau :

IV.8.1. Les sources :

La plupart des sources émergent à la faveur des failles qui jouent un rôle d'écran imperméable par les pincements marneux calcaires, ou par la sédimentation des brèches de failles qui constituent parfois des drains actifs, (**Benoit et Collignon, 1987 in Boumezbou et Ameer, 2003**).

A travers notre travail sur le terrain on a pu inventorier des sources importantes à travers le système karstique étudié, qui sont captées et pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Nous citons à titre d'exemple A.Tagar (Merchiche) et Ain destinées ELkebira (Dar Maamer). Il faut noter aussi que de nombreuses petites sources demeurent non captées.

Tableau IV.3 : Inventaire des sources de la zone étudiée (février et mars 2016)

Source	Nature	Conductivité (m,s)	Débit (L/S) (05/02/2016)	Débit (L/S) (09/03/2016)
Ain Hassikelb	non captée	0,58	/	/
Ain Tagar	captée	0,58	/	Inondée
Ain Lwah 01	non captée	0,51	/	/
Ain Lwah 02	non captée	0,52	/	/
Ain Merchiche 01	captée	0,45	Trop faible	0.23
Ain Merchiche 02	non captée	0,66	/	/
Ain l'Bayda	non captée	0,44	/	/
Ain l'Kbira	captée	0,49	0,094	Inondée
Ain Bir Dar Maamar	captée	/	/	/
Huissi l'Byéd	non captée	/	/	/
Ain Tétaouine	captée	0,55	0,015	0.027
Ain l'Esbar	captée	0,61	0,027	0,25
Ain OuledBounouar	captée	0,61	0,077	0,28
Source GB	non captée	0,52	/	/

IV.8.2. Les Forages :

Il existe un seul forage dans la région, d'une profondeur de 200 mètre linéaire avec un débit de 08 L/s. Il est affecté pour l'approvisionnement en eau potable des localités éparses dans la région.

IV.8.3. Les puits :

On a pu inventorier 4 puits dans notre région d'étude. Ils sont tous utilisés pour l'AEP.

- Puits équipé affecté à Dar Maamer, fermé pour motif de pollution.
- Puits traditionnelle qui date depuis l'époque coloniale, à proximité de GharBoumâaza (Merchiche).
- Hassi el Kebir, puits utilisé pour l'AEP (Tal Terny).
- HassiSehbDerias. Puits effondré (SehbDerias).

IV 9. L'occupation du sol :

Le site est caractérisé par des agglomérations éparses qui ne répondent à aucune norme d'urbanisme, avec une végétation dégradée. La permanence de l'eau a favorisé l'installation de quelques hameaux qui l'utilisent pour l'irrigation des champs installés à proximité de l'oued et à son aval, ceci en plus du pâturage pratiqué sur l'environnement immédiat de GharBoumâaza et à proximité des forêts environnantes.

IV.9.1. Parc logement et population :

La typologie des parcs logement est dominée par de l'habitat traditionnel (Haouch), précaire et fortement influencé par l'activité pastorale des propriétaires. Elle résulte de l'auto-construction, souvent incontrôlée, conçue en maçonnerie légers (pierre, parpaing, tôle, etc.). Toutefois, on observe quelques constructions de type moderne (programme d'habitat rural), disposant d'une façade extravertie. On note la présence d'un certain nombre d'équipements sociaux insuffisants par rapport aux besoins de la demande (**Taamir, 2013**).

Le tableau IV.4, montre le nombre et la répartition de la population au niveau de notre région d'étude.

Tableau IV.4 : Répartition spatiale de population et logements (APC)

Hameaux	Population	Logements
AS-Sehb	782	155
Tal Terny	127	53
Merchiche	115	33
OuledBounouar	178	45
Dar Maamar	88	45

IV.9.2. L'état d'alimentation en eau potable :

L'alimentation en eau potable de l'AS-Sehb est assurée à partir du forage sehb, débitant 08 L/S (**DRH**).

L'eau est stockée au niveau de deux (02) réservoirs semi-enterrés de capacité (120 + 50 m³). Le réseau de distribution se limite à la conduite d'amenée et une série de bornes fontaines réparties le long du tissu aggloméré. Le réseau est en mauvais état.

Tableau IV.5 : Récapitulatif des besoins en eau et capacité de stockage – AS SEHB (Taamir, 2013)

Echéance	Population (habitants)	Q _{moy.j} m ³ /j	Q _{max.j} l/s	Stockage installée (m ³)	Capacité théorique (m ³)	Déficit Stockage (m ³)
2013	864	182	2,5	170	230	60
2018	955	200	2,8	170	240	70
2028	1 163	245	3,4	170	267	97

Il faut noter aussi que l'approvisionnement en eau potable dans la région d'étude n'est pas accessible à une grande partie de la population. Dans la plupart des cas le problème majeur n'est pas la disponibilité de l'eau, mais la qualité de ces eaux, le cas de Merchiche et Dar Maamar, les sources d'approvisionnement sont contaminées (**Annexe 3**).

Tableau IV.6 : Situation d'approvisionnement en eau dans notre zone d'étude (Taamir, 2013) (Modifié).

Localité	source d'eau potable	Observation
Tal Terny	Puits, Forage	L'alimentation se fait par le forage Sehb
SehbTerny	Forage	L'alimentation se fait par le forage Sehb
OuledBounouar	Fontaine public	La source d'Ouledbounouar, source de bonne qualité avec deux bornes fontaines
Merchiche	Source, puits, Forage	Source Ain Taga, Débit important (source contaminée),
Dar Maamer	Puits équipé	Le puits de Dar Maamer et fermé pour cause de pollution, l'approvisionnement en eau se fait par des citernes

IV.9.3. L'état d'assainissement dans la région d'étude :

L'assainissement des eaux usées dans cette région est préoccupant dans la mesure où les réseaux des centres agglomérés de notre région accusent des retards en matière de réalisation. Cette situation est rendu difficile par la nature accidentée du terrain et la vulnérabilité des eaux souterraine. L'épuration des eaux usées est inexistante, par contre l'état des réseaux d'assainissement varie d'un centre à un autre (**Mejdoub, 2014**).

La collecte des eaux usées au niveau du secteur d'étude se limite à des fosses septiques (Figure IV.17) individuelles réparties à travers les habitations. L'étude du réseau d'assainissement étant achevée, les travaux de réalisation sont en cours.

Tableau IV.7 : Etat des réseaux d'assainissement (Taamir, 2013) (Modifier)

Localité	Raccordement au réseau	Observations
Merchiche	Non assaini (se limite à des fosses septiques)	Etude achevée, travaux en cours de lancement
OuledBounouar	Assaini avec rejet vers RN22	Prolongement de rejet en cours d'étude
Tal Terny	Assaini à 100%, avec rejet vers RN22	Prolongement de rejet en cours d'étude
Dar Maamar	Non assaini (se limite à des fosses septiques)	Fosse septique
Seheb	Assaini avec rejet vers RN22	Prolongement de rejet en cours d'étude

**Figure IV.17 : Fosse septique (Sehb) (Benazzouz et Khatir, 2016)**

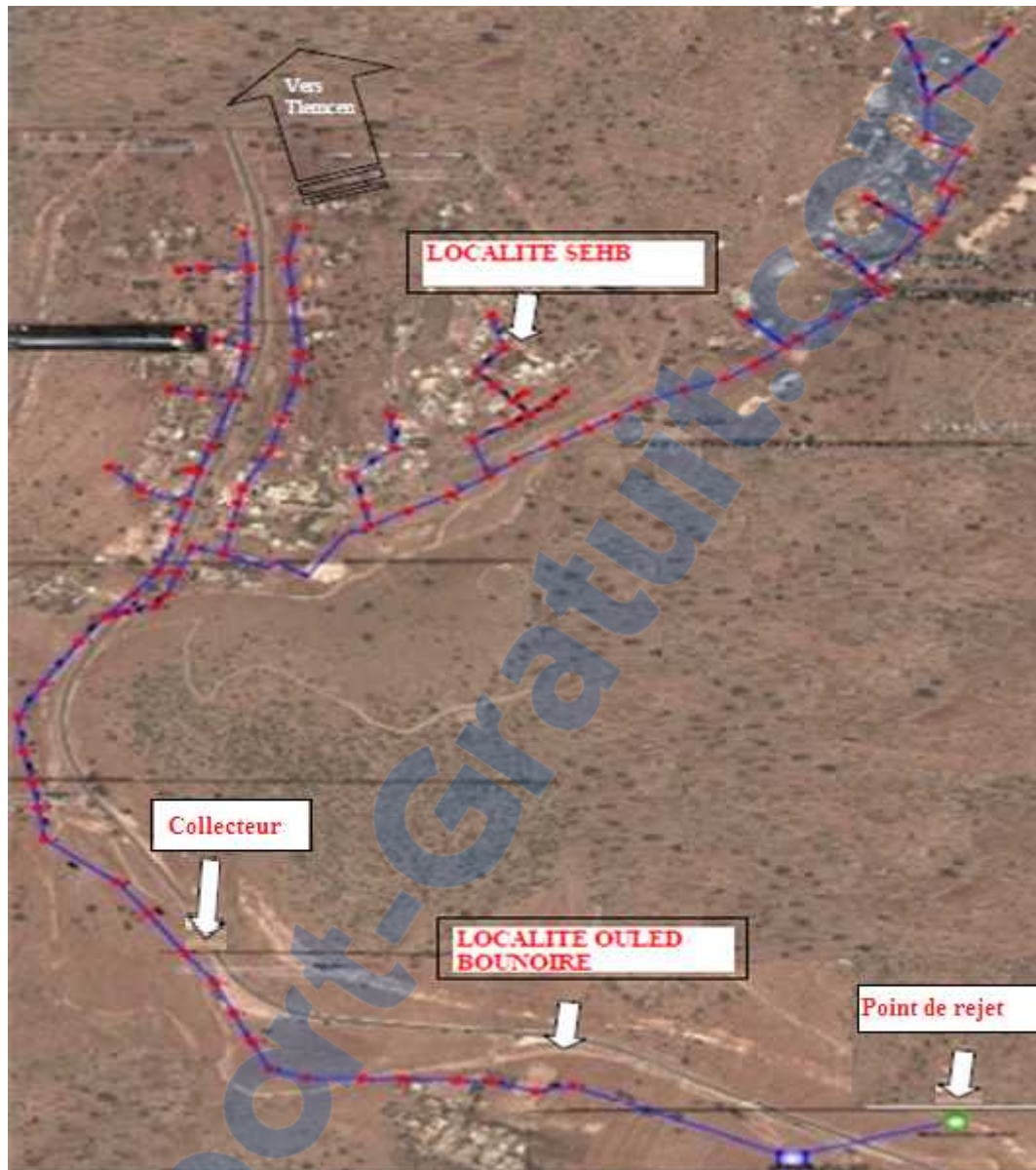


Figure IV.18 : Collecteur d'assainissement des localités Sehb et Ouled Bounouar. (Mejdoub, 2013).

IV.9.4. Agriculture :

L'occupation du sol dans la région est largement dominée par les parcours montagneux, avec une superficie totale de 11360 ha. La superficie forestière représente 22.8 % (2 585 ha) de la surface totale, ce qui impose une agriculture de montagne spécifique.

La présence d'un microclimat favorable et d'une superficie agricole (1500 ha), 13.2% de la surface totale, concentrée aux niveaux des plateaux montagneux (Tit Mokhene, SehbDerias, Merchiche), permet la conduite d'une arboriculture fruitière, spécialisée dans les arbres fruitiers à noyaux et à pépins, notamment le pommier. Partout ailleurs, c'est la culture en sec

qui prédomine l'occupation agricole des terres le cas de plateau de Sehb Derias et Tit Mokhene.

En ce qui concerne l'agriculture intensive en irrigué à Hebalet se pratique sur une superficie insignifiante 0.95 % de la superficie agricole totale.



Figure IV.19 : Aménagement des terrains rocheux plateau Tit Mokhene (**Photo.Benazzouz et Khatir, 2016**).

IV.9.5. Elevage :

En effet, parmi les activités principales dans la zone étudiée réside dans l'élevage extensif sur les plateaux et les parcours montagneux (voir tableau IV.8).

La concentration de l'élevage entraîne un excédent de déjection animale. Sous l'effet pluviométrique, les eaux s'infiltrant dans la nappe souterraine enrichies en dérivés azotés est constituent un risque de pollution.(**Bemmoussat, 2012**)



Figure IV.20 : Rejet d'élevage utilisé pour les vergers de Heblat à proximité d'Ain Taga.

(Photo, Benazzouz et Khatir, 2016)

Dans la structure actuelle, les agglomérations qui se trouvent dans notre système, sont dans un état de désordre, constitué d'habitat dispersé, souvent en cohabitation avec l'activité d'élevage (Zribat).

Le cheptel est composé essentiellement d'ovins, de bovins et de caprins tel que montré dans le tableau suivant :

**Tableau IV.8 : Répartition d'élevage dans le système karstique de GharBoumâaza.
(Subdivision d'agriculture, 2014)**

Localité	Nbr d'Ovin	Nbr de Bovin	Nbr Caprin	Nbr d'éleveurs
Tal Terny	800	280	150	13
Sehb	2250	360	450	30
OuledBounouar	1030	90	428	15
Merchiche	900	250	150	12
Dar Maamer	1120	210	480	09

IV.9.6. Forêt :

La couverture forestière actuelle de notre zone est évaluée à 2585 ha, la plupart des couvertures forestières dans la zone d'étude sont dans un état de dégradation avancé. Les caractéristiques de ces unités forestières se résument comme suit :

- **Forêt de Tit Mokhene (Tal Terny)** : Située au Nord du système, connaissant un taux de dégradation avancé par la pression anthropique (pâturage, extraction de bois, culture en forêt, etc.). Espèces dominantes : chêne vert, genévrier, lentisque.
- **Forêt de Tasser M'Ramet** : Forêt dense, située à la limite d'Ain Ghoraba. Composée essentiellement de chêne vert, chêne liège et chêne zeen, mélangés à des formations d'arbustes.
- **Maquis d'Oued Merdja** : Maquis en état très dégradé par l'érosion. Constitué de divers peuplements : chêne vert, chêne liège, thuya, genévrier, diss, alfa, doum, etc. (Taamir, 2013) (Modifier).

IV.9.7. Infrastructures routières :

Du fait de son caractère montagneux et accidenté, le réseau routier de système souffre d'insuffisance. En effet, hormis le passage de la RN n°22, traversant le territoire du système du Nord vers le Sud, elle existe une autre voie de communication d'intérêt local (CW111). Globalement, la consistance du réseau routier du système se présente comme suit :

RN n°22 liaisons de Tlemcen – Sebdou par Terny centre, Tal Terny, Sehb, Merchiche, Hebalet, 20,5 Km, récemment modernisée.

CW n°111 liaisons entre RN n°22 (Merchiche) – Dar Maamar, son état est Dégradé, se poursuit en piste jusqu'à Béni Ghazli (Oued Chouly) (**Taamir, 2013**).

La circulation routière provoque une pollution marquée des sols, par les imbrûlés, les poussières, les éclaboussures, les sels de déneigement, etc., en particulier là où la chaussée est construite sur un remblai ou au niveau du sol. Il faut en outre s'attendre à un risque d'accident élevé avec des carburants liquides ou d'autres substances pouvant polluer les eaux. (**OFEFP, 2004**).

IV.9.8. Les Carrières :

Notre zone d'étude abrite deux carrières de nature juridique privées.

Tableau IV.9 : Exploitation minière (Direction des mine)

Dénomination	Nature de l'activité	Lieu d'implantation	Superficie	Coordonnées	Carrière en activité
SARL SEDOUKI	Carrière d'agréats	Tal Terny	05 Ha	/	Non
SARL UNION MILOUDI	Carrière d'agréats	TafzaMerchiche	07 Ha	/	Non

L'exploitation minière peut avoir des effets négatifs durables sur la qualité des eaux souterraines et sur leur régime hydraulique. Le décapage du sol et l'enlèvement d'une partie des couches de couverture affaiblit la protection naturelle des eaux souterraines (**OFEFP, 2004**).

IV.9.9. Les installations militaires :

Le secteur de notre étude contient deux casernes militaires, caserne de Tal Terny au niveau de Djbal Nador (la limite nord de notre système), et la caserne d'OuledBounouar, comme montre la figure IV.21.

Ces installations militaires présentent pour les eaux souterraines des dangers analogues à ceux d'ouvrages civils comparables – bâtiments, ouvrages de génie civil, ouvrages souterrains, etc. Les installations de fabrication et d'essai de munitions et d'explosifs, ainsi que les places de tir, comportent des risques spécifiques. Restes de projectiles, munitions non explosées et contamination du sol (plomb, antimoine, mercure et autres métaux) possèdent un potentiel polluant (OFEFP, 2004).

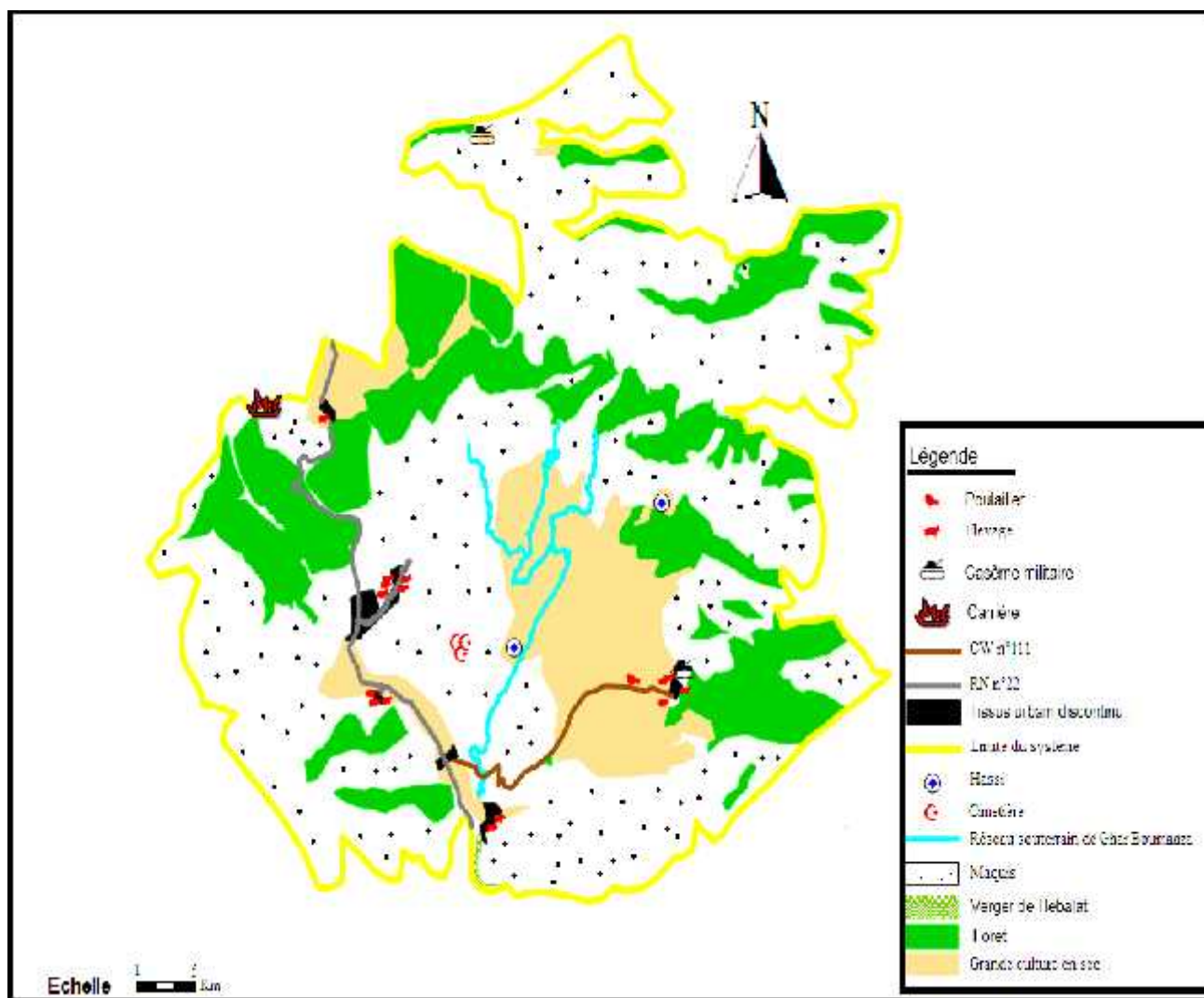


Figure IV.21 : Carte d'occupation du sol Actuelle du système karstique de GharBoumâaza.

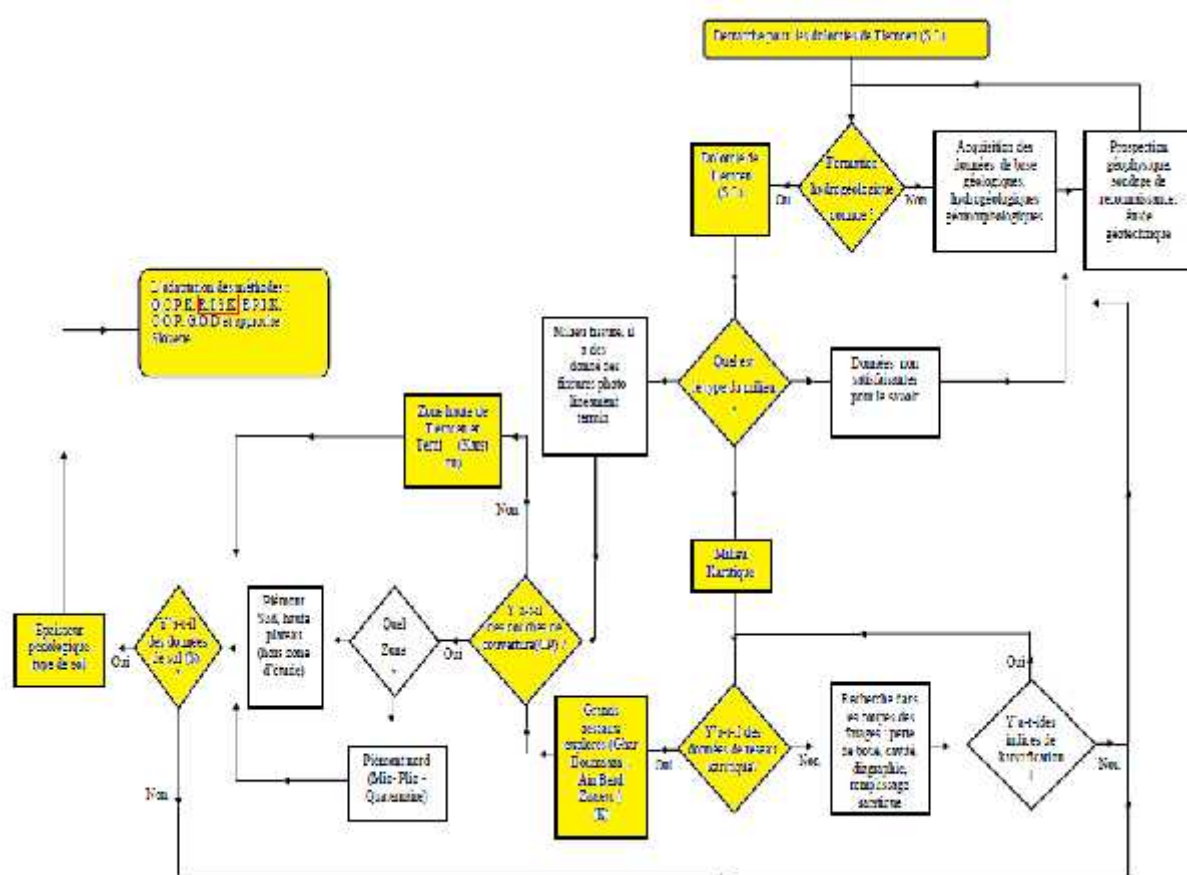
IV.10.Conclusion :

Afin de réaliser une cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du système étudié dans le but de proposer un périmètre de protection des captages qui y sont situés, la collecte et l'inventaire des données a été la première étape du travail. Cet inventaire a concerné aussi bien la configuration géographique, géologique, hydrogéologique du système mais aussi les données concernant la population locale, l'alimentation en eau potable, l'assainissement etc... Afin d'évaluer le risque de pollution des eaux souterraines de ce système les activités susceptibles de polluer sont elles aussi inventoriées.

La masse de données collectées complètes ou fragmentaires qu'elles soient, conditionne le choix de la méthode de cartographie de la vulnérabilité. Ce dernier fait l'objet du chapitre suivant.

Nous ne pouvons pas terminer ce chapitre sans mettre en reliefs toutes les difficultés que nous avons rencontrées au cours de cette étape du travail. Les données sont parfois manquantes sinon mal archivées et enregistrées au niveau des différentes institutions qui les détiennent. Afin de mener à bien cette étape et de pallier au manque de données, nous avons effectué de nombreuses sorties sur le terrain au cours des mois de février, mars et avril 2016.

Notre secteur d'étude est un système karstique « Système karstique de GharBoumâaza », il est constitué par des formations carbonatées qui sont largement karstifiées à savoir les dolomies de Terny. Pour le choix d'une méthodologie de cartographie de la vulnérabilité on s'est basé sur l'organigramme de la figure V.1



Le choix d'une méthode de cartographie à index avec pondération des critères s'est imposé de lui-même compte tenu des résultats observés et avec les différentes informations et données collectées et présentées dans le chapitre précédent. La méthode RISK a été sélectionnée. Cette

dernière s'inspire de la méthode suisse EPIK et de la méthode RISKE, dérivée de cette dernière, en raison de leur spécificité envers les aquifères karstiques.

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

V.2. Cartographie de la vulnérabilité selon la méthode RISK :

V.2.1. Critère « R » Roche aquifère :

A partir de la numérisation de la carte géologique au 1/20000^{ème} sous le logiciel SIG et à l'aide de la lithologie de la zone d'étude on obtient les éléments pour la construction de la carte R (voir tableau V.1).

- Les sources de la région sont principalement alimentées par les Dolomies de Terny, calcaires massifs et dolomies avec une forte intensité de fracturation et de karstification, qui donne des écoulements souterrains faciles et rapides, avec risque de contamination rapide. Ils seront donc cartographiés par **l'indice 4**.
- Des marno- calcaire avec domination argileuse, seront donc cartographiés par **l'indice 1**.
- Les Grés de Merchiche à Bled Boumiah seront donc cartographiés avec **l'indice 3**.

Tableau V.1 : Classe de critère de Roche aquifère.

Critère	Caractéristiques	Indice
R ₀	Marne (35-65% de minéraux argileux)- Faible propriétés aquifères	0
R ₁	Marne – Calcaire (35-65 % de minéraux argileux) – Faible écoulements	1
R ₂	Calcaires avec intercalation de niveaux marneux, % de minéraux argileux < 10-25 %)	2
R ₃	Calcaire massifs et/ou dolomites avec bancs épais sans fractures, calcaire en bancs minces avec fractures (fracturation homogène), écoulement souterrains faciles et rapides	3
R ₄	Calcaires massifs et/ou dolomites avec une forte intensité de fracturation et de karstification, écoulements souterrains faciles et rapides, contamination rapide	4

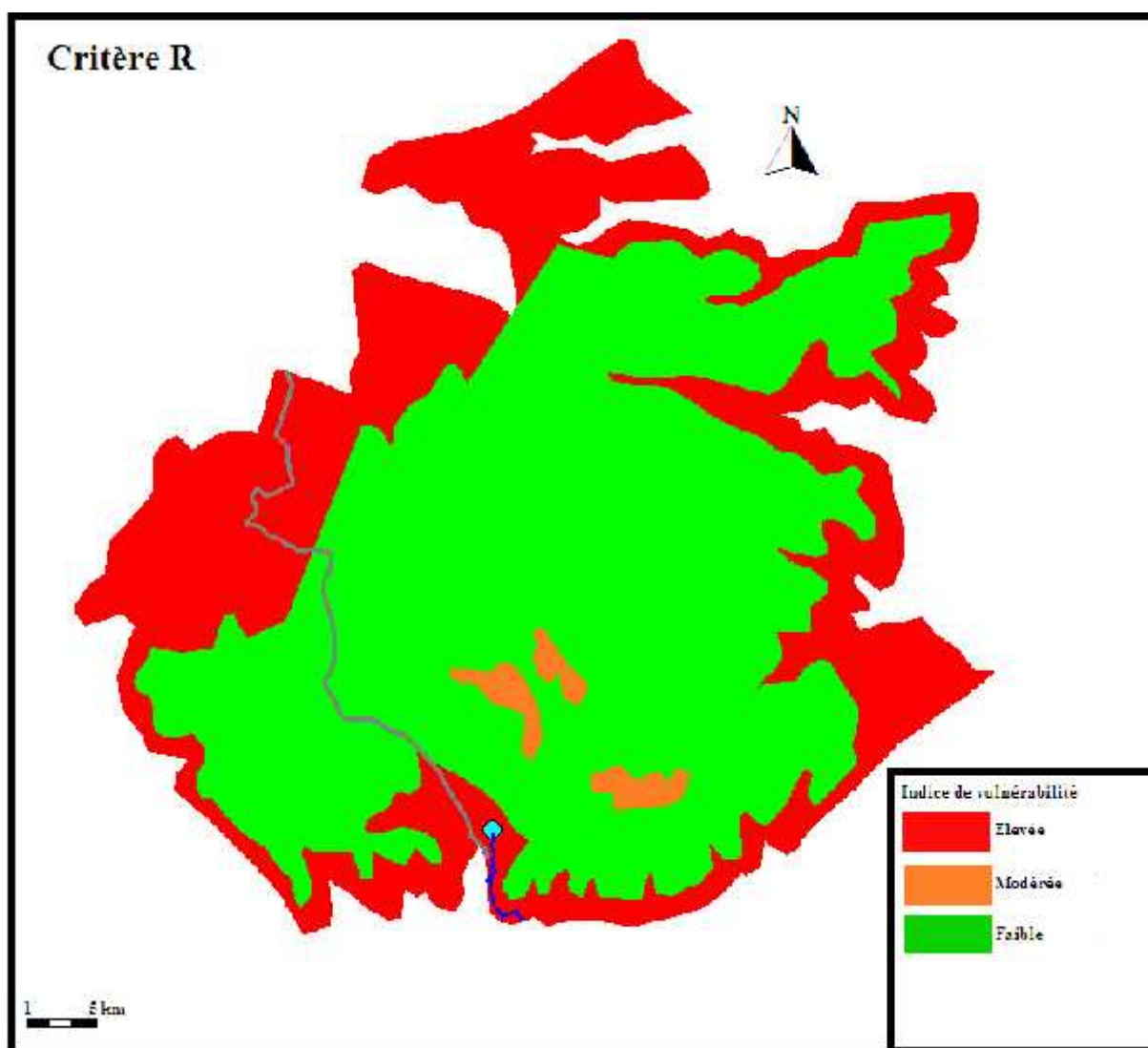


Figure V.2 : Indice de vulnérabilité selon le critère Roche aquifère.

V.2.2. Critère « I » infiltration :

Comme pour la méthode RISK, la carte du critère I a été réalisée comme suit :

- On trace les courbes de niveau de la zone d'étude (courbe maitresse et intermédiaire)
- On identifie les points coté aux alentours du système (voir figure V.3)
- Finalisation de la couche Critère I avec les pentes classées en 4 classes à l'aide de l'outil Vertical Mapper sous SIG (voir figure V.4)

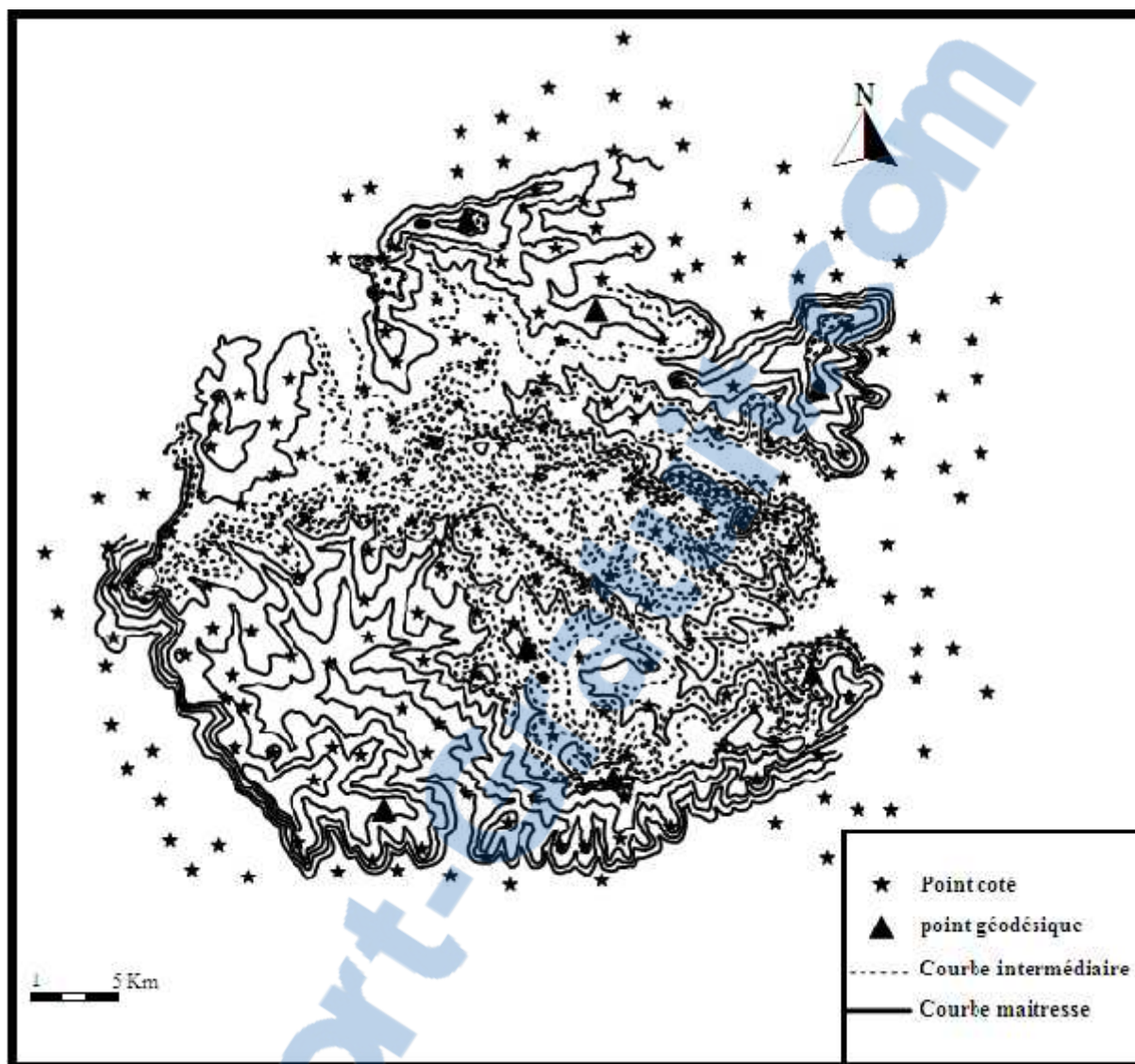


Figure V.3 : courbe des niveaux de la zone d'étude.

Ainsi les 4 classes I suivantes ont été définies (voir tableau V.2) :

On a la classe I_0 qui regroupe les zones du bassin où les pentes sont très fortes ($> 50\%$) induisant un ruissellement de l'eau très important (vers d'autres aquifères) et une infiltration négligeable voire même nulle, L'indice I_1 où les pentes sont fortes ($15-50\%$) favorisant grandement le ruissellement.

I_2 , zone du bassin où la pente est moyenne ($5-15\%$), dans la plus parts des cas le ruissellement est limité en terrains carbonatés.

I_3 zone à pente faible ($0-5\%$) où le ruissellement est limité et l'infiltration beaucoup plus forte.

Tableau V.2 : Classes de critère d'infiltration I

Critère	Caractéristiques	Indice
I₀	Pente très forte > 50 %	0
I₁	Pentes forte 15 - 50 %	1
I₂	Pente modérée 5- 15 % et vallées sèches	2
I₃	Faible pente 0 – 5 % Zones cultivées	3
I₄	Perte actives et leurs bassins versant, accidents tectoniques (failles majeures et alignement de dolines)	4

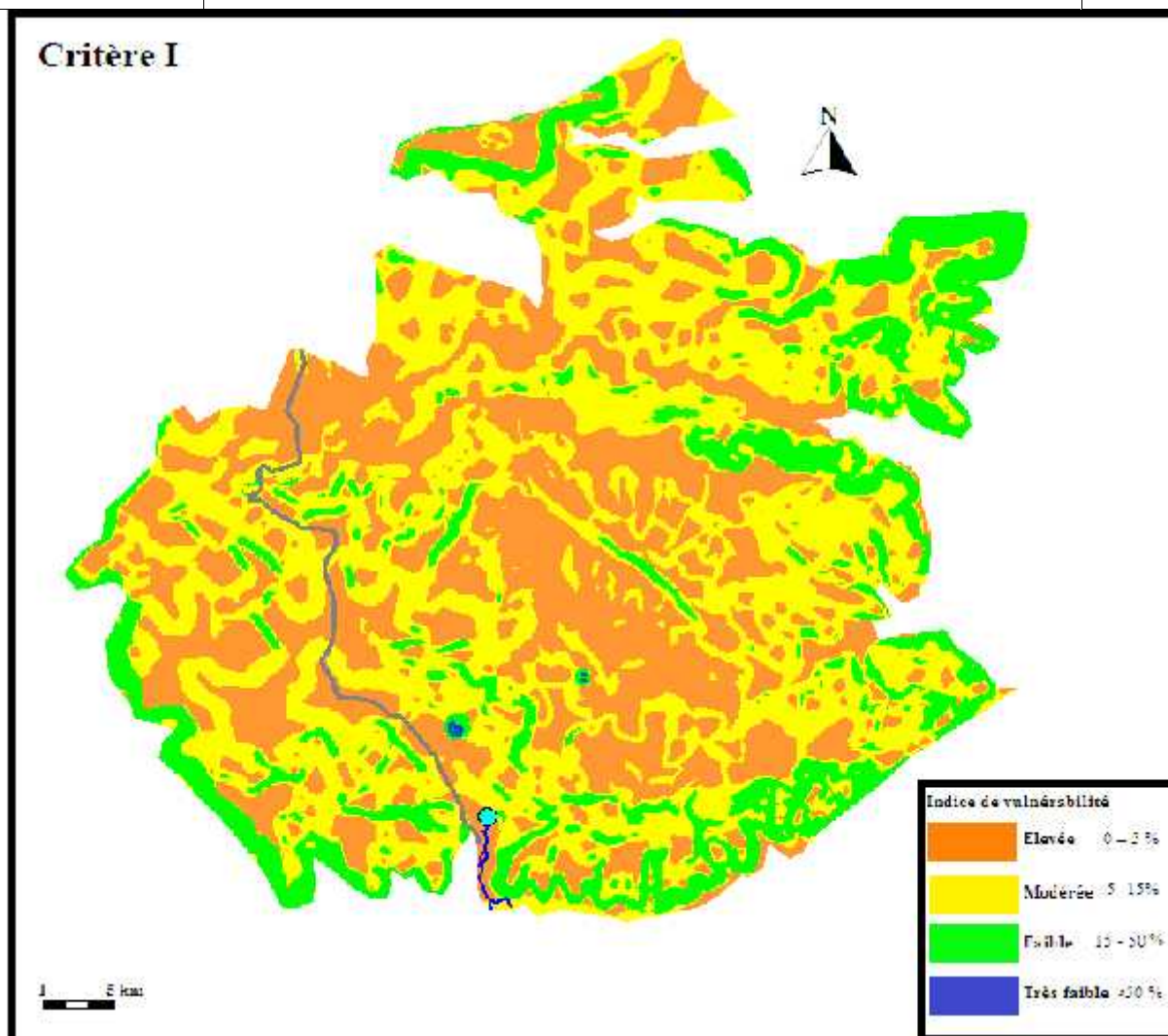


Figure V.4 : Indice de vulnérabilité selon le critère d'infiltration.

V.2.3. Critère de sol « S » : Sol et couverture protectrice

Vu le manque de document cartographique pédologique sur la région, la couche S, a été réalisée à partir de la carte de végétation, la carte géologique de la région et par des observations et des mesures ponctuelles (faites par nous-même) d'épaisseur et de la nature du sol qui sont détaillées dans ce qui suit :

- Dans la localité Ouled Bounouar : La mesure de l'épaisseur du sol a été faite au niveau de fosses creusées pour la réalisation des fondations d'un projet. L'épaisseur est de 60 cm
- Blad Ain l'Bayda (Plateau Merchiche) l'épaisseur varie de 40 à 60 cm
- Sehb Derias, dans le but d'aménagement des plateaux montagneux dans la région et durant notre travail sur terrain on a constaté des excavations prévues pour l'arboriculture. L'épaisseur du sol varie de 60 à 80 cm.
- Les zones avec couverture de végétation dense tel que la forêt de Merchiche qui a subi une grande dégradation), la forêt de Tit Mokrane, la forêt d'Oued Merdja. montrent une épaisseur supérieure à 100 cm.
- Une grande partie de la surface du système étudié est couverte de maquis, où l'épaisseur du sol varie de 0 à 20 cm.

Trois classes de nature de sol sont définies, en fonction de la texture du sol (dominante argileuse, dominante limoneuse ou dominante sableuse) et en fonction de la proportion de cailloux. Les classes sont notées de 1 à 3 :

Tableau V.3 : Classe de nature de sol selon la texture et la proportion de cailloux.

		Texture		
		1 (argiles)	2 (limons)	3 (sables)
Cailloux	1 (0 – 15 %)	1	1	2
	2 (15 – 60 %)	1	2	3
	3 (> 60 %)	2	3	3

Mais vu l'absence des données pédologiques relatives à la nature de sol, l'épaisseur est l'unique paramètre utilisé pour distinguer les différentes classes du critère sol (voir tableau V.4)

Trois classes de vulnérabilité sont ensuite définies en croisant la nature du sol avec l'épaisseur :

Tableau V.4 : classe de critère Sol.

		Nature du sol			
		<u>Inconnue</u>	1	2	3
Epaisseur	1(> 100 cm)	S ₁	S ₁	S ₂	S ₃
	2 (20 – 100 cm)	S ₂	S ₂	S ₃	S ₄
	3 (0 – 20 cm)	S ₃	S ₃	S ₄	S ₄
	4 nulle	S ₄	S ₄	S ₄	S ₄

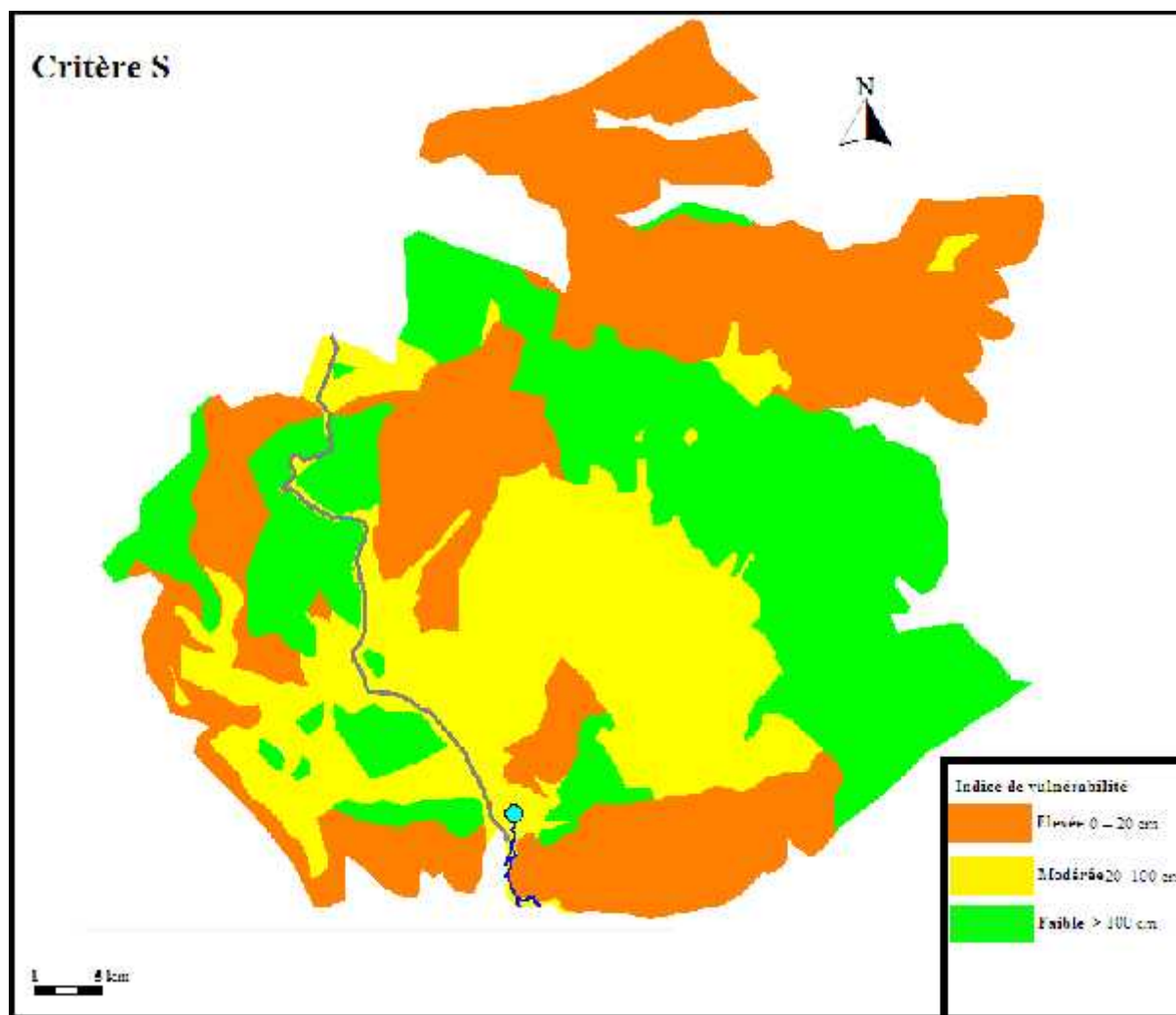


Figure V.5 : Indice de vulnérabilité selon le critère de Sol

V.2.4. Critère « K » Karstification :

La présence de l'une des plus longues rivières souterraines d'Afrique (18400 m), la Tafna souterraine, un réseau Karstique bien développé avec la présence d'un gros collecteur connecté avec la surface, un traçage à circulation rapide, nous amène directement vers le choix de l'indice K_4

Tableau V.5 : classe de critère de karstification.

Critère	Caractéristiques	Indice
K_0	Aquifère plus moins fissuré	0
K_1	Aquifère fissuré mais sans karstification	1
K_2	Réseau karstique peu développé ou mal connecté avec la surface	2
K_3	Réseau karstique bien développé et plus ou moins connecté avec la surface	3
K_4	Réseau karstique très bien développé et connecté avec la surface	4

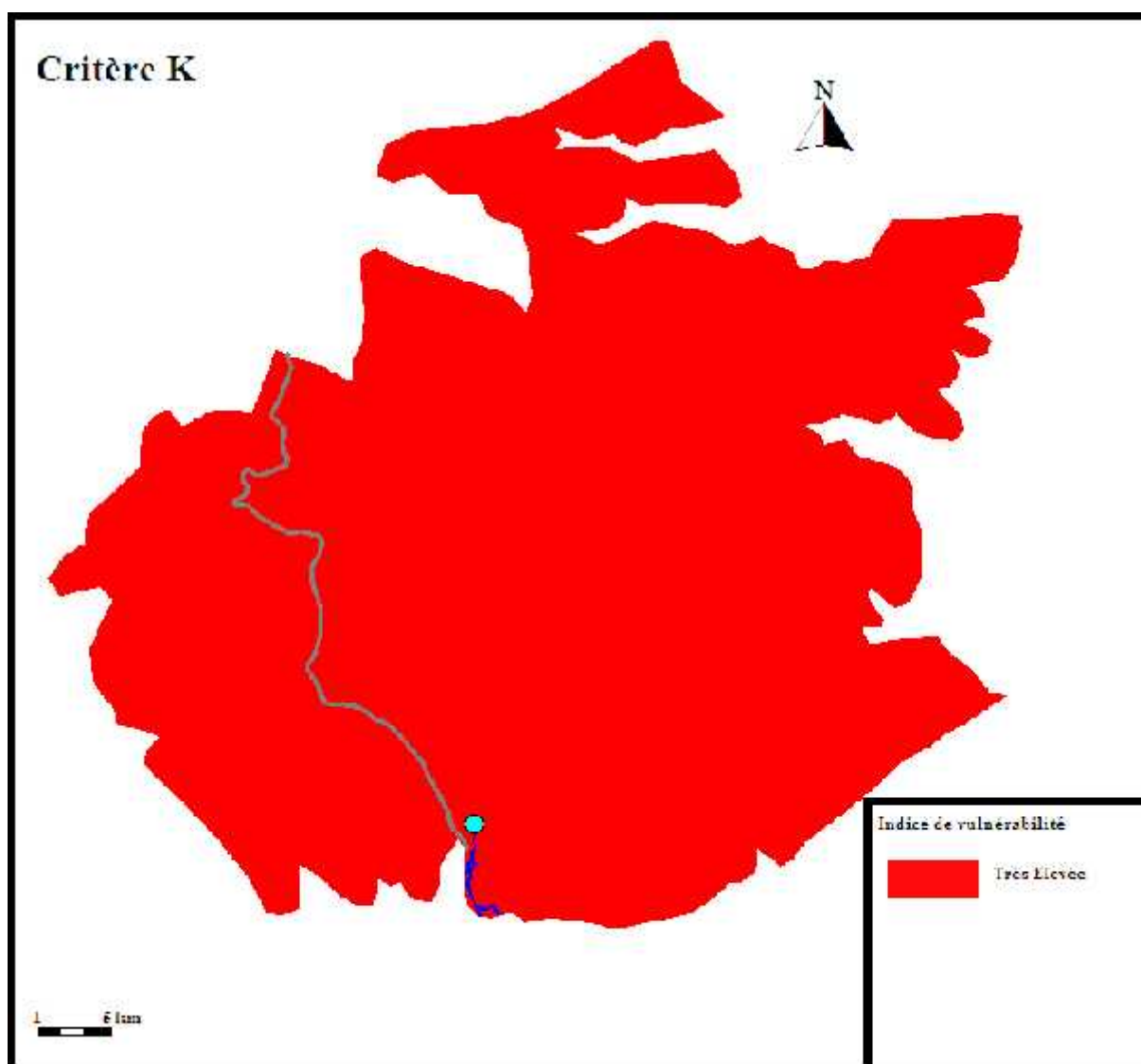


Figure V.6 : Indice de vulnérabilité selon le critère de Karstification.

V.2.5. La carte de vulnérabilité finale :

Indice global de vulnérabilité « Ig » :

Calcul de l'indice global de vulnérabilité – système de pondération

Le calcul de l'indice global de vulnérabilité est effectué selon la formule suivante :

$$I_g = \alpha K_i + \beta R_j + \delta I_k + \gamma S_l$$

I_g : Indice global de vulnérabilité

$\alpha, \beta, \delta, \gamma$: Poids de chacun des critères

K_i, R_j, I_k, S_l : Valeur des critères indexés.

Le calcul de l'indice global de vulnérabilité peut être effectué de façon automatique avec logiciel de SIG sous Vertical Mapper, à partir de la superposition des 4 cartes de base des critères : R, I, S, K.

La superposition des cartes a été effectuée selon la relation suivante :

- $I_g = 0,15R + 0,4I + 0,25S + 0,2K$

La vulnérabilité est alors re-classifiée en 5 catégories suivant le tableau suivant :

Tableau V.6 : Les classes de vulnérabilité selon la méthode RISK.

Reclassification Ig	Indice	Vulnérabilité
3.2-4	4	Très élevée
2.4-3.19	3	Elevée
1.6 - 2.39	2	Modérée
0.8 - 1.59	1	Faible
0 - 0.79	0	Très faible

Toutes les alternatives des critères ont été classées en 5 catégories indexées de 0 à 4, du moins au plus vulnérable. La classe intermédiaire 2 correspondant aux caractéristiques moyennement vulnérables de chaque critère. Les 5 classes ainsi obtenues traduisent le degré de vulnérabilité en chaque point de la zone d'étude (voir figure V.7)

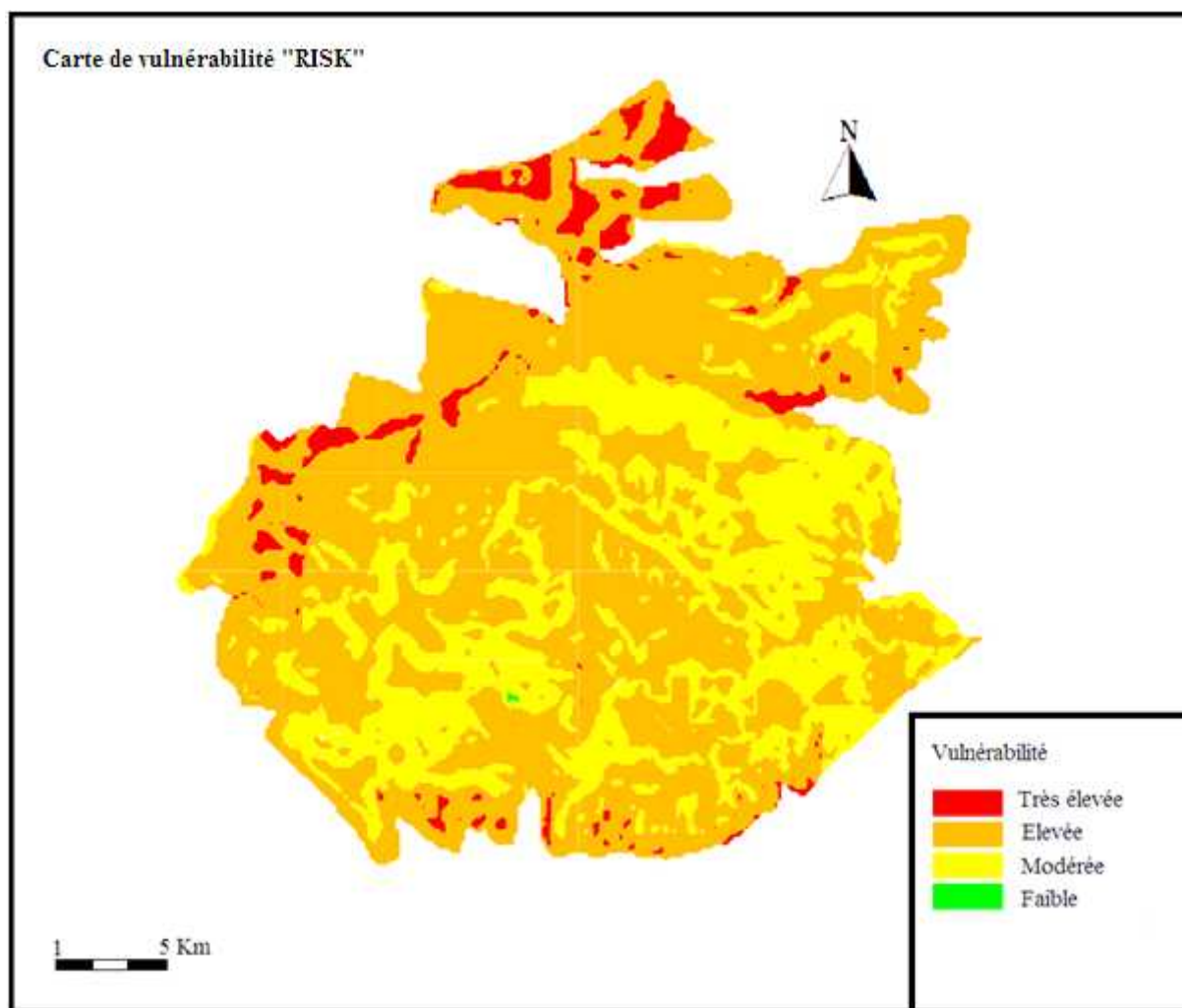


Figure V.7 : Carte finale de la vulnérabilité selon la méthode RISK.

Résultat de la méthode RISK :

La vulnérabilité intrinsèque de système karstique de GharBoumâaza se répartie entre 4 classes. Les surfaces correspondantes à chacune de ces classes sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau V.7 : Répartition de la vulnérabilité dans le système karstique de GharBoumâaza

Vulnérabilité	Surface en Km ²	Proportion en %
Très élevée	5.427	4.83
Elevée	74.17	66.07
Modérée	32.64	29.08
Faible	0.02119	0.02

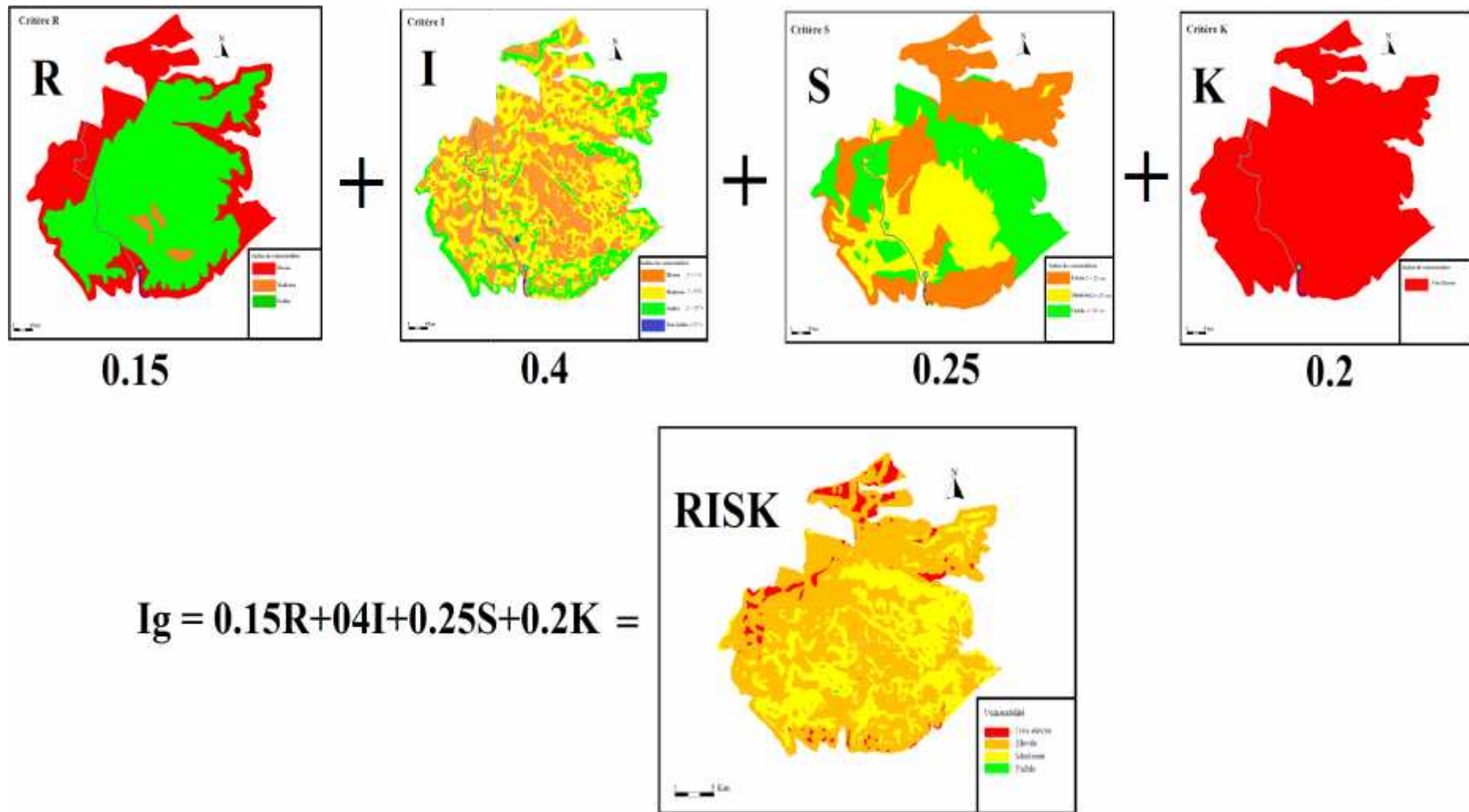


Figure V.8 : Procédure de superposition des cartes R, I, S et K

Plus de 66 % de la surface de système karstique de Ghar Boumâza est cartographiée de vulnérabilité élevée, où les sols sont généralement peu épais avec des pentes (0-5%). Le ruissellement y est donc limité et l'infiltration est beaucoup plus forte.

La couverture forestière dense, avec un sol épais (>100 cm), et la présence des vallées sèches caractérisées par des pentes modérées (5-15%), qui favorisent le ruissellement et limitent l'infiltration et protègent l'aquifère. Ces secteurs sont cartographiés de vulnérabilité modérée. Le seul secteur cartographié en vulnérabilité faible se trouve sur un sommet (1161m), où la pente est supérieure à 50%, donc une infiltration négligeable voire même nulle,

V.3. Inventaire des activités potentiellement polluantes, hiérarchisation et cartographie des aléas :

L'évaluation du risque est une étape dans le processus de protection des ressources en eau souterraine et plus particulièrement de l'établissement des périmètres de protection. Le risque, terme utilisé pour mettre en évidence la probabilité d'une contamination possible résultant d'un événement aléatoire, constitue l'origine possible d'une contamination liée à une activité donnée. Combinée à la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, caractérisant la sensibilité du milieu souterrain à la contamination, elle permet de déterminer les conséquences potentielles d'une contamination.

L'évaluation du risque dans le cadre de la protection des eaux souterraines karstiques, nécessite la collecte de plusieurs données :

- L'identification des risques potentiels
- L'analyse de l'impact potentiel des risques sur les eaux souterraines (concentration et quantité de contaminants)
- L'information sur les caractéristiques hydrogéologiques des matériaux géologiques qui peuvent influencer le transfert et l'atténuation des contaminants : vulnérabilité des eaux souterraines
- L'information sur la valeur des eaux souterraines. Les eaux karstiques sont considérées comme avoir une haute valeur (**Dörfliger et Mettetal, 2005**).

V.3.1. Cartographie des pressions polluantes.

Une carte des pressions polluantes est éditée à partir de la base de données qui fournit l'occupation du sol de notre région. Cette cartographie est vérifiée par rapport à notre connaissance du terrain, elle est éventuellement complétée ou actualisée. La carte des pressions polluantes est indicées en 5 classes de très faibles à très élevées (**AERMC, 2013**). Les risques (pressions polluantes) peuvent être répartis en plusieurs catégories (voir tableau V.8)

Tableau V.8 : Catégorie des risques selon le COST 620 selon Dörfliger et Mettetal, 2005) (Modifié)

N°	Niveau 1 Catégorie des risques	Niveau 2 Catégorie des risques
1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6	Infrastructure	Eaux usées Déchets municipaux Huiles et essences Transport et trafic Zones récréatives Divers
2 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7	Activité industrielles	Mines (en cours d'exploitation et post exploitation) Excavation Exploitation de gaz et pétrole Industries (hors mines) Stations électriques Stockage industriel Traitement d'eaux usées
3 3.1 3.2	Animaux et agriculture	Élevage Agriculture

Tableau V.9 : catégories des risques selon notre zone d'étude

N°	Niveau 1 Catégorie des risques	Niveau 2 Catégorie des risque
1 1.1 1.4 1.6	Infrastructure	Eaux usées Transports et trafics Divers
2 2.2	Activité industrielles	Excavation
3 3.1	Animaux et agriculture	Elevage

V.3.2. Hiérarchisation des pollutions potentielles :

Les pressions polluantes qui se trouvent au niveau de notre zone d'étude sont hiérarchisé en détail dans le tableau suivant (voir Annexe 2 et 3) :

Tableau V.10 : Le poids des aléas dans la zone étudiée.

No.	Dangers	Poids d'aléa
1	Le développement des infrastructures	
1.1	Eaux usées	
1.1.3	Maisons individuelles sans assainissement	45
1.1.4	Fosse septique, fosse d'aisance, latrine	45
1.1.9	Evacuation des eaux usées dans des cours d'eau	45
1.4	Transports et circulation	
1.4.1	Route, non sécurisée	40
1.6	Divers risques	
1.6.1	Cimetière	25
1.6.5	Installation militaire actives ou désaffectées	35
2	Les activités industrielles	
2.2	site d'excavation	
2.2.3	Carrière	25
3	L'élevage et l'agriculture	
3.1	L'élevage	
3.1.1	Grange animale (hangars, abri, étable)	30
3.1.3	Elevage en batterie, ou intensif	30
3.1.4	Epannage d'engrais organiques	45
3.1.6	Zone de pâturage intensif	25

V.3.3. Pondération des aléas (Indice de danger) :

Le tableau V.10 montre le poids H pour chaque type d'aléa ou le degré de danger sur les ressources souterraines. Les valeurs de poids H varient de 10 jusqu'à 100.

Afin d'obtenir le tableau d'aléas classés H_i qui décrit le danger de chaque aléa, avec des valeurs qui varient entre 0 et 120, et qui nous donnent cinq classes de degré d'aléa (Tableau V.11), pour cela on calcule cet indice à partir de la relation suivante :

$Hi = H \times Q_n \times R_f$, avec :

Hi : aléa classé ;

H : poids d'aléa ;

Q_n : facteur de classement. Il varie de 0.8 à 1.2.

R_f : facteur de réduction. Il varie de 0 à 1. Si on a des informations sur l'aléa le R_f est égale à 1 mais si on n'a pas d'informations sur l'impact d'aléa ce R_f prend aussi la valeur 1. Par contre, si l'aléa est sécurisé à 100%, alors le R_f égale à 0.

Le facteur de classement Q_n , varie entre 0,8 et 1.2, afin d'indiquer les quantités des substances toxiques (pondération quantitatif) par rapport à la moyenne générale.

Donc l'estimation de facteur se fait comme suit :

Cimetière $\rightarrow Q_{ni} = f(\text{populations})$

Exemple : Cimetière DiarLakbour au-dessus GharBoumâaza, utilisé pour 3 localités Merchiche, Sehb, et OuledBounouar. Le risque par rapport aux eaux souterraines est grand, donc le facteur $Q_n=1,2$.

Exemple de calculs :

- Cimetière « DiarLakbour » $\Rightarrow Hi = 25 \times 1.2 \times 1 \quad Hi = 30$, Classe d'aléa = 2
vulnérabilité faible selon le tableau V.11

Tableau V.11 : L'indice d'aléa Hi et les classes de Hi

Classification d'aléa	Classe d'Aléa	Vulnérabilité	Couleur
0 - 24	1	Très faible	Bleu
>24 - 48	2	Faible	Vert
>48 - 72	3	Modérée	Jaune
> 72 - 96	4	Elevée	Orange
>96 - 120	5	Très élevée	Rouge

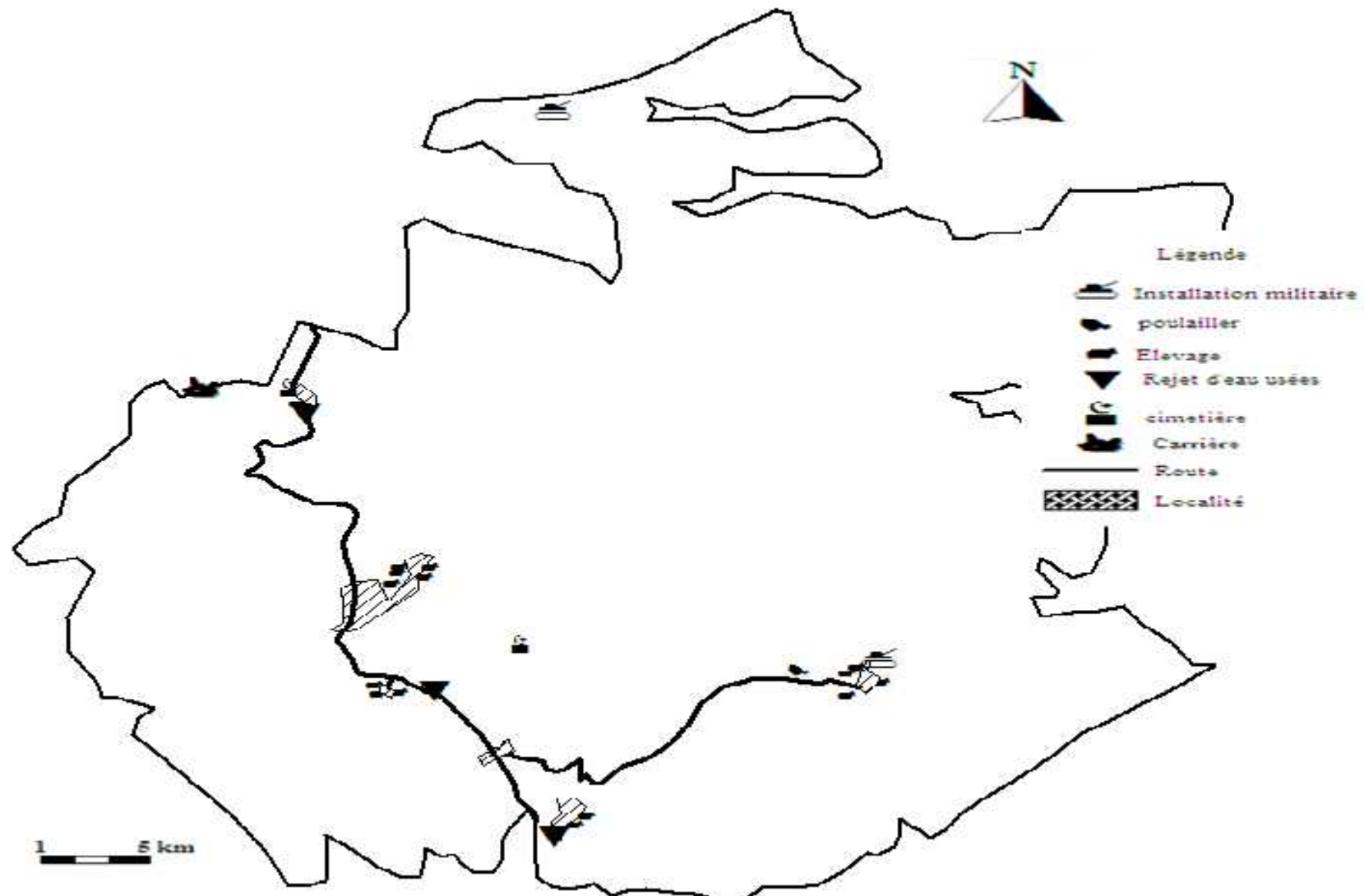


Figure V.9 : La carte d'aléas non classés

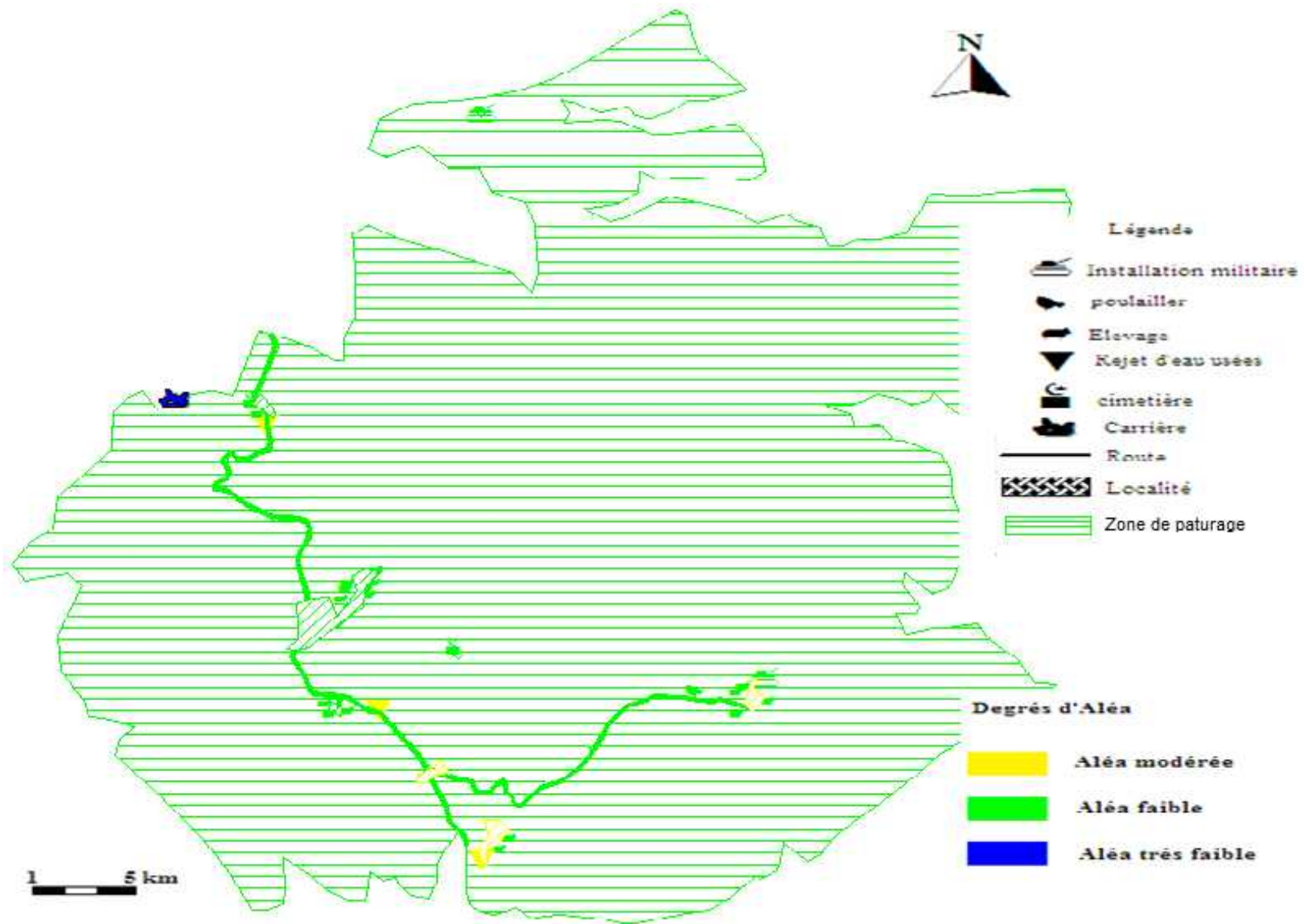


Figure V.10 : Carte d'aléa classé

V.4. Cartographie du risque de pollution :

La carte des risques provient du croisement de la carte des pressions polluantes classées selon le Cost 620 (Figure V.10) et de la carte de vulnérabilité réalisée par la méthode de vulnérabilité intrinsèque « RISK » (Figure V.7). Les risques sont répartis en 3 classes de faible à élever (voir tableau V.12).

Tableau V.12 : classe de risque

Intensité de risque	Indice d'intensité de risque	Niveau d'intensité de risque	Couleur	Cartographie de risque
172 -182	2	Elevé	Rouge	
76 - 172	1	Modéré	Jaune	
52-76	0	Faible	Bleu	

L'intensité de risque est obtenue à partir de COST 620 par la formule suivante :

$$RI = HI \times Ig$$

RI= indice d'intensité de risque

HI= indice d'Aléa classée

Ig= Indice de vulnérabilité.

La superposition des deux cartes, la carte d'Aléa classé et la carte de vulnérabilité nous a donné la carte de risque présentée en figure (Figure V.11)

Au préalable, il faut noter que le nom de la méthode « RISK » n'est pas très bien choisi car c'est une méthode de cartographie de la « vulnérabilité » et non du « risque » (AERMC, 2013)

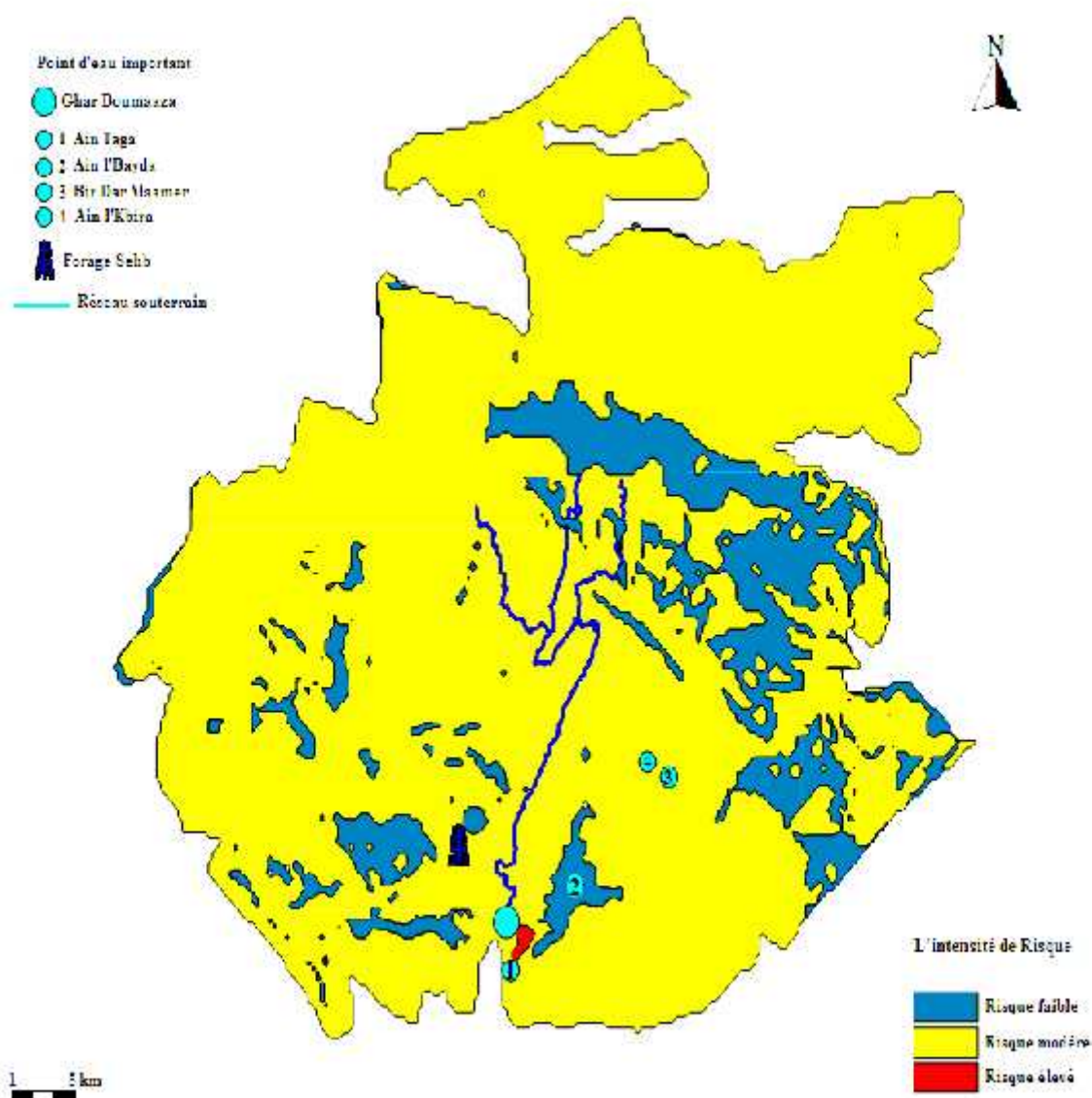


Figure V.11 : Carte de risque de pollution des eaux souterraines dans le système karstique de GharBoumâaza

Tableau V.13 : Répartition du risque de pollution des eaux souterraines dans le système karstique de Ghar Boumâaza

Le risque	Surface en Km ²	Proportion en %
Elevé	0.1143	0.1027
Modéré	96,68	86.884
Faible	14.48	13.01288

Discussions des résultats obtenus : La combinaison de la carte de vulnérabilité intrinsèque (figure V.7) et la carte d'Aléa classé (figure V.10), a permis d'établir une carte de risque de trois degrés (figure V.11) : élevé, modéré et faible.

La carte obtenue nous permet de mettre en évidence les zones à risques liée à l'existence de facteurs polluants. Ainsi à travers le secteur étudié nous avons pu répertorier plusieurs activités polluantes tel que :

- Les rejets d'eaux usées domestiques dans le milieu naturel.
- Fosse septique individuel non conforme.
- L'épandage d'engrais organique à proximité de la source la plus importante au niveau de zone d'étude.

Notons que ces activités ont été repérées en zone à risque élevée, exactement sur le Merchiche comme le montre la figure V.11.

Sur la totalité du secteur d'étude les points d'eau représentés dans la figure V.11 sont affectés à l'alimentation en eau potable de la population. Trois d'entre eux : forage Sehb, Ain l'Kbira, et « Bir Dar Maamer » (figure V.12), se trouvent dans la zone à risque modéré. La source la plus importante dans le système « Ain Taga » se trouve dans la zone à risque élevé. Tous ces points d'eau sont contaminés, d'après les analyses bactériologiques effectuées récemment (voir tableau V.14, communication de fellah H.). Seule Ain l'Bayda a présenté une eau de bonne qualité bactériologique. Cette dernière est captée pour l'alimentation en eau potable de la population de « OuledBounouar ». Elle se trouve dans la zone à risque faible. Ces résultats nous permettent de valider les cartes élaborées à savoir la carte de vulnérabilité et la carte à risque.



Figure V.12 : Bir Dar Maamer, et Ain l’Kbira fermés pour cause de pollution.

Il faut noter que les périmètres de protection de ces ouvrages ne sont pas établis.

Tableau V.14 : Qualité des principaux points d’eau destiné pour l’alimentation en eau potable
(Voir Annexe 03 et 04)

Lieu de prélèvement	Nature	Date d’analyse	Qualité
Ain Taga	Source	• 22/07/ 2014 • 19/01/ 2016 • 03/04/ 2016	• Eau à surveiller • Eau suspecte à traiter • Eau souillée non potable (mauvaise qualité bactériologique)
OuledBounouar	Fontaine publique (capté à partir d’Ain l’Bayda)	• 19/01/ 2016 • 03/04/ 2016	• Eau Potable • Eau potable
Forage Sehb	Forage	• 05/02/ 2008 • 03/04/ 2016	• Propre à la consommation humaine. • La couleur de l’eau est marron clair, eau de mauvaise qualité
Ain l’Bayda	Source	• 16/12/2013	• Eau de bonne qualité
Ain l’Kbira	Source	/	• Eau de mauvaise qualité
Bir Dar Maamar	Puits	• 05/ 2014 • 07/ 2014 • 09/ 2014 • 09/ 2015	• Eau qualité souillé mauvaise • Eau de bonne qualité bactériologique. • Eau de très mauvaise qualité bactériologique • Eau souillée non potable

V.5. Recommandations :

Afin de pallier à l'état de pollution que présentent les captages des eaux souterraines dans la zone étudiée, il est indispensable de procéder tout d'abord à l'application des textes législatifs en vigueur qui préconisent l'installation des périmètres de protection des eaux souterraines.

Une zone de protection immédiate qui intéressera tous les points d'eau et qui sera matérialisé par un grillage.

Dans le cas des sources captées pour l'eau potable et qui comportent également un abreuvoir pour le bétail (à titre d'exemple OuledBounoir comme montré dans la photo de la figure V.13) il est préférable que les bacs de l'abreuvoir soient placés au minimum au-delà des limites du périmètre de protection immédiate et à l'aval afin d'éviter la contamination de l'eau par les déjections des animaux qui viendraient s'en abreuver.



Figure V.13 : Abreuvoir pour le bétail, localité Ouled Bounouar (Benazouz, et Khatir, 2016)

Le Périmètre de protection rapprochée avec une distance de 1000 m, vu la vulnérabilité du secteur. La gestion du périmètre rapproché est la plus délicate, en raison des contraintes qui sont imposées aux occupants de l'espace.

Pour le cas d'Ain Taga le périmètre rapproché va contenir toute la localité de Merchiche, et par application de la législation algérienne (voir chapitre I), toutes les activités suivantes vont faire l'objet d'interdiction :

- L'épandage de fumier, il faut éliminer les rejets des matières organique a Habalat (voir chapitre IV) ;
- l'élimination des fosses septiques au niveau de Merchiche ;
- la règlementation de l'installation des canalisations des eaux usées étant donné que le projet est en cours de réalisation.

Pour les cas d'Ain l'kbira, Bir Dar Maamer et Ain l'Bayda qui se trouvent au milieu d'une zone agricole, l'installation d'un périmètre de protection rapproché exige la diminution des quantités de phosphates et nitrates rejetées par l'agriculture et éliminer et ne plus autoriser les rejets directs d'eaux usées issues des poulaillers comme c'est le cas à 200m de Bir Dar Maamer.

Pour la protection du Forage Sehb, il est strictement interdit de rejeter directement en milieu naturel, les eaux usées domestiques d'Ouled Bounouar. Le rejet se faisant actuellement près du forage.

Seul l'agriculture sans intrants (donc sans fumier, fertilisants chimiques, pesticides) est autorisée.

Pour les eaux du sous-sol en milieu karstique, le périmètre de protection éloigné comprend les parties du bassin d'alimentation du captage ou de l'installation d'alimentation artificielle qui présentent une vulnérabilité moyenne. Donc pour notre cas le périmètre de protection éloignée va englober la totalité du système.

V.6. Conclusion :

La méthode RISK est un outil de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque en milieu karstique à destination d'établir les périmètres de protection ou de faire appliquer la loi sur l'eau en vigueur.

L'attribution des différents indices pour chacun des 4 critères retenus nécessite une connaissance hydrogéologique, topographique et pédologique du système karstique ainsi qu'une approche naturaliste sur le terrain. Le système de pondération proposé peut également faire l'objet de modification, il n'est en aucun cas figé ; à condition de rester dans un système de pondération normé (somme des poids =1).

La traduction des zones de vulnérabilité résultantes en périmètres de protection n'est pas automatique, il faut passer par l'évaluation du risque dans le cadre de la protection des eaux souterraines karstiques, cela nécessite :

- identification des risques potentiels au niveau du secteur d'étude.
- analyse de l'impact potentiel des risques sur les eaux souterraines selon le COST 620.
- information sur la qualité des eaux souterraines dans la région dans le but de valider le résultat de travail.

La superposition de la carte d'aléas classés et la carte de vulnérabilité établie par la méthode RISK, permet d'obtenir la carte finale de risque avec trois degrés : faible, modéré et élevé. Cette carte permet le dimensionnement du périmètre de protection.

Conclusion Générale

Le système karstique de Ghar Boumâaza constitue la source principale de la Tafna avec un réseau souterrain de 18.5 km et une superficie de 11300ha. C'est une zone à climat méditerranéen semi-aride frais avec des précipitations irrégulières d'après les enregistrements au niveau de la station du Meffrouch.

Ces eaux souterraines karstiques jouent un rôle très important dans l'approvisionnement en eau de la population de Tlemcen. C'est une ressource qui a tendance à être de plus en plus exploitée et sa qualité à tendance à se dégrader.

La dégradation de la qualité de l'eau souterraine est un problème majeur qui menace de plus en plus notre environnement.

Pour cela, la mise en place de périmètres de protection à cette ressource, est très importante dans le développement et l'aménagement de notre système karstique.

Plusieurs politiques concernant la protection des eaux souterraines ont été développées en Algérie. A cet effet des textes législatifs ont été mis au point mais ils restent lacunaires tant qu'ils ne prévoient pas des outils nouveaux de protection. La cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines est l'un de ces nouveaux outils.

Sur la base de la carte de vulnérabilité intrinsèque RISK il s'avère que plus de 66 % de la surface de système karstique de Ghar Boumâaza est cartographiée à vulnérabilité élevée, 4,83% très élevée, 29.08 % modérée, 0.02% faible. La superposition de cette carte de vulnérabilité avec la carte d'Aléa classé selon le Cost 620 a permis d'établir une carte de risque de trois degrés :

- Élevé à Ain Taga.
- Modéré à forage Sehb, Ain l'Kbira, et Bir Dar Maamer.
- Faible à OuledBounouar.

Cette carte permet de mettre en évidence les zones à risques liée à l'existence de facteurs polluants. Ainsi à travers le secteur étudié nous avons pu répertorier plusieurs activités polluantes tel que :

- les rejets d'eaux usées domestiques dans le milieu naturel.
- Fosses septiques individuelles non conformes.
- L'épandage d'engrais organiques à proximité de la source la plus importante au niveau de la zone d'étude.

Les documents cartographiques obtenus sont très utiles voire indispensables pour la délimitation des périmètres de protection. Ceci doit permettre de mieux orienter l'aménagement du territoire.

Références bibliographiques :

Ablaoui H et Mehtari Nezha. 2001, Structure et fonctionnement du système karstique d'Ain Taga (Mont de Tlemcen) à partir de l'étude hydrogéochimique sur un cycle hydrologique (période du 13/09/2000 au 26/06/2001), Mémoire de Magister, Université d'Oran.

Agence de l'eau Rhône méditerranée corse (AERMC). 2013, Méthodologie de la cartographie de la vulnérabilité RISK, Identification des ressources karstiques majeures pour l'alimentation en eau potable en vue de leur protection sur une partie du massif Jura, Guide pratique.

Bakalowicz M. 2002, Hydrogéologie Karstique, Caractéristique et concepts, Méthode d'exploitation et de gestion active, Cours DEA H.H.G.G, Université Paris.

Bakalowicz M. 2010, Karst et ressources en eau souterraine : un atout pour le développement des pays méditerranéens, Sécheresse vol. 21, n° 1 : 1-6

Bemoussat A. 2012, Impacte de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraine à travers le bassin de la Tafna, Mémoire de Magister, Université de Tlemcen.

Bencherki A. 2008, Réalisation d'une carte de vulnérabilité des nappes phréatiques de la région de SAIDA, en Algérie, avec l'aide des systèmes d'information géographique, Thèse de Doctorat, Université de Moncton.

Boumezbour A et Ameur N. 2003, Grotte karstique de GharBoumâaza, Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar, Direction générale des forêts, Alger.

Bensaoula F. 2006, Karstification, hydrogéologie et vulnérabilité des eaux karstiques, mise au point d'outils pour leur protection (Application aux monts de Tlemcen-Ouest Oranais), Thèse de doctorat d'état, Université Tlemcen.

Bensaoula F. 2007, Etude de la karstification à partir des données de forage : le cas des Monts de Tlemcen (Algérie). Karstologia n° 49, 2007. 15-24.

Bensaoula F. 2008, Exportation des carbonates et dissolution spécifique dans le système karstique de Boumaza (Monts de Tlemcen- NO algérien). Karstologia n° 52, 2008.31.38.

Benest M. 1985, Evolution de la plate-forme de l'Ouest Algerien 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, Université de Lyon.

Cadilhac L. Dugleux E. 2006, Bilan et analyse de la mise en œuvre des périmètres de protection des captages AEP en milieu karstique, Synthèse des préconisations en faveur de l'amélioration des démarches de protection, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse.

Chareb-Yssaad I. 2014, Gestion intégrée et économie de l'eau, Université Tlemcen.

Darou S. 2013, Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la plaine Maghnia, Mémoire de Master, Université Tlemcen.

Derni S. 2011, Réflexion sur les critères de choix d'une méthodologie pour la cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Cas de bassin versant de la Tafna, Mémoire de Magister, Université Tlemcen.

Dörfliger N. Jauffret D. Loubier S. Petit V. 2004, Cartographie de la vulnérabilité des aquifère karstique en Franche-Comté, Etude réalisée dans le cadre des opérations de Service du BRGM 2003 – PSP03FRC09, BRGM/RP-53576-FR.

Dörfliger N. et Mettetal J.P. 2005, Cartographie de la vulnérabilité en vue de la délimitation des périmètres de protection en milieu karstique, Guide méthodologique, Edition BRGM.

Dörfliger N. Plagnes V. 2009, Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstique, Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa, BRGM RP – 57527-FR.

Energoprojekt-Hidroizenjering. 2009, Carte des ressources en eau souterraines du nord de l'Algérie, ANRH.

Gilli E. 2011, Karstologie Karsts, grottes et sources, éditions Dunod.

Fellah H. 2012, La cartographie de vulnérabilité et du risque de pollution des eaux souterraines dans le groupement urbain de Tlemcen, Mémoire de Master, Université de Tlemcen.

Felidji M. 2011, Contribution à l'étude des plantes aromatique et médicinales du Parc National De Tlemcen. Taxonomie, Ecologie, Caractéristique chimiques, thèse de doctorat en écologie et environnement, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen

Journal Officiel de la République Algérienne N° 30 du 19/07/1983, Lois n° 83-17 du 16 Juillet 1983 portant code des eaux.

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 jourada 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 Jourada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau.

Journal Officiel de la République Algérienne N° 80 du 26/12/2007, décret exécutif n° 07-399 du 14 DhouElhidja 1428 correspondant au 23 décembre 2007 relatif au périmètre de protection qualitative des ressources en eau.

Journal Officiel de la République Algérienne N° 44 du 26/07/2009, ordonnance n° 09-02 du 29 Rajab 1430 correspondant au 22 juillet 2009 modifiant et complétant la loi n° 05-12 du 28 Jourada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau.

Journal Officiel de la République Algérienne N° 11 du 10/02/2010, décret exécutif n° 10-73 du 21 Safer 1431 correspondant au 06 février 2010 relatif à la protection quantitative des nappes aquifères.

Journal Officiel de la République Algérienne N°25 du 29 Avril 2012, Décret exécutif n° 12-187 du 25 Avril 2012, relatif à l'exploitation et à la protection des eaux minérales naturelles et des eaux de source.

Journal Officiel de la République Algérienne N° 43 du 28 Août 2013, Décret exécutif n° 13-298 du 18 Août 2013, relatif à l'exploitation et à la protection des eaux minérales naturelles et des eaux de source.

Journal Officiel de la République Algérienne N° 42 du 05 Août 2015, Décret exécutif n° 15-207 du 27 Juillet 2015, relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.

Ketelaere D.D., Hötzl H., Neukum C., Civity M., et Sappa G, (COST 620). 2003, Hazard Mapping, COST action 620 Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (Karst) aquifers, Final report, Université Neuchâtel.

Lorienne T. 2014, Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier, Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel.

Lallemand-Barrès A. Roux J C. 1999, Périmètre de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine, 2^{ème} édition, BRGM, France.

Marchal J P. 2007, Eau destinées à la consommation humaine, Guide pour la protection des captages publics, Département du Gard et de l'Hérault, Rapport BRGM/RP- 55699- FR.

Muet F et Vier E. 2011, Stratégies de protection des ressources karstiques utilisées pour l'eau potable, Guide pratique. Agence de l'eau Rhone Méditerranée et Corse.

Medjdoub T. 2014, Etude, Conception et dimensionnement d'une STEP par filtre plantés de roseaux des eaux usées des zones éparses de la commune de Terny, Université Tlemcen.

Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEPF). 1998, Cartographie de la vulnérabilité en région karstiques (EPIK), Application aux zones de protection des eaux souterraines, Guide pratique, Berne.

Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEPF). 2004, Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. L'environnement pratique, Guide pratique, Berne.

Pranville J., Plagnes V., Rejiba F., Tremoulet J. 2007, Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la partie sud du Causse de Gramat, Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts).

TAAMIR, 2013, Bureau d'études d'architecture et d'urbanisme, plan directeur d'aménagement et d'urbanisme de la commune de Terny, 2^{ème} phase, DUC de la wilaya de Tlemcen.

Vernoux J F, Wuilleumier A. Dörfliger N. 2007, Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses - Guide méthodologique, BRGM/RP-55874-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 de Doctorat, Université de Pierre et Marie Curie.

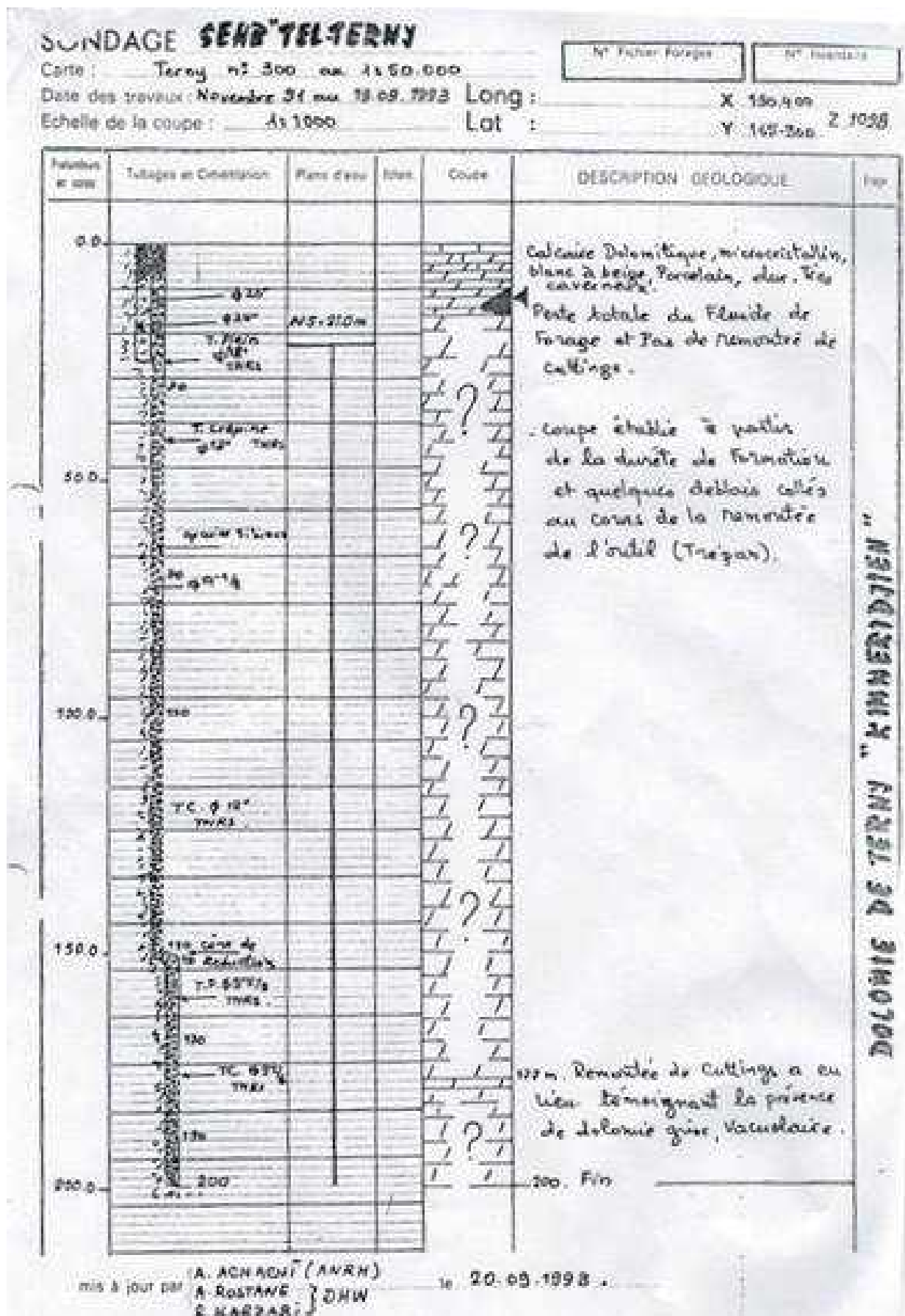
Zeghid K. 2013, Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des eaux souterraines karstique, Cas du bassin versant du Mefrouche, Mémoire de Magister, Université Tlemcen

Site Web:

[1] http://www.geowiki.fr/index.php?title=Relief_karstique

[2] <http://captages.onema.fr/enjeu/la-protection-des-captages/lair-dalimentation-de-captage>

Annexe 01



Annexe 02

No.	Hazards	Weighting Value	Map Symbols		
			Marker	Line	Shade
1	Infrastructural development				
1.1	Waste Water				
1.1.1	urbanisation (leaking sewer pipes and sewer systems)	35			1
1.1.2	urbanisation without sewer systems	70			1
1.1.3	detached houses without sewer systems	45	1		
1.1.4	septic tank, cesspool, latrine	45	2		
1.1.5	sewer farm and waste water irrigation system	55	3		9
1.1.6	discharge from an inferior treatment plant	35	4		
1.1.7	surface impoundment for urban waste water	80	5		9
1.1.8	runoff from paved surfaces	25	6	1	
1.1.9	waste water discharge into surface water courses	45	7		
1.1.10	waste water injection well	85	8		
1.2	Municipal Waste				
1.2.1	garbage dump, rubbish bin, litter bin	40	9		8
1.2.2	waste loading station and scrap yard	40	10		8
1.2.3	sanitary landfill	50	11		8
1.2.4	soils and building rubble deposition	35	12		8
1.2.5	sludge from treatment plants	35	13		
1.3	Fuels				
1.3.1	storage tank, above ground	50	14		
1.3.2	storage tank, underground	55	15		
1.3.3	drum stock pile	50	16		
1.3.4	tank yard	60	17		11
1.3.5	fuel loading station	80	18		
1.3.6	gasoline station	80	19		
1.3.7	fuel storage cavern	85	20		
1.4	Transport and traffic				
1.4.1	road, unsecured	40		2	
1.4.2	road tunnel, unsecured	40	21		
1.4.3	road hauler depot	35	22		11
1.4.4	car parking area	35	23		11
1.4.5	railway line	30		3	
1.4.6	railway tunnel, unsecured	30	24		
1.4.7	railway station	35	25		
1.4.8	marshalling yard	40	26		
1.4.9	runway	35	27	2	
1.4.10	pipeline of hazardous liquids	80		4	
1.5	Recreational facilities				
1.5.1	tourist urbanisation	30	28		2
1.5.2	camp ground	30	29		2
1.5.3	open sport stadium	25	30		3
1.5.4	golf course	35	31		3
1.5.5	skiing course	25	32		3
1.6	Diverse hazards				
1.6.1	graveyard	25	33		10
1.6.2	animal burial	35	34		10
1.6.3	dry cleaning premises	35	35		
1.6.4	transformer station	30	36		
1.6.5	military installations and dereliction	35	37		13
2	Industrial activities				
2.1	Mining (in operation and abandoned)				
2.1.1	mine, salt	80	38		7
2.1.2	mine, other non-metallic	70	39		7
2.1.3	mine, ore	70	40		7
2.1.4	mine, coal	70	41		7
2.1.5	mine, uranium	80	42		7
2.1.6	outdoor stock piles of hazardous raw material	85	43		6
2.1.7	ore milling and enrichment facilities	70	44		
2.1.8	mine waste heap and dirt refuse	70	45		6
2.1.9	ore tailings	70	46		6
2.1.10	mine drainage	85	47	5	
2.1.11	tailing pond	85	48		6
2.2	Excavation sites				
2.2.1	Excavation and embankment for development	10	49		
2.2.2	gravel and sand pit	30	50		12
2.2.3	quarry	25	51		12

Annexe 03

No.	Hazards	Weighting Value	Map Symbols		
			Marker symbol-Number	Line symbol-Number	Shade symbol-Number
2.3	Oil and gas exploitation				
2.3.1	production wells	40	52		
2.3.2	re-injection wells	70	53		
2.3.3	loading station	55	54		
2.3.4	oil pipeline	55		4	
2.4	Industrial plants (none mining)				
2.4.1	smelter	40	55		4
2.4.2	iron and steel works	40	56		4
2.4.3	metal processing and finishing industry	50	57		4
2.4.4	electroplating works	55	58		4
2.4.5	oil refinery	85	59		4
2.4.6	chemical factory	65	60		4
2.4.7	rubber and tyre industry	40	61		4
2.4.8	paper and pulp manufacture	40	62		4
2.4.9	leather tannery	70	63		4
2.4.10	food industry	45	64		4
2.5	Power plants				
2.5.1	gasworks	60	65		4
2.5.2	caloric power plants	50	66		4
2.5.3	nuclear power plant	65	67		4
2.6	Industrial storage				
2.6.1	stock piles of raw materials and chemicals	60	68		
2.6.2	containers for hazardous substances	70	69		
2.6.3	cinder tip and slag heaps	70	70		5
2.6.4	non hazardous waste site	45	71		5
2.6.5	hazardous waste site	90	72		5
2.6.6	nuclear waste site	100	73		5
2.7	Diverting and treatment of waste water				
2.7.1	waste water pipelines	65		5	
2.7.2	surface impoundment for industrial waste water	65	74		9
2.7.3	discharge of treatment plants	40	75		
2.7.4	waste water injection well	85	76		
3	Livestock and Agriculture				
3.1	Livestock				
3.1.1	animal barn (shed, cote, sty)	30	77		
3.1.2	feedlot	30	78		
3.1.3	factory farm	30	79		
3.1.4	manure heap	45	80		
3.1.5	slurry storage tank or pool	45	81		
3.1.6	area of intensive pasturing	25			14
3.2	Agriculture				
3.2.1	open silage (field)	25	82		
3.2.2	closed silage	20	83		
3.2.3	stockpiles of fertilisers and pesticides	40	84		
3.2.4	intensive agriculture area (with high demand of fertilisers and pesticides)	30	85		14
3.2.5	allotment garden	15	86		14
3.2.6	greenhouse	20	87		14
3.2.7	waste water irrigation	60	88		14

