



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tebessi - TEBESSA
Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers
Laboratoire de recherche Eau et environnement



Thèse

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

En Hydrogéologie
Option : Hydrogéologie appliquée

Par : FATAH Samoun
(Master en hydrogéologie)

Intitulée :

**Etats hydrogéologique et hydrochimique et cartographie de la
vulnérabilité et du risque à la pollution des eaux souterraines
delanappealluvionnaire d'El Ma Labiod. NE Algérie.**

Devant le jury :

BOUMAZBER Abderrahmane	Professeur	Larbi Tebessi-Tébessa	Président
GOUAIDIA Layachi	Professeur	Larbi Tebessi-Tébessa	Rapporteur
FEHDI Chemseddine	Professeur	Larbi Tebessi-Tébessa	Examineur
KACHI Slimane	Professeur	8 Mai 1945-Guelma	Examineur
GUEFAIFIA Omar	M.C.A	Larbi Tébessi-Tébessa	Examineur
DJAIZ Fouad	M.C. A	Hadj Lakhder-Batna	Examineur
DJABRI Larbi	Professeur	Badji Mokhtar-Annaba	Invité

2021

INTRODUCTION GENERALE

La zone d'étude, plaine d'El Ma Labiod, est située à l'extrémité Est de l'Algérie et sa limite orientale forme un tronçon de la frontière Algéro-Tunisienne, à une quinzaine de kilomètres au sud de la ville de Tébessa. Elle fait partie de l'atlas saharien sous forme d'un bassin effondré à remplissage miocène (Rouabhia 2006). De par sa position géographique, aux portes du désert, la plaine d'El Ma Labiod est soumise aux contraintes des deux climats avec une pluviométrie torrentielle et brève, un ensoleillement assez fort et un vent d'Est relativement froid de moyen à fort et un vent du Sud tiède à chaud avec, parfois, des charges de poussières et de sable.

La région de Tébessa et particulièrement la zone d'étude se caractérise par l'absence des eaux de surface, et cela malgré un système de drainage bien développé. Faisant partie du sous de bordure entre les deux grands bassins versants de Mellague et de Melrhigh, la plaine ne reçoit aucun écoulement entrant de surface après l'assèchement des sources karstique de la bordure nord suite à la mort des drains qui les alimentaient. Une exploitation accrue des ressources hydriques souterraines s'est instaurée, avec la mise en place des forages moyens et profonds, pour répondre aux besoins de l'AEP et tous les autres usages.

La nappe d'El Ma Labiod est sollicitée pour répondre à plus de 50% des besoins de la région de Tébessa et malgré son alimentation confirmée par les bordures karstifiées au Nord et au sud Ouest (Rouabhia 2006 et Boughanem, 2011), elle présente un bilan hydrique négatif.

Actuellement la plaine qui surplombe la nappe sus citée est exploitée principalement en agriculture et en élevage, soutenue par un programme d'intensification national. Ce qui n'est pas sans risque de détérioration de la qualité de cette denrée vitale.

Pour prévenir toute altération des réserves en eaux souterraines ou du moins minimiser les effets néfastes qui pourraient découler des projets futurs sur un terrain dont la susceptibilité n'a pas été étudiée, l'édification de la carte de la vulnérabilité de l'aquifère de la plaine d'El Ma Labiod devient une priorité comme outil décisionnel pour les planificateurs et les gestionnaires lors de l'extension urbaine ou d'édification d'un projet.

L'objectif de cette étude est de faire un état des lieux du point de vue hydrogéologique, hydrochimique et de déterminer la distribution spatiale des différents degrés de susceptibilité de l'aquifère à la pollution en utilisant les méthodes DRASTIC et GOD et l'outil SIG (global mapper v18 et Arc gis 10.3).

Les données nécessaires à l'appréciation de la vulnérabilité seront acquises chacune à sa source et seront utilisées pour renseigner les deux modèles utilisés. Les deux résultats seront confrontés entre eux dans un premier lieu et comparés à la distribution spatiale du polluant le plus attendu dans l'environnement agricole ; les nitrates (NO_3).

L'étude hydrochimique des eaux souterraines nous permettra de réaliser la distribution spatiale des éléments dissous et d'évaluer l'ampleur d'une probable contamination par un polluant. La détermination des différentes familles chimiques de l'eau et l'origine des écarts importants ainsi que l'aptitude des eaux à l'AEP et à l'irrigation fera l'objet d'un volet indissociable.

L'étude géologique, hydrologique, climatologique et hydrogéologique fournira respectivement le type minéralogique en réaction avec l'eau dans la nappe, le type de climat, les précipitations annuelles et permettra en particulièrement de déterminer l'infiltration cumulée (recharge).

Enfin les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère tels la perméabilité, la transmissivité, le niveau piézométrique, l'ampleur du milieu aquifère et le type de substratum seront déterminés par l'étude lithologique et géophysique.

Pour ce faire l'étude des coupes géo-électriques établies en 1971 par le BRNO et les logs des forages et des puits et certaines études antérieures seront mis à profit.

Dans ce contexte la présente étude sera articulée en 6 chapitres:

- Le premier chapitre présente la géologie et la tectonique de la région avec une introduction pour une brève présentation de la zone d'étude
- Le deuxième chapitre concerne la climatologie.
- Le troisième chapitre sera consacré à l'hydrologie de surface.
- Le quatrième chapitre sera consacré à l'hydrogéologie.
- Le cinquième chapitre portera sur l'hydrochimie et la qualité des eaux de la nappe étudiée.
- Le sixième chapitre expose les cartes des paramètres et des résultats des deux méthodes de vulnérabilité des eaux souterraines DRASTIC et GOD utilisées. Ainsi que les cartes de risque déduites.
- Les recommandations et la conclusion, suivies de la bibliographie, scellent cette étude.

CHAPITRE I

GEOLOGIE

Introduction

Le contexte géologique et litho- stratigraphique d'un site (ou zone), en recherche sur les ressources hydriques, tient son importance de l'influence de ce contexte sur la position, la direction et la forme des effluents en surface et de la probabilité d'existence des eaux souterraines en un lieu déterminé ainsi que l'explication de l'origine de leurs taux de minéralisation.

La région d'El Ma Labiod a fait l'objet de quelques études d'orientation pluridisciplinaires allant de la recherche de l'eau à la l'exploration pétrolière en passant par l'étude des ressource minières mais seule l'esquisse géologique établie par Durrozoy en 1948, modifiée par Rouabhia A. en 2006 (**figure 1**) est disponible avec l'étude de kowalski et al en 2000 et 2002, qui a établi quelques repères chronologiques sur la formation des fossés de la région. Depuis aucune étude n'a enrichie le volet géologique et litho – stratigraphique de cette zone.

La prospection géo électrique, réalisée en 1971 par l'unité UGF BRNO, de la société TRANSACTA et les logs de certains forages ont.mis en évidence une limite géo-électrique qui correspond au toit des marnes emchériennes qui descend jusqu'à 200 mètres de profondeur et des blocs calcaires enfouis dans les dépôts du Miocène et dans les marnes. Cette étude montre un ensemble de failles subparallèles qui corrige les coupes géologiques établies par Durrozoy en 1948 (**figure 2 et figure 3**).

La zone d'étude est caractérisée par deux grands ensembles litho-stratigraphiques:

- Les protubérances compactes d'âge crétacé de bordure et
- Les formations meubles d'âge miocène et quaternaire, réparties sur l'ensemble de la plaine. (Rouabhia A. 2006).

Le log issu de la fiche de forage du puits pétrolier (in Guefaifia O., 1996 et Rouabhia A. 2006) où l'on trouve les séries complètes supposées non perturbées est en **annexe A**.

I.1 - Géologie de la zone d'étude

La géologie de la zone d'étude est similaire à celle de la région de Tébessa dans sa constitution et sa succession litho – stratigraphique.

I.1.1. Le secondaire – Mésozoïque :

L'absence du Jurassique en affleurement rend le contacte Trias – Crétacé, là où il apparait, discordant.

I.1.1.1. Le Trias

Le terrain le plus ancien de la zone étudiée affleure au Nord Est et au Sud Est de la zone d'étude sous forme de diapir à Dj. Djébissa et sous forme de pointement à Dj. Dalaa Er Rouail, Il est représenté par un faciès typique de la région : Argile à gypse, calcaires, cargneules et calcaires dolomitiques noirs en plaquettes.

I.1.1.2. Le Crétacé :

a) Crétacé inférieur

Seuls deux étages du crétacé inférieur affleurent dans la zone d'étude.

a1 - L'Aptien :

Formé essentiellement de calcaire à Orbitoline, il est observé au niveau Dj. Bouroumane et de Dj. Dalaa, où il est localement en contact avec le trias.

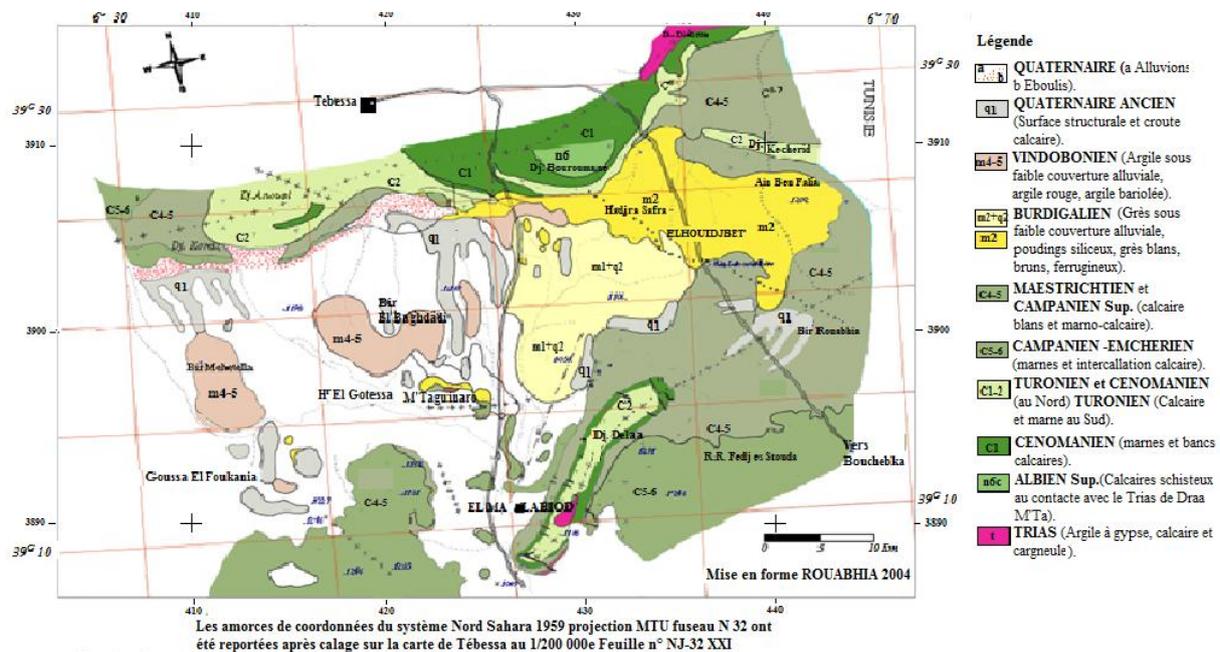


Figure 1 : Esquisse géologique d'El Ma Labiod

a2-L'Albien :

Il est présent à Fedj El-Béhim au nord de Djebel Dalaa, constitué de calcaire grisâtre et de marno - calcaire gris en plaquettes et blanc a cassures noires avec de nombreuses empreintes d'ammonites et de Bélemnites selon J.M. Villa (1994), 40m d'épaisseur.

b) Le crétacé supérieur :

b1- Le Cénomanién : Il s'agit des marnes et de calcaires lumachelliques à huitres observées à Djebel Drea. Il existe trois facies du cénomanién ;

-Le Cénomanién inférieur : A la base, on observe des marnes jaunes à gypse avec quelques bancs de calcaire blancs à prise de marnes noires épaisses.

Au sommet on distingue, de haut en bas, selon la carte géologique de Tébesa, une alternance de dalles minces de lumachelles grises et de marnes, puis deux bancs de calcaires gris compactes cristallise massifs intercales dans les marnes.

-Le Cénomanién Moyen: Est caractérisé par une série très épaisse de marnes grises sans fossiles avec quelques bancs lumachelliques à la base.

-Le Cénomanién supérieur: Il s'agit des marnes jaunâtres avec intercalation de quatre ou cinq bancs de calcaires ocre épais contenant des lumachelles.

b2 - Le Turonien: au Sud de Fedj El-Béhim, il est observé sous forme de marnes et de calcaires en plaquettes. Au Nord, il est représenté par des marnes grises. Le Turonien constitue aussi la partie Est de la chaîne Nord ; (Djebel Anoual, Djebel Tella, Djebel Nahal, Djebel Bekkaria et Djebel Kechrid).

- *Turonien inférieur*: -la partie basale: est représentée par des calcaires en petits bancs gris.

- *Turonien supérieur*: est représenté par des calcaires récifaux avec de grands gastéropodes en gros bancs.

c- L'Emchérien (Santonien et Coniacien) : Il affleure dans la partie Sud d'El Labiod, il comprend des marnes noires et vertes avec des niveaux de calcaires à lumachelles. L'épaisseur de la série varie de 120 à 150m à Djebel Doukkane, au-dessus de laquelle viennent des marnes fossilifères.

d- Le Campanien: il est sous forme d'une intercalation de marnes grises avec des bancs calcaires lumachelliques, calcaires crayeux blanchâtre et friable. D'une épaisseur de 200m. Il est localisé à Adeila, à l'Ouest de la ville d'El Ma Labiod, et aux environs de Tenoukla.

e- Le Maastrichtien : faciès de marno - calcaires blancs massifs à Inocérans.

Il apparaît au centre de la plaine, à M'taguinaro, aux confins de la ville ainsi qu'au Nord- Ouest, à Dj. Koreiz.

I.1.2. Le Tertiaire - Cénozoïque

I.1.2.1. Le Miocène

Le bassin d'El Ma Labiod est à dominance de formations d'âge Miocène (in Roubhia A 2006 et Djebbari H. 2011). Defalía N. 2010 a cité le rapport de Durrozy 1949.

Les fiches de forages et les logs des puits assez profonds donnent une large variété de produits sableux à graveleux avec une composante argilo-marneuse variable : Sables fins et marne, grès grossiers à matrice argileuse, sables moyens et fins avec gravier et marnes ou encore une intercalation d'argile et sables et bien d'autres combinaisons. La profondeur moyenne atteinte par les dépôts du Miocène est de 150 à 200 m mais, par endroits, ils dépassent les 200 m.

Selon la distribution des faciès sur la carte géologique provisoire d'El Ma Labiod (figure 1) le Miocène affleure d'Est vers l'Ouest :

a) LeBurdigalien : un premier faciès [m1] de sables et de grès avec une composante argileuse réduite à négligeable, affleure largement au Nord et Nord Ouest de la ville d'El Houidjbet englobant les sables et grès de El Hadjra Essafra et longe la bordure Nord Est jusqu'à dépasser Tenoukla en un bande hectométrique. Il est retrouvé en de superficie moindre au niveau de la carrière de sable au Sud - Est de Tenoukla et au Nord - Est de M'tegui Narou.

Un deuxième faciès [m2 q2], plus marneux, évolue au Sud, en contact avec le premier, et couvre une superficie aussi importante, arrivant à l'Ouest jusqu'à la RN 16 et au Sud jusqu'à hauteur du forage M9. En contact avec la base marneuse du campanien - Maastrichtien de la bordure Sud Est. Si à l'Est l'amplitude de cet âge arrive à 200 m, au niveau du M9 elle ne dépasse pas les 30 – 40 m. (forage et puits locaux).

b) LeVindobonien : (Helvetien et tortonien) à faciès argileux [m2 q2] s'étend sur la partie Ouest de la plaine (à l'Ouest de la route nationale 16) en affleurement discontinu recouvert par endroit par le Quaternaire et les alluvions récentes. Ces affleurements sont mitoyens à ceux du Burdigalien. Le Vindobonien est absent à l'Est de la route Tenoukla – El Ma Labiod.

Les forages à l'Ouest de la RN16 montrent que le Burdigalien est continu en profondeur quoique la composante argileuse soit relativement plus importante avec parfois présence des passages graveleux.

I.1.3 Le Quaternaire:

L'activité dans la plaine surtout les labours successifs, les aménagements des terrains rendent difficile la distinction des alluvions des dépôts précédents. L'étendue de la couverture alluvionnaire indique l'énergie des écoulements et confirme l'ampleur des remaniements cités par Rouahia A., 2006 et J. M. Vila, 1993.

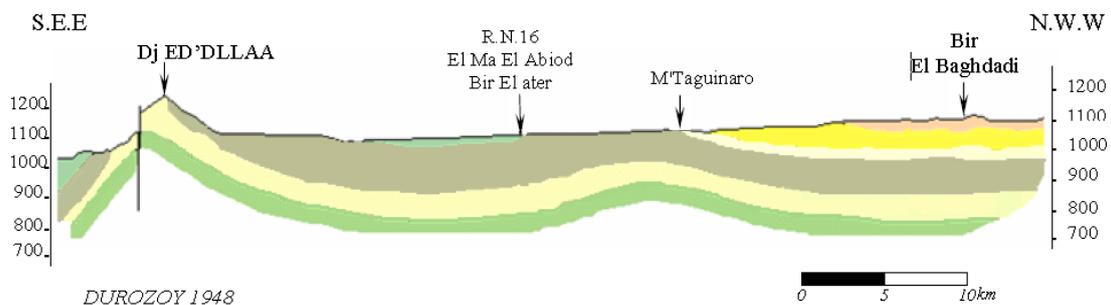


Figure 2 : coupe géologique de Djebel ED'DELLAA au Sud à Bir El Baghdadi au Nord-Ouest

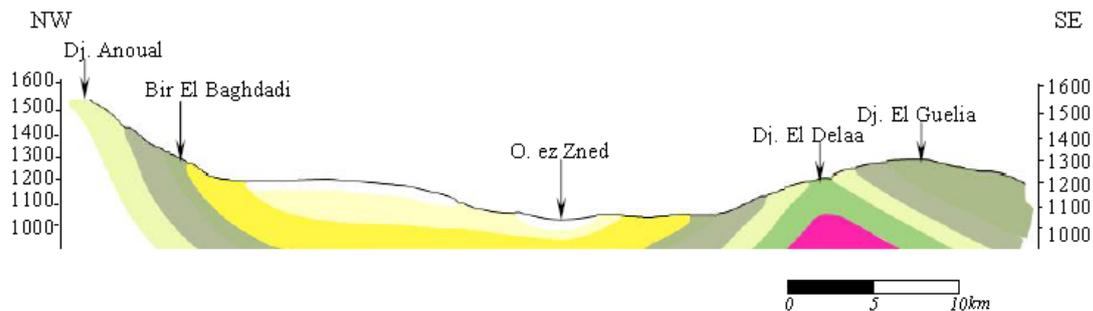


Figure 3 : coupe géologique Dj. Anoual au Nord à Dj Guelia au Sud par Durozoy 1948 in Rouahia A. 2006.

Des alluvions anciennes « Cailloutis gréseux peu cimentés » s'observent dans le lit de l'Oued près de Henchir El-Goussa et au sud de Bordj El-Ma Labiod. (Rouahia, 2006)

I.2. Géomorphologie

Deux barrières rocheuses, l'une au Nord, l'autre au Sud de la plaine limitent la zone d'étude. Le glacis paraît plus développé au Sud Est

I.2.1. La Barrière rocheuse du Nord

Elle est de direction Est-Nord Est vers Ouest-Sud Ouest est allongée sans discontinuité sur une distance d'environ 33Km, elle est formée par une suite de massifs montagneux (Djebel Kechrid 1025m, Djebel Teiba 1230m, Djebel Bekkaria et Djebel Tenoukla). Cette barrière n'est traversée qu'au

niveau du col de Tenoukla par la RN16 (Tébessa – El Ma Labiod) et la voie ferrée et au col de Bekkaria par RN10 (Bekkaria – Bouchebka).

I.2.2. La barrière Rocheuse du Sud

Elle est composée de deux ensembles orogéniques séparés par la route nationale RN16 ; Djebel ed Dalaa (1345 m), Dj. En Nfidat (1207 m), Dj. Dalaa (1182 m) à l'Est avec une direction Sud Ouest-Nord Est et Djebel Bou Djebel (1406 m) à l'Ouest avec une direction Est-Sud Est. Traversée aussi par Fedj ez Zmit et Fedj Elbhim.

I.2.3. La plaine

Entre les deux chaînes de montagnes s'ouvre la plaine d'El Ma Labiod selon un axe de direction NE – SW avec une importante superficie de dix par vingt cinq kilomètres. L'altitude moyenne de la zone d'étude est de 1100m avec une dénivelée de 700 m.

I.3. Tectonique :

I.3.1. Les phases tectoniques

La structure de la région a dû être édifiée suite à la manifestation de deux phases orogéniques (J.M.VILLA, 1996 in Défaflia 2010).

La première phase : s'est manifestée dès la fin du crétacé, et a atteint son paroxysme au fini lutétien (Kovalski et al 2002). Il s'agirait de la phase atlasique qui constitue très certainement la phase principale de plissement dans la région d'étude. Robert Lafitte 1949 in Défaflia N. 2010 l'identifie comme étant la phase orogénique majeure dans l'atlas saharien et lui attribue la formation de Dj. Bouroumane et des plissements de direction NE - SW. En conséquence la faille de Tenoukla et les failles de direction NW – SE orthogonales à ces plissements lui sont aussi attribuées.

Le diapirisme de Trias a dû commencer au début de cette phase tectonique qui a duré jusqu'au villafranchien inclus. (Adjoun B et Slatni F. 1991, Guefaifia O., 1996 et Défaflia N. 2010).

Selon L. D. VISSE (1956) la deuxième phase serait responsable d'une tectonique cassante, marquée par des mouvements du socle. Il considère aussi que ces mouvements auraient causé les affaissements, donnant naissance, entre autre, à la plaine d'El Ma Labiod avec ses bordures montagneuses en conformité avec son hypothèse. (in Guefaifia O., 1996 et Défaflia N. 2010).

I.3.2. Style tectonique

Dans la région d'étude on reconnaît deux directions structurales dominantes (Guefaifia O., 1996). L'orogénèse Alpine : lors de cette phase on observe des bombements anticlinaux et des fracturations. Cependant un autre réseau de fractures se manifeste avec une direction NW-SE qui va hacher les massifs carbonatés. Ces massifs sont soulevés en horst alors que les séries ductiles subissent des contraintes donnant des structures complexes suivies par une distension où se forment les grands bassins continentaux comblés par les apports détritiques et des formations lacustres calcaires et argileuses. (in Meliani O. 2018)

La phase atlasique : lors de cette phase l'orogénèse a atteint son paroxysme. Elle est située entre le Lutétien et le Miocène et elle a généré des plis de direction NE-SW donnant des anticlinaux de

formations calcaro - dolomitiques affectées de nombreuses failles perpendiculaires et parfois parallèles à l'axe des plis. (in Guefaïfia O., 1996 et Meliani O. 2018)

I.4. Conclusion

Cette étude géologique menée à partir des données des forages, des études géologiques sur la région de Tébessa, des domaines des terrains voisins et les travaux antérieurs : Adjoum B. et Slatni F, (1991), Guefaïfia O. (1996), Rouabhia A. (2006) et Défaïlia N. (2010), a abouti à :

- Les formations du Miocène constituent l'essentiel de la zone aquifère de la plaine d'El Ma Labiod et lui confèrent leur potentiel hydraulique des grès et des sables.
- Les formations alluviales qui les surmontent forment aussi un aquifère temporaire.
- Les formations de bordure (calcaires) de la plaine ont un assez important potentiel hydrique; elles constituent les principales zones d'alimentation du système aquifère.
- La région d'El Ma Labiod n'a pas encore de carte géologique, l'esquisse établie par Durrozoy en 1948, améliorée par Rouabhia en 2006 qui tient lieu de référence sur la distribution spatiale des affleurements géologiques provisoire, reste à ce jour la seule synthèse géologique projetée dans les limites de la feuille topographique d'El Ma Labiod.
- L'apport de cette étude à l'esquisse géologique précitée est le positionnement d'amorces en coordonnées Lambert, après calage sur la carte de Tébessa au 1/200000^e feuille N° NJ-32 XXI, ce rend possible son intégration au système d'information géographique par géo référencement.

CHAPITRE 2

CLIMATOLOGIE

Introduction

L'importance du climat et des apports hydriques dans les systèmes aquifères fait de ce chapitre une étude incontournable pour toute étude en hydrogéologie.

De par sa position médiane entre le tell relativement humide et le désert sec, la région qui englobe la zone d'étude se caractérise par un climat spécifique qui subit l'influence des deux milieux ce qui le rend difficilement prévisible.

Même si les valeurs de la température et des précipitations relevées dans la zone d'étude sont très irrégulières, les moyennes annuelles et mensuelles sont telles que les différentes méthodes appliquées y désignent un climat semi-aride à sec.

La série pluviométrique de base a été recueillie auprès de l'A.N.R.H de Tébessa (très incomplète), complétée réajustée par les séries partielles issues des études antérieures sur la zone d'étude. Pour ce qui est de la série des températures la station météorologique de Tébessa a servi pour réajuster et compléter la série à la station d'El Ma Labiod en se référant à la station de Tébessa.

II.1. historique des données pluviométriques et des stations

La première station dans la région a été implantée en 1906 à Tébessa et la plus longue série de données pluviométriques s'étale de 1909 à 2017 avec ses lacunes. En 1981 K. Body a réalisé, au profit de l'A.N.R.H, une synthèse sur les prévisions hydriques pour la région se basant sur une carte de précipitations de l'Algérie au 1/200 000ème établie par Chaumont Paquin en 1971 qui s'est appuyé pour ce travail sur la série 1913-1963.

D'autre part une carte similaire basée sur la série pluviométrique 1913-1938 a été réalisée par Seltzer en 1946, sauf que ce travail n'a pas tenu compte du relief, ce qui le rend d'un intérêt moindre pour un terrain aussi accidenté que la zone d'étude mais il reste toujours une référence exploitable. (Guefafia O., 2007)

Les isohyètes de la carte de Chaumont (fig. 4) montrent nettement la différence entre les quantités précipitées sur la plaine et les hauteurs qui l'entourent.

En 1993, L'A.N.R.H a repris la série 1922 à 1960 à laquelle a été annexée la série 1969 à 1989.

La station d'El Ma Labiod a été installée en janvier 1974 et a cessé de fonctionner en 2008 pour des raisons budgétaires.

Cette étude est basée sur les données des stations pluviométriques d'El Ma Labiod et de Tébessa dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1 : les stations pluviométriques sources de données météorologiques de l'étude.

Nom de station	N° de code	Coordonnées Lambert			Appareils	Mise en service	fin de service
		X	Y	Z			
Tébessa	12 03 01	976.500	251.750	875 m	PV.PG	Avril 1906	// //
El Ma Labiod	06 28 02	977.900	248.500	1030 m	PV.PG	janvier 1974	fin 2008

II.1.2- Pluviométrie moyenne mensuelle par années

L'importante dénivelée qui existe entre les élévations crétacées qui entourent la zone d'étude et sa plaine (jusqu'à 550m) fait que celles-ci reçoivent bien plus de précipitations et se distinguent particulièrement par les périodes de neige aussi bien par la fréquence que par la hauteur accumulée et le temps de séjours. Les quantités non écoulées ni évaporées sont absorbées par le peu de végétation qui s'y trouve clairsemée et les ouvertures du système karstique que forment ces montagnes.

II.1.3. Aperçu général sur le climat de la région

Le climat de la région de Tébessa est en générale de type méditerranéen semi aride, caractérisé par un hiver relativement tempéré et un été chaud et sec. Cette zone est également caractérisée par une instabilité de la saison pluvieuse qui s'étale en moyenne du mois de septembre jusqu'au mois d'avril ou parfois mai où débute la saison sèche avec une importante variabilité interannuelle des précipitations.

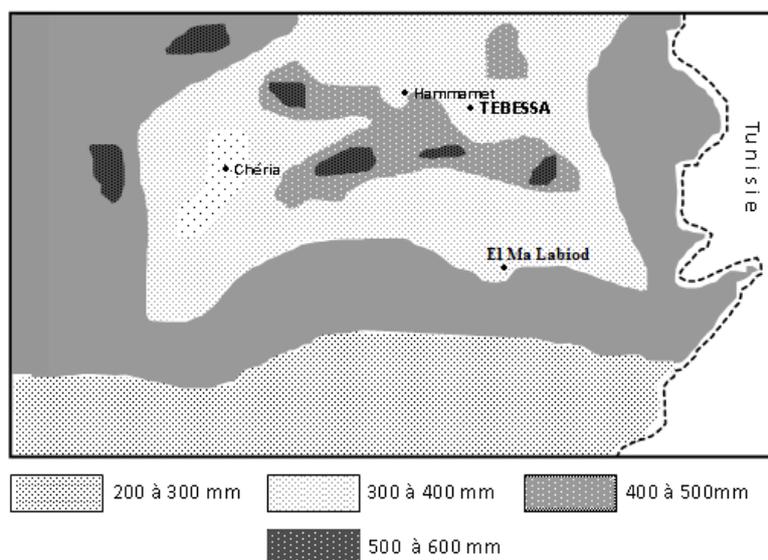


Figure. 4: Carte pluviométrique Chaumont – Paquin (moyenne 1913 – 1963). in Guefaifia 2007

II.1.4. La carte pluviométrique de l'Algérie du Nord

Pour mettre en valeur la pluviométrie de la zone d'étude un extrait de la version 2005 de la carte pluviométrique du Nord de l'Algérie au 1/500.000ème dressée en 1971 et révisée en 2003 par l'A.N.R.H en collaboration avec Jean Pierre Laborde se basant sur les moyennes annuelles ramenées à la période 1960- 2002 de 550 postes d'observation est en (Figure. 5).

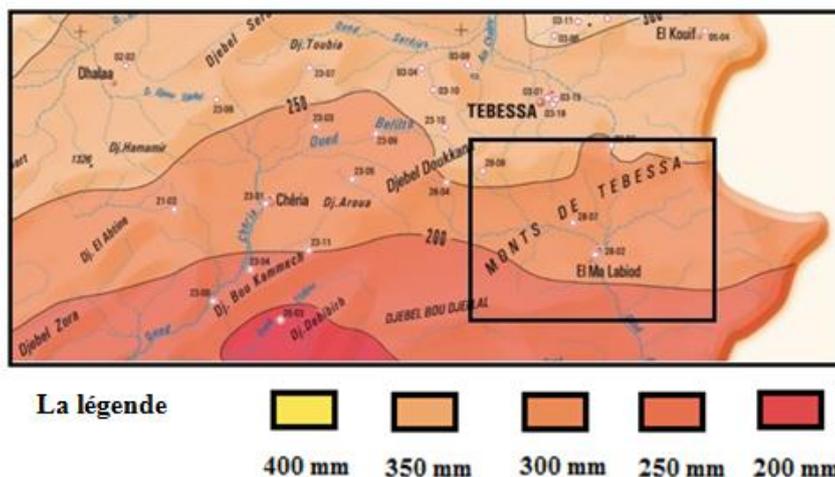


Figure.5 : Extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord, édition 2005 Région de Tébessa.

II.2. Les données climatiques

La série des températures et celle des précipitations de la zone d'étude sont nécessaires pour pouvoir réaliser un bilan hydrique adéquat, base des estimations de toute étude hydrologique ou hydrogéologique.

II.2.1. Les données pluviométriques :

La série de données pluviométriques de la station d'El Ma Labiod tronquée de source ANRH (1982 – 2008) a été complétée et corrigée par l'étude des séries issues de mémoires et des thèses sur la zone d'étude pour obtenir une série cohérente de quarante trois années qui s'étend de 1975 à 2017.

II.2.1.1. Procédé de restauration de la série pluviométrique à la station d'El Ma Labiod.

La série de pluviométrie a été complétée des trois années 2015, 2016 et 2017. Pour déterminer ces valeurs, il a été procédé comme suit :

- les séries des moyennes mensuelles mesurées entre 1975 et 2014 au niveau des deux stations (Tébessa et El Ma Labiod) ont été confrontées et une série des différences mensuelles des hauteurs a été établie pour la même période.
- Les moyennes mensuelles interannuelles de ces différences ont été calculées et sont présentées au tableau n° 2. Ces données ont été ajoutées aux données de pluviométrie récupérées sur le site infoclimat.fr pour la région de Tébessa pour les trois années et les résultats ont été insérés dans la série mesurée à la station d'El Ma Labiod.

La série des précipitations à la station de Tébessa (1975 – 2017) est en **Annexe B**

La série des précipitations (1975 – 2017) complétée et rapportée à la station d'El Ma Labiod est en **annexe C**.

II.2.1.2. Présentation des résultats

Tableau n° 2 : Variations interannuelles des différences entre moyennes mensuelles des séries de précipitations mesurées à la station Tébessa et à la station d'El Ma Labiod pour la période 1975 – 2017

Mois	sept	Oct	nov	dec	janv	Fev	Mars	Avr	Mai	jui	Juil	Aout
Moy	-3.76	-6.385	-11.31	-8.297	-7.249	-11.700	-9.356	-10.528	-11.634	-6.872	-2.7565	-7.399

L'Evolution des moyennes mensuelles des hauteurs cumulées précipitées durant la période 1975 – 2017 est présentée à la figure 6 et l'Evolution des moyennes annuelles des hauteurs cumulées précipitées durant la période 1975 – 2017 est présentée à la figure 7.

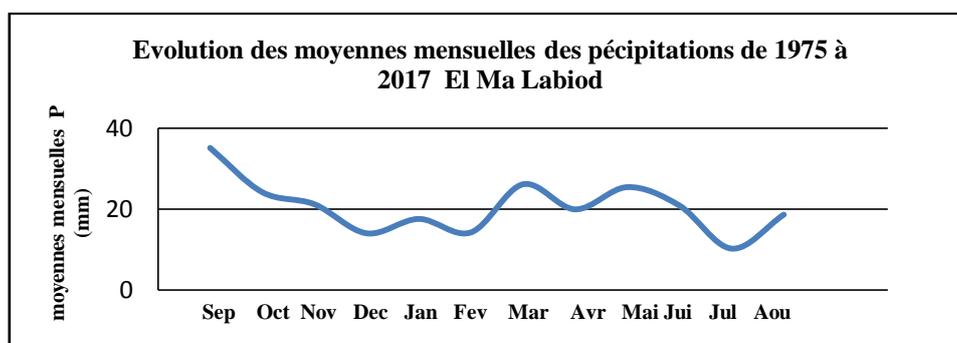


Figure. 6 : évolution des moyennes mensuelles de la pluviométrie sur la série de 1975 à 2017.

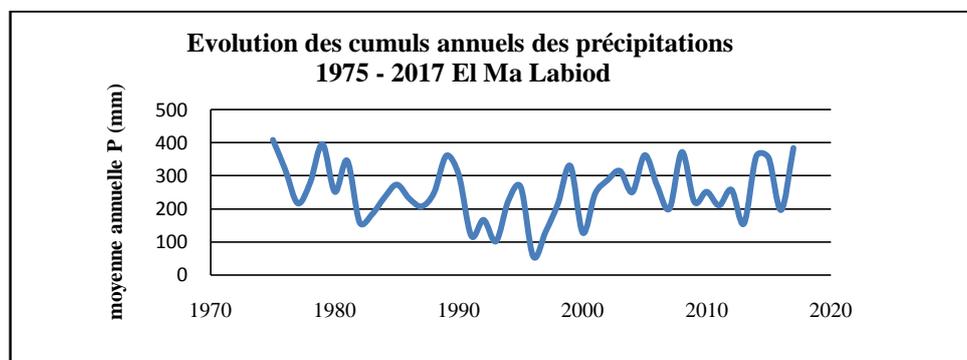


Figure 7 : Evolution des cumuls annuels de la pluviométrie de 1975 à 2017 à El Ma Labiod .

Le tableau 3 montre les moyennes mensuelles des hauteurs précipitées par période de 1975 à 2017.

Tableau 3 : Les moyennes mensuelles des précipitations par période de 1975 à 2017 station El Ma Labiod :

Année	P (mm)												moy. An
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juillet	Aout	
75 - 84	49.16	22.74	23.7	12.14	13.52	25.71	30.34	28.34	30.31	24.61	3.48	15.71	279.73
85 - 94	15.99	23.04	25.06	11.82	21.69	6.28	32.87	8.98	14.87	29.99	14.57	19.19	224.35
95 - 04	34.09	24.95	23.1	20.9	13.84	13.19	15.88	12.75	28.54	15.33	8.1	12.35	223.01
05- 17	34.55	25.7	15	14.76	22.53	15.52	23.78	29.8	28.95	19.8	19.95	26.75	277.1

L'évolution des moyennes mensuelles de pluviométrie par période est représentée aux figures 8a à 8d.

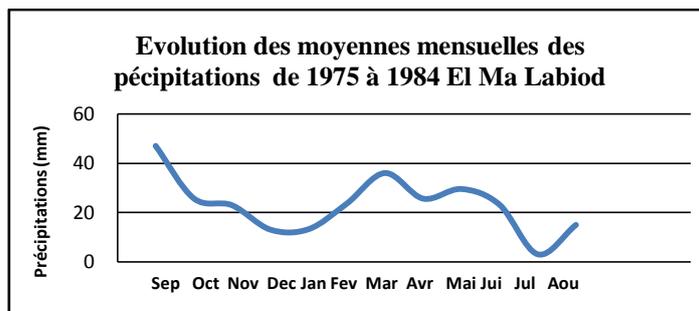


Figure 8a : Evolution de la moyenne mensuelle de la pluviométrie sur la décennie 1975 à 1984.

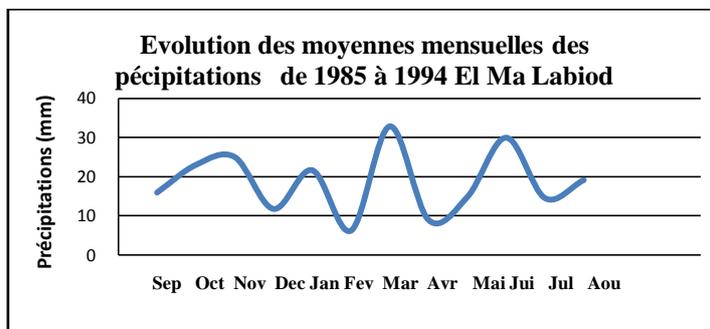


Figure 8b : Evolution de la moyenne mensuelle de la pluviométrie sur la décennie 1985 à 1994.

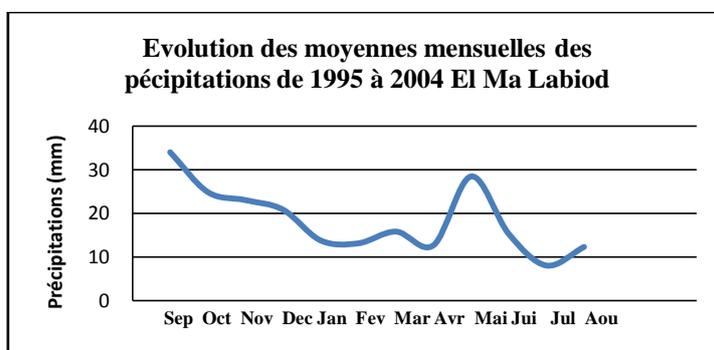


Figure. 8c : Evolution de la moyenne mensuelle de la pluviométrie sur la décennie 1995 à 2004.

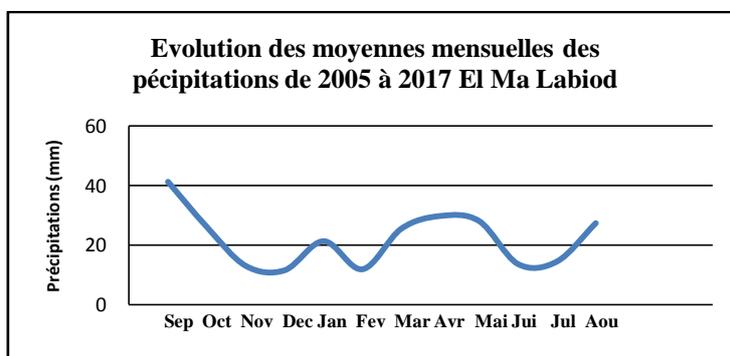


Fig. 8d : Evolution de la moyenne mensuelle de la pluviométrie sur la décennie 2005 à 2017.

II.2.1.3. Pluviométrie journalière

Les graphes annuels de pluviométrie mensuelle et journalière de la région de Tébessa téléchargés du site *Infoclimat* pour la période 2000 – 2017 montrent une distribution interannuelle des journées pluvieuses très variable du point de vue aussi bien temporel, quantitatif qu'en intensité.

Le tableau 4 affiche le nombre annuel total de journées pluvieuses, le nombre de journées où les hauteurs dépassent les 10 mm, le nombre de journées où les hauteurs dépassent les 20 mm ainsi que les maximums annuels des hauteurs précipitées.

La figure 9 montre le graphe des hauteurs journalières précipitées à Tébessa et ses environs établie par infoclimat pour l'année 2015.

À titre spécial La figure 9a. et la figure 9b. montrent le graphe des hauteurs mensuelles et le graphe des hauteurs journalières précipitées à Tébessa et ses environs établie par infoclimat pour l'année 2002. (Année exceptionnelle avec un cumul de plus de 800 mm).

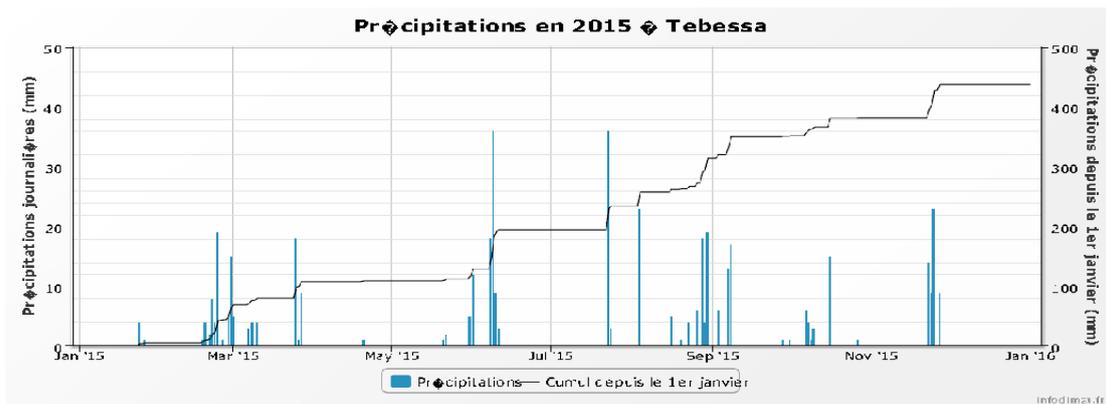


Figure 9 : Précipitations journalières de l'année 2015 pour Tébessa établie par « infoclimat ».

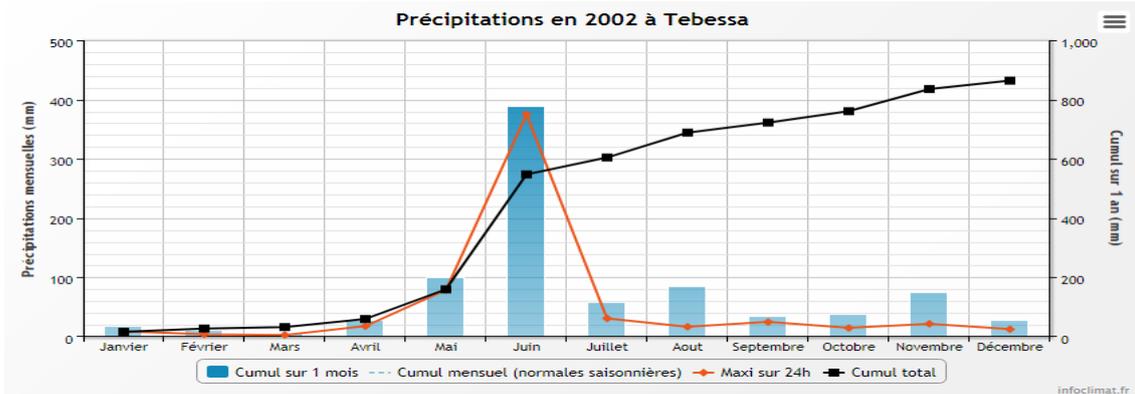


Figure 9a. : Précipitations mensuelles de l'année 2002 à Tébessa téléchargé du site « infoclimat ».

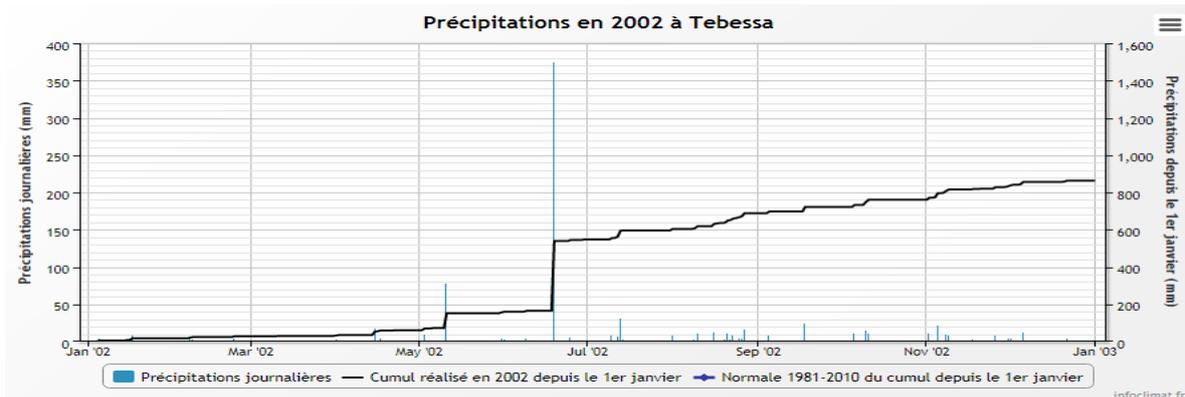


Figure 9b. : Précipitations journalières de l'année 2002 à Tébessa téléchargé du site infoclimat.

Le tableau 4 où sont comptabilisées et classées les journées pluvieuses de chaque années de 2000 à 2017 met en évidence une dispersion des journées de pluies d'intensité minimales à moyennes autour de 20 mm avec de rares piques (maximums) qui atteignent ou dépassent de peu le palier des 40 mm et exceptionnellement 380mm pour l'année 2002.

Tableau 4 nombre de journées pluvieuses par années pour la période 2000-2017 dénombrées d'après les graphes de précipitations journalières à Tébessa sur le site infoclimat

Année	nbre j	>10 mm	> 20 mm	cumul annuel (mm)	Précip journ max (mm)
2000	72	16	4	310	49
2001	40	7	2	220	30
2002	49	21	7	860	380
2003	92	33	20	600	95
2004	70	13	5	525	56
2005	59	17	8	420	51
2006	54	16	2	270	25
2007	94	22	6	395	30
2008	58	10	3	245	25
2009	71	17	6	408	43
2010	62	19	8	365	59
2011	80	16	11	425	42
2012	62	14	6	320	30
2013	46	11	3	185	24
2014	76	15	3	315	44
2015	66	18	5	440	36
2016	60	15	2	275	23
2017	71	13	6	290	40

Pour pouvoir compléter la série de pluviométrie biaisée de la station d'El Ma Labiod il a fallu déterminer les moyennes des différences entre les valeurs mensuelles interannuelles des mois renseignés sur les deux séries de 1975 à 2014 et ces résultats ont été respectivement ajouté (ou retranchés) aux valeurs correspondantes de la série de Tébessa.

La figure 10 montre l'évolution des moyennes des différences entre les précipitations mensuelles interannuelles des séries de la station de Tébessa et celle d'El Ma Labiod de 1975 à 2014 et le tableau des valeurs est en annexe D.

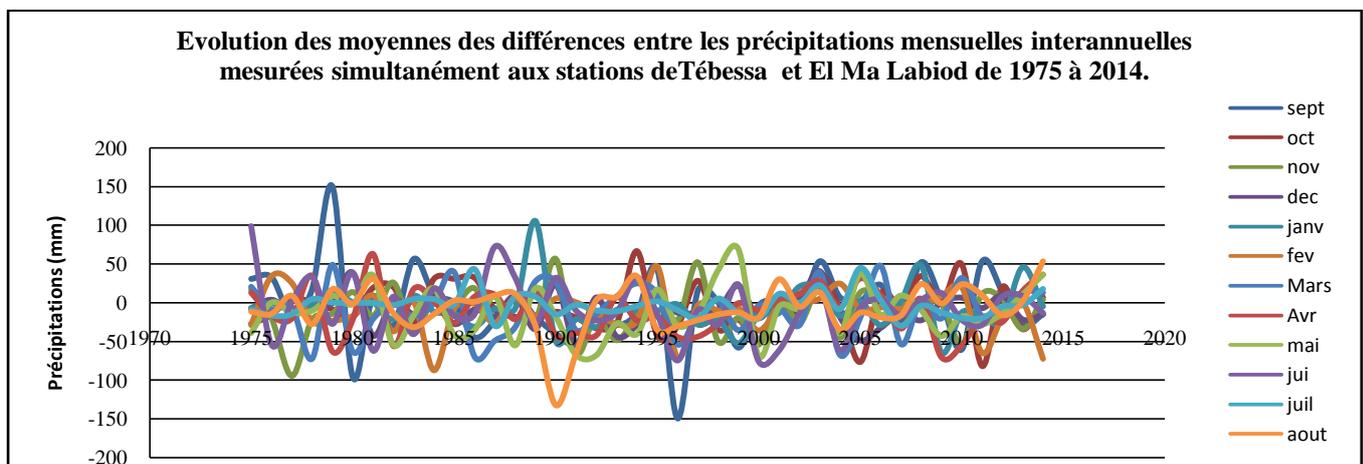


Figure 10 : Evolution des différences entre les moyennes mensuelles des précipitations entre la série de Tébessa et celle d'El Ma Labiod de 1975 – 2014

II.2.2. La série des températures

La station d'El Ma Labiod n'étant pas dotée pour collecter la température, l'utilisation de la série recueillie par les instruments de la station de l'aéroport de Tébessa a été utilisée comme référence pour compenser cette lacune.

II.2.2.1. Les méthodes de détermination de la température relative d'un lieu

Pour approcher les valeurs des températures d'une zone à partir d'une voisine (pas trop éloignée), plusieurs méthodes sont aujourd'hui disponibles la méthode utilisée par l'aviation civile, la formule de Laplace, les résultats de la série expérimentale du BNEDER (Bureau National du Développement Rural) et bien d'autres mais toutes ces méthodes ont un point commun ; le concept de la variation adiabatique de la température de l'air en fonction de l'altitude en milieu sec et en milieu humide autrement dit le gradient thermique de l'air.

a- L'aviation civile propose aux pilotes de diminuer la température d'un degré Celsius (1°C) tous les 100 m de montée en environnement sec c'est-à-dire au-dessous du point de rosée ou de l'altitude de l'isotherme zéro degré Celsius (0°C) et de ne diminuer que de 0.63°C par 100 m au-delà de cette altitude soit en environnement humide. Cette méthode a été validée jusqu'à 11000 m d'altitude.

b- La méthode de Laplace

Cette méthode a pour formule:

$$Tv = \frac{2Tr - 0.0065 (Z2 - Z1)}{2}$$

Où :

- Tr : Température mesurée à la station de référence (°C)
- Tv : Température virtuelle calculée pour le point d'altitude Z2 (°C)
- Z1, Z2 : altitudes respectives des deux stations (m)

Par définition : La température virtuelle Tv est telle que l'air sec de température Tv et l'air humide de température T, à la même pression, ont la même masse volumique. (Calculateur thermique)

c- La méthode du BNEDER

C'est un modèle basé sur des études expérimentales sur les types de climats qui agissent sur les différentes parties du territoire Algérien. Le BNEDER (Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural) a mis en place des formules pour l'estimation de la température dans les zones où il n'y a pas de station de mesure.

La formule utilisée dans cette étude est :

$$T = Tm \pm \left(\frac{h - hm}{100} \right) * (-0,73)$$

Où :

- T : Température à estimer à l'altitude h
- T_m : Température mesurée à la station de référence à l'altitude h_m
- (-0.73) : coefficient relatif à la zone d'El Ma Labiod hauts plateaux.

II.2.2.2. Détermination de la température à la station d'El Ma Labiod

Pour cette étude, la méthode de Laplace et la méthode du BNEDER ont été retenues et leurs formules ont été appliquées aux données issues de la station de Tébessa. La moyenne des deux séries résultantes a été retenue comme série rapportée à la station d'Elma Labiod.

Il existe des méthodes plus précises comme celle présentée par Marcel Délèze (non datée) sur son site à la page « atmosphère terrestre » qui est basée sur la loi des gaz parfaits, utilisée dans « les calculateurs de température virtuelle, d'humidité spécifique, et d'autres caractéristiques de l'air » mais elles demandent des données non disponibles comme la pression atmosphérique, la pression de saturation etc.../

La série des températures moyennes mensuelles de 1972-73 à 2017 à la station de Tébessa complétée à partir du site : infoclimat fait état d'annexe E.

Après application numérique, remplacement des variables z et h des deux stations les deux formules deviennent respectivement sous la forme :

Pour le modèle de Laplace, la formule est:

$$T_v = T_{mr} - 0.56875 ,$$

et Pour le modèle du BNEDER, la formule est :

$$T = T_m - 1.2775$$

Les formules ainsi simplifiées, les calculs ont été aisément exécutés sur Excel pour les deux méthodes retenues. Les résultats sont portés au tableau 5.

Les deux méthodes présentant une légère différence dans le réajustement, les moyennes des températures mensuels réajustées ont été retenues pour former la série adoptée à la station d'El Ma Labiod.

La formule de la moyenne utilisée est:

$$T = T_{ref} - 0.923125$$

Les résultats, pour les moyennes annuelles de température ajustées à la station d'El Ma Labiod, pour la période 1975 à 2017 sont reportés sur le tableau 6 et représentés sur les graphes d'évolution en figures

Tableau 5 Moyennes mensuelles interannuelles de températures ajustées à la station d'El Ma Labiod pour la période de 43 ans (1975-2017) avec méthode de réajustement.

mois	T°C ajustées à la station d'El Ma Labiod	T _{875 m} Tébessa	T _{1030 m} BNEDER	ΔT_{BNEDER}	$\Delta T_{\text{Laplace}}$	T _{1030 m} LAPLACE
sept	19.676875	20.6	19.3225	1.2775	0.56875	20.03125
oct	15.396875	16.32	15.0425	1.2775	0.56875	15.75125
nov	10.096875	11.02	9.7425	1.2775	0.56875	10.45125
dec	6.356875	7.28	6.0025	1.2775	0.56875	6.71125
janv	5.496875	6.42	5.1425	1.2775	0.56875	5.85125
fev	6.326875	7.25	5.9725	1.2775	0.56875	6.68125
mars	8.856875	9.78	8.5025	1.2775	0.56875	9.21125
avr	11.656875	12.58	11.3025	1.2775	0.56875	12.01125
mai	16.436875	17.36	16.0825	1.2775	0.56875	16.79125
jui	21.066875	21.99	20.7125	1.2775	0.56875	21.42125
juil	24.436875	25.36	24.0825	1.2775	0.56875	24.79125
aout	23.516875	24.44	23.1625	1.2775	0.56875	23.87125

(11,11a. et 11b.) et par décennie (1975 - 1984), (1985 - 1994), (1994 - 2004) et (2005 2017) sont représentés respectivement aux figures 12a. à 12h.

Tableau 6 : Moyennes annuelles des températures ajustées aux conditions de la station d'El Ma Labiod pour la période 1974-1975 à 2016-2017.

Année	T moyennes	Année	T moyennes	Année	T moyennes
1974-1975	13.68	1989-1990	15.46	2004-2005	15.59
1975-1976	13.65	1990-1991	14.74	2005-2006	16.25
1976-1977	13.22	1991-1992	13.96	2006-2007	16.01
1977-1978	15.14	1992-1993	16.04	2007-2008	15.90
1978-1979	14.15	1993-1994	16.29	2008-2009	13.97
1979-1980	14.22	1994-1995	15.64	2009-2010	15.74
1980-1981	14.46	1995-1996	15.12	2010-2011	15.67
1981-1982	13.62	1996-1997	14.72	2011-2012	16.44
1982-1983	14.82	1997-1998	15.68	2012-2013	16.37
1983-1984	14.53	1998-1999	16.46	2013-2014	16.67
1984-1985	15.05	1999-2000	15.99	2014-2015	15.69
1985-1986	15.15	2000-2001	16.57	2015-2016	16.46
1986-1987	15.21	2001-2002	16.19	2016-2017	16.60
1987-1988	16.34	2002-2003	15.94		
1988-1989	14.86	2003-2004	15.49		

L'évolution des moyennes annuelles et mensuelles ajustées à la station d'El Ma Labiod pour la période de 1975 à 2017 est portée à la figure 11a.

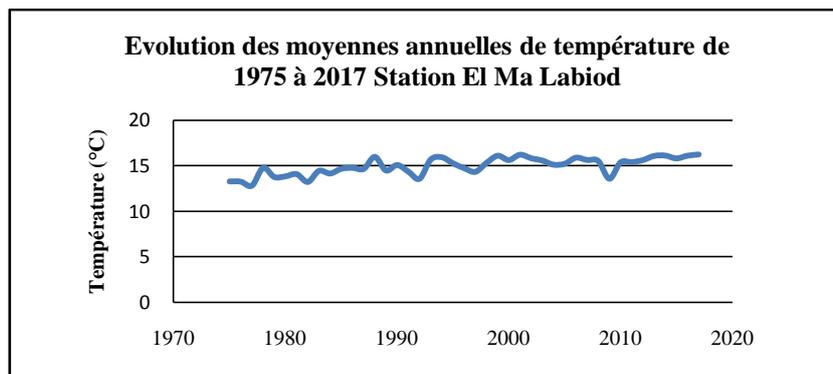


Figure. 11a Evolution des moyennes annuelles de température de 1975 à 2017 Station El Ma Labiod pour la période (1975- 2017)

Le graphe des moyennes mensuelles des températures ajustées à la station d'El Ma Labiod pour la période de 1975 à 2017 est porté en figure 11b.

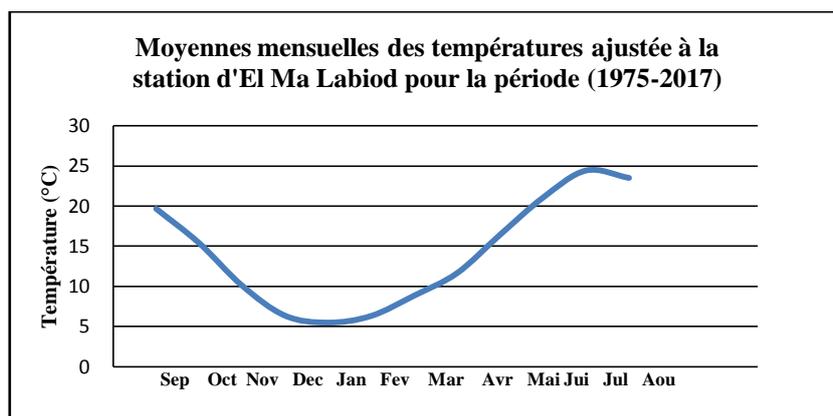


Figure 11b. Moyennes mensuelles des températures ajustées à la station El Ma Labiod pour la période de 1975 à 2017.

Les moyennes mensuelles interannuelles des températures ($T_{\text{moy}} \text{ } ^\circ\text{C}$) ajustées à la station d'El Ma Labiod de 1975 à 2017, selon les périodes (1975-1984), (1985 – 1994), (1994 – 2004) et (2005-2017) sont reportées aux tableaux 7 et respectivement représentées aux figures 12a à 12h.

Tableau 7 Les moyennes mensuelles interannuelles des températures ($T_{\text{moy}} \text{ } ^\circ\text{C}$) ajustées à la station d'El Ma Labiod par décennie pour la période de 1975 à 2017.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juillet	Aout	moy. An
1975-1984	19.79	14.25	8.83	6.53	5.42	6.29	8.71	11.48	15.57	20.22	24.47	23.62	13.76
1985-1994	20.92	16.43	11.59	6.5	4.19	7	9.06	12.21	17.12	22.27	25.26	25.32	14.91
1995-2004	21.02	16.43	10.95	7.27	6.06	7.11	10.03	11.9	19	23.15	26.31	25.49	15.39
2005-2017	21.31	17.57	11.22	6.79	6.54	6.88	9.95	13.9	17.77	23.12	26.55	25.22	15.57

a. Représentation graphique par période

A titre comparatif les représentations graphiques des températures par période sont portées aux figures 12a. à 12h.

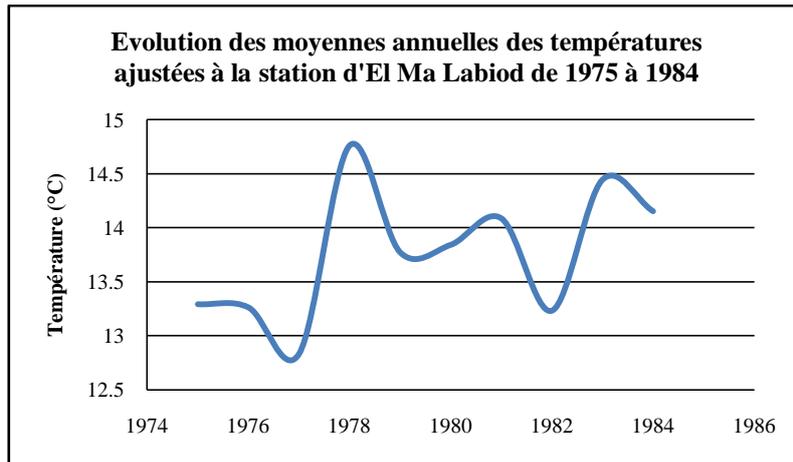


Figure 12a. Evolution des moyennes annuelles des températures ajustées à la station d'Elma Labiod référencées à la station de Tébessa pour la période de (1975- 1984).

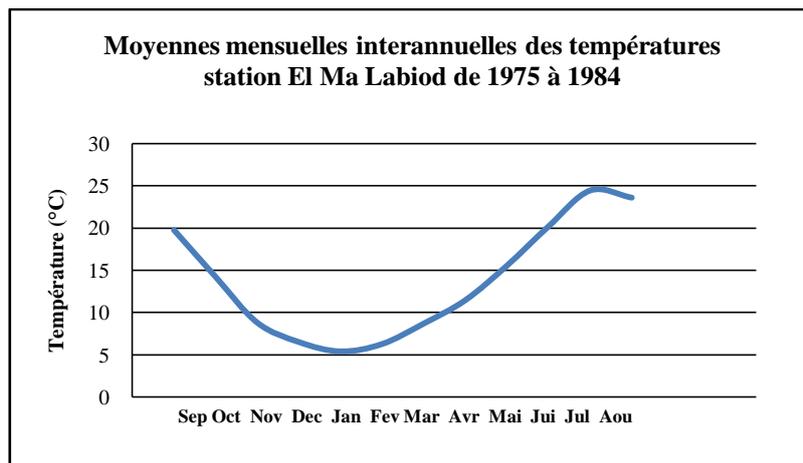


Figure 12b. Evolution des moyennes mensuelles interannuelles des températures ajustées à la station d'Elma Labiod référencées à la station de Tébessa pour la période de (1975- 1984)

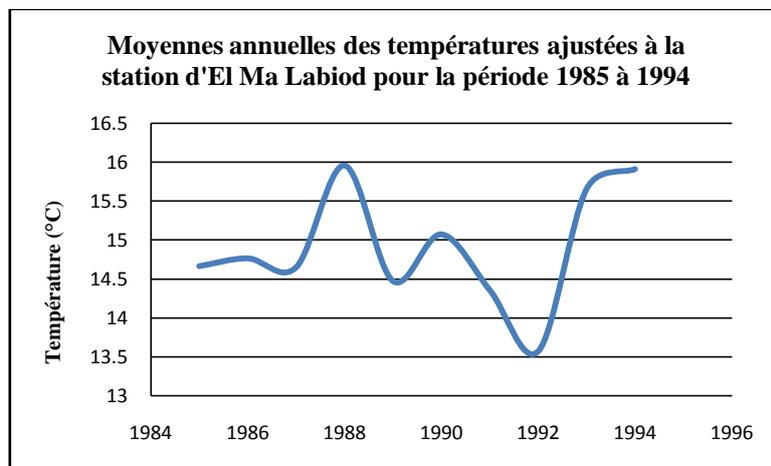


Figure. 12c. Evolution des moyennes annuelles des températures ajustées à la station d'El Ma Labiod pour la période de 1985 à 1994.

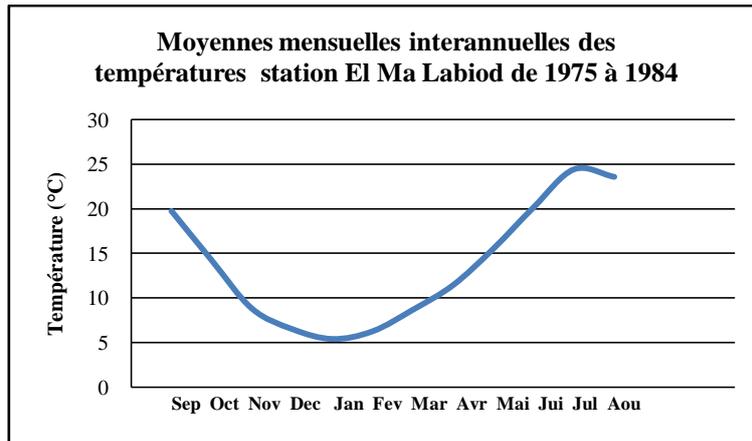


Figure 12d. Les moyennes mensuelles des températures ajustées à la station d'El Ma Labiod pour la période de 1985 à 1994.

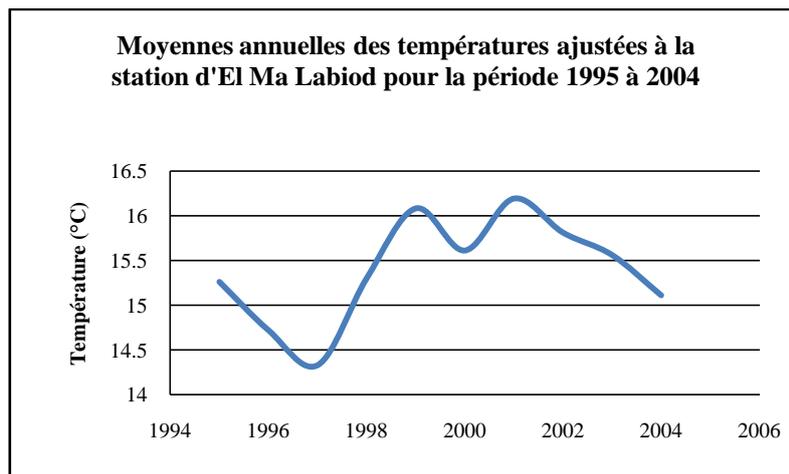


Fig. 12e. Evolution des moyennes annuelles des températures ajustées à la station d'El Ma Labiod pour la période de 1995 à 2004

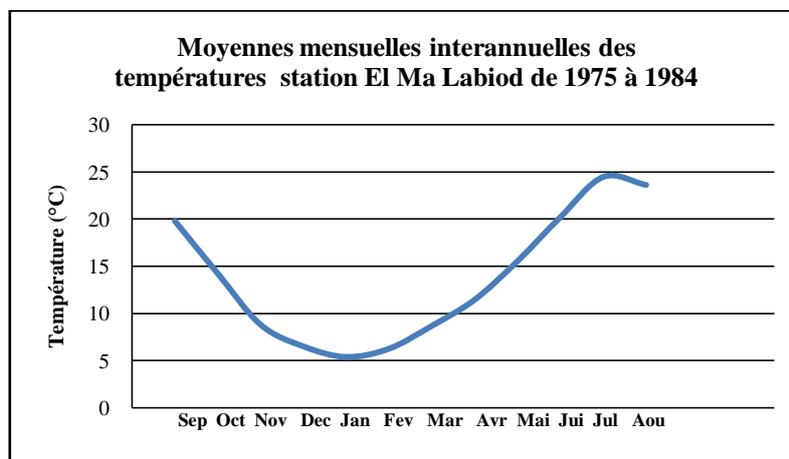


Fig. 12f. Evolution des moyennes mensuelles des températures ajustées à la station d'El Ma Labiod pour la période de 1995 à 2004

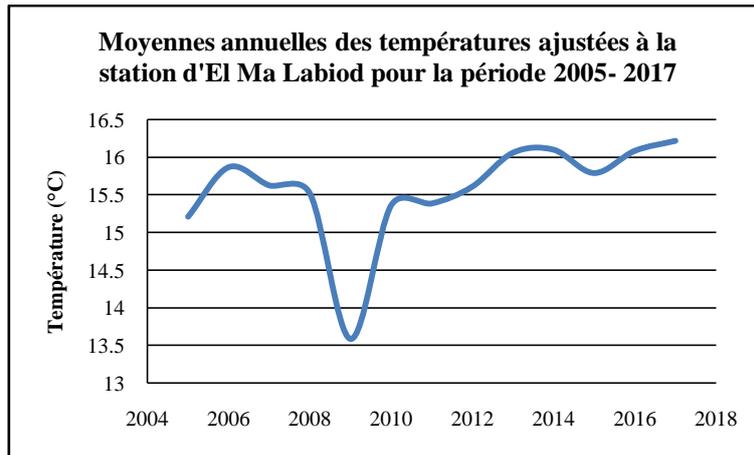


Figure12g. Evolution des moyennes annuelles des températures ajustées à la station d'El Ma Labiod pour la période de 2005- 2017

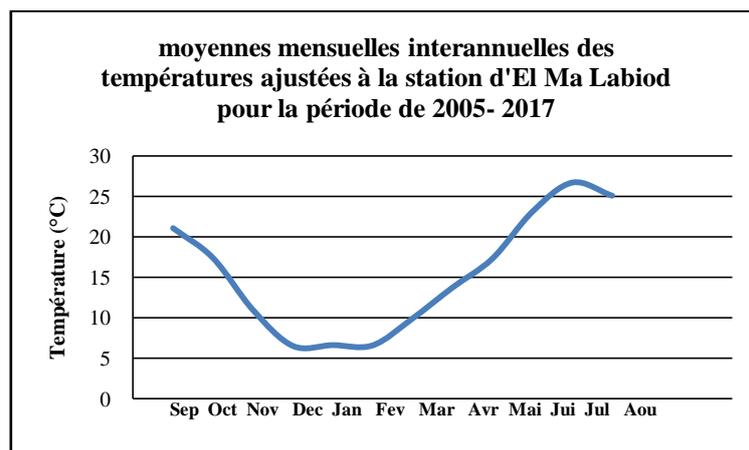


Fig.12h. Evolution des moyennes mensuelles interannuelles des températures ajustées à la station d'El Ma Labiod pour la période de 2005- 2017

b. Les graphes des situations ombrothermiques

La conjugaison des tableaux 3 et 7 des précipitations cumulées et des températures par décennie permet de permet représentation l'évolution simultanée des deux courbes, les graphes des situations ombrothermiques sont aux figures13a, 13b, 13c et 13d.

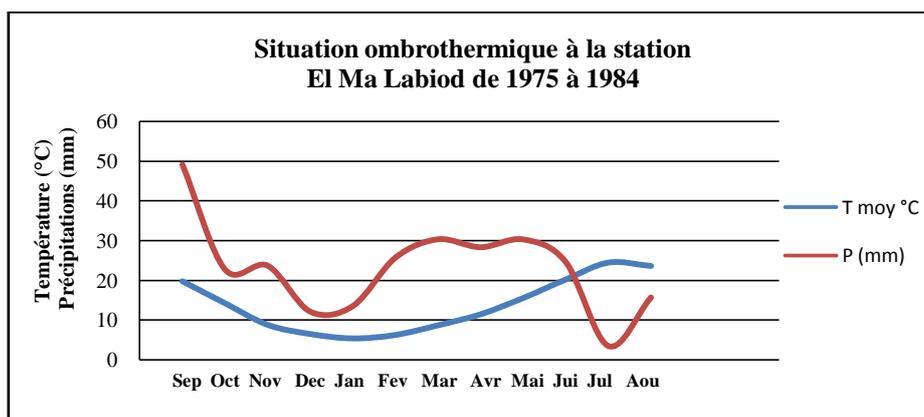


Figure 13a. Situation ombrothermique à la station El Ma Labiod pour la période de 1975 à 1984

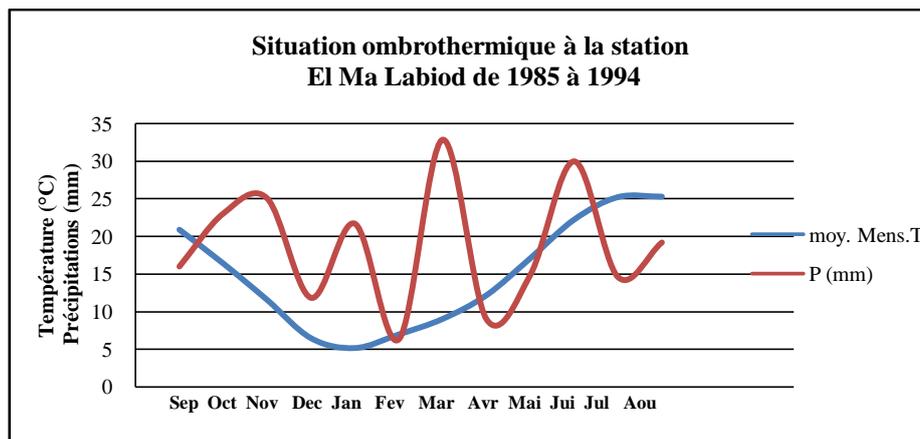


Figure 13b. Situation ombrothermique à la station El Ma Labiod pour la période de 1985 à 1994

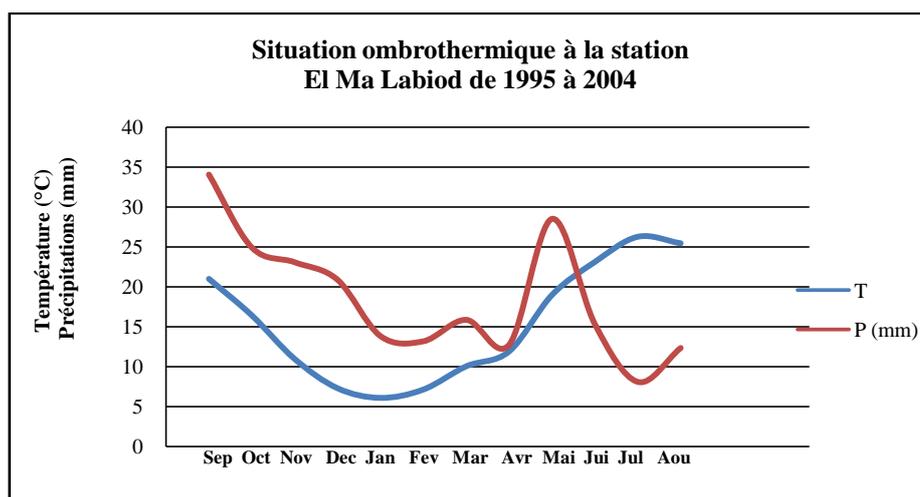


Fig 13c. Situation ombrothermique à la station El Ma Labiod pour la période de 1995 à 2004

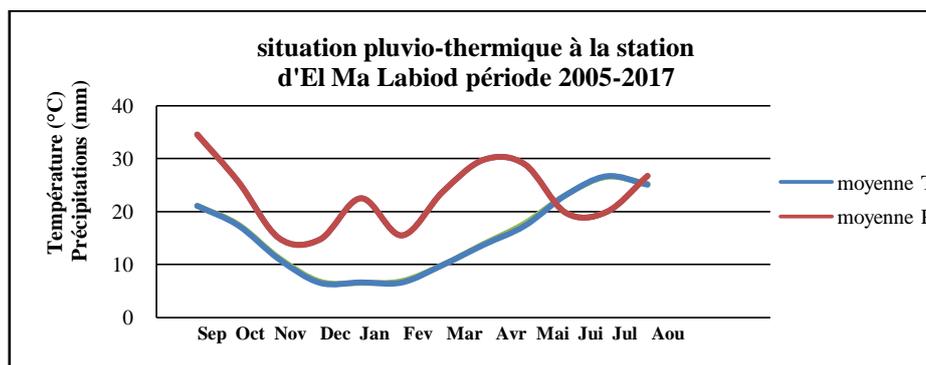


Fig 13d. Situation ombrothermique à la station El Ma Labiod pour la période de (2005- 2017)

II.2.3. L'effet de l'écran montagneux sur le réajustement des températures entre deux stations

L'approximation du réajustement des températures à une station en se référant à une deuxième station est acceptable est suffisante pour les objectifs de cette étude. Pour un objectif qui demande des résultats plus précis, il y a lieu de prendre en compte d'autres paramètres physique tels :

- L'effet de l'obstacle entre les deux points (chaîne de montagnes bordure Nord de la zone d'étude)

- L'exposition du versant sud aux radiations solaires du versant sud et de la plaine d'El Ma Labiod alors que le versant nord est couvert par l'ombre plusieurs heures par jours.
- Le couvert végétal sur le versant nord qui lui fournit un certain taux d'humidité
- L'influence des flux de chaleur du Sud contre lesquels la chaîne de montagnes assez élevées (1300 – 1650 m), jouent le rôle de bouclier protecteur pour Tébessa.

Tous ces facteurs font que deux points à la même altitude de part et d'autre de la chaîne de montagnes qui bordent la zone d'étude du Nord peuvent ne pas se trouver sur une courbe isotherme ou isobare. (Exemples des points Pt1 et Pt2 figure 14).

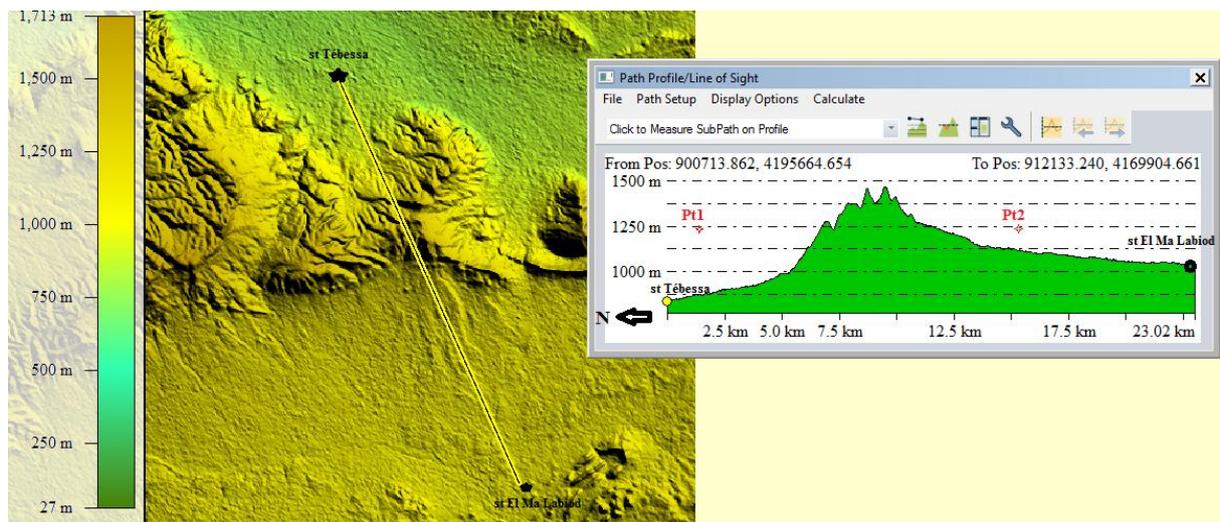


Figure 14 Influence d'un écran montagneux sur les corrections des températures en altitude.

II.3.-Détermination du type de climat

II.3.1. L'indice d'aridité :

II.3.1.1. Définitions :

a - Un **indice d'aridité** (IA) est un indicateur numérique du degré de sécheresse du climat à un endroit donné.

b - Le **climat semi-aride** est défini comme la zone dans laquelle les précipitations sont, certaines années, insuffisantes pour y maintenir les cultures et où l'évaporation excède souvent les précipitations. Appelé aussi subdésertique, Caractérisé par une grande partie de l'année sans pluie et une saison avec une faible pluviométrie (entre 200 et 400 mm/an).

c - Le **climat steppique** : peut être trouvé dans toutes les zones à climat tempéré à tropical. Comme le climat désertique, il a des journées chaudes, et des nuits très froides. La pluviosité est très faible, mais suffisante pour éviter la désertification.

II.3.1.2. L'indice d'aridité de Martonne (1923)

Cet indice prend en compte les précipitations et les températures annuelles.

a. **Formule:** $I = P / (T + 10)$

Avec :

I : indice d'aridité.

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle (C°).

b. **Références d'analyse:**

Suivant les valeurs de << I >> obtenus de Martonne a établi la classification suivante :

* $I < 5$: Climat hyper aride

* $5 < I < 7.5$: Climat désertique

* $7.5 < I < 10$: Climat steppique

* $10 < I < 20$: Climat semi aride

* $20 < I < 30$: Climat tempéré.

c. **Application numérique :**

Les indices d'aridité des quatre décennies sont portés au tableau 8

Tableau 8 les indices d'aridité des quatre décennies.

période	climat	Ia	P(mm)	T (°C)	période	climat	Ia	P(mm)	T (°C)
1975-1984	semi aride	11.59	279.83	14.15	1995-2004	Steppique	8.66	223.32	15.78
1985-1994	Steppique	8.87	224.55	15.31	2005-2017	Semi aride	10.83	277.06	15,57

La méthode de De Martonne utilisée avec les séries de précipitations et de températures précitées, attribue à la zone d'étude un climat semi aride à steppique.

Pour préciser les conditions de l'évolution estivale du climat, les élèves de De Martonne ont proposé l'utilisation d'un indice d'aridité mensuel dont la relation est la suivante :

$$Ia = P * 12 / (T + 10)$$

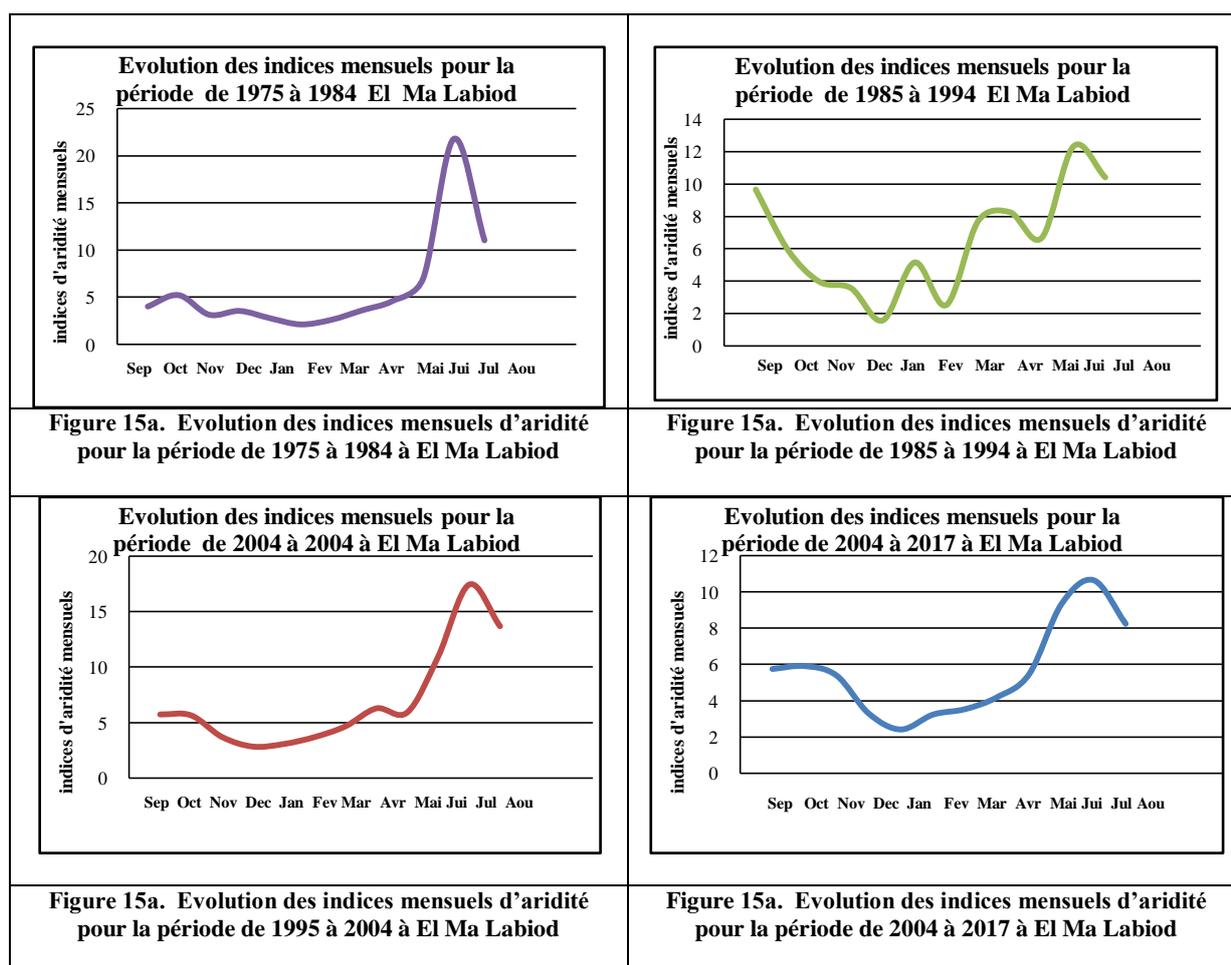
Où : P (mm) est la précipitation du mois considéré (sa multiplication par 12 sert pour l'assimiler à l'indice annuel).

Les résultats des périodes sus - citées sont portés aux tableaux 9

Tableau 9 indices d'aridité mensuels (De Martonne) par période de 1975 à 2017 selon les données climatiques ajustées à la station El Ma Labiod

Mois	sept	Oct	Nov	dec	jan	fev	mar	avr	Mai	juin	jui	aout	an
i 05-17	13.33	11.18	8.47	10.54	16.34	11.03	14.3	14.95	12.5	7.17	6.55	9.11	10.83
i 95-04	5.72	5.64	3.97	2.82	3.05	3.68	4.65	6.27	5.91	10.96	17.44	13.68	6.98
i 85-94	5.72	5.64	3.97	2.82	3.05	3.68	4.65	6.27	5.91	10.967	17.44	13.68	6.98
i 75-84	4.014	5.22	3.14	3.54	2.76	2.11	2.59	3.59	4.63	7.01	21.78	11.02	5.95

La figure 15 montre, que durant toutes les périodes de septembre à mai, un climat steppique à sec et un climat semi aride pour la saison estivale.



De Martonne propose aussi un abaque qui permet de déterminer le climat de plusieurs stations ou plusieurs séries (figure16), sur un même graphe.

La figure 16 montre l'évolution des décennies étudiées entre le climat semi aride et le climat désertique la 3eme décennie est presque entièrement désertique.

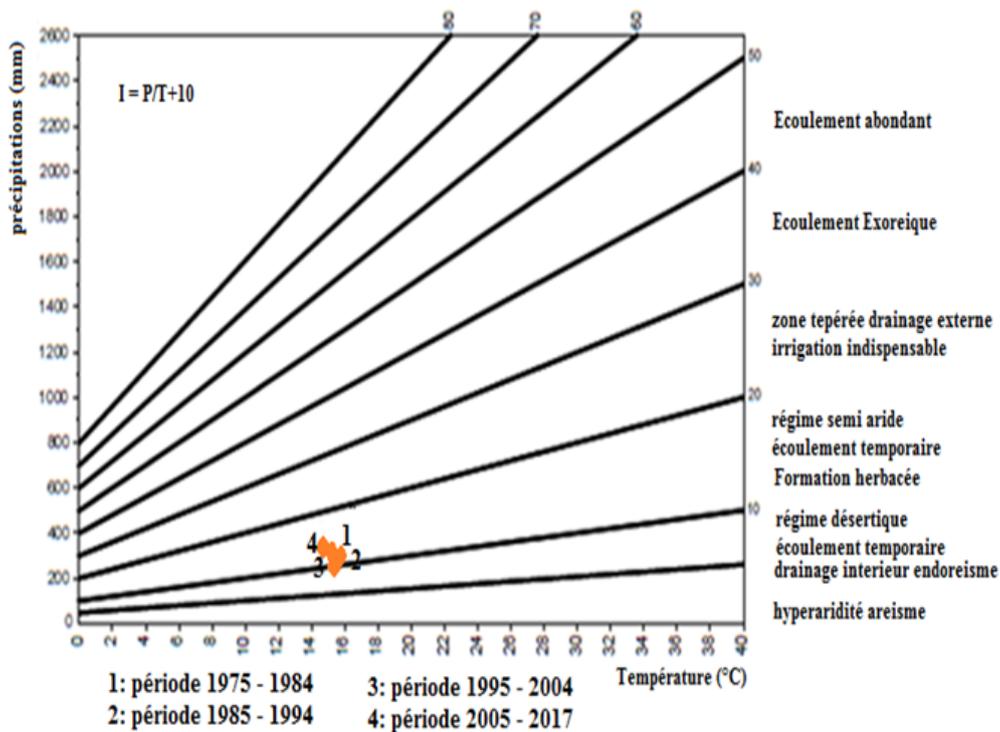


Figure 16 Abaque de De Martonne pour déterminer l'indice d'aridité.

II.3.1.3. Le quotient pluviométrique annuel de Moral

En 1964, Moral propose d'utiliser la relation suivante pour déterminer le type de climat:

a. Formule
$$IA = P / (T^2 + 10T + 200)$$

Où :

I_A : quotient pluviométrique de Moral;(indice d'aridité).

P : précipitations moyennes annuelles (mm);

T : température moyenne annuelle (°C).

Cet indice pluviométrique utilise la hauteur annuelle des précipitations où (P en mm) et les températures moyennes annuelles (T en °C) pour délimiter l'humidité et la sécheresse.

Avec :

$IA = 1$, on est à la limite de la zone aride;

$IA < 1$, on est dans un climat sec.

b. Application numérique :

L'indice d'aridité donné par la relation de Moral, pour la zone d'étude, fait l'objet du tableau 10.

Tableau 10 Indices d'aridité de Moral.

Station	Période	P (mm)	T (°C)	I	Climat
El Ma Labiod	2005-2017	277.06	15,57	0.966	Sec

Selon cet indice, le climat de la zone d'étude est sec pour la période 2005-2017. Les types de climats des périodes précédentes ont été déterminés pour trouver la période de passage du climat semi aride à sec en cette zone selon la relation de Moral. Le résultat est présenté au tableau 11.

Tableau 11 l'indice d'aridité de Moral par décennie de 1975 à 2004

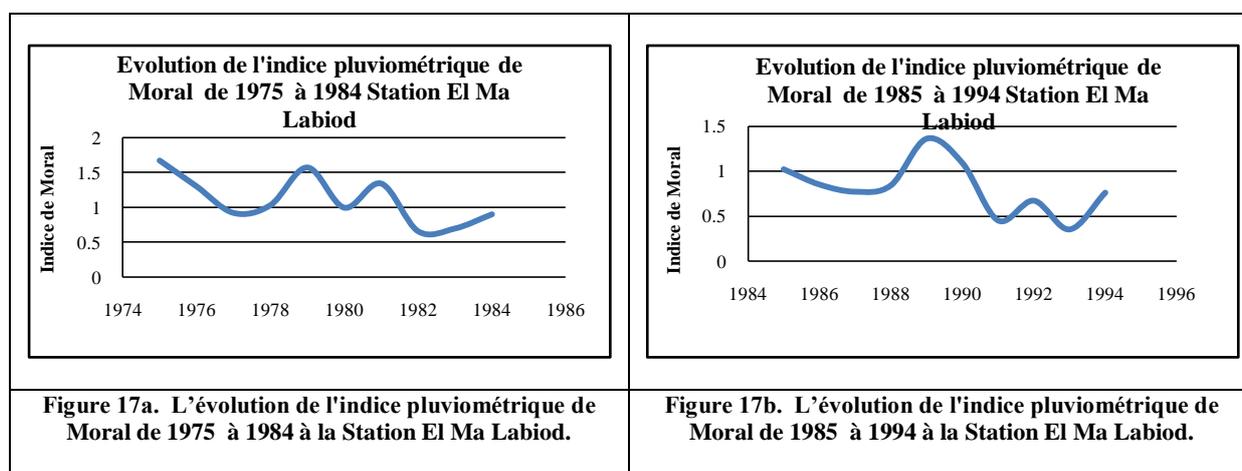
Station	Période	P (mm)	T (°C)	I	Climat
El Ma Labiod	1975-1984	279.83	14.15	1.0815	Semi aride
	1985-1994	224.55	15.31	0.7982	Sec
	1995-2004	223.316	15.78	0.7668	Sec

Les indices pluviométriques de Moral annuels détaillés par période font objet du tableau 12

Tableaux 12 valeurs des indices pluviométriques de Moral annuels détaillés par période.

Année	I de Moral						
1975	1.67	1985	1.02	1995	1.3	2005	1.3
1976	1.3	1986	0.85	1996	1	2006	0.92
1977	0.92	1987	0.77	1997	0.77	2007	0.7
1978	1.03	1988	0.84	1998	1.32	2008	1.3
1979	1.57	1989	1.36	1999	0.74	2009	0.9
1980	0.995	1990	1.09	2000	0.877	2010	0.9
1981	1.34	1991	0.45	2001	0.7	2011	0.74
1982	0.657	1992	0.67	2002	0.88	2012	0.9
1983	0.697	1993	0.35	2003	0.54	2013	0.52
1984	0.9	1994	0.76	2004	1.3	2014	1.2
						2015	1.2
						2016	0.66
						2017	1.27

Et les figures 17a, 17b, 17c et 17d.



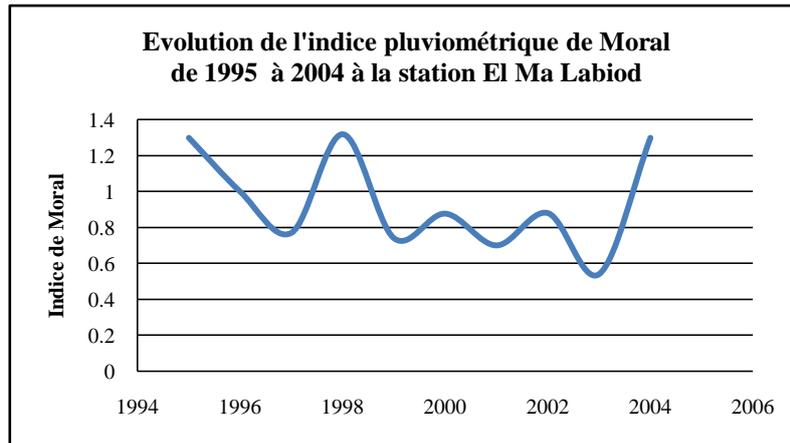


Figure 17c. L'évolution de l'indice pluviométrique de Moral de 1985 à 1994 à la Station El Ma Labiod

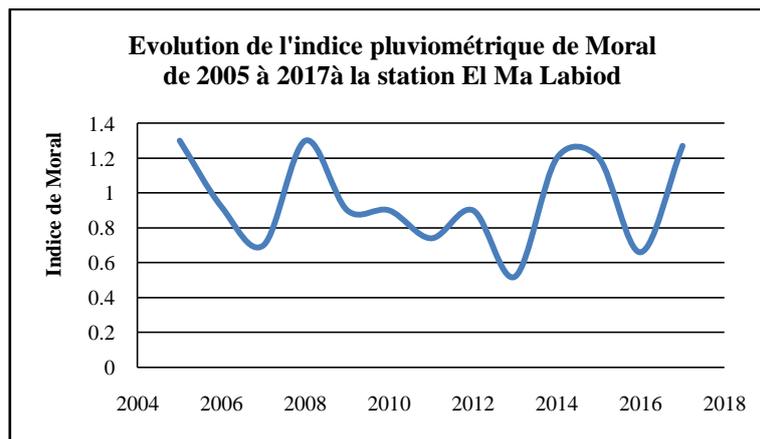


Fig 17d. L'évolution de l'indice pluviométrique de Moral de 2005 à 2017 à la station El Ma Labiod

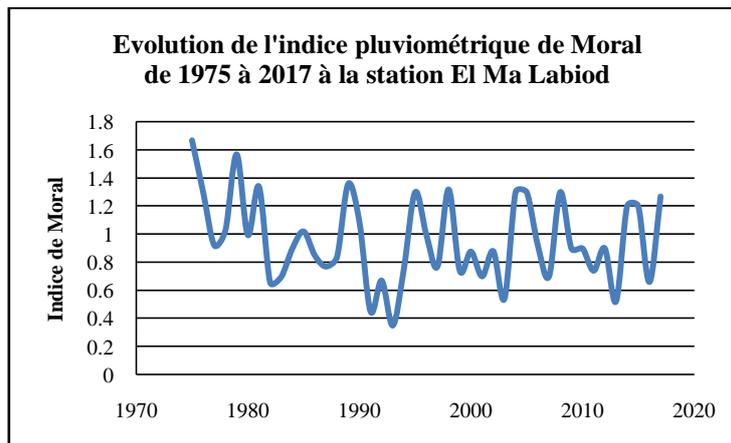


Figure 17e. L'évolution de l'indice pluviométrique de Moral de 1975 à 2017 à la Station El Ma Labiod

II.4. Estimation des paramètres du bilan hydrologique

II.4.1. Bilans hydrologiques

II.4.1.1. Bilan hydrologique de Thornthwaite

Le bilan hydrologique établi selon la méthode de C.W.Thornthwaite à l'avantage d'estimer pour chaque mois:

- L'évapotranspiration réelle ETR,
- La réserve facilement utilisable RFU,
- Le déficit agricole Da et
- L'excédent Ex.

II.4.1.2. Détermination de l'évapotranspiration (ETP, ETR)

Pour le calcul de l'ETR, la méthode de Thornthwaite distingue deux cas principaux:

- $P - ETP > 0$; d'où $P > ETP$ et $ETR = ETP$.
- $P - ETP < 0$; d'où $P < ETP$;

D'où :

- $P + RFU > ETP$ alors $ETR = ETP$.
- $P + RFU < ETP$ alors $ETR = P + RFU$.

Avec :

- P : pour moyenne des cumules annuels des précipitations
- ETP : l'évapotranspiration potentielle
- ETR : l'évapotranspiration réelle :
- RFU : La réserve facilement utilisable

a. Estimation de l'ETP:

« L'ETP correspond à l'évaporation d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques ». Roche (1963).

- Méthode de Thornthwaite

La méthode de Thornthwaite (1948) ne tient compte que de la température :

$$E T P = 16 * (10 * t / I)^a$$

Où : ETP: évapotranspiration potentielle (mm);

t : température moyenne mensuelle (°C);

I: indice thermique annuel; $I = \sum i$

i : indice thermique mensuel; $i = (t/5)^{1,514}$

a: exposant climatique donné par L.Serra en 1954; $a = (0,016 \times I) + 0,5$

- **l'ETP corrigé**

L'ETP calculé par la méthode de Thornthwaite est multiplié par un facteur de correction K donné par les tables et qui est fonction du temps, du mois et de la latitude du lieu. Les valeurs mensuelles de K relatives à la région de Tébessa sont exposées au tableau 13.

L'ETP corrigé est obtenu par l'application de la formule : **E.T.Pc = K * E.T.P**

Où :

- ETP: évapotranspiration potentielle (mm);
- ETPc: évapotranspiration potentielle corrigée (mm);
- K : facteur de correction.

Le facteur mensuel de correction relatif à la région de Tébessa est porté au tableau 13.

Tableau 13 Les valeurs mensuelles de K pour la région de Tébessa. (Latitude 35°).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16

- **Application numérique :**

Le calcul des valeurs de L'ETPc des quatre périodes fait objet des tableaux 14a,14b,14c,14d et 14e.

Tableau 14a : calcul et correction de l'ETP pour la période de 1975 à 1984

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
T °C	19.79	14.25	8.83	6.53	5.42	6.29	8.71	11.48	15.57	20.22	24.47	23.62
t/5	3.958	2.85	1.766	1.306	1.084	1.258	1.742	2.296	3.114	4.044	4.894	4.724
I	8.0274	4.882	2.365	1.498	1.13	1.415	2.317	3.52	5.58	8.29	11.07	10.49
I	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6	60.6
A	1.4696	1.4696	1.4696	1.4696	1.4696	1.4696	1.4696	1.4696	1.4696	1.4696	1.4696	1.4696
10t/I	3.265	2.35	1.457	1.077	0.89	1.0379	1.437	1.89	2.57	3.33	4.038	3.9
(10t/I) ^a	5.69	3.51	1.74	1.12	0.85	1.056	1.70	2.55	4.0	5.87	7.77	7.38
ETP	91.08	56.21	27.82	17.85	13.58	16.90	27.26	40.91	64.03	94.01	124.43	118.13
Kc Teb	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16
ETPc	93.82	54.53	23.92	15.2	11.36	14.36	38.085	44.6	77.47	113.75	153.05	132.03

Tableau 14b : calcul et correction de l'ETP pour la période de 1985 à 1994

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
T °C	20.92	16.43	11.59	6.5	4.19	7	9.06	12.21	17.12	22.27	25.26	25.32
t/5	4.184	3.286	2.318	1.3	0.838	1.4	1.812	2.442	3.424	4.454	5.052	5.064
I	8.731	6.056	3.570	1.487	0.765	1.664	2.46	3.86	6.446	9.6	11.615	11.66
I	67.917	67.917	67.917	67.917	67.917	67.917	67.917	67.917	67.917	67.917	67.917	67.917
A	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58
10t/I	3.08	2.42	1.70	0.957	0.617	1.03	1.334	1.79	2.52	3.279	3.72	3.73
(10t/I) ^a	5.959	4.062	2.335	0.932	0.464	1.049	1.58	2.53	4.339	6.58	8.037	8.068
ETP	95.35	64.99	37.36	14.92	7.43	16.78	25.27	40.58	69.37	105.30	128.60	129.08
Kc	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16
ETPc	98.21	63.04	32.13	12.68	6.468	12.27	26.03	44.23	83.94	127.4	158.18	149.74

Tableau 14c : calcul et correction de l'ETP pour la période de 1995 à 2004

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
T °C	21.02	16.43	10.95	7.27	6.06	7.11	10.03	11.9	19	23.15	26.31	25.49
t/5	4.204	3.286	2.19	1.454	1.212	1.422	2.006	2.38	3.8	4.63	5.262	5.098
i	8.79	6.056	3.276	1.76	1.34	1.70	2.87	3.71	7.54	10.18	12.35	11.77
I	71.374	71.374	71.374	71.374	71.374	71.374	71.374	71.374	71.374	71.374	71.374	71.374
a	1.642	1.642	1.642	1.642	1.642	1.642	1.642	1.642	1.642	1.642	1.642	1.642
10t/I	2.945	2.302	1.534	1.018	0.849	0.996	1.405	1.667	2.662	3.243	3.686	3.571
(10t/I) ^a	5.89	3.93	2.02	1.03	0.76	0.99	1.75	2.31	4.99	6.90	8.52	8.08
ETP	94.27	62.90	32.31	16.49	12.23	15.9	27.97	37.04	79.86	110.45	136.28	129.38
Kc	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16
ETPc	97.095	61.017	27.78	14.02	10.64	13.51	28.81	40.37	96.62	133.65	167.626	150.08

Tableau 14d : calcul et correction de l'ETP pour la période de 2005 à 2017

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
T °C	21.31	17.57	11.22	6.79	6.54	6.88	9.95	13.9	17.77	23.12	26.55	25.22
t/5	4.262	3.514	2.244	1.358	1.308	1.376	1.99	2.78	3.554	4.624	5.31	5.044
I	8.979	6.704	3.399	1.589	1.501	1.621	2.834	4.702	6.820	10.158	12.525	11.588
I	72.42	72.42	72.42	72.42	72.42	72.42	72.42	72.42	72.42	72.423	72.423	72.423
A	1.658	1.658	1.658	1.658	1.658	1.658	1.658	1.658	1.658	1.658	1.658	1.658
10t/I	2.942	2.426	1.549	0.937	0.903	0.95	1.374	1.919	2.453	3.192	3.666	3.482
(10t/I) ^a	5.990	4.349	2.067	0.898	0.844	0.918	1.693	2.949	4.432	6.858	8.627	7.922
ETP	95.85	69.59	33.07	14.38	13.51	14.69	27.10	47.18	70.91	109.73	138.03	126.75
Kc	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16
ETP _c	98.726	67.506	28.443	12.22	11.75	12.49	27.91	51.43	85.804	132.77	169.778	147.03

Tableau 14e : l'ETP corrigé par période de 1975 à 2017

ETPc	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
75-84	93.82	54.53	23.92	15.2	11.36	14.36	38.08	44.6	77.47	113.75	153.05	132.03
85-94	98.21	63.04	32.13	12.68	6.468	12.27	26.03	44.23	83.94	127.4	158.18	149.74
95-04	97.1	61.02	27.78	14.02	10.64	13.51	28.81	40.37	96.62	133.65	167.63	150.077
05-17	98.72	67.50	28.44	12.22	11.75	12.49	27.91	51.43	85.80	132.77	169.78	147.03

Les graphes de l'ETPc sont représentés simultanément en figures 18a à 18d.

- **Méthode de Blaney-Cridde**

Cette méthode est l'une des plus largement utilisée pour estimer les besoins en eau des productions agricoles. Une adaptation de cette méthode, aux zones arides et semi arides, est suggérée par la FAO.

Le calcul de l'ETP, selon cette méthode, s'effectue en deux étapes;

- la première concerne le terme climatique de l'ETP de formule :

$$ETP_{clim} = aF + b$$

Où : ETP_{clim} : l'ETP climatique (mm);

F : pouvoir évaporant de Blaney-Cridde (mm/mois);

a et b: coefficients de correction en fonction des trois paramètres climatiques:

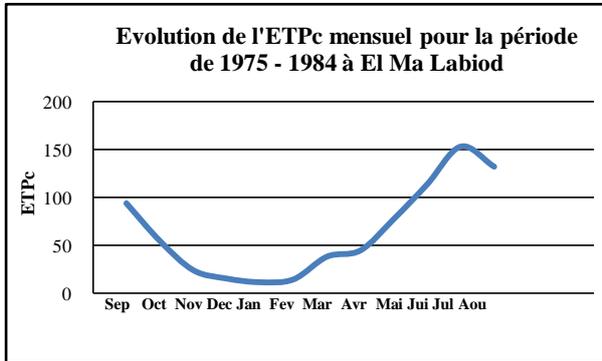


Figure 18a. de l'évolution des ETP corrigés pour la période de 1975 à 1984 à El Ma Labiod

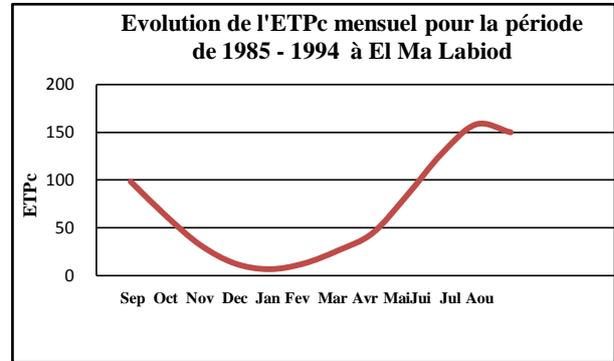


Figure 18b. L'évolution des ETP corrigés pour la période de 1985 à 1994 à El Ma Labiod

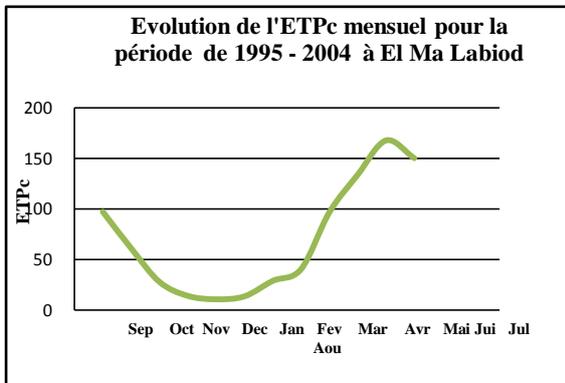


Figure 18c. L'évolution des ETP corrigés pour la période de 1995 à 2004 à El Ma Labiod

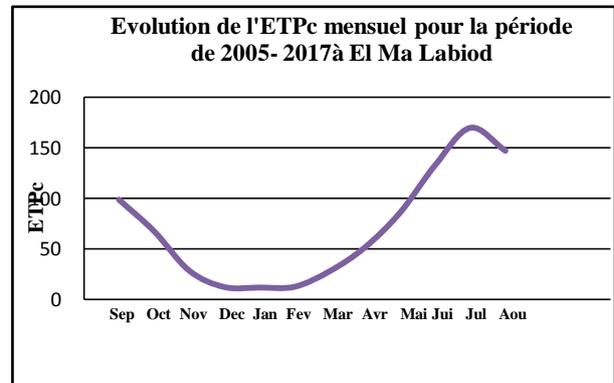


Figure 18d. Représentation de l'évolution des ETP corrigés pour la période de 2005 à 2017 à El Ma Labiod

Le pouvoir évaporant de Blaney-Cridde est donné par la formule:

$$F = p * (8,13 + 0,46 * t)$$

Où : p: pourcentage journalier moyen des heures de jour pour un mois et une latitude considérés;

t: température moyenne mensuelle (°C).

- la deuxième concerne l'ETP des cultures qui a pour formule:

$$ETP = K c * F$$

Où : ETP: évapotranspiration mensuelle (mm);

Kc: coefficient cultural, il varie de 0,50 à 1,20 pour différentes cultures en diverses zones climatiques; (céréales 1 à 1.05 et pomme de terre 1.15 à 0.75)

F: pouvoir évaporant de Blaney-Criddle (mm/mois).

Les valeurs de l'ETP calculées selon la méthode de Thornthwaite et celle de Blaney-Criddle sont portées dans les tableaux des bilans hydrologiques.

b. Evapotranspiration réelle ETR

Elle correspond à l'évapotranspiration qui se produit pendant un intervalle de temps donné, avec les conditions réelles des teneurs en eau du sol.

Ce paramètre est calculé par plusieurs méthodes empiriques prenant en compte les précipitations et les températures.

- Méthode de Coutagne

Cette méthode fait intervenir les moyennes annuelles des précipitations et de manière moins directe les températures moyennes annuelles.

$$ETR = P - \lambda P^2$$

Où :

ETR: évapotranspiration réelle (mm);

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

T : température moyenne annuelle (°C);

λ : facteur dépendant de la température moyenne annuelle;

$$\lambda = 1/(0,8 + 0,14T)$$

Cette formule est applicable pour les précipitations comprises entre $1/8 \lambda$ et $1/2 \lambda$.

La zone d'étude a les caractéristiques climatiques comprises dans le tableau 15

Tableau 15 : conditions d'application de la méthode de Coutagne dans la zone d'étude par période.

Période	75-84	85-94	95-04	05-17
P	277.1	223.1	224.35	279.73
T	15.57	15.39	14.91	13.76
λ	0.335	0.338	0.346	0.366

Ces données font que cette méthode n'est pas applicable dans la zone d'étude.

- **Méthode de Turc**

C'est la méthode la plus utilisée, elle tient compte des précipitations et des températures moyennes annuelles.

$$ETR = P / (0.9 + (P^2 / L^2))^{-1/2}$$

Où :

ETR: évapotranspiration réelle (mm);

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

L : le pouvoir évaporant de l'atmosphère;

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

Où :

T : température moyenne annuelle (°C).

La valeur de l'ETR calculée selon la méthode de Turc fait l'objet du tableau 16

Tableau 16 Valeurs de l'ETR selon la méthode de Turc par période à la station d'El Ma Labiod .

période	75-84	85-94	95-04	05-17
P	277.1	223.1	224.35	279.73
T	15.57	15.39	14.91	13.76
L	877.978	867.007	838.480	774.264
ETR	277.046	219.299	221.140	283.967

II.4.1.3. Estimation des réserves facilement utilisées R.F.U.

a. selon la formule de J. Richard :

La réserve facilement utilisable RFU représente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol et elle est donnée par la formule de J.Richard 1979 :

$$RFU = I/3 (Da \times He \times Pr).$$

où

RFU : Réserve facilement utilisable.

Da : Densité apparente du sol.

He : L'humidité équivalente du sol (capacité de rétention).

Pr : Profondeur de la couche de la terre par couriez par les racines en (mm).

b. selon la formule de Hallaire :

Les sols étant hétérogènes, la valeur de la RFU est estimée selon la formule de Hallaire:

$$\text{RFU} = (c-f/100) \times (H \times D) + 30 \text{ (mm)}$$

Où :

RFU : réserve en eau du sol

C : Capacité au champ

f : Capacité au point de flétrissement

H : Profondeur du sol en (mm)

D : Densité apparente, D=1

Les valeurs de C-f données par Hallaire selon la nature du sol sont :

C-f=5% pour un sol sableux ;

C-f=10% à 15% pour un sol limoneux ;

C-f=20% pour un sol argilo-sableux.

c. Application numérique :

Selon la formule de formule de J. Richard :

La densité apparente du sol moyenne est ainsi estimée égale à **1,4**;

La capacité de rétention est estimée égale à **0,25**;

La profondeur moyenne des racines est prise égale à **0,25** m.

D'où : **RFU = 29.16 mm**

-Selon la formule de Hallaire :

C-f (pour sol sableux) = 05%

D'où : **RFU = 30.175 mm.**

La RFU ainsi calculée pour la zone d'étude n'est pas trop éloignée de la moyenne établie pour la région de Tébessa (la RFU = 29 mm) : Guefaifia O. 1996, Rouabhia A. 2006, Fehdi C. 2008.

La figure 19 tirée d'un document de l'Office fédéral de l'environnement suisse (OFEV, non daté). Elle fait état des différentes composantes de précipitation sa fonction et sa position dans le bilan hydrique.

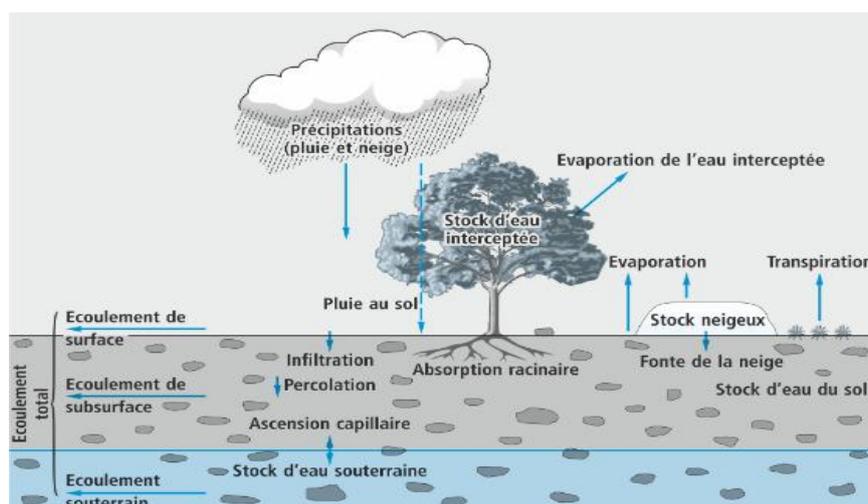


Figure 19 les interfaces entre les différents milieux jusqu'à la nappe et les éléments du bilan hydrique.

II.4.1.4. Indice thermique annuel

C'est la somme des 12 indices mensuels de l'année et l'indice thermique mensuel est calculé selon :

a. formule :
$$i = (t/5)^{1.5}$$

Où : t est la température moyenne du mois considéré.

b. Application numérique :

Les résultats après application numérique, par période de 1975 à 2017, font objet du tableau 16.

Tableau 17 Les indices thermiques mensuels interannuels, par période de 1975 à 2017

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	annuel
i (05 -17)	8.98	6.7	3.4	1.59	1.5	1.62	2.83	4.7	6.82	10.16	12.52	11.58	72.4
i (95 -04)	8.79	6.05	3.26	1.76	1.33	1.7	2.87	3.71	7.54	10.17	12.35	11.77	71.3
i (85-94)	8.73	6.056	3.57	1.48	0.765	1.66	2.46	3.86	6.44	9.6	11.61	11.65	67.881
i (75-84)	8.02	4.88	2.36	1.45	1.13	1.4	2.31	3.52	5.58	8.29	11.07	10.49	60.5

II.1.5. Etablissement du bilan hydrologique :

Les bilans hydrologiques par période sont exposés dans les tableaux 18a à 18d.

Tableau 18a : bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite pour la période 1975 à 1984

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
P (mm)	49.16	22.74	23.7	12.1	13.5	25.7	30.34	28.34	30.31	24.61	3.48	15.71	279.7
T (°C)	19.79	14.25	8.83	6.53	5.42	6.29	8.71	11.48	15.57	20.22	24.47	23.62	13.76
ETP (mm)	93.82	54.53	23.92	15.2	11.36	14.36	38.085	44.6	77.47	113.75	153.05	132.03	876.2
P-ETP (mm)	-44.66	-31.79	-0.22	-3.06	2.16	11.35	-7.74	-16.26	-47.16	-89.14	-149.57	-116.32	.
RFU (mm)	0	0	0	0	2.16	13.51	5.76	0	0	0	0	0	.
ETR (mm)	49.16	22.74	23.7	12.14	11.36	14.36	38.08	34.10	30.31	24.91	3.48	15.71	387.8
Da (mm)	44.66	31.79	0.22	3.06	0	0	0	10.49	47.16	89.14	149.57	116	488.1
Ex (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 18b : bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite pour la période 1985 à 1994

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
P (mm)	15.99	23.04	25.06	11.82	21.69	6.28	32.87	8.98	14.87	29.99	14.57	19.19	224.35
T (°C)	20.92	16.43	11.59	6.5	4.19	7	9.06	12.21	17.12	22.27	25.26	25.32	14.91
ETP (mm)	98.21	63.04	32.13	12.68	6.47	14.26	26.03	44.23	83.94	127.4	158.18	149.74	816.31
P-ETP (mm)	-82.22	-40	-7.07	-0.86	15.22	-7.98	6.84	-35.25	-69.07	-97.41	-143.61	-130.55	-591.96
RFU (mm)	0	0	0	0	15.22	7.24	14.08	0	0	0	0	0	36.54
ETR (mm)	15.99	23.04	25.06	11.82	6.47	14.26	26.03	23.06	14.87	29.99	14.57	19.19	224.35
Da (mm)	82.22	36,39	0,626	0	0	0	0	21.17	69.07	97.41	143.61	130.55	544.03
Ex (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 18c : bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite pour la période 1995 à 2004

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
P (mm)	34.09	24.95	23.1	20.9	13.84	13.19	15.88	12.75	28.54	15.33	8.1	12.35	223.01
T (°C)	21.02	16.43	10.95	7.27	6.06	7.11	10.03	11.9	19	23.15	26.31	25.49	15.39
ETP (mm)	97.09	61.017	27.78	14.02	10.64	13.51	28.81	40.37	96.62	133.65	167.62	150.07	841.21
P-ETP (mm)	-63.01	-36.067	-4.68	6.88	3.2	-0.32	-12.93	-27.62	-68.08	-118.32	-159.52	-137.72	-618.19
RFU (mm)	0	0	0	6.88	10.08	9.76	0	0	0	0	0	0	26.72
ETR (mm)	34.1	24.95	23.1	20.9	10.64	13.51	25.64	12.75	28.54	15.33	8.1	12.35	229.9
Da (mm)	63.01	36.39	4.68	0	0	0	3.18	27.62	68.08	118.32	159.52	137.72	618.52
Ex (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 18d : bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite pour la période 2005 à 2017

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
P(mm)	34.55	25.7	15	14.76	22.53	15.52	23.78	29.8	28.95	19.8	19.95	26.75	277.1
T(°C)	21.31	17.57	11.22	6.79	6.54	6.88	9.95	13.9	17.77	23.12	26.55	25.22	15.57
ETP (mm)	98.72	67.50	28.44	12.22	11.75	12.49	27.91	51.43	85.80	132.77	169.78	147.03	845.85
P-ETP (mm)	-64.17	-41.806	-13.44	2.54	10.78	3.03	-4.13	-21.63	-56.85	-112.97	-149.83	-120.28	-568.76
RFU (mm)	0	0	0	2.76	13.54	16.57	12.44	0	0	0	0	0	45.31
ETR (mm)	34.55	25.7	15	12.22	11.75	12.49	27.91	51.43	28.95	19.8	19.95	26.75	286.5
Da (mm)	64.17	41.81	13.44	0	0	0	0	9.19	56.85	112.97	149.83	120.28	568.54
Ex (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

L. Serra (1954) estime que cette méthode donne des résultats inférieurs en zones arides et semi arides, et supérieurs en zones tropicales humides ou équatoriales aux mesures effectuées avec des lysimètres et qu'elle ne convient qu'aux régions humides et subhumides de la zone tempérée des USA où elle a été mise au point.

La case de l'excédant sur les tableaux du bilan hydrique représente la valeur du ruissellement et de l'infiltration :

$$EX = R + I$$

Où ;

- **R** pour le ruissellement
- **I** pour l'infiltration

II.4.2. Calcul du ruissellement

Lors de leur étude sur les bassins tunisiens ; Tixteront et Berkaloff ont donné en 1961 une méthode de calcul du ruissellement utilisable lorsque les précipitations sont inférieures à 600 mm, l'erreur étant alors inférieure à 10%.

La formule de calcul est la suivante :

$$R = P^3 / 3(E.T.P)^2$$

Où : R : ruissellement (mm);

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

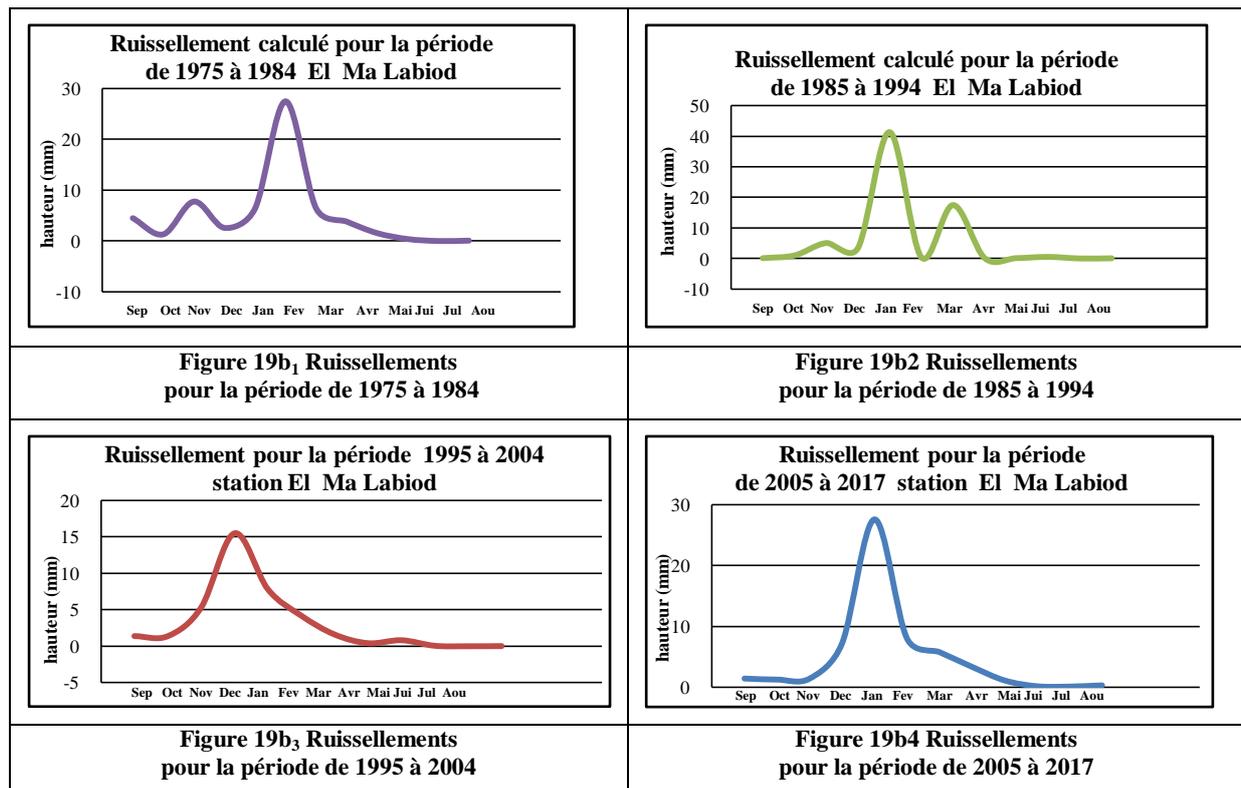
ETP : évapotranspiration potentielle annuelle (mm).

Cette méthode de calcul du ruissellement est critiquée car elle est empirique donc elle nécessite des corrections à l'aide d'installations lysimétriques d'une part, et son utilisation est limitée aux précipitations moyennes annuelles inférieures à 600 mm d'autre part.

Tableau 19 : Ruissellements mensuels par période selon la méthode de Tixteront et Berkaloff

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
R 04 - 17	1.41	1.241	1.39	7.178	27.611	7.988	5.754	3.335	1.098	0.146	0.092	0.295
R 95 - 04	1.4	1.39	5.324	15.488	7.805	4.19	1.608	0.424	0.83	0.067	0.006	0.028
R 85 - 94	0.141	1.025	5.08	3.42	41.25	0.41	17.47	0.123	0.15	0.55	0.04	0.102
R 75 - 84	4.5	1.318	7.755	2.581	6.383	27.471	6.418	3.814	1.546	0.384	0	0.074

Les valeurs de ruissellement selon la méthode de Tixeront et Berkaloff sont portées par période dans le tableau 19 Et sur les figures 19b1 à 19b4.



II.4.3. Calcul de l'infiltration Figure 19b Ruissellements confrontés par période de 1975 à 2017

II.4.3.1. définition :

Pour G. Castany et J. Magrat 1977 l'infiltration est le passage de l'eau à travers la surface du sol (pénétration dans le sol) et le mouvement descendant de l'eau dans la zone non saturée, jusqu'à la zone saturée ou non.

Ils ajoutent de ne pas prendre infiltration dans le sens restreint à la seule traversée de la surface du sol par l'eau -le passage d'un milieu à un autre excluant le mouvement de l'eau en milieu non saturé (zone vadose).

Pour Musy 1991 et Horton l'infiltration est déterminée par le calcul de ses caractéristiques ; le taux d'infiltration $i(t)$ et l'infiltration cumulée $I(t)$ quoique Horton ajoute un troisième paramètre une durée t_0 avant le début effectif de l'infiltration (temps de préparation de la surface du sol pour être traversée par l'eau en contact).

Pour les deux, l'infiltration cumulée $I(t)$ est déterminée en fonction du taux d'infiltration $i(t)$ suivant les formules respectives et in Benarfa H. et Rezaiguia S. (2003).

$$I(t) = \int_{t=t_0}^t i(t) \cdot dt$$

Et

$$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \cdot e^{-r \cdot t}$$

Avec :

$i(t)$: capacité d'infiltration au temps t [mm/h],

i_0 : capacité d'infiltration respectivement initiale dépendant surtout du type de sol [mm/h],

i_f : capacité d'infiltration finale [mm/h],

t : temps écoulé depuis le début de l'averse [h],

r : constante empirique, fonction de la nature du sol [min^{-1}].

D'autres chercheurs ont présenté des formules et des modèles de détermination de l'infiltration cumulée, elles sont présentés au tableau 20 in A. Musy (2005).

Tableau 20 Principales fonctions d'infiltration utilisées (D'après Jatou, 1982).

Auteur	Fonction	Légende
Horton	$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \cdot e^{-r \cdot t}$	$i(t)$: capacité d'infiltration au cours du temps [cm/s] i_0 : capacité d'infiltration initiale [cm/s] i_f : capacité d'infiltration finale [cm/s] r : constante fonction de la nature du sol [min^{-1}]
Kostiakov	$i(t) = i_0 \cdot t^{-a}$	a : paramètre fonction des conditions du sol
Dvorak-Mezencev	$i(t) = i_0 + (i_1 - i_f) \cdot t^{-b}$	i_1 : capacité d'infiltration au temps $t=1$ min [cm/s] t : temps [s] b : constante
Holtan	$i(t) = i_f + c \cdot w \cdot ((IMD) - F)^n$	c : facteur variant de 0,25 à 0,8 w : facteur d'échelle de l'équation de Holtan n : exposant expérimental proche de 1,4
Philip	$i(t) = \frac{1}{2} \cdot s \cdot t^{-0.5} + A$	s : sorptivité [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-0.5}$] A : composante gravitaire fonction de la conductivité hydraulique à saturation [cm/s]
Dooge	$i(t) = a \cdot (F_{\max} - Ft)$	a : constante F_{\max} : capacité de rétention maximale Ft : teneur en eau au temps t
Green & Ampt	$i(t) = K_s \left(1 + \frac{h_0 - h_f}{z_f(t)} \right)$	K_s : conductivité hydraulique à saturation [mm/h] h_0 : charge de pression en surface [mm] h_f : charge de pression au front d'humidification [mm] z_f : profondeur atteinte par le front d'humidification [mm]

II.4.3.2. Les facteurs qui influent sur l'infiltration :

Mais la sensibilité de l'infiltration à plusieurs facteurs, qui eux-mêmes dépendent d'autres, comme le présente J. Rosnoblet 2002, lors de l'étude de « la sensibilité de l'infiltration / ruissellement » :

- Sensibilité à la pente - Sensibilité à la résistance hydraulique de la croûte - l'infiltrabilité du sol - Sensibilité au profil de conductivité hydraulique à saturation - Sensibilité à l'évolution de la succion effective au front d'humectation - Sensibilité à la captation.

Ces paramètres seraient nécessaires pour un calcul précis de la quantité infiltrée à travers une petite surface mais l'appréciation de ce phénomène pour un bassin versant de 600 km² le bilan hydrique est largement suffisant.

L'application directe de la formule du bilan :

$$P = D + R + I$$

donnerait l'infiltration comme suit :

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

Où : P : précipitation (mm);

D: déficit d'écoulement ou (ETR) (mm);

R : ruissellement (mm);

I : infiltration (mm).

Il y a lieu de tenir compte de la RFU du mois passé ; c'est-à-dire :

$$P(i)+RFU(i-1)=D(i)+R(i)+I(i)$$

d'où la **formule**:

$$I(i) = P(i)+RFU(i-1)- D(i)-R(i)$$

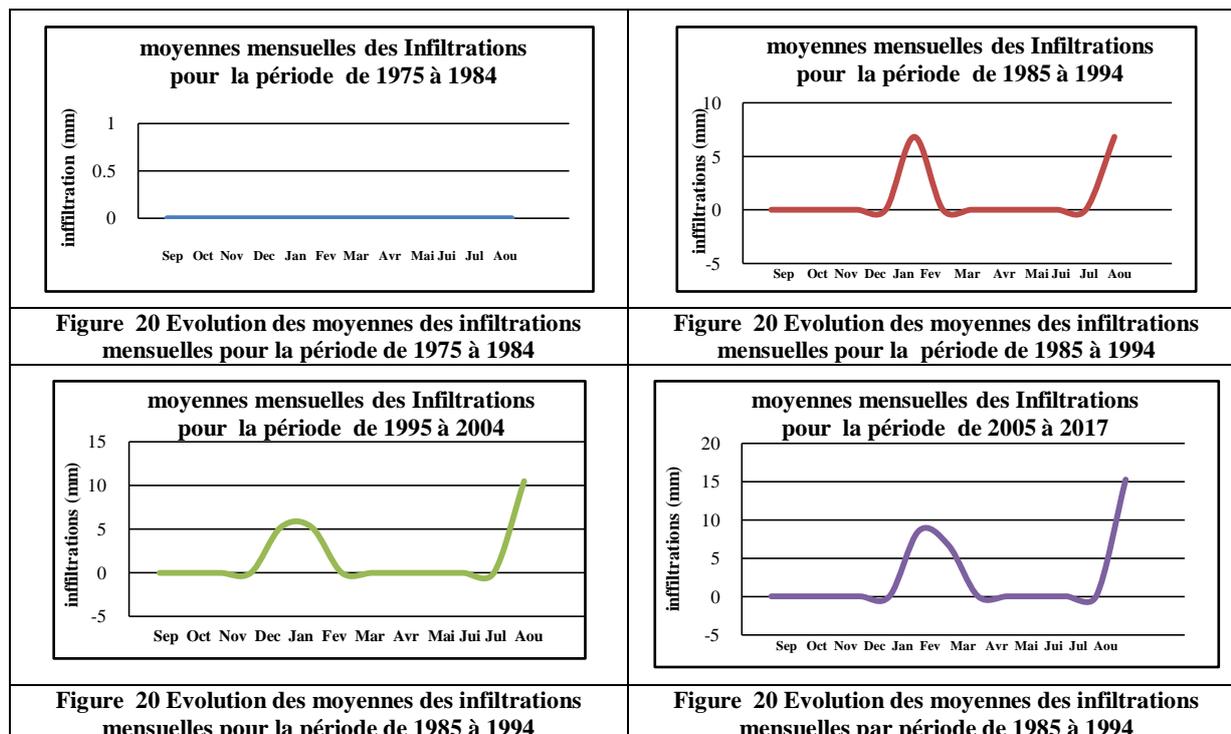
Avec : - (i) indice du mois courant et

- (i-1) indice du mois passé

Les moyennes des infiltrations mensuelles interannuelles, calculées pour les quatre périodes, sont portées au tableau 21 et en figure 20a à 20d.

Tableau 21 Les moyennes des infiltrations mensuelles par période

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Tot
I 75 – 84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I 85 – 94	0	0	0	0	0	6.83	0	0	0	0	0	0	6.83
I 95 – 04	0	0	0	0	5.25	5.25	0	0	0	0	0	0	10.5
I 05 – 17	0	0	0	0	0	8.582	6.686	0	0	0	0	0	15.268



Ces résultats montrent que durant plus de quatre décennies l'infiltration est restée concentrée autour des mois de Janvier février et mars quoique la moyenne annuelle de l'infiltration cumulée affiche une évolution croissante.

II.4.3.3. Estimation de la recharge par la méthode du bilan de G.W.Thornthwaite

Le schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite suppose que la zone non saturée est divisée en deux parties (figure 21) :

- Une zone d'échanges (sol-plantes-atmosphère), d'épaisseur relativement faible et d'humidité très variable ;
- Une zone de transfert, d'humidité peu variable et au moins égale à celle correspondante à la capacité au champ. (Fehdi, 2008).

II.4.3.4.Recharge de la nappe ou infiltration efficace :

Il ressort du bilan hydrique et des fonctions de ces zones que la zone d'échange est soumise aux effets de l'ensoleillement et autres variations climatiques (ETP) et aux besoins du couvert végétal (aspiré par les racines : alimentation et respiration) et autres besoins du biozone. Ce prélèvement sur la quantité infiltrée, parfois noté Δs et appelé « Le stockage dans le sol » (Fehdi 2008)

Comme le passage de l'interface atmosphère-sol a été défini comme « infiltration » noté I dans le bilan, notons I_f le passage de l'interface entre la zone d'échange et la zone de transfert. Et considérons que cette quantité d'eau qui est arrivée va alimenter la nappe. (sans pertes en adsorption ou autres besoins biologique.).

Cette caractérisation correspond à la définition de l'infiltration efficace selon G. Castany et J. Magrat 1977. Et qui est :

« L'infiltration efficace. Quantité d'eau infiltrée depuis la surface du sol, qui traverse la *zone non saturée* et parvient effectivement à la *zone saturée*, exprimée en débit par unité de surface (flux), ou lame d'eau par unité de temps. C'est le *flux d'infiltration* qui traverse la *surface libre* d'une nappe, à distinguer de la *hauteur d'infiltration* (qui se réfère à la surface du sol). Dimension : L/T ».

Vu sous cet aspect le bilan hydrique devient sous la forme:

$$P = ETR + R + I_{ef} + \Delta S$$

Avec:

- I_{ef} comme infiltration efficace
- ΔS comme stockage dans le sol ou encore changement dans l'humidité du sol (mm) (FAO, non daté).

Si on reconsidère la formule du bilan hydrique, on s'aperçoit que l'ETR reprend une partie de l'eau infiltrée sous forme d'évaporation et une partie de la quantité absorbée par les racines sous forme de transpiration végétale ainsi le terme ΔS ne représenterait réellement que la quantité qui correspond aux besoins d'évoluer.

Pour quantifier ces besoins et bien d'autres, la FAO (Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) a développé un outil d'aide à la décision ROPWAT (en téléchargement libre) par la Division de la mise en valeur des terres et des eaux.

Le logiciel CROPWAT 8.0, pour Windows, est un logiciel pour le calcul des besoins en eau des cultures et des besoins d'irrigation basés sur les données du sol, du climat et des cultures.

D'autres comme Iskandar Benhadj, 2008, attribut ΔS à la zone de transfert (adsorption et autres retenues sur le flux en percolation) et laisse la RFU en zone d'échanges figure 21.

Les deux figures (20) et (21) du bilan hydrique montrent que la hauteur de la recharge est inférieure à la quantité infiltrée dans le sol. donc si les valeurs de l'infiltration sont faibles celles de la recharge sont encore moins importantes.

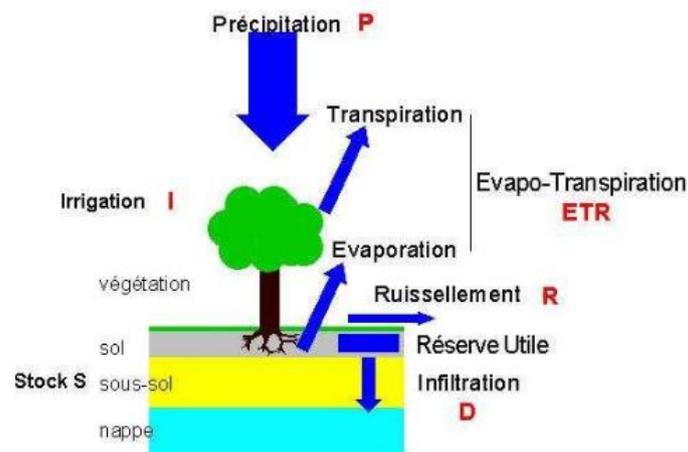


Figure 21 bilan hydrique d'une culture

II.5. Conclusion :

La plaine d'El Ma Labiod est située en zone de transition entre deux types de climats aux influences desquels elle est soumise d'où une météorologie très irrégulière. sa pluviométrie moyenne varie entre 250 et 350 mm et son climat est estimé semi-aride avec une tendance vers l'aridité.

La zone est actuellement sans aucune station météorologique. cet handicap laisse les travaux et entraîne de probables erreurs de calculs lors des extrapolations de données d'autres stations.

Le type d'averse, la topographie des bordures et l'état des sols non irrigués favorisent l'écoulement au détriment de l'infiltration même si les bilans hydriques annoncent très rarement des années excédentaires, la forme et l'envergure des lits des cours d'eau attestent d'une importante énergie d'écoulement. Ce qui confirme la concentration des quantités précipitées sur une période cumulée de quelques dizaines de jours évaluée à une moyenne de 40 jours.

La plaine d'El Ma Labiod se caractérise par une recharge inférieure à 10 mm durant plus de quatre décennies.

CHAPITRE 3

Hydrologie

Introduction

L'étude hydrologique est indispensable pour toute analyse des fonctionnalités d'un bassin versant, elle quantifie ses capacités en tant que réceptacle des précipitations qui y entrent et détermine les ramifications de collecte et l'importance et l'énergie des flux.

Elle a été définie de manière générale comme étant la science qui étudie le cycle de l'eau dans la nature et d'une manière plus stricte comme étant la science qui quantifie les écoulements de surface.

- **Etymologie et Histoire.**

De "Hydro", du grec hudôr, pour eau. Et de "logos" pour science, Attesté en 1661.

III.1. Définitions :

D'après le dictionnaire français d'hydrologie qui cite :

- *LeGlossaire International d'Hydrologie (1992)*

1. Science qui traite des eaux que l'on trouve à la surface de la Terre, ainsi qu'au-dessus et au-dessous, de leur formation, de leur circulation et de leur distribution dans le temps et dans l'espace, de leurs propriétés biologiques, physiques et chimiques et de leur interaction avec leur environnement, y compris avec les êtres vivants.
2. Science qui étudie les processus qui régissent les fluctuations des ressources en eau des terres émergées et traite des différentes phases du cycle hydrologique.

- *Le Petit Robert*

1. "Etude des eaux, de leurs propriétés".

Et propose : « science qui étudie de la distribution et de la circulation de l'eau dans la nature. » (Distribution dans le temps et l'espace) en se référant aux travaux de Oberlin et Hubert (1999).

Avec le temps, la diversité des objets hydrologiques (les branches de la science de l'eau) ont pris de l'ampleur et sont devenues des sciences autonomes. A cette fragmentation s'ajoutent les différentes approches physiques, chimiques et biologiques qu'imposent les objectifs de chaque étude.

L'hydrologie, par ses pratiques actuelles, est une partie intégrante des sciences de la terre qui s'intéresse à la partie continentale du cycle de l'eau mettant à profit toutes les autres branches de la science de l'eau.

Ses applications sont nombreuses :

- l'agriculture : irrigation, drainage ;
- l'étude des ressources en eaux : eau potable, eau pour l'industrie ;
- la lutte contre la pollution : étude des débits d'étiage évacuant les effluents ;
- l'énergie hydraulique ;
- le transport solide (dépôt ou érosion) ;
- la navigation ;
- les loisirs (plans d'eau) ;
- la sécurité des biens et des personnes : protection contre les crues et les inondations.

Tous ces points entrent dans les objectifs de l'association internationale des sciences hydrologiques : IAHS/AISH (2000) qui pour promouvoir l'étude de l'hydrologie en tant que partie intégrante des sciences de la terre et des ressources en eau, s'est fixé les axes suivants (P. Hubert 2001):

- L'étude du cycle hydrologique sur la Terre et les eaux des continents; les eaux superficielles et souterraines, les neiges et les glaces, de même que les processus physiques, chimiques et biologiques les concernant, leurs rapports avec le climat et les autres facteurs physiques et géographiques ainsi que les relations qui existent entre elles;
- L'étude de l'érosion et de la sédimentation et leurs relations avec le cycle de l'eau;
- L'examen des aspects hydrologiques de l'utilisation et de la gestion des eaux ainsi que les modifications affectant les ressources en eau sous l'influence des activités de l'homme;
- La fourniture d'une base scientifique solide pour l'utilisation optimale des systèmes de ressources en eau, comprenant le transfert de connaissances concernant la planification, l'ingénierie, la gestion et les aspects économiques de l'hydrologie appliquée.

III.2. Caractéristiques du bassin versant

La hydrologie du bassin versant est caractérisée par sa réaction à une sollicitation quelconque, cette réaction est déterminée par sa vitesse (temps de montée t_m , ou temps qui s'écoule entre l'arrivée de la crue et le maximum de l'hydrogramme) et son intensité (débit de pointe Q_{max} , volume maximum V_{max} , et le temps de concentration etc.). Ces caractéristiques dépendent, certes, du type et de l'intensité de la précipitation qui les sollicite (André Musy, 2005. ch2) mais toutes ces variables, qui distinguent le bassin versant, sont essentiellement régies par ses paramètres morpho-métriques.

III.3. Caractérisation du bassin versant d'El Ma Labiod :

Le bassin versant hydrologique d'El Ma Labiod, est limité au Nord, et au Sud par les bordures calcaires, à l'Est par une série montagneuse qui comporte (Djebel es Sif en terrain tunisien et à l'Ouest par une butte turonienne sous une légère couverture d'alluvions. (figure) 22.

Au Nord, la ligne de partage des eaux est aussi ligne de partage des eaux entre les grands bassins versants Mellague qui englobe le versant Nord et Melrhah dont fait partie la zone d'étude.

Le comportement hydrologique est déterminé par les caractéristiques topographiques, lithologiques des affleurements et de la géométrie du sous bassin.

III.3.1. Les caractéristiques morpho métriques

III.3.1.1. Le périmètre, la Surface et l'indice de compacité

On a déterminé sur la carte et par Arcgis 10.3;

a. Le **périmètre** : $P = 119$ kilomètres.

b. La **surface** : $S = 600$ kilomètres carrés.

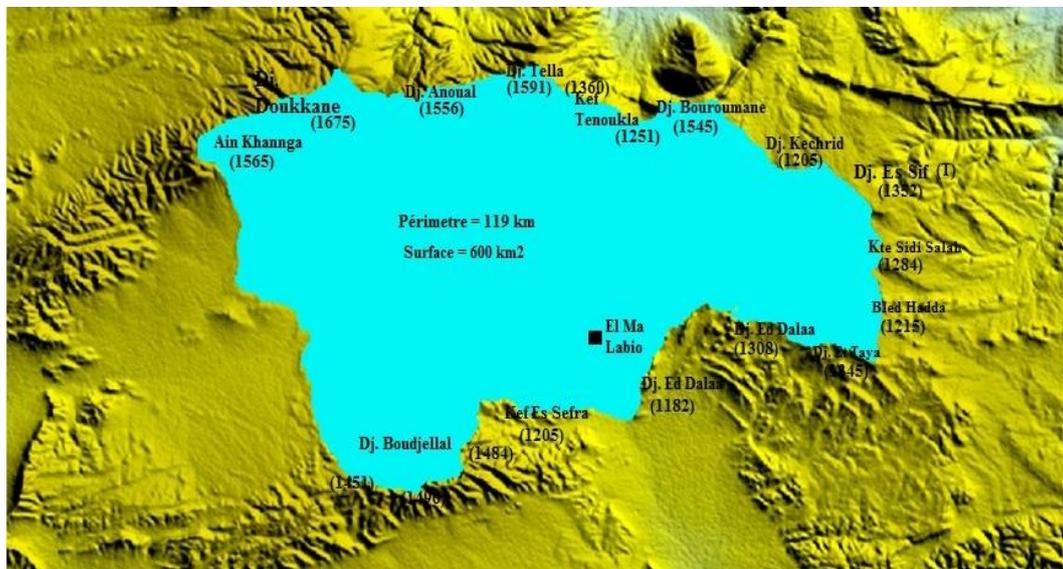


Figure 22 Position du bassin versant de la zone d'étude

c. L'indice de forme

La forme du bassin versant a une grande influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'hydrogramme résultant d'une pluie donnée, cette caractéristique peut être calculée soit par l'**indice** (ou coefficient de compacité) **de Gravelius**, qui a été proposé en 1914, défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface, ou par l'**indice de forme de Horton**, proposé en 1932, qui est lui défini comme le rapport de la largeur moyenne du bassin versant sur la longueur du cours d'eau principal (figure 23).

c.1. L'indice de compacité de "Gravelius (Kc)" :

Appelé aussi coefficient de capacité, se définit comme le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle ayant la même surface sous la forme:

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi \times S}} = \frac{0.28P}{\sqrt{S}}$$

Où :

Kc : indice de compacité de Gravelius.

P : périmètre du sous bassin versant en kilomètres.

S : surface du sous bassin versant en kilomètres carrés.

Repère d'analyse :

Si K_c est supérieur à 1 ($1.3 < K_c < 1.8$) lorsque la forme du bassin est allongée,

Si K_c est proche de 1 ($1.0 < K_c < 1.15$) lorsque un bassin versant de forme circulaire.

c.2. L'indice de forme de Horton

Pour Horton l'indice de forme est calculé par la formule :

$$K_H = A / L^2$$

Où :

K_H est l'indice de forme de Horton

A est la superficie du bassin versant

L est la longueur du cours d'eau principal

Repère d'analyse :

Si $K_H > 1$ le bassin versant est de forme ramassée

Si $K_H < 1$ le bassin versant est de forme allongée

Si $K_H \approx 1$ le bassin versant est de forme arrondie

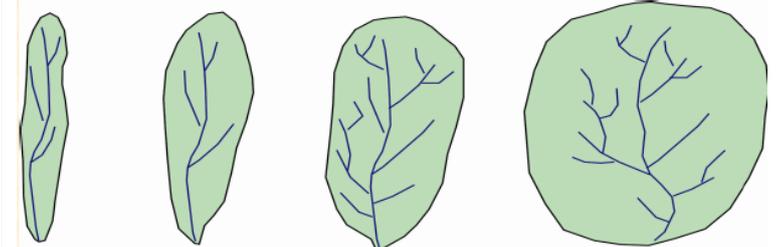
Formes (apparences) du bassin versant					
	Valeurs de K_c	1.55÷1.8	1.27÷1.55	1.15÷1.27	1÷1.15
Type	Chêne		Peuplier ou couloir	Circulaire	

Figure 23 les types de formes des bassins versants pour Gravelius

- L'application numérique au bassin versant d'El Ma Labiod:

L'application de l'indice de compacité de Gravelius a donné:

$$K_c = \frac{0.28 \times 119}{\sqrt{600}} = 1.36$$

Selon le coefficient de Gravelius le sous bassin versant de la zone d'étude (El Ma Labiod) a **une forme allongée**, ce qui augmente le temps de concentration de l'eau à l'exutoire.

L'application de l'indice de forme de Horton a donné :

La longueur moyenne du cours d'eau principal est de $L = 18.5$ km. D'où :

$$KH = \frac{600}{342} = 1.7$$

Selon L'indice de forme de Horton le bassin versant étudié est de **forme Ramassée**.

Vue la forme réelle du terrain, l'indice de forme de Horton convient mieux au cas étudié (plaine d'El Ma Labiod). Figure 24.

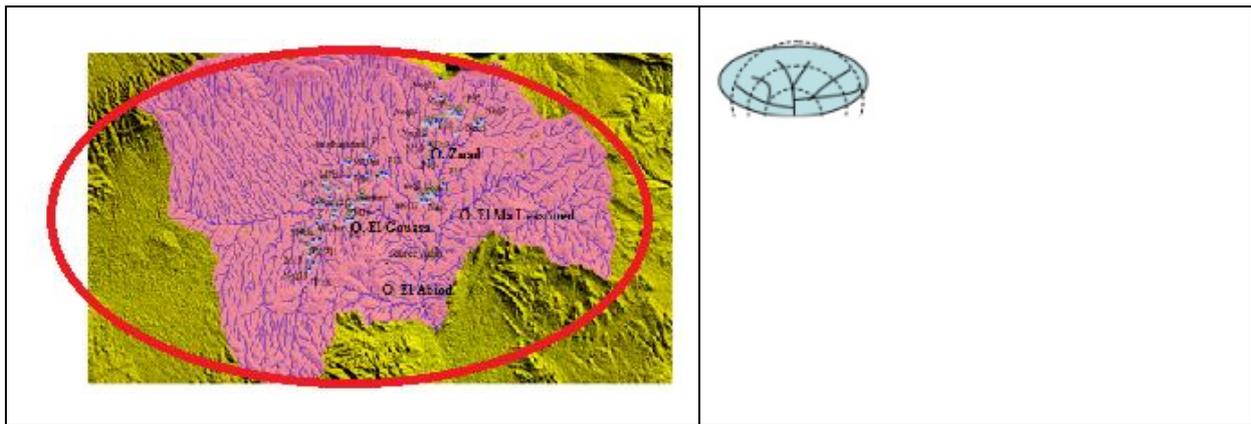


Figure 24 la forme apparente du bassin versant d'El Ma Labiod

III.3.2. Le rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent de "M. Roche" a pour but de comparer les sous bassins entre eux ; en prenant en considération l'influence de la forme sur l'écoulement et la détermination de l'indice de forme pour chaque sous bassin versant.

Le rectangle équivalent Il résulte d'une transformation géométrique du bassin réel on y conserve le même périmètre, la même superficie, (ou coefficient de compacité) donc la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau y deviennent des droites parallèles à la largeur équivalente. La densité de drainage, la couverture végétale, la climatologie, et l'occupation des sols y sont maintenues entre les courbes de niveau.

Les dimensions du rectangle équivalent ont été déterminées comme suit :

a. la longueur équivalente (L) :

$$L = \frac{K_c \sqrt{S} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]}{K_c}$$

où :

Kc : indice de compacité.

S : surface du sous bassin versant en kilomètres

b. La largeur équivalente (l)

C'est le rapport surface par la longueur équivalente, peut aussi être déterminée en en appliquant la formule:

$$l = \frac{K_c \sqrt{S} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]}{1.12}$$

Où les symboles utilisés sont les mêmes que pour la formule de la longueur équivalente « L ».

L'application des données relatives au sous bassin versant d'El Ma El Abiod donne:

$$L=46,61 \text{ km et } l=12.87\text{km}$$

La figure 28 montre la forme du rectangle équivalent du bassin versant d'El Ma Labiod.

III.3.3. Les paramètres du relief

Le relief est un facteur important, il n'influe pas seulement sur l'aptitude au ruissellement mais il lui permet aussi d'acquérir une énergie selon la pente et lui attribue un débit d'écoulement qui agit sur le temps de concentration, sur l'infiltration et sur l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique et hydrogéologique d'un bassin.

La figure 25 montre l'emplacement et la formes des différents éléments du relief.

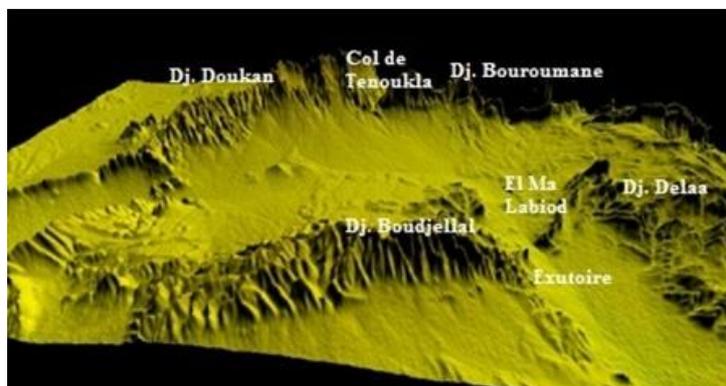


Figure 25 : géomorphologie de la zone d'étude

Le relief est mis en évidence sur les cartes topographiques par les courbes de niveau et sur les images satellitaires 3D par la nuance des couleurs.

III.3.3.1. La courbe hypsométrique

C'est une sorte d'histogramme qui synthétise le relief selon un courbe qui représente l'évolution des surfaces par tranche d'altitude d'un (sous) bassin versant. Ce qui permet d'avoir un profil où il est possible d'estimer le taux des différentes pentes et de là l'énergie de l'écoulement et tous les autres paramètres qui en dépendent.

Répartition des tranches d'altitudes et élaboration de la courbe

La planimétrie a permis d'obtenir les superficies relatives comprise entre deux courbes de niveaux successives (50 m). Ces données sont comprises dans le tableau (22) et projetées en figure (26) pour former la courbe hypsométrique de la zone d'étude.

a. Les altitudes caractéristiques

a.1. Les altitudes maximale et minimale

Ce sont les valeurs lues ou déterminées, sur la carte topographique, au point le plus élevé et au le plus bas de la zone en question. Pour cette étude, c'est Dj. Doukkane au Nord - Ouest et l'exutoire au sud de la plaine d'El Ma Labiod. Elles sont aussi lues au tableau 23.

Tableau 22 de distribution des superficies par tranche d'altitude

Tranches d'altitude	Superficies partielles Si (km2)	Superficies partielles Si (%)	Superficies cumulées Si (km2)	Superficies cumulées Si (%)
1675- 1650	0,84788	0,14131333	0,84788	0,14131333
1650-1600	1,3618	0,22696667	2,20968	0,36828
1600-1550	2,0538	0,3423	4,26348	0,71058
1550-1500	5,1156	0,8526	9,37908	1,56318
1500-1450	6,424	1,07066667	15,80308	2,633846667
1450-1400	14,0102	2,33503333	29,81328	4,96888
1400-1350	13	2,16666667	42,81328	7,135546667
1350-1300	24	4	66,81328	11,13554667
1300-1250	31	5,16666667	97,81328	16,30221333
1250-1200	70,488	11,748	168, 30328	28,05021333
1200-1150	78,7	13,1166667	247,00128	41,16688
1150-1100	155	25,8333333	402,00128	67,00021333
1100-1050	133	22,1666667	535,00128	89,16688
1050-1000	55	9,16666667	590,00128	98,33354667
1000-975	10	1,66666667	600,00128	100,0002133
Valeurs cumulées		100,000213		

a.2. L'altitude moyenne

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$H_{moy} = \sum H_i S_i / S$$

Où :

Hmoy : Altitude moyenne du bassin (m),

Si : superficie comprise entre deux courbes de niveau (Km2)

Hi : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m),

S : Surface totale du bassin versant (Km2)

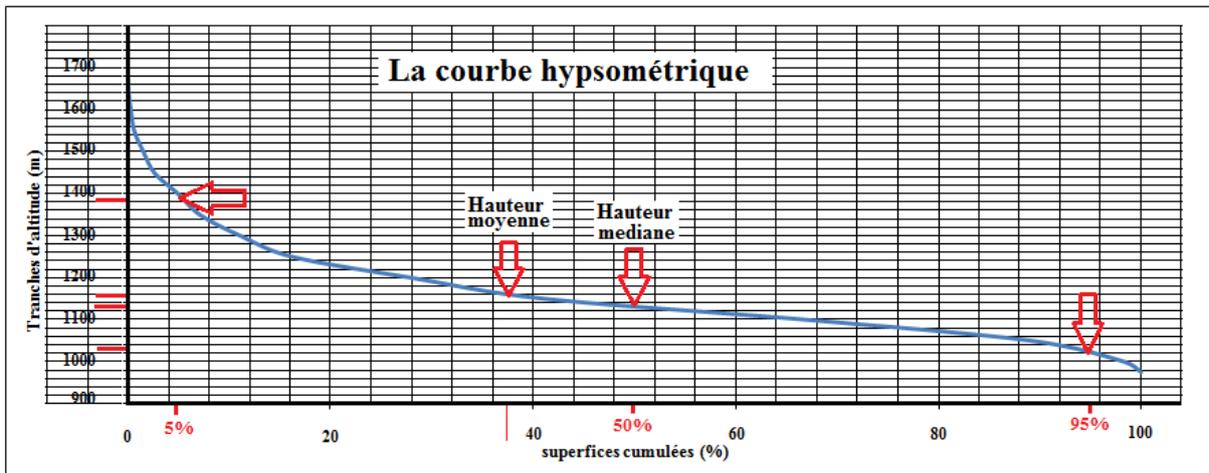


Figure 26 la courbe hypsométrique du sous bassin versant d'El Ma Labiod

a.3 Interprétation de la courbe hypsométrique

Un bassin jeune: A une faible superficie par rapport à la dénivelée initiale, c'est un bassin abrupt.

Un bassin vieux: il a la forme d'une plaine douce où l'altitude varie très peu avec une grande superficie.

Un bassin mature : il présente une forme intermédiaire.

La figure 27 permet d'interpréter la courbe hypsométrique selon sa forme ; concave, convexe ou intermédiaire.

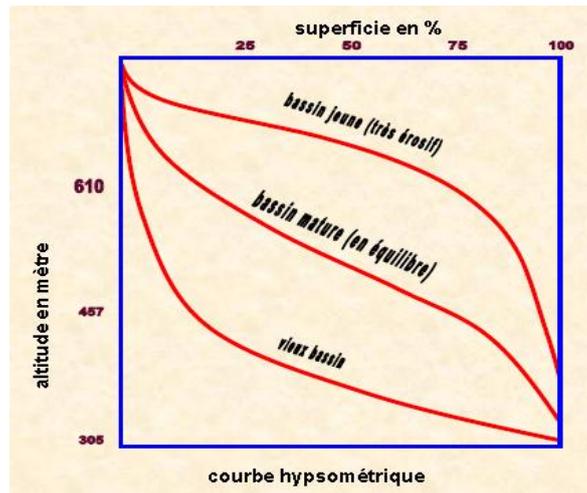


Figure 27 Support d'interprétations des formes de la courbe hypsométrique du bassin versant

D'après la forme de la courbe hypsométrique du bassin versant d'El Ma Labiod, on peut dire que c'est un bassin mature (en équilibre).

a.3. L'altitude médiane

Elle correspond à la valeur lue, au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin (H50%), sur la courbe hypsométrique. Si la dite courbe, du bassin en question, présente une pente régulière, cette grandeur sera identique à la valeur de l'altitude moyenne.

Tableau 23 données pour la détermination des altitudes caractéristiques

Différence d'altitude (m)	Superficies partielles S_i (km ²)	$H_i \frac{S_i}{S}$ (mètre)
1662.5	0.84788	2.34933417
1600	1.3618	2.178
1625	1.3618	3.68820833
1575	2.0538	5.391225
1525	5.1156	13.00215
1475	6.424	15.7923333
1425	14.0102	33.274225
1375	13	29.7916667
1325	24	53
1275	31	65.875
1225	70.488	143.913
1175	78.7	154.120833
1125	155	290.625
1075	133	238.291667
1025	55	93.9583333
Hmoy ou $\sum H_i S_i / S$		1159.53131

a.4. Valeurs des altitudes caractéristiques :

L'altitude maximale : $H_{\max} = 1675$ mètres.

L'altitude minimale : $H_{\min} = 975$ mètres.

L'altitude moyenne : $H_{\text{moy}} = \sum H_i S_i / S = 1159.53$ mètres.

L'altitude médiane : Hmed (lue sur graphe) = H50% = 1130 m

Autres altitudes utiles : (lues sur graphe)- H5% = 1385 m

-H95% = 1025 m

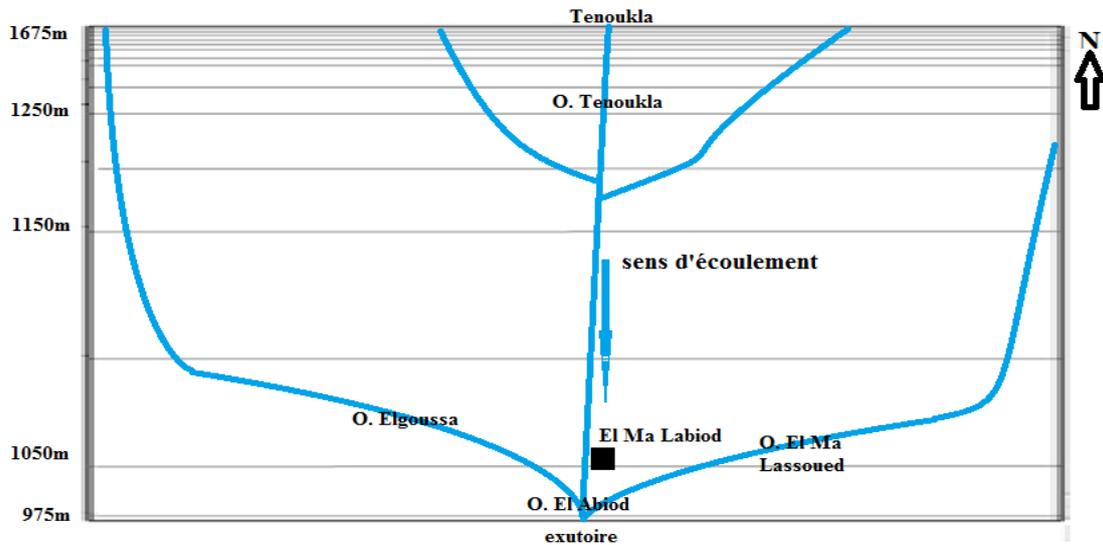


Figure 28 Le rectangle équivalent du bassin versant d'El Ma Labiod

b. Les pentes

b.1. La pente moyenne

La pente moyenne (I_p moy.) du sous bassin versant permet une évaluation de l'énergie de l'écoulement (Vitesse moyenne. temps de concentration. ...). Elle est calculée par la formule suivante :

$$I_{p_{moy}} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \%$$

où :

H max : l'altitude maximale en mètres.

H min : l'altitude minimale en mètres.

L : la longueur de rectangle équivalent en mètres.

Application au sous bassin versant de El Ma El Abiod :

$$I_{p_{moy}} = \frac{1675 - 975}{46,61} = 16,82\%$$

c. Les Indices de pente

c.1. Indice de pente de Roche (I_p) :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum \sqrt{S_i \cdot L_i}$$

Où : S_i est la surface entre deux courbes de niveau

L_i est la distance entre deux courbes de niveau successives

L longueur du rectangle équivalent

Le tableau 24 permet de calculer l'indice de pente de Roche.

Tableau 24 Les superficies des tranches de hauteurs et les distances entre les lignes de niveaux .

H	Si%	Li	Si xLi	$\sqrt{Si \times Li}$	H	Si%	Li	Si xLi	$\sqrt{Si \times Li}$
1675					1300	4	1.3824	5.5296	2.35151015
1650	0.141	0.04873	0.0068709	0.0828911	1250	5.16	1.7833	9.201828	3.0334515
1600	0.227	0.07845	0.0178082	0.1334472	1200	11.74	4.05734	47.6331716	6.9016789
1550	0.342	0.1182	0.0404244	0.2010582	1150	13.11	4.53082	59.3990502	7.70707793
1500	0.852	0.29445	0.2508714	0.5008706	1100	25.83	8.92685	230.580536	15.1848785
1450	1.07	0.36979	0.3956753	0.6290273	1050	22.16	7.6585	169.71236	13.0273697
1400	2.33	0.80525	1.8762325	1.3697564	1000	9.66	3.3385	32.24991	5.67890042
1350	2.16	0.7465	1.61244	1.2698189	975	1.66	0.5737	0.952342	0.97588012
				4.1868696					54.8607472
		$\sqrt{L} =$	6.7535176					$\sum \sqrt{S_i \times L_i} =$	59.0476168

Ainsi, l'indice de pente de Roche pour le bassin d'El Ma Labiod est : $I_p = 8.74323875$

c.2. L'indice de pente global (I_g)

Il est rapporté à la longueur équivalente du bassin versant et il est donné par la formule :

$$I_g = \frac{H5\% - H95\%}{L}$$

D'où $I_g = 7.50911821$ ou $I_g = 7.51$

La relation entre l'indice global et l'indice de Roche: $I_g = 0.8I_p$ a été corrélée à 99%. (Laborde, 2009).

d. La dénivelée spécifique (D_s) :

Elle sert à la classification du bassin versant. elle est calculée par la formule:

$$D_s = I_g * \sqrt{S}$$

D'où :

$$D_s = 183.935 \text{ m}$$

Cette donnée sert à la classification du bassin versant selon son type de relief. Pour ce faire, le tableau 25 sert de référence.

Tableau 25 classification du relief à partir de Ds selon la méthode de l'ORSTOM.

classe	Type de relief	Ds
R1	Relief très faible	10
R2	Relief faible	10 – 25
R3	Relief assez faible	25 – 50
R4	Relief modéré	50 – 100
R5	Relief assez fort	100 – 250
R6	Relief fort	250 – 500
R7	relief très fort	+ 500

Selon le tableau ci-dessus, le bassin versant d'El Ma Labiod a un **relief « assez fort »**.

III.4. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique ou système de drainage est défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participe à l'écoulement dans le bassin versant. Il peut prendre plusieurs formes.

Le bassin versant d'El Ma El Abiod a une superficie de 600 kilomètres carrés. Il est parcouru par les cours d'eau occasionnels et temporaires alimentés par les eaux des précipitations. Ces cours d'eau se rejoignent tous Oued Znad au nord de la ville d'El Ma Labiod pour former Oued El Abiod qui draine le sous bassin versant à travers son exutoire vers le sud.

- Oued elma lassoued. au Sud Est de la zone d'étude prend naissance à hauteur du monticule nommé Ain El Ma Lassoued au sud duquel (au niveau du point coté (1118) de coordonnées (1008.098 et 230.007)) il est alimenté par Oued ben Dhaou et d'autres canaux de moindre importance hydrique. Oued Dhaou. cours d'eau de classe 3 selon le système de schumm. collecte les eaux de toute la zone Sud Est (au Sud d'El Houidjbat) par un système tentaculaire de talwegs traversant les limites géopolitiques vers les cimes des massifs Tunisiens qui délimitent le bassin versant à l'Est.

-Oued Ez Znad prolongé de Oued Tenoukla d'une part et Oued Draa Bouha d'autre part deux cours d'eau sub-paralleles qui drainent les alentours de l'axe tenoukla – El Ma Labiod issus des hauteurs de Tenoukla et de Sif Bouroumane. Figure 29.

Ces trois branches étendent leurs ramifications pour couvrir toute la superficie du bassin versant. L'analyse du système de drainage fait apparaitre deux formes principales:

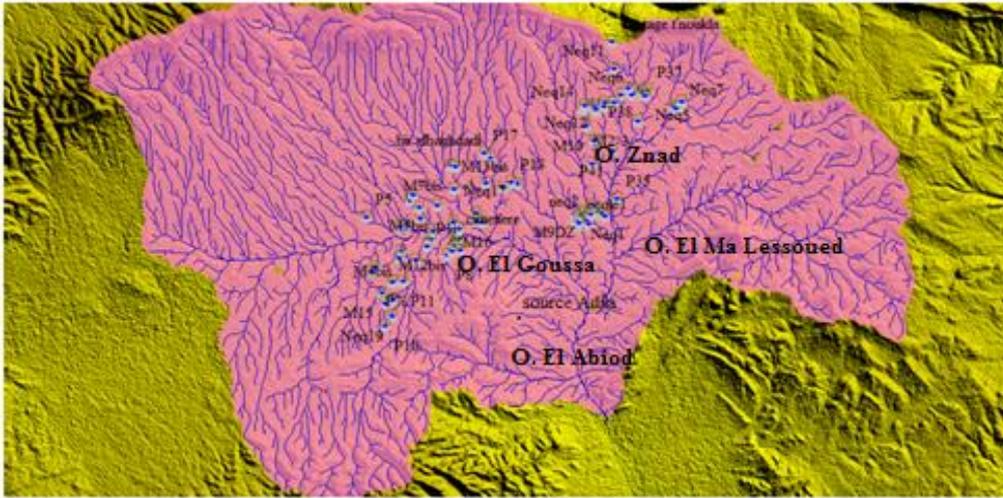


Figure 29 le système de drainage de la plaine d'El Ma Labiod

- une forme parallèle au nord ouest
 - Une forme quadratique au nord est et au sud ouest
- Ce qui met en évidence une certaine énergie cinétique dans les écoulements lors des crues.

III.4.1. Caractéristiques hydrographiques

III.4.1.1. La densité de drainage :

Exprimée en Km/Km², Elle indique le taux de couverture du bassin versant par les cours d'eau,

$$Dd = \frac{\sum li_{ce}}{S}$$

li_{ce} longueur d'un cours d'eau

$$\sum li_{ce} = 1237,5 \text{ Km, d'où } Dd = 2,062 \text{ Km/Km}^2$$

Ce résultat confirme que le bassin versant d'El Ma Labiod comporte plus de formations perméables que de formations imperméables.

III.4.2. Temps de concentration :

Le temps de concentration est la durée nécessaire que met la pluie, tombant sur le point où prend naissance le cours d'eau le plus long jusqu'à l'exutoire.

Il est donné par la formule de "Glandotti" :

$$Tc = \frac{4\sqrt{S + 1.5(Lp)}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \dots\dots(\text{heure})$$

où :

S : surface du sous bassin versant.

Lp : la longueur de thalweg en kilomètre.

Hmin : l'altitude minimale en mètre.

Hmoy : l'altitude moyenne en mètre.

Application au sous bassin versant d' El Ma El Abiodh:

$$T_c = \frac{4\sqrt{600+1.5(37)}}{0.8\sqrt{1675-975}} = 0,956 \text{heures}$$

III.4.3. Vitesse d'écoulement de l'eau

$$V_e = \frac{L_p}{T_c} \dots (m / s)$$

où :Ve : vitesse d'écoulement (m/s)

Tc : le temps de concentration.

LP : longueur du thalweg le plus long en (mètre).

Application au sous bassin versant d' El Ma El Abiod :

$$V_e = \frac{37 \times 10^3}{0,956 \times 3600} = 1,075 (m / s)$$

III.4.4. Étude des apports liquides

Le sous bassin versant de d'El Ma Labiod ne dispose pas de station hydrométrique. d'où l'absence des données concernant les valeurs des apports liquides. Pour combler cette lacune. on a utilisé des formules applicables dans certaines régions de l'Algérie.

III.4.4.1. Estimation de l'apport annuel moyen A0 :

L'apport annuel moyen (A₀) du sous bassin versant est alors donné par la formule suivante :

$$A_0 = M_0 * S * 31.54 * 10^3$$

Où M₀ est le module spécifique moyen, exprimé en (l/s.Km²), calculé en fonction de la pluviométrie moyenne annuelle (P) selon la relation:

$$M_0 = 11.8 * P^{2.82} (m)$$

Où :

P est la pluviométrie moyenne annuelle en (m)

Les résultats des applications au sous bassin versant d'El Ma El Abiod de 1975 à 2017 sont réparties par périodes au tableau 26

III.4.4.2. La lame d'eau ruisselée

La lame d'eau ruisselée en (mm), relative à L'apport annuel moyen. s'exprime par la formule suivante :

$$\gamma = \frac{A_0}{S * 10^3}$$

Où : γ est la lame d'eau ruisselée en millimètres

III.4.4.3. Calcul du coefficient d'écoulement

Comme tous les coefficients. il est exprimé en (%) et il est calculé selon la formule :

$$Ce = \frac{\gamma}{P}$$

Où :

P. est la pluviométrie moyenne annuelle en (mm).

Tableau 26 les apports annuels moyens par période de 1975 à 2017

période	1975 - 1984	1985 - 1994	1995 - 2004	2005 - 2017
M0 (m)	0.32485243	0.17437874	0.171471	0.18787541
A ₀ (m3/an)	6147507.32	3299943.28	3244909	3555354.28
γ (mm)	10.2458455	5.49990546	5.408182	5.92559047
Ce (%)	03662762	02451484	02425	02572317

III.4.5 Observations :

III.4.5.1. la forme du lit du cours d'eau le plus long :

L'observation de la carte d'El Ma Labiod au 1/50000° et la situation hydrographique établie en utilisant global mapper v18, le cours d'eau considéré, qui se termine par le tronçon qui forme Oued El Goussa, est alimenté successivement le long de sa course par une multitude de cours d'eau à ramification subparallèles à écoulements très énergétiques qui le revigorent tout en lui ajoutant leurs charges érodées.

L'examen du lit du cours d'eau le plus long, précité, à un niveau moyen de sa course montre une forme de sa section transversale en U parfait avec une base relativement profonde avec des angles presque droits figure 30 . Ceci indique une érosion aussi bien basale que latérale d'où l'importance de l'énergie de l'écoulement, surtout si l'on considère la masse sableuse – graveleuse cumulative érodée en amont et transportée sans dépôts remarquables sur les tronçons dudit lit.

III.4.5.2. L'Energie des cours d'eau

D'après le glossaire de l'office international de l'eau ; « eau, milieux aquatiques et biodiversité » (OIEau, 2021), l'énergie cinétique d'une masse d'eau est calculée comme suit : **poinds volumique de l'eau par le débit Q (en $m^3.s^{-1}$) X pente S** . L'énergie potentielle (EP) d'un cours d'eau est l'énergie de ce cours d'eau en crue, calculée pour le **débit de plein bord** (exprimée en $watt.m^{-1}$, où Q_{pb} est le débit de plein bord). Pour comparer des cours d'eau de différentes dimensions, on utilise l'énergie potentielle spécifique (EPS), calculée par unité de largeur de la rivière (largeur à plein bord - exprimée en $watt.m^{-2}$).



Figure 30 importance du ravinement des lits des cours d'eau :a. Oued El Goussa à l'Ouest de M4 avec section transversale, b. cours d'eau d'ordre 2 au Nord – Ouest du Bassin versant étudié.

III.4.5.3. Les ruissellements Hortoniens

Particularité des écoulements générés en zone semi arides : Dans les années 30. l'hydrologue R.E. Horton présente le ruissellement de surface comme résultant d'un *refus d'infiltration d'un sol non saturé* comme le processus le plus important, sinon le seul, dans la genèse des crues observées à l'exutoire. (Horton R.E. 1931)

La figure 31 montre le processus du ruissellement (a) et le modèle de Horton (b).

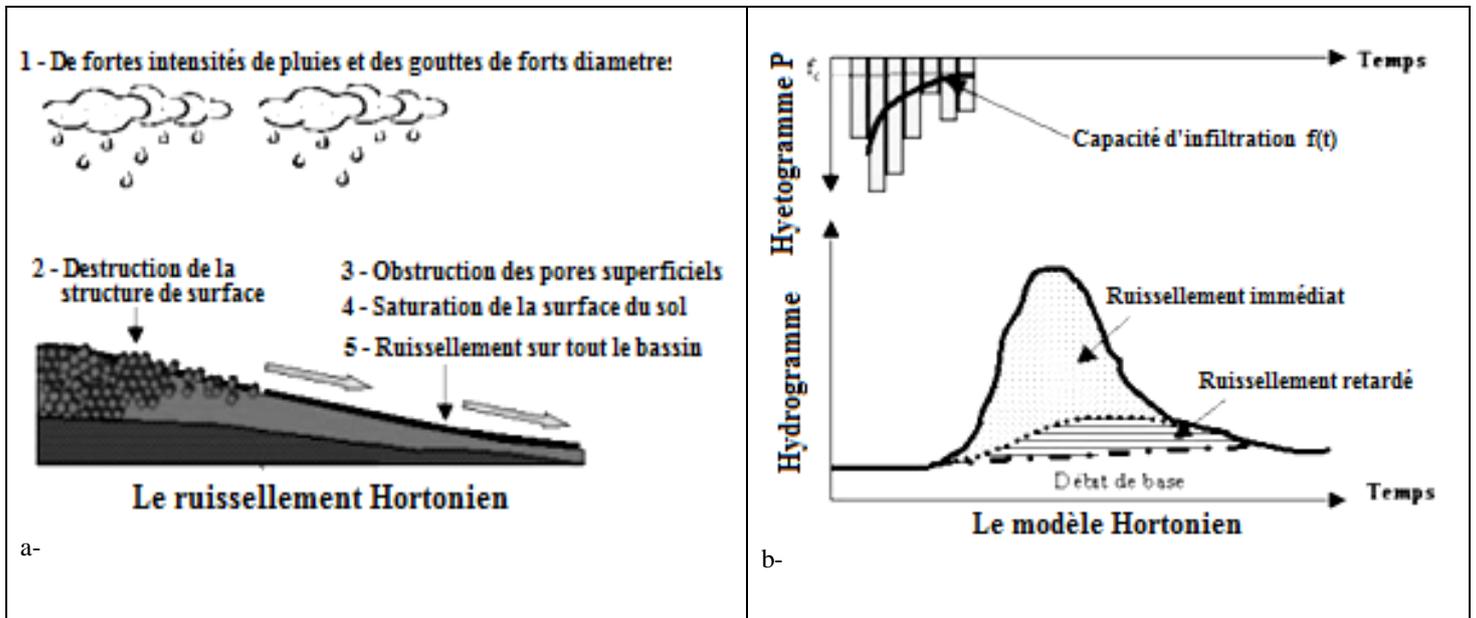


Figure 31 Le ruissellement et le modèle Hortonien

Les processus de ruissellement « Hortoniens » sont indéniables en zones semi arides (Jean Albergel et al 2003).

III.4.5.4. Les Processus de l'écoulement Hortonien :

La figure 31a explique les processus qui entraînent l'écoulement Hortonien.

Les pluies de forte intensité attaquent la structure du sol et en obstruent les pores en surface dégradant ainsi la vitesse d'infiltration. Les quantités d'eau non infiltrées commencent à ruisseler sur les versants dès le début de l'averse sous forme d'une fine lame lente allant jusqu'à 1 cm d'amplitude. Très influencé par la rugosité du sol et la végétation, il est subdivisé en de nombreux flux et cela sur l'ensemble du BV. Avec une hydraulique très perturbée par la continuité des gouttes de pluies qui provoquent des remous très turbulents quant au nombre de Reynolds (Albergel et al 2003).

La figure 31b montre l'importance de l'écoulement immédiat en zones semi arides.

Cette augmentation du ruissellement qui intégrée aux sous Bassin versants puis à l'étendue du bassin versant explique l'énergie de la tête de crues et son pouvoir érosif au niveau de tous les canaux du système de drainage.

Influence sur les quantités infiltrées dans la zone d'étude:

Les hauteurs infiltrées ont été, uniformément, estimées pour des moyennes annuelles (P et T), sans prendre en considération le phénomène mis en évidence par Horton 1933, à une hauteur moyenne proche de 10 mm. Si le ruissellement augmente impérativement l'infiltration va diminuer.

III.4.5.5. L'anthropisation du bassin versant:

C'est l'ensemble des édifices et des changements qu'entraîne l'activité humaine dans le bassin versant et qui provoquent des modifications dans le comportement naturel de ce dernier comme:

- Les routes et les voies ferrées dont les remblais pour surélévations empêchent le processus naturel des écoulements.
- Les édifices industriels, leurs parcs et leurs zones aménagées, creusés ou surélevées.
- Les activités agricoles, avec leurs travaux d'aménagement dont même les sillons des laboureurs dévient les écoulements élémentaires et changent et augmentent la rugosité des surfaces.
- Les transferts de ressources hydriques (pour irriguer les zones démunies ou pour AEP), si les canaux ne sont pas posés assez profondément, se comportent en simples remblais.
- L'urbanisation et ses réseaux
- Les mesures contre les inondations et autres menaces par des remblais ou murettes.
- Les déviations des cours d'eau naturels.

Le bassin d'El Ma Labiod n'en est pas exempté et il a fallu considérer un remplissage sur une hauteur supérieure à 4 mètres pour réussir un bassin versant uni avec l'outil SIG. (pour éviter l'influence du remblais de la RN 16.).

III. 5. Conclusion :

Le bassin versant d'El Ma Labiod est situé à la limite des frontières avec la Tunisie. A l'Est, sa limite hydrologique outrepassé les frontières géopolitiques et arrive aux cimes de Dj Es Sif en territoire voisin. Avec une superficie de 600Km² et un périmètre de 119 Km il présente une forme ramassée.

La dénivelée totale de 700 m à l'exutoire et de 400 m aux abords de la plaine augmente et positionne le bassin versant dans la classe du « relief assez fort » avec une pente moyenne de 16,82% et une dénivelée spécifique de 183,8, et augmentent la vitesse et l'énergie des écoulements.

Le temps de concentration (t_c) calculé à partir de Dj. Doukkane est de **1heure** avec une vitesse moyenne d'écoulement (v_e) de **1m/s**.

La densité de drainage de 2,06 atteste de la perméabilité de la plupart de ses terrains au niveau d'une plaine à pente assez douce (> 3%).

L'hydrographie et forme: Le cours d'eau principal, de direction Nord - Sud, n'a pas le lit le plus long et ses importantes ramifications latérales confèrent au bassin versant une forme ramassée.

La différence remarquable entre les écoulements calculés sur la base des données annuelles et l'énergie déduite de la forme et des dimensions de la section transversale d'un lit du cours d'eau (énergie d'écoulement) nécessite un raffinement du référentiel temps. Le nombre de jours pluvieux moyen est de 40 jours par an (un neuvième) avec un maximum de 90 jours (moins du tiers).

CHAPITRE 4

HYDROGEOLOGIE

Introduction

L'étude hydrogéologique permet de déterminer les dimensions de l'aquifère, quand il existe, sa lithologie, ses caractéristiques hydrodynamiques, la quantification des réserves et le bilan hydrique.

La plaine d'EL Ma El Abiod est composée de deux bassins versants hydrologiques (figure 32) l'objet de cette étude est celui qui englobe la ville d'EL Ma Labiod.

Les études précédentes et les éléments de reconnaissance du terrain font ressortir que bassin versant hydrologique couvre divers types d'aquifères en plus d'une zone aquitard. Figure 32.

En milieu poreux, on distingue :

- un aquifère à nappe captive, au Sud Est, caractérisé par deux forages AT1 et AT2 dont seul le deuxième est exploité pour l'irrigation. Le premier étant mis hors service pour salinité excessive.
- Deux aquifères superposés sans confinement ; le premier, superficiel, est formé d'une assez faible couche d'alluvions avec une nappe temporaire exploitée par des puits peu profonds de moins en moins sollicitée. Ayant rarement un substratum imperméable, sa réserve hydrique, non utilisée à temps et non évaporée, percole vers la nappe d'en dessous. Le second aquifère, profond, qui est formé par un remplissage sableux avec une composante argilo-marneuse variable, est considéré comme la réserve hydrique principale du complexe. Il occupe pratiquement toute la zone aquifère appelée aussi « champs captant ». il est exploité en permanence, par une vingtaine de forages pour AEP et simultanément sollicité par 60 à 100 autres par intermittence au profit de l'agriculture et quelques uns pour l'industrie locale.

En milieu fissuré, deux types de systèmes karstiques ont été cités ; l'aquifère karstique à formation ondulée, recouvert par les sables et les graviers argileux au Nord de Dj. Boudjellal. Il est exploité localement, pour l'irrigation. Le second type est réparti sur les bordures crétacées karstifiées. Il est confirmé au nord Ouest par les sources aujourd'hui tarées et dont les drains actifs sont masqués par les formations du glaciais. Au Nord – Est, l'alimentation de la nappe a été affirmée par les études précédentes (Adjoum B. 1991, Rouabhia 2006 et Boughanem, 2011). Au Sud – Ouest, (DJ. Boudjellal) par l'alimentation du système sus-cité, par contre au Sud-Est il n'y a pas d'indice d'apports et la limite serait considérée étanche. (Rouabhia, 2006).

La zone aquitard qui paraît plus importante dans la partie Est. Elle s'interpose entre les formations calcaires et le champ captant sauf au Nord Est où les Sables miocènes sont en contact directe avec le versant Sud de DJ. Sif Bouroumane. Et Dj. Tenoukla. Figure 32.

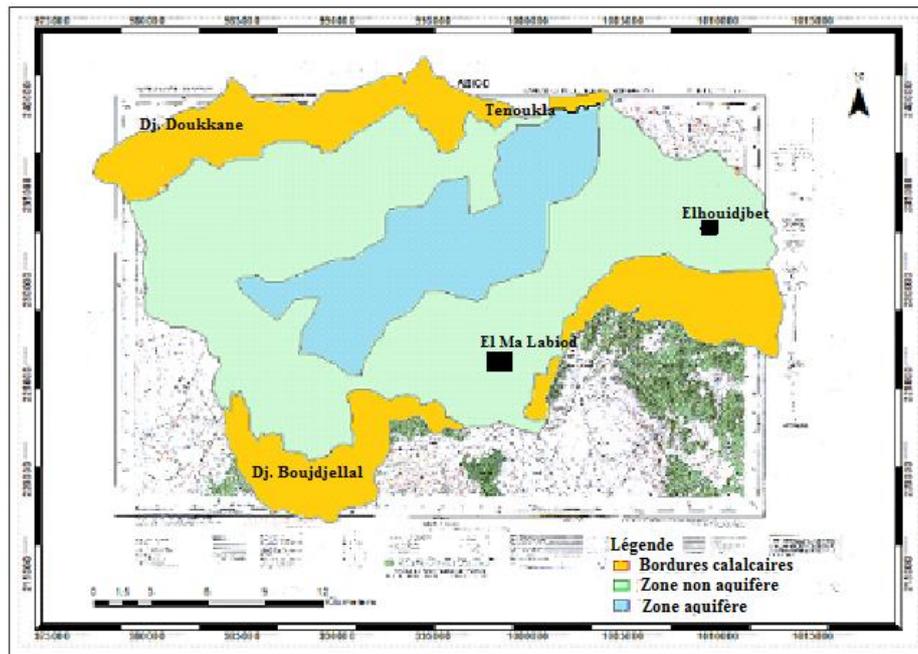


Figure 32 la position du bassin versant, les limites de la plaine et de l'aquifère sur la feuille 235

IV.1. Dimensions du complexe aquifère

La détermination des dimensions de l'aquifère se base sur :

- L'étude des logs des forages qui exploitent la nappe,
- L'étude géophysique de l'aquifère,
- la carte géologique des lieux

IV.1.1. L'étude géologique et lithologique

L'étude géologique et lithologique montre que :

- L'aquifère est essentiellement sableux, marno - sableux – graveleux dont la composante argileuse laisse prévoir un bon environnement hydrodynamique.
- Les alluvions varient de 0 à 20 mètres d'épaisseur,
- Une formation argilo-marneuse, en contact avec la bordure calcaire, plonge parfois brutalement, vers l'axe de la plaine jusqu'à une profondeur de 200m et plus.

IV.1.2. L'étude des sondages géo-électriques

Les sondages géo-électriques effectués en 1971 par la société TRANSAKTA-GEOMETAL couvrent presque l'intégralité de la plaine. (Guefaifia, 1996).

350 points avec A-B = 2000 m et 120 points avec A-B = 6000 m répartis sur une superficie de 420 km² ont permis l'investigation d'une profondeur allant de 700 m - 900 m.

Les valeurs des sondages coupés par les forages ont permis de reconnaître les correspondances lithologiques (Guefaifia 1996) portées au tableau 27 :

Tableau 27 : Les correspondances valeurs des sondages et lithologie

Lithologie	Valeur géoélectrique (Ωm)
Argiles	02 – 15
Argiles sableuses	20 – 60
Alluvions et formations quaternaires	20 – 150
Sables et graviers	50 – 250
Grès et calcaires	> 220

Les correspondances citées par d'autres littératures sont portées en annexe G ; extraite de Klaus Knödel et al (2007)

Les coupes géo-électriques montrent entre autres :

- La stratigraphie du bassin et particulièrement les formations aquifères,
- les discontinuités géo-électriques et les failles non discernables en surface.
- Les formes, les dimensions et la profondeur des lentilles argileuses et des blocs calcaires disloqués,
- L'étendue de l'aquifère karstique et l'ampleur de la couverture. (figures H1 à H15 en annexe H).

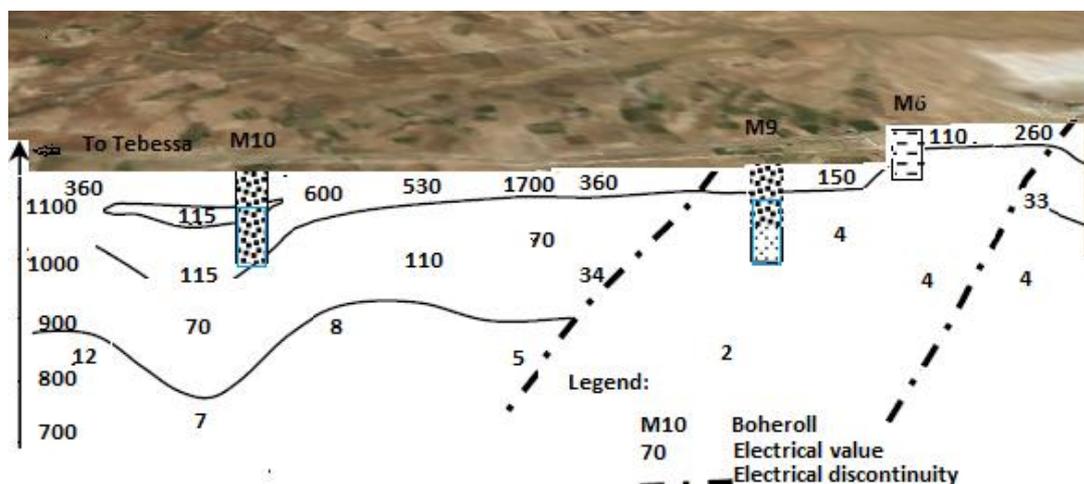


Figure 33 : coupe géo électrique suivant l'axe Tenoukla - El Ma Labiod l'axe principal et coupant les forages M10, M9 et M6.

Une série de coupes géo électriques représentatives (UGF BRNO 1971) , en Annexe H, qui explique certaines fonctionnalités des milieux de la zone d'étude comme les milieux aquifères, aquitards etaquicludes, les profondeurs des zones présumées aquifères, les continuités et les séparations dans la zone aquifère ainsi que l'évolution tridimensionnelle des différents milieux.

IV.1.3. L'étude des fiches de forages

L'étude des fiches de forages et leur corrélation avec les données géo électriques précisent:

- les formations indiquées par les valeurs géoélectriques jusqu'aux substratums par l'étude des logs des captages et permettent l'extrapolation des étendues de mêmes valeurs.
- Les niveaux statiques à la mise en service permettent une estimation des réserves (de la nappe) en ce moment et d'avoir une références pour estimer l'évolution quantitative de la nappe.

Les cumules des formations traversées par certains forages situés dans bassin versant étudié sont portés au tableau n° 28

Le tableau n°28 synthèse des fiches de forages de certains captages.

FORAGE	x	y	Z	M.Sce	h(tot)	h(eau)	Ns	alluvions	miocène	marnes/cal	debit	
M1	1000.525	235.000	1090	1974	125	91	34	0	125	0	(35)	
M2	992.975	229.1	1075	1974	110.5	88.5	22	13.5	74	23	0 (40)	
M2bis	992.975	229.07	1075	2003 - 8	100	66.6	29.4	2	86	12	40	
M3	986.425	228.175	1100	/	200	111	89	11	122	67	?	
M3bbis	986.100	228.750	1100	2007 - 9	150	90.8	59.2	0	150	0	30	
M4	990.7	228.625	1080	1975 - 12	179	136	43	9	155	6	0 (40)	
M4bis	990.7	228.6	1080	2003 - 6	165	126.5	38.5	1	163	1	40	
M5	992.200	230.800	1075	1976 - 5	213	135	78	13	143	40	0 (40)	
M5bis	992.19	230.78	1075	2008 - 10	170	140.5	29.5	3	153	14	40	
M6	500m à l'ouest de RN16 1km au Nord de la ville. fermé						/	/	0	5	40	0
M7	992.8	232.6	1080	1980	212	172	40	0	212	0	0 (40)	
M7bis	992.78	232.6	1080	2005 - 12	205	168.52	36.48	0	205	0	50	
M8	990.890	229.775	1072	1981 - 5	185	160.6	24.20	0	194	0	8.5	
M8bis	900.89	229.785	1072	2006 - 9	190	152.6	37.4	0	190	0	35	
M9	998.4	229.82	1048	1983 - 3	50	30	20	5	40	5	20	
M10	998.975	234.45	1085	1983 - 1	60	36.5	23.5	0	60	0	0 (20)	
M10bis	998.572	232.925	1085	/	150	/	31.91	/	/	/	40	

M12	998.65	223.6	1011	1985 – 3	50	30	20	10	27	13	9
Henchir el miz (MA 12)	999.7	231.5	1060	1961 – 12	40	15.2	14.8	0	10	30	0
M13	995.750.	231800	1080	1988 – 6	100	75	25	1	84	15	0
M13bis	995.349	231.86	1080	2007 - 9	100	61.16	38.8	4	6	82	12
M14	992.2	229.55	1072	1988 – 10	200	181.9	18.1	10	123	67	20
M15	990.2	226.75	1106	1988	142	78	64	7	63	15	08
M16	992.684	229.99	1067	2007 - 8	120	98.09	22.9	1	2	93	/
M17	991.25	230.5	1075	2007 - 8	200	120.1	34.8	5	5	155	/
M18	989.565	230.25	1089	2019	200	175	50.5	25	165	15	/
M19	988.973	229.90	1097	réserve	200	145	55	40	160	0	10
FC1	996.125	232.75	1085	/	125	/	18.3	0	/	/	/
EVI enava	998.000	230.90	1058	/	150	/	18.4	8	/	/	20 x 3
AT1	1007.33	223.49	1142	1983 - 3	66	70	+4	10	20/100	35	08
AT1bis	1007.32	229.5	1136	2008 – 7	150	144.6	5.4	0	109	41	/
Dalaa	998.554	226.00	1034	/	/	/	/	/	/	/	/

Les profils géo électriques déduits qui coupent les forages à titre de corrélation permettent un ajustement des valeurs géophysiques aux données de terrains et montrent une continuité des formations entre les points d'eau (figures 34) mais ne fournissent aucun renseignement entre ces derniers surtout lorsqu'ils ne sont pas sur le même profil géo-électrique.

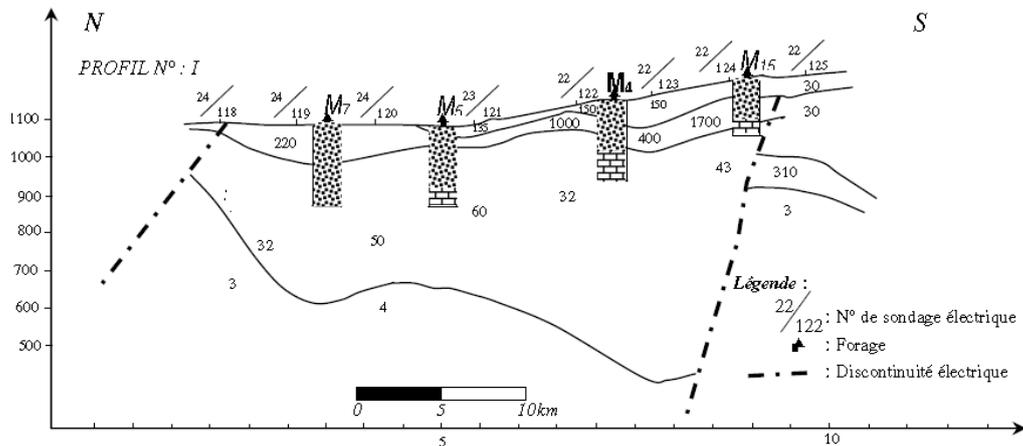


Figure 34 profile géo-électrique Transversal (N/S) N°I coupe les forages M7, M5, M4 et M15. (UGF BRNO 1971). (Source ANRH) in Djebbari H. 2011.

L'étude simultanée des informations issues des méthode de prospection citées ci dessus a permis différenciation des espaces aquifères et non aquifères de la plaine d'El Ma Labiod. La figure 32 montre l'étendue du bassin versant étudié, sa position sur la carte topographique d'El Ma Labiod Feuille n° 235 (IGN, 1950) et la distribution spatiale des limites de la zone aquifère.

La zone aquifère a une constitution très variable allant d'une variété de sable à un sable avec une composante marno-argileuse variable avec des passages graveleux et parfois une alternance de ces éléments est rencontrée dans un même espace log de forage). Ce qui fait que les valeurs géo-électriques semblent parfois insolites dans un milieu relativement homogène.

Certains profiles montrent des affleurements de formations à valeurs très basses (essentiellement argileuses) qui divisent la couche aquifère même si la couche d'alluvions parait continue. Tant que le niveau de la nappe reste au dessous du niveau de cette séparation ont aura l'apparition de réservoirs élémentaires isolés.

IV.2. estimation des réserves de la nappe

L'estimation des réserves hydriques d'une nappe et de son bilan est une opération qui débouche les données de base de toute gestion rationnelle et opérationnelle des aquifères mais sa complexité dans certains cas et surtout le nombre de paramètres la plupart du temps inaccessibles fait qu'elle est délaissée ou dans le meilleur des cas soumise à une approximation assez vague.

Selon les données disponibles la réserve hydrique sous la plaine d'El Ma Labiod pourrait être estimée par la relation : **$Rh_{t0} = \text{Volume moyen de la nappe} \times \text{la porosité efficace}$**

Où : **Rh_{t0}** est la réserve hydrique instantanée car la nappe est en continuelle évolution de par les flux entrants et les flux sortants.

IV.2.1. Le Volume moyen de la nappe

Vue les variations aussi bien des dimensions (en x, y et z) de l'espace aquifère, les fluctuations différentielles du niveau de la nappe, que la composition des éléments de remplissage, l'approche proposée serait de calculer la section moyen sous chaque profile géoélectrique et d'en calculer la section moyenne de l'aquifère, selon la relation :

$$Vmoy\ nap = \sum_7^{42} [(H_{pi} - h_{pi}) * l_{pi}] * L_{aq/35}$$

Où :

- **$Vmoy\ nap$** est Le Volume moyen de la nappe

- H_{pi} , l_{pi} et h_{pi} Sont respectivement la hauteur et largeur moyennes de la section aquifère et, la hauteur moyenne mesurée jusqu'à la nappe.

IV.2.2. La porosité efficace

Définitions :

- **La porosité totale** : c'est le rapport du volume total des vides dans une roche au volume total de cette roche. Elle s'exprime en pourcentage. Elle ne dépend pas de la taille des grains mais elle est influencée par leur arrangement et leur hétérogénéité.
- **La porosité efficace** : c'est le rapport du volume d'eau gravitaire au volume total de la roche saturée en eau.

Les matériaux de l'aquifère d'El Ma Labiod avec les valeurs de leurs porosité efficaces figurent dans le tableau 29 (Beauchamp, 2006).

Tableau 29 valeurs de la porosité efficace par type d'aquifère

Types de réservoir	Porosité efficace (%)
Gravier	25
Sables	15
Limons	2
Vase argileuse	0.1
Calcaire fissurés	2 à 10

La composition de l'aquifère, selon les logs des forages et les déblais sortis des puits, n'est pas sans composante de la partie fine, la porosité efficace sera estimé selon les proportions des éléments en présence à proximité de chaque profile.

La détermination de la porosité efficace moyenne à l'échelle de la zone aquifère peut se faire comme suit :

$$por\ ef\ moy\ aq = \sum_7^{42} por\ ef\ S_{pi} / 35$$

Où : $por\ ef\ S_{pi}$ est la porosité efficace à proximité de la section du profile « i ».

La réserve d'eau peut aussi être estimée par la relation qui intègre la porosité efficace à proximité de la section de son profile « i » à l'unité élémentaire du profile pour donner la quantité élémentaire d'eau avant de la multiplier par la longueur de l'aquifère comme suit :

$$Rh_{t0} = \sum_7^{42} [(H_{pi} - h_{pi}) * l_{pi} * peS_{pi}] * Laq / 35$$

Où : peS_{pi} est la porosité efficace à proximité de la section du profile « i ».

Vu la composition de l'aquifère prédominante (sables argileux et grès à patine argileuse) la porosité efficace est estimée à : $peSp_{moy} = 12\%$, la moyenne des profondeurs à la nappe mesurées aux points d'eau est évaluée à : $h_{moy} = 49.5 m$, la hauteur total moyenne de l'aquifère est estimée à : $H_{pi} = 75m$ la largeur moyenne et la longueur de l'aquifère mesurées sur la carte au 1/50000° (feuille 235) sont de : $l_{pmoy} = 3 km$ et $Laq = 14 km$.

$$D'où : \quad Rh_{t0} = \frac{l_{pmoy} * Laq * (H_{pmoy} - h_{pmoy}) * peSp_{moy}}{100}$$

Ainsi la réserve hydrique de la nappe d'El Ma Labiod est estimée (sans prendre en compte les possibles discontinuités de l'aquifère) à : $Rh_{t0} = 128.52 10^6 Mm^3$.

IV.2.3. La piézométrie

Les niveaux de la nappe ont été mesurés directement aux points d'eau. La projection des différentes valeurs permet d'établir « la carte piézométrique » mais trop de points d'eau. sont sollicités. Ce qui donne à ce document une valeur indicative instantanée, car les cônes générés par les forages en service influent sur les sens d'écoulement souterrains. le tableau n° 30 contient les valeurs de mai 2016.

Tableau n° 30 données sur la piézométrie de la nappe d'EL ma Labiod. (2016)

N°	latitude	longitude	x decimal	y decimal	z	NS116	piezo16
Neq11	8°11'38,3"	35°18'24,7"	8.189716667	35.30411667	1103	63.7	1039.3
Neq 6	8°12'10,2"	35°17'47,1"	8.2017	35.2911833	1099	54.9	1044.1
Neq32	8°13'26,7"	35°17'47,8"	8.221116667	35.2913	1091	50.7	1040.3
Neq33	8°13'21,23"	35°17'14,62"	8.220205	35.28577	1087	51.5	1035.5
Neq8	8°13',24"	35°17'28,2"	8.220666667	35.2880333	1082	51.3	1030.7
Neq7	8°13'31,3"	35°17'30"	8.2218833	35.28621667	1090	56.4	1033.6
Neq12	8°11'7,9"	35°16'4,6"	8.18465	35.26743333	1084	42.3	1041.7
Neq(P18)	8°8'39,4"	35°15'40,9"	8.1399	35.25681667	1092	48.65	1043.35
Neq 30	8°8'57,7"	35°15'12,7"	8.14295	35.25211667	1071	38.55	1032.45
Neq31	8°9'5,5"	35°15'16,3"	8.151	35.25271667	1074	34.4	1039.6
neq38	8°12'48,4"	35°18'49,9"	8.2081	35.30831667	1102	79.75	1022.25
neq39	8°13'11,45"	35°18'42,37"	8.21858	35.30706167	1110	65.15	1044.85
neq40	8°12'56,0"	35°18'18,6"	8.20933	35.3031	1100	57.9	1042.1

La distribution spatiale des iso valeurs des niveaux de la nappe est présentée à la figure 35

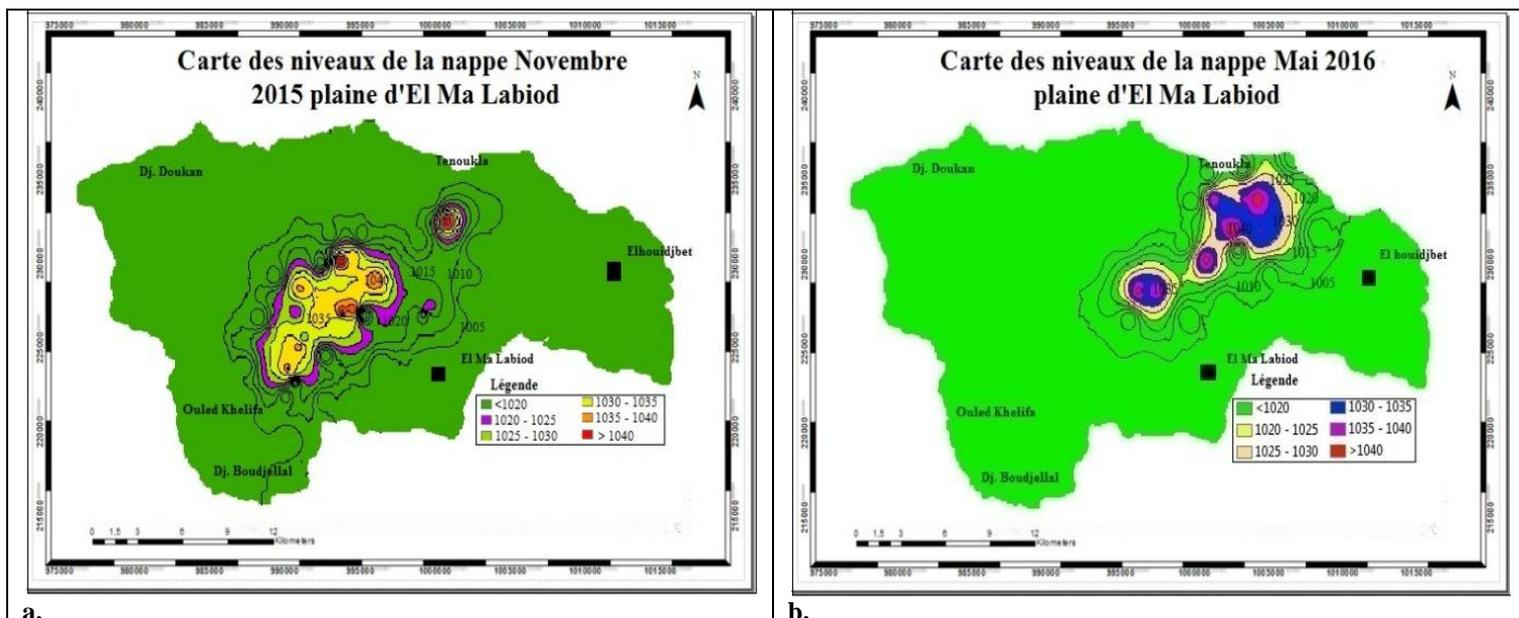


Figure 35 La carte des niveaux de la nappe de la plaine d’El Ma Labiod: a. Novembre 2015 et b. Mai 2016

La piézométrie de la nappe miocène montre, comme il a été observé (Rouabhia 2006), « Localement, les écoulements convergents vers des dépressions piézométriques, créées par la surexploitation des forages et expressivement la zone des forages (M10, M9, M13), et l’influence des puits d’irrigation voisins ».

Vient s’ajouter à cela un forage d’irrigation, non répertorié, assez puissant pour le transfert vers les terrains au Sud Est de la plaine.

IV.2.4. Évolution du niveau de la nappe d’El Ma Labiod

La confrontation des données piézométriques au moment de la mise en service individuelle des puits d’irrigation et celles actuelles (2016) montre que les eaux de la nappe diminuent à une vitesse moyenne de 0,7 m chaque année au centre et au sud ouest de la plaine hormis l’aquifère karstique.

La nappe étudiée dispose de trois piézomètres situés dans la partie ouest de la plaine mais pour des raisons de commodité, ils n’ont pas été consultés, les mesures aux forages et puits sont bien plus crédibles et représentatives de la nappe.

Généralement les eaux souterraines ont le même sens d’écoulement que ceux de surface (...) mais les conditions géologiques de la zone d’étude font que la limite Sud est constituée de formations argileuses imperméables. La coupe hydrogéologique N – S, passant par M10 - M9 – M6 (figure 36), constitution graveleuse et sablo-marneuse milieu aquifère ne présente aucune nappe permanente.

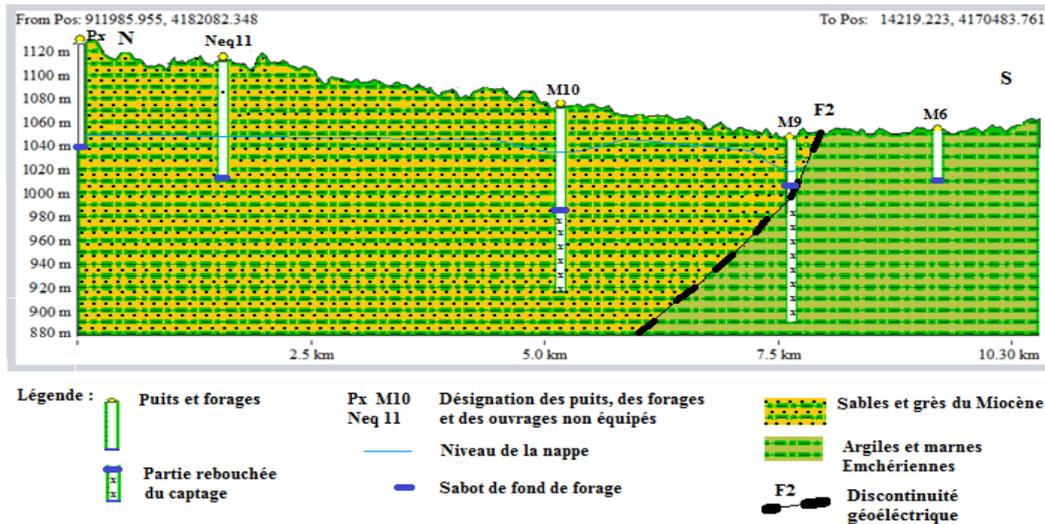


Figure 36 Coupe hydrogéologique Nord – Sud passant par Px, Neq11, M10, M9 et M6

La nappe d'El Ma Labiod est actuellement sollicitée, en permanence, par une quinzaine de forages pour AEP Avec un débit moyen de 30 litres par second (tableau 28) et par quelques 200 forages avec des débits entre 4 et 8 litres par second à raison de 36 à 48 heures par semaine 9 mois sur douze.

Ce qui comptabilise environ : **25 Mm3/an.**

Pour Ghislain de MARSILY et Mustapha BESBES (2017) « La permanence d'une nappe souterraine reflète un équilibre entre a) ses entrées d'eau (recharges) et b) ses sorties : (les débits de drainages) et les prélèvements. »

Les niveaux statiques à la mise en service des captages destinés à l'AEP et de ceux qui les ont remplacés extraits des fiches de forage figurent au tableau 31.

Tableau 31 les niveaux statiques à la mise en service de certains captages destinés à l'AEP.

Forage x	NSx	date	Forage x Bis	NSx Bis	Date	ΔNS (m)	Δt (an)	ΔNS/an	
M3	/	/	M3bbis	59.20 m	17/9/2007	/	/	/	
M7	/	/	M7bis	36.48 m	24/12/2005	/	/	/	
M8	24.2 m	1981	M8bis	37.84 m	27/9/2006	13.64	25	0.5456	
M5	20.6 m	1976	M5bis	29.65 m	8/1/2008	9.05	32	0.283	
M4	28.6 m	1975	M4bis	38.50 m	18/6/2003	9.9	28	0.3536	
M2	22 m	1974	M2bis	29.40 m	27/8/2003	7.40	29	0.2552	
M13	27 m	1988	M13bis	38.84 m	27/6/2007	11.84	19	0.6232	
M14	18.10 m	1988	M14bis	/	/	/	/	/	
M9	12.90 m	1983	Nelle mesure	/	/	/	/	/	
M10	23.23 m	1983	M10 bis	39.91m	/	/	/	/	
M12	13 m	1985	M12bis	/	/	/	/	/	
Moyenne annuelle (m/an)									0.412

La déclinaison annuelle moyenne du niveau de la nappe, basée sur les données des forages AEP, pour des durées entre 19 et 32 ans (Tableau 31) est de : **0.412 m/an.**

Les repères piézométriques pour estimer le déficit annuel au niveau des puits et forages destinés à l'irrigation, il a fallu en référer aux attestations orales du foreur et des agriculteurs. Ce qui a donnée des variations évaluées entre 0.5 et 0.7 m.

Ce qui rapproche la variation moyenne annuelle globale de cette composante de **0.5m/an** sur toute la superficie de l'aquifère (107.32 Km²). Ainsi le déficit annuel global avec tous les prélèvements et tous les apports (connus où inconnus, quantifiés ou non quantifiables) serait de :

$$107.320.000 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m} \times 12\% \text{ soit : } \mathbf{53.660.000 \text{ m}^3} \text{ ou } \mathbf{53.66 \text{ Mm}^3 \times 12/100}$$

Soit un déficit de 6.4392 Mm³ ≈ 6.44 Mm³/an

Cela tout en ayant à l'esprit que ce calcul dépend de conditions variables de manière différentielle dans l'espace et dans le temps. Chaque période et chaque zone de l'aquifère a ses variations propres des entrées et des sorties. Cette généralisation de la moyenne annuelle sert juste pour simplifier les calculs et pouvoir mettre une valeur repère aux éléments actuellement non quantifiables du bilan hydriques de la nappe.

IV.2.5. Quantification des apports latéraux

Pour donner une valeur de base aux termes « apports latéraux » et « pertes souterraines » ; supposant dans un premier temps que les apports latéraux compensent tous les prélèvements anthropiques. Ainsi les apports latéraux (aquifères voisins) seraient de :

Apports latéraux = Prélèvements – Apports pluviométriques – Retour d'irrigation

$$\text{Ou : } \mathbf{Al = Pr - Ap - Ri} \quad \text{====>} \quad \mathbf{Al = Pr - (Ap + Ri)}$$

Avec Prélèvements = **25 Mm³**, Apports pluviométriques = **3Mm³** et Retour d'irrigation = **2.12 Mm³**.

Ce qui donne : $\mathbf{Al = 19.88Mm^3}$

Ces données complètent les exigences du bilan de la nappe et permet d'approcher les apports latéraux en admettant dans un premier temps que les pertes souterraines sont responsables du déficit (baisse du niveau de la nappe) et que les apports latéraux compensent le désordre causé par les prélèvements. Soit la hauteur moyenne des retours d'irrigation égale à 30% des prélèvements pour cette fonction. Le retour d'irrigation a été quantifié à : **2,12 Mm³/an**.

La superficie de l'aquifère est de 107,32 km² mais la quantification du volume pluviométrique infiltré se fera par rapport à la superficie du bassin versant dont les écoulements de surface et les écoulements souterrains convergeraient vers l'aquifère. Soit 50% de la superficie totale du BV étudié ce qui équivaut à: 300 km².

Ce qui donne pour une hauteur moyenne de 10 mm infiltrée : $\mathbf{300 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \times 10 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3Mm^3}$ d'apports pluviométriques par année.

Le retour d'irrigation a été quantifié à 2,12 Mm³/an. et le déficit serait égal à: « la baisse moyenne du niveau piézométrique multipliée par la superficie de la zone aquifère » qui est multiplié à son tour par

la porosité efficace. Ce qui donne pour $\Delta h = 0.5$ m, un déficit, tout apport compris, de $6.44 \text{ Mm}^3/\text{an}$. (Tableau 32)

Tableau 32 bilan annuel de la nappe

Les apports (m^3/an)		Débits sortants (m^3/an)	
Météorologiques	$3 \cdot 10^6$	Pertes souterraines	$6.44 \cdot 10^6$
Retour d'irrigation	$2,12 \cdot 10^6$	Emergences et drains	0
Aquifères voisins	$19.88 \cdot 10^6$	Prélèvements	$25 \cdot 10^6$
Total	$25 \cdot 10^6$	Total.....	$25 \cdot 10^6$ $+ 6.44 \cdot 10^6$
*le rôle du décrochement Ténoukla – Delaa dans la vidange de la nappe ???			

En mettant une valeur sur l'un des deux paramètres le second paramètre est automatiquement fixé selon la relation : $Al = 19.88 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \implies Ps$ (pertes souterraines) = $53.66 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'où :

$$Al = 19.88 \cdot 10^6 + \Delta q \text{ m}^3/\text{an} \implies Ps = 6.44 \cdot 10^6 + \Delta q \text{ m}^3/\text{an}$$

Cette relation entraîne que :

- Si les pertes souterraines sont nulles : $Ps = 0 \text{ m}^3/\text{an} \implies Al = 13.44 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (débit entrant minimal).
- Si les pertes souterraines sont nulles : $Ps > 0 \implies Al = 13.44 \cdot 10^6 + Ps$ (Mm^3/an) (les apports latéraux augmentent de la valeur de Ps).

D'où la relation généralisée : $Al = Al_{\min} + Ps$ (Mm^3/an).

IV.2.6. Le tarissement des sources

Le tarissement des sources au pied de la montagne pourrait avoir plusieurs causes selon le cas :

- Développement du réseau karstique :
 - a) jeune karst : le Développement est moyen selon l'axe principal de fissuration et l'avancement dans la dissolution et l'élargissement des passages se fait du haut vers le bas et lorsqu'un tronçon du canal n'est plus étanche, l'eau descend par gravité jusqu'à être retenue et l'ancien drain est mort. Il en naît un autre plus bas et il arrive que l'ouverture du nouveau drain soit sous la surface du glacis figure 37 a, formant ainsi un écoulement non diffus qui suit l'interface glacis (alluvions) – milieu imperméable. S'il est capté par un puits son niveau piézométrique ne représente que l'état de ce puits et il peut induire en erreur quant à l'état général de la nappe, surtout si ce captage est situé sur un niveau plus haut que celui de la formation aquifère.

Un cas de ce type a été localisé à l'Ouest du M13bis ; Le P45 ($35^\circ 15' 16.9''$ – $8^\circ 09' 09.6''$) dans cette étude.

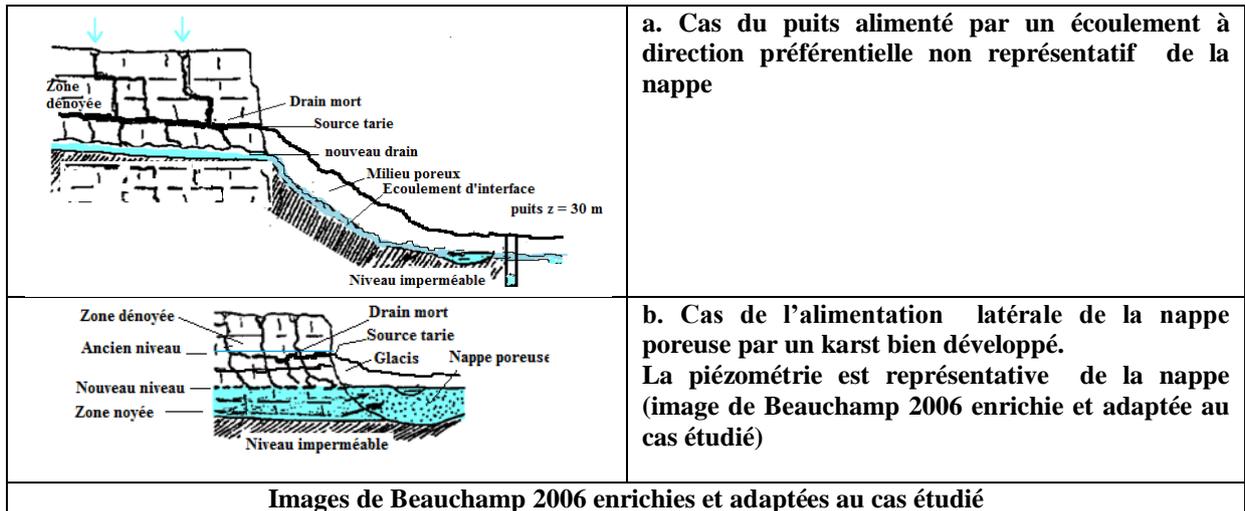


Figure 37 Deux cas de tarissement de source karstique.

b) Karst bien développé : le réseau est interconnecté dans toutes les directions et le comportement hydrodynamique n'est pas très différent de celui du milieu poreux. Le niveau de la nappe diminue d'autant que le déficit est important et tous les drains au-dessus de la zone noyée sont morts mais le reste continue à fonctionner. Figure 37 b.

c) Les dépôts qui se sont accumulés sous l'ouverture qui alimentait la dite source sont arrivés au point critique de fermeture et l'eau a pris une autre direction devenue préférentielle. Le drain obstrué meurt mais le reste continue sans changement.

IV.3. Les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe

L'étude des fiches de forage a permis de recueillir les données relatives à la perméabilité (K), à la transmissivité (T) et aux débits des captages pour AEP. Ces données sont présentées au tableau n° 33.

Mais 80% de ces forages sont situés dans la partie ouest de la zone d'étude d'où la nécessité de compléter la lacune à l'Est pour la perméabilité K et les débits Q.

IV.3.1. La perméabilité :

Définition : c'est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz). BRGM Elle est exprimée en m/s.

Pour compenser le manque de données à l'Est, 12 échantillons ont été choisis parmi les déblais des forages en cours de réalisation où récemment réalisés et quelques autres points considérés représentatifs, ont été testés au perméamètre à charge variables au laboratoire de mécanique des sols (génie civil). La carte de perméabilité est en figure 68g ch.6.

Tableau n° 33 Données hydrodynamiques des forages.

Forages	X	Y	Z	T en (m ² /s) .10 ⁻²	Mise en service	K (m/s) 10 ⁻⁴	Debit (l/s)
M1	1000.525	235.000	1090	1.3	Fermé	1.46	40 (0)

M2	992.975	229.100	1075	1.15	1974	1.72	20
M3	986.425	228.175	1100	2.88	/	3.46	30 (0)
M4	990.700	228.625	1080	0.7	/	0.51	40 (0)
M5	992.200	230.800	1075	0.76	1975	0.76	40 (0)
M7	992.780	232.600	1080	1.22	2005	0.72	45 – 50
M8	990.890	229.775	1072	4.27	1981	2.8	35
M9	998.400	229.850	1048	1.0	1983	1.5	20
M10	998.975	234.450	1085	1.3	1983	1.0	20
M12	998.650	223.600	1011	/	1983	Reversé à l'irrigation	
M13	995.349	231.864	1080	1.11	1988	0.99	40 - 30
M14	992.200	229.550	1072	1.08	1988	0.9	20
M15	990.200	226.750	1106	/	1988	Reversé à l'irrigation	
M16	992.684	229.999	1067	2.5	2007	2.76	40
M17	991.250	230.500	1075	3.35	2008	2.02	40
M18	988.973	230.258	1089	3.5	2015	2.37	17
M19	988.973	229.909	1097	3.5	2017	2.37	15
Fc1bIS	994.000	231.800	1085	0.4	/	0.6	20
AT1	1007.325	229.500	1136	0.48	1983	0.06	20

IV.3.2. La transmissivité :

Définition : c'est la capacité d'un aquifère à mobiliser l'eau qu'il contient. Elle se calcule par

$T = k \cdot e$ (m²/s) avec « k » perméabilité et « e » puissance de l'aquifère mouillé ou se détermine lors des pompages d'essai.

Evolution du paramètre T

La confrontation de ces données avec celles des forages de remplacement, à savoir les forages Mx et les forages Mxbis, a montré une évolution de la transmissivité dans le temps. Les différences sont portées au tableau n° 34

Tableau n° 34 :Evolution de T au niveau des zones où les forages ont été remplacés.

Forages	X	Y	Z	T en (m ² /s) .10) ⁻²		Mise en service		ΔT
				Mx	Mx bis	Mx	Mx bis	
M2	992.975	229.100	1075	1.15	2.711	1975	2003	1.561
M3	986.425	228.175	1100	2.88	8.15	/	2011	5.27
M4	990.700	228.625	1080	0.7	14.64	/	2003	13.94
M5	992.200	230.800	1075	0.76	6.71	1975	2009	5.95
M7	992.780	232.600	1080	1.22	11.54	2005	2008	10.32
M8	990.890	229.775	1072	0.5	3.2	1981	2008	2.7
M10	998.975	234.450	1085	1.3	/	1983	/	Val
M13	995.349	231.864	1080	1.11	10.5	1988	2008	9.39
AT1	1007.325	229.500	1136	0.48	0.76	1983	2008	0.28

On constate que la différence est parfois assez importante. Elle est probablement due au pompage excessif qui a entraîné le lessivage de la partie fine dans tout le rayon d'action du forage. Ce qui, ajouté aux fluctuations de la profondeur à la table d'eau, rend les vides entre les grains plus

importants, amplifie les volumes cumulés à colmater et le réarrangement des grains accélère le phénomène de subsidence tout en diminuant les capacités de la nappe particulièrement le coefficient d'emmagasinement lors des recharges ultérieures par la diminution de la porosité (Dassargues & Monjoie, 1991).

Les conséquences de ce phénomène, surtout dans la zone saturée, se sont manifestées par des forages envahis par les sables et les marnes (argiles) à des hauteurs rendant le point d'eau inexploitable, surtout en environnements gréseux où le tubage a été relativement négligé. Tableau 35.

Tableau 35 coordonnées des points d'eau ensevelis

Point d'eau	Coordonnées			Fonction	Prof. Rest
forage M1	35°17'56,9''	8°12'03,5''	1071	APC / Irr	- 40
Puits neq 35	35°14'07.5''	8°06'10.6''	1082	Privé irr	- 52
Puits neq 20	35° 14'00.7''	8° 07'00.1''	1078	Privé irr	- 30
Puits neq *	35° 14' 40.5''	8° 01' 56.9''	/	Privé irr	- 30
puits neq 07	35° 17' 30.0''	8° 13' 31.3''	/	Privé irr	- 15
Puits neq 25	35° 14'00.7''	8° 07'00.1''	1096	Privé irr	- 0
puits neq **	35° 15' 3,5''	8° 11' 05.8''	1047	Privé irr	- 30
puits neq 26	35° 14' 57,2''	8° 11' 10,4''	1054	Privé irr	- 35
puits neq 12	35° 16' 40,6''	8° 11' 7,9''	1084	Privé irr	- 60

IV.3.3. Lithologie de l'aquifère :

L'exploitation des données de forages et des puits a permis de cerner la lithologie de la zone aquifère et il en ressort que la composante graveleuse est plus importante à l'Ouest, particulièrement au Sud – Ouest. Un bombement (soulèvement) de la formation argileuse au centre de la plaine (à proximité de l'axe Tenoukla – El Ma Labiod) réduisant l'ampleur de la partie concernée de l'aquifère à environ 30 m.

Deux zones (la carrière de Tenoukla et le lieu dit Hadjra safra) sont constituées d'un sable jaune d'une pureté (de toute partie fine) qui pousse à rechercher les conditions hydrauliques et hydrogéologiques qui ont protégé ces lieux de toute contamination par les écoulements et des vents chargés de produits de lessivages et de l'érosion.

La solution qui prédomine à chaque fois c'est que c'était une émergence avec un flux assez puissant pour empêcher d'être submergé par les courants extérieurs chargés en outre la particularité de la consolidation de Hadja Safra, l'apparente aux sables des sources chaudes où la pression hydrique est amplifiée par celle des gaz.

Les forages actuellement ou prochainement en service avec les épaisseurs des formations traversées figurent au tableau 36.

Tableau 36 : Les forages actuellement ou prochainement en service avec les épaisseurs des formations traversées.

FORAG E	X	Y	Z	M.Sce	h(tot)	h(eau)	Ns	Débi t	alluvion s	miocène	marnes/cal c
M2bis	992.975	229.07	107 5	2003 – 8	96	66.6	29.4	40	2	86	12
M3bbis	986.100	228.75 0	110 0	201101	150	90.8	59.1 0	30	0	150	0
M4bis	990.7	228.6	108 0	2003 – 6	165	126.5	38.5	40	1	160	4
M5bis	992.19	230.78	107 5	2008 – 10	170	140.5	29.5	44	3	153	14
M7bis	992.78	232.6	108 0	2005 – 12	205	168.5 2	36.4 8	50	0	205	0
M8bis	900.89	229.78 5	107 2	2006 – 9	190	152.6	37.4	35	0	190	0
M9	998.4	229.82	104 8	1982 – 12	50	30	20	20	5	40	5
M10bis	998.572	232.92 5	108 7	/	150	118.0 9	31.9 1	40	0	150	0
M13bis	995.349	231.86 4	108 0	2007 – 9	100	61.16	38.8 4	40	6	82	12
M14	992.2	229.55	107 2	1988 – 6	200	181.9	18.1	20	10	123	67
M2bis	992.975	229.07	107 5	2003 – 8	100	70.6	29.4	40	5	87	12
M16	992.684	229.99 1	106 7	2007 – 8	120	98.09	22.9 1	40	2	93	25
M17	991.25	230.5	107 5	2008 – 7	200	165.7 5	34.8 5	40	5	155	40
M18	989.310	230.25 8	108 9	2015 – 10	200	149.5 5	50.5	17	35.5	165	10
M19	988.973	229.90 9	109 7	2017	200	145	55	15	35.5	165	10
AT1bis	1007.32 5	229.5	113 6	2008 – 7	150	144.6	5.4	10	0	109	41

La distribution spatiale de ces points d'eau et celle des puits dont les formations traversées sont connues (figure 38), la coupe hydrogéologique ENE – OSO, passant par M10 - M9 – M6 (figure 39) et La coupe hydrogéologique N – S de l'aquifère karstique au sud Ouest, passant par M4bis – P4 – Neq24 – P7i – M15 – P9 – Neq19 et P10, (figure 40), précisent la profondeur, la constitution lithologique des milieux forés.

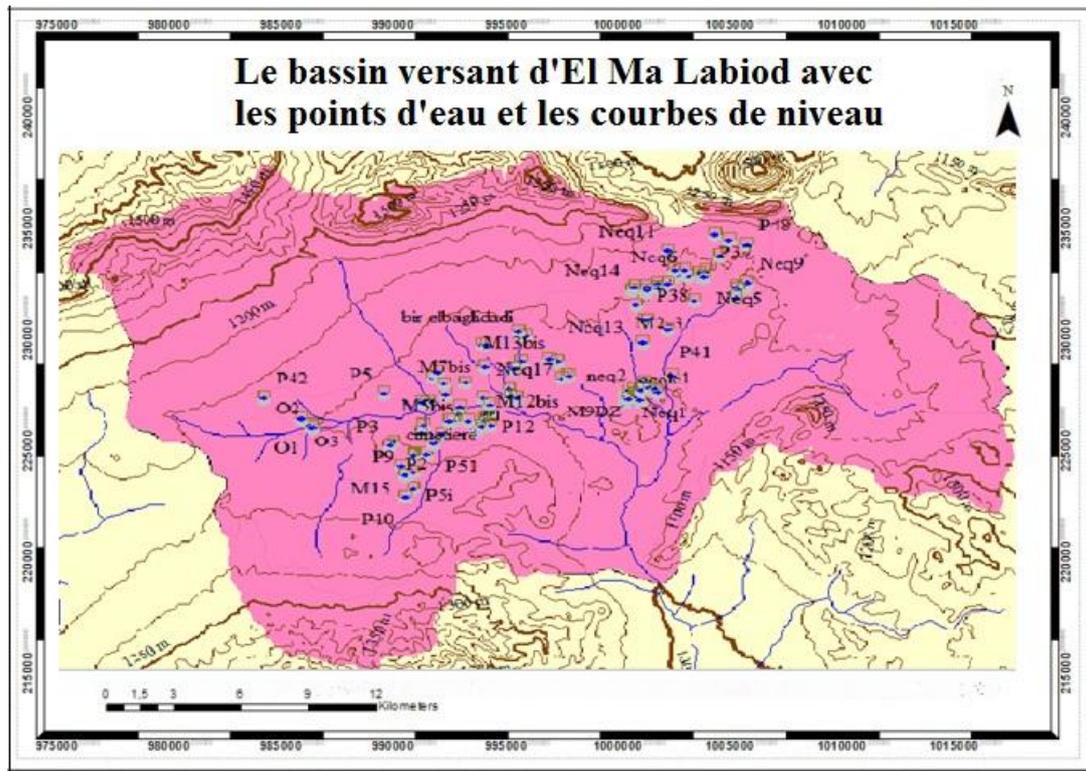


Figure 38 La distribution spatiale des points d'eau dans la plaine d'El Ma Labiod

La lithologie sableuse au Nord - Est présente une teneur en composante argilo marneuse croissante de la bordure nord vers le centre. Au sud Ouest l'aquifère exploité est karstique. Ailleurs, les forages et les puits montrent une couche argileuse plongeante d'épaisseur décroissante qui s'estampe à mi-chemin des bordures vers le centre de la plaine. Parfois la formation argileuse disparaît subitement pour mettre en évidence une faille (affaissement rempli le plus souvent par des sables avec un apport argileux variable où l'on observe parfois une plus ou moins dense présence de gravier).

Les horizons superficiels sont relativement classifiés des bordures vers le centre de la plaine.

L'absence de calcaires parmi les matériaux extraits des puits au niveau de la bordure Nord - Est de la plaine et au Sud de Tenoukla montrent que les formations carbonatées de cette bordure ont un plongement sub-vertical ou que la partie sous le remplissage quaternaire soit effondrée et que la supposée faille n'a pas été touchée par la prospection géo-électrique (Annexe G).

Les coupes hydrogéologiques, longitudinale M1 – M3bbis (figure 39) et transversale M4bis – M15 – P10 au niveau de l'aquifère karstique montrent un milieu sableux diversifié aussi bien en profondeur qu'en composante argileuse et une disharmonie dans l'évolution des calcaires. Ce qui laisse déduire des failles et des affaissements de cette formation entre M15 et M4bis.

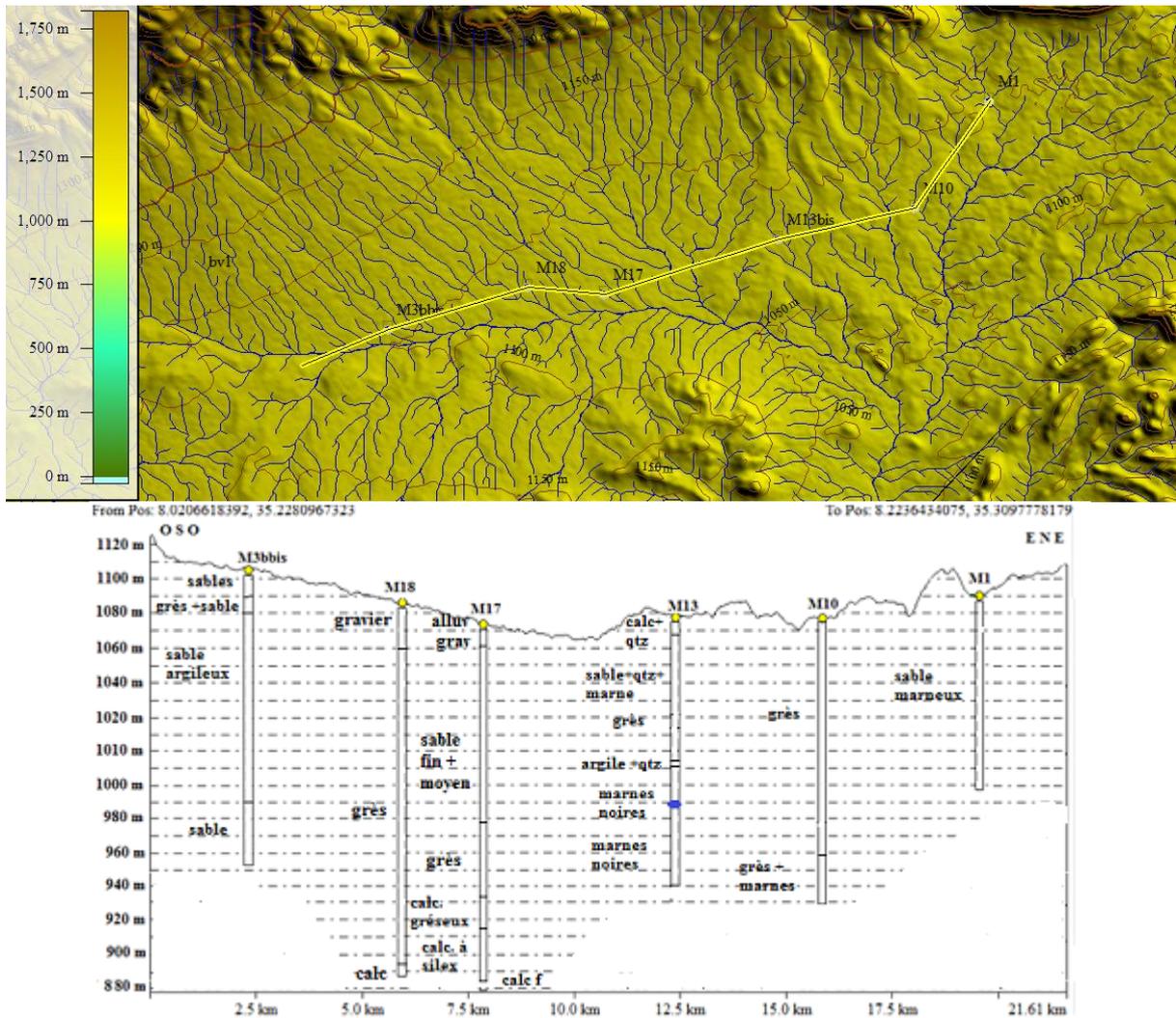


Figure 39 Coupe hydrogéologique ENE – OSO passant par M3bbis, M18, M17, M13 M10 et M1.

IV.4. Typologie de la nappe

En se référant à (J. Magrat 1996), une nappe souterraine peut recevoir divers qualificatifs relatifs à la nature de l'aquifère, ses conditions hydrodynamiques, son accessibilité ou les caractéristiques de l'eau.

Sous cette approche la Nappe sous la plaine d'El Ma Labiod serait :

Suivant la nature de l'aquifère: *Nappe de sables* légèrement recouverte par une *nappe alluviale* sans confinement.

Suivant les conditions hydrodynamiques : *Nappe libre* : nappe à surface piézométrique libre et variable, dans un aquifère à zone non saturée.

Suivant la structure hydrogéologique et les conditions aux limites (d'après la classification des nappes libres de H.Schoeller, 1962):

Nappe soutenue : nappe libre, en général, dans un aquifère à limite à condition de potentiel (cours d'eau ou plan d'eau superficiel) ici les apports des bordures karstiques.

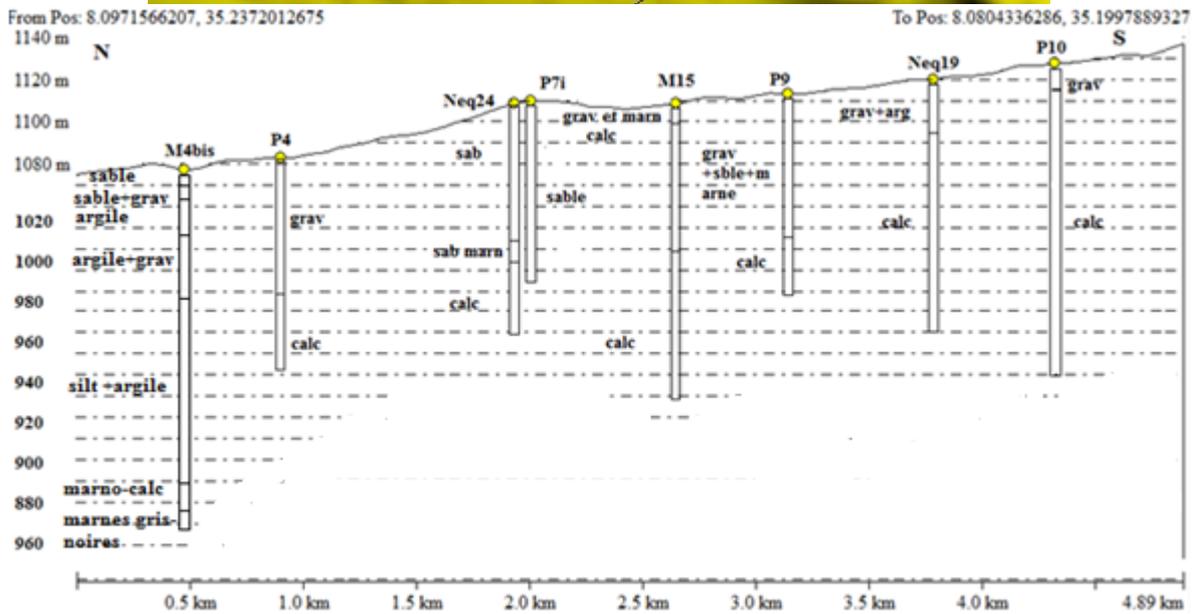
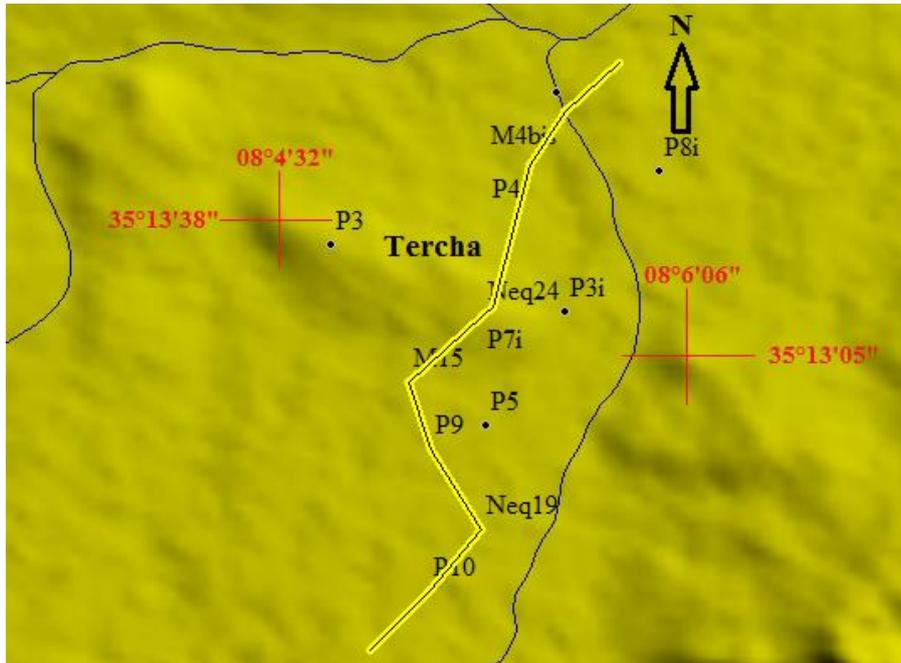


Figure 40 Coupe hydrogéologique Ouest Sud –Ouest Est-Nord -Est passant par M3bbis, M18, M17, M13 M10 et M4bis.

Suivant l'accessibilité:

Nappe phréatique, du grec phreas, puits (Daubrée, 1887), nappe souterraine atteinte et exploitable par les puits ordinaires.

Nappe profonde, atteinte et exploitable par forage, au delà d'une profondeur conventionnelle.

Suivant les caractéristiques de l'eau :

Nappe à eau potable

IV.5. CONCLUSION

Cette étude hydrogéologique a montré que :

- La plaine d'El Ma Labiod comporte quatre aquifères ; un superficiel d'une ampleur de 15 à 20 mètres formé d'alluvions, le deuxième karstique réparti en trois zones individualisées ; la bordure Nord Est (Dj. Bouroumane), la bordure Nord Ouest, et les calcaire de Ouled Khélifa au Sud Ouest), le troisième ; est un aquifère à nappe captive au Sud Est de la plaine (Ain Taga); il est représenté par les Forage AT1(artésien) et AT1Bis.

Le quatrième aquifère, à remplissage miocène, est le plus important par son extension et ses caractéristiques hydriques, objet de cette étude :

- La nappe de cet aquifère à sable est libre, phréatique évoluant vers la profondeur et à eau potable.
- Cette nappe est soutenue mais surexploitée au point que ses réserves diminuent d'une hauteur moyenne de 0.4 à 0.7 mètre chaque année.
- Les caractéristiques hydrodynamiques sont en évolution et la vitesse dépend de l'intensité de pompage, de la composition du terrain et de la durée d'exploitation. le pompage excessif a lessivé l'horizon du rayon d'action et a causé l'effondrement de certains puits et forages.
- Les valeurs de ses paramètres restent pour la plupart assez importantes pour permettre des débits conséquents de 30 à 40 et même 50 litres par second au niveau des nouveaux forages.

CHAPITRE 5

HYDROCHIMIE

Introduction :

L'exploitation rationnelle des ressources hydriques impose la connaissance de certaines données qui permettent aux gestionnaires de cerner les caractéristiques de ces eaux pour prendre une décision quant à leur utilisation. La composition chimique d'une eau permet son identification et son comportement vis-à-vis de chaque usage. L'empreinte chimique de chaque eau lui confère une famille ou classe selon les valeurs relatives de ses composants, les options de son utilisation selon la valeur absolue de leurs teneurs et sa qualité pour chaque option selon son agressivité dans le domaine d'emploi. L'alimentation humaine (animale), l'irrigation, l'industrie, les loisirs ou le transport ; pour chacun de ces domaines des marges ont été déterminées pour les teneurs des composants chimiques de l'eau.

V.1. Le cycle de l'eau

L'eau sur terre suit un cycle naturel (figure 41) qui la régénère et lui donne son caractère de ressource renouvelable.

Lors de son évolution à travers les différentes étapes de ce cycle, l'eau est soumise à une évaporation (évapotranspiration), une condensation et une précipitation, un ruissellement avec remplissage des dépressions, une infiltration, une percolation et écoulement souterrain avec recharge des nappes libres et confinées.

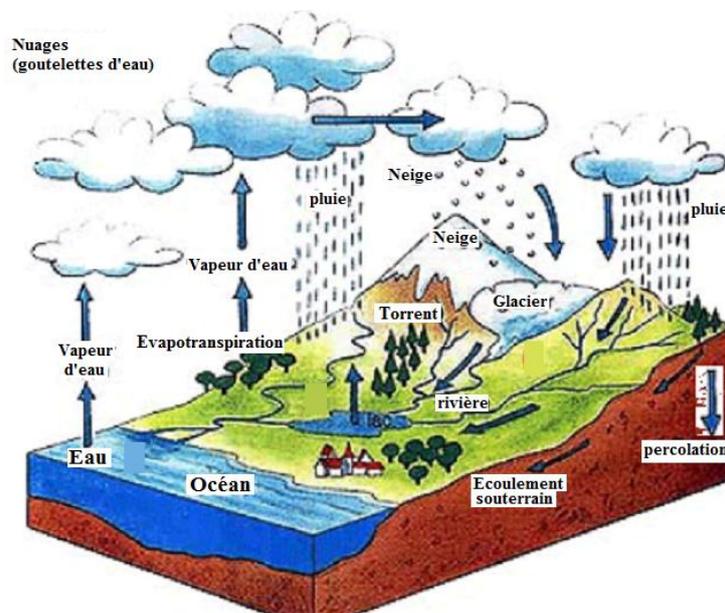


Figure 41 le schéma du cycle de l'eau

Parallèlement au cycle global de l'eau s'ensuit un cycle d'état de l'eau (solide, liquide ou gaz) et un cycle de minéralisation et de déminéralisation (acquisition et libération de sels minéraux). Selon la

phase du cycle, l'état de l'eau, le milieu d'évolution et le temps de séjours, un commerce (échange) permanent d'éléments chimiques a lieu entre l'eau et son environnement.

-*Lors de l'évaporation* ; passage de la phase liquide à la phase gazeuse sous l'effet de la chaleur induite par le soleil (ou la sublimation ; passage de la neige et glace considérées comme solide à l'état de vapeur), les molécules d'eau deviennent volatiles. La masse volumique de l'eau passe de 1000 g/l à une environ 1 g/l les liaisons atomiques faiblissent, les minéraux acquis précédemment se libèrent et permettent à la vapeur d'eau de s'élever au niveau de sa densité.

Si le phénomène de déminéralisation n'est pas remarquable au niveau des surfaces d'eau, la présence de dépôts ;

- Gypsifère au niveau de la station de carburant au bord de la RN 16, confirmée par une eau très salée. Deux autres indices de dépôt à 0.5 à 1m de la surface du sol, sont observés :

- le premier, au Nord Est, à proximité de p47 (35°17'16.8'' – 8°10'40.4'') très compacte et litée, d'une épaisseur de 1,5 m (figure 42 a), et le deuxième à l'Ouest, à proximité du point de coordonnées (35°14'35.0'' – 8°04'40.0'') (figure 42 b),

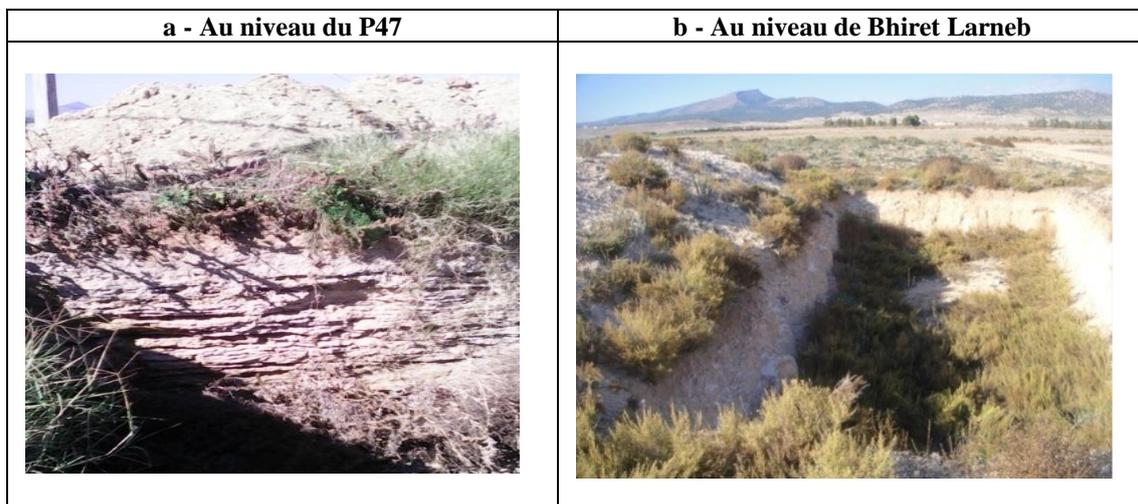


Figure 42 les deux couches, compacte et claire-semée, issues de la déminéralisation

Vu la composition standard de l'air, selon John D.Hem (1985), qui devient le nouveau milieu où évolue l'eau (annexe I), les molécules gazeuses continuent leurs échanges et acquièrent de nouveaux éléments selon la disponibilité et l'affinité.

- *La condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes*, sous l'influence de la baisse de température en altitude, permet l'acquisition d'éléments aussi bien gazeux que particulaires en suspension. Selon John D.Hem (1985) l'atmosphère se compose à 78.1% d'azote.
- *La précipitation des eaux des nuages* se fait, selon les conditions météorologiques, sous forme liquide (bruine, pluie, averse) ou solide (neige, grêle). Quelque soit sa forme physique, l'eau arrive

au sol avec sa minéralisation atmosphérique. L'étude de ces eaux faite par Feth, J.H. et Whitehead H.C., (1964), montre une diversité chimique étendue entre les différents échantillons dont le tableau des moyennes est en (Annexe J).

- Dès le premier contact avec le sol, l'eau de pluie relativement légère avec un TDS très bas et un coefficient d'activité assez élevé, devient un des facteurs en présence qui participent aux réactions chimiques qui lui permettent l'acquisition de sa minéralisation future.
- Que ce soit lors du *ruissellement* à la surface du sol, par roulement sur l'interface eau-sol, lors de l'*infiltration* en passant à travers les éléments aussi bien organiques qu'inorganique du sol relativement riche en CO₂, lors de la *percolation* par gravité le long de la zone non saturée (zone vadose) plus ou moins importante à travers la continuité interstitielle ou lors de l'évolution en zone saturée en contact avec les eaux de la nappe et la roche aquifère, l'eau ne cesse d'acquérir et d'échanger les éléments qui la distinguent chimiquement et qui permettent parfois de retracer une partie plus ou moins importante de son parcours.

NB : au contact des sels déposés lors de l'évaporation précédente (figure 42), l'eau qui débute sa percolation dissout et en reprend une partie relativement importante sous forme ionique (Ca⁺⁺, Na⁺, SO₄⁻⁻, Cl⁻, ...).

L'eau précipitée se transforme peu à peu au cours de son évolution spatio-temporelle ; elle perd certains de ses constituants initiaux (RAMBAUD, 1982) et en gagne d'autres, le tout produisant une solution originale dont la minéralisation reflète les contextes géologiques traversés par l'eau. A. Gadalia (1995)

Ainsi selon les milieux lessivés lors de son trajet en surface et en sub-surface, l'eau percolée pourrait par le même processus entraîner des éléments nocifs (polluants) vers la nappe.

Selon la charge nocive, la fréquence du phénomène, l'ampleur de la nappe son dynamisme, la composition de la zone non saturée et leur comportement chimico-physique vis-à-vis du polluant et particulièrement le temps de percolation, l'eau qui arrive de la surface pourrait rendre, à plus ou moins long terme, la réserve d'eau impropre à un ou plusieurs usage.

V.2. Les processus chimiques d'acquisition de la minéralisation

Généralement la chimie des eaux souterraines est conditionnée par le milieu où elles évoluent (formations géologiques, présence de bactérie apports de gaz profonds etc..) et par l'impact des activités anthropiques.

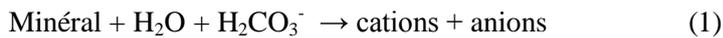
La minéralisation des eaux souterraines est régie par les lois et les principes qui contrôlent toutes les réactions chimiques, on en cite :

V.2.1. Les processus d'altération :

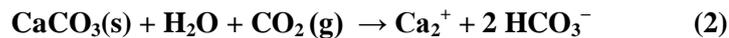
Ils consistent en des réactions de dissolution des roches les plus abondantes (silicates, oxydes, carbonates). Cela peut être considéré comme des réactions entre les bases des roches et les acides de l'atmosphère, principalement l'acide carbonique H_2CO_3 qui se forme dans l'eau à partir de CO_2 .

La composition des phases dissoutes résulte de ces réactions dont les modèles simples d'équilibre, comme la dissolution et la précipitation selon Laura Sigg et al (2014) :

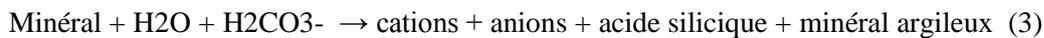
- Pour les carbonates :



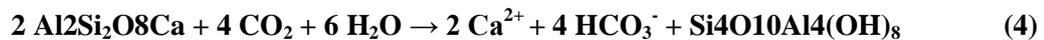
L'exemple de la calcite:



- pour les silicates :



L'exemple du plagioclase :



Dans ce cas le minéral argileux est la kaolinite.

L'auteur, Laura Sigg et al (2014), focalise sur les grandes quantités de CO_2 atmosphérique nécessaire pour chaque réaction.

Ainsi Allan Freeze et John Cherry (1979) s'accordent sur le fait que la quantité de CO_2 que libère la matière organique représentée ici par CH_2O (l'hydrate de carbone simple) lors de sa décomposition selon la formule :



est assez faible devant le CO_2 atmosphérique dans le sol, même si certains appellent cette zone pompe à CO_2 .

En profondeur (conditions d'anaérobie), le CO_2 est généré par d'autres procédés tels que la réduction des sulfates et des nitrates.

Ainsi pour Olivier Atteia, (2005), l'oxydation de la matière organique par la réduction des nitrates peut conduire à la dégradation de 5 à 10 mg/l de carbone organique. et faire jouer à l'azote un rôle plus important que celui de l'oxygène dans ce domaine en milieu proche de la neutralité en présence de bactéries dénitrifiantes. Toujours dans le même contexte il cite (Broholm et al, 2000) des travaux duquel il déduit que « Les réactions relatives à l'azote sont en quasi- totalité effectuées par les bactéries lorsque le pH est proche de la neutralité. ».

V.2.2 Les réactions d'adsorption et de désorption

Les substances dissoutes peuvent s'adsorber sur les composants des couches traversées et les particules solides en suspension et être ensuite résorbées. De tels processus contribuent au contrôle des concentrations en métaux dans les eaux. De plus, les minéraux argileux en suspension, en tant que éléments adsorbants, peuvent servir à la fois de moyen de transport et de réservoir de polluants.

Selon sa composition lithologique, la nappe d'El Ma Labiodh est alimentée par deux voies ; l'une verticale pour les eaux météoriques et les surplus d'irrigation à travers un milieu poreux (limoneux, graveleux et sableux à gréseux avec une patine argileuse), l'autre horizontale pour les eaux karstiques latérales après une traversé plus ou moins longue des formations carbonatées de bordure.

Dans les deux cas le CO₂ acquis de la phase atmosphérique aura le rôle principale dans la dissolution aussi bien de la calcite sur les parois des fissures et des voies karstifiées des calcaires que des éléments gypsifères et débris clastiques de la zone vadose.

V.3. – détermination de la minéralisation et des faciès chimiques des eaux souterraines

V.3.1.méthodologie :

L'essentiel de la méthodologie est de permettre des résultats représentatifs de l'état réel des échantillons sans aucune déviation due à des éléments externes (contamination). Pour cela plusieurs directives et guides ont été établis, les mesures préventives relatives aux outils, aux particularités de prélèvement, à l'emmagasinement, ...) ont été respectées autant que possibles.

V.3.1.1. Prélèvement et analyse

L'eau souterraine échantillonnée est prélevée des grès et des sables du Miocène ainsi que des calcaires fissurés plus ou moins enfouis sous les graviers et les sables marneux au nord de Dj. Boudjellal.

Prélevés dans des bouteilles en plastiques rincées avant remplissage, l'eau des captages a été remplie après 5' d'écoulement pour ceux qui n'étaient pas bronchés. La température, le pH et la conductivité électrique sont des paramètres mesurés sur site.

La majorité des analyses ont été réalisées au niveau des laboratoires de SOMIPHOS de Bir El Ater et de SOMIFER de Tébessa. Le laboratoire FETHALLAH d'expertise de la qualité Agro-alimentaires - cosmétiques - détergents Tébessa. A été aussi sollicité pour une dizaine d'échantillons surtout les azotes.

V.3.2. Résultats et discussions

L'analyse chimique de trente deux échantillons retenus parmi plus de 70 prélèvements d'eau souterraine de la plaine d'El Ma Labiodh montre des valeurs assez dispersées ; une conductivité électrique allant de 615 à 1399 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et des résidus secs à 125°C allant de 360 à 2860 mg/l. La distribution spatiale de la conductivité électrique de la zone d'étude est donnée figure 43

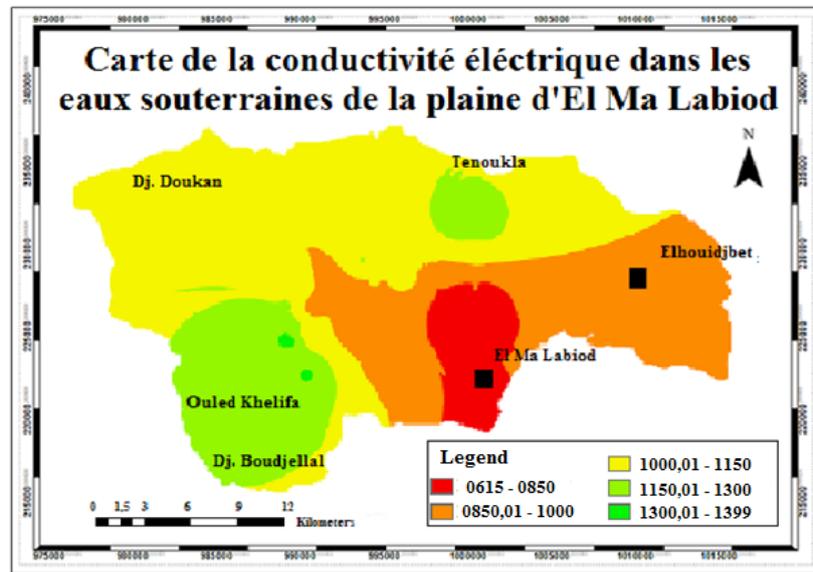


Figure 43 Carte de la conductivité électrique des eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod

V.3.2.1 Le faciès chimique de l'eau

La famille chimique d'une eau est déterminée selon la teneur relative de ses composants (teneur de l'anion X/ la somme des teneurs des anions et la teneur du cation X/ la somme des teneurs des anions) après la transformation de l'unité en milli – équivalent (meq), puis les anions et les cations sont ordonnés selon leurs teneurs en méq/l et les deux éléments chimiques de tête forment la famille (classe) chimique de l'eau en question.

Dans cette étude, les résultats des analyses chimiques des échantillons ont été compilés sur Excel en mg/l et soumis au logiciel « Diagrammes » ce qui a permis de réaliser :

Le diagramme de Piper conçu entre autres pour déterminer le faciès chimique des eaux et de confronter jusqu'à une vingtaine de types d'eau. Après distribution des échantillons qui lui sont soumis sur ses éléments, le graphe final montre que les points d'eau étudiés sont regroupés dans la zone des eaux chlorurées calciques (figure 44). La figure 45 dotée de cercles représentatifs des teneurs renseigne aussi sur la salinité totale des points d'eaux analysés.

La comparaison de ce graphe avec ceux des études précédentes notamment (Rouabhia 2006) ne montre pas de différences notables.

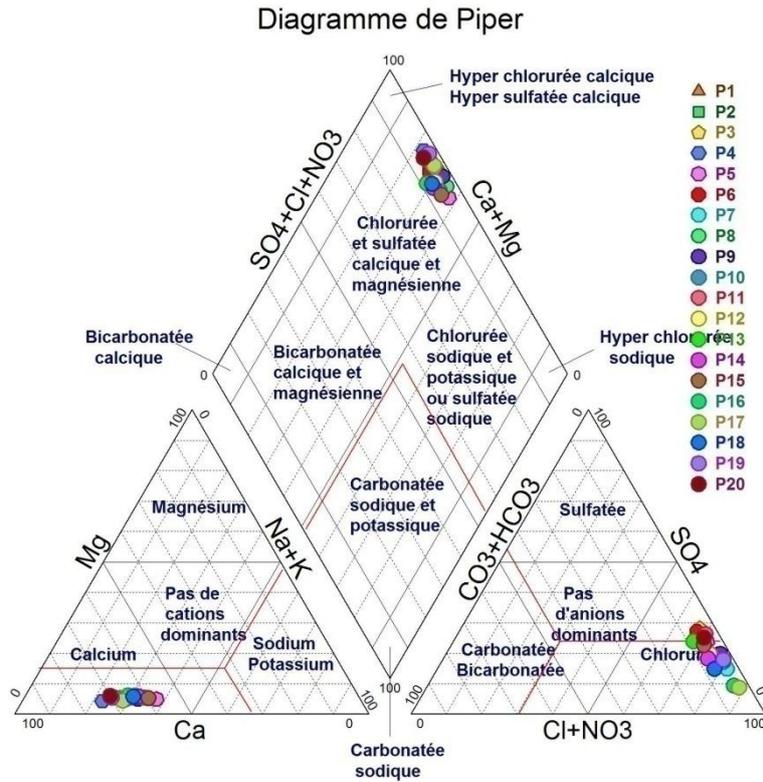


Figure 44 Le diagramme de Piper pour les eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod.

- Le diagramme de Piper

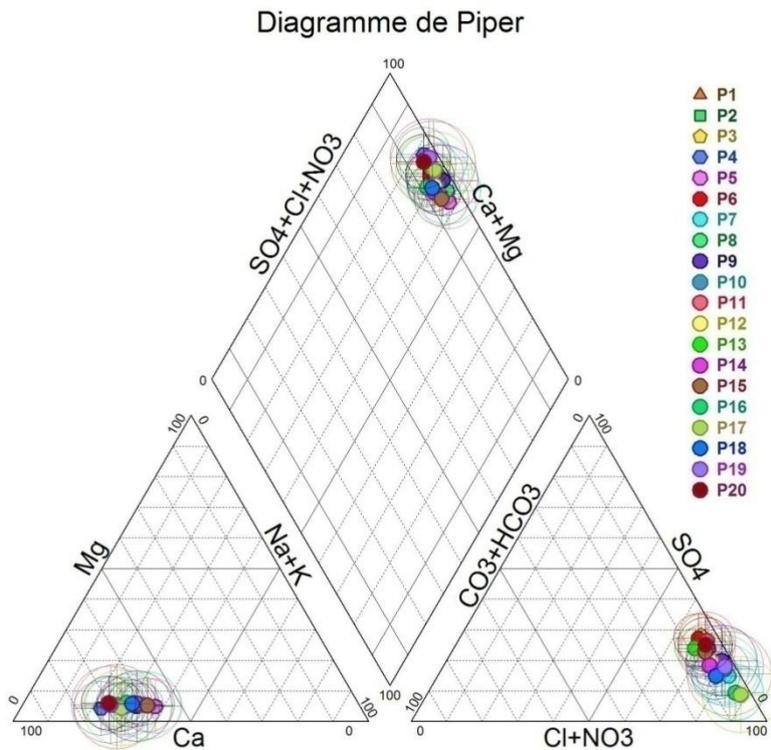


Figure 45 Le diagramme de Piper pour les eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod avec les cercles de résidus sec

V.3.2.2. Représentation du profile chimique

- Le diagramme de Schoeller – Berkallof

Le diagramme de SCHOELLER-BERKALLOF, conçu pour mettre en évidence les différents composants des échantillons, faciliter l'étude comparative et d'homogénéité chimique de plusieurs points d'eau affiche les valeurs aussi bien mg/l qu'en milli - équivalent (meq).

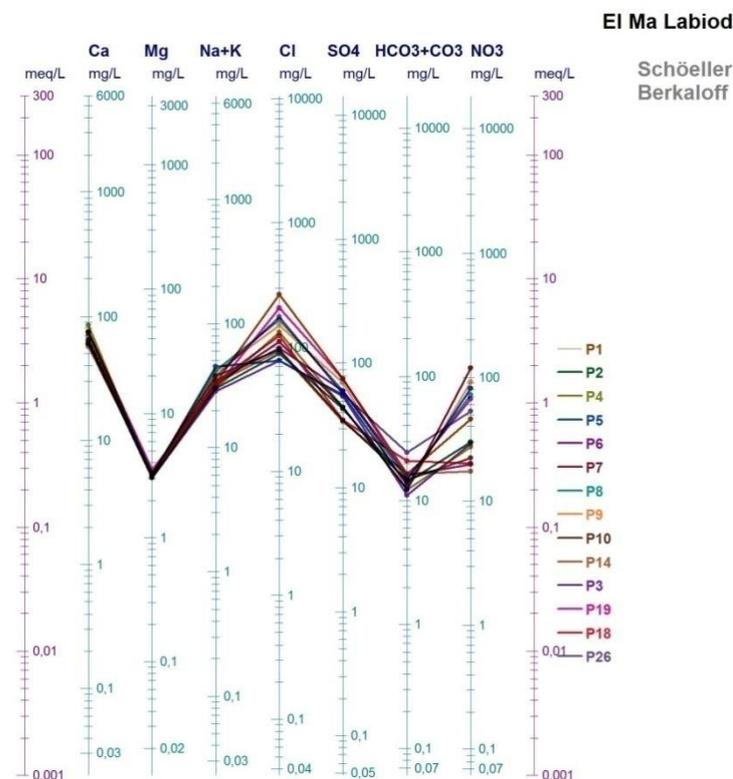


Figure 46 Diagramme de SCHOELLER-BERKALLOF des eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod

Pour les eaux de la plaine d'El Ma Labiod, (figure 46), on constate un rétrécissement du faisceau d'échantillons au niveau des valeurs du calcium et du magnésium (Ca et Mg), celles des sulfates (SO4), du sodium et du potassium (Na + K) et celles des carbonates et des bicarbonates (CO3 et HCO3) présentent un écart moyen tandis que celles des chlorures et des nitrates sont étalées sur des marges relativement importantes.

- Les diagrammes de Stiff

Le diagramme de Stiff n'est pas très précis pour ce qui est des valeurs des composants chimiques mais il affiche des représentations individuelles simultanées de 40 points d'eau et permet une comparaison graphique assez rapide surtout lorsque le nombre d'échantillons est élevé. La représentation des eaux d'El Ma Labiod sur le diagramme de Stiff est portée en figure 47.

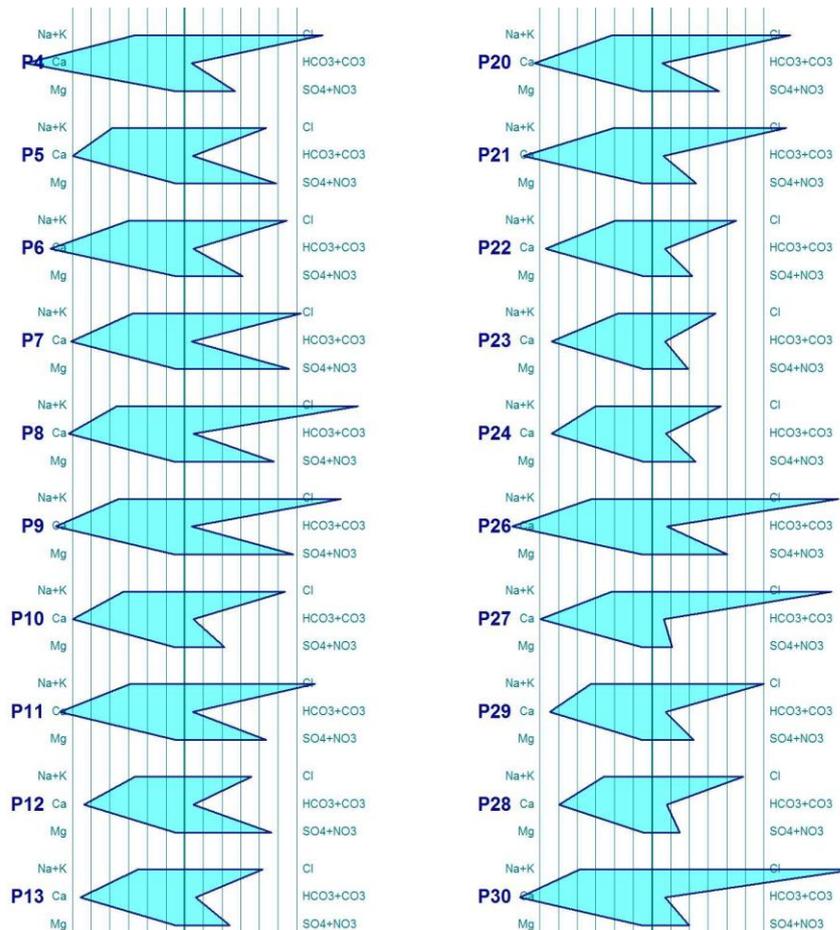


Figure 47 Diagramme de Stiff des eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod

V.3.2.3. la cartographie des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la plaine

La distribution spatiale de ces caractéristiques a été projetée en utilisant les outils d'Arcgis 10.3.

- Caractéristiques physiques :

Organoleptiques : Tous les échantillons présentent une eau limpide et sans aucun gout particulier. Seul le captage de Adila auquel succède un arrière gout comme celui que garde un récipient qui a servi pour transvaser ou stocker du gasoil 'même après plusieurs lavages'.

Aucune suspension n'est observer mais la différence entre les valeurs des TDS et celles des résidus secs les met en évidence..

Le pH (potentiel hydrique) : La distribution spatiale des valeurs du pH des eaux de la zone d'étude est interpolée dans la figure 48.

Le pH des eaux souterraines d'El Ma Labiod s'étale sur la marge « 6.6 – 7.99 ». sans sortir de la neutralité des eaux potables, la projection de ces valeurs montre deux zone bien distinctes ; les eaux à

tendance acide à l'Est dans les sables propres (moins argileux) et les eaux à tendance basique (terreux) à l'ouest avec une zone intermédiaire qui s'élargie au nord et au Sud et s'estompe au centre, entre M9 et M10.

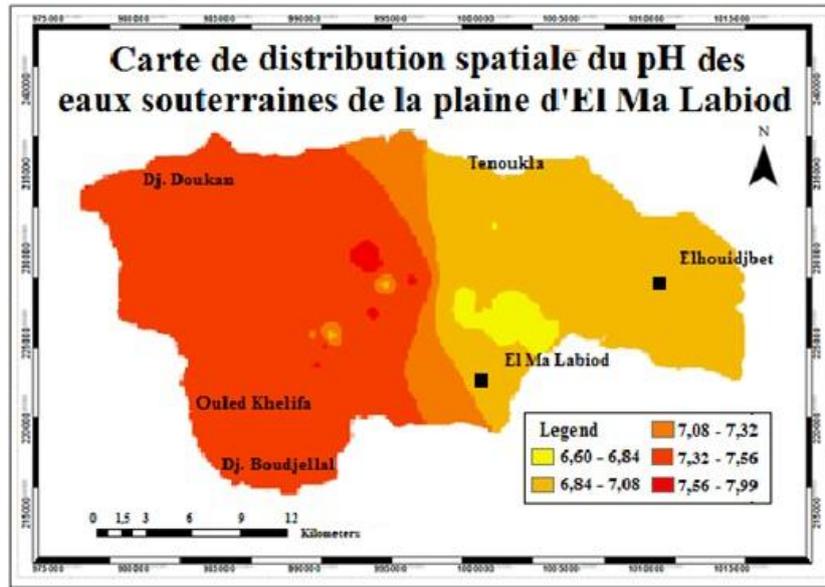


Figure 48 Carte de distribution spatiale des valeurs du pH dans les eaux souterraines de la plaine d'el Ma Labiod.

La température : La marge des valeurs de la température de eaux échantillonnées va de 16.6°C à 18.99°C, son interpolation sur la zone d'étude (figure 49), montre une sectorisation croissante de l'Est

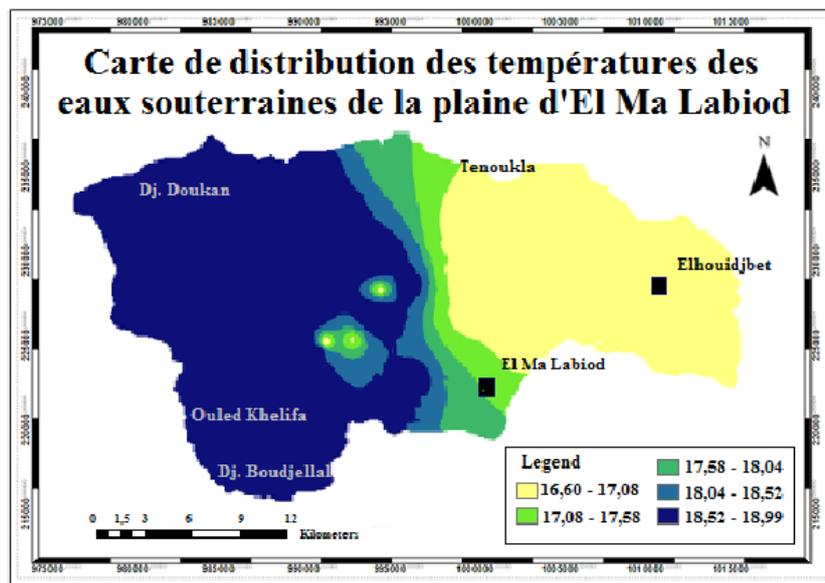


Figure 49 Carte de distribution spatiale des températures dans les eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod.

vers l'Ouest ; deux zones assez importantes avec une zone intermédiaire échelonnée dans le même sens. La partie intermédiaire a une forme apparente qui ressemble à celle de la figure 48.

- **composition chimique:**

- *Le calcium:* les teneurs de cet élément dans les prélèvements retenus varient de 5.24 à 85.9mg/l, Leur distribution spatiale (figure 50) montre une interpolation des valeurs sous des formes ponctuelles

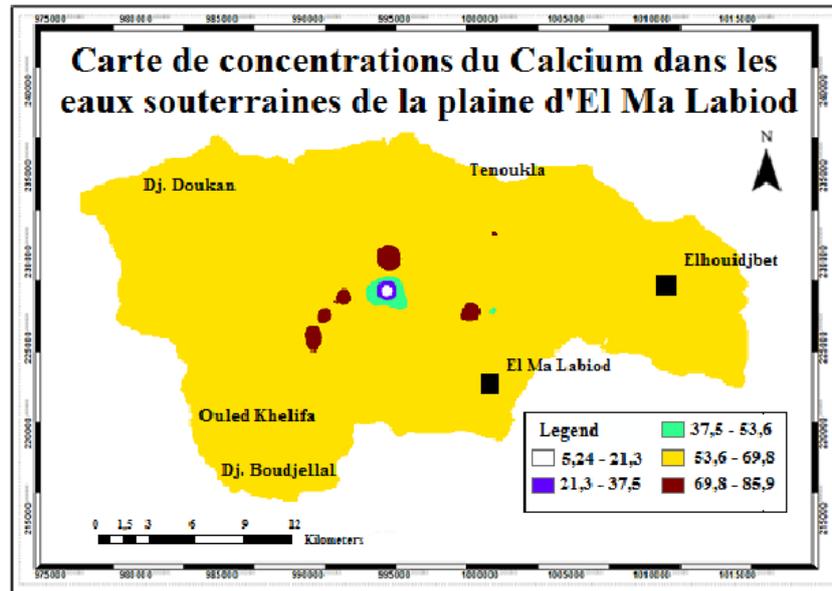


Figure 50 Carte de distribution spatiale des concentrations du calcium des eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod.

Individualisées par la présence de la valeur intruse de la source de Adila qui ne fait pas partie des eaux de la nappe étudiée.

- *Le magnésium :* Les teneurs de cet élément dans les échantillons étudiés sont comprises entre 3 et 3.9 mg/l. leur distribution spatiale (figure 51) faite avec des marges inférieures à 0.3mg/l mais projection a montré un ordre décroissant de l'Est vers l'Ouest avec zone pour des valeurs assez haute (couleur jaune) au Sud Ouest influencée par la valeur des eaux de la source Adila (captage du BDJ2).

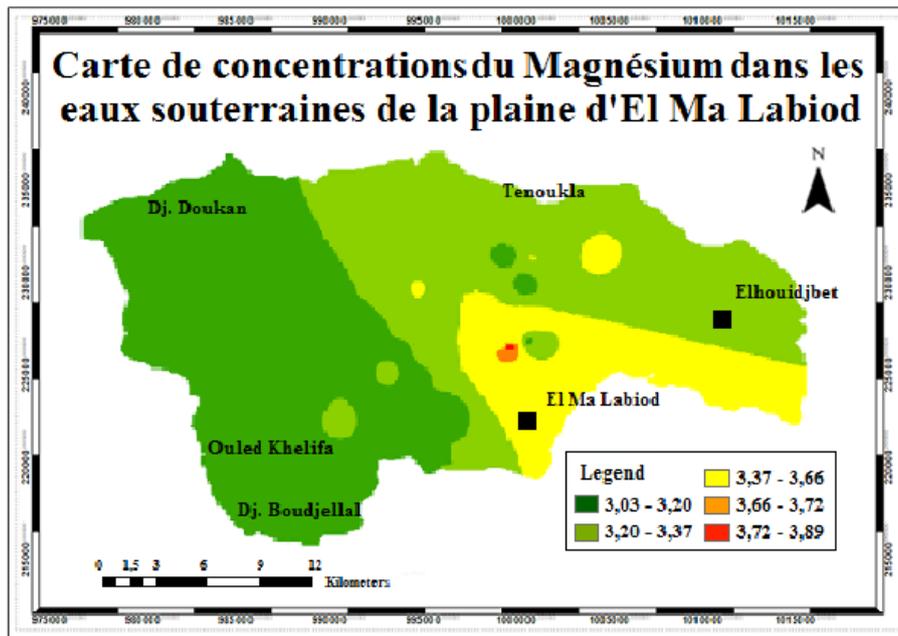


Figure 51 Carte de distribution spatiale des concentrations du magnésium dans les eaux souterraines de la plaine d’El Ma Labiod.

Les sulfates : Les teneurs des sulfates dans les eaux de la zone d’étude vont de 19 à 88.54 mg/l. leur projection (figure 52) montre deux zones l’une au Nord Est l’autre occupe le reste de la superficie de la plaine avec une nouvelle limite mais déjà vue (non discutée) en figure 51.

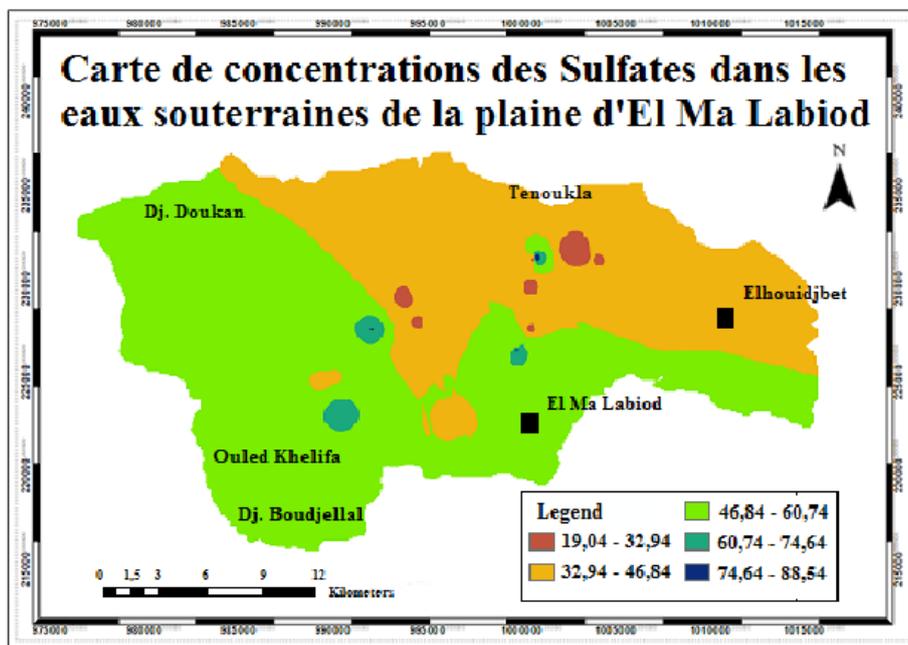


Figure 52 Carte de distribution spatiale des concentrations des sulfates dans les eaux souterraines de la plaine d’El Ma Labiod.

Le chlore : Les teneurs de cet élément dans les échantillons étudiés sont comprises entre 5,1 et 264,4 mg/l. leur distribution spatiale (figure 53), montre une couverture globale par les concentrations entre 100 et 180 mg/l avec deux points qui affichent des valeurs maximales.

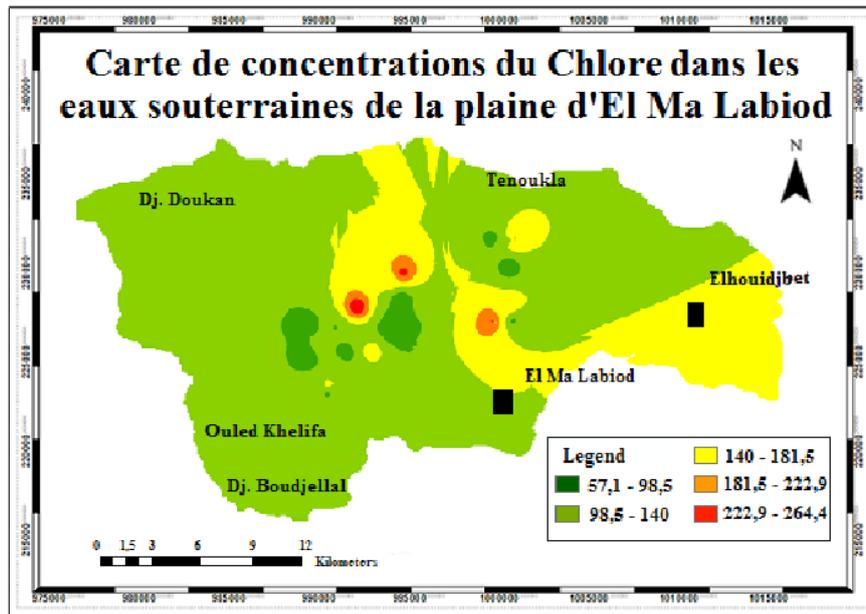


Figure53 carte de distribution spatiale des concentrations des chlorures dans les eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod.

- *le sodium* : Les teneurs du sodium dans les échantillons étudiés varient entre 20,9 et 44,9 mg/l. leur projection montre une distribution spatiale (figure 54) proche de celle des sulfates avec une extension moindre vers l'Ouest. Les valeurs minimales sont observées à proximité du M10 et les valeurs maximales à l'entour du M3bbis et des calcaires au sud Ouest.

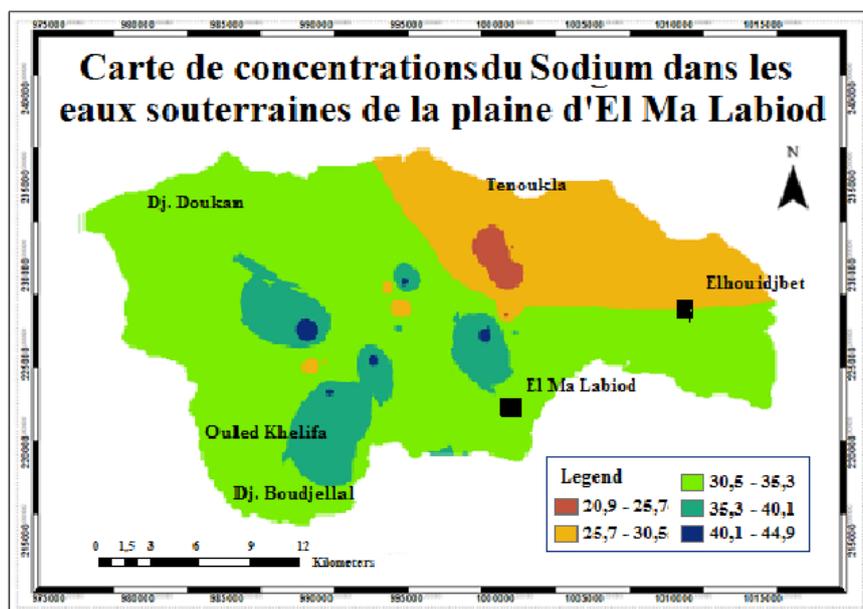


Figure54 Carte de distribution spatiale des concentrations du sodium dans les eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod.

- *Les bicarbonates ou hydrogencarbonates*: Leurs teneurs dans les échantillons étudiés varient

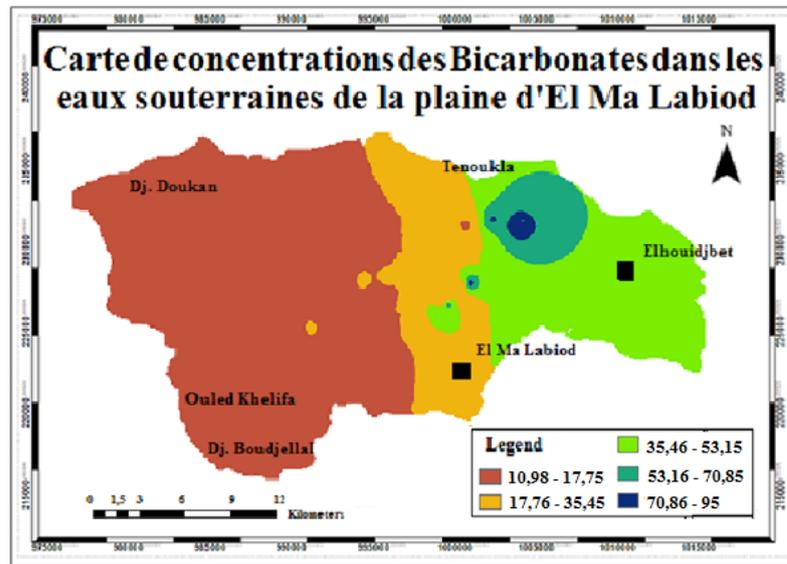


Figure55 Carte de distribution spatiale des concentrations des bicarbonates dans les eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod.

entre 10,98 et 95 mg/l. leur projection montre une distribution spatiale (figure 55) avec des valeurs décroissantes de l'Est vers l'Ouest avec une zone intermédiaire plus distincte. Les valeurs maximales sont observées au niveau de p47 à hauteur du M10 au sud de Bouroumane

- *Le potassium*: Les teneurs du sodium dans les échantillons étudiés varient de 0,1 à 0,3 et une valeur de 3 mg/l (Adila). leur projection montre une distribution spatiale (figure 56) unie de valeurs inférieures à 0,5 mg/l.

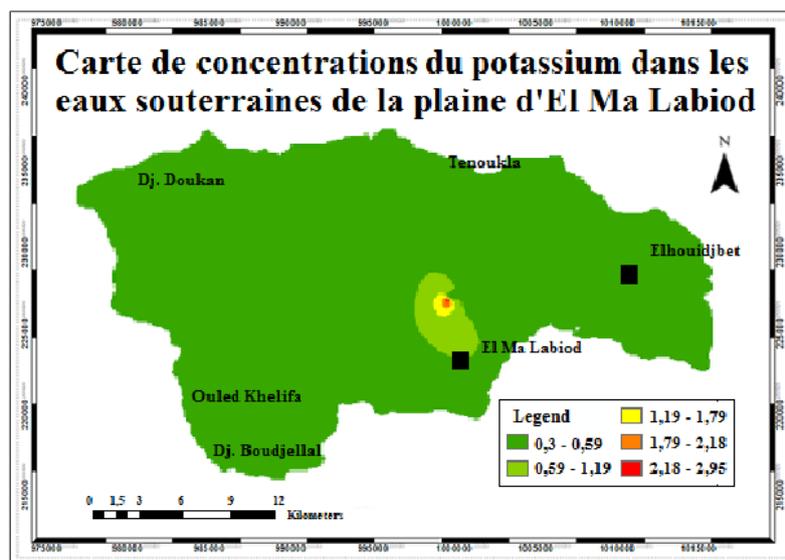


Figure56 carte de distribution spatiale des concentrations du potassium dans les eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod.

- *les nitrates*: entre 10,98 et 95 mg/l. leur projection montre une distribution spatiale (figure 57)

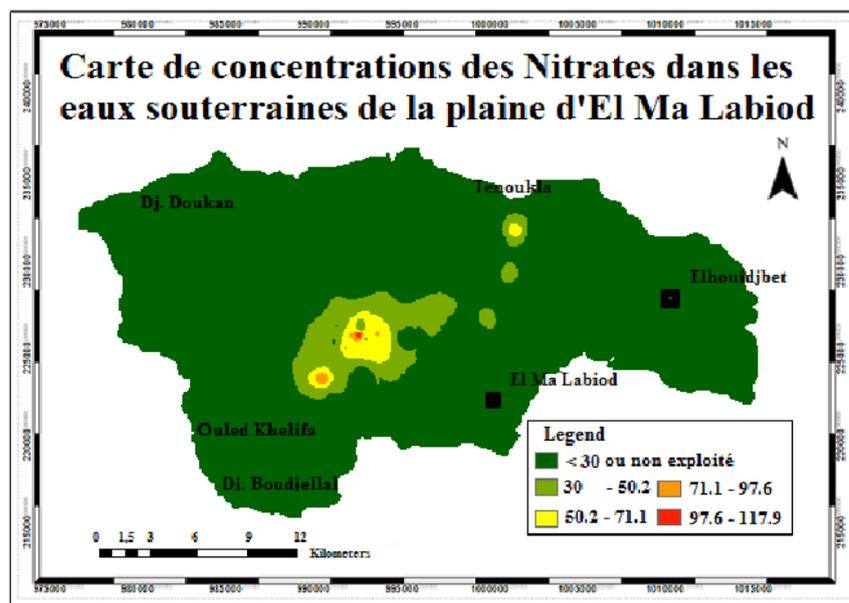


Figure57 Carte de distribution spatiale des concentrations des nitrates dans les eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod.

des valeurs importantes ; supérieures à 60 mg/l et celle de la marge 97,6 à 117,9. Cette valeur maximale a été observée dans les eaux karstiques (forage sans margelle dans des calcaires affleurant) et la mesure de contrôle après 1 mois a affiché 80 mg/l. une certaine concordance avec les maximums des chlorures est aussi observée.

V3.2.4. Données statistiques

- Situation globale:

La situation globale est indiquée au tableau 37

Tableau 37 données statistiques globales sur la minéralisation des eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod (mai 2017) 40 points d'eau.

Désignation	maximum	minimum	moyenne	Ecart type
Cl- (mg/l)	264.5	56.8	127	55.63
HCO3- (mg/l)	95	10.98	29.99	23.7
SO42- (mg/l)	90	19.04	47.14	17.72
Ca2+ (mg/l)	74	5	62.48	13.65
Mg2+ (mg/l)	3.71	3.03	3.27	0.19
Na++K (mg/l)	46.33	21.1	33.172	6.6
NO3- (mg/l)	118.2	17.5	44.345	28.32
TDS (mg/l)	730	340	543.5	91
CE (µS/cm)	1399	615	942.22	221.5
pH	7.93	6.6	7.26	0.343
T °C	18.99	16.6	18.02	1.09

- Corrélation

La corrélation des caractéristiques physiques et chimiques des échantillons étudiés (Tableau 38) a été réalisé par SPSS 22 en Analyse de composantes principales.

Tableau 38 matrice de corrélation entre les éléments chimiques des échantillons étudiés

Corrélation	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO3	SO4	NO3	pH	T	Cdvt
Ca	1,000	-,020	,245	,117	,727	-,146	,264	-,063	,094	,181	,466
Mg	-,020	1,000	-,684	-,034	-,166	-,203	-,062	-,142	,121	,195	-,116
Na	,245	-,684	1,000	,271	,358	,233	,420	,363	-,063	,030	,701
K	,117	-,034	,271	1,000	,251	,236	,006	,391	-,350	-,267	,311
Cl	,727	-,166	,358	,251	1,000	,201	,327	,232	-,090	-,048	,568
HCO3	-,146	-,203	,233	,236	,201	1,000	-,004	,307	-,680	-,730	,300
SO4	,264	-,062	,420	,006	,327	-,004	1,000	,085	-,090	,040	,586
NO3	-,063	-,142	,363	,391	,232	,307	,085	1,000	-,467	-,282	,374
pH	,094	,121	-,063	-,350	-,090	-,680	-,090	-,467	1,000	,885	-,170
T	,181	,195	,030	-,267	-,048	-,730	,040	-,282	,885	1,000	-,012
Cdvt	,466	-,116	,701	,311	,568	,300	,586	,374	-,170	-,012	1,000

La représentation graphique de ces données, sous forme de cercle de corrélation (Figure 58a).et de nuage de points sur plan factoriel (Figure 58b.), a été réalisée par le logiciel SPAD (système portable d'analyse de données) développé par le CISIA (Centre international de Statistiques et d'Informatique Appliquées).

Cette représentation graphique a été réalisée avec un tableau de données initiales de trente et une (31) lignes (individus ou échantillons) et onze (11) colonnes de variables (caractéristiques chimiques et physiques de ces échantillons hormis les deux (02) destinées à leurs origines géographiques).

Le cercle des corrélations :

C' est un cercle de rayon 1 (comme le cercle trigonométrique), l'axe des abscisses représente le facteur 1 ou la première composante principale (axe de représentation maximale) et l'axe des ordonnées représente le facteur 2 ou la deuxième composante principale (la représentation y est très bonne mais de moindre importance que l'axe F1). À l'intérieur du cercle, les flèches qui partent du centre représentent les variables (concentrations minérales et caractéristiques physiques), elles sont plus ou moins grandes, et peuvent aller jusqu'à toucher le cercle, mais sans jamais le dépasser car en ACP les données sont toujours centrées.

La projection de ces flèches sur les deux axes représente leurs corrélations respectives au facteur 1 et au facteur 2. Les éléments dont les valeurs sont proches de 1 sont bien corrélés et ceux aux petites valeurs sont mal corrélés.

Les variables dont les projections sur l' un des axes sont opposés (l' une dans la partie positive et l' autre dans la partie positive) sont dits inversement corrélés ou anti corrélés sur cet axe.

Les individus ne sont pas visualisés sur le cercle des corrélations.

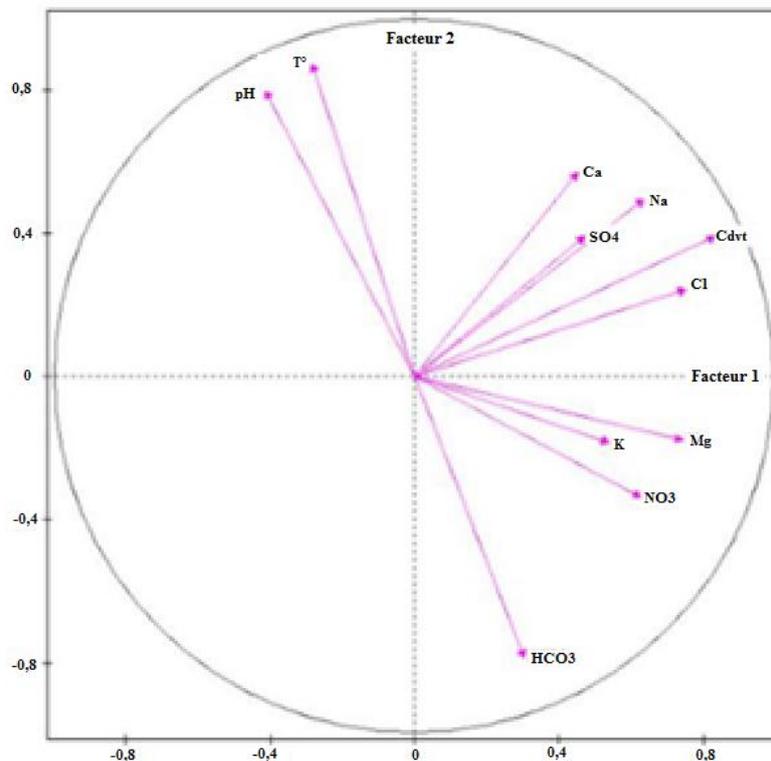


Figure 58a Le cercle des corrélations des composants chimiques des échantillons étudiés en ACP.

Interprétation :

De ce qui précède on peut dire que l'observation du cercle des corrélations permet de faire les constatations suivantes :

-La conductivité électrique (notée Cdv), avec presque de 0,86, est très bien corrélée avec le facteur 1 (ou composante principale F1) tandis que les bicarbonates, avec 0,315 y sont mal corrélés. La corrélation négative affichée par la température et le pH (dite aussi « anti corrélées ») c'est-à-dire que, l'évolution de ces éléments et celle de la composante principale F1 sont inversées, Quoique dans ce cas les coefficients de corrélation ne soient pas très forts ; (Respectivement -0,27 et -0,43).

– pour la composante principale F2 les corrélations des variables sont tout à fait différentes. La température, mal corrélée à F1, est très bien corrélée sur F2 avec un coefficient de corrélation qui dépasse 0,84 et le pH qui approche de 0,78. La conductivité très bien corrélée sur F1 est assez mal sur F2 avec un coefficient de 0,38. On observe aussi quatre éléments inversement corrélés dont les bicarbonates avec un coefficient très proche de - 0,78.

L'axe F1 dont la plus forte corrélation est celle de la conductivité électrique pourrait être apparenté à la salinité des eaux.

L'axe F2, sur lequel HCO_3^- est anti corrélé avec le pH et la température T° , pourrait être apparenté à l'alcalinité des eaux avec moins de rigueur (avec la présence du SO_4^{2-} et du Cl^- , même s'ils ne sont pas bien représentés et anti corrélés avec K^+ et Mg^+ , dans la partie des projections positives.).

Note : dans un espace $RnRn$ la détermination des corrélations entre deux variables initiales (flèches) peut se faire en calculant le cosinus de l'angle qui sépare les flèches qui les représentent mais le cercle étant une projection de l'espace $RnRn$ en $R2R2$, les angles précités sont déformés et inopérants. « **Le cercle de corrélations n'est pas prévu pour déterminer les coefficients de corrélation entre les variables mais entre les variables initiales et les composantes principales** ». La matrice des corrélations (Tableau 38) est mieux indiquée pour la corrélation des variables initiales.

Le nuage de points en ACP :

Le nuage de point en ACP est une représentation des individus, sur un plan factoriel, selon leur ressemblance (par les valeurs de leurs caractéristiques ou variables). Plus le nuage de points en 2 dimensions (dans le plan) paraît dispersé est mieux il représente le nuage de points de l'espace à n dimensions duquel il est projeté.

Les axes horizontal et vertical du plan sont les plus représentatifs des informations de l'ensemble analysé. L'axe horizontal est l'axe principal avec le maximum de fidélité descriptive et l'axe vertical est secondaire mais pas négligeable.

L'origine des deux axes est le barycentre de la projection des individus. Les variables ne sont pas représentées dans le nuage de points mais la relation (liaison) entre les individus, deux à deux, est estimée par la somme des carrés des distances entre les variables similaires des deux individus considérés.

La réalisation du graphe en figure 58b est basée sur un principe de distance entre les individus qui sont elles mêmes synthétisées à partir des distances entre leurs variables respectives.

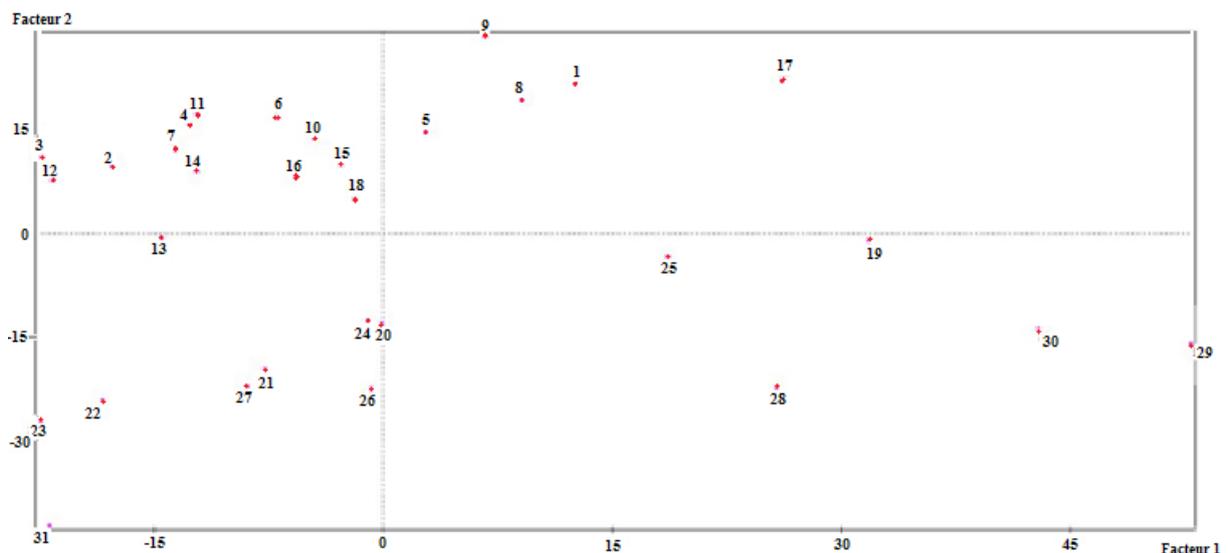


Figure 58b Projection du nuage de points sur le plan factoriel F1F2

Interprétation : De ce qui précède l'interprétation des résultats dans la figure 58b sera aussi basée sur les distances.

-On constate que les échantillons 20 et 24 sont très proches cela signifie que leurs dix variables sont aussi respectivement très proches (que leurs composition chimiques et leurs caractéristiques physiques

sont presque les mêmes) de même pour les échantillons 21 et 27, 3 et 12 et 11, 4 et 7. Par contre on observe une grande distance entre les échantillons 19 et 13 ou 29 et 23 ces individus sont opposés selon l'axe F1 qui est l'axe (premier axe) qui sépare au mieux les points ce qui voudrait dire que les échantillons 19 et 13 ou 29 et 23 sont très différents sur l'ensemble des variables (de compositions tout à fait différentes).

Le regroupement des eaux en groupes à compositions similaires conjugué à leurs positions géographiques pourrait être un indicateur efficace du confinement et des connections entre les milieux aquifères d'une zone d'étude.

V.3.3 Origine des éléments chimiques:

L'origine des éléments qui constituent les échantillons d'eau peut être déterminée par l'étude quantitative de leurs liaisons.

V.3.3.1. La corrélation entre les éléments spécifiques

La corrélation des éléments spécifiques et sa projection sur le graphe binaire ont été réalisées en utilisant le tableur Excel de Microsoft office (windows 7 pro).

- Le couple (Na⁺ et Cl⁻) :

Ces éléments sont essentiellement des indicateurs de dissolution de la halite dont ils seraient le produit selon l'équation : $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ $\log K = 1.52$ (Helegson 1969) in Zair N. (2009). Le graphe de corrélation de Na⁺ et Cl⁻ est montré en figure 59.

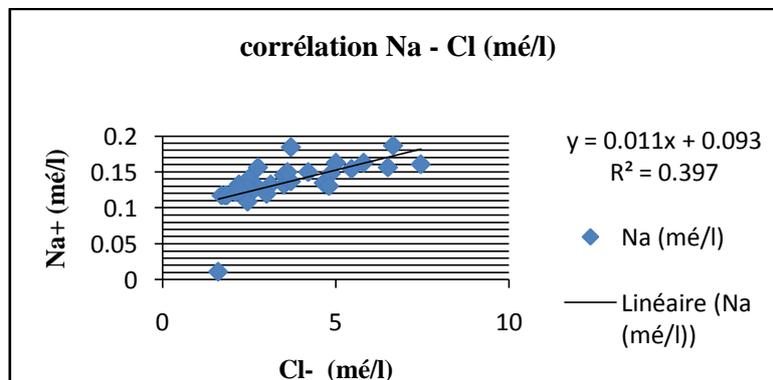


Figure 59 Graphe de corrélation de Na⁺ et Cl⁻

L'étude de l'évolution du sodium en fonction des teneurs en chlorure est due à la relation naturelle "Na⁺ Cl⁻" qui forme la Halite, très répandue dans presque tous les milieux et très soluble, qui aurait pu générer ces éléments. En outre ce couple est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites qui n'intervient pas dans les réactions d'oxydoréduction. Il est aussi très peu sensible aux bactéries.

La représentation graphique de l'évolution des teneurs en méq/l des éléments de ce couple (figure 59) affiche la répartition des ions Na^+ et Cl^- avec un coefficient de corrélation de 0.4 indique que l'halite est en partie à l'origine du faciès de ces eaux.

La représentation graphique de l'évolution des données du même couple sur une échelle logarithmique (figure 60) confirme la corrélation $0.397 \approx 0.4$.

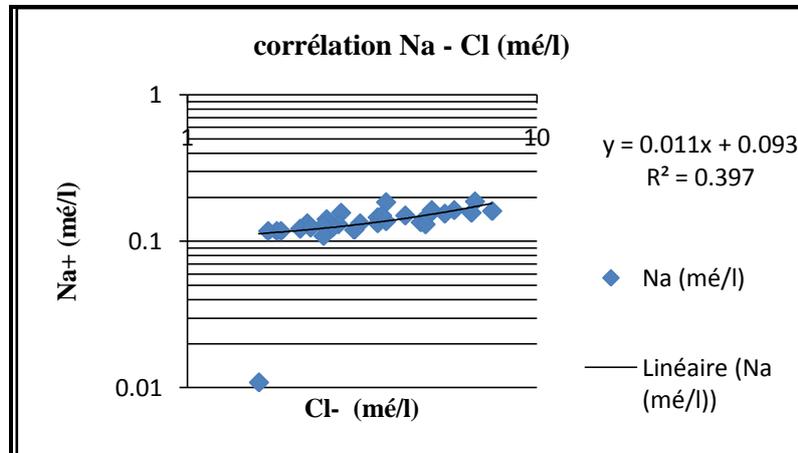


Figure 60 : Courbe de Corrélation des ions Na^+ avec les ions Cl^- sur échelle logarithmique

- Le couple Ca - Cl

La corrélation de Ca^{2+} avec Cl^- (figure 61) montre que le CaCl_2 (chlorure de calcium) peut être à l'origine de 39,7% de la concentration de ces deux éléments dans les eaux échantillonnées. La relative prédominance de l'élément Cl^- d'origine autre que le Na^+ et Cl^- et du faciès chloruré calcique peuvent s'expliquer selon deux possibilités :

- par la présence des argiles bordières et profondes qui encaissent presque la totalité de l'aquifère,
- par une présence plus accrue de couches gypsifères signalées au chapitre hydrogéologie ou d'éléments de Trias remaniés, en profondeur, comme ceux observés dans le terrain voisin de Ain Telidjene (J. M. Vila, 1993).

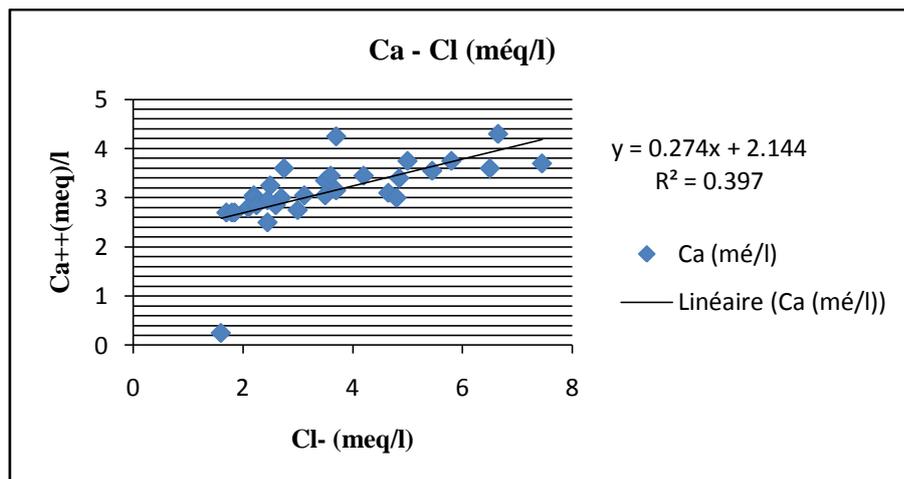


Figure 61 : Courbe de Corrélation des ions Ca^+ avec les ions Cl^-

- Les éléments Ca^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} :

La corrélation du calcium avec les sulfates n'a donné que de 7,5% (figure 62) et La corrélation du

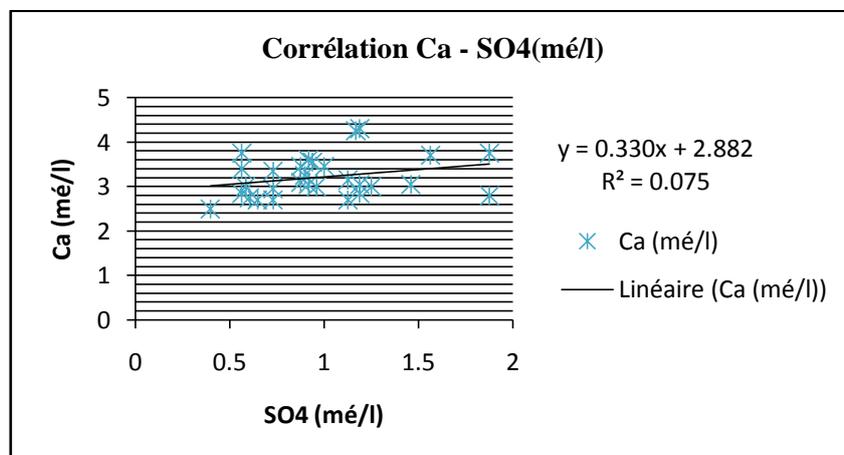


Figure 62 : Courbe de Corrélation des ions Ca^+ avec les ions SO_4^-

calcium avec les bicarbonates (HCO_3^-) est de 16,5% (figure 63). D'où une proportion de 67% de la

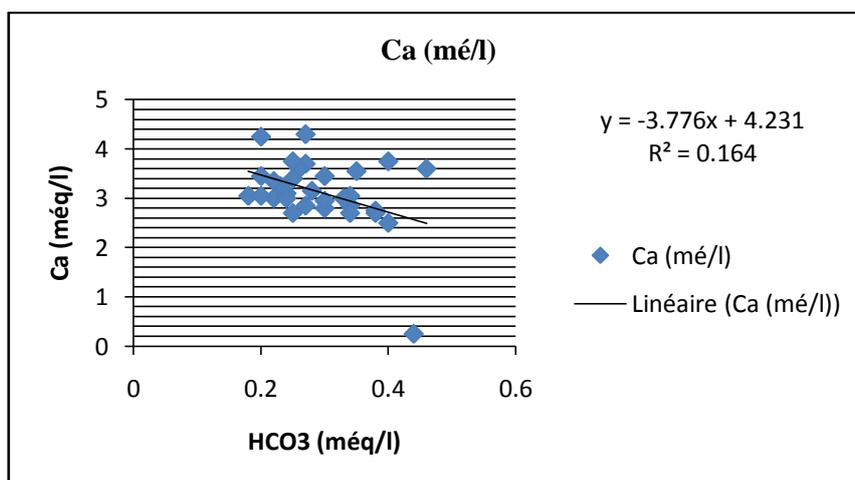


Figure 63 : Courbe de Corrélation des ions Ca^+ avec les ions HCO_3^-

totalité des ions Ca^{++} en présence serait couplée aux ions HCO_3^- , SO_4^- et Cl^- c'est-à-dire originaire principalement des calcaires de bordures et des gypses. Le reste pourrait être réparti entre les origines probables de la dissolution de la calcite (CaCO_3), de la libération de l'élément Ca^{++} lors de la dolomitisation des calcaires crétacés - albiens avides de magnésium (Mg^{2+}) (Hamad, 2018) et les graviers et blocs signalés surtout dans la partie ouest de l'aquifère.

V.3.4. Conclusion de la composition chimique:

L'étude hydro-chimique de la zone d'étude montre une situation complexe où les eaux souterraines d'une quarantaine d'échantillons, sont regroupées dans la zone des eaux chlorurées calciques malgré la différence de l'origine de leur minéralisation et les milieux relativement variés de leur évolution. Ce qui nous permet de dire que ces eaux sont régies par l'hydrogéologie plutôt que par la géologie du milieu. (Cloutier 2004, Cloutier 2006) un tel regroupement n'est observé que lorsque les échantillons sont divisés par formations litho – géologiques, surtout avec la caractéristique de nappe surexploitée qui élève la dynamique des écoulements souterrains à une échelle de brassage des eaux.

Tous les échantillons étudiés montrent la prédominance des éléments chimiques (Ca^{2+} et Cl^-) avec un faciès unique d'une eau chlorurée calcique.

L'origine de la salinité des eaux est due principalement à la présence des formations évaporitiques et à la dissolution des calcaires. L'influence de la masse argileuse qui constitue le substratum et les parois de la nappe ne peut être négligée.

V.4. Evaluation de la qualité de l'eau :

Les plus intéressantes caractéristiques de l'eau sont sa qualité et sa quantité. Elles déterminent son exploitation et peut réorienter le mode de vie locale et régionale.

V.4.1. L'aptitude à l'alimentation en eau potable (AEP) :

Pour estimer la qualité des eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod, les résultats des analyses chimiques des points d'eaux échantillonnés ont été confrontés aux normes nationales de potabilité éditées au JORADP du 2011 mis à jours en 2014 et 2020 et soumis au système d'évaluation de la qualité des eaux (SEQ-eau).

V.4.1.1. Le système d'évaluation de la qualité des eaux :

Le système d'évaluation de la qualité de l'eau (SEQ-Eau) aussi appelé « Normes de qualité des eaux et des masses d'eaux naturelles » a été approuvé par Directive du cadre eau européenne MEED et

agence de l'eau (2014). Ce système adopté par l'ABH (Agence des Bassins Hydrographiques) pour le constantinois, Seybousse et Mellègue (Touahria K. et Fatah S. 2014) et (Arab S. et al, 2019).

Le tableau n° 39 montre les marges de classification de la qualité des eaux par paramètre selon SEQ de l'eau.

Tableau 39 paramètres et marges de classification de la qualité des eaux selon SEQ - eau:

Détérioration par Minéralisation:					
Paramètres	Unités				
Conductivité	μS/cm	[180 – 400]] 400 – 2500]	<180 or] 2500 – 4000]	>4000
Chlorures	mg/l	<25	200	/	>200
Sulfates	mg/l	<25	250	/	>250
Détérioration par matières azotées sauf les Nitrates:					
Paramètres	Unités				
Ammonium	mg/l	<0,05	0,5	4	>4
Nitrites	mg/l	<0,05	0,1	0,7	>0,7
Détérioration par les Nitrates:					
Paramètres	Unit				
Nitrates	mg/l	<25	50	100	>100

Légende

Couleur	signification
	Eau potable : ne nécessite aucun traitement.
	Potable mais pourrait être améliorée par un traitement.
	Non potable sans traitement.
	Impropre à la consommation humaine même après traitement.

V.4.1.2. Résultats :

Le tableau 40 montre (en %) la distribution des 40 points d'eau échantillonnés sur quatre classes de qualité conformément aux exigences du système SEQ-Eau.

Observations : les nitrates, avec cinq points d'eau inaptes à la production d'eau potable et 8 autres impropres à la consommation humaine sans traitement préalable, sont pratiquement la cause d'altération de la qualité des eaux souterraines d'El Ma Labiod.

Tableau 40 : les points classifiés selon les normes du système SEQ-Eau.

Détérioration par Minéralisation:				
Paramètres				
Conductivité	/	100%	/	/
Chlorures	/	90%	/	10%
Sulfates	2,5%	97,5%	/	/
Détérioration par matières azotées sauf les Nitrates:				
Paramètres				
Ammonium	/	100%	/	/
Nitrites	95%	5%	/	/
Détérioration par les Nitrates:				
Paramètres				
Nitrates	22,5%	45%	20%	12,5%

Trois des quatre points d'eau qui apparaissent avec un taux élevé de chlorures font partie de ceux qui sont impropres pour cause de nitrates et le quatrième est un puits qui a une hauteur d'eau de moins d'un mètre au-dessus d'un substratum argileux.

Pour cela, la carte des concentrations des nitrates (figure 57) reclassifiées selon les marges SEQ-Eau peut être assimilée et être utilisée en tant que carte de la qualité des eaux.

V.4.1.3. Le nitrate:

- Définition : L'ion nitrate (NO_3^-) est naturellement présent dans l'environnement et l'eau en particulier, il est le produit de l'oxydation de l'azote, dans le cycle naturel. (Environnement Canada, 2003 ; Santé Canada, 2013).

Sa concentration dans l'eau est exprimée en ions (NO_3^-) ou en éléments d'azote (N) c'est-à-dire en (NO_3^-/L) ou en ($\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{L}$) avec 1 mg de NO_3^-/L qui équivaut à 0,226 mg de NO_3^-/L (Pfander et coll., 1993).

Sources : elles peuvent être naturelles ou anthropiques. L'oxydation de l'azote atmosphérique, les microorganismes dans les végétaux le sol et l'eau ou (dans une moindre mesure) les éclairs (OMS, 2007). Les activités anthropiques (engrais inorganiques et fumier) en sont les sources les plus importantes. On cite aussi le traitement des eaux usées, les rejets industriels, humains et animaux (Environnement Canada, 2003; OMS, 2007).

Les apports atmosphériques de nitrate varient beaucoup d'un endroit à l'autre. Le dépôt annuel total (sec et humide), a été estimé en Colombie-Britannique, à 192 mg/m² (McGreer et Belzer, 1999).

Evolution : L'évolution du nitrate dans le sol est régie par les précipitations (ou l'irrigation), la profondeur de la nappe aquifère, les matières organiques et les propriétés physico-chimiques des milieux traversés (OMS, 2007).

Dans le sol, la quantité de nitrates est réduite essentiellement par les végétaux et le surplus lessivé est transporté vers les eaux souterraines.

Dans la zone vadose, l'ion nitrate, considéré comme très mobile, porte une charge négative, n'est donc pas adsorbé sur les minéraux argileux ou les particules de matières organiques. (Environnement Canada, 2003; OMS, 2007).

Dans les eaux souterraines, les concentrations de nitrate sont influencées par plusieurs facteurs ; l'utilisation des terres, le type de sol, les conditions géochimiques et l'âge de l'eau souterraine (Dubrovsky et Hamilton, 2010).

L'azote résiduel dans le sol (ARS) se présente principalement sous forme de nitrate, lequel est facilement lessivé et entraîné vers les eaux souterraines (Environnement Canada, 2003; Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2010) où est observée une stratification des concentrations et les puits privés de moins de 30 m de profondeurs en affichent des valeurs plus importantes que celles des forages profonds. (Johnson et Kross, 1990; Ruckart et al., 2008).

V.4.2- L'aptitude à l'irrigation :

V.4.2.1. Méthode :

Pour connaître l'aptitude des eaux à l'irrigation, **la quantité de sodium adsorbé (SAR)** est calculée par l'équation suivante :

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}}$$

Les concentrations de Na⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺ sont exprimées en meq/l. Le SAR de chaque point d'eau est reporté sur les diagrammes de Wilcox et de Riverside en fonction de sa conductivité électrique. Les deux diagrammes d'aptitude à l'irrigation (figure 64.a.) et (figure 64.b.) ont été réalisés moyennant le logiciel « Diagramme ».

V.4.2.2. Résultats.

Ces diagrammes affichent (confirment) que la totalité des points d'eau sont situés en classe 3-faible1, pour Riverside et C3-S1 pour Wilcox et qu'ils ne présentent aucun danger d'alcalisation même s'ils affichent une salinité au dessus de la moyenne et cela surtout que les sols exploités ont une perméabilité qui varie entre très acceptable à très bonne.

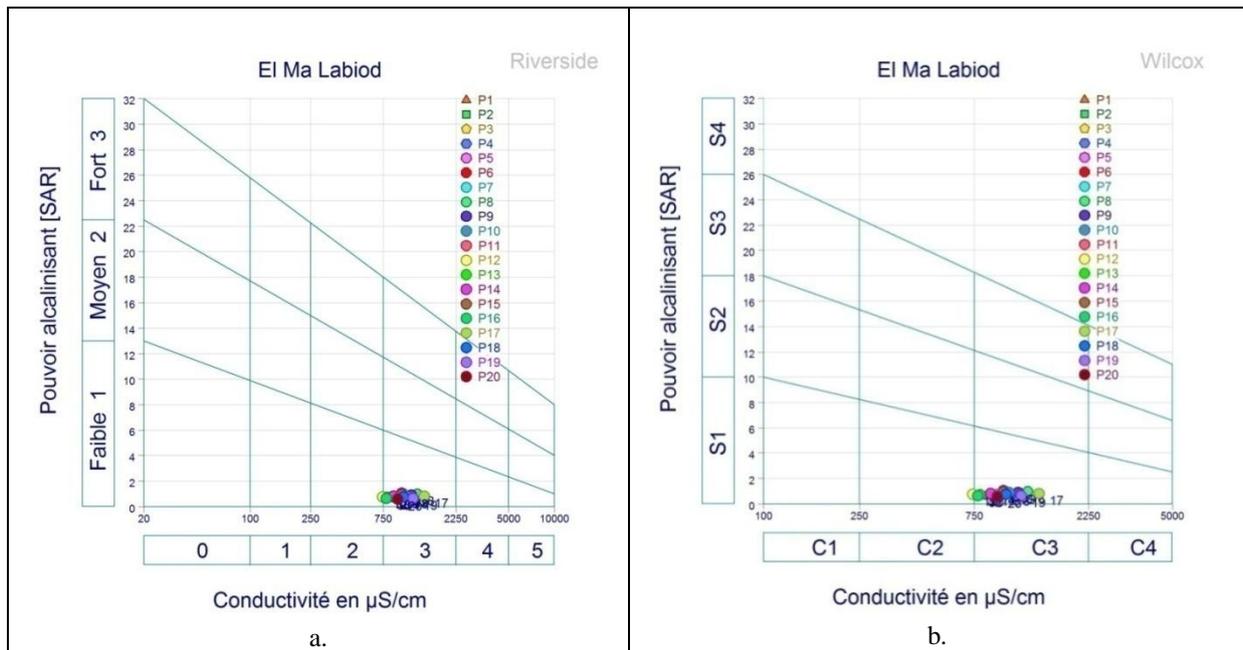


Figure 64 Aptitude des points d'eau étudiés à l'irrigation a. sur le diagramme de Riverside et b. sur le diagramme de Wilcox

V.4.2.3. Conclusion :

La qualité des eaux d'El Ma Labiod est en général assez bonne quoique pour la consommation humaine certains points d'eau sont à exclure (dans cette étude cinq) et des mesures curatives sont à prendre pour 8 autres points. Les causes de cet handicap sont les Nitrates et les chlorures or ce sont deux indicateurs de la contamination anthropique, vu la dynamique assez forte des écoulements souterrains induits par l'exploitation il suffirait d'un temps relativement court pour réduire les concentrations et sortir des marges proscrites. La représentation spatiale de l'aptitude à l'AEP peut être assimilée à celle des Nitrates.

La totalité des points d'eaux échantillonnés sont aptes à l'irrigation avec un SAR minimal.

Chapitre 6

Cartographie de la vulnérabilité et du risque de pollution des eaux souterraines

Introduction

Les besoins en eau ont augmenté de façon dramatique avec la croissance démographique et l'évolution des activités agricoles et industrielles (C S. Weather and al, 2010) et les eaux souterraines sont de plus en plus sollicitées (BRGM, 2002) elles ne sont, généralement, pas facilement contaminées, mais une fois leur qualité altérée, elle est difficilement restaurée. (W.S. Jang et al 2017). Les régions arides et semi-arides présentent des défis particuliers pour la gestion de l'eau. (Howard S. Weather and al, 2010). Le réarrangement des grains suite au retrait des eaux des milieux arides et semi-arides due à la compressibilité du milieu poreux entraîne une diminution de la porosité. (Dassargues, A., Monjoe, A., 1991). La gestion quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines est devenue aujourd'hui capitale. (Dassargues, A., Monjoe, A., 1992)

La prise de conscience de l'importance de cette denrée vitale impose de prendre des mesures de préventive dont la première est l'évaluation de sa vulnérabilité, son suivi et sa mise à jour périodique.

VI.1. Le concept de vulnérabilité

Historiquement, Le terme «vulnérabilité à la pollution des aquifères» a été inventé pour la première fois par Margat (1968), puis en 1987- 88, l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) suivie par l'Organisation mondiale et l'Organisation panaméricaine de la santé (OMS et OPS) qui ont donné un mode de gestion de cas en appliquant la méthode DRASTIC (Aller et al. 1987) et la méthode GOD (Foster 1987; Foster et Hirata 1988).

Le concept était de représenter la sensibilité d'un aquifère à être affecté en un point donné par la présence d'un contaminant à la surface du sol. (foster 2013).

Le concept de vulnérabilité à la pollution des aquifères forme une base utile pour la de protection de la qualité des eaux souterraines et relation impérative des hydrogéologues avec les secteurs de la protection de l'environnement et de la gestion des eaux et des terre.

Il conçoit aussi l'atténuation naturelle de cette contamination par les formations qui couvrent la masse d'eau souterraine tout en prévoyant l'application de contraintes d'utilisation des sols par l'administration si des mesures de lutte contre la pollution s'imposent.

Même si la «vulnérabilité à la pollution des aquifères» scientifiquement fondée elle ne peut être rigoureusement définie car:

Tous les aquifères sont vulnérables aux contaminants très mobiles et persistants (tels que les nitrates, très solubles dans l'eau et soutenus par l'apport agricole).

Un degré variable de protection naturelle de la nappe est imposée par les caractéristiques de la zone non saturée ; selon la texture et la structure de sa lithologie et les processus physico-chimiques qui y règnent (biodégradation, adsorption, dispersion, etc ...).

Bâti sur la base du processus d'atténuation lors du transport vertical des polluants, le concept de vulnérabilité des nappes est mieux adapté à la gestion de l'environnement et l'utilisation des terres. Avec des définitions bien appropriées de ses classes de vulnérabilité, il peut avoir une légitimité scientifique. Ces définitions doivent être significatives et assimilables pour ceux qui les interpréteraient pratiquement sur terrain pour éviter un risque spécifique de pollution des eaux souterraines.

Une classe de vulnérabilité doit être induite par une classe de contaminants et signifier une série de mesures de protection correspondantes à exécuter. Suivant cette approche, la définition, quatre nuances de vulnérabilité sont largement représentatives et la désignation d'un supplément de catégories sera sans effets pratiques si elles ne peuvent entraîner de nouvelles décisions relatives à l'utilisation des terres et à la gestion de l'environnement.

L'ajout de catégories de vulnérabilité sans définition pratique et claire serait plus néfaste qu'utile. (Foster et al 2013).

Ce n'est pas la complexité de la méthodologie de détermination d'une vulnérabilité qui rend l'évaluation des vulnérabilités à la pollution et les cartes qu'elle génère plus réalistes. En outre, plus la procédure d'évaluation de la vulnérabilité est complexe, plus elle risque de masquer la réalité et de rendre le subtil non discernable.

Il est évident qu'une meilleure compréhension hydrogéologique entraîne une meilleure application des méthodes de vulnérabilité à la pollution, Cependant, ces approches doivent être évaluées non pas par le nombre de paramètres qu'elles comportent mais selon leur capacité à intégrer, de la manière la plus simple et la plus sensible possible, les principaux paramètres qui contrôlent l'accessibilité hydraulique et la protection naturelle de la nappe.

Avant, toutes les méthodes de vulnérabilité à la pollution des aquifères classaient les terrains calcaires karstiques dans la gamme de vulnérabilité «extrême» sans autre considération.

La méthode EPIK (Doerfliger et Zwahlen 1997) est la première à être conçue spécialement pour les aquifères karstiques. D'autres méthodes de vulnérabilité comme celles dites de type COP ont été développées (Andreo et al.2006, 2009). Avec (C) pour concentration de la recharge, (O) pour la capacité d'atténuation des couches au-dessus de la nappe et (P) pour le régime de précipitation

individualisé de la recharge. Ces méthodes sont considérées comme très significatives pour affiner le diagnostic de la vulnérabilité à la pollution des aquifères karstiques.

Les cartes de vulnérabilité à la pollution des aquifères étant destinées à être utilisées de manière complémentaire avec les données sur la charge et la proximité des contaminants pour déterminer le risque de pollution des eaux souterraines, il faudrait noter que lors de l'évaluation du risque de pollution, l'aspect de l'aléa (la charge en contaminants) est plus difficile à définir, particulièrement en zone de faible vulnérabilité où un effort particulier est toujours nécessaire. (Foster et al.2007).

VI.1.1. Les méthodes d'évaluation de l'Indice de Vulnérabilité des Eaux Souterraines

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines sont classées en trois catégories: Les méthodes de superposition et d'indexation, les modèles déterministes (processus physiques); et les méthodes statistiques (Mogaji, K.A. et al 2014). Le concept de vulnérabilité de l'aquifère implique principalement deux types de vulnérabilité : intrinsèque et spécifique (Gogu R.C. et Dassargues A. 2000). La méthode Drastic et la méthode GOD sont toutes les deux des méthodes de superposition et d'indexation de vulnérabilité intrinsèque (Aller et al, 1987), (Foster et al, 1995).

L'objectif de cette étude est d'établir une carte actuelle de vulnérabilité des eaux souterraines dans la plaine d'El Ma Labiod, en appliquant la méthode DRASTIC. (Aller and al 1987) La carte résultante de l'indice de vulnérabilité drastique sera confrontée à la carte d'index de vulnérabilité obtenue par la méthode GOD. (Foster and al, 1987)

Comme un complément de données hydro-chimiques ajouté aux données de vulnérabilité donnerait des résultats plus réalistes (Deeksha Katyal and al, 2018) et que les nitrates, les sulfates et les chlorures sont utilisés comme indicateurs de l'impacte des activités humaines sur la qualité de l'eau (René Alberto and al 2014), les deux cartes d'indices sont confrontées à la carte actualisée des concentrations de nitrates dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

VI.1.3. LA METHODE DRASTIC

La méthode DRASTIC est une méthode de superposition et d'indexation, ses paramètres, au nombre de sept sont dotés chacun d'un poids et notés entre 0 et 10 selon que leur état retarde ou facilite le déplacement du polluant de la surface du sol à la table d'eau. DRASTIC est l'acronyme formé par les initiales des sept paramètres requis (Aller et al, 1987) :

- D pour la profondeur à la nappe phréatique,
- R pour la recharge nette,

- A pour les milieux aquifères,
- S pour les médias sol,
- T pour la topographie,
- I pour l'impact de la zone non saturée et
- C pour la conductivité hydraulique.

Elle a été finalisée par Aller et son équipe de recherche pour US EPA en 1987 (schnebelen, 2002) [12] et depuis lors elle n'a cessé d'être utilisée à travers le monde: au Canada (V. Murat et al 2003), au Maroc (Sinan et al 2003), Portugal (Stigter, TY et al 2006), en Chine (You-Hailin 2011), en Italie (G. Bartzas, et al 2015), en Jordanie (Alsharifa Hind 2016), et quelques fois en Algérie (RM Mohamed. 2001) , (Benchekri 2008), (Rouabhia 2006.), (Adjim M. et Bensaoula F. 2013), (Miguel Edilásio et Paim Paulo, 2015.), (Ilhem Abdesselam, 2017) et beaucoup d'autres utilisations à travers le monde. La méthode DRASTIC a été utilisée seule (Anane et al., 2013) ou avec une autre méthode; (Gouaidia Layachi et al., 2011, couplée à la méthode GOD, Mouhcine Batchi, 2017, couplée à la méthode SI), ou à d'autres méthodes, telle qu'elle a été conçue ou modifiée; en nombre de paramètres (Vias et al., 2005, en tant que DRATIC, sans le paramètre de sol, couplé aux méthodes GOD, AVI et EPIK dans une étude d'un aquifère carbonaté) ou en variant les estimations des paramètres (r) et leurs poids (w) (Majed Ibrahim, Barbara Koch, 2015), avec un système flou (Dhundi Raj Pathak, 2009) ou avec l'utilisation des sols (René Alberto et al, 2014, Ilhem Abdeslam et al, 2017) ou avec de nouvelles valeurs des poids (Sbargoud Saida, 2017) et plusieurs autres combinaisons.

DRASTIC est l'une des méthodes de superposition les plus utilisées pour calculer l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines sur de larges étendues géographiques où évoluent une variétés de caractéristiques hydrogéologiques. (Dhundi Raj Pathak and Akira Hiratsuka, 2009).

VL1.4. LA MÉTHODE GOD

Le système de notation GOD est une méthode empirique d'évaluation rapide de la vulnérabilité qui utilise trois paramètres notés et non pesés (Andrzej J. et al 2004). Elle a été finalisée par Foster en 1987 au profit de l'OMS à travers la division « santé et environnement » (HPE) à Lima (Pérou). (Foster 1995).

GOD est l'acronyme formé par les initiales des trois paramètres requis. Cette méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines estime la sensibilité des aquifères et des aquitards (Foster 1987). Ses paramètres sont:

- "G" pour le type d'aquifère,
- "O" pour la lithologie de la zone non saturée et
- "D" pour la profondeur à la nappe phréatique (Najat Knouz, 2017).

Ces paramètres sont notés de 0 à 1 selon leur participation à faciliter la progression du polluant vers la table d'eau.

Cette méthode considère le sol et la zone non saturée sans tenir compte des processus de transport dans la zone saturée (S. Takizawa 2008). La description de ces paramètres, la manière de les noter et la formule de calcul de l'indice de vulnérabilité "GODindex" sont résumés fig.5 (Foster 1995).

La méthode GOD est également largement utilisée; seule (Najat Knouz, 2017), (N. Boualla 2017) ou couplée avec d'autres méthodes comme (J. M. Vias et al 2004) .

Les décideurs et les gestionnaires des terrains devraient s'appuyer sur les cartes de vulnérabilité des eaux souterraines (Majed Ibrahim, Barbara Koch 2015) car c'est un outil qui permet au District d'évaluer facilement les impacts potentiels sur leur qualité quant à l'utilisation futurs des terres. (Ilhem Abdeslam et al, 2017).

VI.2. METHODOLOGIE

VI.2.1. Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité:

VI.2.1.1. la méthode DRASTIC:

La carte de l'indice de vulnérabilité DRASTIC (DVI) est obtenue par addition, cellule par cellule, des cartes des paramètres notés multiplies par les poids respectifs, formule (1) :

$$DRASTICindex = Dr * Dw + Rr * Rw + Ar * Aw + Sr * Sw + Tr * Tw + Ir * Iw + Cr * Cw$$

ou:

$$DVI = \sum_{n=1}^7 (r_i w_i) \quad (1)$$

où:

- $i \in \{D, R, A, S, T, I, C\}$; évolue dans l'ensemble des sept paramètres.
- r et w sont respectivement la note et le poids appliqués à chacun des paramètres dans chaque espace représenté par le point mesuré, la première, de 1 à 10, évalue la qualité du paramètre à faciliter l'évolution du contaminant vers la nappe et le second, de 1 à 5, est attribué par les auteurs à chaque paramètre selon son importance dans la formule du DVI dès sa conception.

L'indice de vulnérabilité DRASTIC (DVI) peut valoir de 28 à 226. Cet intervalle est partagé en cinq classes ; objet du tableau 41. (Aller and al, 1987).

Tableau 41: les cinq classes de l'indice de vulnérabilité DRASTIC avec leurs intervalles de valeurs. (in Gouaidia L.2004)

Indices de vulnérabilité De la méthode DRASTIC	Classes de vulnérabilité
< 75	très faible
75-100	Faible
100-125	Modérée
125-150	Haute
150-200	très haute

VI.2.1.2. Laméthode GOD:

l'indice final, GODindex, de vulnérabilité par la méthode GOD, est obtenu en multipliant entre elles, cellules par cellules, les valeurs des cartes des trois paramètres notés, formule (2) (Foster 1995) . Sa carte est présentée en figure 70b.

$$GODindex = cG . cO . cD$$

où: cG, cO et cD sont les notes respectives assignées au paramètres G, O et D.

VI.2.2. acquisition des données:

Les données de base ont été acquises chacune à sa source:

LA PROFONDEUR A LA TABLE D'EAU ; "D" a été directement mesurée sur terrain avec une sonde piézométrique et ses valeurs compilées sur Excel.

LA RECHARGE NETTE ; "R" a été calculée à partir du bilan hydrique de la zone d'étude à partir de ses climatiques des quatre décennies (1975–2015) à partir des stations d'El Ma Labiod et de Tebessa par combinaison de la formule Tixeront - Berkaloff et celle de la balance hydrique de Thornthwaite, formule (3) (Roubhia A. 2006), (Boucenna F. 2009) :

$$R = P - ETR - \frac{P^3}{3.(ETP)^2}$$

avec:

- R = recharge nette annuelle,
- P = précipitations,
- ETP = évapotranspiration potentielle et
- ETR = évapotranspiration réelle.

LA ZONE SATURÉE ET LA ZONE NON SATURÉE ; séparées par le niveau de la nappe, "A" et "I" ont été évaluées selon leurs lithologie, conformément aux tableaux respectifs établis par les auteurs (Aller and al 1987) après l'étude de la carte géologique, des logs de forages et des puits (données ANRH et DW) et les coupes géo- électriques. (UGF BRNO 1971) .Les résultats ainsi établis pour chaque Ai et Ii sont reportés sur un tableau excel sous forme de couplet (Aiw – Air) et (Iiw – Iir) où Aiw et Iiw sont les notes respectives pour les points i de la zone saturée et les points de la zone non saturée et Air et Iir leurs poids. Le tableau qui résume la lithologie des forages est en annexe K.

LA NATURE DU SOL ; " S " a été directement estimée sur terrain appuyée par les schémas d'occupation des sols (Sub-Division d'Agriculture Locale). Les résultats ainsi établis pour chaque Si sont reportés

sur un tableau excel sous forme de couplet (Siw – Sir) où Siw et Sir sont respectivement la note et le poids du point i.

LA TOPOGRAPHIE OU CARTE DES PENTES ; “T” a requis le téléchargement des données avec altitudes de la zone d’étude. Ce qui a été fait avec le logiciel global mapper-v18 depuis le site « STRM GDEM v2 worldwide elevation data (1 arc-second resolution) » et l’exportation vers la base de données de l’arcgis sous extension « shapefile » de la carte du MNT de la zone d’étude après sa dotation de courbes de niveau de 50 m d’équidistance. (Global mapper-v15 tutorial).

Ces données tridimensionnelles ont aussi permis la détermination des bassins versants et du système de drainage de la plaine d’El Ma Labiod ainsi que l’extraction de la limite de la zone d’étude.

LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE “C” a été déterminée par teste de 12 échantillons prélevés sur les matériaux (cuttings) extraits de nouveaux forages avec un perméamétrie à charge variable (Binod Tiwari, PhD, 2008) et autres points considérés représentatifs.

Les résultats ont été confrontés aux notes de « C » des cas étudiés dans le livre de Aller (1987) particulièrement “high plain, alluvial plain, mountains valley et sand dunes” qui présentent des caractéristiques lithologiques et hydrauliques proches.

Selon leurs profondeurs estimées, au-dessus ou au-dessous du niveau de la table d’eau, ces données ont servi à confirmer l’estimation des paramètres “T” et “A”.

LES COORDONNEES DES POINTS D’EAU ET AUTRES POSITIONS UTILES ONT ETE déterminés avec le GPS personnel Garmin “nüvi”, confirmées par l’image satellitaire téléchargée du site "popular sources" et reportée sur une carte au 1 / 50.000th. La Figure. 4 montre le système de drainage et les positions des puits et des forages visités de la zone d’étude.

Les données de base des paramètres sont les mêmes que celles déterminées pour la méthode DRASTIC qu’elles soient mesurées comme « D » ou déduites des mêmes observations sur terrain ou des études antérieures comme « G » et « O ». Après leur notation conformément aux tableaux établis par les auteurs de la méthode GOD (Figure 66), les données sont compilées sous Excel et cartographiées suivant les étapes de la figure 67b

VI.2.3. exploitation des données:

vu l’importance des unités SI aussi bien pour la science que pour la technologie, (Ambler Thompson and Barry N. Taylor, 2008) toutes les unités dans les tables d’Aller ont été converties au système international “metric weight and measure system” avant leur exploitation.

POUR LES SIX PARAMETRES D, R, A, S, I ET C, les données collectées ont été compilées sous Excel, puis notées (Aller and al, 1987), et interpolées par « IDW inverse distance weighted ». les rasters résultant ont été coupés à travers les limites du bassin versant. (Arcgis 10.* tutorial) déterminées avec global mapper v18 (Global mapper v15 tutorial.).

LE PARAMETRE “T” OU CARTE DES PENTES a été directement dessinée par la fonction “slope” ou pente de « 3D analysis d’Arc map » à partir du MNT « TIN » exporté par global mapper v18 avec extension shapefile. Le raster résultant est coupé à travers les limites de la zone d’étude. (Arcgis 10.* tutorial).

The meridians and parallels data, required to limit the wanted area download (image and elevation data map), were extracted from the topographic map of El Ma Labiod sheet n° 235 (ING, 1950).

L'image satellite a également permis la précision des coordonnées des points d'eau et la découverte de points inconnus spécifiquement dans les limites de la zone aquifère. Le tableau 42 montre les données, leurs sources et le processus pour réaliser chacune des sept cartes de paramètres.

Tableau 42: les données pour évaluer les paramètres Hydrogéologiques du modèle DRASTIC.

No.	Couches	Données	Sources	Processus
1	(D) Profondeur jusqu'à l'eau	Niveau de l'eau	Field direct measure with piezometric probe	Unites des tableaux converties en unites SI.
2	(R) Recharge	Données météorologique	Données ANRH Tébessa	Extraite du bilan hydrique
3	(A) Zone saturée	Rapports Géophysiques, Logs des puits/ forages et échantillons solides.	Terrain et données ANRH Tébessa	étude et notation du profile
4	Sol (S)	Types d'affleurements	terrain, carte géologique, image satellite.	Notation directe
5	Topographie (T) (pente)	MNT avec courbes de niveau	Carte topographique carte 3D satellite, GM v18	(fonction "slope" de 3D analysis) Arcgis 10.3.1
6	Impacte de la zone non saturée (I)	Rapports Géophysiques, Logs des puits/ forages et échantillons solides.	Terrain et données ANRH Tébessa	étude et notation du profile
7	Conductivité hydraulique (C)	Logs des puits/ forages et échantillons solides.	- Terrain (échantillons) - labo (permeamètre à CV) - Tables de conductivité.	-Applied formula Hydraulic conductivity: $C = 2,3al \frac{\log(h_0/h_1)}{At_1} * (4)$

* t_1 est le temps nécessaire pour que le niveau de l'eau passé de "h0" à "h1" dans le tube de diamètre "a" à travers le cylindre de diametre "A" et d'épaisseur "l".

LA CARTE DE L'INDICE DE VULNERABILITE DRASTIC a étéobtenue en appliquant la formule (1) sur les cartes des paramètres notés comme en formule:

$$mDRASTICVIndex = 5mDr + 4mRr + 3mAr + 2mSr + 1mTr + 4mIr + 3mCr \quad (5)$$

Où: *m* est utilisé pour les éléments cartographiés "mapped item".

Les cartes des paramètres pesées sont additionnées, cellule par cellule, conformément au modèle DRASTIC (Aller and al, 1987). En utilisant la fonction "Raster calculator" à travers "map algebra" dans "spatial analyst tools" d'Arcmap 10.3.1. (Arcgis 10.* tutorial). Le diagramme opératoire est présenté en Fig. 67a. Le tableau 43 montre les marges des valeurs des paramètres DRASTIC notés et pesés.

LA CARTE DE L'INDICE DE VULNERABILITE GODINDEX: les paramètres de la méthode GOD ont été mesurés ou évalués, notes conformément aux tableaux établis par l'auteur (Foster, 1995) et multipliés entre eux (Figure 66). Les données notés ont été interpolées avec la fonction « inverse distance weighted » in Arcgis 10.3.1. (Arcgis 10.* tutorial). La carte de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines a été créée en appliquant la formule (2) dans "raster calculator" (Arcgis 10.* tutorial). Le diagramme opératoire est présenté en figure 67b et la figure70b montre la carte de l'indice de vulnérabilité GODindex.

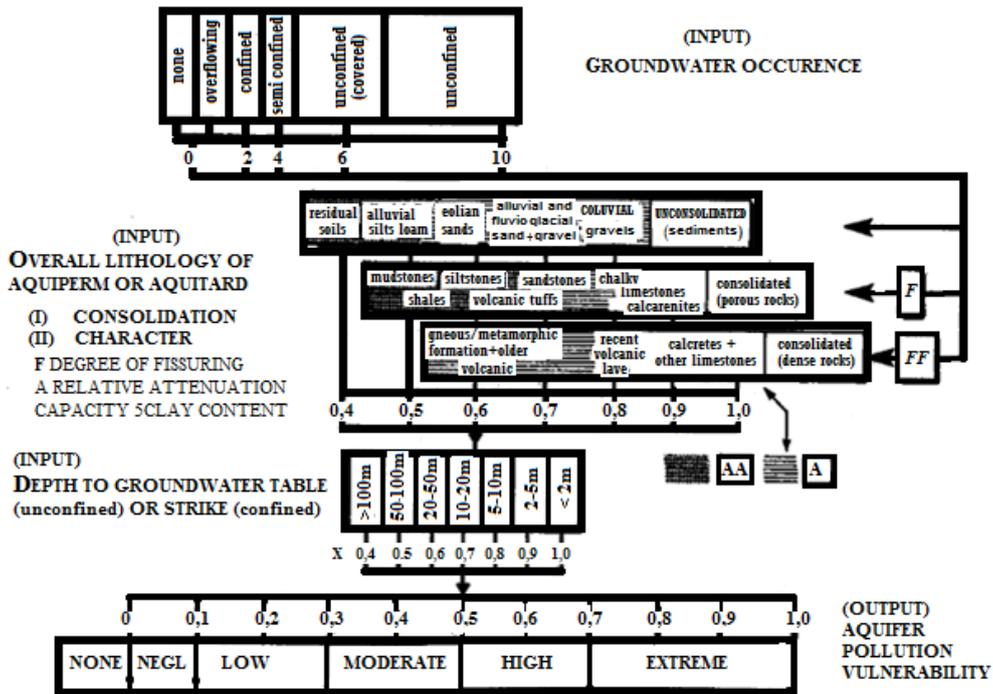


Figure 18

GOD SYSTEM FOR EVALUATION OF AQUIFER VULNERABILITY INDEX
(after Foster, 1987)

Figure.66: la méthode GOD pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, in (Foster 1995).

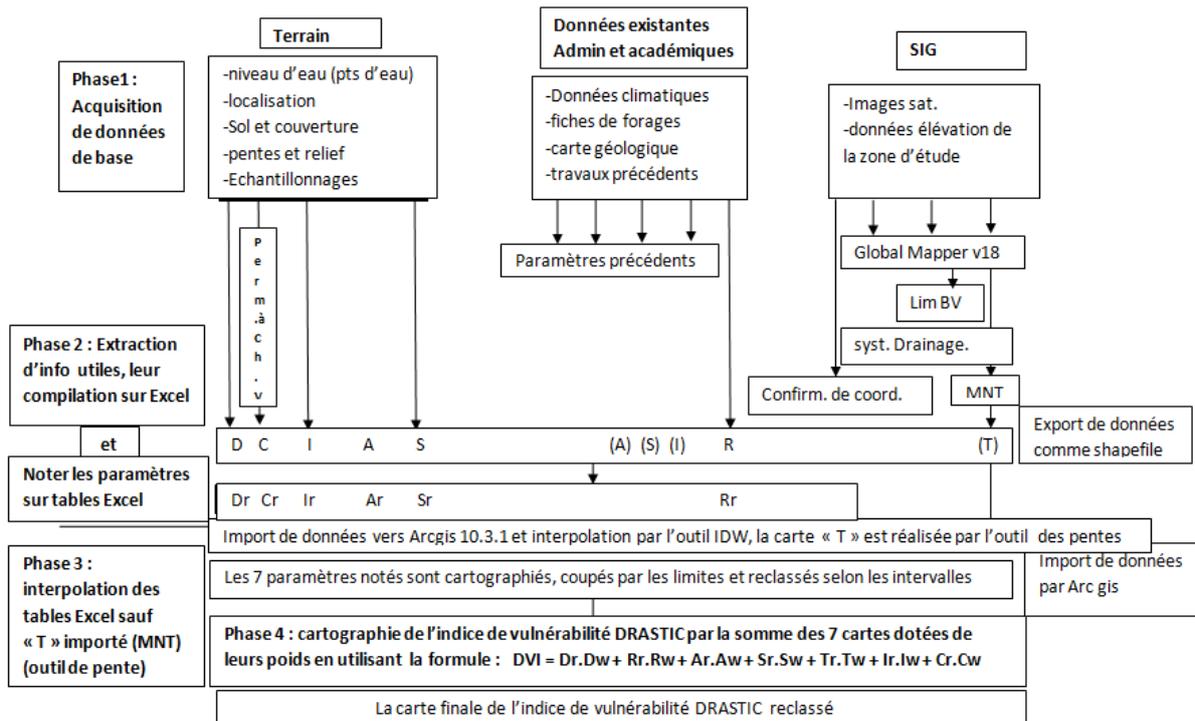


Figure 67a: Diagramme de réalisation de la carte de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines (GVI) par la méthode DRASTIC

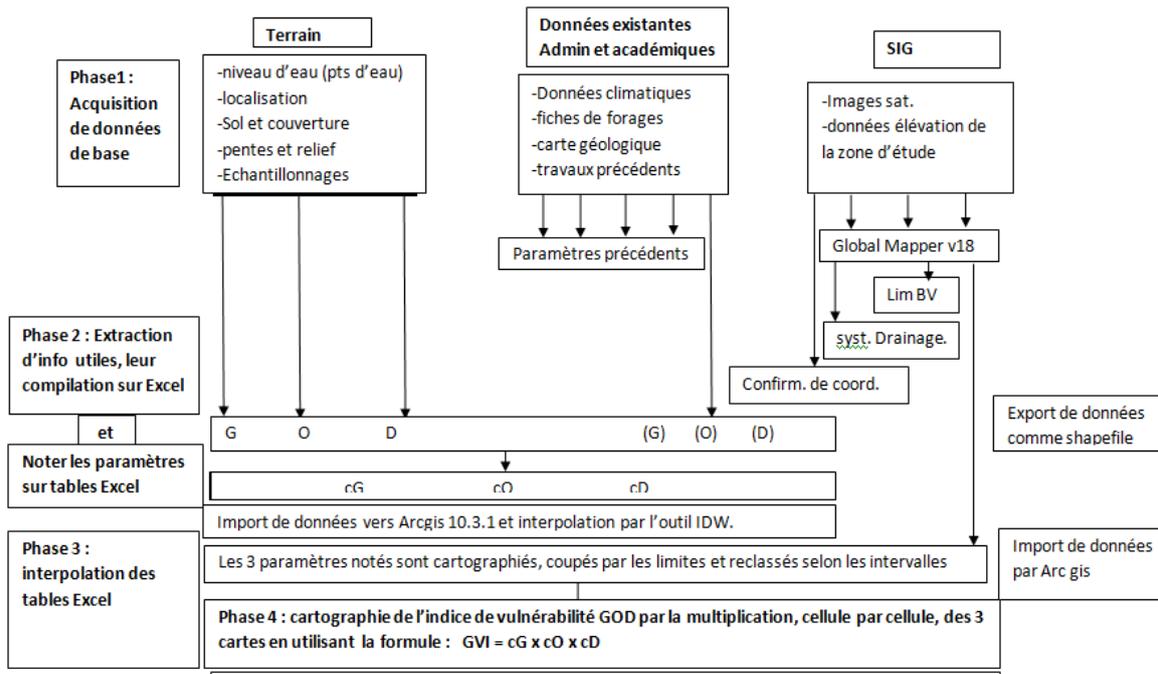


Figure 67b: Diagramme de réalisation de la carte de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines (GVI) par la méthode GOD.

VI.3. Résultats et discussion

Les résultats portent sur la cartographie des paramètres des deux méthodes ainsi que leurs indices de *vulnérabilité respectifs.

VI.3.1. Les paramètres de la méthode DRASTIC :

Les sept paramètres induisent sept cartes préparées en utilisant Arcmap 10.3.1 et la huitième est celle de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines (GVI) établi par la méthode DRASTIC. (Figures 68a. à 68g).

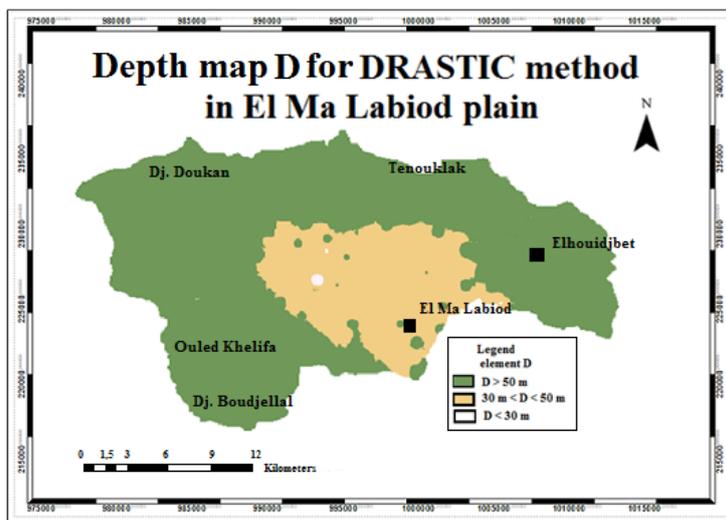


Figure 68a. Carte de la profondeur de l'eau

VI.3.1.1. profondeur a la table d'eau « D »

La carte de la profondeur de l'eau (figure 68a.) a été dessinée à partir des données de 40 puits et forages pour la période 2015-2016 spatialement interpolées avec l'outil IDW (Arcgis 10.* tutorial). La valeur de la profondeur à l'eau varie dans les points d'eau mesurés entre 28,6 m à 82,8 m avec une valeur exceptionnelle de 18 m. 88,5% des points mesurés sont hors norme pour DRASTIC (> 30,4 m) et notés « 1 » (Aller et al 1987). On observe deux classes notées 1 et 2 assez peuplées et une troisième notée « 6 » avec un seul élément (18m).

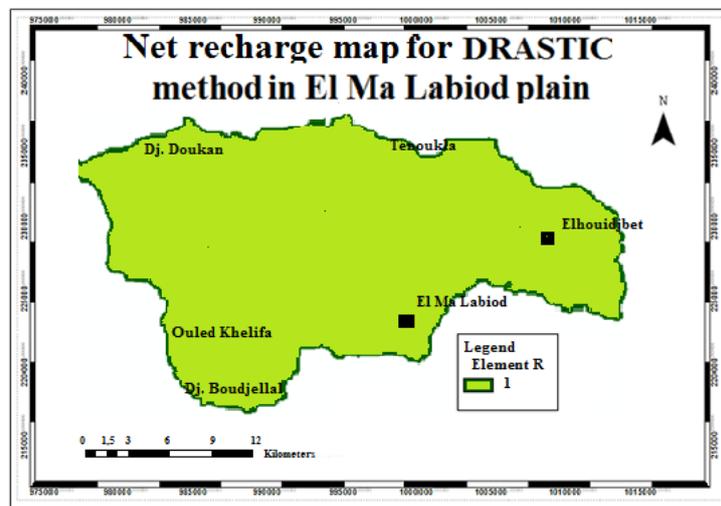


Figure 68b. Carte de la recharge de la nappe

VI.3.1.2. La recharge nette « R »

La carte de la recharge de la nappe (figure est uniforme vu que zone d'étude ne dispose que d'une seule station météorologique. La très faible valeur de recharge nette (10 mm / an) notée « 1 » dans toute la zone d'étude est la même que celle citée dans les travaux précédents. (Rouabhia A 2006) et (Djebbouri 2011). La carte de recharge nette est montrée en figure 68b.

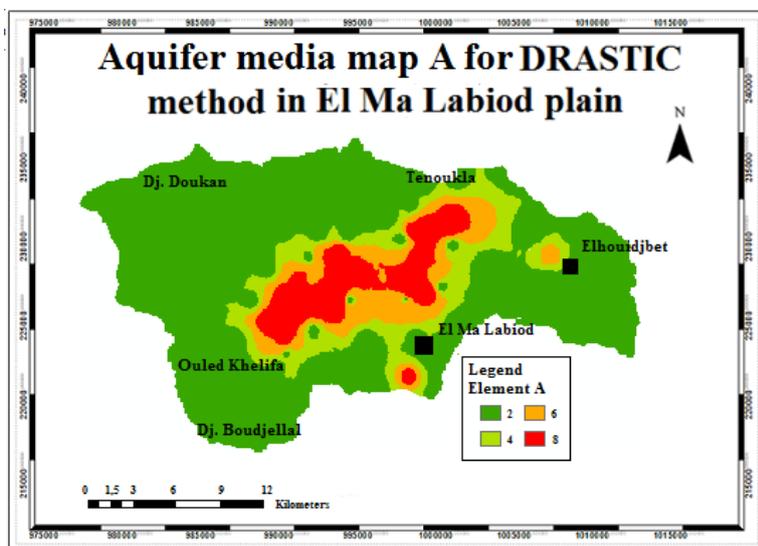


Figure 68c. Carte de la zone saturée

VI.3.1.3. la zone saturée “A”

Les données pour réaliser la carte relative à la zone saturée “A” ont été extraites des fiches de forages (données ANRH et DEW) et l'étude de matériaux issues de quelques nouveaux trous de forages.

La zone saturée est constituée de sable et de grès argileux et occupe le centre de la plaine a été notée 8 et 9 tandis que les bordures à pentes modérée d'argile sableuse (non aquifère) est notée « 1 ». La carte du paramètre "A" du milieu aquifère de la plaine El Ma Labiod est représentée en Figure 68c.

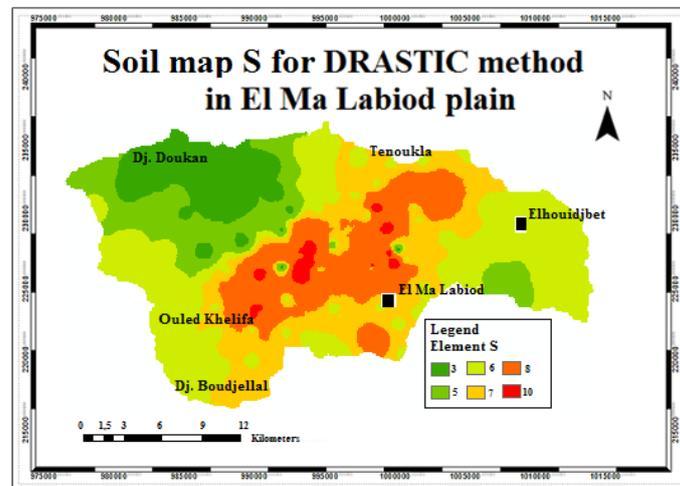


Figure 68d. Carte de la conductivité hydraulique

VI.3.1.4. le Sol « S »

Les éléments étudiés montrent pratiquement deux types de sols: le premier avec des tendances sableuses au centre et à l'est de la plaine avec des dunes de sable peu couvertes, le second avec des tendances graveleuses sur les bordures et la partie ouest de surface exploitée. Mais tous sont relativement élevés (6 à 10). La zone agricole utilisée est recouverte d'un sol limono-sableux argileux. La carte des sols est en Figure 68d.

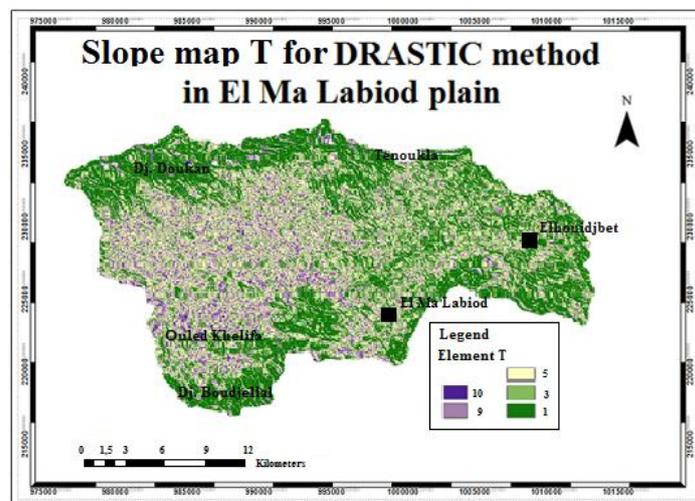


Figure 68 e. Carte des pentes (Topographique)

VI.3.1.5. Topographie ou la carte des pentes « T »

La carte du paramètre “T” (Fig.68e) montre des pourcentages de pentes qui varient entre 0% et 6% autour de l’axe centrale de la plaine (NE – SO). Généralement, la classe de pentes 0% à 2% est observée dans la partie Ouest de la zone d’étude et tandis qu’à l’Est les classes 0% à 2% et 0% à 6% ne peuvent être discernées à cause des dunes de sable clairsemées en cette zone. Les valeurs entre 6% et 12% sont observées aux abords des contacts Nord et Sud avec les formations carbonatées dont les versants qui atteignent et parfois dépassent les pentes 18%.

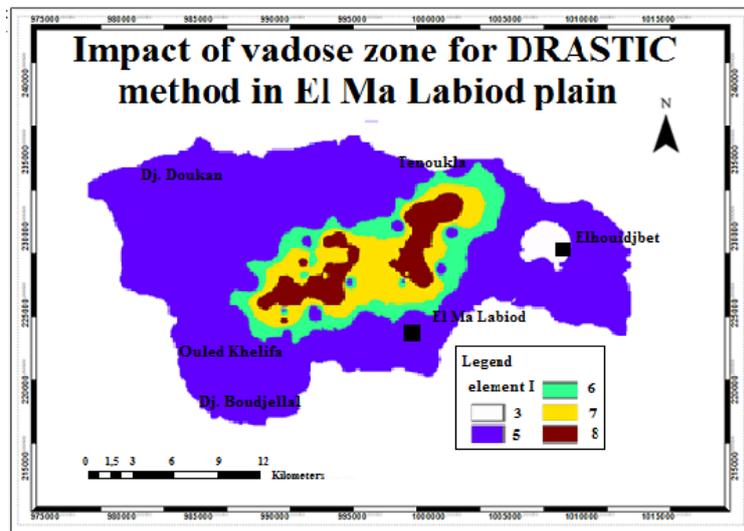


Figure 68f. Carte de l’Impacte de la zone non saturée

VI.3.1.6. Impacte de la zone vadose « I »

La carte du paramètre « I » de l’Impacte de la zone non saturée est en figure 68f. la plupart des terrain de la zone d’étude sont formés de sable de grès argileux et de graviers, ils ont été notés relativement haut (6 to 8).

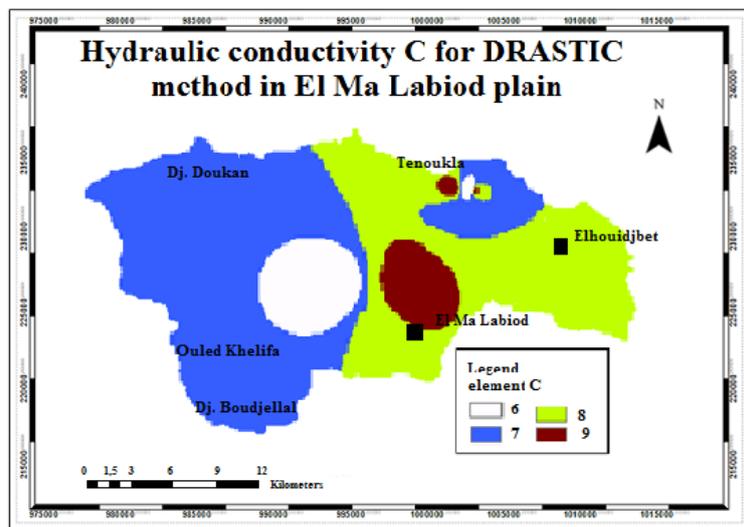


Figure 68g Carte de la conductivité hydraulique

VI.3.1.7. Conductivité Hydraulique

La carte du paramètre « C », conductivité hydraulique, divise la zone d'étude en deux parties l'une à l'Est avec des dunes de sable et l'autre à l'Ouest avec une composition plus argileuse. Les deux milieux ont affiché des valeurs entre $1.89.10^{-5}$ m/s à $8.89.10^{-5}$ m/s et ont été notés 1 et 2.

Deux, relativement, petites aires avec des valeurs extrêmes sont aussi observées; les valeurs minimales dans le Campanien carbonaté non compacte, vers $0,13.10^{-5}$ m/s notée 1 et les valeurs maximales avec 65.10^{-5} m/s dans des sables, probablement lessivés par un pompage excessif prolongé notée 6. La carte du paramètre « C » est représentée à la figure 68g.

Tableau 43 Les marges des valeurs des paramètres DRASTIC notés et pesés

Elements	Valeurs et classes	Notes	Notes et pesés
profondeur "D"	18 – 30,5m et $d > 30,5$ m	1 – 6	5 à 30
Recharge nette "R"	10 mm/y	1	4
Zone saturée "A"	Sables, graviers, grès argileux, marnes et calcaires.	6 à 10	9 à 30
Sol "S"	fin, sableux, graviers et argiles.	7 à 10	14 à 20
pentés "T"	0 - 18 %	3 à 10	3 à 10
Zone non saturée "I"	Sables, graviers, grès argileux, marnes et calcaires.	7 à 10.	28 à 40
Conductivité hydraulique "C"	$(0.13 \text{ à } 65) * 10^{-5}$ m/s	1 à 6	3 à 24

VI.3.2. Les paramètres de la méthode GOD

Les paramètres de la méthode GOD ont été déterminés et cartographiés par par similitude aux paramètres de la méthode DRASTIC selon les diagrammes en, figures 66a. et 66b.

Les trois paramètres induisent trois cartes préparées en utilisant Arcmap 10.3.1 et la quatrième est celle de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines (GVI) établi par la méthode GOD. (Figures 69a. à 69C.).

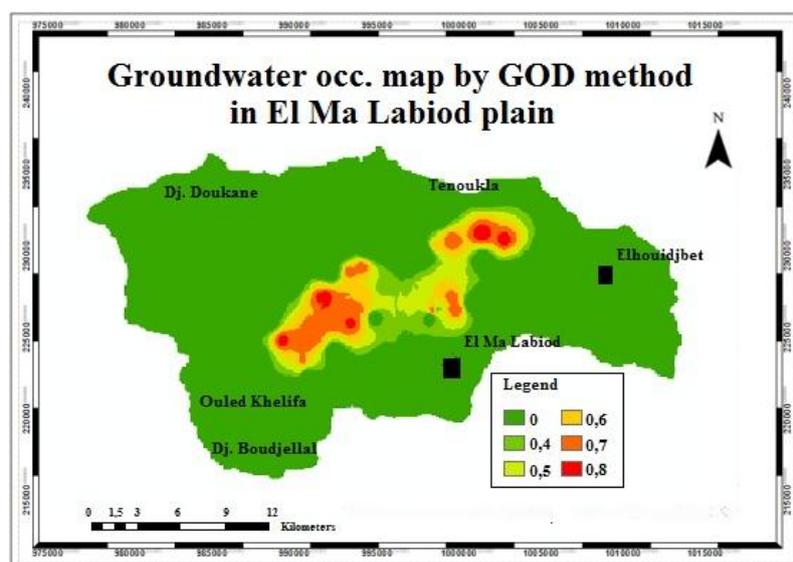


Figure 69a. Carte de présence d'eau souterraine

VI.3.2.1. Présence d'eau « G »

La carte d'occurrence (figure 69a.) montre la zone où il y a possibilité de présence d'eau souterraine, elle est aisément assimilée au champ captant d'El Ma Labiod.

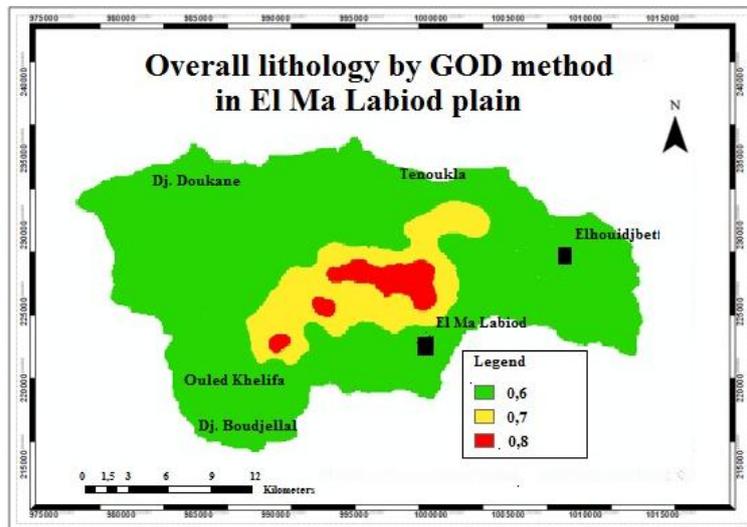


Figure 69b. La carte de la lithologie de la couverture et des sols.

VI.3.2.2. Lithologie de la surface « O »

La carte de la lithologie de surface (Figure 69b.) affiche trois types de sols selon leur aptitude à faciliter l'infiltration des eaux vers le sous sol.

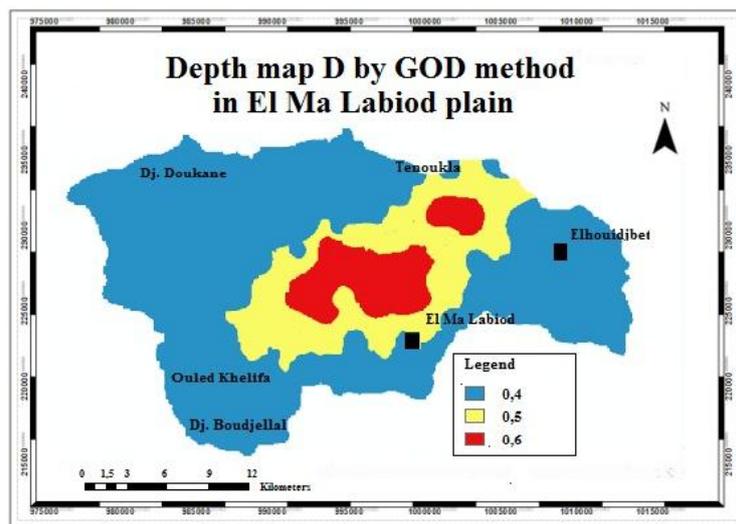


Figure 69c. Carte de la profondeur à la nappe.

VI.3.2.3. profondeur a la nappe « D »

La carte de la profondeur à la nappe selon les marges de la méthode GOD montre trois zones

VI.3.3. Cartes des indices de vulnérabilité des eaux souterraines

VL3.3.1. La carte du “GVI” de DRASTIC

La carte du “gvi” drastic (figure 70a) dont les valeurs vont de 28 à 124 s’étale sur trois classes de susceptibilité et divise la plaine d’El Ma Labiod en classes: très faible (<75)%, faible (75 à 100) % et modérée (100 à 124), 1.25% de la superficie de la plaine. La classe de faible vulnérabilité couvre 50 % de la zone aquifère concentrée autour de l’axe central de la surface exploitée avec deux petites aires où la vulnérabilité des eaux souterraines est modérée. Au Sud Ouest la classe modérée est due à la nappe karstique qui affleure plongeant vers le sud et à l’est elle est probablement due aux valeurs de “D” relativement petites et celles de “C” » dues aux pompages excessifs.

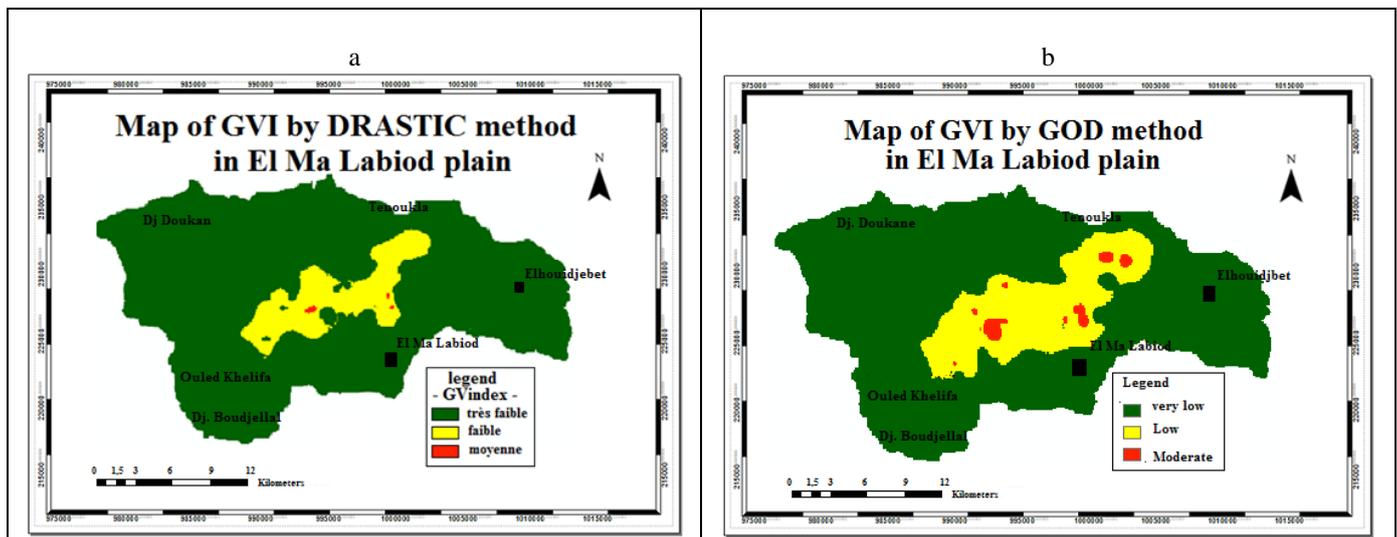


Fig. 70: confrontation des cartes des indices de vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine d’El Ma Labiod par la method DRASTIC (a) et par la method GOD (b).

VL3.3.2. La carte du “GVI” GOD

La carte du “GVI” GOD (Fig.70b) dont les valeurs vont de 0 à 0.43 s’étale sur trois niveaux de vulnérabilité et partage la plaine d’El Ma Labiod en trios classes de vulnérabilité : nulle à négligeable (<0.1) 72%, faible de (0.1 à 0.3) 26,1% et modérée (0.3 to 0.43) 1,9% de la superficie de la plaine.

La classe de faible vulnérabilité couvre 85 % de la zone aquifère et les aires de la classe de vulnérabilité modérée sont plus importantes et plus nombreuses avec deux de plus au Nord. Les nouvelles aires au Nord sont situées en des dunes de sable pur pas ou peu couvertes.

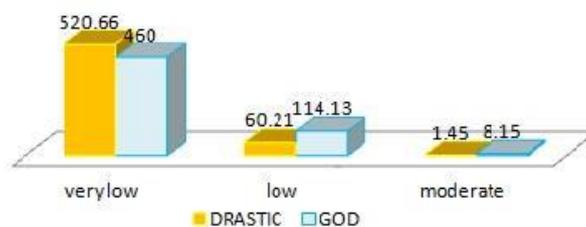


Figure 71a. Distribution des indices de vulnérabilité sur le BV en km²

Les figures 71a. et 71b. montrent les états comparatifs entre les deux méthodes sur les différents espaces.

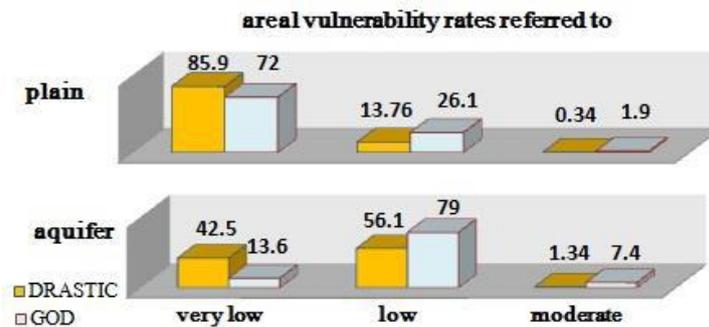


Figure 71b. Distribution des indices de vulnérabilité dans la plaine et l'aquifère en % de surfaces

Les zones communes aux deux méthodes ont été discutées plus haut. La différence entre les étendues serait surtout due au paramètre "D" qui, pour la méthode GOD, couvre jusqu'à 100 mètres de profondeur contre 30 mètres pour la méthode DRASTIC couvrant ainsi tous les points d'eau mesurés.

VI.3.3.3. Confrontation des cartes d'indice de vulnérabilité

La confrontation des deux cartes d'indice de vulnérabilité (figures 70a et 70b.) montre:

- Une parfaite concordance spatial des maximums,
- Les deux GVIndex partagent la zone d'étude en trois classes de vulnérabilité dont la plus haute est la modérée quoique les valeurs atteintes par la méthode DRASTIC sont proche de la classe de «haute vulnérabilité» tandis que le maximum de la méthode GOD s'arrête au milieu de la classe modérée.
- les classes de vulnérabilité « faibles » et « modérées » de la méthode GOD sont spatialement plus étendues et couvrent intégralement les aires occupées les mêmes classes évaluées par la méthode DRASTIC.

VI.3.3.4. Analyse des Résultats

La différence observée entre ces deux distributions spatiales des indices de vulnérabilité est probablement due au mode opératoire des deux approches:

- Le paramètre D couvre une plus importante marge de profondeur jusqu'à 100 m pour GOD alors que pour DRASTIC il est limité à 30 m
- Les systèmes de calcul utilisent des formules différentes et un nombre de paramètres inégal

VI.3.4. Validation par les nitrates

La Confrontation des deux indices de vulnérabilité avec la carte des nitrates (figures 71a et 71 b) et (figure 57 page 104) montre une similitude dans les formes et les emplacements des valeurs significatives. Ce qui rapproche les résultats obtenus de la situation sur le terrain.

VI.4. Le risque de pollution des eaux souterraines

Généralement, le risque est évalué par l'approche qui se rapporte à l'enjeu et à l'aléa, comme le stipule (BRGM, non daté): Le risque de pollution résulte du croisement d'un ou plusieurs aléas et d'un ou de plusieurs enjeux, sous la forme : $\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Enjeux}$.

Comme l'enjeu (eau) est un ingrédient vital et que son estimation n'est pas aisée, la plupart des auteurs utilise l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines comme enjeu et l'aléa par son indice d'intensité.

VI.4.1. définition

Le risque de la pollution des eaux souterraines pourrait être défini comme la probabilité que l'aléa influât sur leur qualité ou la détériore via le milieu doté d'un indice de vulnérabilité donné.

D'après Nobre et al.(2007) :Le risque de pollution des eaux souterraines est défini comme la possibilité de dégradation de la qualité du contenu d'une nappe par le transfert de substances chimiques ou autres provenant de sources de pollution en surface.

D'après Karaouzas et al. (2009) : La carte des risques est le résultat de la combinaison de la carte de vulnérabilité et de la carte des pressions de pollution.

Pour Daniella Ducci (1999), l'évaluation du risqué ne serait qu'une étape de « la gestion du risque » dont l'objectif serait la détermination des mesures qui visent à éliminer, réduire, atténuer, transférer ou simplement apprendre à vivre avec les risques.

VI.4.2. Action probable de l'aléa

L'aléa considéré comme source de pollution, peut être diffus comme l'épandage des engrais ou les déchets des animaux qui broutent librement dans un champ ou encore les restes après la récolte, ou ponctuels comme les amas de fumiers mal conservés, les fosses septiques non normalisées. Qu'elle soit délibérée ou accidentelle la source probable de polluants ne peut avoir d'effet sur la nappe que si un moyen de transport peut **atteindre** les polluants, en **lessiver** une quantité remarquable, être lui-même en quantité suffisante pour les **dissoudre**, les **transporter** (à travers l'interface air-sol « **infiltration** » et la zone non saturée « **percolation** ») jusqu'à la nappe où ils seraient **repérables** malgré la **dilution** comme cela pourrait arriver dans le cas de forte à très **forte vulnérabilité** (ou **susceptibilité**) de la nappe.

Cela veut dire qu'en absence ou insuffisance de moyen de transport (généralement l'eau de pluie ou d'irrigation excédentaire) ou si les mesures prises empêchent l'eau d'atteindre les polluants, le cas rejoint la déclaration de Foster, (2013): « *Il est possible d'avoir une vulnérabilité très élevée mais pas de risque de pollution s'il n'y a pas de charge de contaminants* ».

VI.4.3. L'intensité de l'aléa

Les auteurs comme Panagopoulos et al (2006) ont proposé des coefficients prédéfinis pour divers cas et types d'aléas (land use et land cover). Plusieurs auteurs qui cartographie le risque de pollution cite comme référence (Zwhalen 2003) du fait de l'application de la classification de Corine quant à l'occupation des sols. Pour un terrain à occupation et couverture assez diversifiée, où la variation spatiale de l'intensité de l'indice « aléa » ou « indice de danger » comme il apparaît dans certaines littératures, serait notable mais dans le cas où l'usage et l'occupation de terrain selon la table de Corine ou celle de Panagopoulos ne permettent pas une diversité cartographique, la notation détaillée de l'aléa devient une option.

La différenciation des aléas de même type peut-être faite en les décomposant ; les fermes qui étaient notées uniformément seront différenciées selon « l'ampleur de leurs écuries, l'état de l'amas de fumier, l'état des latrines et des puits ». Ainsi les trois types d'aléas (ferme, champs et école) pourraient être décomposés et notés comme indiqué au tableau 44 :

Tableau 44 notation détaillée de l'intensité des aléas

N°	Aléa	composantes	Notation	note
1	Ferme	Puits Fosse perdue Ecurie et fumier Cheptel	: 5 + 1 pour la présence de puits (jusqu'à +3 selon son état) + 1 à 3 pour la fosse perdue (selon l'état) + 1 jusqu'à 5 pour chaque Amas de fumier. Et +1 Jusqu'à 5 selon l'exposition de l'écurie + 1 par trentaine de têtes d'ovins ou 5 têtes de bovins	7 à 30
2	Champs	Epandage irrigation	1 pour les 2 premiers quintaux d'engrais par hectare (Q/ha). + 1 pour chaque ,quintal/ha supplémentaire. le tout multiplié par 0,5 pour les champs non irrigués ou par jusqu'à 5 pour les champs irrigués (selon la fréquence d'irrigation).	0,5 à 45
3	Ecoles	latrines	Jusqu'à 10 selon l'état de ses latrines et le nombre d' élèves.	5 à 10

La figure 72 montre une certaine densité et homogénéité d'éléments d'une intensité assez importante selon la table de Panagopoulos. Presque entièrement classés comme fermes avec écurie, fosse perdue et puits. Il y a aussi trois écoles dont l'élément le plus influant serait les latrines.

La digitalisation des éléments a permis leur projection et la notation de leurs paramètres permet de réaliser la table d'attributs et par interpolation de réaliser la carte d'influence probable de l'aléa azoté.

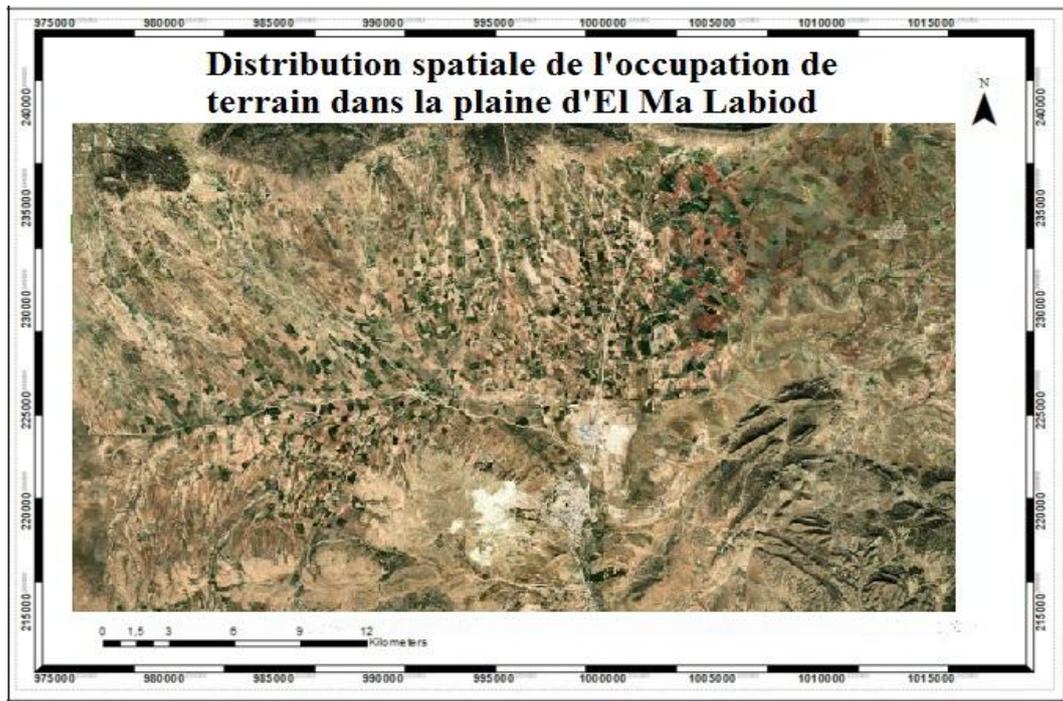


Figure 72 Situation des aléas sur la zone aquifère

La figure 72b montre la carte des aléas azotés de la plaine d'El Ma Labiod les trois types d'aléas cités plus haut sont représentés par le même symbole mais la différence d'intensité sont portés sur la table d'attributs.

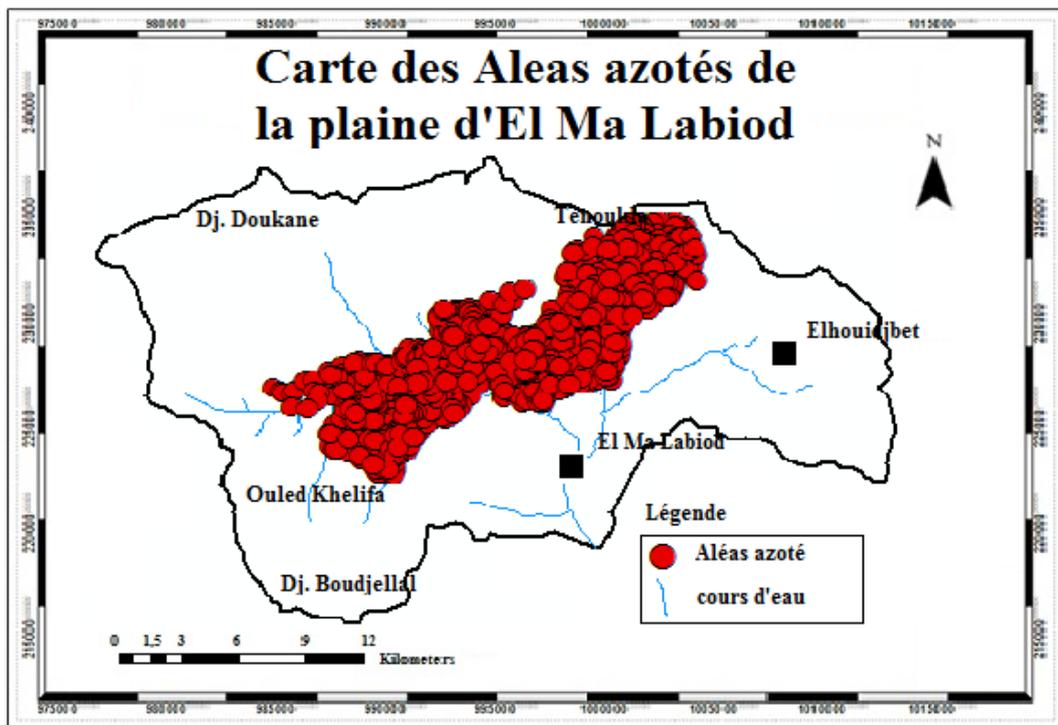


Figure 72b Situation des aléas azotés de la plaine d'El Ma Labiod

La carte des risques de pollution des eaux souterraines (Figure 73) est réalisée en utilisant les outils d'analyse spatiale et d'interpolation d'arcmap.

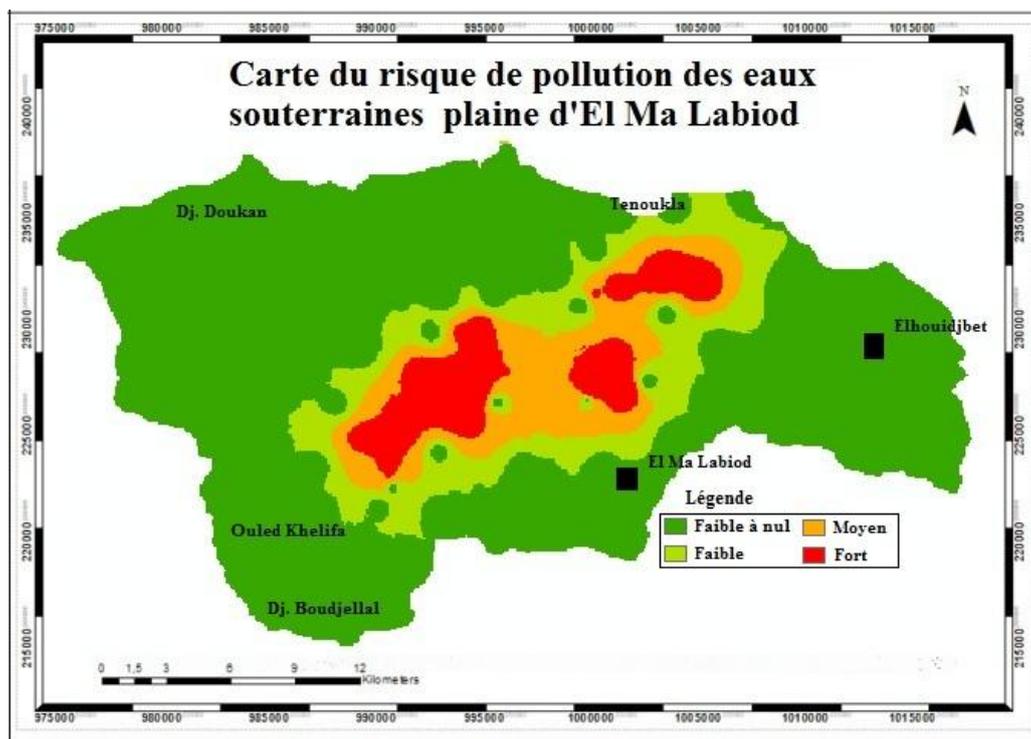


Figure 73 Carte de risque de pollution des eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod

VI.5. Conclusion

L'effet des activités agricoles sur les eaux souterraines n'est plus à prouver; le niveau de l'eau concernée est fortement diminué par les besoins d'irrigation et sa qualité est dégradée par les polluants des champs. Depuis quelques décennies, le niveau de la nappe diminue dans la zone d'étude, avec une moyenne de 0,4 à 0,7 m par an, malgré les apports de calcaire au Nord et Sud-ouest.

La contamination de certaines zones de la plaine d'El Ma Labiod est concrète et dépasse les normes de consommation, avec cinq points d'eau impropres à la production d'eau potable et huit autres impropres à la consommation humaine sans traitement préalable.

L'analyse des échantillons désigne les nitrates et les activités agricoles comme la cause essentielle de la dégradation de la qualité de l'eau dans la plaine d'El Ma Labiod.

Les cartes d'indice de vulnérabilité DRASTIC et GOD qui en résultent sont réparties sur trois niveaux avec une plus grande zone de «susceptibilité» pour la méthode GOD dont le paramètre «D» va jusqu'à 100 m de profondeur au lieu de 30 m pour DRASTIC.

Ainsi, la méthode GOD est mieux adaptée aux zones climatiques arides et semi-arides caractérisées par des nappes phréatiques profondes. Mais une méthode d'évaluation sans limitation de profondeur serait préférable.

La comparaison de la carte des concentrations de nitrates avec les cartes DRASTIC et GOD GVI montre une correspondance parfaite des valeurs maximales respectives et une similitude dans la forme et l'emplacement des valeurs significatives, ce qui confirme les voies préférentielles des contaminants de surface pour atteindre la nappe phréatique et rapproche les résultats obtenus par les deux méthodes de la situation réelle.

Conclusion générale et perspective

L'étude géologique menée à partir des données des forages, des études géologiques sur la région de Tébessa, des domaines des terrains voisins et les travaux Antérieurs sur la zone d'étude a abouti à :

Les formations du Miocène constituent l'essentiel de la zone aquifère de la plaine d'El Ma Labiod et lui confèrent leur potentiel hydraulique des grès et des sables.

Les formations alluviales qui les surmontent forment aussi un aquifère périodique

Les formations de bordure (calcaires) de la plaine ont un assez important potentiel hydrique; elles constituent les principales zones d'alimentation du système aquifère.

La région d'El Ma Labiod n'a pas encore de carte géologique, l'esquisse établie par Durrozoy en 1948, améliorée par Rouabhia en 2006 qui tient lieu de carte géologique provisoire, reste à ce jour la seule synthèse géologique projetée dans les limites de la feuille topographique d'El Ma Labiod.

La plaine d'El Ma Labiod est située en zone de transition entre deux types de climats aux influences desquels elle est soumise d'où une météorologie très irrégulière. sa pluviométrie moyenne varie entre 250 et 350 mm et son climat est estimé semi-aride avec une tendance vers l'aridité.

La zone est actuellement sans aucune station météorologique. cet handicap laisse les travaux et entraîne de probables erreurs de calculs lors des extrapolations de données d'autres stations.

Le type d'averse, la topographie des bordures et l'état des sols non irrigués favorisent l'écoulement au détriment de l'infiltration même si les bilans hydriques annoncent très rarement des années excédentaires, la forme et l'envergure des lits des cours d'eau attestent d'une importante énergie d'écoulement. Ce qui confirme la concentration des quantités précipitées sur une période cumulée de quelques dizaines de jours évaluée à une moyenne de 40 jours.

La plaine d'El Ma Labiod se caractérise par une recharge inférieure à 10 mm durant plus de quatre décennies.

La plaine d'El Ma Labiod est située en zone de transition entre deux types de climats aux influences desquels elle est soumise d'où une météorologie très irrégulière. sa pluviométrie moyenne varie entre 250 et 350 mm et son climat est estimé semi-aride avec une tendance vers l'aridité.

Le type d'averse, la topographie des bordures et l'état des sols non irrigués favorisent l'écoulement au détriment de l'infiltration même si les bilans hydriques annoncent très rarement des années excédentaires, la forme et l'envergure des lits des cours d'eau attestent d'une importante énergie d'écoulement. Ce qui confirme la concentration des quantités précipitées sur une période cumulée de quelques dizaines de jours évaluée à une moyenne de 40 jours.

La plaine d'El Ma Labiod se caractérise par une recharge inférieure à 10 mm durant plus de quatre décennies.

Le bassin versant d'El Ma Labiod est situé à la limite des frontières avec la Tunisie. A l'Est, sa limite hydrologique outrepassé les frontières géopolitiques et arrive aux cimes de Dj Es Sif en territoire voisin. Avec une superficie de 600Km² et un périmètre de 119 Km il présente une forme ramassée.

La dénivelée totale de 700 m à l'exutoire et de 400 m aux abords de la plaine augmente positionne le bassin versant dans la classe du « relief assez fort » avec une pente moyenne de 16,82% et une dénivelée spécifique de 183,8 m, et augmentent la vitesse et l'énergie des écoulements.

Le temps de concentration (t_c) calculé à partir de Dj. Doukkane est de 1heure avec une vitesse moyenne d'écoulement (v_e) de 1m/s.

La densité de drainage de 2,06 atteste de la perméabilité de la plupart de ses terrains au niveau d'une plaine à pente assez douce (> 3%).

L'hydrographie et forme: Le cours d'eau principal, de direction Nord - Sud, n'a pas le lit le plus long et ses importantes ramifications latérales confèrent au bassin versant une forme ramassée.

La différence remarquable entre les écoulements calculés sur la base des données annuelles et l'énergie déduite de la forme et des dimensions de la section transversale d'un lit du cours d'eau (énergie d'écoulement) nécessite un raffinement du référentiel temps. Le nombre de jours pluvieux moyen est de 40 jours par an (un neuvième) avec un maximum de 90 jours (moins du tiers).

L'étude hydro-chimique de la zone d'étude montre une situation complexe où les eaux souterraines d'une quarantaine d'échantillons, sont regroupées dans la zone des eaux chlorurées calciques malgré la différence de l'origine de leur minéralisation et les milieux relativement variés de leur évolution. Ce qui nous permet de dire que ces eaux sont régies par l'hydrogéologie plutôt que par la géologie du milieu. (Cloutier 2004, Cloutier 2006) un tel regroupement n'est observé que lorsque les échantillons sont divisés par formations litho – géologiques, surtout avec la caractéristique de nappe surexploitée qui élève la dynamique des écoulements souterrains à une échelle de brassage des eaux.

Tous les échantillons étudiés montrent la prédominance des éléments chimiques (Ca^{2+} et Cl) avec un faciès unique d'une eau chloruré calcique.

L'étude hydrogéologique a montré que :

La plaine d'El Ma Labiod comporte quatre aquifères ; un superficiel d'une ampleur de 15 à 20 mètres formé d'alluvions, le deuxième karstique réparti en trois zones individualisées ; la bordure Nord

Est (Dj. Bouroumane), la bordure Nord Ouest, et les calcaire de Ouled Khélifa au Sud Ouest), le troisième ; est un aquifère à nappe captive au Sud Est de la plaine (Ain Taga); il est représenté par les Forage AT1(artésien) et AT1Bis.

Le quatrième aquifère, à remplissage miocène, est le plus important par son extension et ses caractéristiques hydriques, objet de cette étude :

La nappe de cet aquifère à sable est libre, phréatique évoluant vers la profondeur et à eau potable.

Cette nappe est soutenue mais surexploitée au point que ses réserves diminuent d'une hauteur moyenne de 0.4 à 0.7 mètre chaque année.

Les caractéristiques hydrodynamiques sont en évolution et la vitesse dépend de l'intensité de pompage, de la composition du terrain et de la durée d'exploitation. le pompage excessif a lessivé l'horizon du rayon d'action et a causé l'effondrement de certains puits et forages.

Les valeurs de ses paramètres restent pour la plupart assez importantes pour permettre des débits conséquents de 30 à 40 et même 50 litres par second au niveau des nouveaux forages.

La qualité des eaux d'El Ma Labiod est en général assez bonne quoique pour la consommation humaine certains points d'eau sont à exclure (dans cette étude cinq) et des mesures curatives sont à prendre pour 8 autres points. Les causes de cet handicap sont les Nitrates et les chlorures or ce sont deux indicateurs de la contamination anthropique, vu la dynamique assez forte des écoulements souterrains induits par l'exploitation il suffirait d'un temps relativement court pour réduire les concentrations et sortir des marges proscrites. La représentation spatiale de l'aptitude à l'AEP peut être assimilée à celle des Nitrates.

La totalité des points d'eaux échantillonnés sont aptes à l'irrigation avec un SAR minimal.

L'effet des activités agricoles sur les eaux souterraines n'est plus à prouver; le niveau de l'eau concernée est fortement diminué par les besoins d'irrigation et sa qualité est dégradée par les polluants des champs. Depuis quelques décennies, le niveau de la nappe diminue dans la zone d'étude, avec une moyenne de 0,4 à 0,7 m par an, malgré les apports de calcaire au Nord et Sud-ouest.

La contamination de certaines zones de la plaine d'El Ma Labiod est concrète et dépasse les normes de consommation, avec cinq points d'eau impropres à la production d'eau potable et huit autres impropres à la consommation humaine sans traitement préalable.

L'analyse des échantillons désigne les nitrates et les activités agricoles comme la cause essentielle de la dégradation de la qualité de l'eau dans la plaine d'El Ma Labiod.

Les cartes d'indice de vulnérabilité DRASTIC et GOD qui en résultent sont réparties sur trois niveaux avec une plus grande zone de «susceptibilité» pour la méthode GOD dont le paramètre «D» va jusqu'à 100 m de profondeur au lieu de 30 m pour DRASTIC.

Ainsi, la méthode GOD est mieux adaptée aux zones climatiques arides et semi-arides caractérisées par des nappes phréatiques profondes. Mais une méthode d'évaluation sans limitation de profondeur serait préférable.

La comparaison de la carte des concentrations de nitrates avec les cartes d'indice de vulnérabilité DRASTIC et GOD montre une correspondance parfaite des valeurs maximales respectives et une similitude dans la forme et l'emplacement des valeurs significatives, ce qui confirme les voies préférentielles des contaminants de surface pour atteindre la nappe phréatique et rapproche les résultats obtenus par les deux méthodes de la situation réelle.

Perspectives et recommandations

Les principales opérations futures jugées profitables :

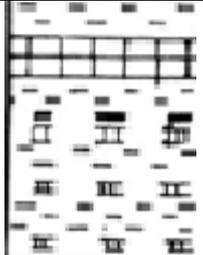
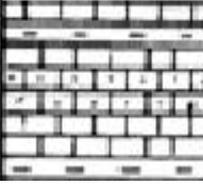
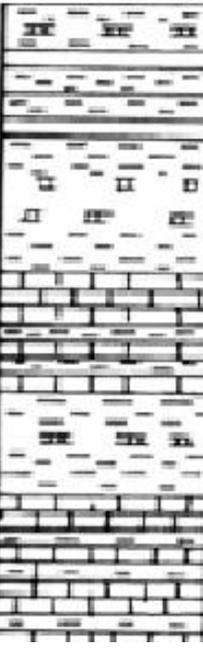
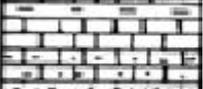
- Le rétablissement d'au moins une station météorologique comme source de données locales.
- Mettre en place un système limnimétrique.
- Reconsidérer les quantités d'eau extraites pour essayer de rétablir l'équilibre de la nappe.
- Initier les agriculteurs aux dangers de la pollution des eaux souterraines et les former à la gestion de leurs déchets et à la protection des amas de fumier et des engrais.
- Généraliser la plantation de végétation qui se nourrit de sels le long des cours de rejets domestiques et les éloigner des points d'eau tels les roseaux et les plantes grasses.
- Pomper l'eau destinée à l'irrigation d'un niveau proche de la surface de la nappe et d'une profondeur relativement importante celle destinée à la consommation humaine.
- Opter pour une concentration maximale (limite) de nitrate résiduel dans le sol (entre 20 et 25 mg/l) au-delà de laquelle l'épandage d'engrais soit interdit.

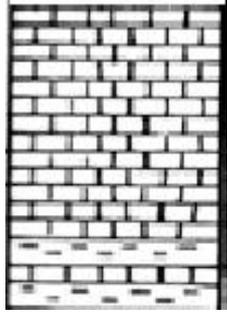
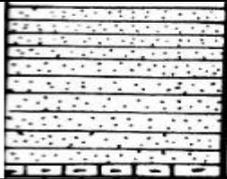
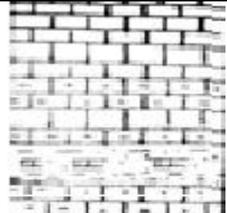
Annexes

Annexe A

**Permis DJEBEL DOUKKANE
FORAGE PETROLIER BOUDJELLAL-2 [BDJ-2]**

*Coordonnées : Géographiques : Lambert : X = 8°07'35''E X = 993.533,5
Y = 35°13'12''N Y = 227.121,2 Z = 1120m (sol)*

Cote	Coupe	Description lithologique	Étage
138		Calcaire blanc, compact. Biocrite argileuse à faune pélagique	Mæstrichtien campanien sup.
576		Argile brune rougeâtre et marnes gris verdâtre Argiles grises-foncées, calcareuses avec rare banc de calcaire gris-claire. Argile grise avec quelques bancs de calcaire gris-claire fossilifères. Calcaire gris compact, marneux à foraminifères. Marne grise indurée, légèrement dolomitique, intercalations de calcaires bruns, souvent rouge.	Campanien inf. Emscherien
917		Calcaire gris claire, argileux, granuleux, partiellement lumachellic, compact avec fractures remplies de calcite, intercalations d'argile marneuse, grise à grise foncée, trace de calcite et de pyrite. Calcaire brun, multicolore, moyen dure, crayeux légèrement dolomitique, partiellement lumachellic bitumineux, trace de calcite blanche, translucide avec bandes d'argile verte à grise verdâtres, gluconique.	Turonien
1010 2050		Argile gris verdâtre, calcareuse pyriteuse, fossilifères, devenant marneuse à partir de 873m avec fines passées de calcaires gris blanchâtre, lumachellic. Calcaire blanc à crème parfois gris cryptocrystallin à crayeux, pyriteux. Alternance de calcaire blanc lithographique, cryptocrystallin, crayeux, moucheté, lumachellic d'argile grise à grise verdâtre, feuilletées marneuse. Argile grise, grise verdâtre, feuilletée, calcareuse, finement pyriteuse, parfois légèrement glauconieuse et lumachellic avec intercalations de calcaire blanc, grisâtre lithographique, cryptocrystallin crayeux avec trace de calcite. Alternance d'argiles, grises foncées, feuilletées marneuses, légèrement silteuses et de calcaire gris à gris claire, microcristallin lumachellic. Calcaire gris à gris claire induré cryptocrystallin, parfois blanchâtre, crayeux avec débris de fossiles, avec intercalations d'argiles grises. Alternance de calcaire gris clair, induré cryptocrystallin à passées de calcaires blancs. Argiles grises à grises foncées, carbonatées indurées, feuilletées légèrement silteuses.	Cenomanien
2093		Alternance de calcaires gris, gris foncés parfois noirâtres, argileux. Alternance de calcaire gris clair, beige, crayeux cristallin	Albien sup.

3058		<p>Dolomie blanche à gris brunâtre, microcristallin bitumineuse, compacte.</p> <p>Alternance de calcaire, gris claire blanchâtre souvent bioclastique. Calcaire gris claire blanchâtre, brunâtre, compacte, souvent crayeux, rarement bioclastique ou graveleux, oolithique, traces de foraminifères. Calcaire gris clair, gris foncé, oolithique, bioclastique, parfois cryptocristallin. Calcaire gris claire, légèrement dolomitique avec fines passées d'argiles vertes.</p> <p>Alternance de marnes gris foncée compactes, argiles grises à gris foncé, feuilleté, carbonaté.</p>	Albo-aptien.
3560		<p>Grès blanc à gris, fins à très fin, bien consolidé, quartzitique, ciment silico-dolomitique glauconieux avec passées d'argiles grise à gris noirâtre, compact, silteuse, carbonaté. Intercalations de grès quartzitique, de siltes, d'argiles dolomitiques et de dolomies.</p>	Baremien
		<p>Dolomies, grises, brunes et beiges, cryptocristallin à microcristalline, fines passées d'argiles grises et grises noirâtres. Dolomies moyennes à fantôme de débris. Alternance de dolomies oolithiques, de calcaires dolomitiques de grès quartzitiques et d'argiles dolomitiques silteuses à 3760m. dolomies fines à huîtres.</p>	Néocomien

Annexe B

Tableau de la série pluviométrique d'El Ma Labiod 1975 - 2017

Année	Sept	oct	nov	Dec	janv	fev	Mars	Avr	mai	juin	Juil	aout	Total A
1975	57.8	10.4	35.5	6.9	16.5	38.8	54	34.6	27.1	98.7	16.3	12.3	408.9
1976	59.1	6.9	27.1	10	21.7	72.2	40.5	15.4	35.6	4.6	0.6	24.9	318.6
1977	8.5	10	39.5	0	4.5	32	39.5	19.6	25.2	10.2	0	28.6	217.6
1978	28.5	25.1	24.5	4.9	0.5	30.6	29.9	57.7	13.2	37.2	4.6	22.5	279.2
1979	155.5	9.7	6	3	25	21.3	89.2	26	31.2	0	0	29.3	396.2
1980	19.9	7.3	34.8	40.6	34.3	12.6	13.4	6.1	38.6	42.5	0	2	252.1
1981	73	22.6	7	5.2	13.5	28.2	2.9	74.6	70.9	10.1	3.1	35	346.1
1982	6.7	43	27.7	19.6	0.2	8.4	10.2	0	25.2	16.1	0.4	2	159.5
1983	68.4	30.3	11.2	10.2	11.8	8.1	0.5	23.2	13.6	1.7	5.2	0	184.2
1984	14.2	62.1	23.7	21	7.2	4.9	23.3	25.9	22.5	25	4.6	0.5	234.9
1985	26.8	56.7	16.5	23.5	11.5	3.5	93.8	0	23	9.9	0	8.8	274
1986	5.9	55	21.9	4.8	0	12.5	13.2	10.1	0	0	94.1	14.4	231.9
1987	0.5	19.9	16.8	3.3	2.4	1.1	13.3	23.5	32.9	76.5	3.7	14.5	208.4
1988	24	0	39.3	17.3	16	10.3	4	10	0	94.4	16.1	18	249.4
1989	2.5	3.8	13.6	1.4	123.5	0.3	41.5	31.6	26.6	31.2	16.2	69.4	361.6
1990	4.5	0	67.2	31.9	30.4	5.5	61.6	0	48.5	49.1	0	4.2	302.9
1991	0	22.9	35.2	9.9	8.8	13.2	18.3	3.9	0	3.9	3.4	0	119.5
1992	63.6	1	27.3	21.1	2.5	16.4	9.6	1.1	13.7	0	3.3	8	167.6
1993	22.8	1	12.8	5	0	0	29.3	9.6	4	0	8.9	9.3	102.7
1994	9.3	70.1	0	0	21.8	0	44.1	0	0	34.9	0	45.3	225.5
1995	50.4	23.5	10.2	10.3	14.4	49.9	43.5	4.2	24.2	22.9	3.3	9.2	266
1996	0	9.1	3.8	5.4	22.6	1.6	2.1	5.3	0	3.9	3.4	0	57.2
1997	28.1	32.1	53.1	2	3.1	3.6	2.4	2.7	1.5	0.8	0.3	1.4	131.1
1998	64.4	37.7	3.7	12.6	0	0	30.9	1.8	58.4	1.9	5.2	0	216.6
1999	20.4	41.1	35.2	36.4	4	5	9.8	14.7	99.4	40.1	5.2	19.2	330.5
2000	20.6	28.4	10.1	14.9	20.9	4.9	5.6	4.9	17.2	0	1.1	0	128.6
2001	52.5	4.5	21.1	10.6	6.7	7.5	6	11.2	35.4	16.2	28.4	46.6	246.7
2002	26	19.1	7.26	27.7	46	26.7	13.1	40.4	31.1	16.4	11.3	22.2	287.26
2003	53.5	37.4	18.1	40.7	17.6	5.1	39.1	27.6	18.2	22.3	22.3	13.4	315.3

2004	25	16.6	68.4	48.4	3.1	27.6	6.3	14.7	0	28.8	0.5	11.5	250.9
2005	35.3	16.1	41	26.3	31.5	23.5	0.7	51.3	37.2	23.2	44.6	32.2	362.9
2006	29	23.6	7.5	30.4	3	6.9	51.6	53.7	17	29.6	11.5	7	270.8
2007	17.2	10.8	6.3	14.2	6.3	2	15.2	22.3	47	22.5	0	37.5	201.3
2008	60.3	44.1	11.6	26.4	53.9	4.9	31.8	29.8	55.9	12.5	0	41.2	372.4
2009	98.8	2	0	6.2	13.7	16.5	4.5	39.1	10.6	12.2	9.3	9	221.9
2010	16.5	65.2	0	9.4	24.4	22	44.8	22.8	18	3.5	0	25.8	252.4
2011	56.4	4.8	14	0	10	0	26.7	25.4	17.8	0	35.2	20.7	211
2012	54.8	75.4	4.1	9.3	11.8	35.6	27.3	0	13.3	10	0	16.8	258.4
2013	11.9	7.3	0	3.4	45.6	0	13.8	15.2	10.3	8.3	19	21	155.8
2014	32.8	11.7	45.7	1.3	13	7.4	38.8	38.3	53.9	14.5	39.6	62.6	359.6
2015	1.24	57.61	27.68	0	12.75	54.3	29.64	69.47	26.36	23.13	52.24	0	354.43
2016	10.23	0	16.68	9.70	26.75	0	0	2.47	17.36	42.13	14.24	57.6	197.18
2017	24.76	15.39	20.31	55.3	40.25	28.7	24.35	17.53	51.63	55.87	33.75	16.4	384.26
Moy	33.52	24.21	21.24	14.89	18.22	15.2	25.58	20.64	25.89	22.25	12.12	19.07	252.87

Annexe C

Série des températures (st de Tébessa) période de 1972-1973 à 2016-2017

Années	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juillet	Aout	moy. An
1974-1975	20.88	13.42	9.41	6.15	6.57	6.57	9.75	10.72	17.76	23	23.01	23.41	14.22
1975-1976	22.76	13.81	9.35	7.58	5.89	6.09	8.45	11.79	16.08	20.72	24.4	23.34	14.19
1976-1977	19.76	15.59	7.91	8.46	5.25	6.78	7.32	11.49	15.54	19.91	23.46	23.63	13.76
1977-1978	19.56	16.32	11.02	8.16	8.17	9.71	11.81	12.33	17.23	21.52	27.62	24.78	15.68
1978-1979	20.26	12.82	8.25	9.75	5.3	9.69	9.27	12.33	17.07	22.67	24.64	24.32	14.69
1979-1980	18.84	17.47	8.41	7.34	9.95	6.88	10.36	10.11	16.01	21.74	25.15	24.92	14.76
1980-1981	21.3	14.2	11	4.5	3.9	6.3	12.4	15.2	19.4	23.3	24.5	24.1	15.01
1981-1982	20.7	17.3	9.2	9.7	7.7	7.4	9.2	11.8	10	13	28	25.9	14.16
1982-1983	21.5	15.9	10.8	5.7	4.7	6.7	9.3	15.3	18.9	22.5	27.1	26	15.36
1983-1984	21.6	15	12.2	7.2	6.1	6	8.5	13	17	23.1	26.1	25.1	15.07
1984-1985	20.6	14.5	12	6.4	5.4	10.4	8.3	14.2	16.9	25.1	27.7	25.6	15.59
1985-1986	20.4	15.7	13	8	6.3	8.1	9.4	13.7	19.9	22	25	26.8	15.69
1986-1987	21	16.6	10.2	6.4	6.3	7.7	8.8	14.3	16.7	24.3	26.7	27.9	15.57
1987-1988	23.6	19.3	10.7	10.5	8.2	7.4	9.9	14.8	21	22.5	28	26.7	16.88
1988-1989	20.6	18.2	11.6	5.8	5.4	7.2	11.5	13.7	18.2	20.9	25.6	26.1	15.4
1989-1990	22.2	15.5	13.4	10.7	6.7	10.4	10.4	12.7	17.2	25.4	24.9	22.5	16
1990-1991	24.1	20	11.5	5.5	5.5	6.8	11.6	10.4	14.2	21.9	26.3	25.6	15.28
1991-1992	21.8	16.7	10.6	5.5	4.7	6.7	9.4	11.8	16.3	20.9	23.9	25.7	14.5
1992-1993	21.9	18	21.1	7.8	5.2	5.6	8.7	13.9	18.2	24.8	26.8	27	16.58
1993-1994	22.3	19.1	11.1	7.7	7.5	8.9	11.9	11.85	21.9	24.2	27	28.6	16.84
1994-1995	23.6	16.7	13.2	8.1	5.7	10.3	9.2	12.7	20.1	22.9	27.1	24.6	16.18
1995-1996	21.1	16.3	11.3	9.8	9	6.3	10.1	12.4	18.2	20.8	25.9	26.6	15.65
1996-1997	20.3	15	12.4	10.2	8.7	6.3	9.3	1.2	20.4	26.6	27.5	25.2	15.26
1997-1998	20.5	17	11.5	8.5	7.2	9.3	9.8	15.1	17.7	24.6	27.8	25.7	16.22
1998-1999	23.2	15	10.2	6.3	7.1	8.2	10.2	14.9	28.1	25.8	26.2	28.9	17.01

1999-2000	23.6	19.2	11.1	7.1	4.1	7.8	11.7	16.1	21	22.4	27.5	26.8	16.53
2000-2001	22.1	15.9	12.8	9.4	8	7.5	15.6	14	19.6	25	28.4	27.1	17.12
2001-2002	22.3	21.1	11.8	6.8	6.3	9	12.5	15	19.4	25.1	26.6	24.9	16.73
2002-2003	21.2	17.8	12.2	8.8	6.9	6.1	10	14.1	18.9	25.2	29.2	27.4	16.48
2003-2004	21.5	19.6	12.3	7	6.9	9.6	11.2	12.8	15.9	22.4	26.2	27	16.03
2004-2005	20.8	20.5	10.2	8.1	4.5	4.9	11.2	14.2	21.1	23.7	28.5	25.9	16.13
2005-2006	21.6	17.8	12.1	6.5	9.4	7.2	11.8	16.6	21.3	24.8	26.5	25.9	16.79
2006-2007	21.4	19	12.1	7.9	8.8	9.2	9.7	13.5	18.5	25.3	26.5	26.7	16.55
2007-2008	22	17.6	10.5	6.9	7	8.3	10.9	15.5	19.3	23.4	28.7	27.2	16.44
2008-2009	22.2	16.9	10.01	0.3	7.1	6.4	9.7	11.5	10.3	24.2	28.7	26.8	14.509
2009-2010	21	16.7	12.4	10.7	8.3	10.1	13.1	15.9	17.4	24	27.2	18.6	16.28
2010-2011	21.8	17.4	12.12	10.1	8.2	7	9.7	14.7	17.9	22.3	27.5	27	16.31
2011-2012	23.5	16.1	12.5	8.1	6.4	4.5	9.7	14.3	19.3	26.8	28.7	28.5	16.53
2012-2013	22.8	19.6	14.8	8.4	7.4	7.5	13.8	15.6	18.8	22.6	26.9	25.6	16.98
2013-2014	23.1	21.7	12.4	7.5	8.4	10.1	8.9	14.9	18.6	23.3	27.3	28.1	17.02
2014-2015	24.8	19.2	14.5	8.4	7.1	6.1	9.8	15.1	20.2	22.6	26.5	26.3	16.71
2015-2016	22.7	18.3	11.8	8.3	9	10.4	10.9	17.4	19.5	24.2	26.4	25.2	17.01
2016-2017	21.4	19.6	12.4	9.1	5.5	9.8	12.2	13.5	20.9	25.4	27.8	28.1	17.14
Moyenne	20.69	16.32	11.02	7.28	6.42	7.25	9.78	12.58	17.36	22	25.35	24.44	15.04

Annexe D

Tableau de la série pluviométrique d'El Ma Labiod 1975 – 2017

année	sept	oct	nov	dec	janv	Fev	Mars	Avr	mai	ju	juil	aout	Total
1975	57.8	10.4	35.5	6.9	16.5	38.8	54	34.6	27.1	98.7	16.3	12.3	408.9
1976	59.1	6.9	27.1	10	21.7	72.2	40.5	15.4	35.6	4.6	0.6	24.9	318.6
1977	8.5	10	39.5	0	4.5	32	39.5	19.6	25.2	10.2	0	28.6	217.6
1978	28.5	25.1	24.5	4.9	0.5	30.6	29.9	57.7	13.2	37.2	4.6	22.5	279.2
1978	28.5	25.1	24.5	4.9	0.5	30.6	29.9	57.7	13.2	37.2	4.6	22.5	279.2
1979	155.5	9.7	6	3	25	21.3	89.2	26	31.2	0	0	29.3	396.2
1980	19.9	7.3	34.8	40.6	34.3	12.6	13.4	6.1	38.6	42.5	0	2	252.1
1981	73	22.6	7	5.2	13.5	28.2	2.9	74.6	70.9	10.1	3.1	35	346.1
1982	6.7	43	27.7	19.6	0.2	8.4	10.2	0	25.2	16.1	0.4	2	159.5
1983	68.4	30.3	11.2	10.2	11.8	8.1	0.5	23.2	13.6	1.7	5.2	0	184.2
1984	14.2	62.1	23.7	21	7.2	4.9	23.3	25.9	22.5	25	4.6	0.5	234.9
1985	26.8	56.7	16.5	23.5	11.5	3.5	93.8	0	23	9.9	0	8.8	274
1986	5.9	55	21.9	4.8	0	12.5	13.2	10.1	0	0	94.1	14.4	231.9
1987	0.5	19.9	16.8	3.3	2.4	1.1	13.3	23.5	32.9	76.5	3.7	14.5	208.4
1988	24	0	39.3	17.3	16	10.3	4	10	0	94.4	16.1	18	249.4
1989	2.5	3.8	13.6	1.4	123.5	0.3	41.5	31.6	26.6	31.2	16.2	69.4	361.6
1990	4.5	0	67.2	31.9	30.4	5.5	61.6	0	48.5	49.1	0	4.2	302.9
1991	0	22.9	35.2	9.9	8.8	13.2	18.3	3.9	0	3.9	3.4	0	119.5
1992	63.6	1	27.3	21.1	2.5	16.4	9.6	1.1	13.7	0	3.3	8	167.6
1993	22.8	1	12.8	5	0	0	29.3	9.6	4	0	8.9	9.3	102.7
1994	9.3	70.1	0	0	21.8	0	44.1	0	0	34.9	0	45.3	225.5
1995	50.4	23.5	10.2	10.3	14.4	49.9	43.5	4.2	24.2	22.9	3.3	9.2	266
1996	0	9.1	3.8	5.4	22.6	1.6	2.1	5.3	0	3.9	3.4	0	57.2
1997	28.1	32.1	53.1	2	3.1	3.6	2.4	2.7	1.5	0.8	0.3	1.4	131.1
1998	64.4	37.7	3.7	12.6	0	0	30.9	1.8	58.4	1.9	5.2	0	216.6
1999	20.4	41.1	35.2	36.4	4	5	9.8	14.7	99.4	40.1	5.2	19.2	330.5
2000	20.6	28.4	10.1	14.9	20.9	4.9	5.6	4.9	17.2	0	1.1	0	128.6
2001	52.5	4.5	21.1	10.6	6.7	7.5	6	11.2	35.4	16.2	28.4	46.6	246.7

2002	26	19.1	7.26	27.7	46	26.7	13.1	40.4	31.1	16.4	11.3	22.2	287.3
2003	53.5	37.4	18.1	40.7	17.6	5.1	39.1	27.6	18.2	22.3	22.3	13.4	315.3
2004	25	16.6	68.4	48.4	3.1	27.6	6.3	14.7	0	28.8	0.5	11.5	250.9
2005	35.3	16.1	41	26.3	31.5	23.5	0.7	51.3	37.2	23.2	44.6	32.2	362.9
2006	29	23.6	7.5	30.4	3	6.9	51.6	53.7	17	29.6	11.5	7	270.8
2007	17.2	10.8	6.3	14.2	6.3	2	15.2	22.3	47	22.5	0	37.5	201.3
2008	60.3	44.1	11.6	26.4	53.9	4.9	31.8	29.8	55.9	12.5	0	41.2	372.4
2009	98.8	2	0	6.2	13.7	16.5	4.5	39.1	10.6	12.2	9.3	9	221.9
2010	16.5	65.2	0	9.4	24.4	22	44.8	22.8	18	3.5	0	25.8	252.4
2011	56.4	4.8	14	0	10	0	26.7	25.4	17.8	0	35.2	20.7	211
2012	54.8	75.4	4.1	9.3	11.8	35.6	27.3	0	13.3	10	0	16.8	258.4
2013	11.9	7.3	0	3.4	45.6	0	13.8	15.2	10.3	8.3	19	21	155.8
2014	32.8	11.7	45.7	1.3	13	7.4	38.8	38.3	53.9	14.5	39.6	62.6	359.6
2015	1.24	57.6	27.7	0	12.75	54.3	29.64	69.47	26.36	23.13	52.24	0	354.4
2016	10.24	0	16.69	9.702	26.75	0	0	2.472	17.366	42.128	14.244	57.6	197.2
2017	24.76	15.39	20.31	55.3	40.25	28.70	24.36	17.53	51.63	55.872	33.757	16.4	384.26
Moy	33.52	24.21	21.2	14.9	18.2	15.2	25.58	20.65	25.89	22.25	12.11	19.1	252.8

Annexe E

la série pluviométrique de Tébessa 1975 - 2014

Année	Sept	oct	nov	dec	janv	Fev	Mars	Avr	mai	juin	juil	aout	Total A
1975	27.1	37.9	18.5	14.2	23.4	67.8	33.6	21.6	66.6	0	25.4	23.7	359.8
1976	26.1	23.1	47.3	6.2	22.4	38.2	49.1	32.4	35.8	59	17.3	39.3	396.2
1977	26.1	3.3	134.5	10.3	14.7	6.6	45.1	40.4	38.2	9.1	15	19.4	362.7
1978	11.2	26	46.7	3.9	3.9	54.7	102.5	23	23.9	3.9	0	50.1	349.8
1979	5.4	18.5	20.4	3.6	10.3	44.6	40.3	89.4	22.7	27.7	0	11.7	294.6
1980	116.1	26	21.3	1.7	33.7	29.8	76.8	28.1	41	4.3	0.2	3.4	382.4
1981	65.5	3.7	24.1	47.5	13.4	18.8	24.1	11.7	35.8	72.4	3.6	4.1	324.7
1982	37.3	23	1.9	15.3	21.8	45.6	12.4	56.2	80.1	8.5	3.7	15.5	321.3
1983	12	58.5	50.3	24.7	2.8	7.3	18.1	5.7	30.4	42.7	0.7	31.5	284.7
1984	3.9	31.7	17.8	12.2	18.9	92.4	24	24.1	4.3	6.8	0.2	15.4	251.7
1985	27.2	26.2	19.1	51	25.7	11.3	54.5	26.4	65.2	27.2	2.4	6	342.2
1986	50.8	23.1	3.5	13.5	31.1	14.3	83.1	2.5	35.8	15.2	51	13.1	337
1987	24.4	28.7	44.7	20.7	10.2	27.4	62.6	13.2	25	4.2	33.7	5	299.8
1988	15.5	18.7	33.8	9.2	23.7	4.2	35.8	31.6	55.6	62.1	8.3	6.5	305
1989	21.1	20.6	35.1	35.4	18.3	17.4	14	16.3	8.4	57.3	8.7	99.3	351.9
1990	44.6	12	10.8	8.7	80.3	0.2	34.8	43.1	66.9	17.1	15.2	136.6	470.3
1991	53.3	42.4	99.8	64.9	30.3	12.8	54	43	67.8	14.4	6.4	65.5	554.6
1992	74.7	34.3	44.3	14.2	34	29.9	24.3	43.6	82	23.2	13.4	4.5	422.4
1993	51.2	28.4	61.6	48.4	9.3	27.9	21.4	2.6	31.1	12.8	20.1	1.8	316.6
1994	22.7	3.8	16.8	28.7	31	23.9	19.4	23.3	41	2.4	4.5	11	228.5
1995	7.2	66.8	0.6	6.8	24.7	3	32.2	22.1	7.4	37.9	1.7	44.1	254.5
1996	149.7	39.7	26.6	18.2	24.9	72.9	56.3	49.8	30.2	78.9	13.2	30	590.4
1997	12.4	4.1	1.2	15	31.6	7.1	18.9	46.8	16.1	10.3	20.2	23.7	207.4
1998	64	72.5	54.2	21.25	22.3	10.2	28.7	29.2	16.7	31	0	15.1	365.15
1999	78.6	63.2	55.1	14.5	56.4	11.7	45.6	15.4	30.9	16.9	18.9	31.7	438.9
2000	24.1	81.5	64.6	34.5	37	41	10	14.7	86.5	76.4	21.6	18.8	510.7
2001	51.8	13.2	14.7	0.6	20.2	14.8	12.2	10	40.8	78.1	17.1	16.2	289.7
2002	39.9	31.83	34.02	23.26	25.39	27.82	42.56	29.23	39.36	30.69	11.46	27.29	362.81
2003	69	47	17	165	97	38	16	98	28	9	2	10	596

2004	18	25	114	67	20	3	74	20	40	91	9	46	527
2005	33	93	28	75	30	32	20	20	0	30	0	45	406
2006	6	12	1	63	32	13	4	44	33	26	8	26	268
2007	40	14	8	28	5	10	69	56	38	39	30	54	391
2008	8	10	12	49	6	7	29	25	66	9	4	17	242
2009	97	2	2	6	78	8	25	110	54	0	22	10	414
2010	77	16	54	3	37	2	13	78	36	26	20	2	364
2011	3	87	3	7	30	65	45	44	46	29	55	11	425
2012	41	55	0	0	36	55	39	25	27	2	5	33	318
2013	41	42	34	25	0	0	0	0	0	0	22	19	183
2014	48	5	42	16	18	80	26	2	18	28	22	9	314
2015	1.237	57.61	27.69	0	12.75	54.3	29.64	69.5	26.36	23.13	52.24	0	354.43
2016	10.23	0	16.7	9.70	26.7	0	0	2.47	17.36	42.13	14.24	57.6	197.18
2017	24.76	15.39	20.31	55.3	40.25	28.701	24.357	17.53	51.634	55.872	33.757	16.4	384.26
Moy	38.63	31.25	32.16	26.45	27.2	26.97	34.66	32.7	37.37	28.85	14.72	26.2	357.20

Annexe F

Tableau de l'évolution des moyennes des différences entre les précipitations mensuelles interannuelles mesurées simultanément aux stations de Tébessa et El Ma Labiod de 1975 à 2014.

année	sept	oct	nov	dec	Janv	fev	Mars	Avr	mai	juin	juil	aout
1975	30.7	-27.5	17	-7.3	-6.9	-29	20.4	13	-39.5	98.7	-9.1	-11.4
1976	33	-16.2	-20.2	3.8	-0.7	34	-8.6	-17	-0.2	-54.4	-16.7	-14.4
1977	-17.6	6.7	-95	-10.3	-10.2	25.4	-5.6	-20.8	-13	1.1	-15	9.2
1978	17.3	-0.9	-22.2	1	-3.4	-24.1	-72.6	34.7	-10.7	33.3	4.6	-27.6
1979	150.1	-8.8	-14.4	-0.6	14.7	-23.3	48.9	-63.4	8.5	-27.7	0	17.6
1980	-96.2	-18.7	13.5	38.9	0.6	-17.2	-63.4	-22	-2.4	38.2	-0.2	-1.4
1981	7.5	18.9	-17.1	-42.3	0.1	9.4	-21.2	62.9	35.1	-62.3	-0.5	30.9
1982	-30.6	20	25.8	4.3	-21.6	-37.2	-2.2	-56.2	-54.9	7.6	-3.3	-13.5
1983	56.4	-28.2	-39.1	-14.5	9	0.8	-17.6	17.5	-16.8	-41	4.5	-31.5
1984	10.3	30.4	5.9	8.8	-11.7	-87.5	-0.7	1.8	18.2	18.2	4.4	-14.9
1985	-0.4	30.5	-2.6	-27.5	-14.2	-7.8	39.3	-26.4	-42.2	-17.3	-2.4	2.8
1986	-44.9	31.9	18.4	-8.7	-31.1	-1.8	-69.9	7.6	-35.8	-15.2	43.1	1.3
1987	-23.9	-8.8	-27.9	-17.4	-7.8	-26.3	-49.3	10.3	7.9	72.3	-30	9.5
1988	8.5	-18.7	5.5	8.1	-7.7	6.1	-31.8	-21.6	-55.6	32.3	7.8	11.5
1989	-18.6	-16.8	-21.5	-34	105.2	-17.1	27.5	15.3	18.2	-26.1	7.5	-29.9
1990	-40.1	-12	56.4	23.2	-49.9	5.3	26.8	-43.1	-18.4	32	-15.2	-132.4
1991	-53.3	-19.5	-64.6	-55	-21.5	0.4	-35.7	-39.1	-67.8	-10.5	-3	-65.5
1992	-11.1	-33.3	-17	6.9	-31.5	-13.5	-14.7	-42.5	-68.3	-23.2	-10.1	3.5
1993	-28.4	-27.4	-48.8	-43.4	-9.3	-27.9	7.9	7	-27.1	-12.8	-11.2	7.5
1994	-13.4	66.3	-16.8	-28.7	-9.2	-23.9	24.7	-23.3	-41	32.5	-4.5	34.3
1995	43.2	-43.3	9.6	3.5	-10.3	46.9	11.3	-17.9	16.8	-15	1.6	-34.9
1996	-149.7	-30.6	-22.8	-12.8	-2.3	-71.3	-54.2	-44.5	-30.2	-75	-9.8	-30
1997	15.7	28	51.9	-13	-28.5	-3.5	-16.5	-44.1	-14.6	-9.5	-19.9	-22.3

1998	0.4	-34.8	-50.5	-8.65	-22.3	-10.2	2.2	-27.4	41.7	-29.1	5.2	-15.1
1999	-58.2	-22.1	-19.9	21.9	-52.4	-6.7	-35.8	-0.7	68.5	23.2	-13.7	-12.5
2000	-3.5	-53.1	-54.5	-19.6	-16.1	-36.1	-4.4	-9.8	-69.3	-76.4	-20.5	-18.8
2001	0.7	-8.7	6.4	10	-13.5	-7.3	-6.2	1.2	-5.4	-61.9	11.3	30.4
2002	-13.9	-12.73	-26.76	4.44	20.61	-1.12	-29.46	11.17	-8.26	-14.29	-0.16	-5.09
2003	53.5	37.4	18.1	40.7	17.6	5.1	39.1	27.6	18.2	22.3	22.3	13.4
2004	7	-8.4	-45.6	-18.6	-16.9	24.6	-67.7	-5.3	-40	-62.2	-8.5	-34.5
2005	2.3	-76.9	13	-48.7	1.5	-8.5	-19.3	31.3	37.2	-6.8	44.6	-12.8
2006	23	11.6	6.5	-32.6	-29	-6.1	47.6	9.7	-16	3.6	3.5	-19
2007	-22.8	-3.2	-1.7	-13.8	1.3	-8	-53.8	-33.7	9	-16.5	-30	-16.5
2008	52.3	34.1	-0.4	-22.6	47.9	-2.1	2.8	4.8	-10.1	3.5	-4	24.2
2009	1.8	0	-2	0.2	-64.3	8.5	-20.5	-70.9	-43.4	12.2	-12.7	-1
2010	-60.5	49.2	-54	6.4	-12.6	20	31.8	-55.2	-18	-22.5	-20	23.8
2011	53.4	-82.2	11	-7	-20	-65	-18.3	-18.6	-28.2	-29	-19.8	9.7
2012	13.8	20.4	4.1	9.3	-24.2	-19.4	-11.7	-25	-13.7	8	-5	-16.2
2013	-29.1	-34.7	-34	-21.6	45.6	0	13.8	15.2	10.3	8.3	-3	2
2014	-15.2	6.7	3.7	-14.7	-5	-72.6	12.8	36.3	35.9	-13.5	17.6	53.6
Moy	-3.76	-6.385	-11.314	-8.297	-7.249	-11.70	-9.35	-10.528	-11.63	-6.87	-2.75	-7.4

Annexe G

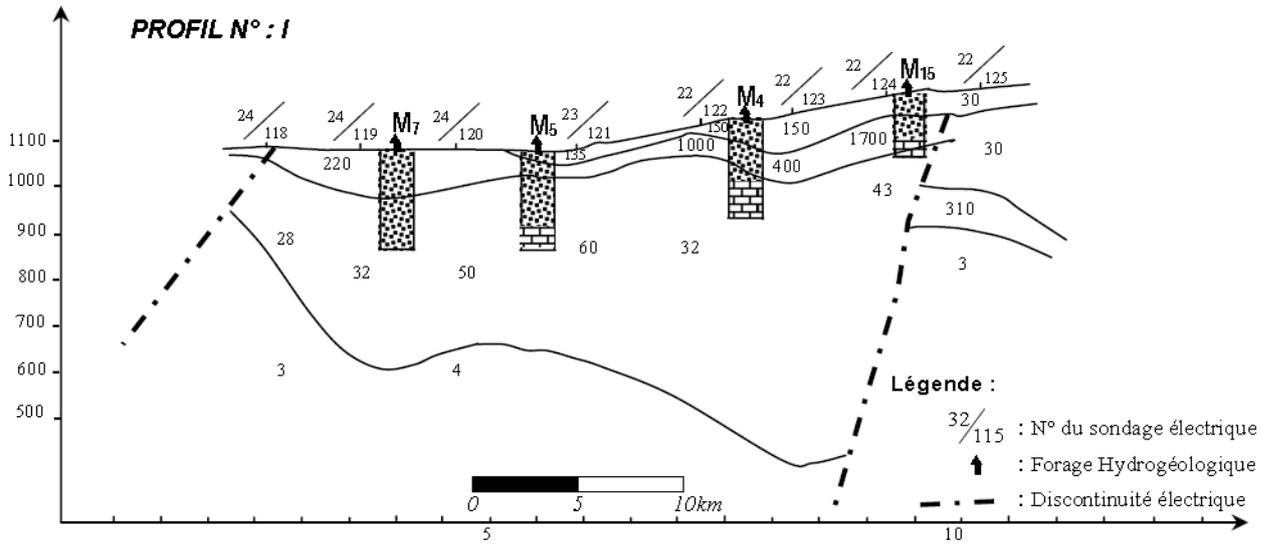
Résistivité de matériaux géologique

Table 4.3-2: Resistivities for geological and waste materials

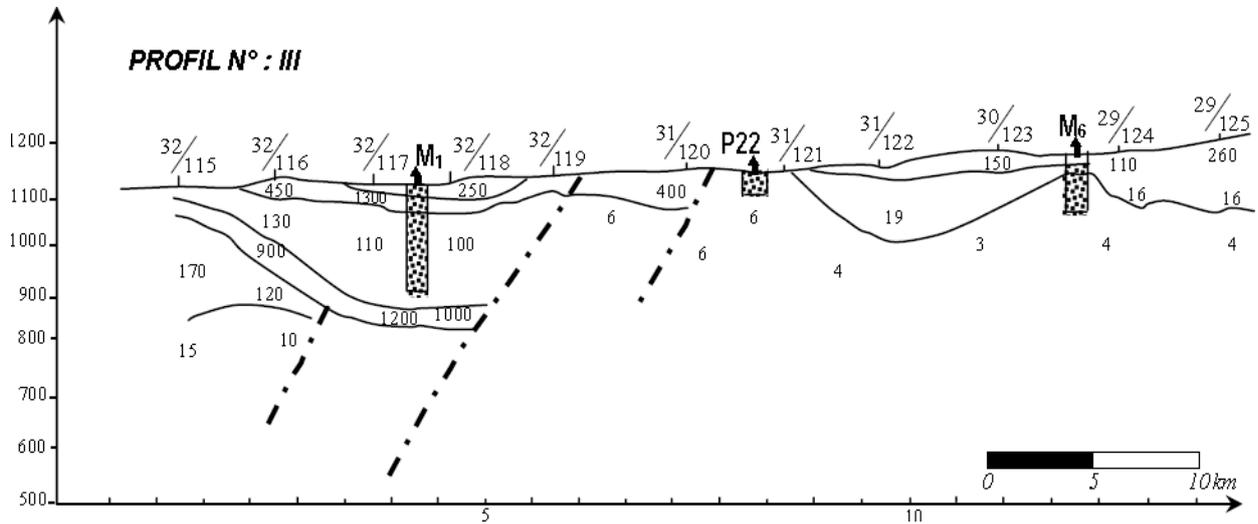
Material	Resistivity (in Ωm)	
	minimum	maximum
gravel	50 (water saturated)	$>10^4$ (dry)
sand	50 (water saturated)	$>10^4$ (dry)
silt	20	50
loam	30	100
clay (wet)	5	30
clay (dry)		>1000
peat, humus, sludge	15	25
sandstone	<50 (wet, jointed)	$>10^5$ (compact)
limestone	100 (wet, jointed)	$>10^5$ (compact)
schist	50 (wet, jointed)	$>10^5$ (compact)
igneous and metamorphic rock	<100 (weathered, wet)	$>10^6$ (compact)
rock salt	30 (wet)	$>10^6$ (compact)
domestic and industrial waste	<1	>1000 (plastic)
natural water	10	300
sea water (35% NaCl)	0.25	
saline water (brine)	<0.15	

Annexe H

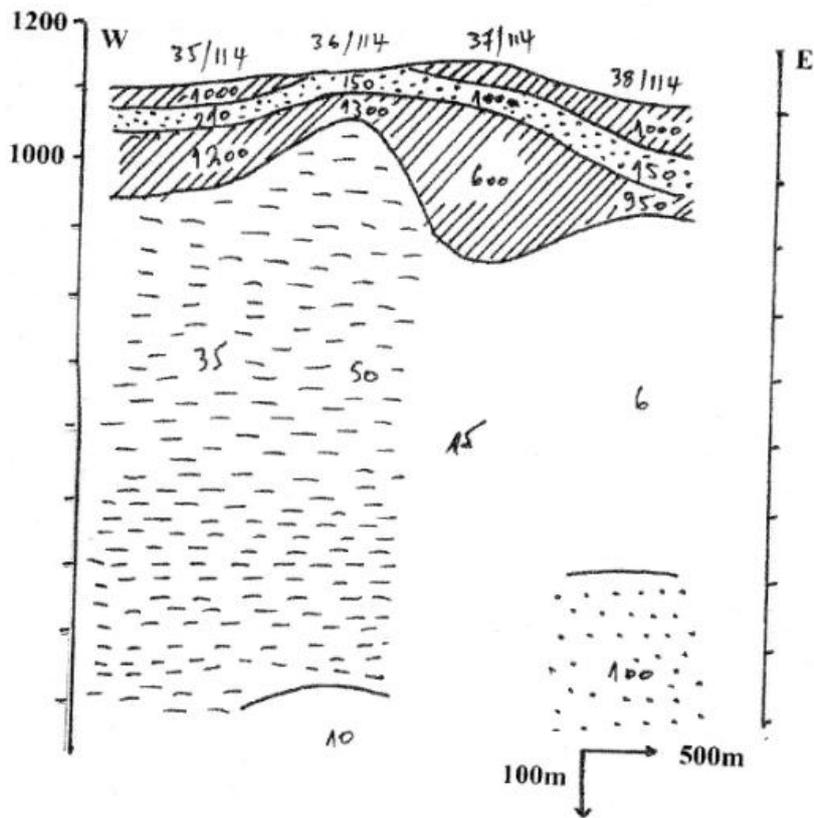
I - Quelques profils géoélectriques établis à partir de l'exploration géophysique faite en 1971 sur la plaine d'El Ma Labiod (in Rouabhia 2006)



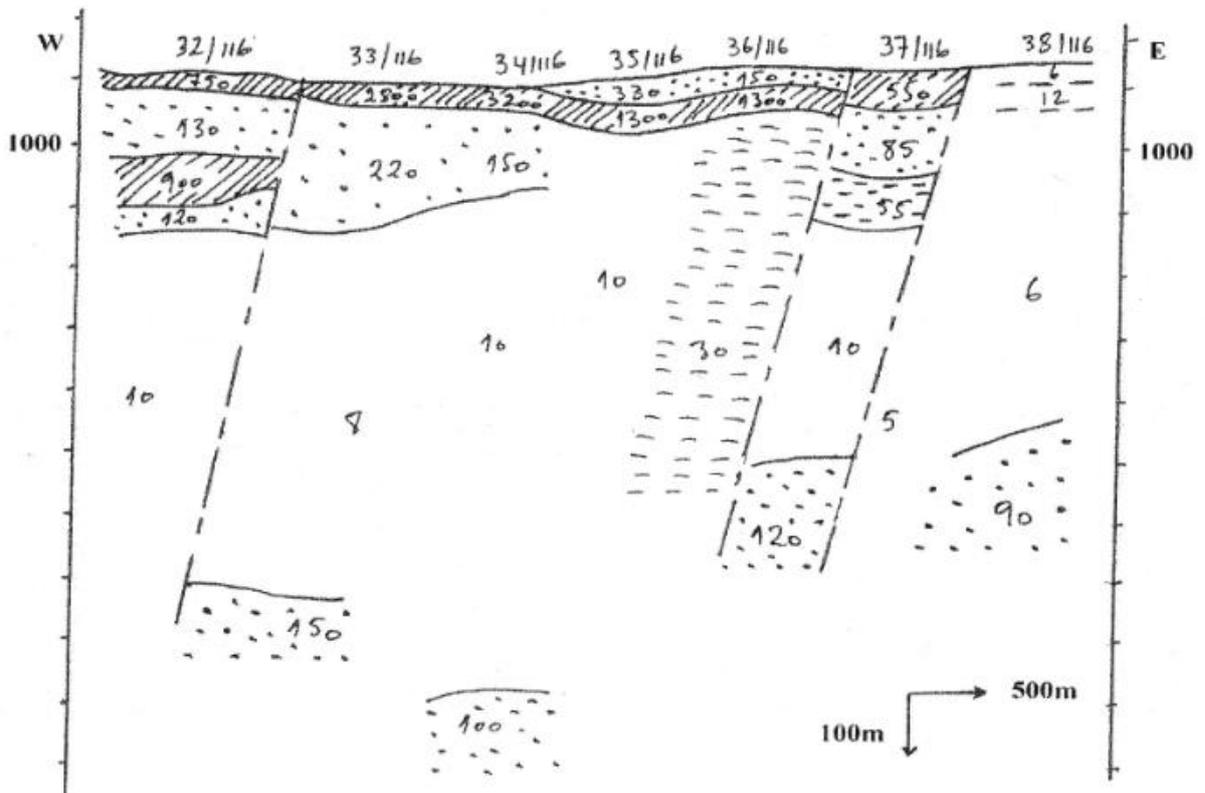
H1 : Coupe Géo électrique (Nord– Sud dans la partie ouest) passant par M7, M5, M4 et M15



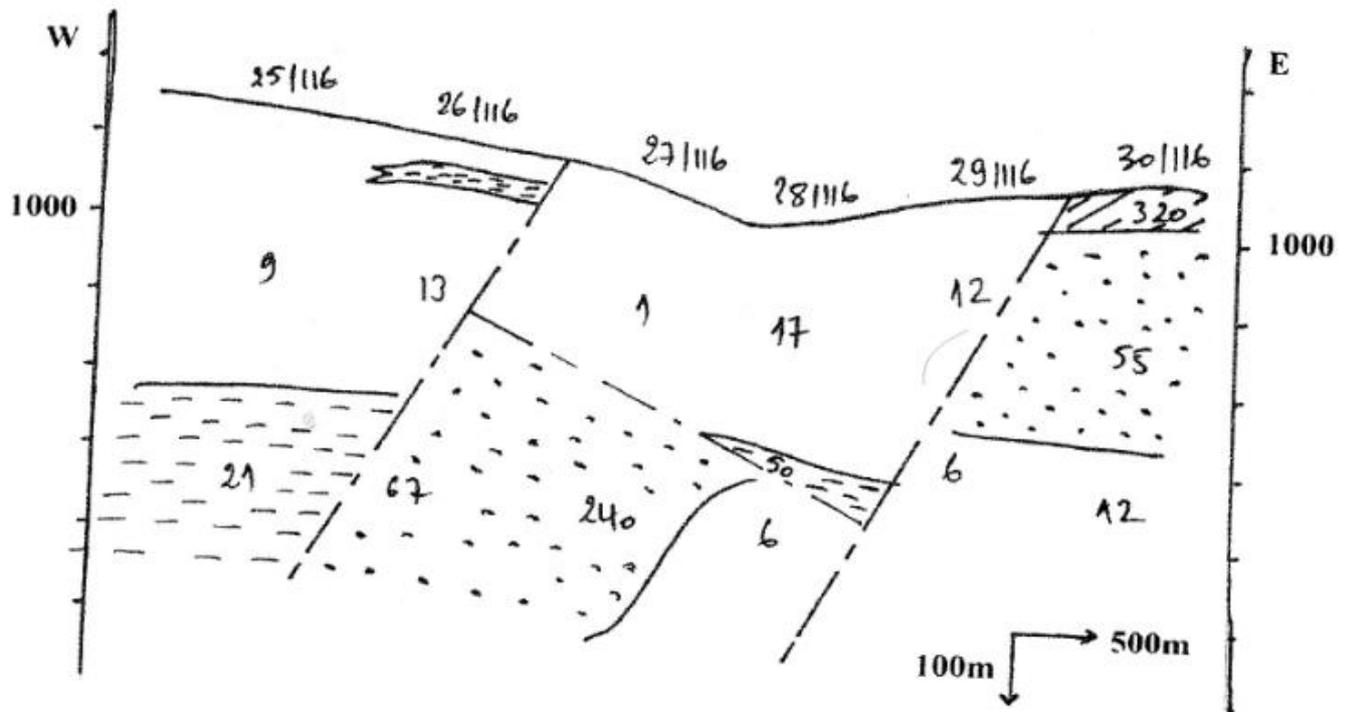
H2: Coupe Géo électrique (Nord Est – Sud Ouest dans la partie Est) passant par les forages M1, P22 et M6



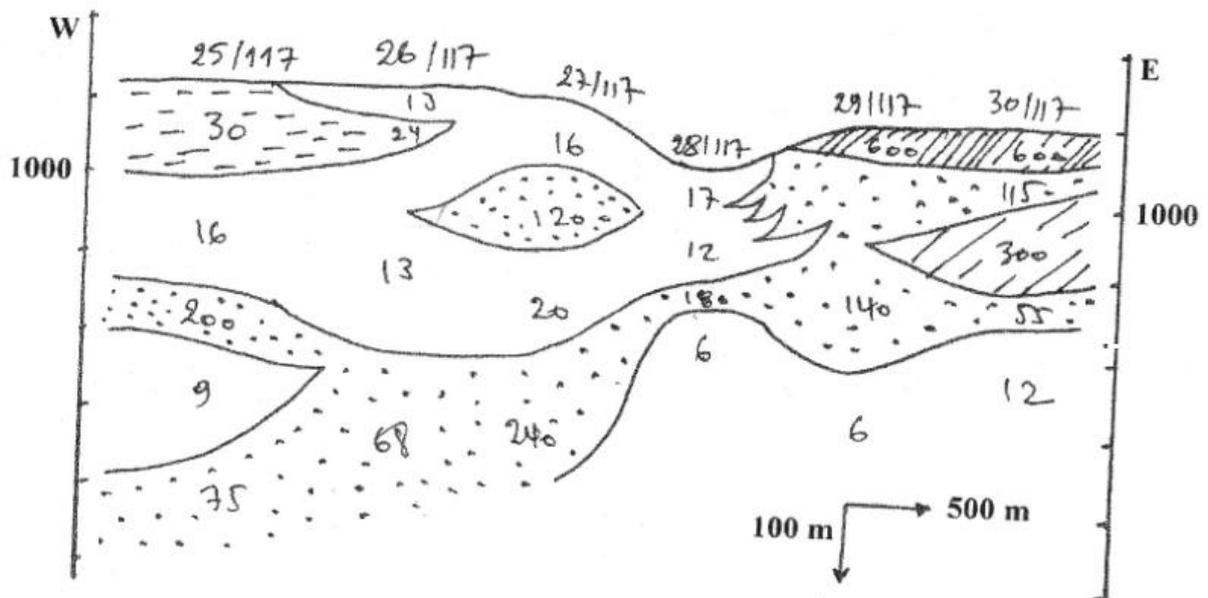
H5: Coupe Géo électrique réinterprétée



H6: Coupe Géo électrique réinterprétée



H7: Coupe Géo électrique réinterprétée



H8: Coupe Géo électrique réinterprétée

Annexe I

Table 4. Mean composition of the atmosphere

[After Mirtov (1961)]

Gas	Percentage by volume	Partial pressure (atm)
N ₂	78.1	0.781
O ₂	20.9	.209
Ar93	.0093
H ₂ O1-2.8	.001-0.028
CO ₂03	.0003
Ne	1.8×10^{-3}	1.8×10^{-5}
He	5.2×10^{-4}	5.2×10^{-6}
CH ₄	1.5×10^{-4}	1.5×10^{-6}
Kr	1.1×10^{-4}	1.1×10^{-6}
CO	$(0.06-1) \times 10^{-4}$	$(0.06-1) \times 10^{-6}$
SO ₂	1×10^{-4}	1×10^{-6}
N ₂ O	5×10^{-5}	5×10^{-7}
H ₂	$\sim 5 \times 10^{-5}$	$\sim 5 \times 10^{-7}$
O ₃	$(0.1-1.0) \times 10^{-5}$	$(0.1-1.0) \times 10^{-7}$
Xe	8.7×10^{-6}	8.7×10^{-8}
NO ₂	$(0.05-2) \times 10^{-6}$	$(0.05-2) \times 10^{-8}$
Rn	6×10^{-18}	6×10^{-20}

Annexe J

Tableau des moyennes des compositions de la pluie et de la neige (mg/l)* à travers le monde avec les sites et les dates de prélèvement (Feth et al, 1964). Traduction V. Cloutier et E. Rosa

Constituant	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	0.0	0.1	-	0.29	0.6	-	0.9
Ca	0.0	0.9	1.20	0.77	0.53	1.42	0.42
Mg	0.2	0.0	0.50	0.43	0.15	0.39	0.09
Na	0.6	0.4	2.46	2.24	0.35	2.05	0.26
K	0.6	0.2	0.37	0.35	0.14	0.35	0.13
NH ₄	0.0	-	-	-	0.6	0.41	0.48
HCO ₃	3	2.0	-	1.95	-	-	-
SO ₄	1.6	2.0	-	1.76	0.45	2.19	3.74
Cl	0.2	0.2	4.43	3.75	0.22	3.47	0.38
NO ₃	0.1	-	-	0.15	0.41	0.27	1.96
TDS	4.8	5.1	-	12.4	-	-	-
pH	5.6	-	-	5.9	5.3	5.5	4.1

*(1) Neige, Sponer Summit, U.S. Highway 50, Nevada (est du Lake Tahoe), altitude 7100 pieds, 20 nov. 1958;
 (2) pluie, à huit sites dans l'ouest de la Caroline du Nord, moyenne de 33 événements, 1962-1963;
 (3) pluie dans le sud-est de l'Australie, 28 sites sur une période de 36 mois, 1956-1957;
 (4) pluie au Menlo Park, Californie, hivers 1957-1958;
 (5) pluie, près du Lake of the Woods, nord-ouest de l'Ontario, moyenne de 40 événements, 1972;
 (6) pluie et neige, nord de l'Europe, 60 sites sur une période de 30 mois, 1955-1956;
 (7) pluie et neige à un site 20km au nord de Baltimore, Maryland, moyenne pour 1970-1971.

SOURCE: Feth et al., 1964 (1); Laney, 1965 (2); Carroll, 1962 (3); Whitehead et Feth, 1964 (4); Bottomley, 1974 (5); Carroll, 1962 (6); et Cleaves et al., 1974 (7).

Annexe K

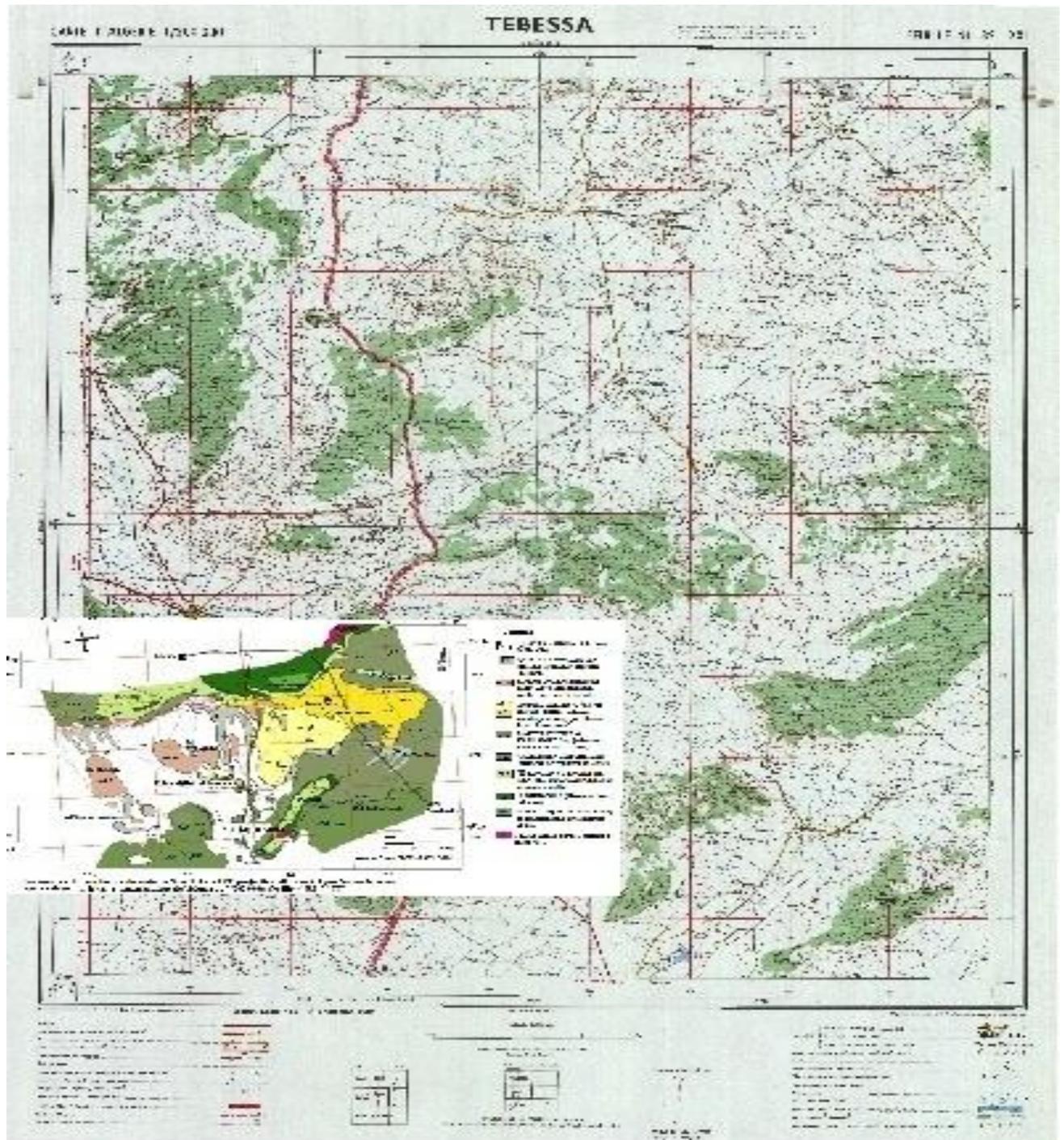
Lithologie de certains forages de la plaine d'El Ma Labiod

FORAGE	X	y	Z	-z	Lithologie (avec la profondeur en m)
M1	1000.525	235.00 0	1090	125	0 – 125 sables marneux
M2	992.975	229.1	1075	110. 5	0 - 2.5 sol, 2.5 – 11.5 gravier et sable grossier avec argile 11.5 – 88.5 grès avec passage ferrugineux, 88.5 – 110.5 calc marneux.
M2bis	992.975	229.07	1075	100	0 – 2 sol, 3 – 88 gravier, sables marneux et grès 88 – 100 calcaire
M3bbis	986.100	228.75	1100	150	0 – 14 sable 14 – 23 grès avec sables 23 – 137 sable argileux 137 – 150 sables.
M4	990.7	228.62 5	1080	179	0 – 1 sol argile silteuse 1 – 5 sable, 5 – 9 argile 9 – 16 sables 16 – 18 graviers siliceux et silex 18 – 31 marnes 31 – 62 sables 62 – 65 silts argileux 65 – 128 argile silteuse et silt argileux et sable 128 – 141 argile silteuse avec concrétions ferrugineuses 141 – 150 silt argileux avec gravier et sable 150 – 161 sable 161 – 164 cuttings de silex 164 – 170 marno calcaire 170 – 179.5 marnes gris-noires.
M4bis	990.7	228.6	1080	165	0 – 5 sable 5 – 9 argile 9 – 18 sable fin moy + gravier 18 – 31 argile 31 – 62 sables fin moy + gravier avec passage de quartz 62 – 150 silt argileux à argile silteuse 150 – 161 sable moy 161 – 164 silex 164 – 165 marno calc.
M5	992.200	230.80 0	1075	213	0 – 5 alluv., 5 – 13 argile plastic, 13 – 26 grès, 26 – 45 argile sableuse et sable argileux, 45 – 49 graviers quartzeux, 49 – 54 argile peu sableuse, 54 – 61 grès ferrugineux, 61 – 75 argile grès noir 75 – 95 argile sableuse à sable argileux, 95 – 122 sable moy à grossier 122 – 129 argile sableuse à sable argileux 129 – 136 argile 136 à 156 sable moy à grossier 156 – 196 calcaire 196 – 213 marno calc gris.
M5bis	992.19	230.78	1075	170	0 – 3 sol, 3 – 9 cailloutis 9 – 10 argile j. 10 – 130 sable, grès sable marneux, 130 – 136 argile plastic 136 – 156 sable, 156 - 170 calc.
M6					0 – 10 Argile jaune 10 – 30 marne grise
AT1	1007.325	229.49 1	1142	164	0 – 10 alluv 10 – 37 marne grise 37 – 45 marne blanche 45 – 63 grès t. fins 63 – 66 marne grise 66 – 146 grès t. fins 146 – 164 marnes noires.
AT1bis	1007.325	229.5	1136	150	0 – 13 sable 13 – 33 marne gréseuse 33 – 38 grès 38 – 69 calc 69 – 77 grès avec marne 77 – 87 marnes 87 – 109 grès 109 – 151 calc.
M7bis	992.78	232.6	1080	205	0 – 112 argile et sable avec 2 passages argileux de 5 à 6 mètres,
M8	990.890	229.77 5	1072	194	0 – 194 grès
M8bis	900.89	229.78 5	1072	190	0 – 195 grès
M9	998.4	229.82	1048	50	0 – 5 argile j. 5 – 45 argile sableuse 45 – 150 marne grise.

M10bis	998.572	232.92 5	1085	150	0 - 150 miocène
M10	998.975	234.45	1085	60	0 – 123 grès fin et moy 123 – 124 argile 124 – 141 grès 141 - 152 grès et marne
M12	998.65	223.6	1011	50	0 – 10 gravier 10 – 16 gravier et sable 16 – 27 gravier avec marne et argile 27 – 30 argile et marne 30 – 37 argile avec qlq gravier 37 – 70 marne grise avec qlq intercalation marno calc grise
MHT1(M15)	990.2	226.75	1106	85	argile – marne avec gravier 7 – 10 sable 12 – 13 calc. 13 – 16 marnes et gravier, 16 – 30 marne et argile avec passage sable marneux 30 – 70 sables grossiers avec marne verdâtre 70 – 142 calc.
henchir el miz	999.71	231.5	1048	65	0 – 5.5 argile marron, 5.5 – 45 sables et grès, 45 – 65 marnes.
M2bis	992.975	229.07	1075	100	
Henchir el miz (MA 12)	999.7	231.5	1060	40	0 – 5 argile j. 5 – 7.30 argile sableuse, 7.30 – 41 sable a sable avec gravillons.
M13	995.750.	231800 .	1080	100	0 – 1 alluv. 1 – 11 croute calc et quartz à quartz avec calc 11 – 24 sable fin moy et gros avec domino de quartz 24 – 25 sable fin 25 – 33 marne et sable quartzeux 33 – 56 sable fin à moy avec quartz 56 - 58 quartz avec sable à matrice argileuse 58 – 66 grès consolidés 66 – 72 sable fin et moy 72 – 85 grès à matrice argileuse 85 – 88 argile avec quartz 88 – 100 marnes noires.
M13bis	995.349	231.86 4	1080	100	0 – 1 sol 1 – 11 croute calc et qq quartz 11 – 85 sable avec quartz et grès 85 – 88 argile avec quartz, 88 – 150 marnes noires.
M14	992.2	229.55	1072	200	0 – 10 terre 10 – 40 sable fin et moy 40 – 48 sable à matrice marneuse 48 – 105 sable fin, moy et grossier 105 – 130 grès grossier quartzeux couleur j rouge et bl 130 – 134 grès avec lits calc 134 – 136 calc f 136 – 155 intercalations calc et manes 155 – 170 marne grise 170 – 184 grès grossier à matrice marneuse 184 – 196 sable fin et moy à matrice marneuse 196 – 200 marnes grises.
M15	990.2	226.75	1106	142	0 – 7 argile marne et gravier 7 – 10 sable 10 – 12 croute calc 12 -16 gravier et marne 16 – 25 marne argileuse 25 – 26 sable et quartz 26 – 42 sable gros + marnes 42 – 48 sable gros et moy 48 – 58 marne et sable 58 – 70 sable grossier + quartz 70 – 108 calc 108 – 116 calc avec marne 116 – 162 calc.
Dalaa	998.554	226.00 6	1034		
M16	992.684	229.99 1	1067	120	0 – 2 sol 2 – 24 sable fin à moy avec passage de gravier 24 – 41 gravier à silex et grès 41 – 95 gravier à silex et calc avec passage de sable 95 – 108 calc marneux et calc à silex 108 – 120 marne grise
M17	991.25	230.5	1075	200	0 - 5 alluv 5 -14 gravier 14 – 112 sable fin à moy + quartz 112 – 157 grès 157 – 175 calcaire gréseux 175 – 200 calc à silex 200 - + calc f

M18	989.565	230.25 8	1089	200	0 – 25 gravier, 25 – 190 grès, 190 – 200 calc
M19	988.973	229.90 9	1097	200	0 – 200 grès (varié)
BZ1	1000.417	221.90 5	1015	200	0 – 172 intercalation de calcaire beige et de calcaire blanc 172 - 200 marne grise plastique.

Annexe L



Affleurements géologiques de la plaine d'El Ma Labiod géoréférenciés et positionnés sur la carte de Tébessa au 1/200000^e feuille n° NJ-32 XXI.

Adjim M, et Bensaoula F, (2013) Application of the drastic groundwater vulnerability to the aquifer of Maghnia (North west of Algeria) Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°16, Décembre 2013, pp. 21-30 © 2013.

Adjoum B. et Slatni F, (1991). Apport de la géologie de l'ingénieur à un projet d'implantation des silos sur le site III. (Cimenterie d'El Ma Labiod). *Mémoire d'ingénieur - université de Tébessa Algérie. Non édité.*

Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010). L'agriculture écologiquement durable au Canada – Série sur les indicateurs agroenvironnementaux : rapport n° 3. W. Eilers, R. MacKay, L. Graham et A. Lefebvre (éds.). Agriculture et Agroalimentaire, Ottawa (Ontario). www4.agr.gc.ca/resources/prod/doc/prog/pdf/ascaaedc_rep2010_fra.pdf

Albergel et al (2003). Les processus hortonien et leurs importance dans la genèse et le développement des crues en zones semi arides. la houille blanche n°6 2003 »

Aller and al, (1987), DRASTIC : a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. *U.S.Environmental Protection Agency, Region 5, Ubrary (PI-12J) Chlcago, IL 60604.3590 t*

Alsharifa Hind Mohammad, (2016), Assessing the groundwater vulnerability in the upper aquifers of Zarqa River Basin, Jordan using DRASTIC, SINTACS and GOD methods. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*

Ambler Thompson and Barry N. Taylor, (2008), Guide for the Use of the International System of Units (SI) *NIST Special Publication 811 2008 third Edition*

Anane et al. (2013), GIS-based DRASTIC, Pesticide DRASTIC and the Susceptibility Index (SI): comparative study for evaluation of pollution potential in the Nabeul-Hammamet shallow aquifer, Tunisia. *Hydrogeology Journal. 2013; 21(3):715-731.*

André Musy (2005), Cours "Hydrologie générale Chapitre 2 Le bassin versant et son complexe <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html>

André Musy (2005), Cours "Hydrologie générale Chapitre 5 l'infiltration et les écoulements. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM) Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE) Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL)
<https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre5/chapitre5.html>

Andrzej J. and al, (2004). Groundwater vulnerability assessment and mapping. *International conference, Ustron, Poland 2004. International association of hydrogeologist selected papers.*

ARAB S., BOUCHELOUCHE D., HAMIL S., ARAB A.(2019), application of water quality index for surface water quality assessment Boukourdane Dam, Algeria. *Advances in sustainable and environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and water resources.*18(4): 308 – 314,.

Benarfa H. et Rezaiguia S. (2003), Essais d'infiltration et application de la méthode Styfszande pour l'étude de la salure des eaux souterraines de la région d'El Ma Labiod w. de Tebessa N.E. Algérie mémoire d'ingénieur en hydrogéologie, centre universitaire de Tébessa.

Binod Tiwari, PhD, (2008). Constant head and falling head permeability test. *Civil & Environmental Engineering Department EGCE 324L (Soil Mechanics Laboratory).*
http://ecs.fullerton.edu/~btiwari/geotech_Lab/mainpage_files/other/Permeability.pdf.

Boughanem Mohamed. (2011), Mise en évidence de l'alimentation de la nappe des sables miocènes d'El Ma Labiodh à partir des calcairesAlbo-Aptiens de Djebel Bouroumane. *Mémoire de master en hydrogéologie appliquée U. de Tébessa.*

BRGM, (non date), Notions générales de vulnérabilité.
http://sigessn.brgm.fr/IMG/pdf/notions_gen_vuln-2.pdf

Broholm MM. et al (2000) concurrent nitrate and Fe(III) reduction during anaerobic biodegradation of phenols in a sandstone aquifer J. contam.hydrol. 44:275-300

Cloutier V (2004) Origin and geochemical evolution of groundwater in the Paleozoic Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Quebec, Canada. PhD Thesis, INRS-Eau, Terre & Environnement, Quebec, Canada [in French and English]

Cloutier V. (2006) Hydrogeochemistry and groundwater origin of the Basses Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Quebec, Canada

Dassargues, A., Monjoe, A., (1991). Modèle hydrogéologique en zone aride ou semi-aride. *Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed, AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris 0 (1991), p, 17-22*

Dassargues, A., Monjoe, A., (1992). Modélisation mathématique des aquifères. Laboratoire de géologie de l'ingénieur, de l'hydrogéologie et de la prospection géophysique. U. Lg Liège.

Deeksha Katyal and al, (2018), Recent trends in groundwater vulnerability assessment techniques: A review. *International Journal of Applied Research* 2017; 3(5):646-655

Defaflia N. (2010) Caractérisation géologique, géométrie canique et potentiel industriel des coches carbonatées de la région de Tébessa. Thèse de doctorat, Institut des Mines (Alger).

Dhundi Raj Pathak and Akira Hiratsuka (2009),. An integrated GIS based fuzzy pattern recognition model to compute groundwater vulnerability index for decision making. *Journal of Hydro-environment Research* 5 (2011) 63e77

Djebbouri H. (2011): Ressources et essai de gestion intégrée des eaux souterraines du bassin d'El Malabiod w. de Tébessa, Nord - Est algérien. Mémoire de magister. Univ. Badji Mokhtar - Annaba

Dubrovsky, N. et Hamilton, P. (2010). Nutrients in the nation's streams and groundwater: national findings and implications. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia (Fact Sheet 2010-3078; pubs.usgs.gov/fs/2010/3078/).

Environnement Canada (2003). Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique – ion nitrate. Bureau national des recommandations et des normes, Direction générale de la coordination et des politiques relatives à l'eau, Environnement Canada. 130 p. (Santé des écosystèmes : solutions fondées sur la science, rapport no 1-6; http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/collection_2008/ec/En1-34-6-2003F.pdf).

FAO, (non daté), AQUASTAT - Système d'information mondial de la FAO sur l'eau et l'agriculture <http://www.fao.org/aquastat/fr/data-analysis/irrig-water-use/irrig-water-requirement>

Fatih Boucenna (2009) : Cartographie par les différentes méthodes de vulnérabilité à la pollution de la plaine alluviale de l'oued Djendjen (Jijel, Nord – Est algérien) mémoire de magister. Univ. Badji Mokhtar - Annaba

Foster and al, (1995) groundwater pollution risk assessment methodology using available data CEPIS Young professional DAEE-Departement des eaux et de l'énergie, Sao Polo, Brasil. 1ere édition 1988, 2e édition 1991, 3e édition 1995.

Allan Freeze et John Cherry (1979) les eaux souterraines, chapitre 7 Évolution chimique des eaux souterraines naturelles. (Traduction réalisée par : Vincent Cloutier (Canada) et Éric Rosa (Canada)) <http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-francais/chapitre-7/>

S.S.D. Foster et P.J. Chilton (2003) : Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation *British Geological Survey, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB, UK.*

S.S.D. Foster, (2013), The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal* DOI 10.1007/s10040-013-1019-7.

Gadalia A., (1995) Chimie de la minéralisation Antea-Groupe BRGM

G. Castany et J. Magrat (1977), dictionnaire français d'hydrogéologie. Editions du BRGM.

G. de MARSILY et M. BESBES (2017), les eaux souterraines, RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT N°86. <https://www.oieau.fr/audoc/system/files/33898.pdf>

GIROUX, Isabelle, (2003). *Contamination de l'eau souterraine par les pesticides et les nitrates dans les régions en culture de pommes de terre*, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement, Québec, envirodoq no ENV/2003/0233, 23 pages et 3 annexes.

Gogu, R., Hallet, V., Dassargues A. (2003). Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques Application to the Néblon river basin (Belgium). *Environmental Geology*.

Gouaidia Layachi and al, (2011), Evaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées : cas de la nappe de Meskiana (Est algérien). *Secheresse 2011* ; 22 : 35–42

Guefaifia Omar (2007), Identification et caractérisation d'un milieu karstique et sa contribution à l'alimentation du champ captant : Hammamet – Ain Chabro cas de la zone de Bouakous Hammamet région de Tébessa. Thèse de doctorat Université de Annaba.

Guefaifia Omar (1996), Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe aquifère d'El Ma Labiod. Wilaya de Tébessa. Mémoire de magistère université de Annaba.

Howard S. Weather and al, (2010) *Groundwater modeling in arid and semi arid areas. Cambridge University press 2010.*

I.G.N, (1950). Carte d'Algérie 1/50000. El Ma EL Abiod feuille n ° 235. *Institut géographique national 1950 - 136bis rue Grenelle Paris (VII^e).*

Ilhem Abdeslam and al, (2017), Application of drastic method for determining the vulnerability of an alluvial aquifer: Morsott - El Aouinet north east of Algeria: using arcgis environment, *Energy Procedia 119 (2017) 308–317.*

INC, (2005) Institut national de cartographie, Carte d'Algérie au 1/200000°, Tébessa, feuille NJ- 32 XXI – système géodésique Nord Sahara 1959 projection clarke 1880 – M.T.U. fuseau 32. - 123 rue de Tripoli Hussein Dey Alger.

Infoclimat (2016) climatologie de Tébessa – Algérie année 2015. (<https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2015/tebessa/valeurs/60475.html>)

IAHS/AISH (2000) IAHS Handbook, IAHS Press, Wallingford (Royaume Uni), 94 p.

Iskandar Benhadj, (2008), Observation spatiale de l'irrigation d'agro-systèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech. Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier. Discipline: Océan et atmosphère des surfaces continentales.

J M Vila (1993), Notice explicative de la carte géologique à 1/50.000e Aine Telidjane feuille N° 265 ORGM Office National de la recherche géologique et Minière, Edition du service géologique de l'Algérie, Boumerdes, 1993.

J. M. Vi'as et al (2004). A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Environ Geol* (2005) 47: 586–595 DOI 10.1007/s00254-004-1185-y https://books.google.dz/books?id=LTqEEL6ROcgC&pg=PA78&lpg=PA78&dq=GOD+method+groundwater&source=bl&ots=yXVFTng4d3&sig=_d78OoDCSrzzneaROmP07ftVb7A&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwjX5KLG9aTZAhWF7xQKHVz2DeI4ChDoAQhzMAk#v=onepage&q=GOD%20method%20groundwater&f=false

J. P. Laborde, (2009) ELEMENTS D'HYDROLOGIE DE SURFACE https://hydrologie.org/BIB/manuels/Laborde_2009.pdf

J. Rosnoblet, 2002, Dynamique du bilan hydrique parcellaire au sein de l'espace rural – conséquences sur les transferts hydrologiques. Thèse de Doctorat. Institut National Agronomique de Paris-Grignon.

Jacques Beauchamp (2006) les systèmes aquifères, cours en ligne. Université de picardie. <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours.qge/du-7.htm>

John D. Hem (1985) Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. 3e édition. USGS.

Johnson, C. et Kross, B. (1990). Continuing importance of nitrate contamination of groundwater and wells in rural areas. *Am. J. Ind. Med.*, 18: 449–456.

K.Krishna Veni and A.V.Ramaraju (2017), Groundwater vulnerability Assessment by DRASTIC method using GIS, *SSRG International Journal of Geo informatics and Geological Science*.

Karaouzas I., et al(2009), Linking Hydrogeological and Ecological Tools for an Integrated River Catchment Assessment, *Environ Model Assess*, 14, 677–689.

Klaus Knödel et al, 2007, Environmental Geology, Handbook of Field Methods and Case Studies, ISBN 978-3-540-74669-0 Springer Berlin Heidelberg New York

Laura Sigg, Philippe Behra et Werner Stumm (2014) Chimie des milieux aquatiques 5e édition aux éditions DUNOD Paris.

Luís Filipe Sanches Fernandes and al,(2014), DRASTIC and GOD vulnerability maps of the Cabril River Basin, Portugal. *Civil Engineering Souterraine* - Symposium - Pollution des Eaux Souterraines; Actes du Colloque de Moscou, Août (1971): IAHS-AISH Publ. No. 103, 1975.

Majed Ibrahim and Barbara Koch: (2015) Assessment and Mapping of Groundwater Vulnerability Using SAR Concentrations and GIS: A Case Study in Al-Mafraq, Jordan. *Journal of Water Resource and Protection*, 2015, 7, 588-596 doi.org/10.4236/jwarp.2015.77047

Marcel Déleze (non datée), Calcul de la masse volumique de l'air en fonction de la pression, de la température et de l'humidité relative. <https://www.deleze.name/marcel/physique/rosee/masse-vol.html>

Margat J. (1968), Groundwater vulnerability to contamination. *BRGM; Orleans, France*.

Margat j. (1996), Nappe souterraine, <https://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICNAPPE.HTM>

McGreer, E.R. et Belzer, W. (1999). Contaminant sources. In: Health of the Fraser River aquatic ecosystem. Vol. 1. A synthesis of research conducted under the Fraser River Action Plan. C. Gray et T. Tuominen (eds.). Environnement Canada, Vancouver, C.B. p. 7–22 (Publication No. DOE FRAP 1998-11)

Meliani O. (2018), Etude de la flexure sud atlasique à partir de données de champs potentiels. Thèse de doctorat en Imagerie et Cartographie Numériques en Géosciences. Université des sciences et de la technologie Houari Boumédiène.

Mogaji, K.A. et al (2014). Modeling groundwater vulnerability to pollution using Optimized DRASTIC model *IOP Conf. Ser: Earth Environ. Sci.* 20 012002

Mouhcine Batchi, (2017), Étude comparative de deux modèles (DRASTIC et SI) pour l'évaluation de la sensibilité de la nappe phréatique de Mnasra (Maroc nord-occidental) à la pollution d'origine agricole. *Géographie Physique et Environnement* volume 11 2017

MRE (2014) le décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine JORADP 2015.. <http://www.joradp.dz/FTP/JO-FRANCAIS/2014/F2014013.pdf>

N. Boualla and al, (2017). Assessing Vulnerability of groundwater with GOD model: a case study in Oran Sebkhia basin - Algeria N. *Journal of New Technology and Materials JNTM Vol. 07, N°01 (2017)18-26*

Nadjat Knouz and al, (2017), Cartography of intrinsic aquifer vulnerability to pollution using GOD method: Case study Beni Amir groundwater, Tadla, Morocco. *Journal of Materials and Environmental Sciences ISSN : 2028-2508*

Nobre R.C.M., et al. (2007), Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool, *Journal of Contaminant Hydrology*, 94, 277–292.

Oberlin G. & Hubert P. (1999) Refondation du concept de régime hydrologique, Rapport quadriennal du CNFGG publié avec le concours de l'Académie des Sciences, 269-277.

OFEV (non daté), le bilan hydrique de la suisse <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/info-specialistes/etat-des-eaux/wasserhaushalt-schweiz.html>

Oleau, (2021) glossaire eau et milieux aquatiques éditions de l'office international de l'eau 87065 Limoges Cedex France. http://www.glossaire-eau.fr/sites/default/files/glossaire_eau_biodiv_fr_20210308.pdf?v=1615228287

Olivier Atteia (2005), Cimie et pollution des eaux souterraines, 398p. Editions TEC et DOC, 11, rue Lavoisier 75008 Paris.

OMS, (2007), Nitrate and nitrite in drinking-water, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Organisation mondiale de la Santé (WHO/SDE/WSH/07.01/16).

P. Hubert (2001) dictionnaire français de l'hydrologie terme « hydrologie ». <http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICHYDROL.HTM>

Panagopoulos, G.P., Antonakos, A. and Lambrakis, N.J. (2006) Optimization of the DRASTIC Method for Groundwater Vulnerability Assessment via the Use of Simple Statistical Methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, 14, 894-

911 https://www.researchgate.net/publication/226268507_Optimization_of_the_DRASTIC_Method_for_Groundwater_Vulnerability_Assessment_Via_the_Use_of_Simple_Statistical_Methods_and_GIS

Pfnader, W.H., Brown, J.R. et Garner, G.B. (1993). Terminology for reporting nitrate concentration. University of Missouri Extension report G9802. <http://extension.missouri.edu/publications/DisplayPub.aspx?P=G9802>

R. Krishna et al (2015), Groundwater vulnerability to pollution mapping of Ranchi district using GIS, *Appl Water Sci.* 2015 Dec; 5(4): 345–358. . doi: [10.1007/s13201-014-0198-2](https://doi.org/10.1007/s13201-014-0198-2)

R.C. Gogu et A. Dassargues (2000), Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental geology* 30 (-) 2000. Springer vertag

René Alberto et al (2014). Land-Use Impact and Nitrate Analysis to Validate DRASTIC Vulnerability Maps Using a GIS Platform of Pablillo River Basin, Linares, N.L., Mexico *International Journal of Geosciences*, 2014, 5, 1468-1489

Rouabhia A (2006), Vulnérabilité et risqué de pollution des eaux souterraines de la nappes des sables miocènes de la plaine d'El Ma Labiod Nord Est algérien. Thèse de doctorat université Badji Mokhtar. Annaba.

Ruckart, P., Henderson, A., Black, M. et Flanders, D. (2008). Are nitrate levels in groundwater stable over time? *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 18: 129–133.

S. Takizawa, (2008). Groundwater management in asian cities. *Springer. ISSN 1865-8504. library of congress control number 2008923163*
https://books.google.dz/books?hl=fr&lr=&id=GOn5dWDRtLAC&oi=fnd&pg=PR6&dq=Groundwater+management+in+asian+cities.&ots=KkKlE62s&sig=y9YIb1YipEGMI9fm_ORfAhoHRHo&redir_esc=y#v=onepage&q=Groundwater%20management%20in%20asian%20cities.&f=false

Santé Canada, (2013), Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Document technique – Le nitrate et le nitrite. N o de publication : 130472 Cat. : H144-13/2-2013F-PDF ISBN :978-0-660-21550-1 <https://www.canada.ca/content/dam/canada/health-canada/migration/healthy-canadians/publications/healthy-living-vie-saine/water-nitrate-nitrite-eau/alt/water-nitrate-nitrite-eau-fra.pdf>

Schnebelen, (2002), Schnebelen N, Platel JP, Lenindre Y, et al. Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise – Rapport BRGM/RP-51178-FR. SI : BRGM, 2002.

Sihem Boutaineh et al, undated, Groundwater resources, the DRASTIC method and applications in Jordan.

Touahria K., Fatah S. Influence de l'environnement sur la qualité des eaux en zone semi-aride: Les eaux souterraines de la région de Tébessa. Conference 2014; 3rd International Conference Water-Climate' (2014): SYNERGIES NORTH-SOUTH October 21, 22 and 23, 2014 Hammamet (Tunisia).

UGF BRNO (1971). Prospection géophysique de la cuvette d'El ma Labiod. *Direction des études du milieu et de la recherche hydraulique – rapport inédit archives ANRH DEW Tebessa.*

Vias J.M, Andreo B, Perles MJ, Carrasco F., (2005), A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Journal of Environmental Geology*. 2005; 47:586-595.

SDAL, (2014) données de la subdivision de l'agriculture locale de l'année 2014 non éditées.

W. S. Jang and al (2017), Aquifer vulnerability assessment for sustainable groundwater management using DRASTIC. www.mdpi.com/2073-4441/9/10/792/pdf.

You-Hailin –(2011) - Evaluation of Groundwater Vulnerability with Improved DRASTIC Method *Procedia Environmental Sciences 10 (2011) 2690 – 2695. 2011 3rd International Conférence on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT 2011)*

Zair Nadjat (2009), Etude hydrogéologique et problèmes de vulnérabilité des nappes aquifères dans la région d'Oum El-Bouaghi, Magistère, Option : Hydrogéologie, Environnemental et modélisation. Universté Badji Mokhtar – Annaba.

