

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD – TLEMCEM**

N° d'ordre : /DSTU/2018



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

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

LABORATOIRE DE RECHERCHE N°25 : « PROMOTION DES RESSOURCES
HYDRIQUES, PEDOLOGIQUES ET MINIERES : LEGISLATION ET CHOIX
TECHNOLOGIQUE »

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du grade

De Master Académique

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Option : Hydrogéologie

Par

Adamou Hassan Sidikou
Taïbou Issoufou Amadou

Intitulé

**Essai de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines
dans le bassin versant d'oued Saf Saf (NO Algérie)**

Soutenu publiquement, le 07 / 07 / 2019, devant le jury composé de :

BENCHOUK M.	MAA	Université de Tlemcen	Président
KEZRABI YOUSFI S.	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
KERZABI R.	MAA	Université de Tlemcen	Co-Encadreur
BOUDJEMA A.	MCB	Université de Tlemcen	Examineur

Année universitaire 2018-2019

DEDICACES

Nous remercions en priorité nos familles, pour leur patience, leur encouragement, soutien et leur aide.

*Une pensée à tous nos camarades d'Hydrogéologie
Et tous nos amis de Tlemcen.*

A Toutes les personnes que nous aimons.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions DIEU le tout Puissant de nous avoir donnés la santé, la foi, le courage, la force et la patience de réaliser ce travail.

*Nous tenons chaleureusement, au fond du cœur à remercier, Monsieur et Madame **Kerzabi**, pour leur encadrement, leur patience, leurs précieux conseils.*

*Nous remercions fortement **Nebia Riad**, pour son soutien.*

*Nous remercions fortement aussi Monsieur **Bensoufia**, pour son soutien technique.*

*Nos vifs remerciements à Monsieur **Kazi Tani**, de sa patience, de nous guider, et de nous avoir fait partager ses connaissances.*

*Nous remercions particulièrement Monsieur **Benchouk**, d'avoir présidé le jury.*

*Nos remerciements adressés à Monsieur **BOUDJEMA**, de ces compétences pédagogiques et d'examineur.*

Résumé :

Les cartes de vulnérabilité sont de plus en plus utilisées afin d'établir un périmètre de protection autour des zones identifiées comme étant des zones à fort potentiel de pollution des ressources hydriques souterraines en fonction des caractéristiques hydrogéologiques. Dans cette étude nous avons appliqué la méthode COP, qui est une méthode de calcul de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères des régions karstiques, aux aquifères du bassin versant de l'oued Saf Saf situé à l'Est de la ville de Tlemcen ; où près de la moitié de la surface du bassin versant est occupé par des roches carbonatées très souvent fortement karstifiées. La méthode utilise les propriétés des couches (non saturée) sus-jacentes à la nappe d'eau (facteur O), la concentration de flux (facteur C) au niveau des aquifères et le régime de précipitation (facteur P) dans le bassin versant. La méthode COP considère les formes de relief karstiques comme des facteurs diminuant la protection naturelle fournie par les couches sus-jacentes d'un aquifère karstique. A l'aide de l'outil du Système d'Information Géographique (SIG), des cartes de vulnérabilité ont été établies, soulignant les différents degrés de vulnérabilité intrinsèque. Ainsi dans notre zone d'étude seulement 7.78 % de la surface totale présente une vulnérabilité comprise entre « grande » et « très grande » tandis que 41,30 % présente une vulnérabilité « modérée ». Ces pourcentages montrent que les activités anthropogènes peuvent (pas forcément de manière significative) altérer la qualité des eaux souterraines dans ces zones.

Mots clés: Vulnérabilité intrinsèque – Pollution – Eaux souterraines – Méthode COP – Oued Saf Saf – Protection – Monts de Tlemcen.

ABSTRACT

Abstract:

Vulnerability maps are increasingly used to establish a protection perimeter around areas identified as areas with high potential for pollution of underground water resources according to the hydrogeological characteristics. In this study, we applied the COP method, which is a method for calculating the intrinsic vulnerability of aquifers in karst regions, to aquifers in the Oued Saf watershed located East of the city of Tlemcen; where almost half of the surface of the watershed is occupied by carbonate rocks very often strongly karstified. The method uses the properties of the (unsaturated) layers overlying the water table (factor O), the flux concentration (C factor) at the aquifer level and the precipitation regime (P factor) in the catchment area. . The COP method considers karst landforms as factors that diminish the natural protection provided by the overlying layers of a karstic aquifer. Using the Geographic Information System (GIS) tool, vulnerability maps have been established, highlighting the different degrees of intrinsic vulnerability. Thus, in our study area only 7.78% of the total area has a vulnerability between "Hight" and "very Hight" while 41.30% presents a "moderate" vulnerability. These percentages show that anthropogenic activities can (not necessarily significantly) alter the quality of groundwater in these areas.

Keys words: Intrinsic vulnerability – Pollution – Groundwater – COP method – Oued Saf Saf – Protection – Tlemcen Mountains.

ملخص

يتم استخدام خرائط الضعف بشكل متزايد لإنشاء محيط حماية حول المناطق التي تم تحديدها كمناطق ذات إمكانية عالية لتلوث موارد المياه الجوفية. وذلك اعتمادًا على الخصائص الهيدروجيولوجية. في هذه الدراسة، طبقنا طريقة (COP)

وهي طريقة لحساب القابلية للتأثر الجوهري لطبقات المياه الجوفية في المناطق الكارستية، على طبقات المياه الجوفية لمستجمع مياه واد صاف صاف الواقع غرب مدينة تلمسان؛ حيث صخور الكربونات تحتل ما يقرب نصف سطح مستجمع.

تستخدم هذه الطريقة خواص الطبقات (غير المشبعة) التي تغطي الطبقات المياه الجوفية، وتركيز التدفق على مستوى طبقة المياه الجوفية ونظام هطول الأمطار في منطقة مستجمعات المياه. تعتبر هذه الطريقة التضاريس الكارستية عوامل مقللة للحماية الطبيعية التي توفرها الطبقات المغطاة لطبقة المياه الجوفية. باستخدام أداة نظام المعلومات الجغرافية، تم إنشاء خرائط الضعف، مع تسليط الضوء على مختلف درجات الضعف الداخلية. وبالتالي في منطقة دراستنا، هناك 7.78% فقط من المساحة الكلية تتميز بعرضة بين "كبيرة" و "كبيرة جدًا" للتلوث. بينما يمثل 41.30% عرضة "معتدلة". تُظهر هذه النسب المئوية أن الأنشطة البشرية يمكن (وليس بالضرورة بشكل كبير) تغيير نوعية المياه الجوفية في هذه المناطق.

المفتاحية الكلمات :

الضعف الأساسي - التلوث - المياه الجوفية - COP - المستجمع مياه واد صاف صاف - الحماية - جبال تلمسان

TABLE DES MATIERES

DEDICACES.....	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME :.....	III
ABSTRACT:	IV
ملخص.....	V
LISTE DES TABLEAUX :	VI
LISTES DES FIGURES :	VII

INTRODUCTION:.....	1
--------------------	---

PARTIE I

Chapitre I. Pollution des eaux souterraines

I-1 Origines de pollutions et types de polluants des eaux souterraines	3
I-1-1 Origines de pollutions :	3
I-1-1-1 Origines ponctuelles :.....	3
I-1-1-2 Origines diffuses :	4
I-1-2 Types de polluants :.....	4
I-1-2-1 Nitrate :.....	4
I-1-2-2 Pesticides :.....	5
I-2 Comportements du polluant dans son environnement :.....	6
I-2-1 Mécanisme de transfert vers la zone saturée :.....	7
I-2-2 Phénomènes d'atténuation d'un polluant	7
I-2-2-1 Phénomènes physiques :	7
I-2-2-2 Processus biochimiques :	8

Chapitre II. Concept de vulnérabilité des eaux souterraines

II-1 Définition du concept de vulnérabilité :	9
II-1-1 Vulnérabilité intrinsèque :.....	10
II-1-2 Vulnérabilité spécifique :	10
II-2 Milieu karstique et vulnérabilité.....	11
II-3 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :	12
II-3-1 Différentes catégories de méthodes :	12
II-3-1-1 Méthodes cartographiques :	12
II-3-1-2 Méthodes des systèmes paramétriques :	12
II-3-1-3 Méthodes analytiques et modélisation numérique :.....	13

TABLE DES MATIERES

II-3-2 Description et comparaison des méthodes :	13
II-3-2-1 Méthode DRASTIC :	13
II-3-2-2 Méthode de SINTACS :	14
II-3-2-3 Méthode GOD :	15
II-3-2-4 Méthode AVI :	16
II-3-2-5 Méthode COP :	17
II-3-2-6 Méthode PI :	18
II-3-2-7 Méthode LEA :	18
II-3-2-8 Méthode EPIK :	19
II-4 Choix d'une méthode :	21

PARTIE II

Chapitre I. Présentation générale de la zone d'études

I-1 Situation géographique	23
I-2 Paramètres physiques du bassin versant	25
I-2-1 Indice de compacité de Gravelius (K_G)	26
I-2-2 Rectangle équivalent	26
I-2-3 Courbe hypsométrique.....	27
I-2-4 Indice de pente global (I_G).....	28
I-2-5 Dénivelé spécifique (DS).....	29
I-3 Réseau hydrographique.....	30
I-3-1 Classification de Strahler.....	30
I-3-2 Profil en long	31
I-4 Synthèse climatique	33
I-5 Contexte Géologique et Structural des Monts de Tlemcen	35
I-5-1 Aperçu géologique.....	35
I-5-1-1 Jurassique supérieur et Crétacé basal	36
I-5-1-2 Miocène.....	39
I-5-2 Aperçu structural	41
I-6 Contexte hydrogéologique des Monts de Tlemcen.....	43
I-7 Contexte Géologique, Structural et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Saf Saf :	44
I-7-1 Géologie et Hydrogéologie du bassin versant de l'oued Saf Saf :	44
I-7-2 Structurale du bassin versant	52

TABLE DES MATIERES

Chapitre II. Cartographie de la vulnérabilité

II-1 Description de la Méthode COP :.....	55
II-2 Résultats et discussions	60
II-2-1 Facteur C	61
II-2-2 Facteur O	66
II-2-3 Facteur P.....	70
II-2-4 Indice de vulnérabilité COP	74

CONCLUSION :

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

ANNEXES :

LISTE DES TABLEAUX

Liste des Tableaux :

Partie I

Tableau 1 : Critères de vulnérabilité intrinsèque (Mardhel et al, 2005).....	10
Tableau 2: Systèmes de pondération "Normal" et "Pesticides" de la méthode DRASTIC (Dörfliger, et al, 2004).....	14
Tableau 3 : Critères d'évaluation des de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC selon Engel et al. (1996) (in Daboussi, 2009).....	14
Tableau 4 : Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode (Civita, 1994 in Hamza in Daboussi, 2009).....	15
Tableau 5: Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS (Civita, 1994, in Hamza, 2007 in Daboussi, 2009).....	15
Tableau 6: Indices de vulnérabilité utilisé par la méthode GOD (Murat, 2000).....	16
Tableau 7 : Relation entre Indice de Vulnérabilité de l'Aquifère (AVI) et résistance Hydraulique (Murat, 2000).	17
Tableau 8 : Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST620 in Dörfliger et al, 2004).	18
Tableau 9: Couverture protectrice liée à la vulnérabilité et classe de temps de transit estimatif (COST 620, in Dörfliger et al, 2004).....	18
Tableau 10 : Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et paramètres pris en compte.....	20

Partie II

Tableau 11: Répartition hypsométrique du bassin versant de l'oued Saf Saf.....	27
Tableau 12: Classification du relief selon I_G par l'ORSTOM (in Bouanani, 2004).....	28
Tableau 13. Classification du relief selon D_s (en mètre) (Bouanani, 2004).....	29
Tableau 14. Principaux paramètres du bassin versant de l'oued Saf Saf.....	29
Tableau 15. Formations traversées par l'ensemble des forages dans la région d'étude avec leurs épaisseurs (en mètre).....	51
Tableau 16: Valeurs attribuées aux facteurs de la méthode COP et des variables dans la zone d'étude	60
Tableau 17. Récapitulatif des données du Facteur P.....	72

LISTE DES FIGURES

Listes des figures :

Partie I

Figure 1 : Sources ponctuelles et panaches de contamination engendrés (Banton et Bangoy, 1999).....	3
Figure 2: Transfert de composé xénobiotiques, constituant une source diffuse (Banton et Bangoy, 1999).	4
Figure 3: Formes et trajets de l'azote à l'intérieur du système de production agricole (Mckague et al, 2005).	5
Figure 4: Comportement du polluant dans son environnement (Beauchamp, 2002)	6
Figure 5: Paysage et morphologie karstiques (Bakalowicz, 1999 in Fournier, 2006)	11

Partie II

Figure 6 : Carte des aléas dans la région d'études.....	22
Figure 7 : Carte topographique de Tlemcen (Echelle : 1/50000)	24
Figure 8: Situation géographique du bassin versant de l'oued Saf Saf	25
Figure 9. Rectangle équivalent	27
Figure 10: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Saf Saf.....	28
Figure 11. Classification de Strahler du réseau hydrographique du bassin versant d'oued Saf Saf.....	31
Figure 12. Profil en long du cours d'eau principal de l'oued Saf Saf	32
Figure 13. Variations des précipitations moyennes annuelles dans les trois stations (2006-15).....	33
Figure 14. Variations des précipitations moyennes mensuelles interannuelles dans les trois stations (2006-15).....	34
Figure 15. Extrait de carte géologique de l'Algérie au 1/500 000	36
Figure 16 : Log lithostratigraphique de la région de Tlemcen selon (Collignon ,1986) (modifiée)	40
Figure 17 : Schéma structural simplifié des monts de Tlemcen (Elmi, 1970)	41
Figure 18 Colonne hydrogéologique du bassin versant d'oued Saf Saf (Collignon, 1986 ; Bensaoula, 2007)	43
Figure 19. Coupe transversale des Monts de Tlemcen, illustrant les principaux types d'aquifères de la région (Collignon, 1986 ; Achachi, 1996 in Bensaoula 2007).....	44
Figure 20. Carte géologique du bassin versant de l'oued Saf Saf (d'après Doumergue, 1924) et position des forages.	47

LISTE DES FIGURES

Figure 21. Colonne lithostratigraphique du bassin versant de l'oued Saf Saf,	52
Figure 22 Coupe géologique simplifiée de la région de Tlemcen (Bensaoula, 2007)	53
Figure 23. La carte litho-structurale du bassin versant de l'Oued Saf Saf (d'après Concaret et Clair, 1973).....	54
Figure 24 : Diagramme de la méthode COP, montrant la différenciation entre les différents facteurs C, O et P (Cost620, 2003).....	59
Figure 25. Schéma simplifié des différentes étapes suivies pour aboutir à la carte de vulnérabilité de la méthode COP.....	61
Figure 26. Sous facteur pente et végétation (sv)	63
Figure 27. Sous facteur Caractéristiques de surfaces (sf).....	64
Figure 28. Carte du facteur C	66
Figure 29. Carte du sous facteur OS	68
Figure 30. Carte du sous facteur OL	69
Figure 31. Carte du facteur O	70
Figure 32. Carte du sous facteur (P _Q)	71
Figure 33. Carte du sous facteur	73
Figure 34. Carte du facteur P.....	74
Figure 35. Carte de l'indice de vulnérabilité final COP	75

INTRODUCTION :

L'eau est l'une des ressources les plus précieuses sur terre. Elle est essentielle à la vie et aux moyens de subsistance de l'homme; elle soutient l'agriculture, l'industrie et les écosystèmes. Fragile et inégalement répartie dans le temps et dans l'espace, cette ressource mérite d'être drastiquement protégée.

En excluant, les eaux contenues des calottes polaires, Les eaux souterraines représentent le réservoir le plus important d'eau douce de la planète, constituant plus de 97 % des ressources mondiales d'eau douce disponible (Quevauviller, 2010).

En Algérie, La ressource en eaux souterraines est estimée à 5319,4 Hm³, dont 2623 Hm³ Au Nord, dans un ensemble de 177 aquifères et 2696,4 Hm³ au sud du pays, contenues principalement dans les aquifères du continentale terminale et intercalaire (Kherbache, 2014).

Les eaux souterraines, de la région de Tlemcen jouent un rôle essentiel au développement socio-économique de la population. Elles sont indispensables, pour l'alimentation en eau potable d'une grande partie de la population de la wilaya et de celles des wilayas voisines notamment Ain-Temouchent et Oran, en plus des eaux de barrage et des eaux de dessalement. Les réserves en eaux souterraines sont stockées dans les formations karstiques des Monts de Tlemcen estimée à 30 Hm³ avec une recharge de 27 Hm³/an représentant le principal massif entre la Méditerranée et les hautes plaines Oranaises. A part l'alimentation en eau potable, ces eaux souterraines sont mobilisées pour des activités agricoles et industrielles. À travers des forages, allant de 130 à 400 m (Bensaoula et al, 2007).

Selon la FAO, l'agriculture est l'activité qui consomme le plus d'eau dans le monde, soit 70 % d'eau prélevée, l'industrie 19 % et 11 % pour l'usage domestique. En Algérie l'irrigation occupe une place importante dans la consommation d'eau (62 % de la demande totale du pays). La demande en eau potable, représente quant à elle 35 % de la demande totale. Le secteur industriel ne s'élève qu'à 3 % (Mozas et Ghosn, 2013). A cause de l'utilisation intensive de pesticides et d'engrais dans l'agriculture, près de 70 % des eaux sont polluées à l'échelle mondiale, nuisant à la santé humaine. À Gaza, l'eau pompée de la nappe phréatique polluée, représentant 97 % de l'eau de robinet, a été responsable d'une centaine de morts à

Introduction

cause de la concentration élevée de nitrates (Kherbache, 2014). En effet, le polluant le plus omniprésent dans l'eau souterraine au niveau mondial est le nitrate (Éric, 2017).

La pollution des eaux souterraines est aussi favorisée par les caractéristiques physiques, géologiques et hydrogéologiques du terrain. Notre zone d'étude, le bassin versant de l'oued Saf Saf, est constituée de formations carbonatées très fissurées et karstique, réputés d'être sensible face à la pénétration de polluants. Dans ces conditions suite aux activités agricoles importantes et lors de fortes précipitations ou de gel, la lixiviation des engrais (p. ex. nitrate) et de produits phytosanitaires (p. ex. herbicides, épandage de purin) ainsi que les rejets des eaux usées domestiques et industriels (soit directement dans la nature, soit par pertes de collecteurs d'eaux usées, de fosses à purin et de réservoirs non étanches (bactéries et polluants), à proximité de gouffres ou de dolines ; et infiltration dans le sous-sol des eaux de lixiviation de sites contaminés (décharge publique non homologuée et décharge des déchets d'animaux d'élevage dans les fermes, expose fortement les aquifères de cette zone à la pollution. L'établissement d'un outil de gestion de l'environnement tel que la carte de vulnérabilité est un moyen efficace pour préserver la qualité de cette ressource. En établissant des périmètres de protections, afin de règlementer les activités humaines.

Pour élaborer une carte de vulnérabilité, ils existent plusieurs méthodes, des plus complexes au plus simples, des moins coûteux au plus coûteux. L'objectif de ce mémoire, est d'établir une carte de vulnérabilité du bassin versant de l'oued Saf Saf à partir de la méthode COP. Pour répondre à cette problématique, le travail a été divisé en deux parties, contenant chacune deux chapitres ;

La première partie est constituée, d'une généralité sur la pollution et vulnérabilité des eaux souterraines.

La seconde, présente d'une manière générale la zone d'études, ensuite une présentation de la méthode COP et enfin les résultats et discussions.

PARTIE I

CHAPITRE I. POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES

La contamination et la pollution des eaux souterraines sont liées à la présence d'un altéragène dans le milieu, provoquant une altération de la qualité de l'eau souterraine. La contamination ne devient pollution que lorsque cette altération présente des effets de nuisance ou de gêne envers l'utilisateur, et a fortiori un risque pour sa santé, et compromet ainsi l'utilisation de cette eau (Simard et al, 1977 in Duchaine, 1998).

I-1 Origines de pollutions et types de polluants des eaux souterraines

I-1-1 Origines de pollutions :

En fonction de la durée de propagation et de l'échelle, la pollution est soit d'origine diffuse ou ponctuelle.

I-1-1-1 Origines ponctuelles :

Il s'agit d'introduction rapide et involontaire d'un polluant à travers une échelle restreinte. Dont la quantité de polluant pénétré peut être importante. Par exemple : d'un déversement accidentel de produit chimique, fuite d'un réservoir de stockage de déchets ou de retenue d'eaux usées ou encore de fosse septique. Lors de la fuite ou du déversement du polluant, celui-ci s'infiltre et forme un panache de contamination dans la zone non saturée, qui peut lentement se propager jusqu'à atteindre la zone saturée (Figure 1), (Banton et Bangoy, 1999).

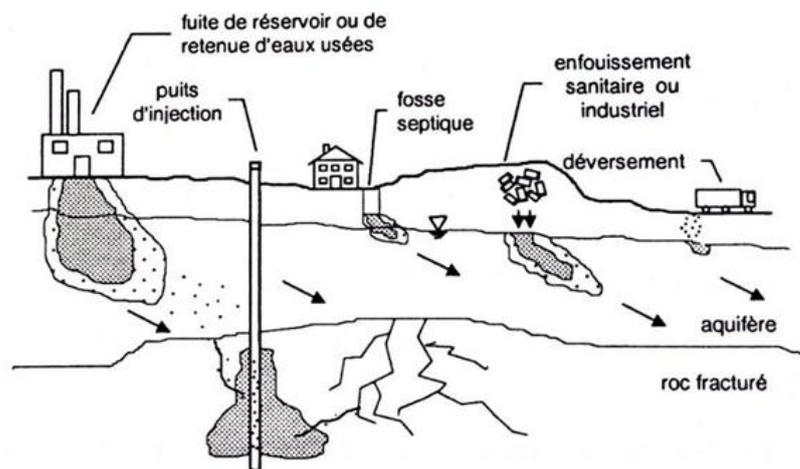


Figure 1 : Sources ponctuelles et panaches de contamination engendrés (Banton et Bangoy, 1999)

I-1-1-2 Origines diffuses :

Les sources diffuses sont généralement ceux provenant d'activités agricoles, utilisant des composés xénobiotique, pouvant s'étendre à des échelles plus importantes. L'ampleur de la pollution dépend de la fréquence d'application du composé. En effet, la découverte de la pollution, n'est possible qu'après de longs périodes de temps. Exemple : irrigation prolongée causant la salinisation du profil de sol, utilisation de pesticides ou fertilisants inorganique (engrais chimiques) ou organique (fumiers, lisiers, purins etc...), étalement de résidus huileux. Les composés s'introduits à partir du sol, travers la zone non saturée pour atteindre la zone saturé (Banton et Bangoy, 1999) (Figure 2).

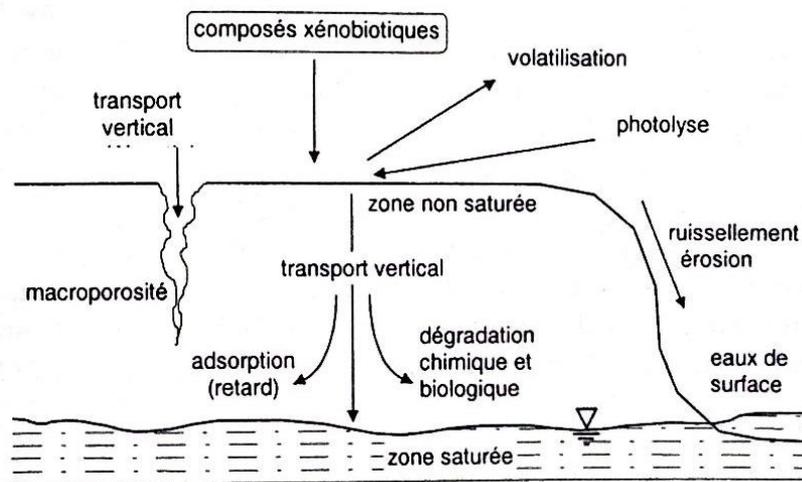


Figure 2: Transfert de composé xénobiotiques, constituant une source diffuse (Banton et Bangoy, 1999).

I-1-2 Types de polluants :

Les polluants des eaux souterraines proviennent de plus souvent des activités anthropiques, d'origine domestique, urbaine, industrielle et agricole. L'incursion d'eau de mer dans les aquifères, au niveau des zones côtière, représente aussi une source de modification aggravante de la composition de l'eau, pouvant empêcher son exploitation.

Les polluants de type diffusent sont les plus courants. Particulièrement, les nitrates, et pesticides (insecticides, herbicides, etc.), qui proviennent le plus souvent d'activités agricoles.

I-1-2-1 Nitrate :

Les nitrates (NO_3^-) qui se sont formés à partir de la minéralisation de l'azote organique et de l'oxydation de l'azote inorganique (ammonium NH_4^+), réagissent très faiblement avec le sol.

Ces nitrates possèdent de fort potentiel de lixiviation, et peut migrer avec l'eau des pluies jusqu'aux point de captage. Le taux de concentration de nitrate dans l'eau de consommation peut agir sur l'hémoglobine du sang pour causer des maladies. Cependant, la dénitrification biologique en condition anaérobie peut atténuer, la quantité de nitrates, mais conduit à la production de gaz à effet de serre N_2O et de N_2 azote moléculaire. Toutefois, à long terme ces gaz peuvent être libérés vers l'atmosphère (Banton et Bangoy, 1999) (Figure 3). Les nitrates des eaux souterraines ne sont pas toujours d'origines agricoles, elles peuvent provenir aussi des boues résiduaire industrielles.

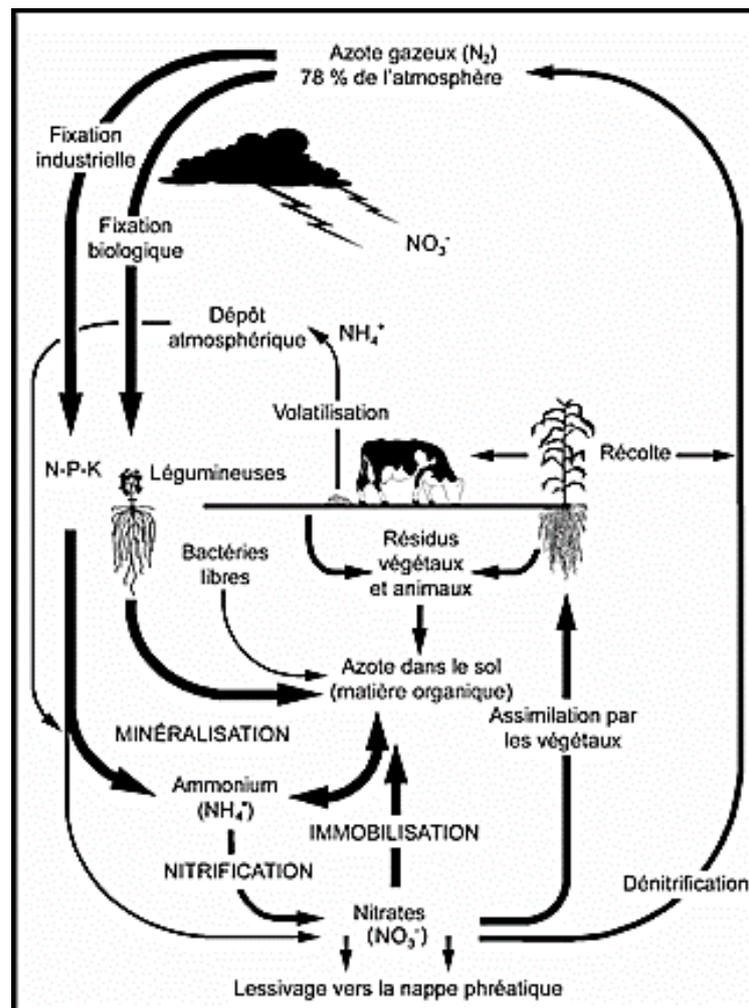


Figure 3: Formes et trajets de l'azote à l'intérieur du système de production agricole (Mckague et al, 2005).

I-1-2-2 Pesticides :

La vitesse de pénétration des pesticides dépend de leurs conformités avec la matière organique, ou des minéraux argileux. La contamination de l'eau souterraine par les pesticides serait souvent associée à la lixiviation rapide de l'eau comparativement au temps de dégradation des pesticides. La faible profondeur de la nappe par rapport à la surface du sol

est un paramètre souvent indiqué comme un facteur qui augmente la vulnérabilité des aquifères vis-à-vis des pesticides. Des conditions propices pour le transport rapide vers un aquifère se produisent soit lors des précipitations intenses, lorsque les sols sont fortement drainants ou encore lorsque le contaminant suit des chemins préférentiels d'écoulement via les macros pores (Mehnert et al, 2005 ; Andrade et Stigter, 2009 in Meyzonnat, 2012).

I-2 Comportements du polluant dans son environnement :

Les comportements d'un polluant dépendent des propriétés du polluant, des caractéristiques du milieu traversé et des interactions entre polluant et milieu, ainsi que les conditions locales à la région, telle que la pluviométrie (Lemière et al, 2001).

Lors du transfert de polluants vers l'eau souterraine, l'interaction des polluants avec le milieu, peut entraîner l'atténuation du polluant par rapport au transfert de l'eau dans le milieu. Cette atténuation dépend des caractéristiques du polluant et celle du milieu.

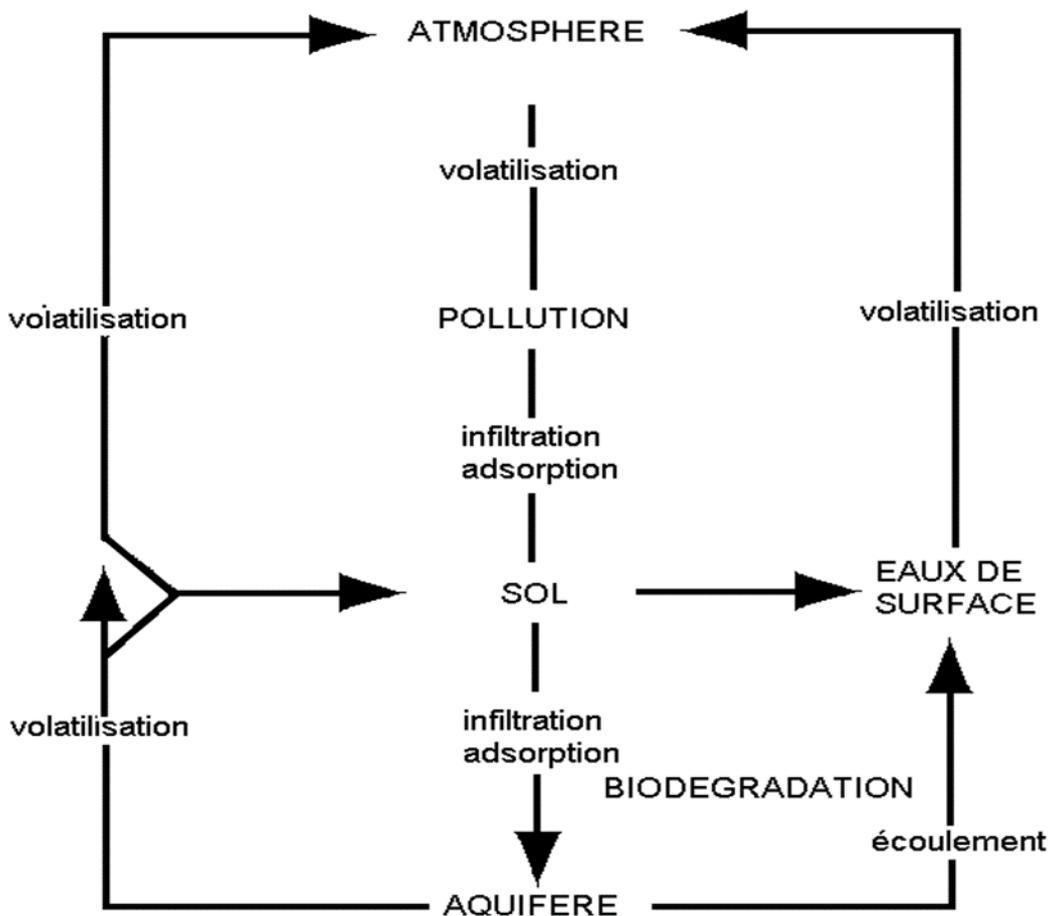


Figure 4: Comportement du polluant dans son environnement (Beauchamp, 2002)

I-2-1 Mécanisme de transfert vers la zone saturée :

L'eau s'infiltré par gravité, grâce à la perméabilité du sol et/ou à partir des pentes d'écoulement préférentiel. La durée de transfert va dépendre de deux paramètres principaux: l'humidité et les caractéristiques du sol (homogénéité, composition, perméabilité). La durée de transfert augmente avec l'humidité du sol.

Dans une nappe libre les polluants atteignent plus facilement la zone saturée. La zone non saturée conditionne en grande partie le transfert vers la nappe. Suivant que la roche est perméable d'interstices ou de fissures, les circulations seront plus ou moins rapides. Dans la zone saturée, les transferts sont essentiellement latéraux (composante horizontale), selon la direction d'écoulement dans la nappe. Au niveau d'une nappe captive les polluants auront du mal à rejoindre la zone saturée, sauf en cas d'introduction de polluant à travers un forage (Boudjelthia, 2000).

La durée est relativement plus long dans la craie et les sols granitiques du socle , de l'ordre de 1 an a 1000 ans moins long dans les plaines alluviales , de l'ordre de 1 mois a 5 ans et rapide dans les sols karstiques de l'ordre de 1 jour a 1 an (Miquel, 2003).

I-2-2 Phénomènes d'atténuation d'un polluant

I-2-2-1 Phénomènes physiques :

1-Volatilisation :

Il s'agit du passage d'une substance, donc d'un polluant de la surface de la Terre vers l'atmosphère, ou de l'aquifère vers l'extérieure.

2-Adsorption :

C'est le potentiel à s'adsorber du sol d'un composé, résultant des actions physico-chimiques fluide/roche. Elle dépend de la surface spécifique des grains ou des fissures. Les particules polluantes de charge électrique, on tendance à se réunir avec des argiles ou minéraux, par contre ceux pas chargés, s'associeront plus facilement avec la matière organique. Les polluants peuvent s'adsorbés, par les interactions ioniques, polaires, hydrophobes ou hydrophiles. L'adsorption dépend aussi des caractères géologiques du sol tels que la porosité, la perméabilité etc... (Beauchamp, 2002).

3-Photo-décomposition :

Certains, polluant peuvent se dégrader à la surface du sol, suite à un certain nombre de réactions photochimiques qu'ils ont subi, à cause de l'absorption de l'énergie du soleil (Boudjelthia, 2000).

I-2-2-2 Processus biochimiques :**1-Dégradation chimique :**

Le plus souvent, il s'agit de dégradation par hydrolyses, avec l'intervention d'acides ou bases servant de catalyseurs (Boudjelthia, 2000).

2-Dégradations par les micro-organismes :

La biodégradation représente le résultat final d'un ensemble de processus dynamiques qui sont impliqués dans la destruction biologique de composés organiques par les micro-organismes contenus dans le milieu souterrain (Bonazountas, 1987 in Boudjelthia, 2000).

3-Dégradation par les plantes :

Dans un milieu nutritif, riche en polluants les plantes peuvent absorber les polluants à partir de leurs racines. Ensuite, sous l'effet d'influence du métabolisme de la plante hôte, le polluant peut subir des transformations, provoquant ainsi son retardement de transfert vers la zone saturée (Boudjelthia, 2000).

PARTIE I

CHAPITRE II. CONCEPT DE VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

A l'époque, les eaux souterraines étaient considérées pures, à l'abri de toutes pollutions. A cause du phénomène d'autoépuration qui empêche ou retarde le passage de polluants vers l'eau souterraine. Suite à l'augmentation des processus industriels et agricoles, de nombreux cas de pollutions des eaux souterraines ont été observés.

La notion de vulnérabilité des eaux souterraine a pris naissance que vers les années 1960, pour sensibiliser la population au fait que même si la notion d'eau souterraine est associée à une image de pureté, cette ressource n'en reste pas moins sensible aux agents extérieurs et susceptible d'être polluée (Murat, 2000). Les problèmes de contaminations des eaux souterraines n'ont été perçus comme réellement préoccupants qu'après les années 1980. Cette perception de la part du public et des professionnels de l'environnement résulte du nombre croissant de remarque de contamination, mais également du développement de méthodes ou d'outils qui ont amélioré la connaissance de l'origine, de la présence et du devenir de ces contaminations (Banton et Bangoy, 1999).

Ainsi à débiter le développement des méthodes d'évaluations de la vulnérabilité des eaux souterraines. Vladirnirskij vers les années 1960 proposa l'élaboration d'une méthode puis, Margat et Albinet réalisa une carte de vulnérabilité de la France en 1970 (Murat, 2000). Depuis lors il en existe un nombre important de méthodes d'évaluations, élaboré en fonctions des objectifs et des zones d'études.

II-1 Définition du concept de vulnérabilité :

Le concept de vulnérabilité de l'eau souterraine est généralement défini comme étant : « la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol jusqu'à atteindre la zone saturée ». Véhiculé à partir de l'eau des précipitations qui s'infiltre à la surface du sol, le contaminant percole ainsi à travers la zone non saturée jusqu'à atteindre la zone saturée (Rahman, 2008 ; in Meyzonnat, 2012).

Ce concept est catégorisé en deux types : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique.

II-1-1 Vulnérabilité intrinsèque :

Ce type se caractérise par : les propriétés géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination engendré par les activités humaines. Elle ne dépend pas du polluant et ne varie pas dans le temps.

Les critères à tenir en compte dans ce cas sont résumés dans le tableau 1:

Tableau 1 : Critères de vulnérabilité intrinsèque (Mardhel et al, 2005)

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

II-1-2 Vulnérabilité spécifique :

Ici la sensibilité de l'eau souterraine à la contamination, fait intervenir à la fois ; les propriétés hydrogéologiques et géologiques naturels, les propriétés du contaminant et les activités humaines. Elle dépend donc du polluant, variable dans le temps en caractérisant un temps précis (Mardhel et al, 2005).

II-2 Milieu karstique et vulnérabilité

Le milieu karstique est composé d'un ensemble d'éléments de surface: vallée sèche, reculée, poljé, doline, perte, ouvala, lapiaz (exo-karst) et d'éléments souterraines : gouffre, conduit karstique (endo-karst) (Fournier, 2006). La plupart du temps ils sont interconnecter les unes aux autres (Figure 5).

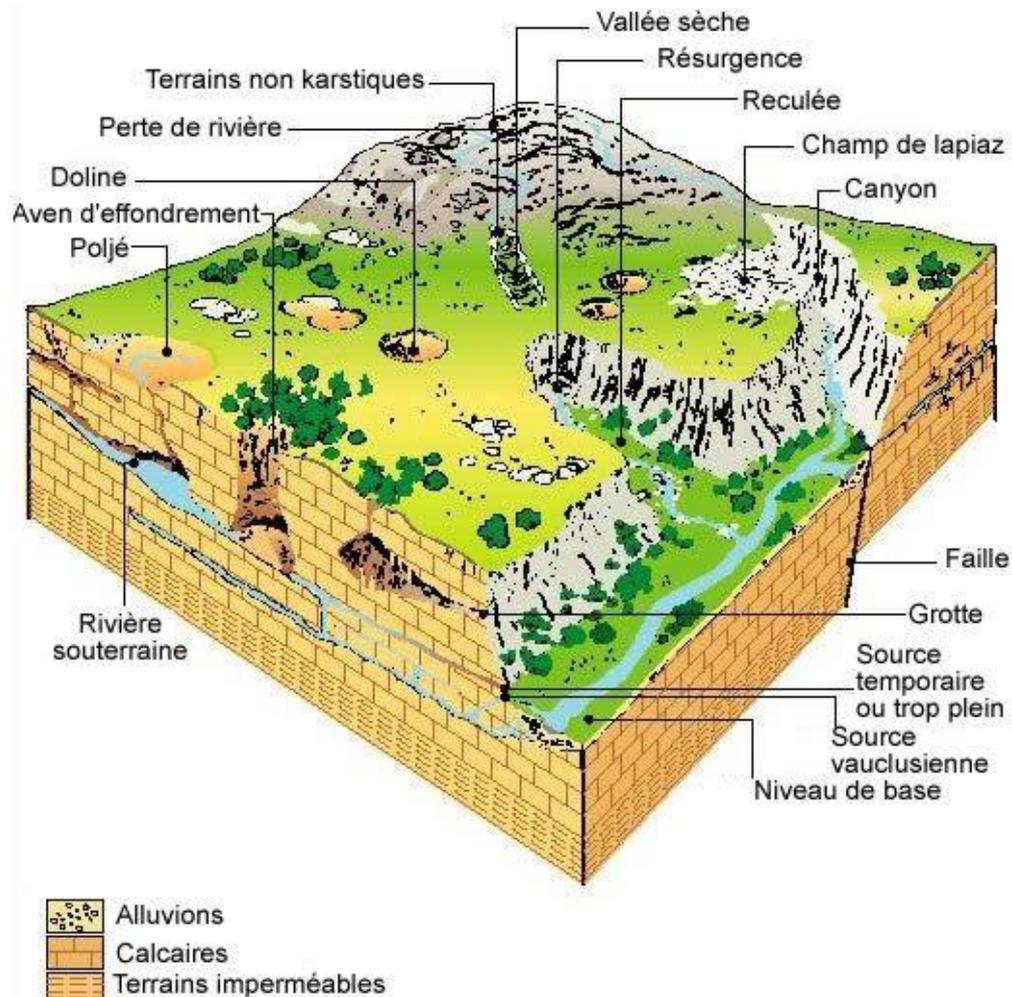


Figure 5: Paysage et morphologie karstiques (Bakalowicz, 1999 in Fournier, 2006)

Les aquifères karstiques sont plus vulnérable, à l'infiltration de contaminant. Ceci peut s'expliquer par le résultat de la structure hautement hétérogène. Ces aquifères sont alimentés, d'une part par des infiltrations concentrées (perte de cours d'eau) et par une recharge diffuse à l'échelle du bassin d'alimentation, et d'autre part, ils possèdent de fortes conductivités hydrauliques au sein de leur système de drainage souterrain (réseau de conduits) et des perméabilités plus faibles au sein de la matrice rocheuse fissurée. Cette double dualité se

traduit par un comportement hydraulique spécifique, à savoir des crues rapides et de hautes intensités liées à des infiltrations rapides à travers des réseaux de conduits aboutissant à la source (exutoire du système). Les processus de filtration et d'autoépuration n'ont ainsi pas le temps de se développer, tels qu'on peut les rencontrer dans les aquifères à porosité (ex. les nappes alluviales) (Dörfliger et Mettetal, 2005).

II-3 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :

II-3-1 Différentes catégories de méthodes :

Le classement des types de méthode d'évaluation de la vulnérabilité se fait selon des critères qui dépendent de chaque auteur. Ici on verra un classement proposé par Vrba et Zaporozec (1994). Classés en méthodes de vulnérabilité intrinsèque et méthodes de vulnérabilité spécifique (Murat, 2000) ;

- Vulnérabilité intrinsèque: méthodes de systèmes cartographiques, systèmes paramétriques, systèmes analytiques.
- Vulnérabilité spécifique: méthodes de systèmes analytiques et modélisation numérique

II-3-1-1 Méthodes cartographiques :

Ces méthodes évaluent la vulnérabilité des eaux souterraines à partir du contexte hydrogéologique présent dans la zone. Ceux-ci étant pris comme représentatifs des conditions de vulnérabilité. Le but est de représenter une variation spatiale de la protection naturelle des aquifères, en se basant sur des facteurs hydrogéologiques. Le nombre de facteur hydrogéologique utilisé, permet d'avoir des classes de sensibilité. Qui varie en général entre deux et cinq, en fonction de la méthode. Elles sont les premières méthodes utilisées pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque (Vrba et Zaporozec, 1994 in Murat, 2000).

II-3-1-2 Méthodes des systèmes paramétriques :

Méthodes utilisant des paramètres, qui caractérisent les propriétés du milieu. L'évaluation se fait à partir de l'introduction d'un système de cotation numérique pour chaque classe de paramètre. Les résultats peuvent se représenté, sous forme de carte ou de liste (Murat, 2000). Exemple : COP, GOD, DRASTIC, EPIK, SINTACS,

II-3-1-3 Méthodes analytiques et modélisation numérique :

Méthode d'évaluation, par simulation du transport et de l'écoulement d'un fluides vers et dans l'eau souterraine à l'aide d'équations mathématiques (ex : EVARISK) (Murat, 2000).

II-3-2 Description et comparaison des méthodes :

Nous verrons ici, quelques méthodes courantes.

II-3-2-1 Méthode DRASTIC :

Elle est l'une des méthodes les plus utilisé dans le monde. Cette méthode a été développée aux Etats-Unis en 1987, par Aller et al, 1987 et par L'EPA (Environmental Protection Agency). Afin de déterminer la vulnérabilité verticale à la pollution des eaux souterraines. L'acronyme DRASTIC, représente les 7 paramètres d'évaluation que constitue la méthode ; D : profondeur à la nappe, R : recharge, A : type d'aquifère, S : type de sol, T : topographie, I : impact de la zone vadose, C : conductivité hydraulique (Dörfliger, et al, 2004).

On quantifie la vulnérabilité de chaque paramètre, en lui attribuant un indice de vulnérabilité allant de 1 à 10. Un facteur de pondération (poids paramétrique) variant entre 1 et 5, est ensuite appliqué aux différents paramètres afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité (Dörfliger, et al, 2004). L'indice de vulnérabilité final de DRASTIC (ID) est la somme pondérée des 7 paramètres :

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

Avec ID : indice de vulnérabilité global

W_j : facteur de pondération du paramètre j

R_j : indice de paramètre j.

Il existe deux versions de la méthode DRASTIC, avec deux systèmes de pondération (tableau 2). Suivant les conditions d'utilisation du sol on distingue ; DRASTIC STANDARD (normal), utilisation normale et DRASTIC PESTICIDES, avec une activité agricole importante (Dörfliger, et al, 2004 ; Daboussi, 2009).

Tableau 2: Systèmes de pondération "Normal" et "Pesticides" de la méthode DRASTIC (Dörfliger, et al, 2004)

Paramètre	Facteur de pondération "normal"	Facteur de pondération "pesticides"
Profondeur jusqu'à la nappe phréatique	5	5
Recharge nette	4	4
Type d'aquifères	3	3
Type de sol	2	5
Topographie)	1	3
Impact de la zone non saturée	5	4
Conductivité hydraulique	3	2

L'indice de vulnérabilité final, est un nombre compris entre 23 et 226 pour la DRASTIC normal. L'indice final de la vulnérabilité DRASTIC, est classé en quatre niveaux de vulnérabilité (tableau 3).

Tableau 3 : Critères d'évaluation des de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC selon Engel et al. (1996) (in Daboussi, 2009)

Degré de Vulnérabilité	Indice de Vulnérabilité
Faible	< 101
Moyen	101-140
Fort	141-200
Très fort	>200

II-3-2-2 Méthode de SINTACS :

Cette méthode a été développée en Italie vers les années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet et al, 2000 in Mardhel et al, 2005). Elle a été développée à partir de la méthode DRASTIC ,et utilise les mêmes paramètres.

La particularité de cette méthode par rapport à DRASTIC, est qu'elle propose 5 scénarios de situation de vulnérabilité, « Impact Sévère » : correspond aux zones d'activité industrielle importante, avec des rejets liquides et de déchets solides, ou l'occupation des sols sont intense, constituées de terres cultivées à forte utilisation de pesticides et fertilisants. Ensuite, scénario « Impact Normale », de milieu pas très transformé, avec existence ou non de terres cultivées, et une utilisation très faible de pesticides et fertilisant. Les trois autres scénarios ; « drainage important », relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau, le scénario « terrain karstifié », concernant les aires

caractérisées par une forte karstification, et le scénario « terrain fissuré », correspondant aux zones caractérisées par une forte fracturation (Daboussi, 2009) (tableau 4).

Tableau 4 : Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode (Civita, 1994 in Hamza in Daboussi, 2009)

Scénario paramètre	Impact normal	Impact sévère	Drainage important	Karst	Terrains fissurés
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

L'indice de vulnérabilité SINTACS est donné par la formule suivante :

$$IS = \sum P_{(1,7)} \times W_{(1,7)}$$

Avec

$P_{(1,7)}$: indice des paramètres 1 à 7

$W_{(1,n)}$: poids correspondant à chaque classe, varie de 1 à n

La vulnérabilité de SINTACS est évaluée à partir de 4 degré de vulnérabilité (tableau 5).

Tableau 5: Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS (Civita, 1994, in Hamza, 2007 in Daboussi, 2009)

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	<106
Moyen	106-186
Elevé	187-210
Très élevé	>210

II-3-2-3 Méthode GOD :

Développée en Angleterre par Foster en 1987 (Murat, 2000). La vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de la pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que présente la couche sus-jacente à la zone saturée.

L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres :

- Le premier : Groundwater occurrence (G) ; réside dans l'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement.
- Le deuxième : Overall lithology of aquifer (O) ; est défini par la lithologie de l'aquifère
- Le troisième : Depth to groundwater (D) ; correspond à la profondeur de la nappe (Murat et al, 2003 in Ake et al, 2009 in Daboussi, 2009).

L'indice de vulnérabilité GOD (IG) (tableau 6), est déterminé par cotation numérique pour chaque paramètre (I_i) puis leur multiplication. L'équation est la suivante :

$$I_V = I_G * I_O * I_D.$$

Tableau 6: Indices de vulnérabilité utilisé par la méthode GOD (Murat, 2000)

Indice de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité	Définition du degré
0	Aucune vulnérabilité	
0-0.1	Vulnérabilité négligeable	Couches confinantes présentes sans écoulement vertical significatif
0.1-0.3	Faible vulnérabilité	Seulement vulnérable à long terme aux polluants conservateurs lorsque la décharge es fait en continu
0.3-0.5	Vulnérabilité modérée	Vulnérable à certains polluants mais seulement lorsque la décharge est continue
0.5-0.7	Vulnérabilité élevée	Vulnérable à beaucoup de polluants excepté ceux hautement absorbés ou transformés
0.7-1	Vulnérabilité extrême	Vulnérable à beaucoup de polluants de l'eau avec un impact rapide sur la pollution

II-3-2-4 Méthode AVI :

Cette méthode évalue la vulnérabilité des eaux souterraines à partir de la résistance hydraulique. C'est un facteur théorique utilisé pour décrire la résistance d'un aquitard au flux vertical (Kruseman et de Ridder, 1990 ; D. Van Stempvoort et al, 1992 in Murat 2000), en utilisant deux paramètres : d = épaisseur de chaque couche de sédiment au-dessus de l'aquifère saturé de surface, K : conductivité hydraulique estimée de chacune de ces couches.

La résistance hydraulique est calculée à partir de la formule suivante :

$$C = \sum_{1}^{i} di/ki$$

L'indice de vulnérabilité AVI est obtenu en calculant le logarithme décimal de la résistance hydraulique (C) (tableau 7).

Tableau 7 : Relation entre Indice de Vulnérabilité de l'Aquifère (AVI) et résistance Hydraulique (Murat, 2000).

Résistance hydraulique (C) (années)	Log (C)	Vulnérabilité(AVI)
0 à 10 ans	< 1	Extrêmement fort
10 à 100 ans	1 à 2	Fort
100 à 1000 ans	2 à 3	Modéré
1000 à 10000 ans	3 à 4	Faible
>1000 ans	> 4	Extrêmement faible

II-3-2-5 Méthode COP :

La méthode COP a été élaborée dans le cadre du programme COST620 de l'union européenne. Le principale but de ce programme était d'élaborer, une approche générale permettant d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en zone européenne. L'étude, a ressortie quatre facteurs permettant cette évaluation ; C : concentrations de flux, O : couches sus-jacentes a la zone saturée, P : régimes des précipitations, K : développement réseau karstique. Ce dernier facteur, est considéré pour l'évaluation d'un de la vulnérabilité d'un puits ou une source en zone karstique.

En effet, la méthode COP a été conçue, à partir des trois facteurs C, O, P. D'où L'acronyme COP. Dans le but, d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères carbonatés. Ces trois facteurs C, O et P de cartographie de la vulnérabilité ont été caractérisés, classifiés considérant les résultats des réflexions des groupes de travail et leur combinaison et pondération déterminées (Dörfliger et al, 2004). La base conceptuelle de cette méthode, en fonction de l'approche européenne est d'évaluer la protection naturelle des eaux souterraines, déterminé par les propriétés des couches situées au-dessus de l'aquifère (Vias et al, 2006 in Daboussi, 2009). Elle a été élaborée par le groupe d'hydrogéologue de l'université de Malaga, avec le soutien financier du ministère espagnol de la recherche et de la science, ainsi que des groupes de recherche d'Andalousie (Dörfliger et al, 2004).

L'équation permettant l'évaluation de la vulnérabilité par la méthode COP est la suivante :

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

II-3-2-6 Méthode PI :

C'est dans le cadre de l'action COST620, que la méthode PI a été aussi conçue, à l'université de Karlsruhe (Allemagne) et cofinancée par le BGR. Elle est basée sur un concept suivant « origine -écoulement-cible », dont la cible est la surface piézométrique. Cette méthode est constituée de deux paramètres, P : pour la couverture Protectrice et I : pour les conditions d'infiltrations (Dörfliger et al, 2004). Elle est composée de cinq classes de vulnérabilité (tableau 8).

Tableau 8 : Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST620 in Dörfliger et al, 2004).

	Carte de vulnérabilité		Carte P		Carte I	
	Description	PI-facteur	Description	P-facteur	Description	I-facteur
Rouge	Extrême	0-1	Très faible	1	Très élevée	0-0.02
Orange	Haute	>1-2	Faible	2	Élevée	0.4
Jaune	Modérée	>2-3	Modérée	3	Modérée	06
Vert	Faible	>3-4	Elevée	4	Faible	0.8
Bleu	Très Faible	>4-5	Très élevée	5	Très faible	0.1

II-3-2-7 Méthode LEA :

Cette méthode utilise deux paramètres, la couverture protectrice et les conditions d'infiltration. Elle n'a pas recours à l'usage d'indice numérique, contrairement à la méthode PI (tableau 9) (Dörfliger et al, 2004).

Tableau 9: Couverture protectrice liée à la vulnérabilité et classe de temps de transit estimatif (COST 620, in Dörfliger et al, 2004).

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

II-3-2-8 Méthode EPIK :

Méthode élaborée, pour la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstique de la Suisse, dans l'objectif de délimiter des périmètres de protection. Elle sert à traduire la sensibilité des eaux souterraines vis-à-vis de tout type de contaminants. Elle est composée de 4 paramètres (Dörfliger et al, 2004) : Epi-karst, Protective cover (couverture protectrice sol), Infiltration conditions (Conditions d'infiltration), Karst network development (développement de la karstification).

Un résumé, des paramètres pris en compte par chacune des méthodes sont cités dans le tableau 10 ci-après.

Tableau 10 : Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et paramètres pris en compte.

Méthodes	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	COP	PI	LEA	EPIK
Paramètres mis en jeu	Profondeur à la nappe							
	Recharge	Recharge			Précipitation	Conditions d'infiltrations	Conditions d'infiltrations	Conditions d'infiltration
	Type d'aquifère	Type d'aquifère	Type d'aquifère					
	Type de sol,	Type de sol						
	Topographie	Topographie						
	Impact de la zone vadose	Impact de la zone vadose	Lithologie de l'aquifère		Couches sus-jacente a la zone non saturée	Couverture Protectrice	Couverture Protectrice	Couverture protectrice
	Conductivité hydraulique	Conductivité hydraulique		Conductivité hydraulique				
					Concentrations de flux			
								Développement de la karstification
								Epi-karst

II-4 Choix d'une méthode :

Pour le choix d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité, quelques critères à tenir en compte :

- L'objectif de l'évaluation de la vulnérabilité, (exemple : estimation de la vulnérabilité intrinsèque, ou spécifique).
- Les données nécessaires pour l'utilisation de la méthode, et des données disponibles.
- Les conditions d'utilisation de la méthode. Il faut que la méthode soit utilisée dans les conditions hydrogéologiques et selon les modalités pour lesquelles elle a été conçue (Aller et al, 1987 in Murat, 2000).
- Les moyens financiers, humains et matériels.
- L'échelle : les modèles analytiques complexes s'utilisent à grand échelle, de 1/25 000 à 1/100 000. Les méthodes paramétriques avec des échelles moyennes, les méthodes cartographiques quant à eux, avec de petite échelle, allant jusqu'à 1/500000 (Murat, 2000).

Les études de vulnérabilité des eaux souterraines, sert à contribuer à la gestion durable de la ressource en eau souterraines. Elle Intervient aussi, dans la prise de décision en matière d'aménagement de territoire. Cependant, il est important de bien choisir la méthode, qui dépend généralement des objectifs à atteindre et de la zone d'étude.

PARTIE II

CHAPITRE I. PRESENTATION

GENERALE DE LA ZONE D'ETUDES

Dans notre zone d'étude l'activité agricole qui ne cesse de croître, l'implantation d'une zone industrielle et d'une décharge urbaine sont sujets d'inquiétude quant à leurs impacts sur les importantes ressources hydriques souterraines, une éventuelle pollution entre autres, nous présentons dans la figure 6 la cartes des aléas dans région d'étude. A cet effet nous nous sommes fixés pour objectif d'établir une carte de la vulnérabilité des eaux souterraines de la région afin de voir si ces inquiétudes ont lieux d'être.

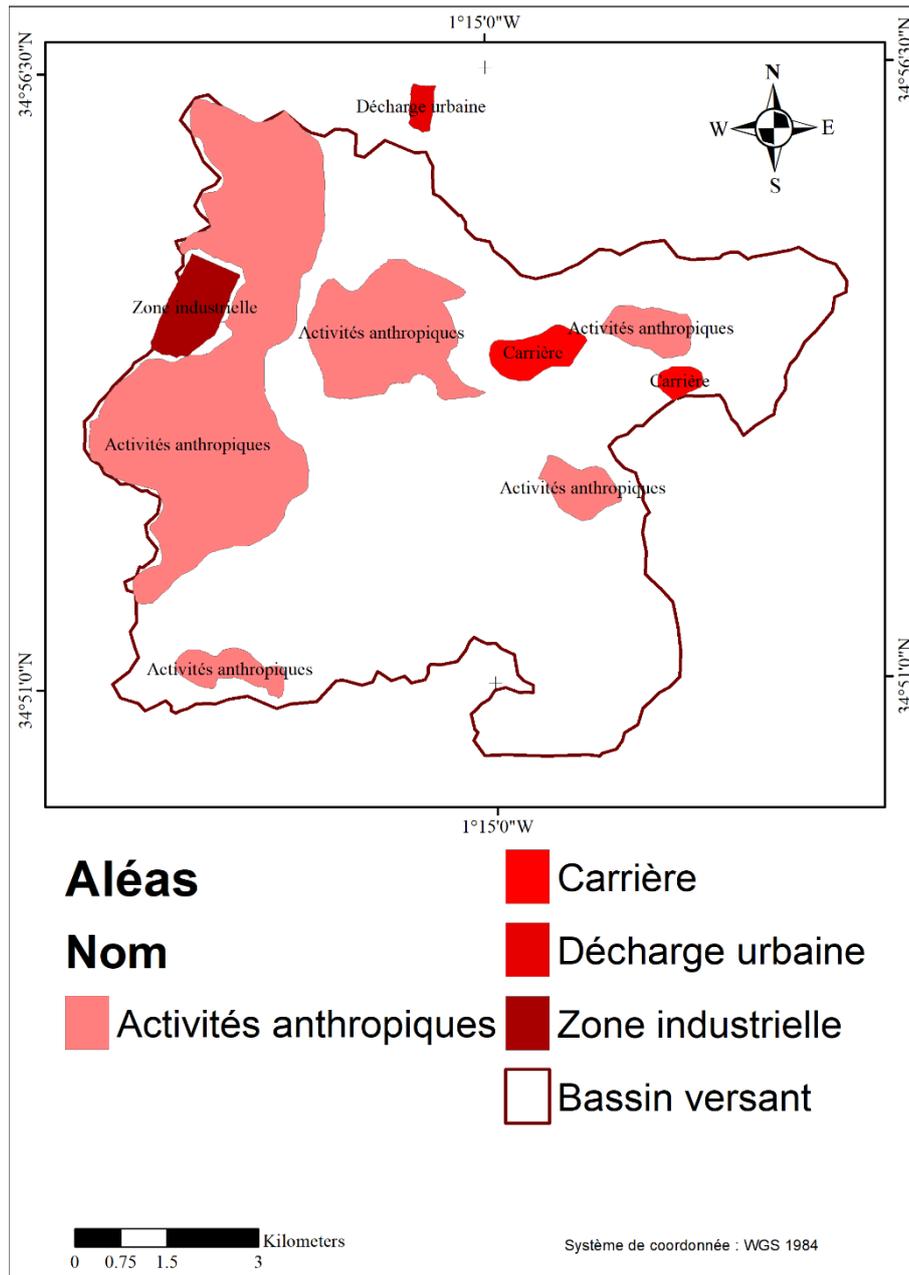


Figure 6 : Carte des aléas dans la région d'études

I-1 Situation géographique

Notre étude porte sur le bassin versant de l'oued Saf Saf, d'une superficie d'environ 77,9 Km² situé au Nord Est de la division administrative de Tlemcen. Il est bordé au Nord par le Djebel El Hadid, à l'Est par le Djebel Tabria recouvert par la forêt d'Ifri, au Sud par la limite Nord du bassin versant de l'oued Mefrouche et à l'Ouest par la ville de Tlemcen et l'agglomération de Bréa (Figure 7).

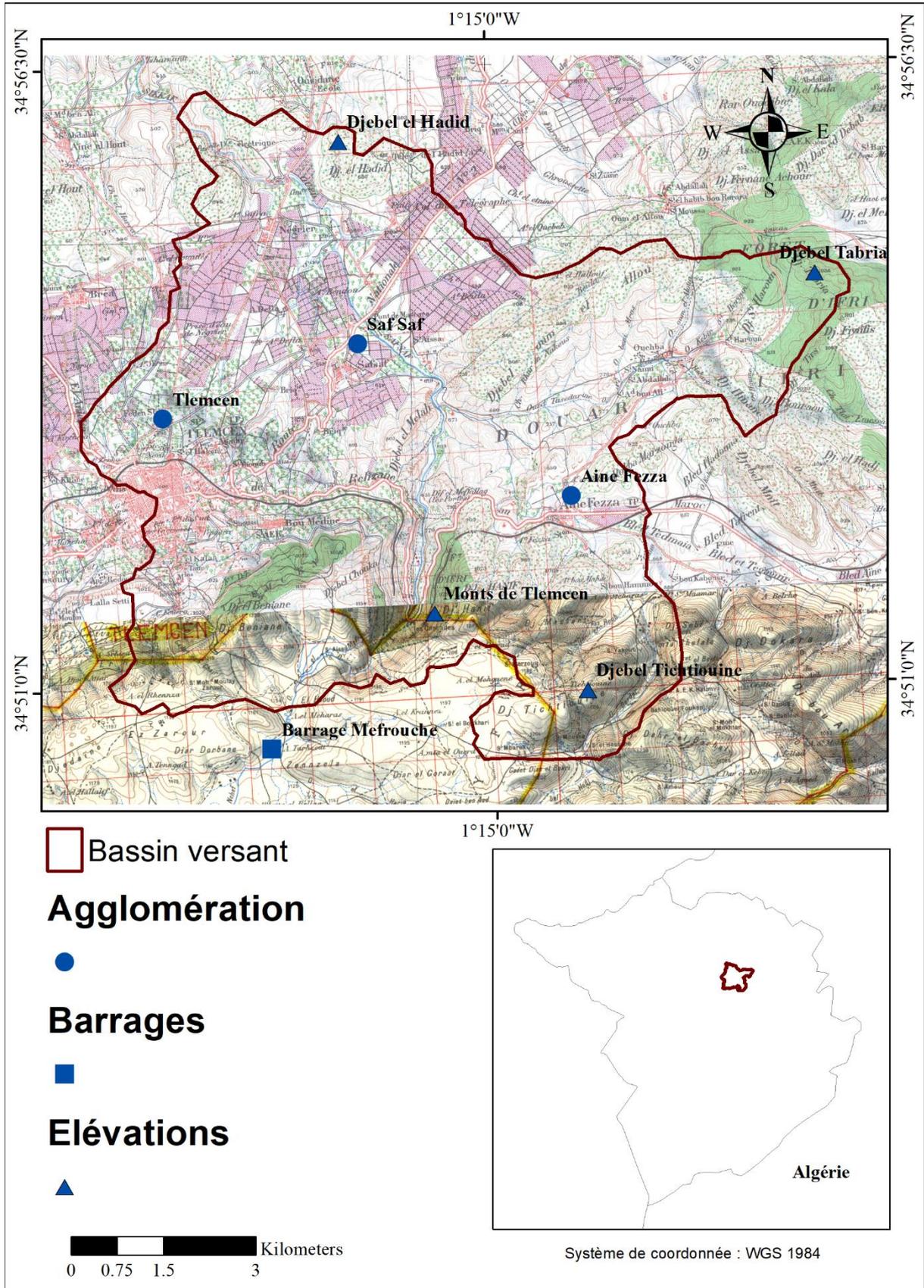


Figure 7 : Extraits de cartes topographiques de Tlemcen et de Terny (Echelle : 1/50000)

Le bassin versant de l'oued Saf Saf est localisé dans la partie orientale plutôt au centre du bassin versant de la Tafna (Figure 8).

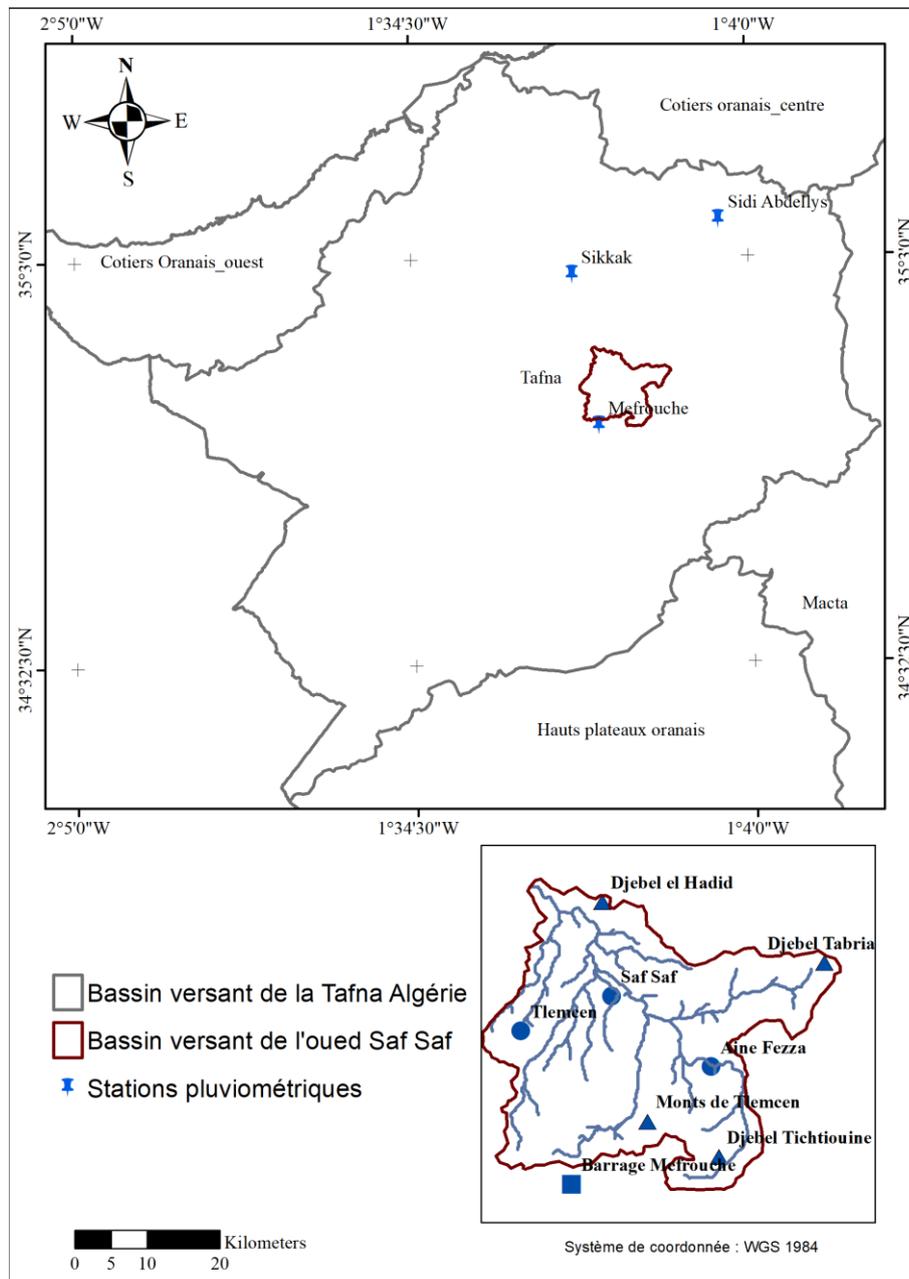


Figure 8: Situation géographique du bassin versant de l'oued Saf Saf

I-2 Paramètres physiques du bassin versant

Les caractéristiques physiques des bassins versants sont de la plus haute importance. Leur importance vient du fait qu'ils influent sur l'ensemble des phénomènes climatologiques, sur l'hydrologie et aussi sur l'hydrogéologie des bassins versants (Hayane, 1983). L'écoulement

annuel à l'exutoire d'un bassin est déterminé par les conditions climatiques de la région l'occupation du sol. Cependant, deux bassins voisins soumis aux mêmes conditions climatiques peuvent avoir un régime d'écoulement totalement différent. Cette différence est principalement causée par les diverses caractéristiques physiques des deux bassins (Bouanani, 2010). La pente par exemple joue un rôle très important dans l'évaluation de la vulnérabilité.

Pour délimiter le bassin versant nous avons utilisé un raster SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) callé sur les cartes topographiques de Tlemcen N°270 et de Terny N°300 sur ArcGis par une méthode semi-automatique.

L'ensemble des caractéristiques morphométriques du bassin versant d'oued Saf Saf sont calculées et présentées ci-dessous :

I-2-1 Indice de compacité de Gravelius (K_G)

Gravelius définit l'indice de compacité (K_G), comme étant le rapport du périmètre du bassin versant par la circonférence du cercle ayant la même aire, donné par :

$$K_G = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 1.63$$

Avec,

K_G : Coefficient de Gravelius

P : Périmètre du bassin versant (Km)

A : Aire du bassin versant (Km²)

En se référant au résultat consigné dans le tableau 14, nous avons un bassin de forme allongé.

I-2-2 Rectangle équivalent

C'est la représentation sous forme de rectangle du bassin versant avec les mêmes dimensions que ce dernier. La longueur « L » et la largeur « l » s'expriment en Km et par les équations :

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] = 22.19$$

$$l = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] = 3.51$$

Avec,

L : Longueur du bassin versant (Km)

l : Largeur du bassin versant (Km)

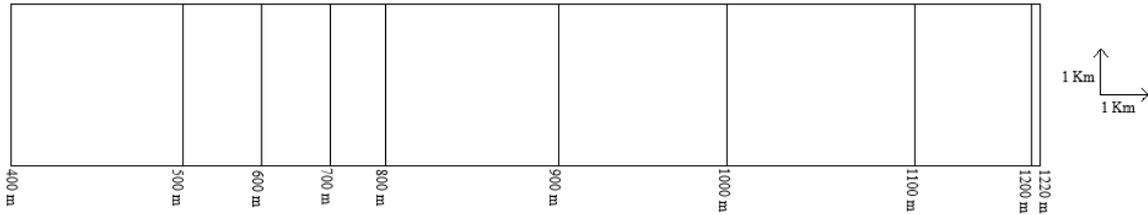


Figure 9. Rectangle équivalent

I-2-3 Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique (Figure 10) donne une vue synthétique de la pente du bassin versant, donc du relief (Benchaïba, 2011). Cette dernière se traduit par une courbe des altitudes en fonction des aires cumulées en % (tableau 11) qui nous sera utile pour déterminer l'indice de pente global ainsi que d'autres paramètres.

Tableau 11: Répartition hypsométrique du bassin versant de l'oued Saf Saf

Intervalles Altitudes	Altitudes	Aire partielle Ai (Km ²)	Ai (%)	Ai cumulée (Km ²)	Ai cumulée (%)	Aire totale
1200-1220	1210	0.255457999	0.32782578	0.255458	0.32782578	77.9249271
1100-1200	1150	8.991547951	11.5387313	9.24700595	11.8665571	
1000-1100	1050	14.31645052	18.3721064	23.5634565	30.2386635	
900-1000	950	12.69280041	16.2884983	36.2562569	46.5271618	
800-900	850	13.11861489	16.8349402	49.3748718	63.362102	
700-800	750	4.231197067	5.4298377	53.6060688	68.7919397	
600-700	650	5.229694791	6.71119626	58.8357636	75.5031359	
500-600	550	5.926893685	7.60590212	64.7626573	83.109038	
400-500	450	13.16226962	16.8909617	77.9249269	99.9999998	

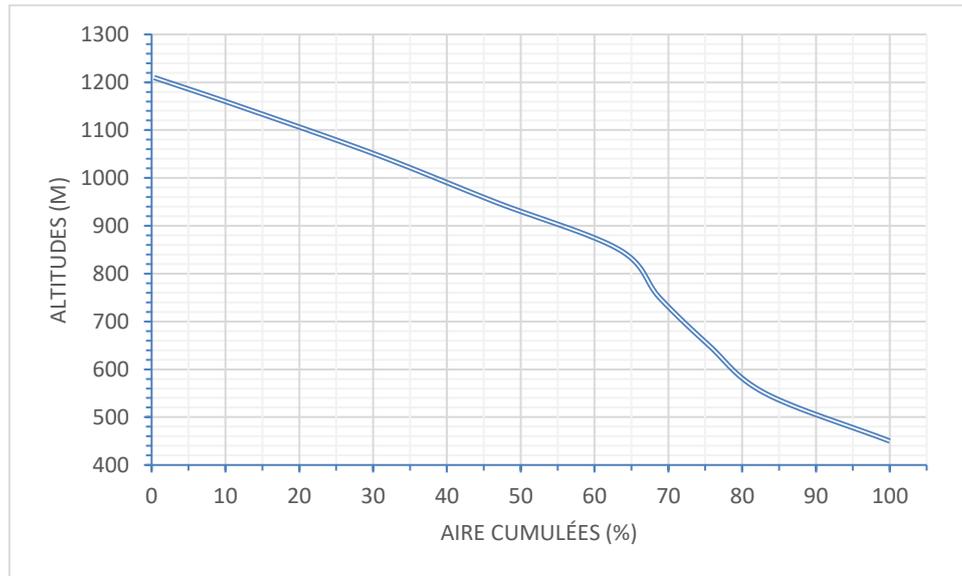


Figure 10: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Saf Saf

I-2-4 Indice de pente global (I_G)

Cet indice nous donne une appréciation générale du relief et donne aussi une vague idée de l'intensité du ruissellement dans le bassin versant, donné par l'expression suivante :

$$I_G = \frac{D}{L} = 31.55$$

Avec,

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \text{ (m)}$$

L : Longueur du bassin versant (Km)

En comparant la valeur de l'indice de pente global calculé ci-dessus, aux données du tableau 12 nous constatons que le bassin versant de l'oued Saf Saf présente un relief assez fort.

Tableau 12: Classification du relief selon I_G par l'ORSTOM (in Bouanani, 2004)

Relief très faible	$I_G < 2$
Relief faible	$2 < I_G < 5$
Relief assez faible	$5 < I_G < 10$
Relief modéré	$10 < I_G < 20$
Relief assez fort	$20 < I_G < 50$
Relief fort	$50 < I_G < 500$
Relief très fort	$500 < I_G$

I-2-5 Dénivelé spécifique (DS)

Le dénivelé spécifique est égal à l'indice de pente global que multiplie la racine carrée de la surface du bassin, donné par l'expression :

$$D_s = I_G * \sqrt{A} = 278.45$$

D'après les informations fournies par le tableau 13 et la valeur du dénivelé spécifique le bassin versant présente un relief fort.

Tableau 13. Classification du relief selon D_s (en mètre) (Bouanani, 2004)

Relief très faible	$D_s < 10$
Relief faible	$10 < D_s < 25$
Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
Relief modéré	$50 < D_s < 100$
Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
Relief fort	$250 < D_s < 500$
Relief très fort	$500 < D_s$

Le tableau 14 représente un récapitulatif des paramètres du bassin versant de l'oued Saf Saf. D'après ces résultats, nous avons ($20 < I_G < 50$) un relief assez fort selon la classification de L'ORSTOM (tableau 12). Cependant après correction ($250 < D_s < 500$) nous avons d'après la classification du tableau 13 un relief de type fort.

Tableau14. Principaux paramètres du bassin versant de l'oued Saf Saf

Périmètre P (Km)	Surface A (Km ²)	K _G	Rectangle équivalent		I _G		D _s
					H _{5%} (m)	H _{95%} (m)	
			Longueur (Km)	Largeur (Km)	1180	480	
51.405251	77.924927	1.6305245	22.191083	3.5115423	31.54420115	278.45674	

I-3 Réseau hydrographique

L'oued Saf Saf prend naissance sur les plateaux de Terny (massif de la haute Tafna), à la source d'Aïn Rhannous et prends diverses appellations selon les régions traversées (Hayane, 1983), c'est un affluent de la Tafna (moyenne Tafna) plus connu sous le nom de Sikkak avant de confluer avec l'Oued Isser (Affluent rive droite de la Tafna).

I-3-1 Classification de Strahler

Méthode de classification de flux proposée par Strahler en 1952. L'ordre des cours d'eau n'augmente que lorsque des cours d'eau du même ordre se croisent. Par conséquent, l'intersection d'un cours d'eau de premier ordre et d'un cours d'eau de second ordre restera un cours d'eau de second ordre, plutôt que de créer un cours d'eau de troisième ordre.

D'après l'ordre du bassin versant (Figure 11) le bassin versant de Saf Saf est relativement jeune avec un réseau peu ramifié qui laisse penser soit à une faible pluviométrie dans la région ou plutôt à une infiltration très importante.

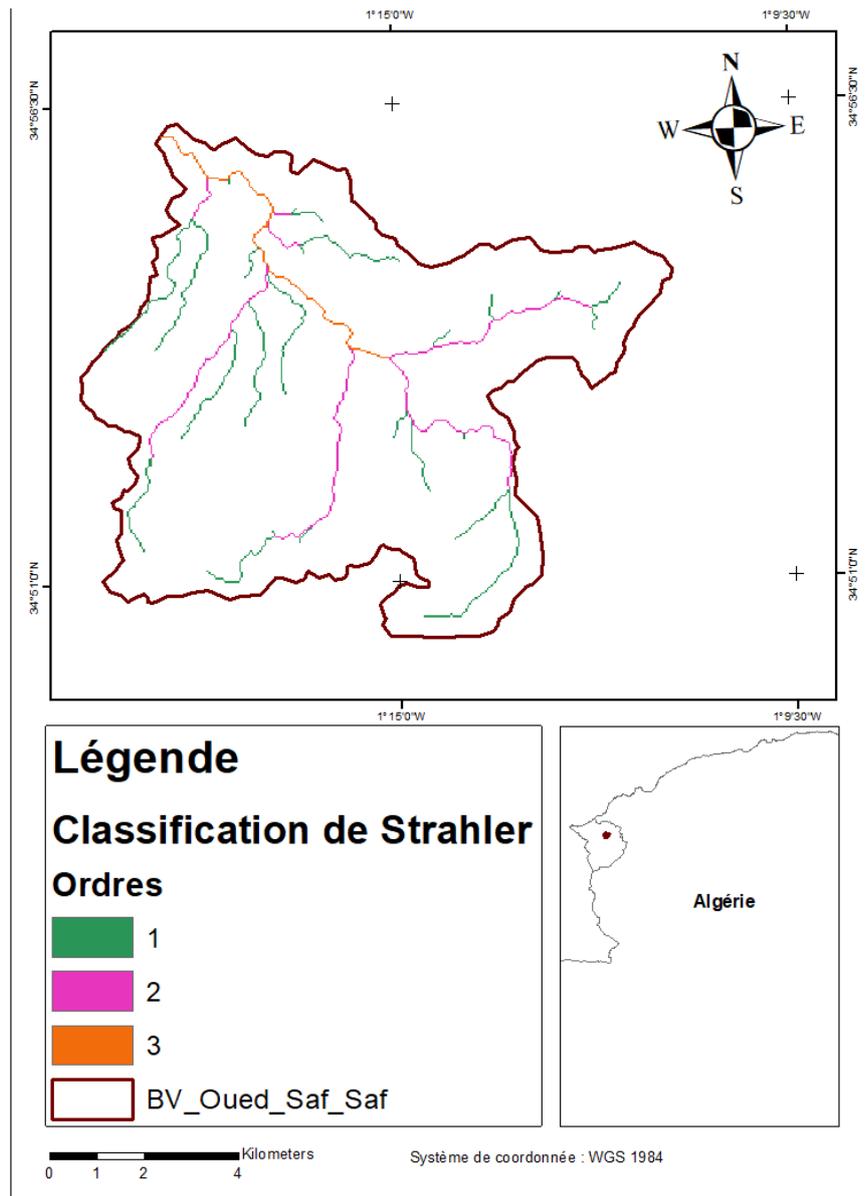


Figure 11. Classification de Strahler du réseau hydrographique du bassin versant d'oued Saf Saf

I-3-2 Profil en long

Sur un profil en long on peut observer les variations de pente qui se succèdent au long d'un cours d'eau. Ces variations sont importantes car elles peuvent donner de façon indirecte des informations sur les climats antérieurs, sur l'augmentation amont-aval des débits, sur la charge sédimentaire transportée et sur les caractéristiques du bassin versant (http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2008.meurer_m&part=151521)

Nous observons quatre divisions qui se démarquent par le biais de trois variations de pente sur le profil de la figure 12 :

- Subdivision 1 : elle correspond à l'amont de l'oued juste à l'aval du barrage Mefrouche entre 1120 m et 1080 m d'altitude où la pente moyenne est de 1,66 % environ, l'oued s'est frayé un chemin dans les formations calcaréo-dolomitique pour atteindre le cirque des cascades à 2,4 Km en aval qui marquent le début de la deuxième subdivision.
- Subdivision 2 : c'est une forte dépression où les pentes sont presque verticales jonchée par des cascades dans les formations gréseuses, avant de se stabiliser à 4 Km de l'amont qui correspond à l'entrée du bassin miocène (piémont des Monts de Tlemcen).
- Subdivision 3 : c'est la subdivision la plus longue avec 8,9 Km de distance, elle correspond à un siège de dépôt des particules érodées en amont, elle présente une pente moyenne 1,79 % entre une altitude de 700 m et 540 m.
- Subdivision 4 : la plus courte avec un parcours de 1,9 Km et présente une pente moyenne d'environ 4,21 % dans les formations calcaréo-dolomitique à une altitude entre 540 m et 460 m.

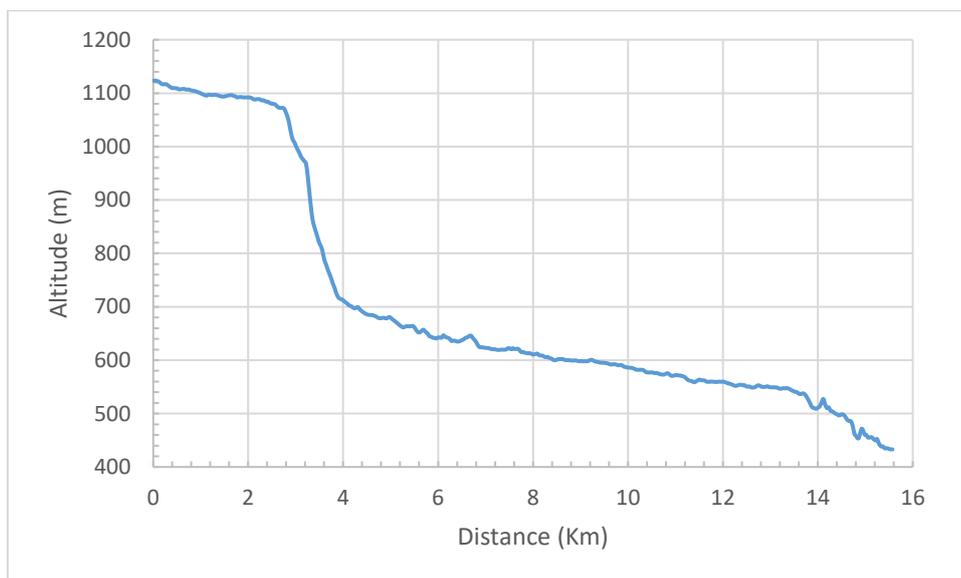


Figure 12. Profil en long du cours d'eau principal de l'oued Saf Saf

I-4 Synthèse climatique

Par manque de donnée sur cette région, surtout les levés de températures, nous allons présenter les variations des précipitations dans trois stations pluviométriques de la région d'études : Mefrouche, Sikkak et Sidi Abdellys durant la période 2006-15.

L'histogramme des variations des précipitations moyennes annuelles montre que la pluviométrie est hétérogène dans les trois stations, mais l'année 2013 était la plus pluvieuse pour toutes les stations. La moyenne des précipitations atteint les 636 mm à Mefrouche et que 343mm à Sikkak. (Figure 13)

A l'échelle mensuelle, la variation des précipitations montre que la station de Mefrouche dépasse largement les deux autres stations durant tous les mois sauf les mois de juillet et d'août.

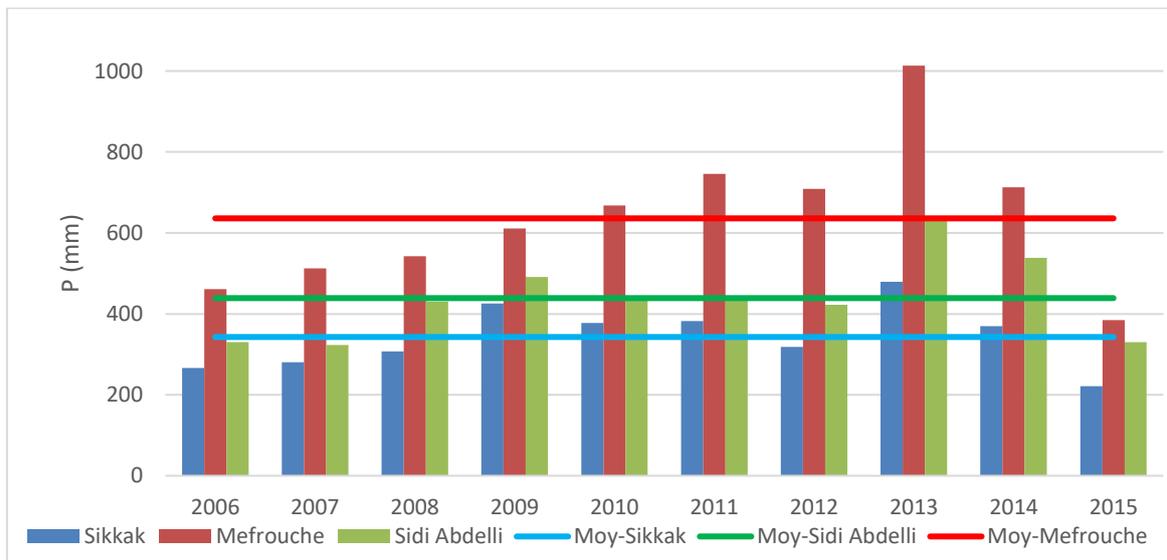


Figure 13. Variations des précipitations moyennes annuelles dans les trois stations (2006-15)

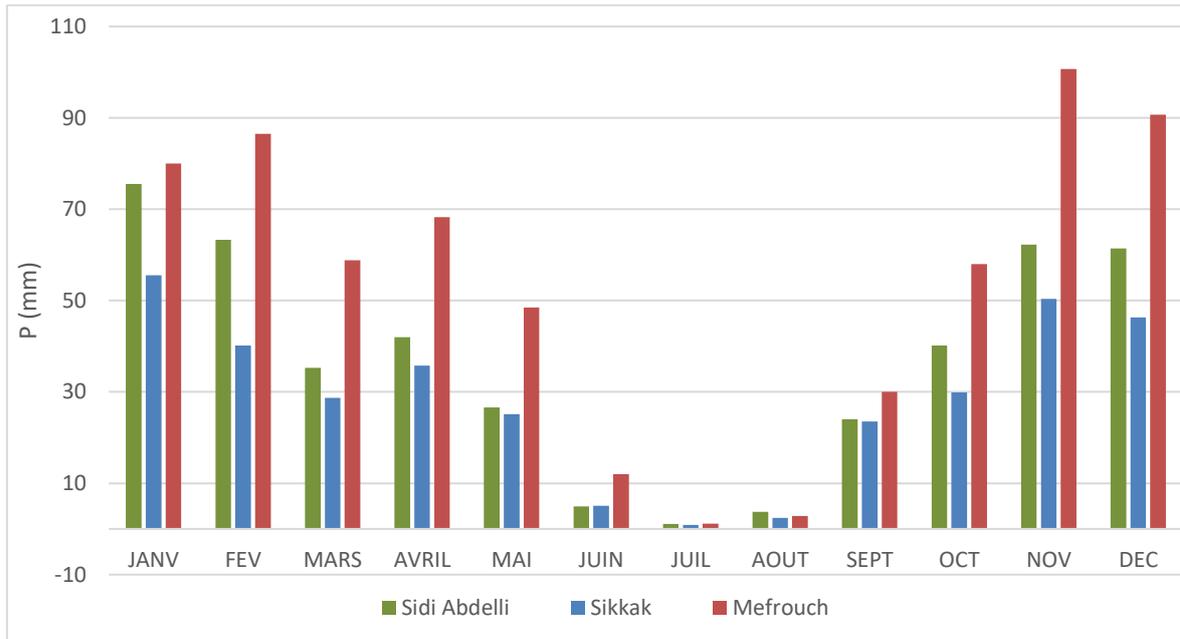


Figure 14. Variations des précipitations moyennes mensuelles interannuelles dans les trois stations (2006-15)

Des études antérieures (Babali, 2014 ; Bilem, 2012) présentent une étude comparative récente du climat de la station de Saf Saf entre une « ancienne période » de 25 ans (1913-1938 : source Seltzer, 1946) et une « nouvelle période » de 30 ans (1980-2010 : source O.N.M., 2011). Ainsi il a été constaté pour la question de la pluviométrie une diminution de la moyenne interannuelle des précipitations pour la nouvelle période d'environ 200 mm.

Concernant les températures nous avons les plus basses en janvier tandis que les températures les plus élevées ont été enregistrées en août, avec une diminution d'environ 1°C de l'ancienne période vers la nouvelle.

La région présente une période sèche entre début mai et fin octobre et une période humide pour les autres mois restant, la période sèche est plus étalée pour la nouvelle période.

En ce qui concerne le climat, des études antérieures (Baghdadli, 2014 ; Benmechernane, 2013 ; Bouguettaya, 2011) montrent que bassin versant de Saf Saf est sous un climat semi-aride vu qu'il se trouve entre trois stations caractérisées par un climat semi-aride.

I-5 Contexte Géologique et Structural des Monts de Tlemcen

I-5-1 Aperçu géologique

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 fluviatiles éocènes sur le revers sud et par des marnes miocènes et des dépôts continentaux du Plio-Quaternaire au Nord (Bensaoula, 2006) (Figure 15).

Lithostratigraphie

Les premiers travaux qui se rapportent à la géologie des Monts de Tlemcen ont été élaborés par Bayle et Ville en 1854, Pouyanne en 1877 et Gentil en 1903 ; et c'est grâce à Doumergue que les grands ensembles litho stratigraphiques ont été définis sur des cartes géologiques de Terni, Tlemcen et Lamoricière, publiées entre 1910 et 1943 (<https://www.recy.net/actualites/20080428-geologie-Tlemcen-algerie.php>).

La succession litho-stratigraphique de la figure ci-dessous, montre la série des formations des Monts de Tlemcen. Ainsi, les calcaires de Zarifet, les Dolomies de Tlemcen, les calcaires de Stah constituent le membre calcaréo-dolomitique inférieur, les calcaires du Lato, et les Dolomies de Terni constituent le membre calcaréo-dolomitique supérieur.

Les seuls niveaux intéressants sont les Dolomies de Tlemcen au sens large. Elles présentent une forte perméabilité due à la forte fissuration voire karstification. Ceci a déjà été mis en évidence dès 1880 lors des premiers travaux de terrassement du barrage du Mefrouche où l'on vit la première crue de septembre s'engouffrer et disparaître dans les fouilles ouvertes du barrage. Le projet fût abandonné et ne put être repris qu'en 1946 (Gevin, 1952 et 1987). Des observations analogues ont été faites lors des travaux de réalisation du barrage des Beni Bahdel (Gautier, 1946).

Notons que 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, 1985 ; Collignon et Bensaoula).

La description des formations qui suit est principalement inspirée des travaux de Benest (1985) et Bensaoula (2006), Concret et Clair (1974), et ceci en raison du détail descriptif au point de vue morphologique des formations dolomitique et leurs épaisseurs.

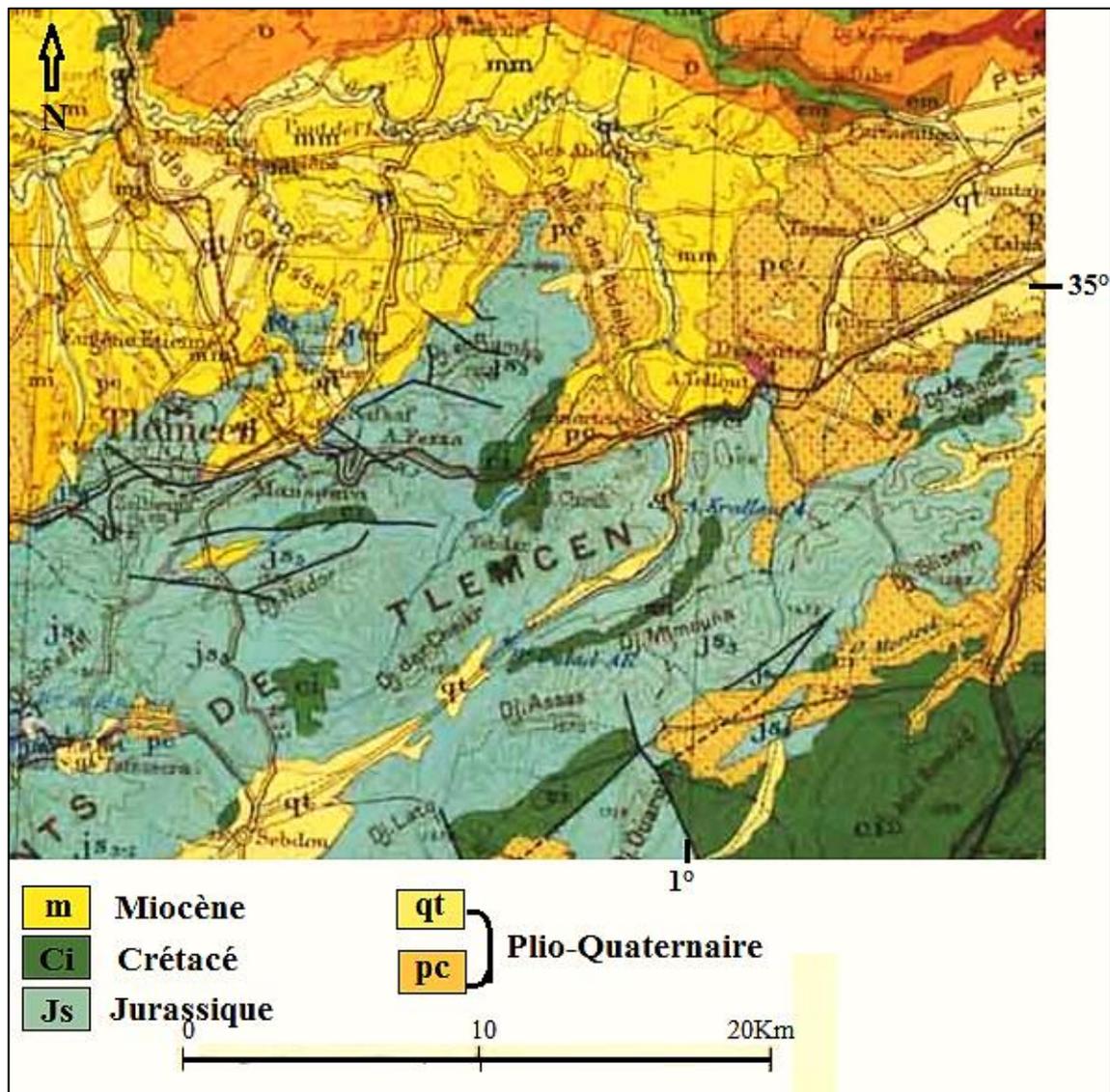


Figure 15.Extrait de carte géologique de l'Algérie au 1/500 000

I-5-1-1 Jurassique supérieur et Crétacé basal

1-Les grès de Boumédiène

Ce sont des grès blancs parfois bruns ferrugineux à la surface, durs avec des intercalations de bancs marneux multicolores. C'est une série épaisse comportant à son sommet des passages de bancs de calcaires bleus appelés calcaires de Zarifet. Cette formation a été attribuée au Lusitanien par Auclair et Biehler et a été replacée dans l'Oxfordien et le Kimméridgien par Benest.

2-Les calcaires de Zarifet

Les calcaires de Zarifet sont bien exposés dans les secteurs de Tlemcen et de Terni.

Leur limite inférieure est placée au toit de la dernière assise gréseuse ou argileuse des grès de Boumédiène c'est à dire à la base du premier banc carbonaté généralement dolomitisé. La limite supérieure a été fixée à l'apparition du 1^{er} banc dolomitique des Dolomies de Tlemcen.

La dolomitisation montre une extension verticale très variable selon les secteurs. Dans la partie méridionale des Monts de Tlemcen, elle affecte la quasi-totalité des calcaires de Zarifet qui de ce fait ne peuvent être séparées des Dolomies de Tlemcen. Son développement est tel dans certains cas qu'il n'est plus possible de distinguer entre les trois formations du rythme A (calcaire de Zarifet, Dolomie de Tlemcen, calcaire de Stah). L'épaisseur des calcaires de Zarifet est variable dans le sens latéral sur les monts de Tlemcen, le Col de Zarifet 100m d'épaisseur, à Terni 95m, Dj. Bou Acha 73m, Sidi Yahia Ben Sefia 85 à 90m, au DJ. Ed Diss 90m, au Nif El Ogab 105 à 110m

3-Les Dolomies de Tlemcen

Les Dolomies de Tlemcen marquent les Monts de Tlemcen d'un style morphologique bien particulier. L'érosion y a parfois donné naissance à des reliefs très pittoresques à aspect ruiniforme avec cheminées (sud de Terni, oued Tessera Mramet rive droite).

En l'absence de données bio-stratigraphiques précises, la limite inférieure a été placée à la base des premiers niveaux dolomitiques riches en laminites stromatolitiques. Elle est rarement aussi tranchée qu'au col de Zarifet.

La limite supérieure plus nette en général correspond à la première passée marneuse peu indurée par laquelle débutent les calcaires de Stah. Il faut encore insister sur l'imprécision de cette limite, lorsque la dolomitisation affecte complètement les calcaires de Stah (Sidi Yahia Ben Sefia).

Les Dolomies de Tlemcen ainsi définies comportent assez souvent des intercalations lenticulaires calcaires. Dans d'autres cas, elles peuvent se terminer par plus de 100 m ou plus de calcaires critiques à dames-blanches et à lituaniens. On constate qu'on peut passer latéralement et brutalement à des calcaires massifs comportant de nombreuses

passées de lamines stromatolitiques, par exemple Dj. Stah, Dj. Guern, Kossilet (sud de Terni).

Aucune limite litho stratigraphique ne permet de séparer les calcaires épargnés de la dolomitisation, de la masse des calcaires de Zarifet sous-jacents, Dans tous les cas (Dj. Stah en particulier), l'intensité de la dolomitisation est liée avant tout à la fracturation. Leurs épaisseurs dans la région de Tlemcen peuvent atteindre 300 m

4-Les calcaires de Stah

Elle n'est vraiment différenciable des Dolomies de Tlemcen que lorsqu'elle est épargnée de la dolomitisation.

Elle correspond à des calcaires massifs à dominante micritiques pratiquement dépourvues de passées marneuses (Dj. Stah 65 m). En revanche dans d'autres secteurs cette formation admet des intercalations marneuses.

Le membre calcaréo-dolomitique inférieur peut avoir une épaisseur variant de 250 m à 350 m d'après Collignon, 1986.

5-Les marno-calcaires de Raourai

Appelé aussi membre marno-calcaire intermédiaire, dans la partie nord des Monts de Tlemcen se manifestent un enrichissement de calcaires. Celui-ci est perceptible au Bled Gliia à Ouled Mimoun avec une épaisseur de 115m. Le faciès devient plus calcaire à l'Ouest de Tlemcen et plus au Nord avec une diminution de l'épaisseur, 75 m seulement au Dj. Tefatisset à Tlemcen.

Dans la partie sud des Monts de Tlemcen la formation sous un faciès très marneux devient très épaisse (400m) dans le massif de Raourai et à un degré moindre au Dj. Ouargla (240 m).

6-Les calcaires du Lato

Avec une épaisseur d'environ 50 m en moyenne. Elle débute au-dessus du dernier niveau marneux des marno-calcaires de Raourai et se termine au sommet de lamines noires formant une vire (un palier sur une falaise) dans toute la région de Sebdou. Ils sont le plus souvent micritiques.

7-Les dolomies de Terni

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 Terni peu fossilifères montrent un faciès constant. On observe à la base un horizon riche en silex et en stromatolites colonnaires recristallisées.

Sur la bordure méridionale des Monts de Tlemcen, cette formation dolomitique ne peut être séparée des calcaires du Lato également dolomitisés, appelé aussi membre calcaréo-dolomitique supérieur son épaisseur d'après Collignon 1986, varie entre 100 et 200 m.

8-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.

9-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.

I-5-1-2 Miocène

1-Les marnes du Serravallien

Repose souvent en transgression et en discordance sur les formations du jurassique. Il est constitué essentiellement par une épaisse série d'argiles marneuses grises ou bleutées dans la masse, devenant ocre par altération. Au sein de cette masse, pouvant dépasser 300 m d'épaisseur dans le bassin d'Isser, s'intercalent de nombreux bancs de grès jaunes plus ou moins épais et fréquemment au sommet de la série.

La base du Serravallien, en particulier dans le bassin de la Tafna est marquée par un niveau discontinu de poudingue relativement peu consolidé à ciment argilo-gréseux, bien représenté à 4 km à l'Est de Hamman Boughrara et en limite des affleurements jurassiques (Concaret et Clair, 1973).

Dans les Sebaa Chioukh, ce Serravallien est constitué par une série marno-gréseuse épaisse de plus de 2000 m (Guardia, 1975).

2-Les Grès Tortonien

Représenté par des grès jaunes du Tortonien, concordant avec le sommet du Serravallien, ils sont durs, jaune d'or ou citron, mal lités, parfois peu consolidés, atteignant 20 à 30 m d'épaisseur, essentiellement localisés entre Tlemcen et Remchi (Concaret et Clair, 1973).

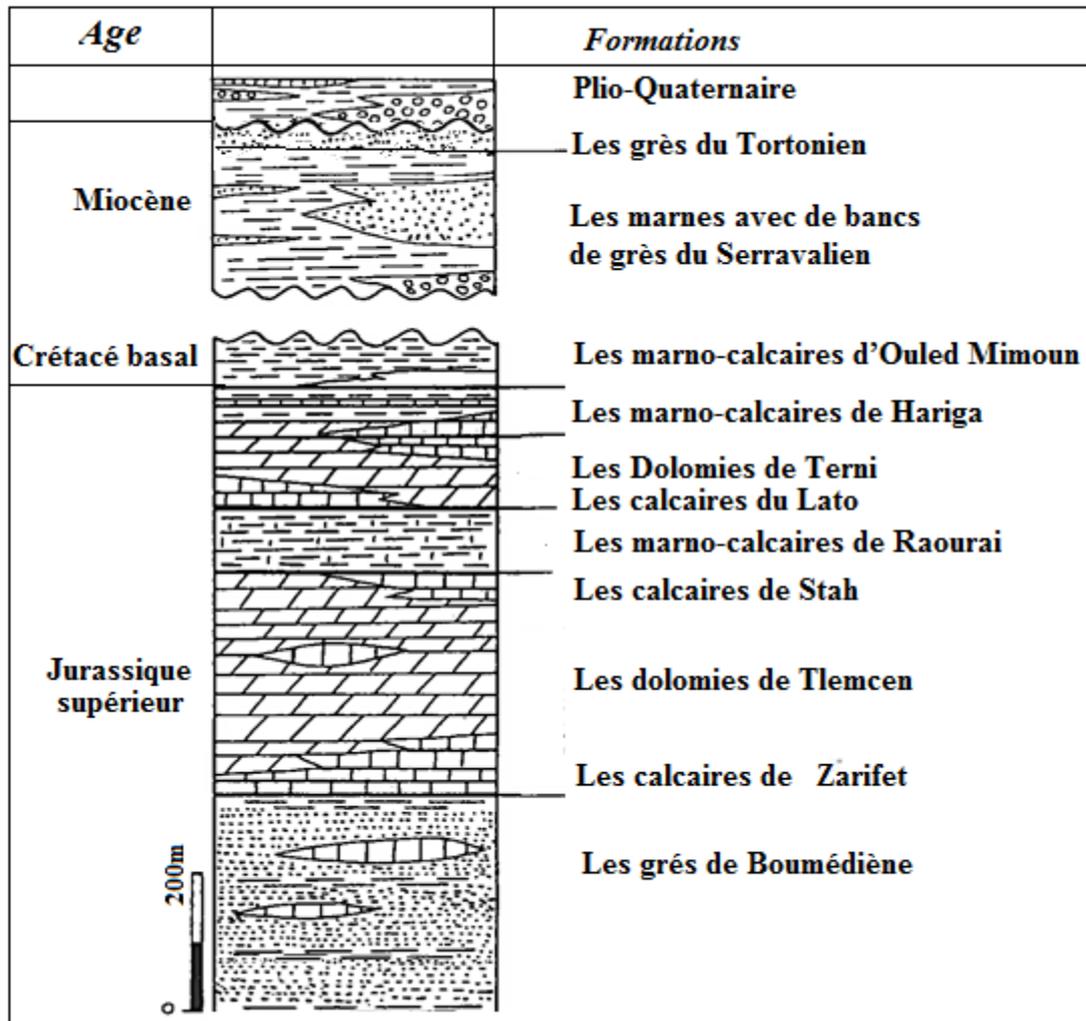


Figure 16 : Log lithostratigraphique de la région de Tlemcen selon (Collignon ,1986) (modifiée)

Les principales phases tectoniques :

De l'Eocrétacé jusqu'à une période récente (Benest ,1982 in Hayane, 1983) envisagea cinq principales phases.

1- Phase éocrétacé

Le jeu ou rejeu des grands accidents SO-NE, SE-NO et subméridiens, héritage de l'orogénèse hercynienne a joué un rôle majeur dans la subsidence durant le jurassique supérieur et l'éocrétacé.

2- Phase atlasique

Elle peut être liée à la tectonique, qui dans les Monts Traras (Guardia, 1975) qui ont débuté au sénonien mais antérieur à la mise en des nappes telliennes. Les monts de Tlemcen et Daïa ont subi deux types de mouvements d'abord d compressif puis distensifs (contrôlé par le rejeu du socle ayant abouti à des failles conjuguées N 55-80 et N 140 responsable des principales structures) déductions tirées à partir de l'analyse tectonique de cette zone.

3- Une phase importante de compression N-S à NO-SE,

Avec un probable paroxysme miocène par comparaison avec la région des Traras, cette phase aurait commencé avec (ou avant ?) la mise en place des nappes et serait antérieur au Messinien.

4- Phase à dominante distensive,

A contribuer à accentuer le découpage en horst et graben à travers le rejeu des failles déjà existantes.

5- Phase récente (plio-quadernaire)

Ce sont des mouvements soit compressif, soit distensifs.

I-6 Contexte hydrogéologique des Monts de Tlemcen

Nous présentons ci-dessous les formations qui présentent un grand intérêt hydrogéologique (Figure 18 et 19).

1- Dolomies de Tlemcen et calcaires associés ; les dolomies de Tlemcen qui ont pour base les calcaires de Zarifet, et pour sommet les calcaires de Stah occupent une bonne partie des Monts de Tlemcen. Ces roches sont très fissurées et intensément karstifiées.

2- Dolomies de Terny et calcaires associés ; avec à leurs base les calcaires de Lato, moins karstifiées que les Dolomies de Tlemcen.

3- Grès du Tortonien, présentent une porosité d'interstice et de fissure.

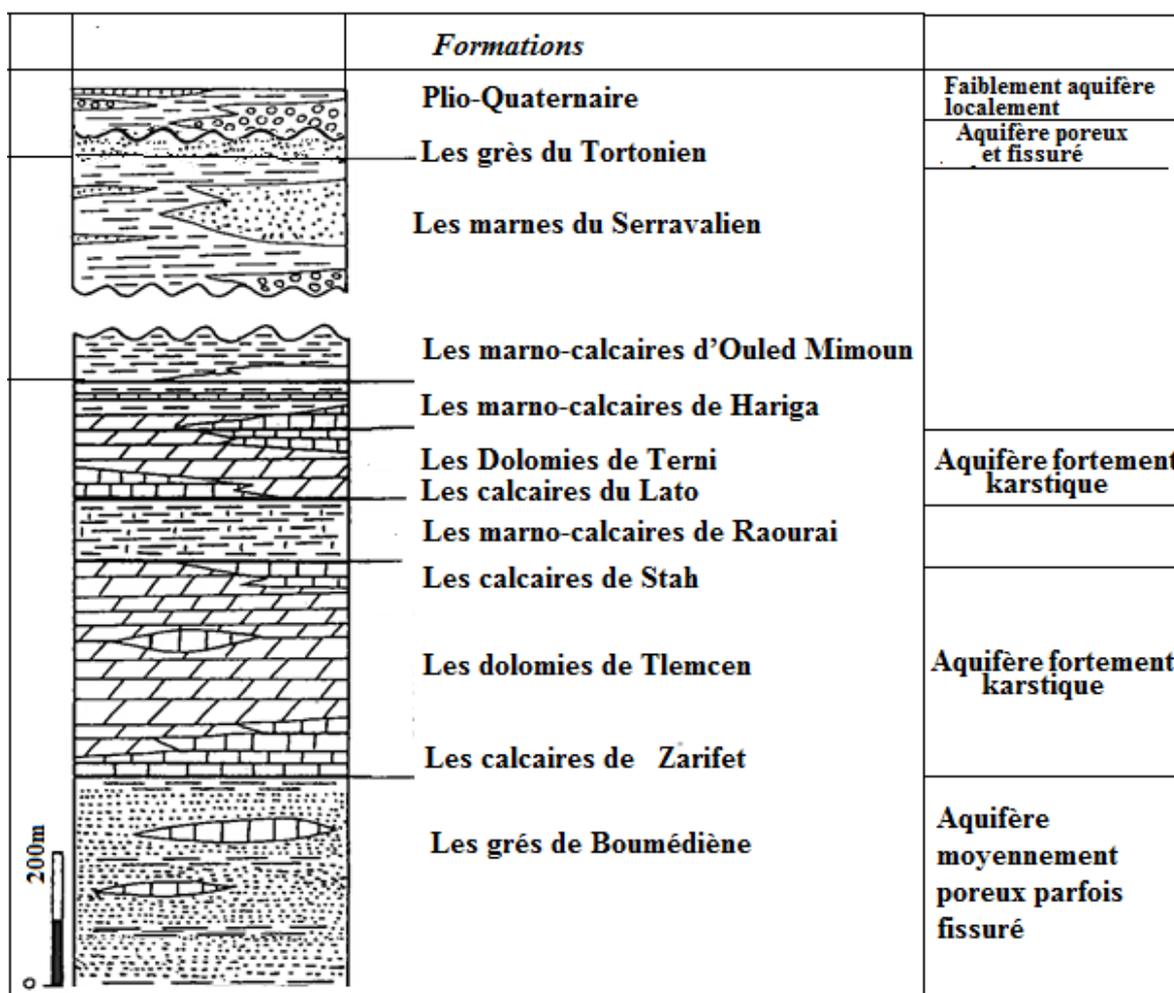


Figure 18 Colonne hydrogéologique du bassin versant d'oued Saf Saf (Collignon, 1986 ; Bensaoula, 2007) (modifiée)

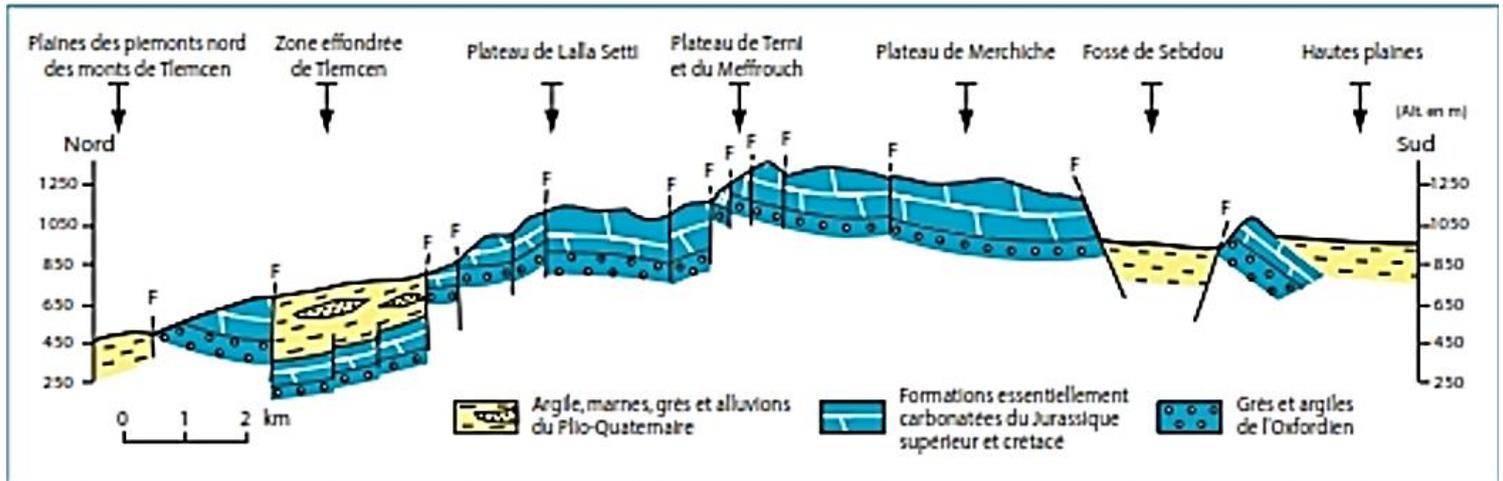


Figure 19. Coupe transversale des Monts de Tlemcen, illustrant les principaux types d'aquifères de la région (Collignon, 1986 ; Achachi, 1996 in Bensaoula 2007)

I-7 Contexte Géologique, Structural et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Saf Saf :

I-7-1 Géologie et Hydrogéologie du bassin versant de l'oued Saf Saf :

La description des formations qui suit est principalement inspirée des travaux de Doumergue (1924), Hayane, (1983), Collignon (1986), et ceci en raison du détail descriptif au point de vue lithologique, hydrogéologique, et puissance des formations dans notre bassin d'étude.

Pour ce qui concerne l'établissement de la colonne hydrogéologique du bassin versant, nous nous sommes basés sur les épaisseurs éditées ; par les auteurs cités (Collignon, 1986 ; Bensaoula, 1986) et l'analyse des coupes des forages réalisées par la Direction des Ressources de l'Eau au sein de notre bassin d'étude (tableau 15).

Nous avons du bas vers le haut les formations litho stratigraphiques et leurs propriétés aquifères :

1-Grès de Boumediene (J⁴)

D'âge Oxfordien et Kimméridgien, c'est un ensemble lithologique à dominante gréseuse qui affleure bien aux environs de Tlemcen en particulier près du monument de Sidi Boumediene. C'est en se référant à ce lieu que Pouyanne en 1877 individualise une formation des grès de Bou Médine.

C'est un ensemble monotone, massif avec des stratifications obliques. Ces grès sont en bancs, les uns puissants, les autres d'épaisseurs variables, bruns, ferrugineux à la surface, à

éléments fins à moyens, les grains de quartz sont anguleux à sub-anguleux, à cassure d'un blanc roussâtre, parfois grise.

Ces grès forment de gros bancs séparés par des inter-lits argileux de couleur verte ou parfois brune. Dans le tiers supérieur, on a constaté la présence d'argiles lie de vins. Ils admettent, au sommet, quelques passées marneuse et calcaires à Echinides ; bleus alternés dans la série supérieure des grès de Boumediene, séparés par des lits de calcaires marneux ou passant latéralement à des marnes multicolores à plaquettes et plaques de grès. Son épaisseur est de 10 m à 40 m (Hayane ,1983).

Ces grès sont souvent à ciment calcaire et dolomitique, dans les 100 m supérieurs, on trouve souvent une ou plusieurs grosses lentilles de calcaires ou de dolomies.

Ces grès jouent le rôle de drain et sont marquées par de nombreuses petites sources (Collignon, 1986).

Cet ensemble de grès sont particulièrement développés au niveau des cascades d'El Ourit, où sa puissance dépasse les 250 m ; cette épaisseur a été vérifiée sur le forage "Siège de la Wilaya" et le forage "Villa Marguerite"

2-Calcaires de Zarifet (J⁵_a) :

D'âge Kimméridgien moyen, définis par Doumergue en 1910, sous le nom de calcaires bleus à Géodes, leur base est caractérisée par quelques bancs de calcaires micritiques, détritiques et marneux, la majeure partie de la formation est constituée par des pelmicrites, en bancs épais, souvent constellées de *Clypeïna jurassica*, cette formation peut être réduite et partiellement dolomitisée (Hayane ,1983).

3-Dolomie de Tlemcen (J⁵_b) :

D'âge Kimméridgien moyen-supérieur, sont des dolomies massives grises à beiges, saccharoïdes riche en calcite, et présentent de nombreuses cavités et sont très fissurés.

Largement représentées dans notre bassin d'étude, elles affleurent au niveau d'Ain Fezza, et djebel Ain El Hout.

Ces dolomies donnent des reliefs ruiformes dans lesquels la stratification est difficilement reconnaissable. Ce sont des Dolomies cristallines grises à patine rousse et à cassure grise, parfois rousse avec de nombreuses cavités remplies de calcite. On y observe une succession

de laminites stromatolithiques entrecoupées de bancs à texture rubanée et d'horizons riches en gastéropodes (Hayane, 1986).

Au-dessus des Dolomies de Tlemcen viennent les calcaires de Stah, définis par Benest (1972) se sont des micrites en bancs épais à patine gris clair renfermant des pellets, des coprolites et des dasycladacées.

Une épaisseur du membre calcaréo-dolomitique inférieur de plus de 271 m a été constatée sur le forage 'Saf Saf bis'.

Dans le bassin versant les calcaires et dolomies du Kimméridgien moyen à supérieur constituent un aquifère à très forte perméabilité, très souvent intensément fissuré et/ou présentent souvent des cavités

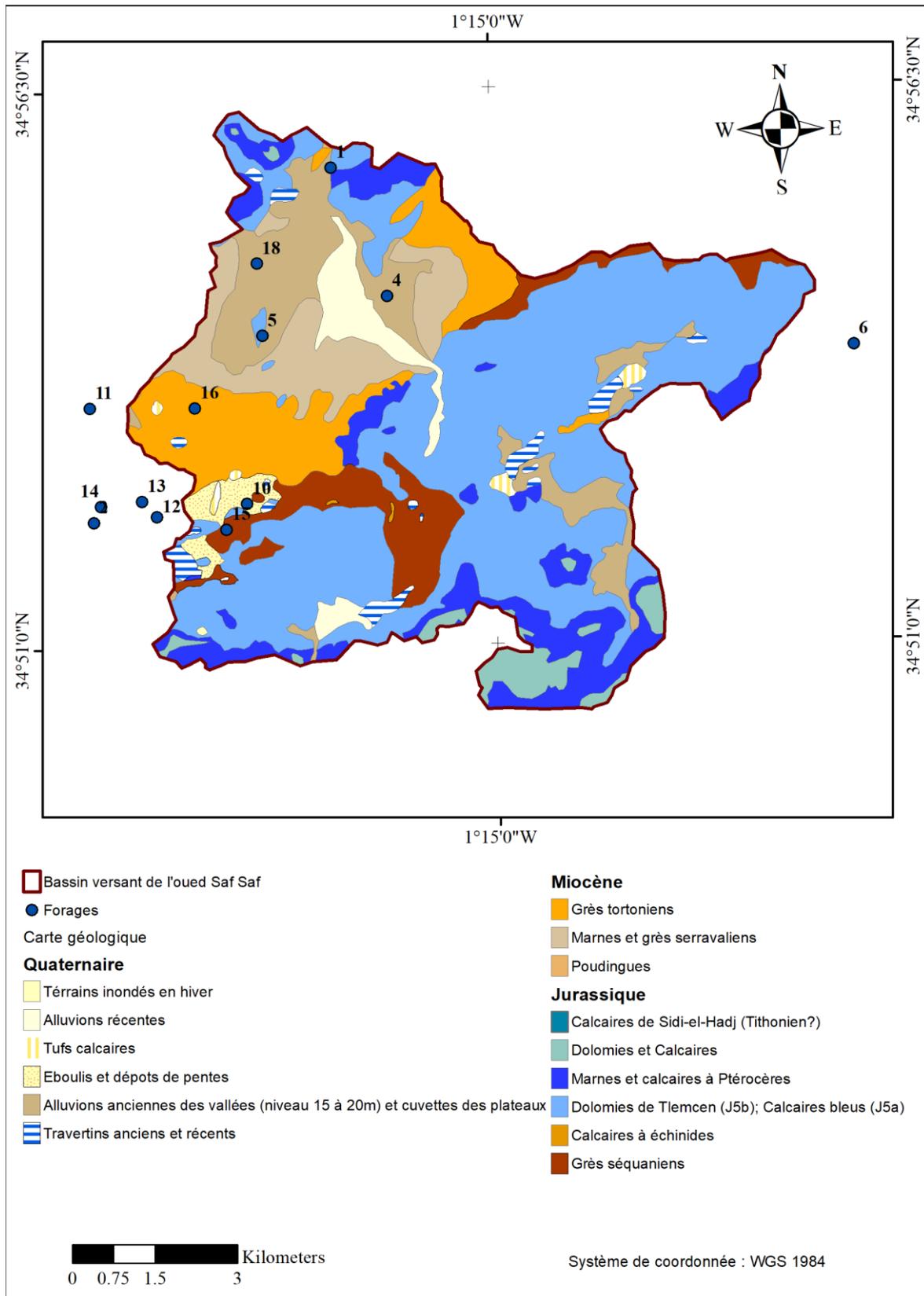


Figure 20. Carte géologique du bassin versant de l'oued Saf Saf (d'après Doumergue, 1924) et position des forages.

4-Marno-calcaires (J⁶) :

D'âge Tithonien inférieur, ce sont des marnes grisâtres avec de nombreux lits et bancs de calcaires marneux (Doumergue, 1924).

Une épaisseur de 104 m a été constaté sur le forage "Sidi Othmane"

5-Dolomies de Terny et calcaires de Lato (J⁷) :

D'âge Tithonien inférieur, Ce sont des dolosparites mal stratifiées, parfois vacuolaires présentant une patine rousse. Le niveau de base peut être riche en silex stratiformes et en stromatolithes. Il y a des stratifications obliques qui, avec l'aspect très massif, permettent de bien les différencier des Dolomies de Tlemcen

A la base des Dolomies de Terny, les calcaires de Lato, sont des calcaires micritiques gris parfois roses ou bordeaux. (Hayane, 1983).

Leur épaisseur est de l'ordre de 100 m au niveau du plateau de Terny, et une épaisseur de 140 m a été constaté sur le forage "Chetouane II".

La même subdivision que dans le cadre géologique régional, deux séries karstifiables séparées par une série peu perméable ;

- Un membre calcaréo-dolomitique inférieur,
- Un membre marno-calcaire intermédiaire,
- Un membre calcaréo-dolomitique supérieur.

En pratique, il semble que la dolomitisation ait affecté une partie plus ou moins importante de la série selon les endroits, comme cela avait été indiqué par (Auclair et Biehler, 1967). Cette question de dolomitisation plus ou moins grande de la série présente une importance hydrogéologique considérable. Les niveaux calcaires sont ceux qui ont les meilleures propriétés transmissives (pertes totales non colmatables, caves importantes lors des forages, développement des réseaux souterrains de grande largeur, bons débits spécifiques). Selon l'importance de la couche calcaire, située souvent à la base des dolomies, on aura donc un drainage plus ou moins efficace de l'ensemble (Collignon, 1986).

6-Poudingues (m^{1p}) :

Très durs, appuyés sur le Jurassique et s'en distinguant difficilement en surface, apparentés dans la région d'Ain El Hout formant une assise de 50 m. (Doumergue ,1924), une épaisseur de 26 m a été constaté au niveau du forage "Ouzidane I".

7- Marnes et grès du Serravallien (m²) :

D'âge Serravallien, ce sont des marnes d'un gris bleu, à texture très fine, grises, roussâtres et coulantes en surface, très pyriteuses dans les niveaux inférieurs, intercalées de nombreux bancs de grès jaunes de 10 cm à 70 cm, surtout à la base, au milieu et au sommet plus ou moins distant parfois subordonnés et pouvant constituer des séries puissantes de 15 à 20 m qui, lorsqu'elles affleurent isolément en surface, sont bien difficiles à séparer des grès Tortoniens F (Doumergue ,1924).

En dehors de la limite de notre bassin, la plus grande épaisseur de 235 m est constatée au niveau du forage " Hopital TL5", sur un alignement du SSO vers le NNE, le forage "Sidi Othmane" a traversé une épaisseur de 68 m, celui de "Saf Saf F2 " une épaisseur de 24 m, et forage "Ouzidane I" une épaisseur de 14 m.

8-Grès tortoniens (m³) :

Ce sont des grès fissurés jaune d'or ou citron avec, par endroit de minces passées marneuses. Ces grès sont durs, mal lités, parfois peu consolidés et subhorizontaux, à éléments siliceux fins à moyens. Localement, ce Tortonien peut avoir des faciès différents : argiles plus ou moins sableuses (Hayane, 1983)

En dehors de la limite Ouest de notre bassin versant, cette formation à une épaisseur d'environ 73 m.

Les grès du Tortonien n'ont une épaisseur notable que près des reliefs ; donc ils sont aquifères dans la masse, lorsqu'ils sont durs, deux porosités leurs sont conférées d'interstices et de fissures.

9-Travertins anciens et récents (T) :

D'imposants dépôts disposés en terrasses et s'avancant en hautes falaises à pic aux abords des grandes sources disparues ou actuelles originaires des formations jurassiques, peuvent atteindre 60 m de puissance.

10-Alluvions anciennes des vallées et cuvettes des plateaux (q¹) :

Dépôts caillouteux et limoneux du fond des vallées et dépôts de ruissellement sur les plateaux et pentes.

11-Eboulis et dépôts de pentes (a) :

Très souvent formés des éléments de désagrégation des dolomies et calcaires du Kimméridgien et du Tithonien et des grès de l'Oxfordien.

12-Tufs calcaires (a^t) :

Très développés auprès des grandes sources qui sortent des formations calcaréo-dolomitiques du Kimméridgien et du Tithonien.

13-Alluvions récentes (a²) :

Dépôts caillouteux et limoneux, nivelant les parties basses des plaines aux abords des cours d'eau.

14-Terrains inondés en hiver (a³)

Tableau 15. Formations traversées par l'ensemble des forages dans la région d'étude avec leurs épaisseurs (en mètre)

Forages & N°	Sidi Othmane	Ouzidane I	Saf Saf bis	GUT	Ksar Ech Chaera	El Koudia	Tizi- Ain Fezza	Chetouane II	Saf Saf F2	Siege Wilaya	Hôpital	Villa marguerite	Birouana
Formations traversées	16	1	4	12	11		6	18	5	13	2	15	10
Terre Arable/Alluvions	-	-	6	2	-	-	-	-	4	-	7	1	5
Grès tortoniens (m³)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73	-	-
Marnes et grès du Serravallien (m²)	68	14	24	-	-	-	-	-	24	-	235	-	-
Poudingues (m^{1p})	-	26	-	-	-	-	-	-	3	-	5	-	-
Dolomies de Terny et calcaires de Lato (J⁷)	124	-	-	-	-	-	-	140	28 (N-A)	-		-	-
Marno-calcaires (J⁶)	104	-	-	-	-	-	50	20	-	-		-	-
Dolomie de Tlemcen (J^{5b})	180 (N-A)	220	271	208	11	205	110	260	-	-	110 (N-A)	-	115 (N-A)
Calcaires de Zarifet (J^{5a})			(N-A)	(N-A)									
Grès de Boumediene (J⁴)	-	53 (N-A)	-	-	39 (N-A)	245 (N-A)	90 (N-A)	80 (N-A)	-	250 (N-A)	-	249 (N-A)	-

N-A : formation de la base du forage nom achevée

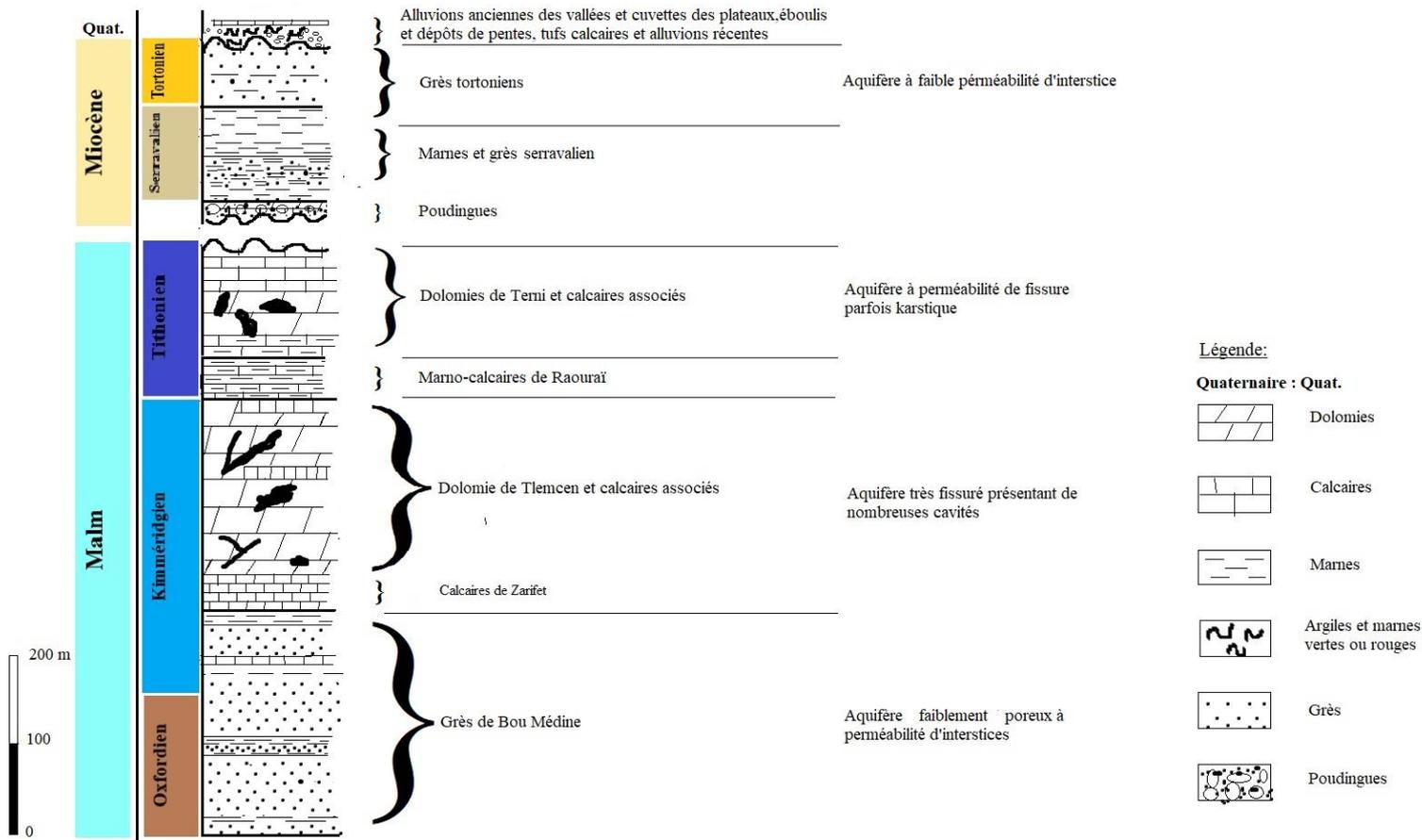


Figure 21. Colonne lithostratigraphique du bassin versant de l'oued Saf Saf,

I-7-2 Structurale du bassin versant

Un essai d'élaboration de la carte des linéaments du bassin versant à l'aide du traitement de l'image satellitaire par l'ENVI, n'a pas donné des résultats satisfaisants en raison de la majeure partie du terrain recouverte par les terrains mio-plio-quaternaires souples et l'urbanisation et la végétation sur presque la totalité de la zone d'étude

Notre zone d'étude correspond structurellement à la zone « effondrée » de Tlemcen faisant partie du même ensemble effondré que la plaine de Maghnia dont elle est séparée par le djebel Tefatisset-Boudjlida-Oujlida et Ain El Hout, à la suite de jeu d'accidents SO-NE. Les formations carbonatées du jurassique s'annoient sous les dépôts mio-plio-quaternaires qui

deviennent en général de plus en plus épais vers le nord dans les piémonts des monts de Tlemcen. Cette structure a été relevée par des prospections géophysiques et confirmée par les résultats des forages (Bensaoula, 2007) (Figure 22).

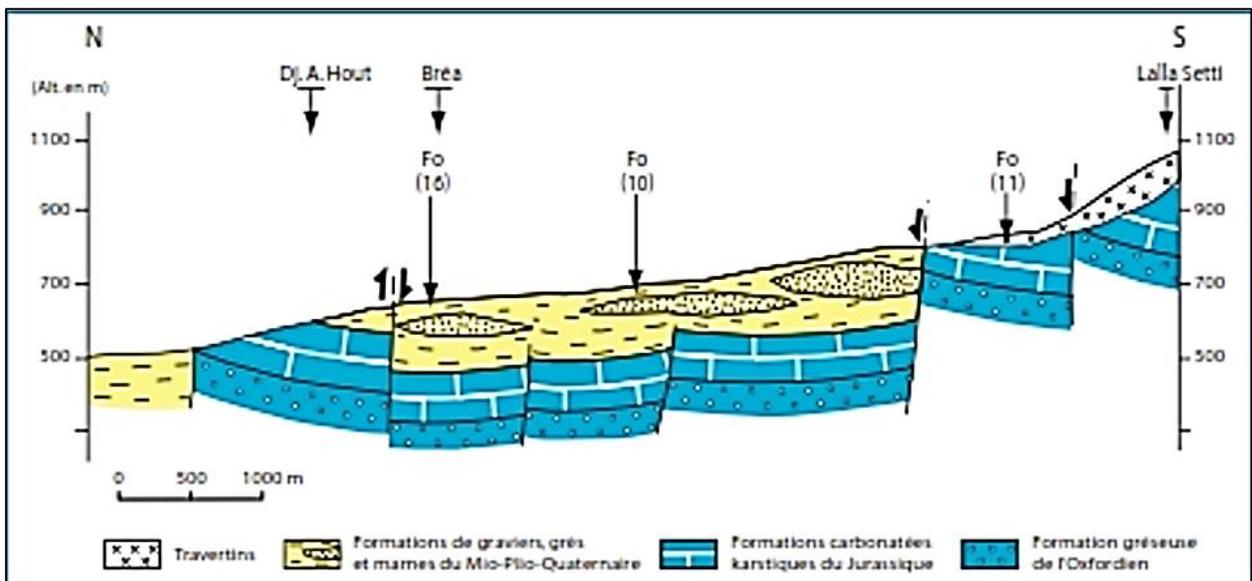


Figure 22 Coupe géologique simplifiée de la région de Tlemcen (Bensaoula, 2007)

La figure 23 nous donne une esquisse de failles tirée de la carte lithologique de la région de Tlemcen 1/100 000 de Concaret et Clair 1973 ; Nous constatons une certaine concordance entre les directions (généralement NO-SE et NE-SO) des failles illustrées ci-dessus avec ceux des grands structures régionales (Figure 17).

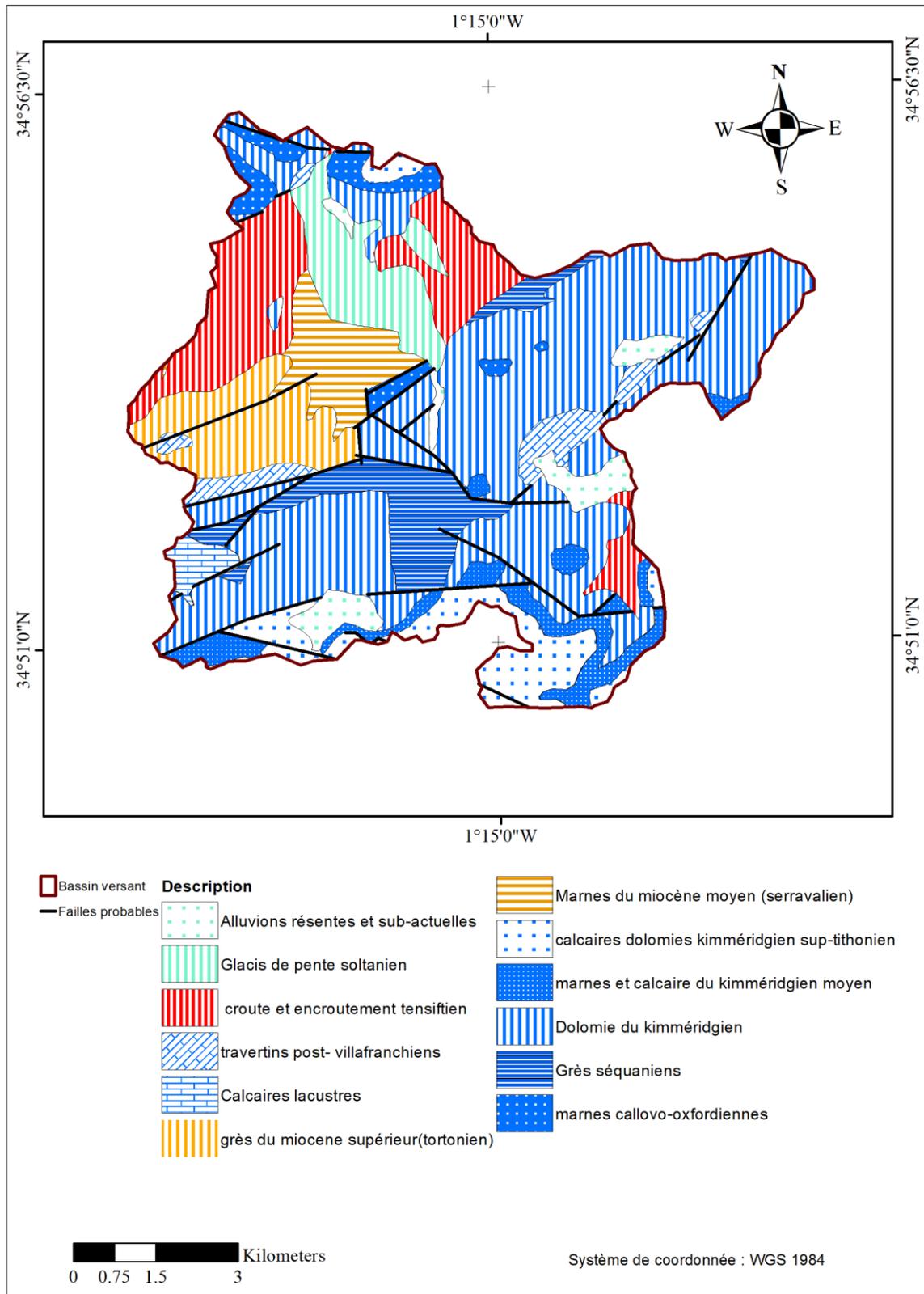


Figure 23. La carte litho-structurale du bassin versant de l'Oued Saf Saf (d'après Concret et Clair, 1973)

PARTIE II

**CHAPITRE II. CARTOGRAPHIE DE
LA VULNERABILITE**

Le bassin versant de l'oued Saf Saf, qui s'étend sur une superficie de 77.9 km², est composé d'un ensemble d'aquifère karstique ; les dolomies de Tlemcen et celle de Terry. La méthode COP sera utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité de cette zone, il s'agit d'une méthode qui a prouvé son efficacité à travers certains aquifères karstiques en zone méditerranéenne (Italie, France et Espagne). Ce choix de méthode a été fait sur la base de notre objectif qui est d'élaborer une carte de vulnérabilité à l'aide de la méthode COP dans un bassin versant, en méditerranéen.

II-1 Description de la Méthode COP :

En se référant sur le rapport final COST620 de 2003, un détail sera donné sur les différentes étapes pour parvenir à déterminer l'indice de vulnérabilité de COP.

La méthode repose essentiellement sur deux principes : le déplacement du contaminant vers l'aquifère est régie par l'eau, ensuite le contaminant s'infiltré depuis la surface du sol via les précipitations.

L'indice de vulnérabilité $COP = C (\text{indice}) * O (\text{indice}) * P (\text{indice})$.

Avec C : concentration de flux, O : les couches sus-jacentes, et P : précipitations.

- **Facteur O :**

Ce facteur fait intervenir deux sous-facteurs ou couches ; le sol (OS), et la lithologie (OL). La couche OS, est caractérisée par la fonction d'autoépuration. Elle est évaluée à partir de la texture et de l'épaisseur des formations. La texture est classée en quatre catégories ; argile, sable, limon et reste. Chacune des classes, est déterminées à partir de pourcentage d'éléments (Figure 24 tableau I). L'épaisseur est subdivisée en 3 classes. Le sous facteur Os est obtenu, par interpolation des textures et épaisseurs (tableau II de la figure 24).

La couche (OL) est caractérisée par la capacité d'atténuation (réduction de la concentration du contaminant) des différentes couches de la zone non saturé. Trois paramètres sont mis en évidence pour son évaluation : la lithologie/fracturation (ly), l'épaisseur des couches (m) et le confinement de l'aquifère (cn). Le premier est évalué à partir d'un tableau (Figure 24 tableau III), basé sur les propriétés hydrogéologiques telles que la porosité efficace, la conductivité hydraulique et la fracturation. Le (cn), est évalué à partir du tableau V de la figure 24. Plus un aquifère est confiné plus il est protégé.

Ensuite, un indice de couches est aussi nécessaire. Il est déterminé par la somme des produits de l'épaisseur avec les caractéristiques lithologiques $[\sum (ly.m)]$. Puis cette valeur sera convertie à travers les valeurs du tableau IV de la figure 24 pour limiter la valeur maximale. Les valeurs d'OL, sont obtenus par multiplication de l'indice des couches avec le confinement de l'aquifère ($OL = \text{indice des couches} * cn$). OL est un nombre compris entre 1 et 10. Dont la valeur 10 signifie un degré de protection maximum.

Enfin, l'indice final du facteur O est obtenu en additionnant les deux sous facteurs OS, OL ($O = OS + OL$). La valeur obtenue, varie entre 1 et 15, avec 1 qui représente un degré de protection le plus faible, et 15 plus élevé. L'indice final O de protection est subdivisé en cinq niveaux de sévérité. Plus faible à très élevé (Figure 24 tableau VI).

- **Facteur C :**

Ce facteur est pris comme coefficient correcteur du facteur O, d'après Daly *et al* (2002). C'est à dire un facteur de réduction du facteur de protection O. On peut distinguer deux types de scénarios ; un premier scénario qui met en évidence l'infiltration directe de l'eau, une infiltration concentrée (infiltration rapide), à partir d'élément karstique (Swallow hole (aven) et/ou Sinking streams (perte de rivière)), et un deuxième scénario, caractérisé par une infiltration diffuse à partir des zones qui ne sont pas fortement karstifiées et qui ne sont pas en contacte directe avec la zone saturée.

- **Scénario 1 :**

A ce niveau, trois sous-facteurs sont nécessaires pour évaluer le facteur C ; La distance par rapport au « swallow hole » (dh), la distance par rapport au « sinking streams » (ds), la pente et la végétation (sv), ($C = dh * ds * sv$). Les valeurs du premier sous facteur sont données par le tableau VII de la figure 24. Plus la distance est élevée plus alors la protection sera élevée. Le sous facteurs (ds) est évalué à travers le tableau VIII. Ensuite la pente et la végétation est évalué à partir du tableau IX. Plus la pente est élevée, moins la végétation est dense et plus la protection est faible et donc (sv) inférieure à 1.

- Scénario 2 :

L'aquifère n'est pas alimenté directement. Le facteur C'est alors, évalué à partir de ces deux variables qui sont : caractéristiques de surface (sf), la pente et végétation (sv), avec $C = sf * Sv$. Les caractéristiques de surface (sf) indiquent les propriétés géomorphologiques des roches carbonatées et la présence ou absence de couche perméable ou imperméable (Tableau X de la figure 24). L'évaluation de la pente et de la végétation se fait différemment que pour ceux du scénario 1. Ici plus la pente est abrupte, et que la végétation est absente, le ruissellement est favorisé par rapport l'infiltration et donc la protection du facteur O ne sera pas réduite (tableau XI figure 24).

Dans les deux scénarios les valeurs du facteur C, varie entre 0 et 1, avec cinq classes de niveau de réduction de la protection (tableau XII, figure 24).

• Facteur P :

Les facteurs O et C fournissent les caractéristiques du sol qui influent sur le transport des contaminants, tandis que le facteur P fait référence à la disponibilité de l'eau pour transporter le contaminant. C'est aussi un facteur qui modifie la protection de l'aquifère. Pour évaluer ce facteur, deux variables sont nécessaires ; la quantité de pluie et de l'intensité des précipitations.

Le sous-facteur Quantité de pluie [P_Q] décrit l'effet de la quantité de pluie et de la recharge nette annuelle qui en résulte sur la vulnérabilité des eaux souterraines. Deux aspects doivent être pris en considération : le temps de transit et la dilution. L'augmentation de la hauteur des précipitations entraîne une diminution du temps de transit et une augmentation de la dilution. Cependant, la réduction du temps de transit signifie une augmentation de la vulnérabilité, tandis que l'augmentation de la dilution signifie une diminution de la vulnérabilité.

Les valeurs moyennes annuelles des précipitations sont réparties en cinq intervalles (Figure 24 tableau XIII), chacun avec une valeur qui dépend du temps de transit du contaminant potentiel et de la capacité de dilution. Ces données sont les valeurs moyennes d'une série d'années humides, ces dernières étant définies comme des précipitations.

Pour estimer le sous-facteur P_I, deux variables ont été prises en compte : la moyenne annuelle des précipitations pour les années humides et le nombre moyen de jours de pluie (au cours

d'une année humide). P_I = Précipitations annuelles moyennes (mm)/Nombre moyen de jours de pluie.

Des valeurs sont attribuées pour le P_I à travers le tableau XIV de la figure 24. La valeur assignée au sous-facteur (P_I) suit le critère selon lequel une intensité plus élevée provoque une recharge plus élevée et donc la protection de la ressource est réduite. Des précipitations plus intenses produisent plus de ruissellement vers les conduites qui favorisent une infiltration concentrée. Si l'intensité des précipitations est faible, l'infiltration est plus diffuse et plus lente, et la probabilité d'autres processus, comme l'évapotranspiration, est plus élevée. Cela finit par produire un volume de recharge plus faible. Le facteur $P = P_Q + P_I$, la valeur est comprise entre 0.4 à 1, divisé en cinq niveaux de réduction de la protection (Tableau XV, figure 24).

- **Indice de vulnérabilité finale la méthode COP :**

L'indice de vulnérabilité final COP est obtenu par multiplication des trois facteurs, O, C, P. les valeurs varie entre 0 et 15 et subdivisé en classe de vulnérabilité (tableau XVI, figure 24).

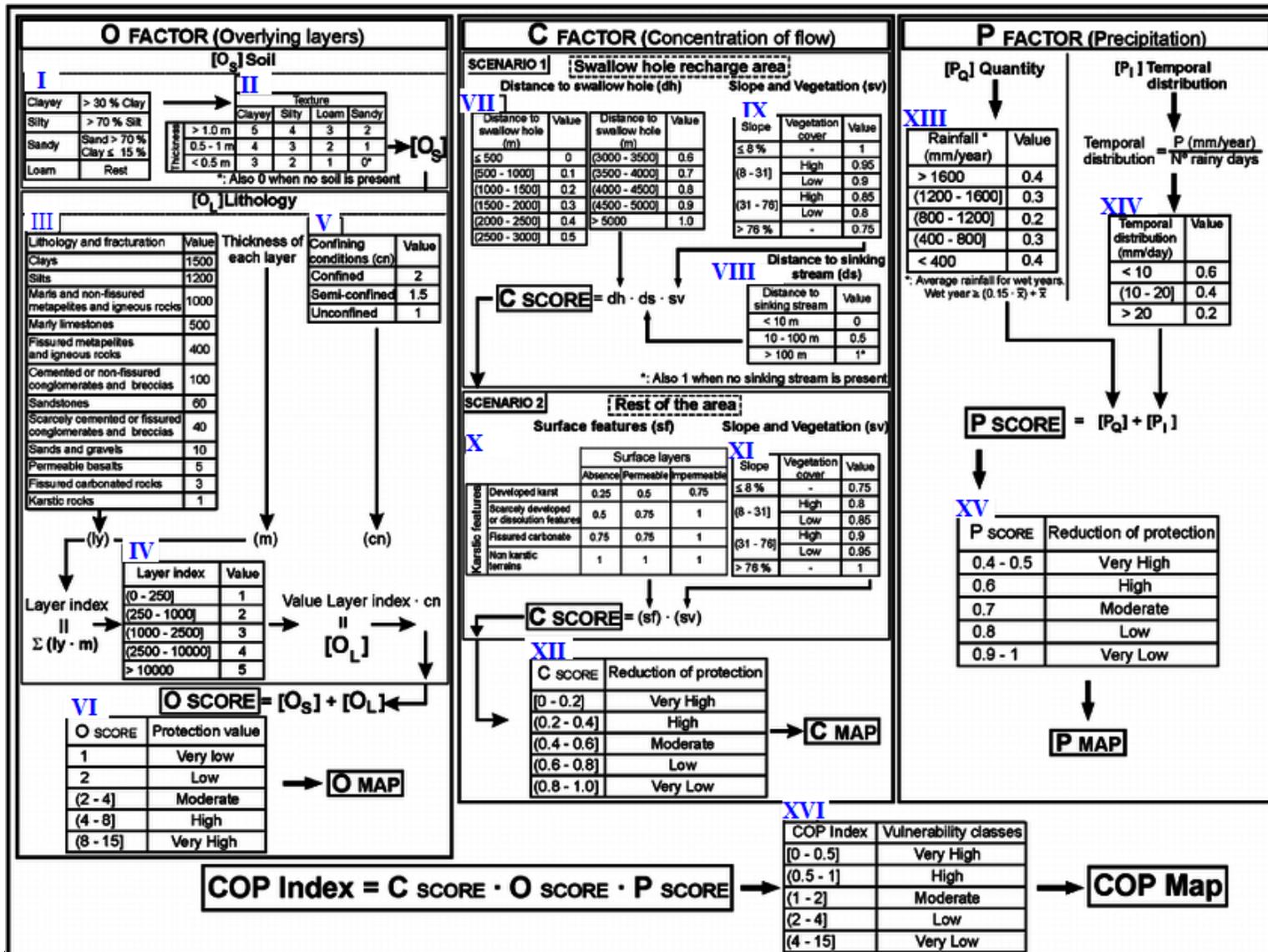


Figure 24 : Diagramme de la méthode COP, montrant la différenciation entre les différents facteurs C, O et P (Cost620, 2003)

II-2 Résultats et discussions

L'application de la méthode COP aux aquifères carbonatés du bassin versant de l'oued Saf Saf est résumée dans le tableau 16, qui présente les valeurs choisies des différents paramètres, en fonction des valeurs standard fournies par la méthode (Figure 24).

Tableau 16: Valeurs attribuées aux facteurs de la méthode COP et des variables dans la zone d'étude

Facteur	Sous facteur		Variable	Valeur
C	Scénario 2	Eléments de surface (sf)	Karst développé & découvert	0,25
			Karst à peine développé & non couvert	0,5
			Roches carbonatées fissurées & non couvertes	0,75
		Pente & végétation (sv)	Pas de terrains karstiques	1
			≤8%	0,75
			8-31% avec végétation	0,8
			8-31% sans végétation	0,85
			31-76% avec végétation	0,9
			31-76% sans végétation	0,95
O	Sol (O _s)	Texture et épaisseur (O _s)	Pas de sol	0
			Reste 0,5-1 m	2
			Argileux 0,5-1 m	4
			Argileux >1 m	5
	Lithologie (O _L)	Lithologie et fracturation (I _y)	Argiles	1500
			Limons	1200
			Marnes	1000
			Marno-calcaires	500
			Grès	60
			Roches carbonatées fissurées	3
			Formations karstiques	1
	Conditions de captivité (cn)	Semi-captive	1,5	
		Libre	1	
P	Quantité (P _Q)	800-1200 mm/an	0,2	
		400-800 mm/an	0,3	
	Intensité (P _I)	<10 mm/jour	0,6	

Nous présentons dans la figure 25 les différentes opérations entre l'ensemble des rasters (sous facteurs et facteurs) ayant tous des mailles de taille (50 m,50 m) définie avant la création de chaque raster pour uniformiser la taille des cellules qui doivent accueillir les

différentes valeurs (Tableau 16), qui seront utilisées pour les opérations citées précédemment. Le logiciel utilisé pour effectuer ces étapes est le ArcGIS.

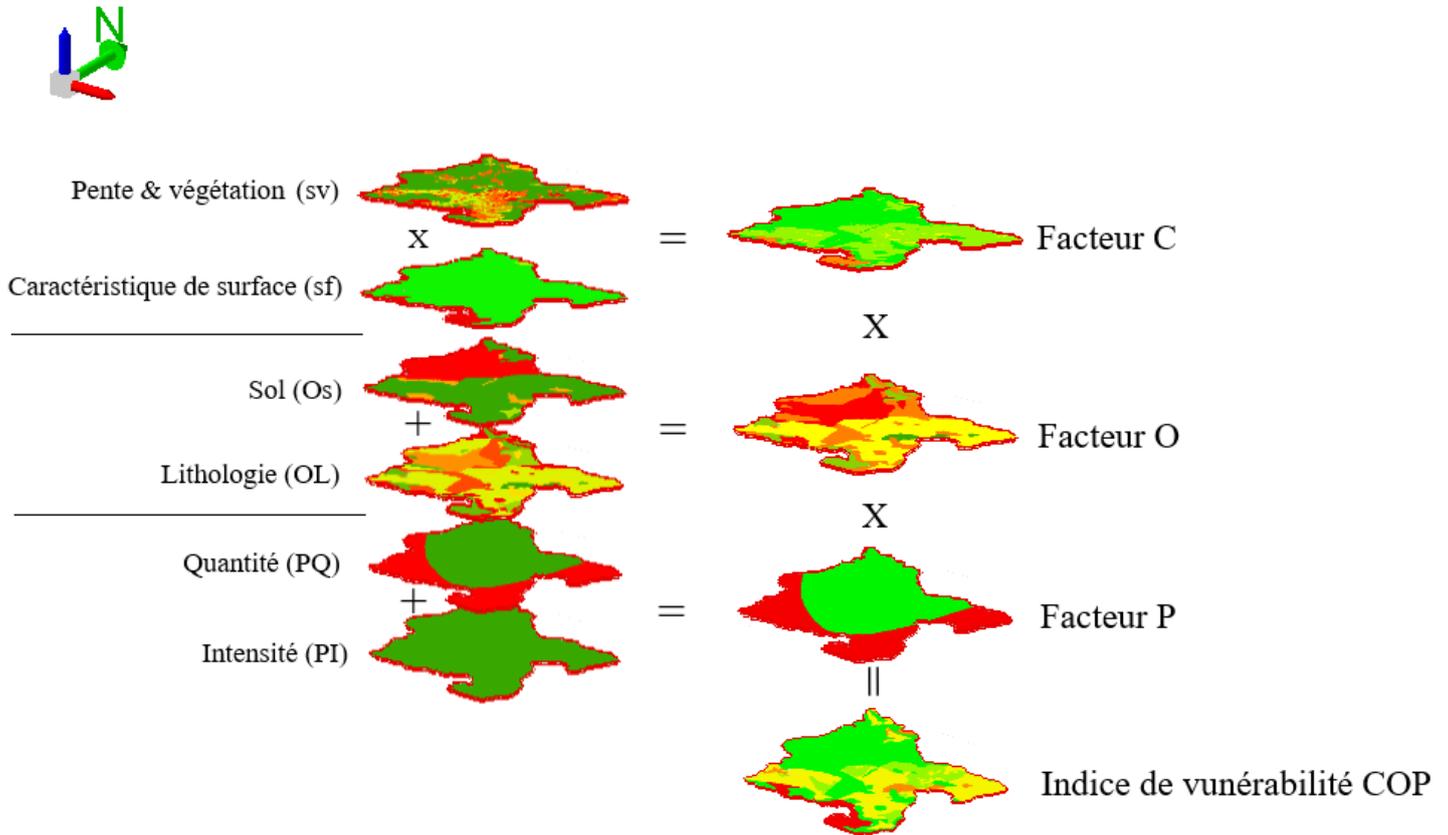


Figure 25. Schéma simplifié des différentes étapes suivies pour aboutir à la carte de vulnérabilité de la méthode COP

II-2-1 Facteur C

La carte du facteur C restitue la vulnérabilité du bassin versant selon le type d'infiltration qui prédomine. L'infiltration dans une zone karstique peut se faire de façon diffuse sur l'ensemble du bassin versant et/ou de manière concentrée à travers les avens parfois alimenter par des rivières (perte de rivière), il s'agit des zones à infiltration rapide. D'où l'existence de 1 scénarios. Tandis que le scénario 2 s'intéresse aux zones où des caractéristiques de surface d'un karst n'ont pas été identifié c-à-dire le reste de la zone. Pour chaque scénario le facteur C présente une équation, respectivement :

$$C = dh * ds * sv \quad \text{Equation 1}$$

$$C = sf * sv \quad \text{Equation 2}$$

Où, dh : distance par rapport aux caractéristiques d'un karst ;

ds : distance par rapport aux rivières souterraine ;

sv : pente et végétations ;

sf : surface features.

Dans notre zone d'étude présente une absence de zones d'infiltration rapide, donc nous avons opté pour le scénario 2 :

- **Pente et végétations (sv)**

Nous avons extrait la carte des pentes en pourcentages et reclassifiée par la suite en catégories telle que l'indique la méthode (Figure 24) à l'aide du logiciel ArcGis à partir du SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). En se référant aux images satellitaires (Landsat 8) traitées à la composition coloré (4,3,2) par l'ENVI, couplée à la carte d'occupation des sols de la région de Tlemcen (1/100000) et comparées aux images haute résolution de Google Earth nous avons pu déterminer et différencier deux zones au sein du bassin versant, l'une comportant tout partie n'ayant « pas de végétations » (ou très peu développée) et l'autre comportant de la « végétations ». La carte finale résultante de l'association de la carte des pentes et celle des végétations est montrée à la figure 26.

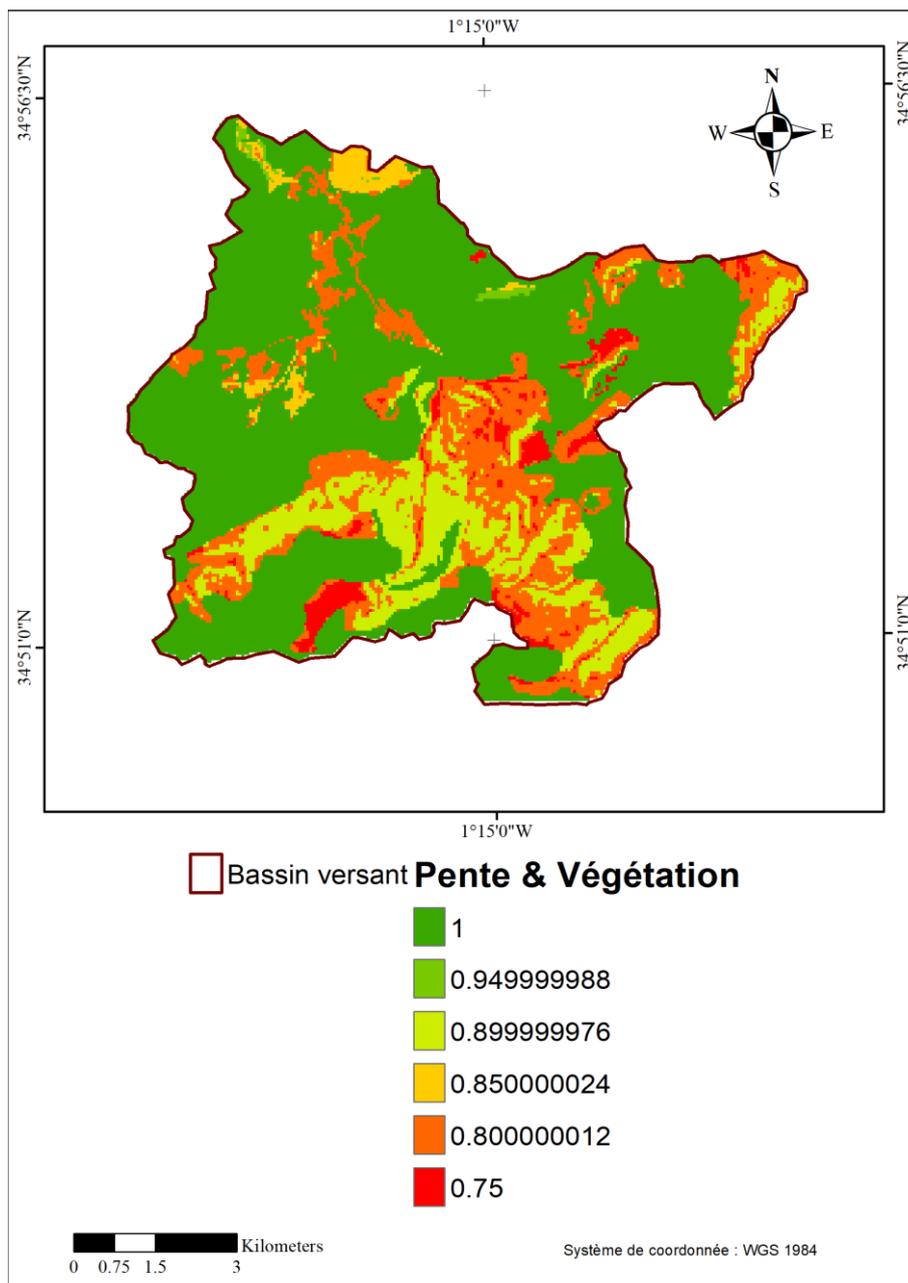


Figure 26. Sous facteur pente et végétation (sv)

Dans ce cas de figure, l'évaluation de la végétation et de la pente est effectuée dans le sens opposé à celui effectué à l'intérieur du bassin versant d'un « swallow hole » (COST620). Donc plus la pente est raide et une végétation absente plus le ruissellement est favorisé par rapport à l'infiltration, ce qui a pour conséquence de ne pas altérer la protection offerte par le facteur O.

- **Caractéristiques de surfaces (sf)**

Le paramètre sf (Figure 27) indique les caractéristiques géomorphologiques des formations carbonatées et la présence ou l'absence d'une couche (perméable ou imperméable) au-dessus de ces matériaux qui détermine l'importance des processus de ruissellement et/ou d'infiltration (COST620). La procédure pour l'attribution des valeurs pour ce paramètre est montrée dans la figure 24.

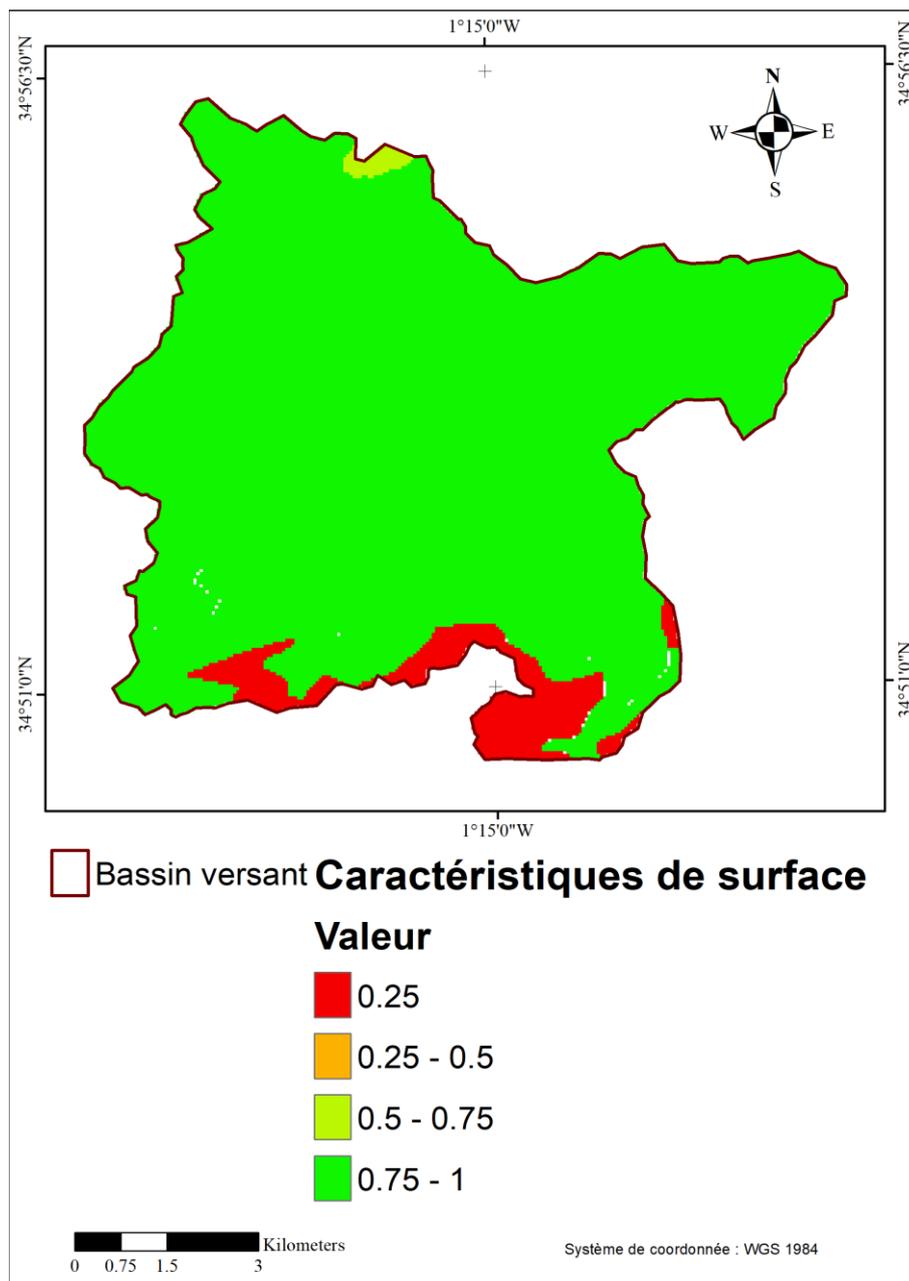


Figure 27. Sous facteur Caractéristiques de surfaces (sf)

La figure 28 montre la carte du facteur C issue de la multiplication de sv et sf. Sur cette carte nous avons trois zones distinctes qui se dessinent, une occupant la partie du bassin miocène qui indique une très faible réduction de la protection de la part du facteur de correction C. Cette faible réduction est due à un karst peu ou pas assez développé et surtout aux couches (imperméables) protectrices le plus souvent marneuses.

L'autre zone correspond surtout aux escarpements situés juste au sud du bassin miocène. On dénote en général une faible réduction de la protection dans cette partie avec quelques rares apparitions de zones ayant une réduction modérée de la protection. C'est une conséquence des formations carbonatés fissurées qui affleurent dans la zone, associées à un jeu de variations des pentes et de la présence ou pas de la végétation.

Et enfin la zone située tout au sud du bassin versant où on remarque une grande (par endroit très grande) réduction de la protection, conséquence des formations calcaréo-dolomitiques caractérisée par une karstification assez développée.

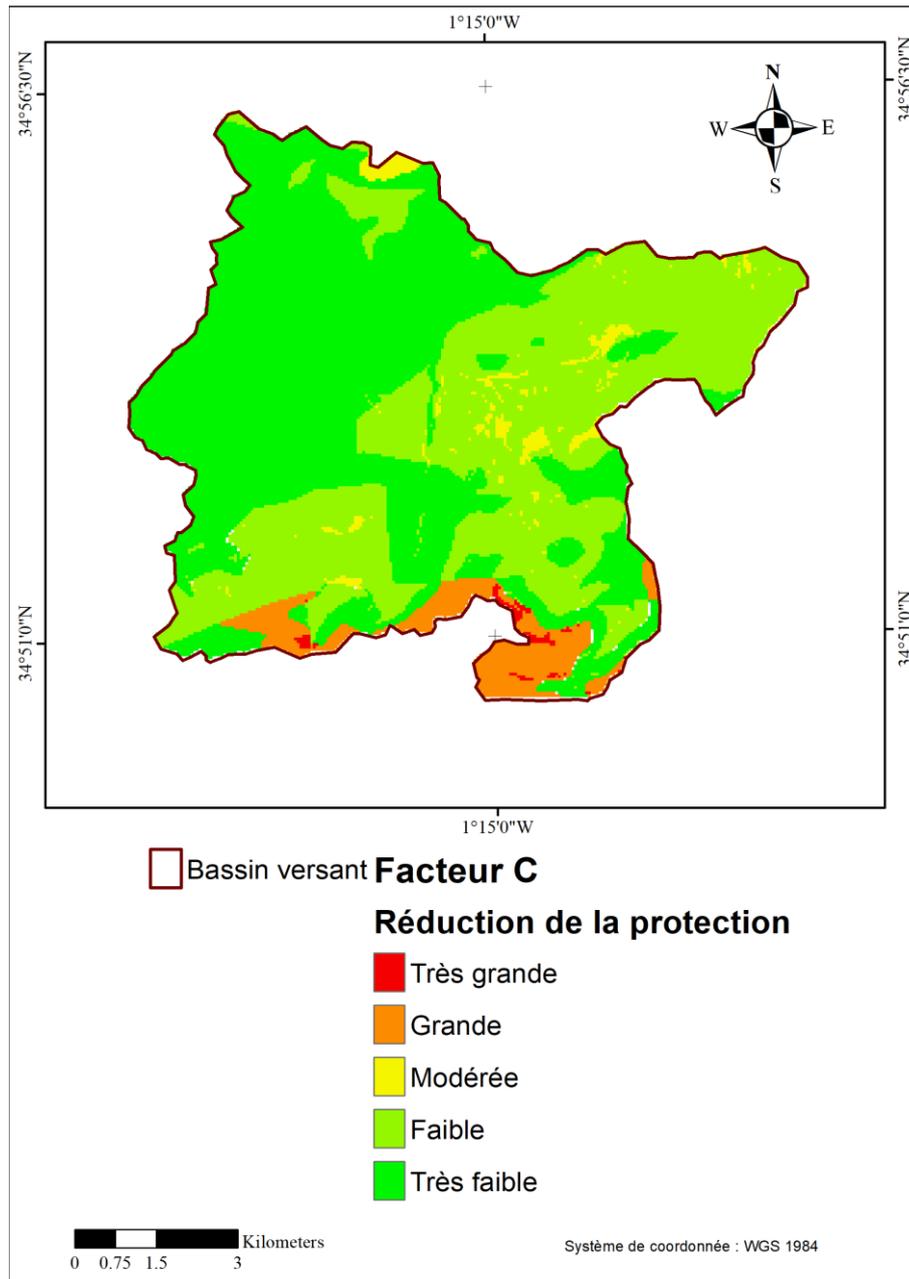


Figure 28. Carte du facteur C

II-2-2 Facteur O

La carte du facteur O (Figure 31), représente la somme des deux sous-facteurs en relation avec les couches sus-jacentes à la zone saturée, à savoir la texture du sol (O_s) reposant sur les formations rocheuses en d'autres termes la lithologie (O_L).

- **Sous facteur Os**

La carte Os (Figure 29) a été élaborée à partir de la lithologie, qui a servi à déduire les dérivés de sols possibles pour une zone donnée, de 7 logs de forages dispersés dans le bassin versant ont permis de confirmer les déductions préétablies le reste des logs de forages ont été utilisé pour confirmer une certaine continuité latérale des sols et aussi à partir des images satellitaires.

Quatre catégories de sol prédominent sur cette carte, la valeur « 5 » étant attribuée aux zones avec un sol argileux dépassant les 1m et la valeur « 0 » est attribuée aux zones à affleurements rocheux sans sol.

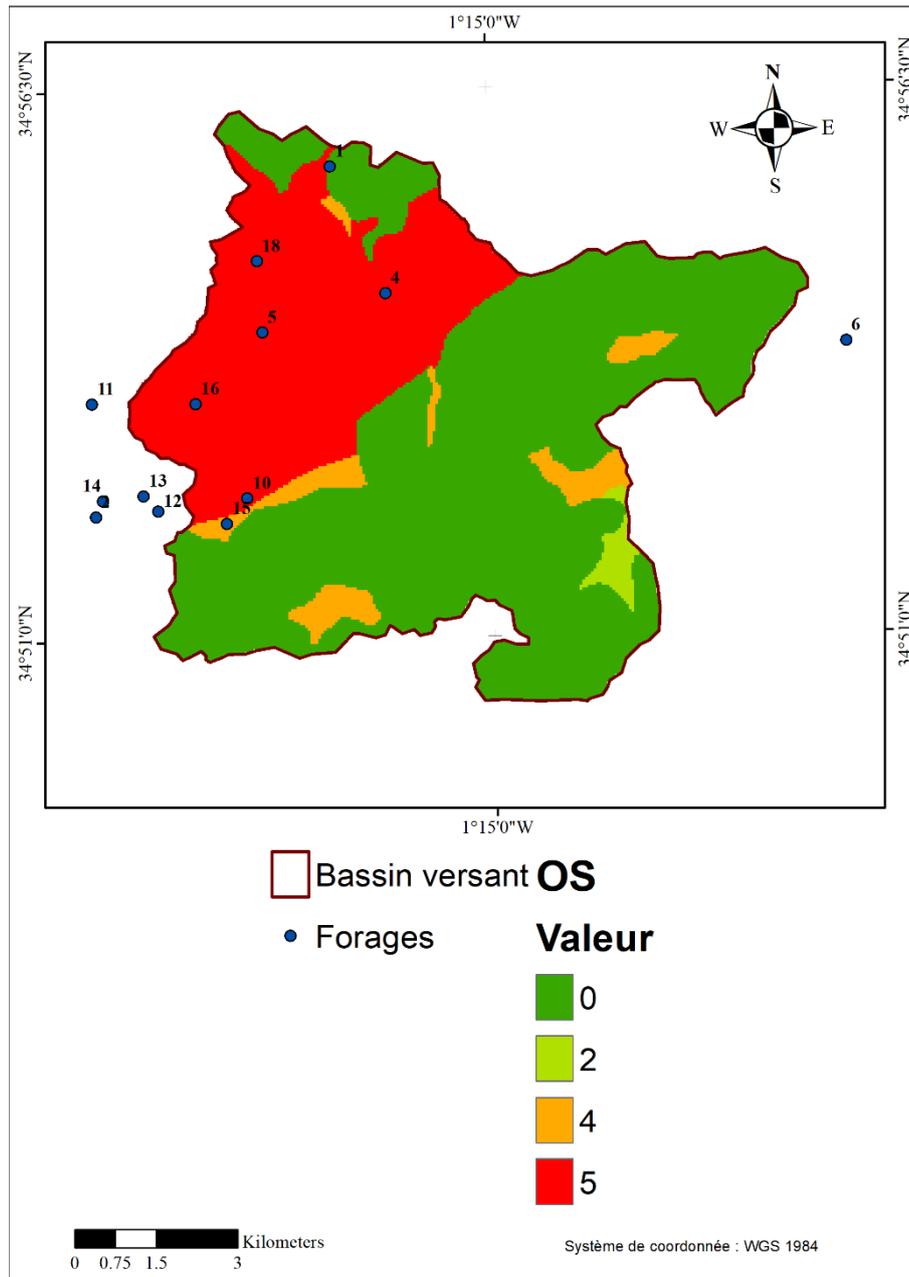


Figure 29. Carte du sous facteur OS

- **Sous facteur OL**

Le facteur OL (Figure 30) est le produit de l'indice de couche et du degré de confinement (cn). L'indice de couche est le produit du type de lithologie et de fracturation (ly) et de l'épaisseur de la zone non saturée. Les conditions de confinement sont identifiées pour chaque aquifère, notamment les principaux aquifères, en fonction des propriétés d'imperméabilité des couches sus-jacentes et sous-jacentes. La profondeur des eaux souterraines est principalement représentative de l'épaisseur de la zone non saturée dans des conditions statiques (Goettingen et Ballounh, 2012).

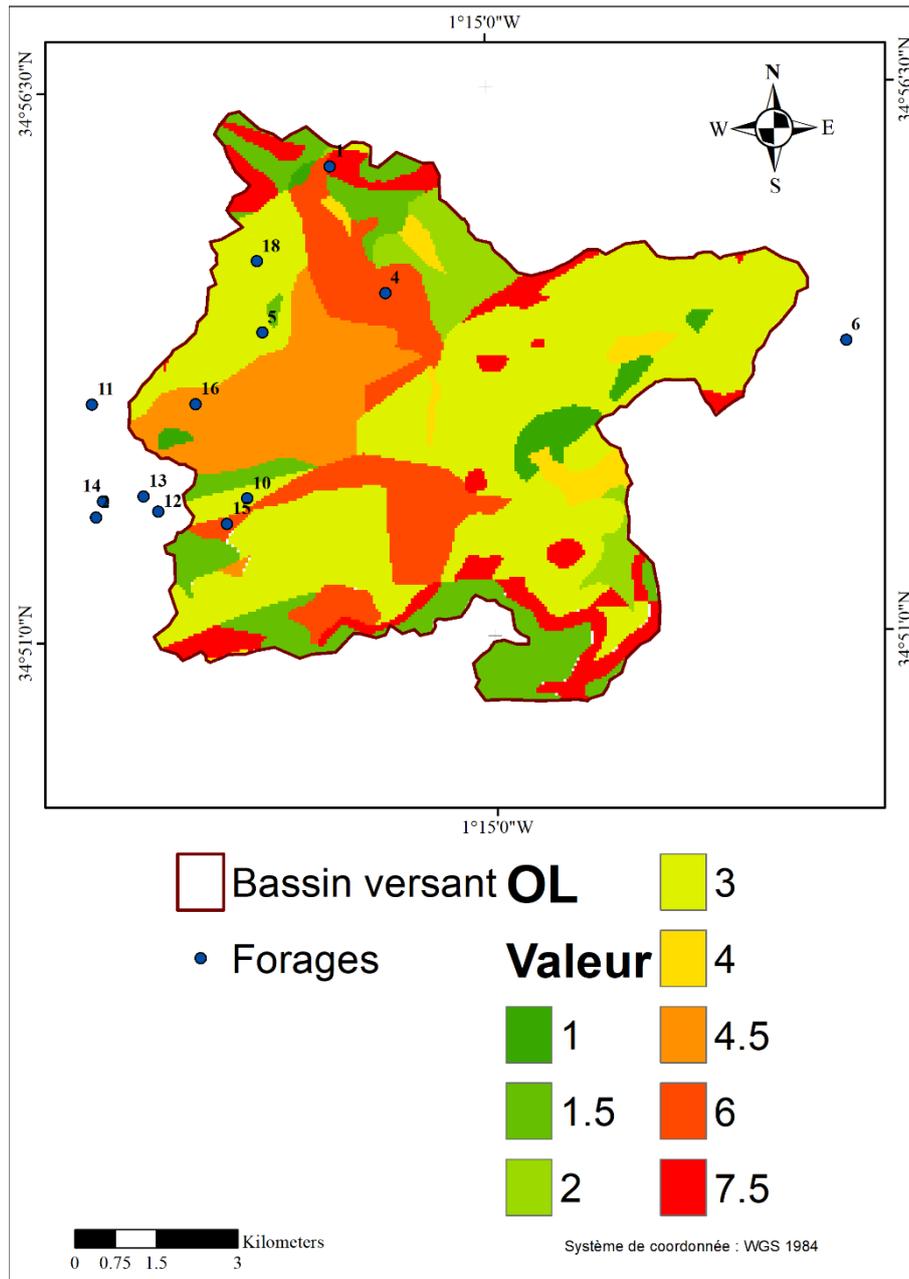


Figure 30. Carte du sous facteur OL

La partie Nord (bassin miocène) possède une grande voire très grande protection grâce aux formations peu perméable et aux sols qui sont en général argileux et relativement épais dans la zone.

La partie Sud correspondant aux escarpements de formations généralement carbonatées (fissurées et/ou karstique) possède une protection généralement moyenne, et à quelques rares endroits, faible à très faible.

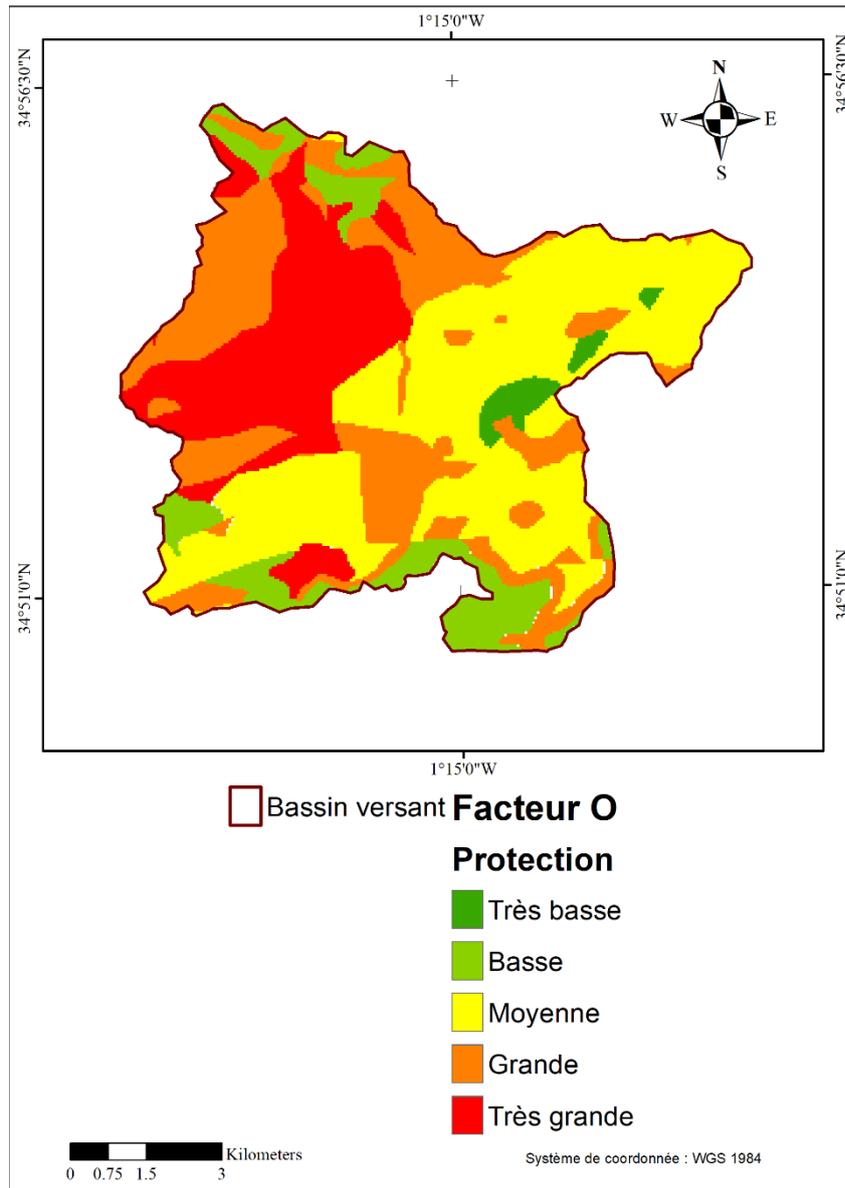


Figure 31. Carte du facteur O

II-2-3 Facteur P

La carte du facteur P (Figure 34) représente les conditions climatiques dans le bassin versant. C'est la somme de deux sous-facteurs (P_Q et P_I) définissant respectivement la quantité et l'intensité des précipitations annuelles.

- **Sous facteur P_Q**

Par manque de données locales nous avons dû utiliser les précipitations de quatre stations pluviométriques qu'on a ensuite interpolé pour couvrir l'ensemble du bassin versant. Nous avons utilisé les données pluviométriques d'une chronique de douze années (tableau 17). Pour calculer le sous facteur P_Q , nous avons déterminé la moyenne interannuelle (M) des

précipitations. Puis en utilisant l'équation ci-dessous, nous avons déterminé la valeur limites de précipitations au-dessus de laquelle doit se situer les précipitations d'une année pour qu'elle soit dite « année humide A_H ». Ensuite on a calculé la moyenne interannuelle des années humides des précipitations pour obtenir P_Q .

$$A_H = (0,15 * \overline{M}) + \overline{M}$$

Avec, \overline{M} est la moyenne interannuelle

Les valeurs de P_Q (Figure 32) ont été attribuées conformément aux indications de la méthode.

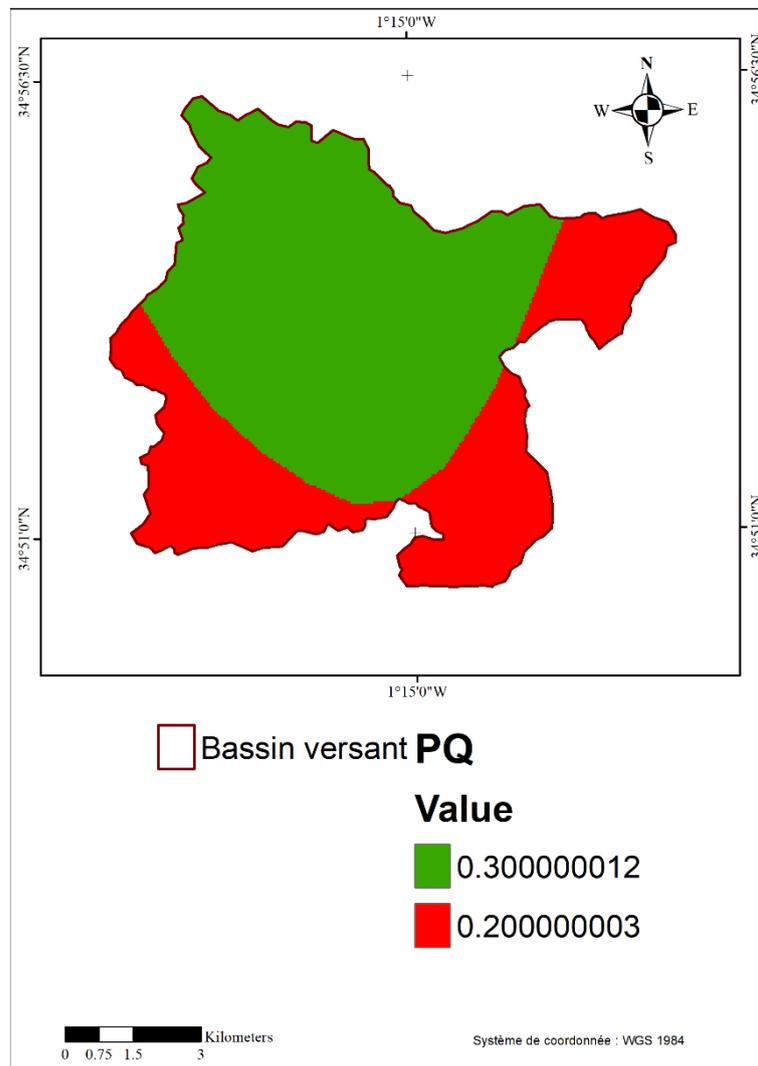


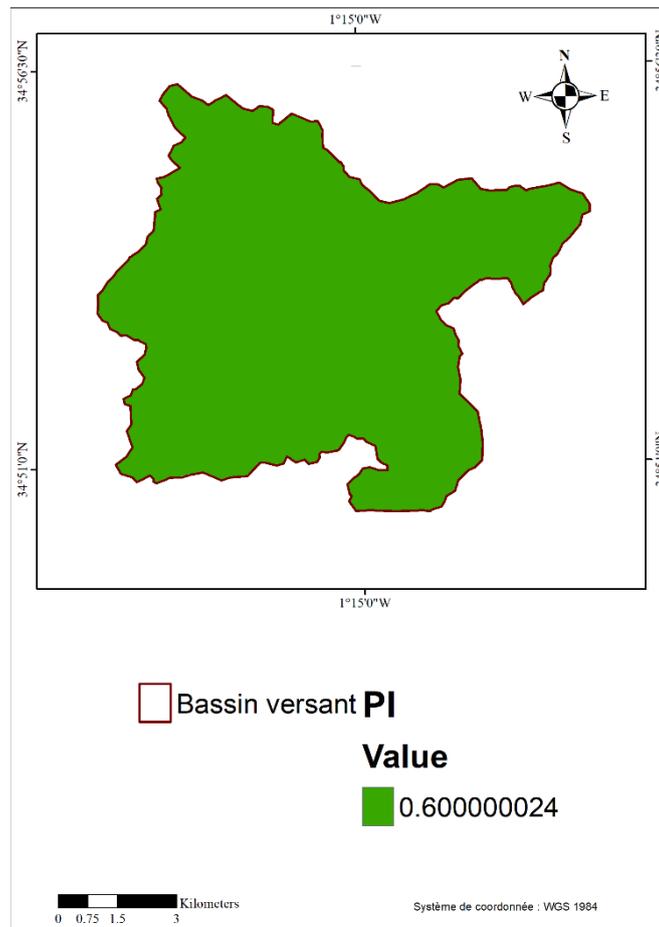
Figure 32. Carte du sous facteur (P_Q)

- **Sous facteur P_I**

L'intensité des précipitations (Figure 33) est le rapport entre la quantité de précipitations et le nombre de jours de pluie (pour une année humide : P_Q / nombre de jours de pluie ; figure 24)

Tableau 17. Récapitulatif des données du Facteur P

Années	Mefrouche	Sikkak	Sidi Abdellys	Zenata
	Total (mm/an)	Total (mm/an)	Total (mm/an)	Total (mm/an)
2004-2005	376.7	119.37	298.4	/
2005-2006	458.5	249.32	337.2	/
2006-2007	444	251.4	284.4	/
2007-2008	289.1	167.3	194.6	/
2008-2009	871.1	501.8	675.3	/
2009-2010	619.1	438.6	503.1	/
2010-2011	661.3	338	375.5	/
2011-2012	580.9	288.3	387.4	/
2012-2013	1144.9	532	642.7	/
2013-2014	750.2	299	513.314	/
2014-2015	631.1	389.8	507.9	/
2015-2016	564.4	236	306.9	/
Moyenne (M)	615.9416667	317.5741667	418.8928333	/
A_H (mm)	708.3329167	365.2102917	481.7267583	/
P_Q (mm)	922.0666667	430	568.4628	1219.4
P_I (mm)	9.313804714	4.257425743	5.413931429	7.918181818



Par rapport au Facteur P nous avons une faible à très faible réduction de la protection à cause d'une intensité relativement faible et de précipitations moyennes juste assez pour permettre un écoulement et une infiltration pas très important dans le bassin versant.

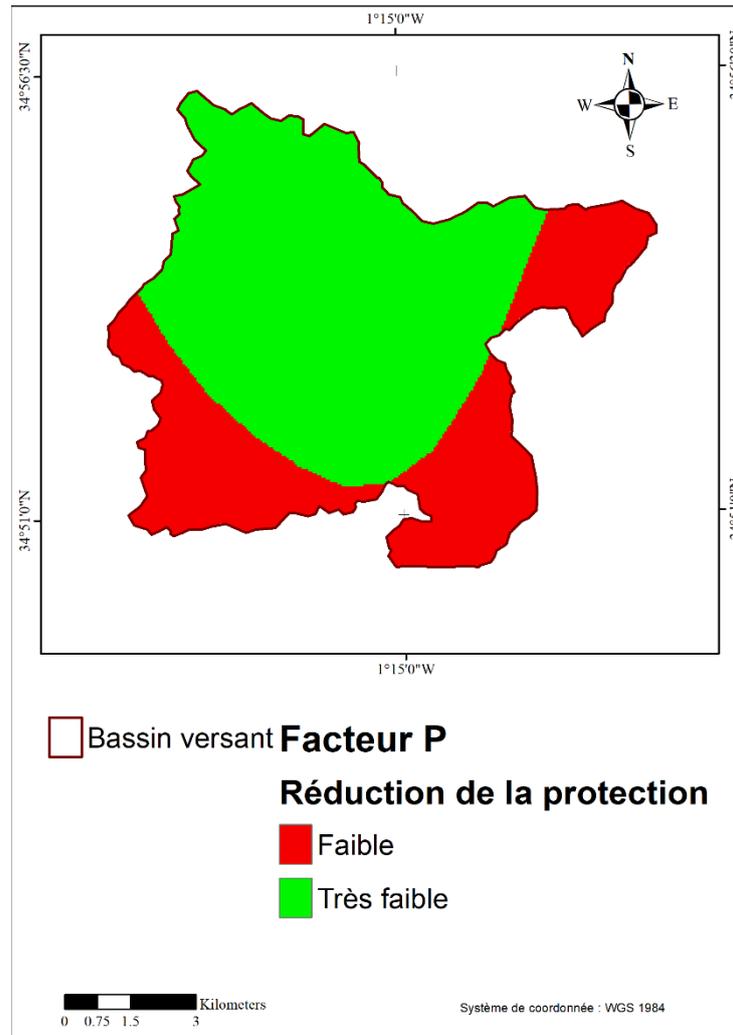


Figure 34. Carte du facteur P

II-2-4 Indice de vulnérabilité COP

Pour aboutir à la carte finale restituant l'indice de vulnérabilité de la méthode COP nous avons fait le produit des cartes des trois facteurs tels que l'indique l'équation suivante. La carte de vulnérabilité obtenue (Figure 35) a été reclassifiée en classes comme le veut la méthode (Figure 24).

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

Nous identifions cinq classes de vulnérabilité allant de très basse à très grande passant par faible, modérée et grande. Le facteur C semble avoir un grand impact sur l'indice de vulnérabilité calculé, car les valeurs attribuées aux zones fortement karstiques sont proches de zéro, ce qui a pour implication de réduire le poids de la multiplication (par ceux de la pente et de la végétation et par les deux autres facteurs (O et P) à une valeur presque nulle.

Nous avons deux classes de vulnérabilité qui occupent majoritairement la surface du bassin versant, ce sont les zones à vulnérabilité modérée et très faible avec respectivement **41,30 %** et **49,53 %** d'occupation de la surface. Les zones à faible vulnérabilité occupent **1,40 %** du bassin versant. Le reste du bassin versant présente soit une très grande soit une grande vulnérabilité (respectivement **4.80%** et **2.98%**).

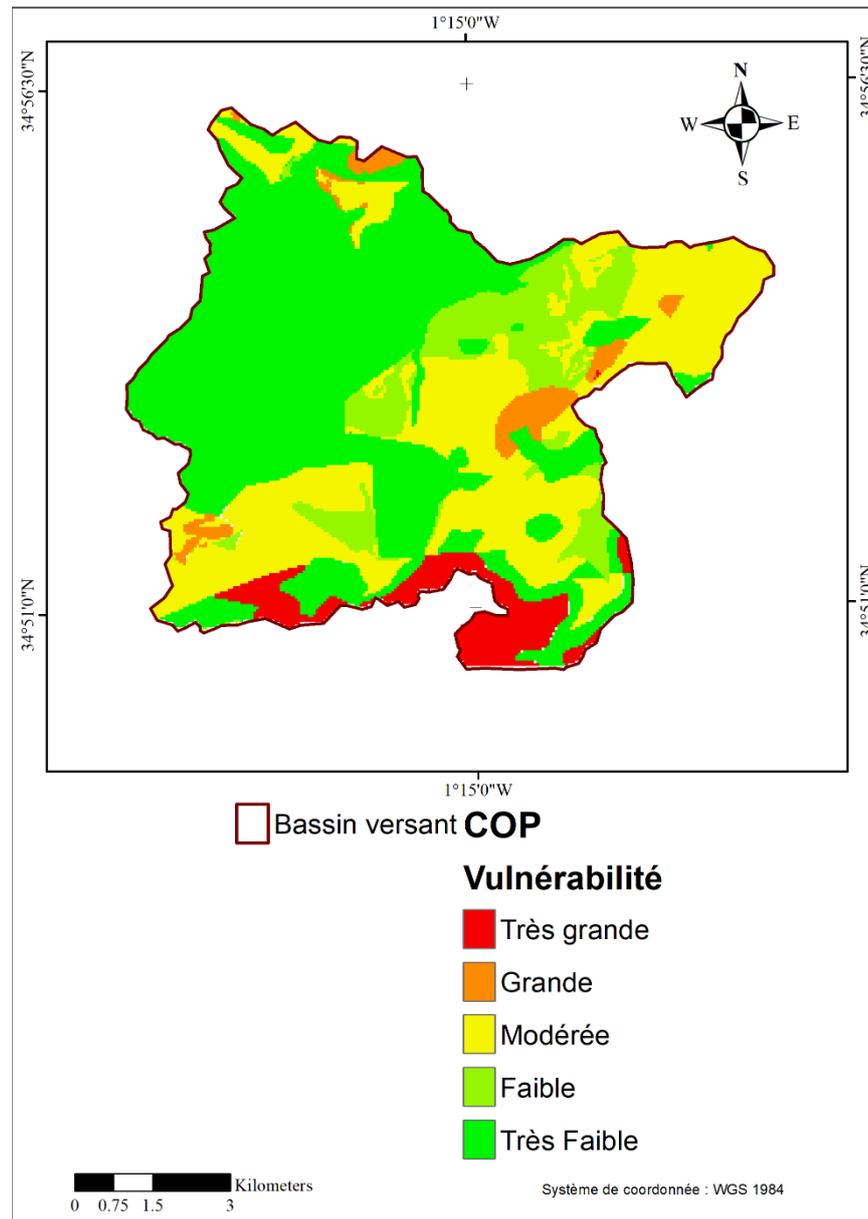


Figure 35. Carte de l'indice de vulnérabilité final COP

Conclusion :

Le présent mémoire visait à cartographier le degré de vulnérabilité intrinsèque des aquifères du bassin versant de l'oued Saf Saf, aquifères qui soutiennent presque la moitié de la production en eau de la région.

Nous avons dans un premier temps défini les concepts de pollution et de vulnérabilité ainsi que les différentes particularités qui leur sont propres, puis à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG) nous avons procédé à l'analyse et aux traitements des données diverses utiles pour la mise au point de la carte de vulnérabilité.

La carte de vulnérabilité offre une classification de l'ampleur de la vulnérabilité sur l'étendue de la zone d'étude. Cette carte est primordiale pour la préservation de la qualité des eaux souterraines et pour assurer une gestion durable de ces eaux.

La méthode COP a été utilisée avec succès pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines dans les aquifères karstiques des pays méditerranéens (Eleni-Anna et Eleni, 2018). Sans prétendre tirer des conclusions exhaustives, d'après les résultats de l'application de la méthode à notre zone d'étude, il est assez rassurant de constater un degré de vulnérabilité assez faible voir très faible pour la majeure partie de la superficie de la zone d'étude soit **50,93 %**. Toujours étant pas moins de **49,07 %** de la superficie présente une vulnérabilité modérée à très grande, ce qui laisse la place au doute quant à la sécurité des eaux souterraines dans ces zones.

Cependant avant de pouvoir utiliser cette carte de vulnérabilité à de fins d'aménagement de territoires il est nécessaire de valider les résultats à l'aides de traceurs chimiques (nitrates, pesticides) et/ou de traceurs artificiels sous différentes conditions hydrologiques. En dehors de la validation nous devons aussi faire mention de l'insuffisance des données disponibles et de leurs répercussions sur la carte de vulnérabilité. Une étude plus poussée et approfondie est donc nécessaire en vue d'obtenir des résultats fiables qui sont des plus fidèles à la réalité de la zone d'étude.

Références Bibliographiques :

Ablaoui, H. (2007). Structures et fonctionnement des trois émergences karstiques des Monts de Tlemcen à partir des réponses hydrologiques et hydrochimiques. Université d'Oran.

Ameziane, A., Bensaad, M. S. (2016). Quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau. Cas du bassin versant de l'oued Mouilah (NW algérien). Mémoire de Master. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid.

Auclair, D., Biehler, J. (1967). Étude géologique des hautes plaines oranaises entre Tlemcen et Saida, Publ. Serv. Geol. Alg. Bull.n°34. P 3-45, 4 fig.

Babali, B. (2014). Contribution à une étude phytoécologique des monts de Moutas (Tlemcen-Algérie occidentale) : Aspects syntaxonomique, biogéographique et dynamique.

Baghdadli, I. (2014). L'influence du changement climatique sur les ressources en eaux du Meffrouch. Mémoire de Master. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid

Banton, O., Bangoy, L.M. (1999).Hydrogéologie : Multiscience Environnementale des Eaux Souterraines. Québec : Presses de l'Université du Québec. 460 p.

Benmechernane, N. (2011). Etude de protection de la ville de Bensekrane (W.Tlemcen) contre les inondations. Mémoire de Master. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid

Benest, M. (1972). Importance des mouvements de coulissage et de rotation dans la mise en place de la partie occidentale de la dépression de Sebdou (Monts de Tlemcen). Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique Nord, Alger, t.62, fasc. 1-2, p.21-38, 5 fig., 3pl. h.t.

Benest, M. (1982) - Importance des décrochements sénestres (N-S) et dextres (E-W) dans les Monts de Tlemcen et de Daïa (Algérie Occidentale). Rev. Géol. Dayn. Géogr. Phy. vol. 23, pp. 345-362.

Benest, M. (1985). Evolution de la plate forme de l'Ouest algérien et du Nord - Est marocaine au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : Stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. Thèse de Doctorat, Lab., Géol. Univ, Lyon. Fasc. 1, 367 p., 107 fig.

Références Bibliographiques

Bensaoula, F., Collignon, B. (1986). Evaluation des coûts de production de l'eau selon divers types d'ouvrages hydrauliques : les données récentes dans la Wilaya de Tlemcen, Colloque « Les ressources en eau et l'aménagement du territoire », Oran.

Bensaoula, F., Adjim, M., Bensalah, M. (2007). L'importance des eaux karstiques dans l'approvisionnement en eaux de la population de Tlemcen. Larhyss Journal, (6) ,57-64.

Bensaoula, F., Adjim, M., Bensalah, M. (2005). Les forages récents dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen. Larhyss journal, (4), 7-15.

Bensaoula, F., Bensalah, M. (2006). Contribution à l'étude de la vulnérabilité à la pollution des aquifères karstiques des monts de Tlemcen, Journal algérien des zones arides, numéro spécial, 113-117.

Bensaoula, F., Bensalah, M. Contribution à l'étude de la vulnérabilité à la pollution des aquifères karstiques des monts de Tlemcen. Colloque International « TERRE et EAU » Annaba, 21, 22 & 23 Novembre 2004

Bentahar, K. (2014). Gestion quantitative et qualitative de l'eau de la ville de Tlemcen. Mémoire de Magister : Hydraulique. Oran : Université des Sciences et de la Technologie d'Oran. 110 p.

Berrabah, H., Torchi, M. (2017). Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Missiouin (NO ALGERIE). Mémoire de Master. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid.

Berrezoug, N. (2016). Hydrologie et modélisation Pluie-Débit de l'oued Boukiou (NW algérien). Mémoire de Master. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid.

Bilem, A. (2012). Contribution à l'étude histologique du chamaerops humilis L. : Approche comparative des peuplements des Monts de Traras et des Monts de Tlemcen. Oran : Université Es-Senia.

Bouanani, R. (2004). Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW- Algérie). Thèse de doctorat : Géologie appliquée : Option hydrogéologie. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid, 250p.

Bouanani, R. (2010). Modélisation de la fonction pluie - débit. Application au bassin versant de la Tafna (NW - ALGERIEN). Mémoire de Magister. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid.

Références Bibliographiques

Boudjelthia, M. (2000). Evaluation et Cartographie de la vulnérabilité des nappes souterraines a la pollution par la méthode DRASTIC. Cas de la Nappe du moyen Cheliff. Mémoire Magister : Hydraulique. Chlef: Centre Universitaire de Chlef, 81 p.

Bouguettaya, K. (2011). Contribution à l'étude de l'aléa érosif sur la biologie de *Vitis vinifera* L. dans la région de Tlemcen. Mémoire de Magister. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid

Collignon, B. (1986). Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des monts de Tlemcen. Thèse de Doctorat nouveau régime .Université d'Avignon.

COST620. (2003). Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karts) Aquifers (Final Report COST Action 620). Neuchâtel. 297p.

Daboussi, A. (2009). La cartographie de la vulnérabilité des nappes : un moyen de gestion durable des ressources en eaux. Mémoire de Maîtrise : sciences de la terre. Tunis : Université de Tunis El Manar Faculté des Sciences de Tunis Département de Géologie.49 p

Dörfliger N., Jauffret D., Loubier S. (2004) : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté, avec la collaboration de V. Petit, rapport BRGM RP-53576–FR, 129 pages, 47 illustrations, 4 annexes.

Dörfliger, N., Mettetal, J. P. (2005). Cartographie de la vulnérabilité en vue de la délimitation des périmètres de protection en milieu karstique. Besançon : BRGM, DIREN FRC, 41 p.

Duchaine, D. (1998). Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique). Mémoire de Baccalauréat : Géographie. Québec : Université du Québec.95 p

Eleni-Anna, N., Eleni, Z. (2018). Groundwater Vulnerability to Pollution Map for Karst Aquifer Protection (Ziria Karst System, Southern Greece). Geosciences. 8. 10.3390/geosciences8040125

Éric, F. (2017). La problématique des nitrates dans l'eau souterraine en milieu agricole : du sol à l'aquifère. Cas de l'aire d'alimentation de l'eau souterraine de la municipalité de Sainte-luce, Québec, canada. Mémoire de maitrise : Géographie. Rimouski : Université du Québec À Rimouski.131 p

Références Bibliographiques

- Fournier, M. (2006).** Identification des modalités de transport et de la vulnérabilité du karst de la craie. Application de nouveaux outils statistiques d'analyse des données au système du Hannetot (Seine-Maritime, France). Thèse de Doctorat : d'hydrogéologie karstique. Rouen : Université de Rouen. 196p.
- Gautier, M. (1952).** La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie, Tome 1, Eléments de technologie des barrages algériens et de quelques ouvrages annexes, Le barrage des Beni-Bahdel et la conduite d'Oran, 44-57.
- Gevin, P. (1987).** Essai de réserve souterraine en vraie grandeur le barrage sur l'oued Meffrouch (Algérie), Bulletin d'hydrogéologie, centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, Editions Peter Lang, n°7, 217-228.
- Gherissi, R. (2012).** Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued Lakhdar (EX : CHOULY) TAFNA-NW algérien. Mémoire de Magister. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid.
- Goettingen, Ballouneh. (2012).** Protection of Jeita Spring. CDR ET BGR
- Guardia P., (1975).** Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord occidentale. Thèse .de doctorat. Nice. 256 p., 139 fig., 5 pl.
- Guppy, L., Uyttendaele, P., Villholth, K.G., Smakhtin, V. (2018).** Groundwater and Sustainable Development Goals: Analysis of Interlinkages. UNU-INWEH Report Series, Issue 04. United Nations University Institute for Water, Environment and Health, Hamilton, Canada.
- Hayane, S.M. (1983).** Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Sikkak. Thèse de doctorat. Université d'Oran
- Iratni, N. (2014).** Modélisation hydrologique de quelques sous bassins versant de la Tafna. Mémoire de Magister. Oran : Université des Sciences et de la Technologie Mohamed BOUDIAF d'Oran
- Kerzabi, R. (2008).** Identification de l'aquifère des grès Serravalliens du bassin Miocène dans la région de Remchi-Hennaya- Bensekrane et Ouled Mimoun. Mémoire de Magister. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid.

Références Bibliographiques

Kherbache, N. (2014). La problématique de l'eau en Algérie : Enjeux et contraintes. Mémoire de Magistère : Sciences économiques. Bejaïa : Université Abderrahmane Mira. 237p

Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph., Darmendrail D., Conil P. (2001) -Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d'Évaluation Détaillée des Risques pour les ressources en eau. BRGMRP-50662.FR, 103 p., 20 fig., 9 tabl. 5 ann.

Mardhel, V., Pinson, S., Gravier, A. (2005).Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais (BRGM/RP – 54238 - FR).

Mckague, K., Reid, K., Simpson, H. (2005). Répercussions Environnementales De l'utilisation d'azote en agriculture. Fiche technique /Ministère de l'agriculture de l'alimentation et des Affaires Rurales, Ontario. Commande n° 05-074.p 4

Meyzonnat, G. (2012). Estimation de la vulnérabilité de l'aquifère au roc de la zone Bécancour (Centre-du-Québec).Mémoire de Maîtrise : Sciences de la Terre. Montréal : Université du Québec à Montréal. 122p.

Murat, V. (2000). Étude comparative des méthodes d'évaluation de la Vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : application aux aquifères granulaires du piémont laurentien. Mémoire de Maîtrise. Québec : Université de Québec. 118 p

Mozas, M., Ghosn, A. (2013). État des lieux du secteur de l'eau en Algérie. Études & Analyses : Ipemed (L'Institut de prospective économique du monde méditerranéen).25p

Pouyanne, J. (1877). Notice géologique sur la subdivision de Tlemcen. (Algérie occidentale). Ann.Mines. Paris. t. XII., pp. 81 - 155. Carte 1/400 000 de Tlemcen.

Quevauviller, Ph. (2010).Protection des Eaux Souterraines : Législation Européenne et Avancées Scientifiques. Paris : Lavoisier.433p

Seltzer, P. (1946). Le climat de l'Algérie. Univ. Alger.Inst. Météo et Phys du Globe, Carbonnel. 219 p., 2 cartes.

Beauchamp, J. (2002). (Page consultée le 13/04/2019). < <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours.qge/pol-sout/pol-sout.htm> >

Références Bibliographiques

MIQUEL, G. (2003). La qualité de l'eau et de l'assainissement en France. Rapport. (Page consultée le 24/04/2019). < <https://www.senat.fr/rap/102-215-2/102-215-210.html>>.

Université de Québec à Montréal. (Page consultée le 14/04/2019). <<http://www.guidemt.uqam.ca/citer/insérer-une-référence-texte>>

Tout sur l'Algérie(TSA). Site d'information généraliste. (Page consultée le 18/05/2019). < <https://www.tsa-algerie.com/eau-douce-lalgerie-parmi-les-pays-les-plus-pauvres/>>

http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2008.meurer_m&part=151521

Annexes :

Annexe 2

Pluviométrie Barrage Sikkak (DRE-Tlemcen)

ANNEES PLUVIO	SEPT	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	TOTA L
2005-2006	11,20	13,70	36,70	6,32	42,30	59,70	19,10	9,10	44,90	1,80	3,20	1,30	249,32
2006-2007	20,40	10,80	6,70	47,00	27,50	50,20	6,00	80,70	2,10	-	-	-	251,40
2007-2008	11,70	41,00	49,80	11,90	18,50	4,90	-	9,30	20,20	-	-	-	167,30
2008-2009	22,90	68,50	61,90	100,90	111,70	38,9	38,20	52,00	6,30	0,50	-	-	501,80
2009-2010	122,00	2,20	20,00	33,70	60,30	39,90	66,90	34,60	25,30	16,90	1,60	15,20	438,60
2010-2011	8,40	55,10	26,90	26,50	29,90	33,60	36,90	46,60	54,50	16,90	0,60	2,10	338,00
2011-2012	3,90	52,80	76,20	28,30	21,40	30,10	19,50	49,50	4,00	0,60	2,00		288,30
2012-2013	21,00	39,60	115,00	15,60	118,10	54,80	51,00	66,30	46,80	-	0,70	3,10	532,00
2013-2014	11,00	/	41,80	85,70	56,50	44,40	28,80	5,70	16,40	8,70	-	-	299,00
2014-2015	10,30	10,40	75,20	113,40	68,90	45,20	20,70	3,60	30,60	2,70	-	8,80	389,80

Annexe 2

Pluviométrie Barrage Meffrouch (DRE-Tlemcen):

ANNEES PLUVIO	SEPT	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	TOTA L
2005-2006	15,50	21,00	75,90	25,80	59,90	111,70	30,40	45,10	62,00	11,20	-	-	458,50
2006-2007	35,00	16,50	11,30	77,80	29,40	50,20	65,70	130,80	27,30	-	-	-	444,00
2007-2008	16,90	94,40	76,90	20,80	33,80	-	-	13,30	33,00	-	-	-	289,10
2008-2009	42,30	104,30	109,30	206,40	207,10	67,9	53,90	59,20	14,70	1,10	3,90	1,00	871,10
2009-2010	78,50	1,60	46,00	75,90	49,80	90,60	152,00	52,40	42,00	19,70	0,50	10,10	619,10
2010-2011	25,30	78,00	87,80	59,90	34,20	70,70	27,80	123,80	115,40	29,60	-	8,80	661,30
2011-2012	8,80	147,60	133,50	45,80	23,80	82,40	33,40	74,00	24,60	1,80	4,80	0,40	580,90
2012-2013	12,70	50,50	377,20	23,00	182,20	146,60	103,00	159,80	83,10	-	1,40	5,40	1 144,90
2013-2014	34,30	/	54,20	243,30	86,20	156,40	85,00	15,60	30,70	44,50	-	-	750,20
2014-2015	28,80	35,20	84,80	154,40	93,60	88,80	37,40	8,80	51,70	16,60	-	31,00	631,10
2015-2016	17,60	52,30	41,20	-	41,20	138,50	78,80	153,60	38,10	2,60	0,50	-	564,40

Annexe 2

Pluviométrie Barrage Mefrouche (DRE-Tlemcen):

ANNEES PLUVIO	SEPT	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	TOTAL
2005-2006	16,30	24,00	40,50	22,80	44,30	114,70	21,90	15,50	32,00	4,80	-	0,40	337,20
2006-2007	23,30	5,70	5,80	61,50	20,40	67,70	9,20	86,40	4,40	-	-	-	284,40
2007-2008	7,60	85,10	28,60	13,40	23,40	1,00	1,50	11,40	22,60	-	-	-	194,60
2008-2009	49,20	97,60	93,80	130,10	128,60	69,6	31,10	60,30	15,00	-	-	-	675,30
2009-2010	85,70	2,20	36,10	62,70	99,30	59,90	68,20	29,10	29,00	18,00	2,00	10,90	503,10
2010-2011	6,30	55,90	37,10	24,70	29,70	49,50	38,80	59,40	61,70	8,20	1,30	2,90	375,50
2011-2012	7,30	41,40	107,60	36,10	28,10	77,70	21,90	59,40	1,90	0,20	5,80		387,40
2012-2013	8,70	54,40	144,60	19,90	148,20	50,60	77,40	82,80	39,10	-	1,00	16,00	642,70
2013-2014	15,30	0,01	84,90	123,70	127,00	73,40	43,30	12,60	20,20	12,90	-	-	513,31
2014-2015	29,00	11,90	66,30	141,80	106,10	62,10	39,20	3,00	40,20	4,30	-	4,00	507,90