



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah

Faculté des Sciences et Techniques

www.fst-usmba.ac.ma



Année Universitaire : 2017-2018



Master Sciences et Techniques : Géosciences et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et
Techniques

Etude de la fracturation et synthèse hydrogéologique de
l'aquifère des calcaires liasiques du causse d'Agourai,
Maroc

Présenté par:

ELOUALI Anas

Encadré par:

- LAHRACH Abderrahim, FST – Fès,

- BOURAK Abdellah, ABHS

Soutenu le 12 Juin 2018 devant le jury composé de:

- Pr. Lahcen Benaabidate
- Pr. Abderrahim Lahrach
- Pr. Abdel-Ali Chaoui
- Mr. Abdellah Bourak
- Pr. Hmidou Elouardi

Stage effectué à : ABHS,



Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	6
Problématique	6
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	8
I.1. Cadre géographique et socio-économique	9
I.2. Cadre géologique.....	9
I.3. Cadre géomorphologique	12
CHAPITRE II : PHENOMENES OBSERVEES AU NIVEAU DES FORMATIONS CARBONATEES LIASIQUES DANS TROIS SITES	13
II.1. Karstification.....	14
II.2. Bréchification.....	16
II.3. Fracturation	17
II.3.1. Connectivité des fractures et relation avec les joints de stratification	17
II.3.2. Ouverture des fractures	19
II.3.3. Réseau de fractures denses	20
II.3.4. Chronologie des fractures.....	21
CHAPITRE III : ANALYSE DE LA FRACTURATION AU NIVEAU DES TROIS SOURCES.....	22
III.1. Ain Maârouf	23
III.2. Ain Boujaoui.....	31
III.3. Ain Bouchermou.....	35
CHAPITRE IV : SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE	40
IV.1. Contexte climatique.....	41
IV.1.1. Précipitations	41
IV.1.2. Température	43
IV.1.3. L'évapotranspiration.....	44
IV.1.4. Courbe Omrothermique	45
IV.2. Contexte Hydrologique :	46
IV.3. Drainage et écoulement des eaux souterraines	47
IV.4. Caractéristiques des sources	49
IV.5. Caractéristiques de l'aquifère	50
IV.5.1. Limite de l'aquifère	50
IV.5.2. Fonctionnement de l'aquifère :	50
CHAPITRE V : DISSCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	53

CONCLUSION GENERALE	57
Références	58

LISTE DES FIGURES

PREMIER CHAPITRE

Figure 1: Situation de la zone d'étude.....	9
Figure 2 : Log Stratigraphique du cause d'Agouraï.....	10
Figure 3 : Extrait de la carte géologique d'Agouraï et d'El Hajeb montrant la géologie du cause d'Agouraï.....	11

DEUXIEME CHAPITRE

Figure 4: phénomène de karstification dans les roches carbonatées liasiques autour de la source de Bouchermou.....	14
Figure 5 : Gouffre formé par le phénomène de dissolution des carbonates observé près de la source de Bouchermou.....	15
Figure 6 : Aspect bréchiq ue et ruiniforme des calcaires liasique à Bouchermou.....	16
Figure 7 : Zone broyée près de la source de Bouchermou.....	16
Figure 8 : intersection fractures-joints de stratifications dans les calcaires liasiques de Bouchermou..	17
Figure 9 : Modèle expliquant l'importance de l'intersection des fractures et des joints de stratification.....	18
Figure 10 : fracture ouverte dans le site de Bouchermou.....	18
Figure 11 : fracture ouverte dans le site de Maârrouf.....	19
Figure 12 : Réseau dense de fractures affectant les calcaires liasiques de Bouchermou.....	19
Figure 13 : photo montrant la chronologie des fractures dans le site de Maârrouf.....	20

TROISIEME CHAPITRE

Figure 14 : coupe géologique au niveau d'Ain Maârrouf.....	22
Figure 15 : la fracturation mesurée dans la station 1 à Ain Maârrouf.....	23
Figure 16 : Schéma représentatif expliquant la résurgence d'Ain Maârrouf, localisée à l'intersection de deux failles normales orientées N40 et N122.....	24
Figure 17 : Aspect de la fracturation mesurée à la surface d'une strate calcaire à Ain Maârrouf.....	25
Figure 18 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 3 à Ain Maârrouf.....	25
Figure 19 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 4 à Ain Maârrouf.....	26
Figure 20 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 5 à Ain Maârrouf.....	27
Figure 21 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 6 à Ain Maârrouf.....	28
Figure 22 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 7 à Ain Maârrouf.....	28
Figure 23 : Rosace directionnelle générale des fractures mesurées dans les différentes stations au pourtour de la source Ain Maârrouf.....	29
Figure 24 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 1 à Ain Boujaoui.....	30

Figure 25 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 2 à Ain Boujaoui.....	31
Figure 26 : représentation des familles de fracture mesurée dans la station 3 à Ain Boujaoui.....	32
Figure 27 : représentation de deux familles de fractures dans la station 3 à Ain Boujaoui.....	33
Figure 28 : schéma explicative du principe de recoupement dans la station 3 à Ain Boujaoui.....	33
Figure 29 : Rosace directionnelle générale des fractures mesurées dans les différentes stations au pourtour de la source.....	34
Figure 30 : coupe géologique au niveau de Bouchermou.....	35
Figure 31 : représentation des familles des fractures mesurées dans la station 1 à Ain Bouchermou.....	35
Figure 32 : représentation des familles de fractures mesurées dans la station 2 à Ain Bouchermou.....	36
Figure 33 : représentation des familles de fractures mesurées dans la station 3 à Ain Bouchermou.....	37
Figure 34 : représentation des familles de fractures mesurées dans la station 4 à Ain Bouchermou.....	37
Figure 35 : Rosace directionnelle générale des fractures mesurées dans les différentes stations au pourtour de la source.....	38

QUATRIEME CHAPITRE

Figure 36 : Précipitations moyenne mensuelles au niveau de la station d'Agourai (2010-2013).....	41
Figure 37 : Historique pluviométrique de la station d'Agourai (2010-2013).....	41
Figure 38 : Températures moyenne mensuelles interannuelles au niveau de la station d'Agourai pour la période 2010-2013.....	42
Figure 39: Diagramme ombrothermique de la station d'Agourai (2010-2013).....	44
Figure 40 : carte de réseau hydrographique du cause d'Agourai.....	46
Figure 41: schéma explique le sens d'écoulement des eaux souterraines et l'alimentation du plaine de Sais (Amraoui, 2005 modifiée).....	47
Figure 42: Schéma explicable d'écoulements et zones de recharge à l'échelle du bassin (Saracco Ginette, 2011).....	48
Figure 43: carte piézométrique de l'aquifère liasique du cause d'Agourai.....	50

CINQUIEME CHAPITRE

Figure 44 : Rosace directionnelle générale montrant les principales familles de fractures au niveau des trois sources.....	53
Figure 45 : Géologie et structure du Causse d'Agourai.....	54
Figure 46 : coupe transversale du cause d'Agourai.....	55

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Précipitations et températures moyenne mensuelles de la station d'Agourai.....	40
Tableau 2 : Températures moyenne mensuelles de la station d'Agourai.....	42
Tableau 3 : Principales sources du cause d'Agourai.....	49
Tableau 4 : Paramètres hydrodynamiques disponibles sur le Causse d'Agourai.....	51

INTRODUCTION GENERALE

Le Causse d'Agouraï offre une ressource en eau d'une importance capitale pour le développement socio-économique local et régional. En effet, cette ressource est utilisée pour l'alimentation en eau potable de plusieurs communes, elle donne naissance aux sources qui alimentent Meknès en eau via oued Boufekrane, contribue à renouveler le potentiel de la plaine de Fès-Meknès et abrite des centaines d'ouvrages exploités pour l'irrigation. La gestion rationnelle de cette ressource en eau est le seul gage d'équilibre entre les différents usages. Elle ne peut être atteinte qu'à travers une étude détaillée qui intègre les éléments quantitatifs et qualitatifs relatifs à la compréhension de ce système, son évolution spatio-temporelle, et ses utilisations.

Problématique

Le Lias des Causses du Moyen Atlas a constitué un objectif de recherche d'une grande importance pour beaucoup de géologues et hydrogéologues. Les études structurales antérieures réalisées dans ces causses se sont surtout concentrées sur l'analyse quantitative et la modélisation de la fracturation le long des bordures du bassin de Saïs.

Le but de ce mémoire est de contribuer à l'amélioration, à la fois les modèles de fracturation analysée sur le terrain et les modèles hydrogéologiques de façon à permettre, à terme, de les coupler directement. Les résultats escomptés permettront une meilleure connaissance du fonctionnement des aquifères fracturés et karstiques du causse d'Agouraï et par conséquent une gestion plus efficace des ressources hydriques dans cette régions.

En effet, la circulation des eaux dans les roches compactes est contrôlée principalement par la fracturation développée au cours de leur histoire géologique (pendant la sédimentation, durant les phases diagénétiques, le plissement ou post-plissement). Cette fracturation n'est pas aléatoire et elle résulte de l'histoire tectonique du réservoir traduisant surtout les différentes phases de déformation.

Le premier objectif est l'identification du paramètre tectonique (densité de fracture, ouverture, densité d'intersection, chronologie) dans le causse d'Agouraï, aux alentours des principales sources (Ain BouChermou, Ain Maârouf, Ain Boujaoui) d'eau alimentant les oueds de la région à potentialités hydro-géologiques importantes, mais le but ultime demeure le couplage direct des modèles de fracturation avec les modèles hydrogéologiques. Les résultats escomptés permettront une meilleure connaissance du fonctionnement de l'aquifère

fracturé du causse d'Agourai et de là ceux du Moyen Atlas, et par conséquent une gestion plus efficace des ressources hydriques dans ces régions.

La méthodologie d'étude

Le présent travail de recherche a été subdivisé en Cinq chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'élaboration d'une synthèse actualisée des aspects géographiques, socio-économiques, géologiques et géomorphologiques au niveau du causse d'Agourai. Il s'agit d'une étude bibliographique riche et très diversifiée.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des phénomènes observés au niveau des formations carbonatées liasique.
- Le troisième chapitre traite essentiellement le travail effectué sur le terrain concernant l'analyse de la fracturation au niveau du causse d'Agourai.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'hydrogéologie de la zone d'étude (causse d'Agourai). Il est basé sur une documentation riche fournie par la direction de l'agence de bassin hydraulique de Sebou et il comprend la mise en place et l'exploitation d'un système d'Information Géographique (SIG) et aussi la caractérisation de l'aquifère et de son comportement hydrodynamique, terminant par la quantification des termes du bilan hydrique et de l'évolution de cette ressource.
- Le cinquième chapitre est consacré à la discussion et l'interprétation des résultats.

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Cadre géographique et socio-économique

Le Causse d'Agouraï, d'une superficie de 260 Km², se situe dans les limites administratives de la province d'El Hajeb, à une trentaine de kilomètres au Sud de Meknès. Il abrite une population rurale pour l'essentiel de 26000 habitants (Noraz et Pompougnac, 2005) et la principale activité économique est l'agriculture. Ce Causse montre des reliefs avec des altitudes dépassant 1000 m.

La limite nord du causse s'interrompt à sa retombée sur la plaine du Saïs. La limite ouest est marquée par l'interruption brutale du Causse qui domine des terrains primaires de la Meseta (Amraoui, 2005).

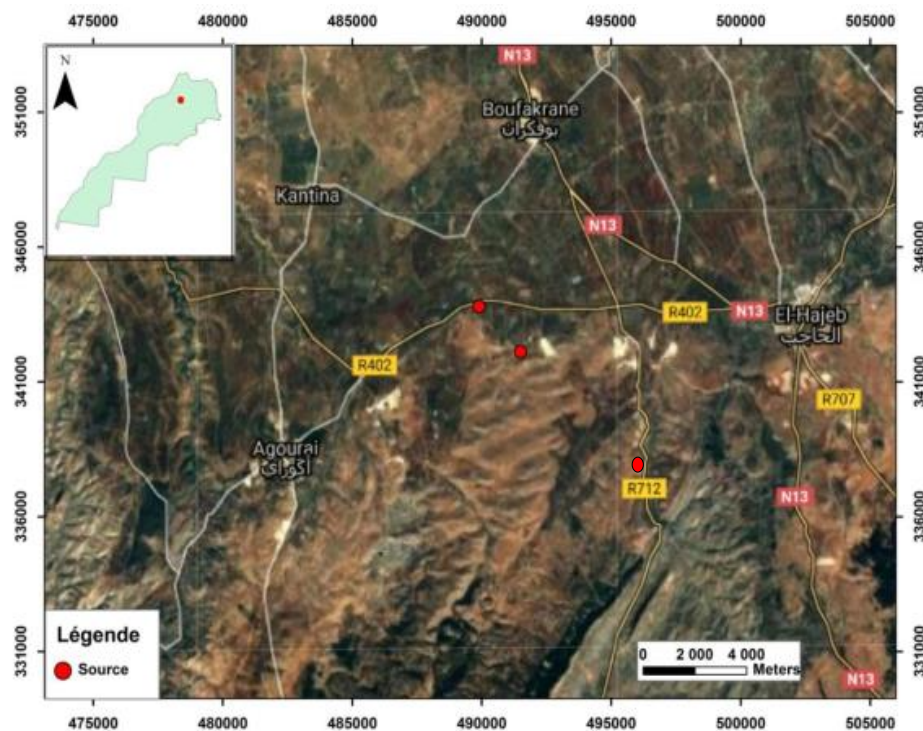


Figure 1: Situation de la zone d'étude

I.2. Cadre géologique

Le causse d'Agouraï situé à environ 35 km au SW de Meknès, fait partie des panneaux sub-tabulaires du Moyen Atlas connus sous le nom de causses moyen-atlasiques (Colo, 1962 ; Charrière, 1990). Culminant à plus de 1000m d'altitude, ce causse surplombe le bassin de Saïs vers le Nord et les terrains hercyniens déformés du synclinorium de Fourhal à l'Ouest et au

SW (Ben Abbou, 1990 ; El Ouardi et al., 2008 ; Driouch et al., 2010 ; Bouya et al., 2013 ; Bouya, 2014 ; El Ouardi et al., 2018).

Le Causse d'Agourai est caractérisé par une structure tabulaire, plus faillée et moins plissée qui comprend une série sédimentaire allant du Trias jusqu'au Jurassique inférieur (Lias). Il fait partie des plateaux calcaires appelés Causses Moyen Atlasiques. Ces carbonates liasiques fracturés et parfois karstifiés constituent l'aquifère. On peut noter la présence de calcaire du Lias moyen notamment au niveau du synclinal d'Ain Maârouf. Localement, en bordure ouest principalement, sa base comporte des marnes beiges du Lias inférieur renforçant l'imperméabilité du substratum imperméable composé d'argiles salifères triasiques. La couverture discordante de l'aquifère est constituée par des sables et des marnes du Miocène au niveau du bassin de Saïs au nord et de dépôts quaternaires récents fertiles dans les dépressions du causse.

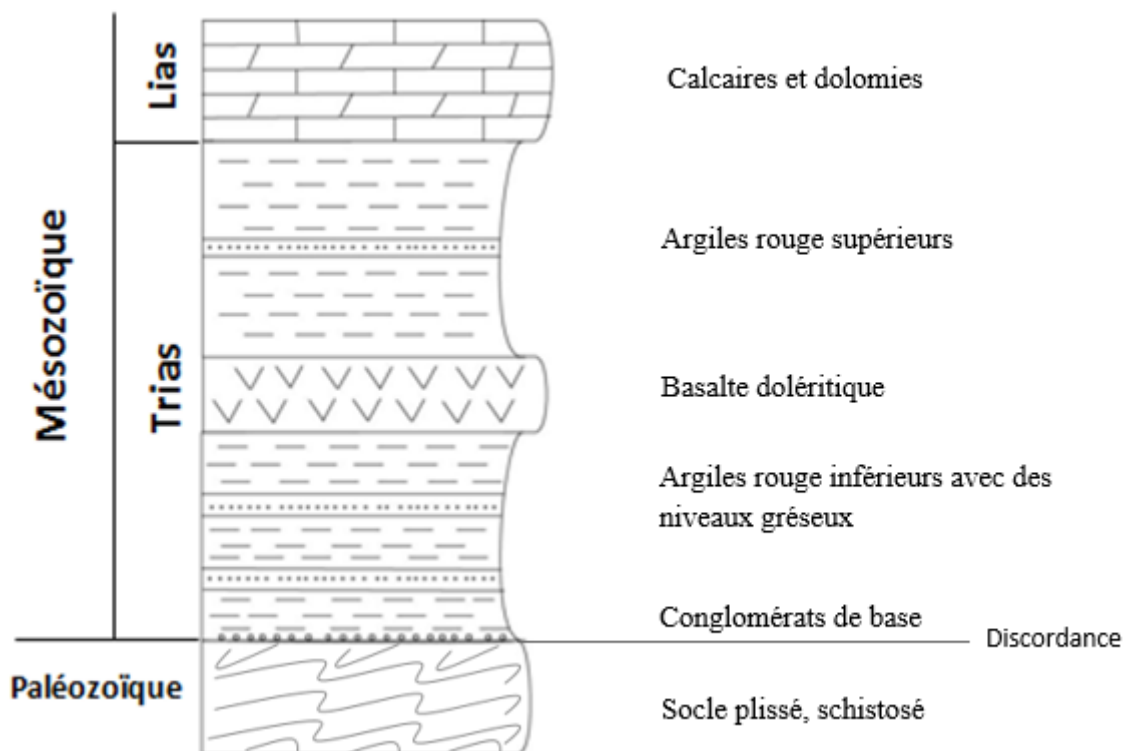


Figure 2 : Log Stratigraphique du causse d'Agourai.

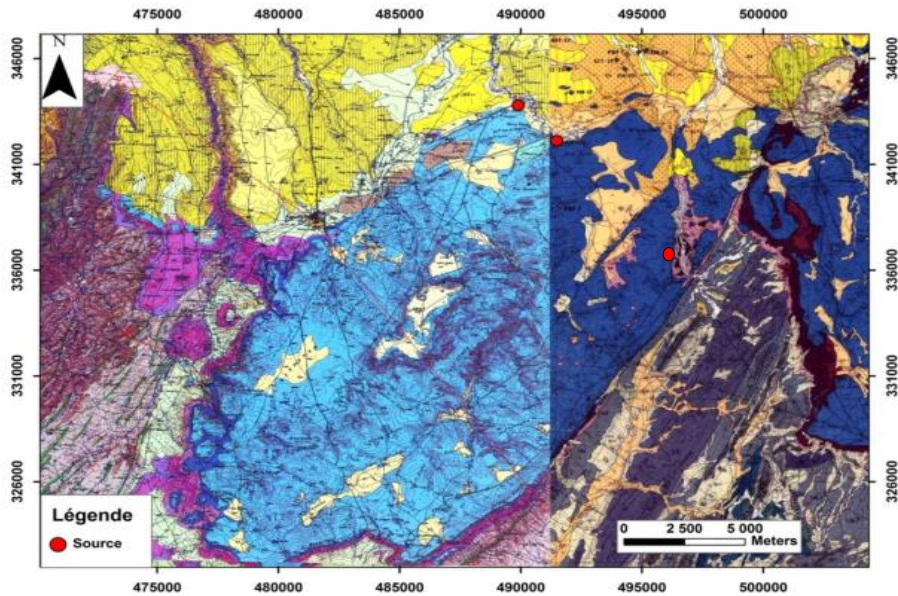


Figure 3 : Extrait de la carte géologique d'Agourai et d'El Hajeb montrant la géologie du causse d'Agourai.

I.3. Cadre géomorphologique

Le Causse Moyen Atlasique est constitué des roches dolomitiques et calcaires du Lias voilées, par endroits, par des épanchements volcaniques récents. Il se caractérise par une structure tabulaire, plus faillée que plissée et par un relief monotone. Il s'agit de vastes plateaux karstiques diversement étagés, qui surplombent la plaine environnante du Saïs à des altitudes dépassant 1000 m. Des ondulations à très grands rayons de courbure, et des systèmes de failles créent de larges grabens et des horsts. Les cuvettes sont nombreuses, créant des bassins versants fermes au centre desquels existent parfois des lacs permanents ou Dayet (exemple Dayet Aoua).

Le petit Causse d'Agouraï est ceinturé par des corniches qui dominant le socle paléozoïque. Schématiquement, il s'agit d'un synclinorium de terrains de nature essentiellement dolomitique du Lias, basculé en direction du Saïs de Meknès, suivant une pente de 2 à 3 %. La bordure SE est définie par la grande faille d'Adarouch articulée en touche de piano (Amraoui, 2005).

CHAPITRE II : PHENOMENES OBSERVEES
AU NIVEAU DES FORMATIONS
CARBONATEES LIASIQUES DANS TROIS
SITES

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de la fracturation et des phénomènes associés dans trois sites différents. Il s'agit des sources d'eau d'Ain Bouchermou, Ain Maarouf et Ain Boujaoui, constituant les principales sources d'alimentation en eau de la région. Au niveau des trois sites, les formations carbonatées liasiques sont affectées par différents phénomènes géologiques correspondant à la karstification, la bréchification et surtout à une fracturation intense. Avant de présenter les résultats d'étude de la fracturation, il convient de rappeler quelques phénomènes de dissolution observés dans cette série.

II.1. Karstification

Un karst de surface à lapiés ruiniformes et ouvalas s'est développé, ainsi qu'une dizaine d'avens de faible importance. Les phénomènes karstiques sont mal développés. On note une faible présence de grottes ou de galeries souterraines accessibles.

C'est un aspect morphologique qui affecte les roches carbonatées et qui résulte de la dissolution de ces roches. Elle est très fréquente dans les formations carbonatées autour de la source de Bouchermou, et présente des formes et des dimensions différentes. Les poches karstiques sont soit isolées soit interconnectées (fig.4).

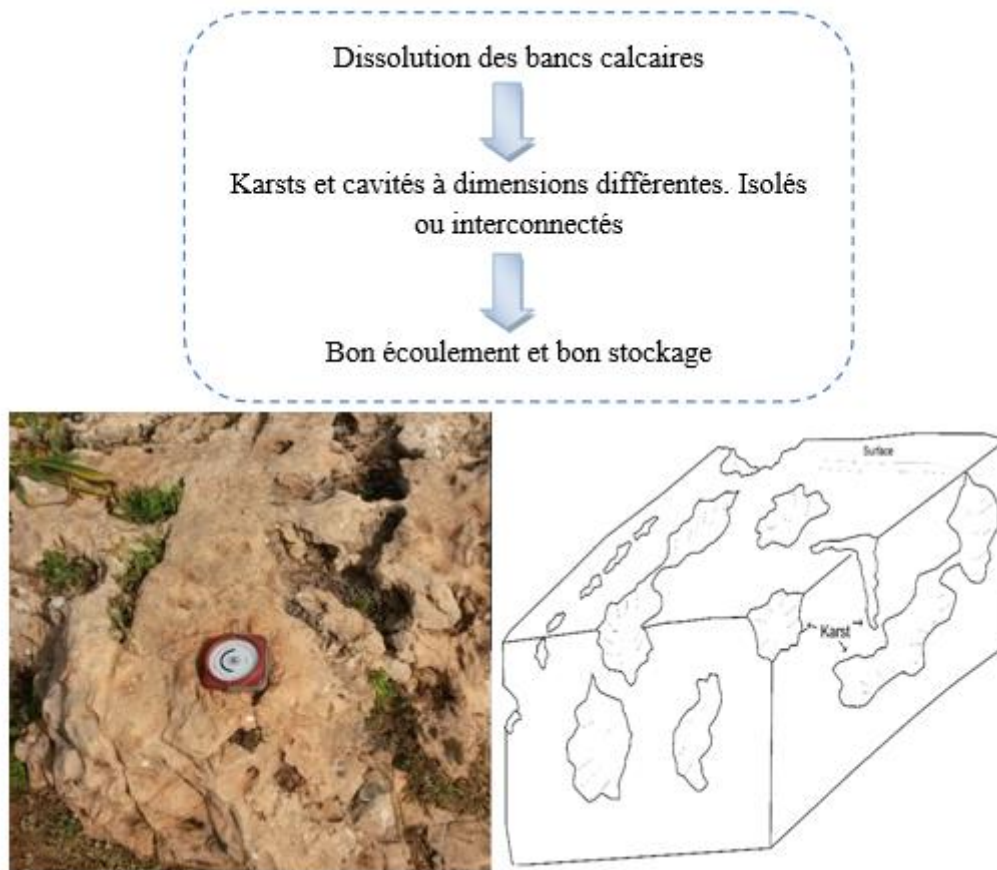
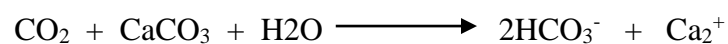


Figure 4: phénomène de karstification dans les roches carbonatées liasiques autour de la source de Bouchermou.

La formation des karsts est liée à la dissolution des roches carbonatées par les eaux météoriques qui circulent dans les fissures. En plus, les eaux souterraines sont souvent enrichies en acides carboniques et d'autres acides organiques, notamment les acides humiques produits par l'activité racinaire lors de leur percolation dans le sol. Le CO_2 dissout dans l'eau s'hydrate et forme l'acide carbonique qui se dissocie en ions H^+ et HCO_3^- , puis en ion carbonate CO_3^{2-} (internet).



Les karsts et les cavités jouent un rôle important au sein des formations carbonatées dans le stockage et dans l'écoulement des eaux souterraines principalement lorsqu'ils sont interconnectés entre eux.

Autour de la source de Bouchermou, ces phénomènes de dissolution sont très

importants, certaines cavités karstiques sont interconnectées et nous avons même pu observer un gouffre important faisant 8m de largeur et presque 6m de hauteur (fig. 5).



Figure 5 : Gouffre formé par le phénomène de dissolution des carbonates observé près de la source de Bouchermou.

II.2. Bréchification

La formation carbonatée liasique montre un aspect bréchique et une rugosité sur la surface des bancs caractéristique des paysages karstiques. Cette bréchification peut être de deux origines :

- Tectonique fréquente dans les zones de fractures.
- Synsédimentaire liée à l'instabilité de milieu (mouvement tectonique), ou diagénétique liée aux propriétés physico-chimique du Mg.

Certaines zones sont broyées et ces zones de broyages s'alignent le long de fractures importantes affectant les formations carbonatées (fig. 6,7).

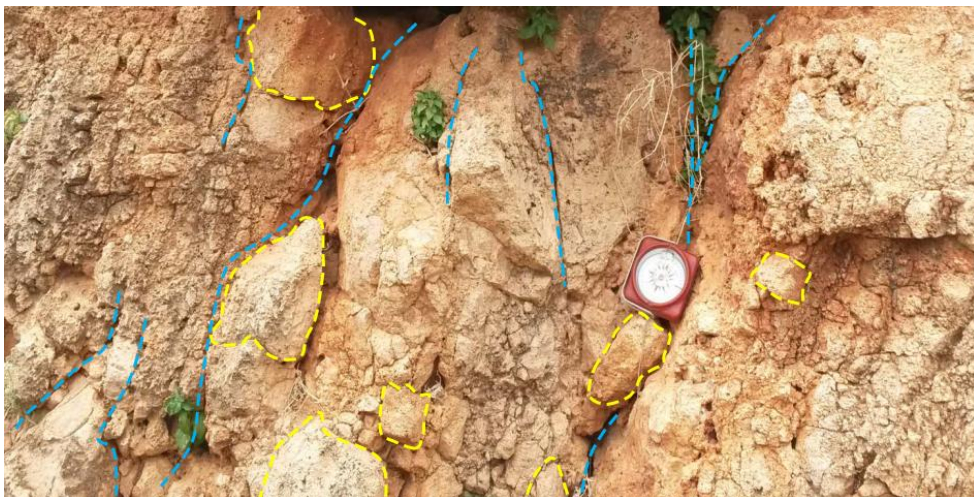


Figure 6 : Aspect bréchiqque et ruiniforme des calcaires liasique à Bouchermou



Figure 7 : Zone broyée près de la source de Bouchermou

II.3. Fracturation

L'analyse de la fracturation est à la fois quantitative et qualitative, parmi les aspects qualitatifs de cette fracturation :

II.3.1. Connectivité des fractures et relation avec les joints de stratification

Soit en surface (fig. 8,9), soit au sein de réservoir, l'intersection joue un rôle important. La connectivité de deux fractures ou plus d'une part fournit une augmentation de circulation et de stockage des eaux et entre les joints de la stratification d'autre part. Les joints de stratification sont les premières discontinuités d'infiltration des eaux.

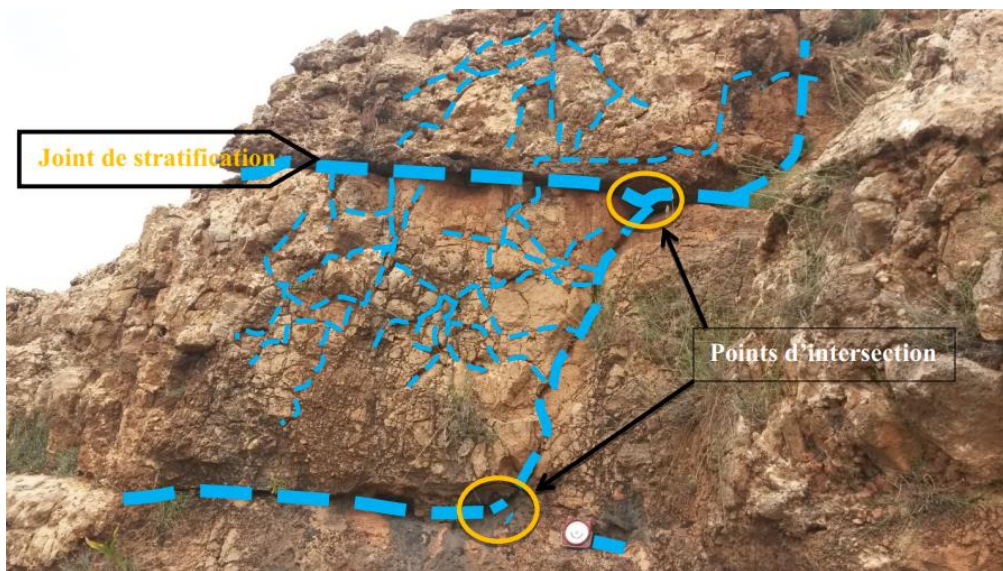


Figure 8 : intersection fractures-joints de stratifications dans les calcaires liasiques de Bouchermou

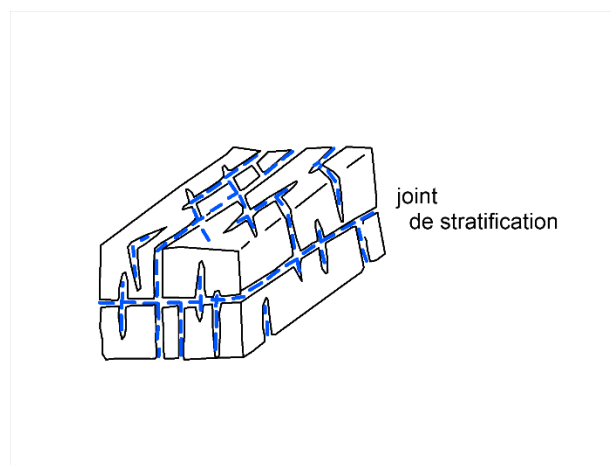


Figure 9 : Modèle expliquant l'importance de l'intersection des fractures et des joints de stratification.

II.3.2. Ouverture des fractures

Les fractures étudiées dans les sites de Bouchermou, Maârouf et Boujaoui présentent des ouvertures variables (Fig. 10 et 11), variant des fractures très ouvertes à l'échelle centimétriques à des fractures colmatées. Notons que plus la fracture est ouverte, plus sa capacité de drainage devient importante. Ce paramètre est donc très important dans l'étude des réservoirs fracturés.



Figure 10 : fracture ouverte dans le site d'A. Bouchermou.



Figure 11 : fracture ouverte dans le site d'A. Maârrouf

II.3.3. Réseau de fractures denses

Dans les sites étudiés, la facilité d'infiltration des quantités importantes des eaux de surface vers le réservoir est assurée par la densité des fractures à la surface de la formation carbonatée qui est très importante. Notons que plus le réseau de fractures est important, plus le réservoir est bien développé et alimenté par les eaux pluviales.

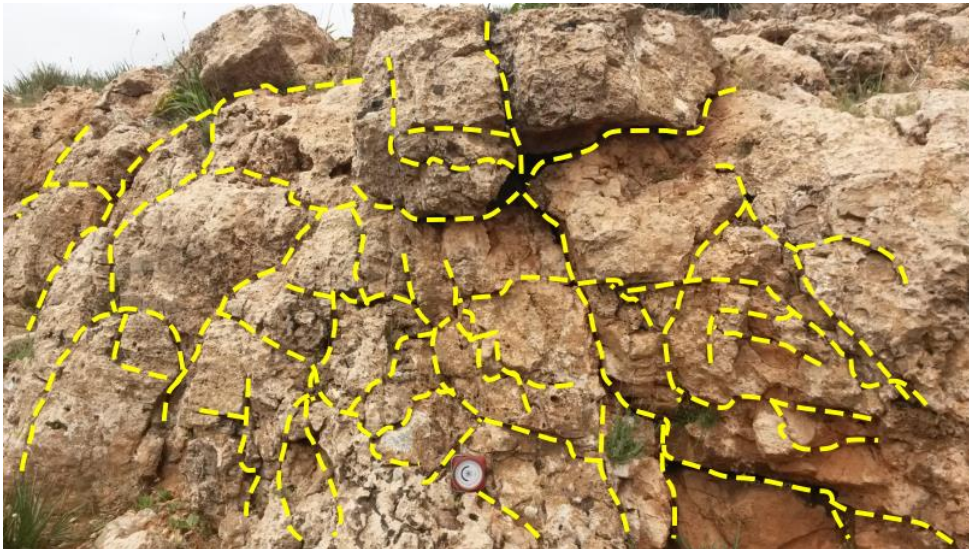


Figure 12 : Réseau dense de fractures affectant les calcaires liasiques de Bouchermou.

II.3.4. Chronologie des fractures

Le principe de recoupement nous a permis d'établir la chronologie des deux principales familles de fractures NW-SE et NE-SW qui sont les familles les plus dominantes.

La figure suivante montre un exemple de recoupement qui indique la chronologie des fractures aux alentours d'Ain Maârouf.

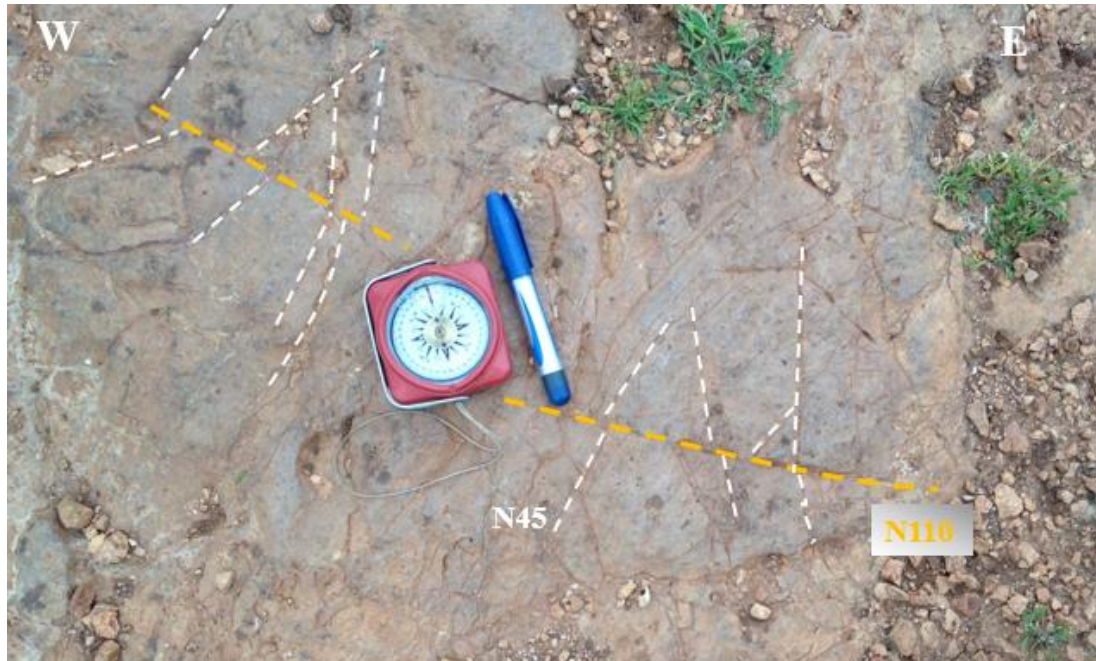
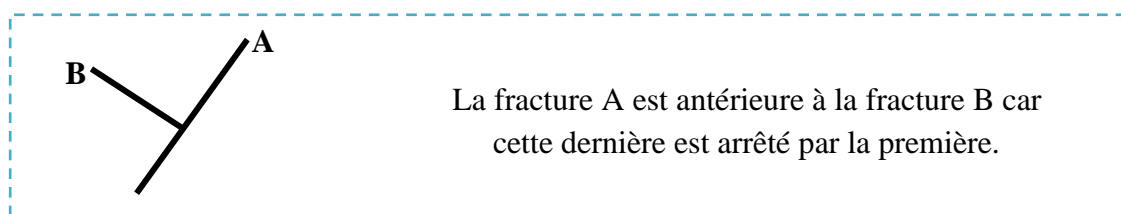


Figure 13 : photo montrant la chronologie des fractures dans le site de A. Maârouf.

L'analyse de la fracturation microtectonique, montre que la famille de direction NW-SE recoupe la famille NE-SW. Ce qui indique que la famille postérieure est de direction NW-SE.

On peut expliquer ce principe par le schéma suivant :



**CHAPITRE III : ANALYSE DE LA
FRACTURATION AU NIVEAU DES
TROIS SOURCES**

Pour analyser la fracturation aux alentours des sources (Ain Maârrouf, Ain Bouchermou, Ain Boujaoui), nous avons effectué plusieurs mesures au niveau des trois sources afin de déterminer la chronologie des fractures et distinguer celle qui guide l'écoulement des eaux.

L'étude de chaque source était faite selon des stations bien choisies, dans le but de régionaliser et couvrir tout le secteur d'étude.

Nous présentons ci-dessous les mesures au niveau de chaque source.

III.1. Ain Maârrouf

Cette source s'agit d'une émergence de débordement de la nappe libre du Lias, donnant lieu à l'Oued Boufekrane. Il se situe à 20 km au Sud de la ville de Meknès. Elle émerge à la base du calcaire liasique dans plusieurs endroits. Les affleurements au niveau de la source sont de types calcaires bréchiques, montrant une fracturation très intense. Notons que cette source est située dans la zone de contact entre le Causse d'Agourai et le bassin néogène de Sais, le long de la faille d'effondrement de ce bassin.

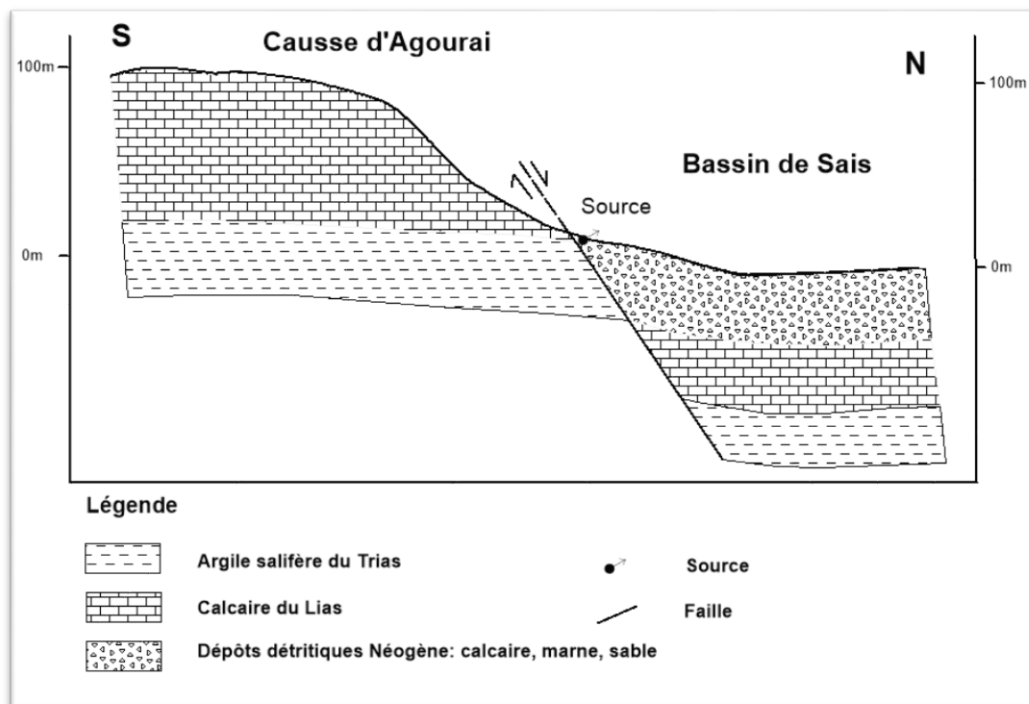


Figure 14 : coupe géologique au niveau d'Ain Maârrouf.

Avant de présenter les 7 stations mesurées au niveau de la source, on note que la stratification dans cette zone est tabulaire à sub-tabulaire.

- **Station 1 :**

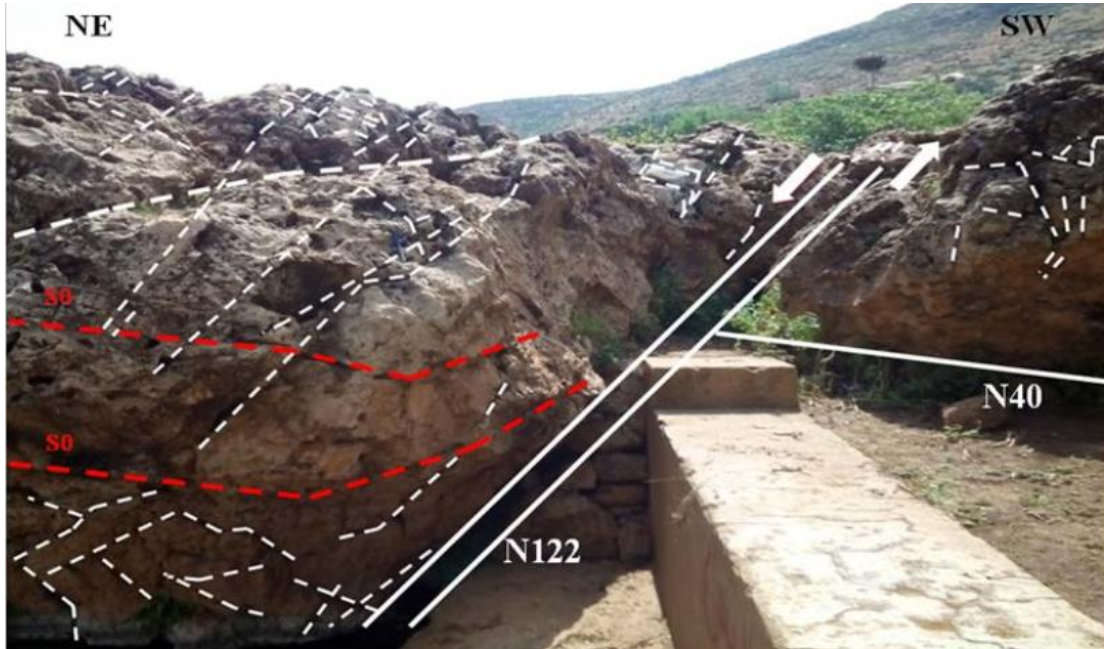


Figure 15 : la fracturation mesurée dans la station 1 à Ain Maârouf.

Cette station présente la principale résurgence d'eau à Ain Maârouf d'où nous avons pu mesurer la stratification et le pendage. Les fractures observées dans cette station sont bien visibles et s'agencent en deux familles orientées NW-SE et NE-SW. L'eau jaillit de la fracture principale orientée N122, 70NE. Il s'agit d'une faille normale à jeu métrique, effondrant le compartiment NE en direction du bassin de Sais.

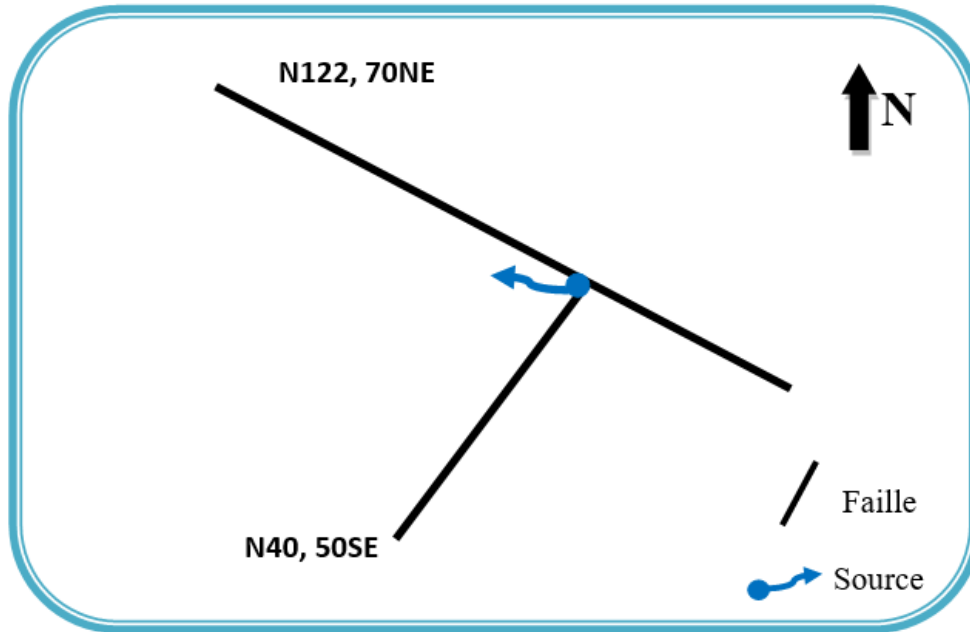


Figure 16 : Schéma représentatif expliquant la résurgence d'Ain Maârouf, localisée à l'intersection de deux failles normales orientées N40 et N122.

Dans cette station, nous avons noté la présence de quatre familles de fractures principales orientées NW-SE, NE-SW, E-W et N-S. Les familles dominantes sont orientées NW-SE et NE-SW.

- **Station 2 :**

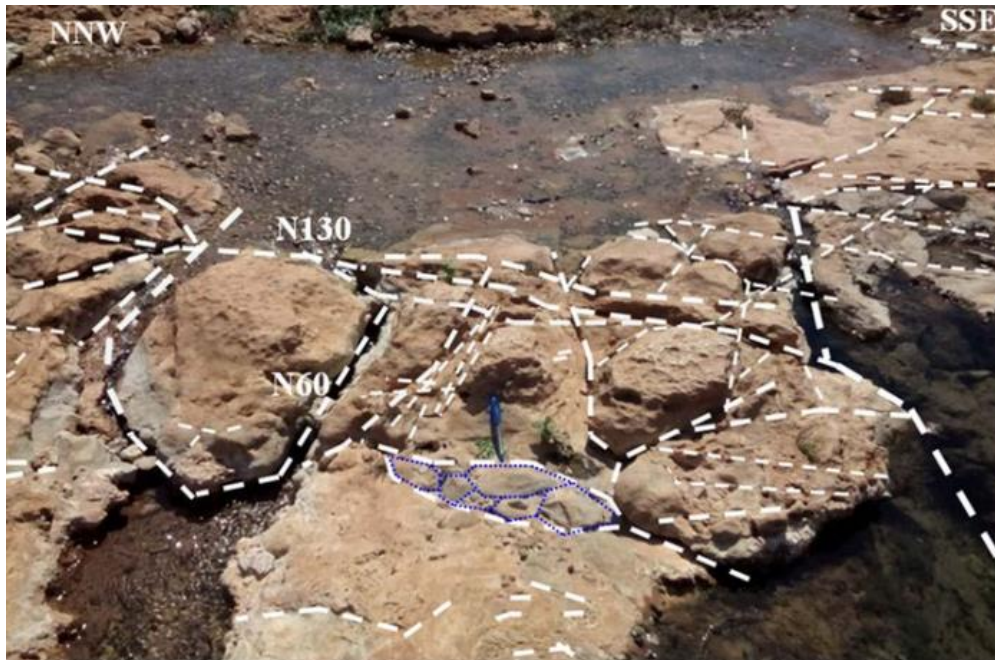


Figure 17 : Aspect de la fracturation mesurée à la surface d'une strate calcaire à Ain Maârouf.

Les fractures mesurées dans cette station s'agencent en trois familles orientées : NW-SE, NE-SW et E-W. La famille NW-SE recoupe les autres familles et par conséquent elle leur est postérieure.

- **Station 3 :**



Figure 18 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 3 à Ain Maârouf.

Dans cette station, la famille des fractures orientées NW-SE recoupe les familles orientées NE-SW et E-W. Les fractures de cette famille présentent latéralement des ouvertures et des fermetures et se terminent parfois en fractures en échelons.

Les trois familles principales des fractures mesurées dans cette station sont orientées NW-SE, NE-SW et E-W.

- **Station 4 :**



Figure 19 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 4 à Ain Maârouf.

Dans cette station, nous avons noté la présence de deux familles de fractures conjuguées, déterminant un angle aigu ($0 < \alpha < 90$) et un angle obtus ($90 < \beta < 180$). Ces deux familles conjuguées orientées N120 et N90, recoupent la famille orientée N60.

Nous avons noté dans cette station la présence de trois directions principales orientées NW-SE, NE-SW et E-W.

- **Station 5 :**



Figure 20 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 5 à Ain Maârouf.

Dans cette station (figure 20), nous avons déterminé le pendage de certaines fractures, surtout celles orientées NW-SE (N115, 50NE). Les fractures orientées NE-SW montrent des ouvertures importantes pouvant atteindre 15 cm.

Les trois directions de fractures déterminées dans les stations précédentes ont été observées dans cette station, auxquelles s'ajoute la direction N-S.

- **Station 6 :**



Figure 21 : Représentation de la fracturation mesurée dans la station 6 à Ain Maârouf.

Dans cette station, deux directions de fractures dominantes NW-SE et NE-SW ont été analysées, ces fractures mesurées à la surface d'un banc tabulaire déterminent des blocs losangiques caractéristiques, permettant de constater la présence de deux familles principales. Une autre direction moins abondante, orienté E-W, s'ajoute aux précédentes familles.

Trois directions principales ont été déterminées dans cette station, il s'agit des directions NW-SE, NE-SW et E-W. La famille des fractures orientées NW-SE est la plus dominante.

- **Station 7 :**



Figure 22 : Représentation de la fracturation mesurée dans la station 7 à Ain Maârouf.

Les blocs losangiques qui apparaissent dans cette station à la surface d'une strate calcaire, témoignent de la présence de deux familles de fractures conjuguées orientées NW-SE et NE-SW.

Dans cette station, nous avons noté la présence de deux familles dominantes de fractures orientées NW-SE et NE-SW, auxquelles s'ajoutent une troisième famille moins représentée orientée N-S.

Les mesures des directions et pendage effectuées au niveau des 7 stations précédentes situées à Ain Maârrouf ont été traitées séparément de la station 1 à la station 7 dans le même diagramme, ce qui nous a permis de représenter une seule rose diagramme au niveau de la source (figure 23).

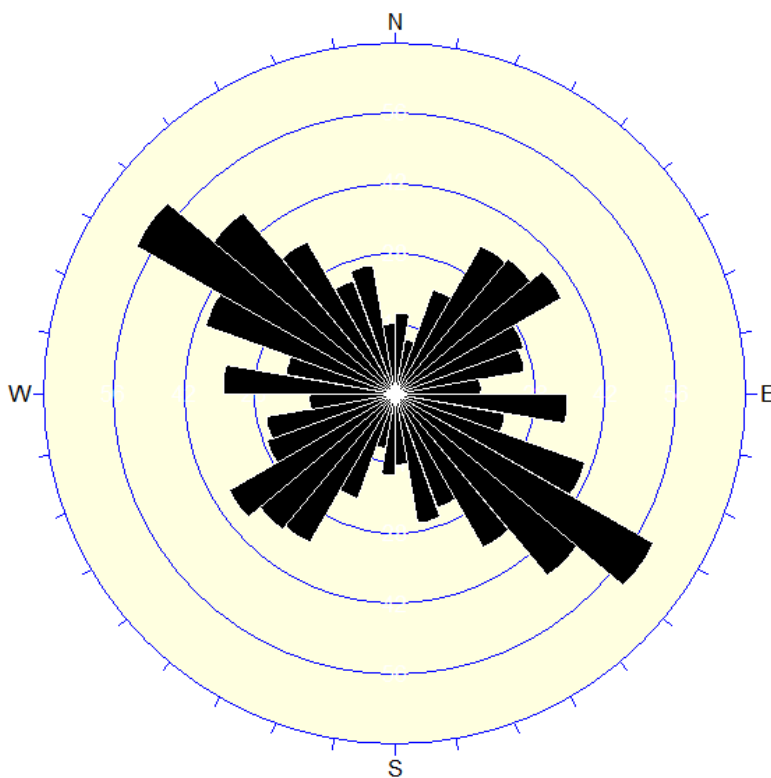


Figure 23 : Rosace directionnelle générale des fractures mesurées dans les différentes stations au pourtour de la source Ain Maârrouf.

Cette rosace générale permet de visualiser l'ensemble des directions des fractures affectant les calcaires bréchiés tabulaires dans le pourtour de la source. Ainsi, toutes les directions sont représentées avec une dominance nette de la direction NW-SE, qui est la direction tardive dans ce site.

III.2. Ain Boujaoui

Cette source est située dans la zone de contact entre le bassin de Sais et le causse d'Agouraï, elle émerge à la base du calcaire liasique dans plusieurs endroits, d'où les affleurements géologique sont de types calcaires bréchiques. Aux alentours de la source, on remarque une fracturation très intense.

Avant de présenter les 3 stations mesurées au niveau de la source, on note que la stratification dans cette zone est de direction et pendage N45, 35 SE.

- **Station 1 :**



Figure 24 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 1 à Ain Boujaoui.

Dans cette station, nous avons noté la présence de deux familles de fractures de directions différentes orientées NW-SE et NE-SW, avec dominance de la famille de direction NW-SE.

- **Station 2 :**

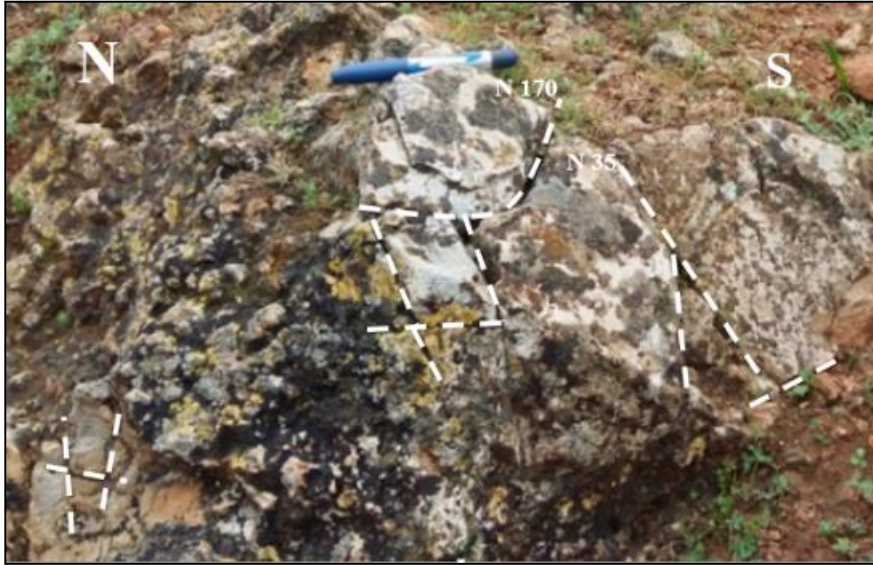


Figure 25 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 2 à Ain Boujaoui.

La fracturation mesurée au niveau de cette station détermine des blocs rocheux losangiques entre deux familles de différentes directions, celle du NE-SW et recoupée par une famille récente orientée NW-SE.

- **Station 3 :**



Figure 26 : Représentation des familles de fracture mesurée dans la station 3 à Ain Boujaoui.

Dans ce site, les directions sont représentées avec une dominance nette de la direction NW-SE qui est la plus tardive, notons aussi la présence d'une autre famille de fractures de direction NE-SW.

La fracturation mesurée au niveau de cette station montre le phénomène du recoupement et qui est présenté et expliqué dans la figure suivante (figure 27,28). Ce principe de recoupement des fractures permet d'indiquer les plus tardive et celles qui guident l'écoulement des eaux.

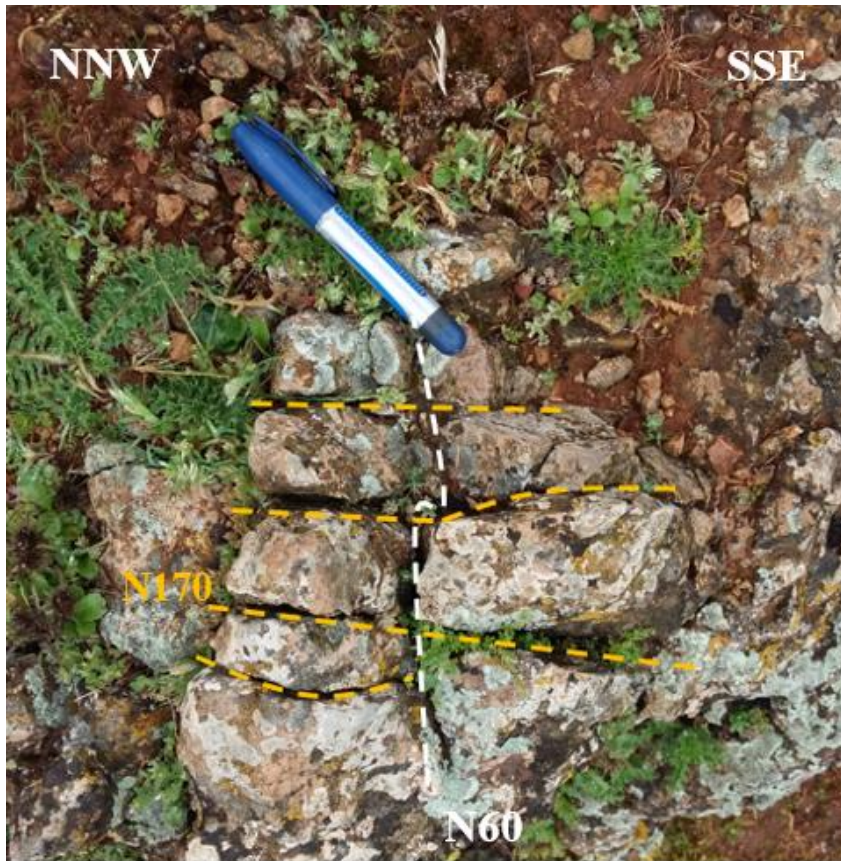


Figure 27 : Représentation de deux familles de fractures dans la station 3 à Ain Boujaoui.

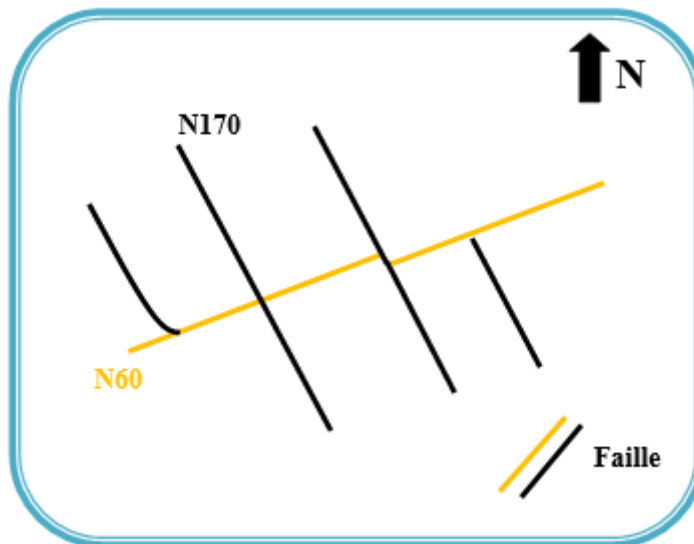


Figure 28 : Schéma explicatif du principe de recoupement dans la station 3 à Ain Boujaoui.

Les mesures de la fracturation effectuée au niveau des trois stations précédentes situées à Ain Boujaoui, ont été traitées séparément, ce qui nous a permis de les présenter dans une même rose directionnelle (figure 29).

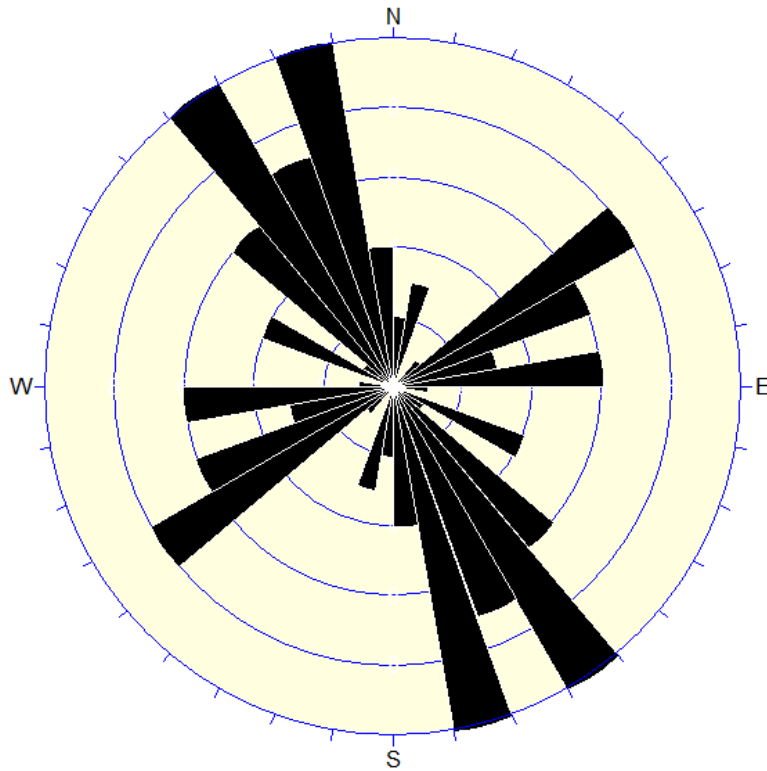


Figure 29 : Rosace directionnelle générale des fractures mesurées dans les différentes stations au pourtour de la source.

Cette rosace générale de la fracturation dans cette zone d'étude, nous présente deux principales familles de fractures orientées NNW-SSE et ENE-WSW, avec dominance de la première famille qui est la plus tardive dans ce site.

III.3. Ain Bouchermou

Les quatre stations de mesures ont été choisies à l'amont de la source à cause des affleurements des calcaires liasiques.

La source d'eau de Bouchermou est alimentée selon deux directions différentes des ravins qui caractérisent ce secteur et qui sont orientées NW-SE et NE-SW.

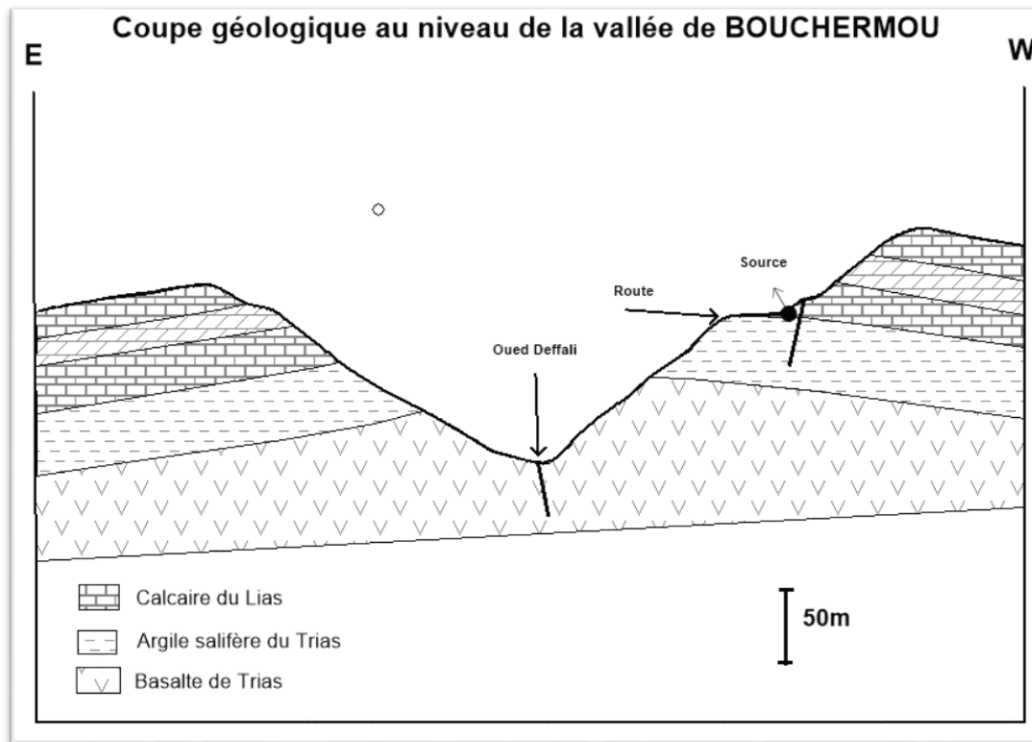


Figure 30 : Coupe géologique au niveau d'A. Bouchermou.

Pour couvrir tout le secteur, nous avons mesuré la fracturation au niveau des quatre stations choisies dans les différents flancs des plis prospectés.

- **Station 1 :**



Figure 31 : Représentation des familles des fractures mesurées dans la station 1 à Ain Bouchermou

Notons que la stratification au niveau de cette station est de direction et pendage N46, 26 NW et N20, 35 NW.

Plusieurs fractures ont été mesurées au niveau de cette station et sont présentées en deux familles principales de directions : NW-SE et NE-SW, avec la dominance de la famille NW-SE.

- **Station 2 :**

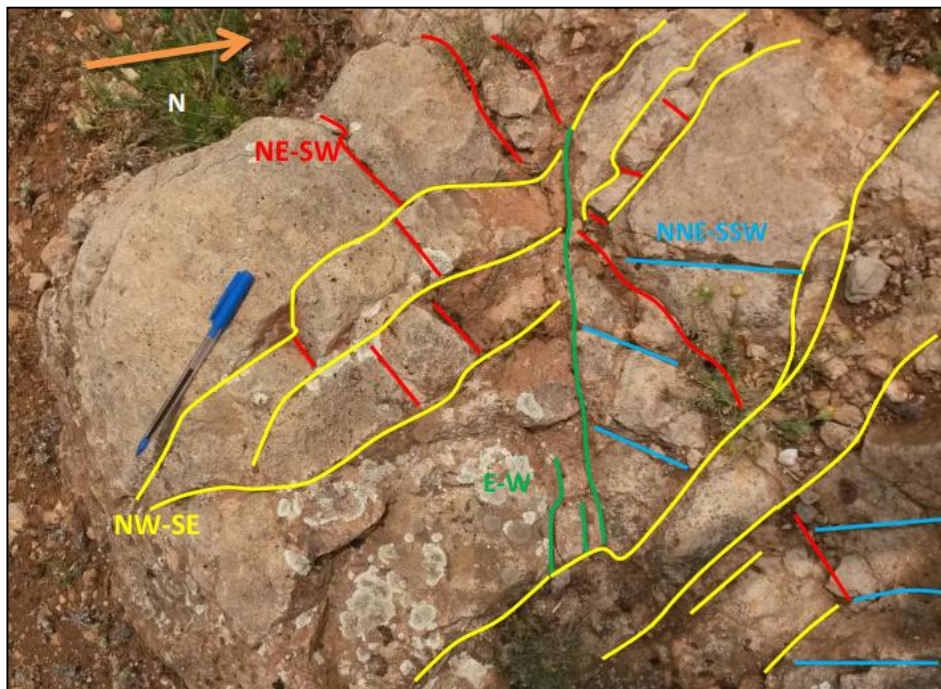


Figure 32 : Représentation des familles de fractures mesurées dans la station 2 à Ain Bouchermou.

La stratification dans cette station est de direction et pendage N170, 23 SW. Au niveau de cette station, la fracturation est nette dans toutes les directions, d'où on trouve trois familles principales de directions : NNW-SSE, NNE-SSW et E-W.

- **Station 3 :**

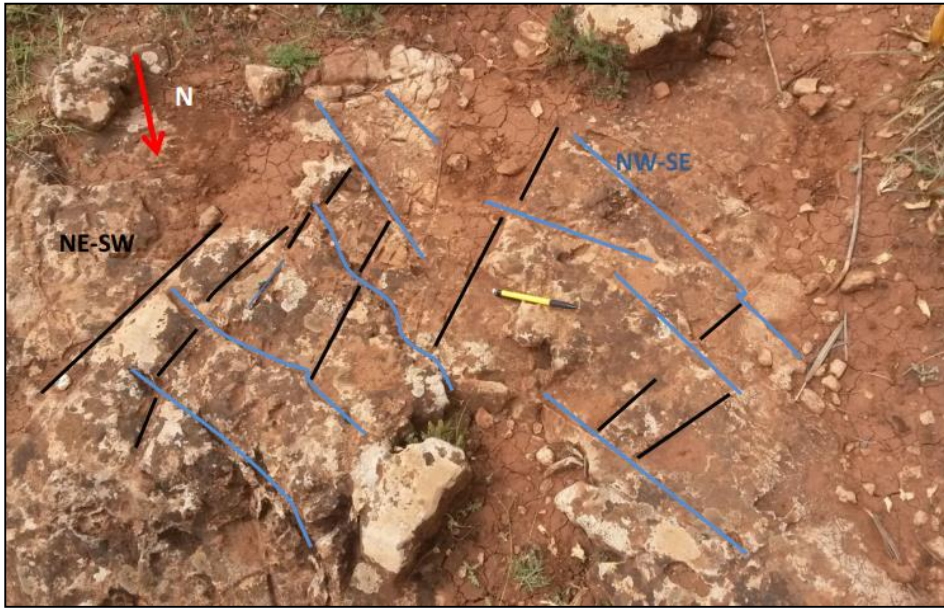


Figure 33 : représentation des familles de fractures mesurées dans la station 3 à Ain Bouchermou.

La stratification au niveau de cette station est de direction et pendage N86, 10 N.

Nous observons dans cette station quatre familles de fractures de directions NE-SW, NW-SE, E-W, N-S.

Les principales familles sont de directions NE-SW et NW-SE avec dominance de la famille NE-SW.

- **Station 4 :**

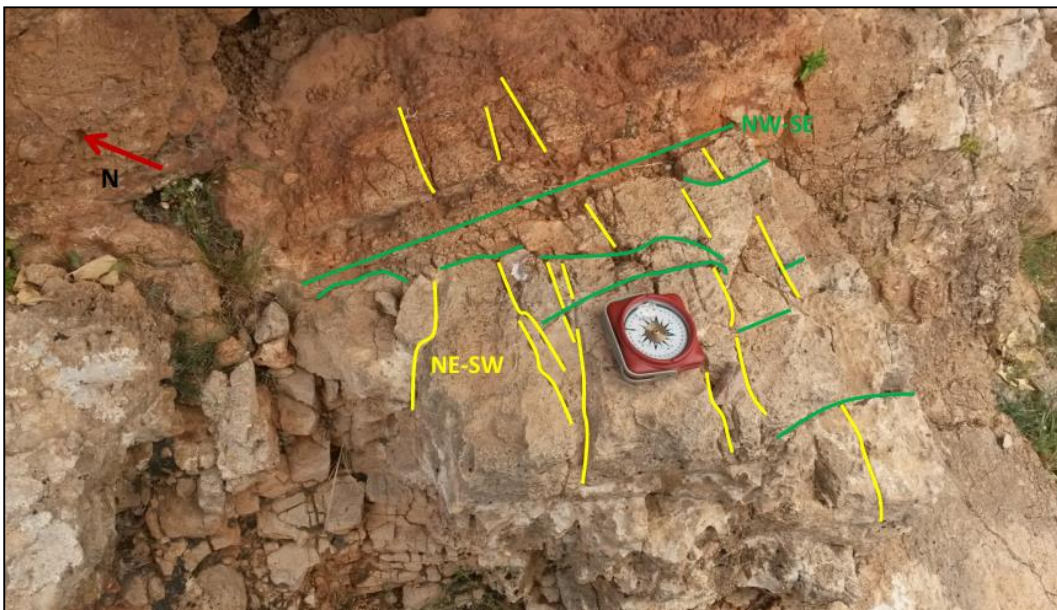


Figure 34 : Représentation des familles de fractures mesurées dans la station 4 à Ain Bouchermou.

La stratification au niveau de cette station est de direction et pendage N155, 15 SW.

La fracturation dans cette station est nette dans toutes les directions. On note la présence de quatre familles de fractures de directions ENE-WSW, NW-SE et E-W.

Les principales familles sont de directions ENE-WSW et NW-SE, avec dominance de la famille ENE-WSW.

La rosace directionnelle (figure 35) englobe l'ensemble des mesures des quatre stations analysées séparément et qui peuvent constituer une seule station microtectonique.

Cette rosace directionnelle générale des quatre stations, permet une classification des familles de fractures autour de la source de Bouchermou.

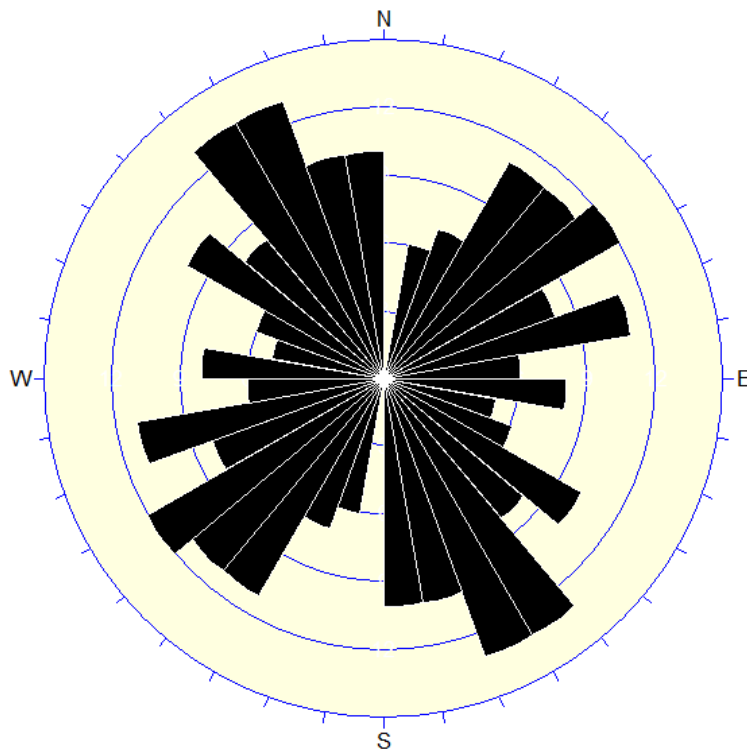


Figure 35 : Rosace directionnelle générale des fractures mesurées dans les différentes stations au pourtour de la source.

A partir de cette rosace générale, on constate que les principales familles présentes sont de directions NW-SE, NE-SW, E-W et N-S, avec une dominance de la famille de direction NW-SE.

CHAPITRE IV : SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE

IV.1. Contexte climatique

La compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux superficielles et souterraines exige une étude climatique qui intervient aussi dans l'équation du bilan hydrologique à savoir l'étude des précipitations, des températures, l'évapotranspiration...etc. Pour cette raison, on utilisera les données enregistrées au niveau de la station d'Agourai pour une période de quatre années (2010-2013):

Le tableau n° 1 ci-dessous expose les précipitations et les températures moyennes mensuelles au niveau de la station d'Agourai pour la période 2010-2013.

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
P (mm)	79.48	92.06	121.03	60.53	50.80	15.52	1.64	7.26	34.50	65.20	119.72	43.36
T (°C)	9.82	9.29	12.26	15.18	18.43	22.25	26.14	27.73	23.21	19.42	13.47	10.82

Tableau 1 : Précipitations et températures moyenne mensuelles de la station d'Agourai.

IV.1.1. Précipitations

La figure 36, montre la distribution des précipitations moyennes mensuelles au niveau de la station d'Agourai. Cette figure met en évidence deux périodes distinctes. Une période pluvieuse qui s'étale du mois d'octobre jusqu'au mois de Mai avec le mois de Mars est le mois le plus pluvieux (121.03 mm) et une période sèche allant du mois de juin jusqu'au mois de septembre avec le mois de juillet est le mois le moins pluvieux (1.64 mm).

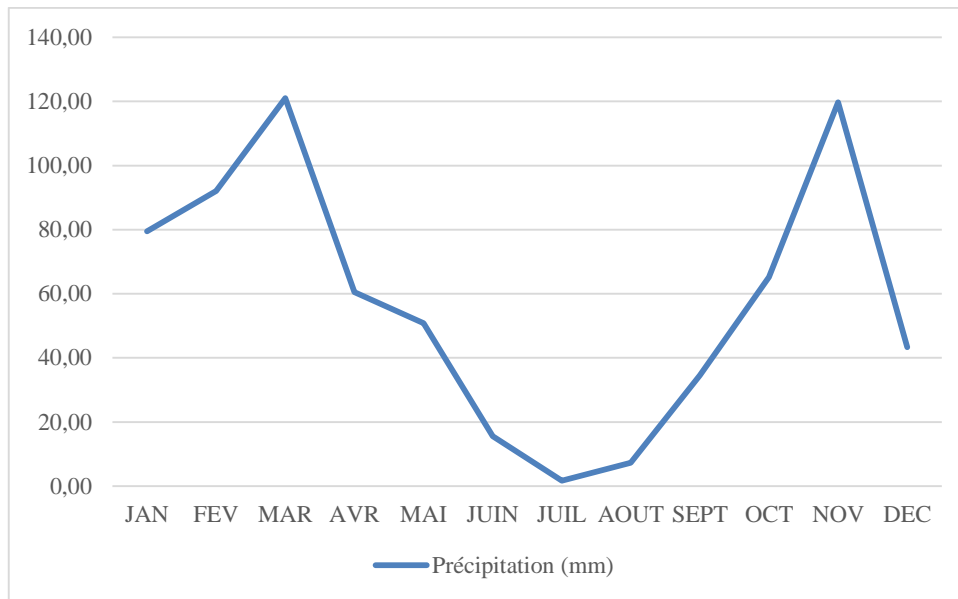


Figure 36 : Précipitations moyenne mensuelles au niveau de la station d'Agourai (2010-2013).

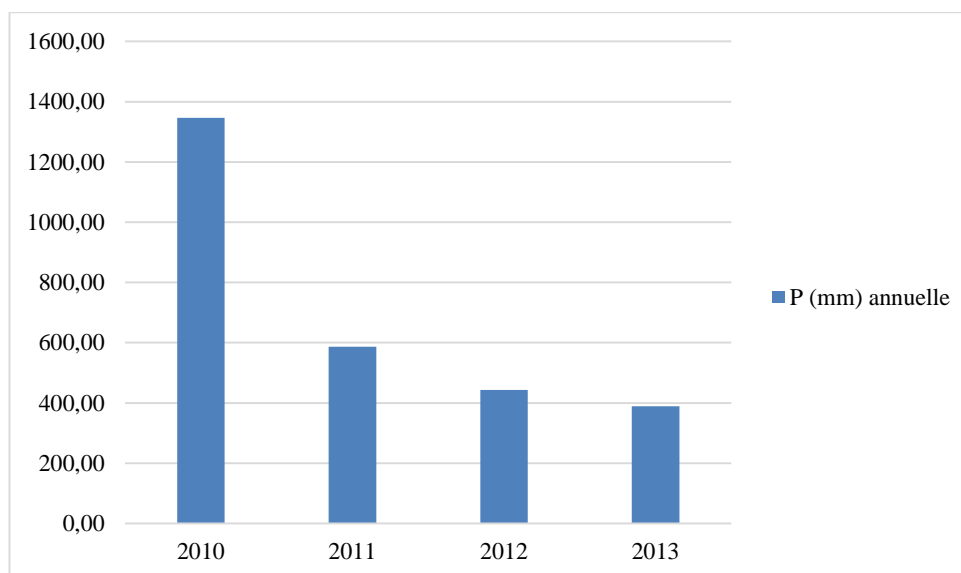


Figure 37 : Historique pluviométrique de la station d'Agourai (2010-2013).

Les précipitations annuelles mesurés au niveau de la station d'Agourai durant la période 2010-2013 montrent des valeurs qui oscillent entre un maximum de 1300 mm enregistré pendant l'année 2010 et un minimum de 380 mm enregistré au cours de l'année 2013 (figure 37).

Le régime des précipitations est de types semi-aride. Il se caractérise par la sécheresse de l'été et par les pluies de la saison froides, généralement en averses courtes et brutales. La

saison sèche est fréquemment entrecoupée d'orages qui peuvent donner des chutes d'eau appréciables.

IV.1.2. Température

L'étude des températures a été réalisée sur les données enregistrées dans la station d'Agouraï pendant la période 2010-2013. Le tableau n° 2 présenté ci-dessous montre les températures moyennes mensuelles interannuelles de la période étudiée.

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec	M.A
T (°C)	9.8	9.3	12.26	15.18	18.43	22.25	26.14	27.73	23.21	19.42	13.47	10.8	17.3

Tableau 2 : Températures moyenne mensuelles de la station d'Agouraï.

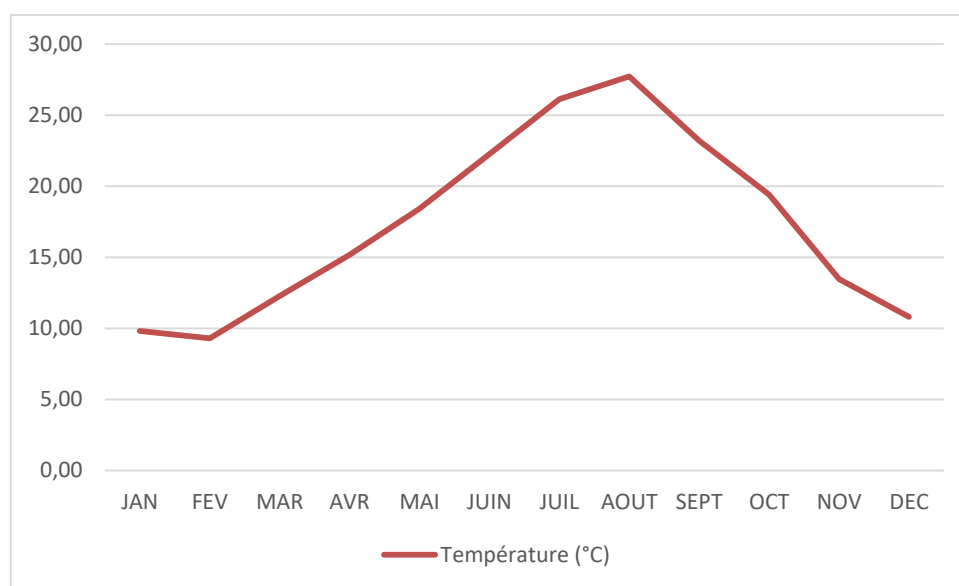


Figure 38 : Températures moyenne mensuelles interannuelles au niveau de la station d'Agouraï pour la période 2010-2013.

Le tableau ci-dessus et la figure n° 38 montrent que l'amplitude maximale des températures moyennes mensuelles interannuelles s'observe entre le mois de Février et le mois d'Aout. On en déduit que dans le secteur étudié les mois de Février et Aout sont respectivement les mois le plus froid et le plus chaud de l'année.

IV.1.3. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est la restitution à l'atmosphère de l'eau sous forme de vapeur, à partir de la surface terrestre quelque soit sa nature (sol, végétaux, eau libre). Donc cette notion englobe la lame d'eau évaporée à partir du substratum terrestre ou transpirée par les végétaux.

On distingue généralement l'évapotranspiration réelle (ETR) qui est la quantité d'eau réellement évaporée sous forme de vapeur, et l'évapotranspiration potentielle qui est la quantité qui aurait pu s'évaporer si le sol était saturé en eau. Ainsi l'évapotranspiration réelle est par définition inférieure ou au plus égale à l'évapotranspiration potentielle.

a. Calcul de l'évapotranspiration réelle par la formule de Turc

Turc a proposé une formule permettant d'évaluer directement le déficit d'écoulement annuelle d'un bassin versant de surface à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle.

i. Formule de Turc

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

Avec : D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle

T : température moyenne annuelle [°C].

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

Application Numérique :

$$P = 691 \text{ mm} \quad P^2 = 691 \times 691 = 477481 \text{ mm}^2$$

$$T = 17.3$$

$$L = 300 + (25 \times 17.3) + 0.05 (17.3)^3 = 300 + 432.5 + 258.8 = 991.3$$

$$L^2 = 991.3 \times 991.3 = 982675.6$$

$$P^2/L^2 = 477481/982675.6 = 0.48$$

$$0.9 + P^2/L^2 = 0.9 + 0.48 = 1.38$$

$$\sqrt{1.38} = 1.17$$

$$\text{Donc : } D = \text{ETR} = P / 1.17 = 691 / 1.17 = 590.5 \text{ mm}$$

IV.1.4. Courbe Omrothermique

Afin de montrer les différentes caractéristiques du climat nous allons dresser le diagramme ombrothermique qui est une représentation graphique indiquant les variations conjointes de la température moyenne et des pluies mensuelles au niveau de la station d'Agouraï.

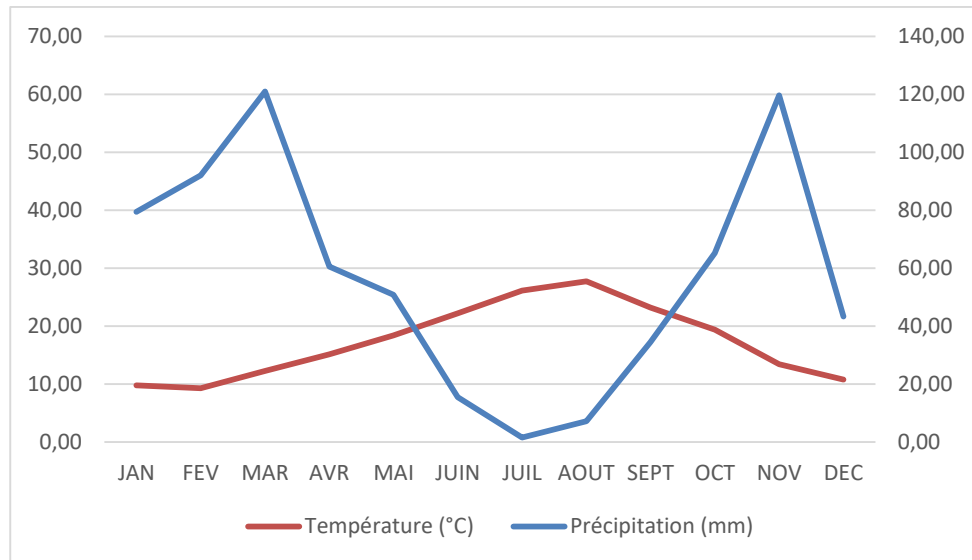


Figure 39: Diagramme ombrothermique de la station d'Agouraï (2010-2013).

Le Diagramme Ombrothermique montre une période sèche qui s'étale du mois juin à septembre entourée de deux périodes humide qui sont janvier-Mai et Septembre-décembre.

Dans la région, le climat est continental semi-aride à sub-humide avec des températures fluctuant de -4 à 44°C en 2013 pour une moyenne annuelle de 17,3 °C.

La pluviométrie moyenne annuelle sur 4 ans (2010-2013) est de 691 mm avec un pic régulièrement remarquable au mois de novembre et mars. L'historique de la pluviométrie montre une irrégularité des précipitations sur les 4 ans représentés et surtout une baisse quantitative durant les 3 dernières années. Cette tendance est confirmée par une pluviométrie moyenne de 1346 mm en 2010 et 388 mm après 2012 (baisse de 71% environ).

L'évapotranspiration réelle est de l'ordre de 590mm. Elle est inférieure aux précipitations. Ainsi un excédent d'eau contribue au ruissellement et à la recharge de la nappe d'eau souterraine.

IV.1.5. Conclusion

Le régime des précipitations est de type semi-aride à humide. Il se caractérise par la sécheresse de l'été et par des pluies généralement courtes et brutales de la saison froide. La saison sèche est fréquemment entrecoupée d'orages qui peuvent donner des chutes d'eau appréciables.

Le régime thermique est caractérisé par les températures élevées de l'été et les températures faibles de la période hivernale.

L'approche des quantités d'eau évapotranspirées est plus délicate. Comme souvent en pays aride à semi-aride les méthodes classiques de calcul ne sont pas adaptées. En effet les valeurs obtenues concernant l'ETR sont proches ou quelque fois supérieures aux précipitations, ce qui induit l'absence d'infiltration. Or il existe des sources pérennes. Dans cette zone la formule de Turc permet de mettre en évidence un excédent d'eau.

IV.2. Contexte Hydrologique :

Le Causse d'Agourai se situe dans la partie sud du bassin hydraulique du Sebou et ne semble au premier abord traversé par aucun cours d'eau majeur. Dans le détail, l'analyse confirme que son réseau hydrographique est représenté par des vallées sèches essentiellement qui contribuent aux bassins versants de l'oued R'dom à travers oued Boufekrane et de l'oued Beht à travers l'oued El Kell.

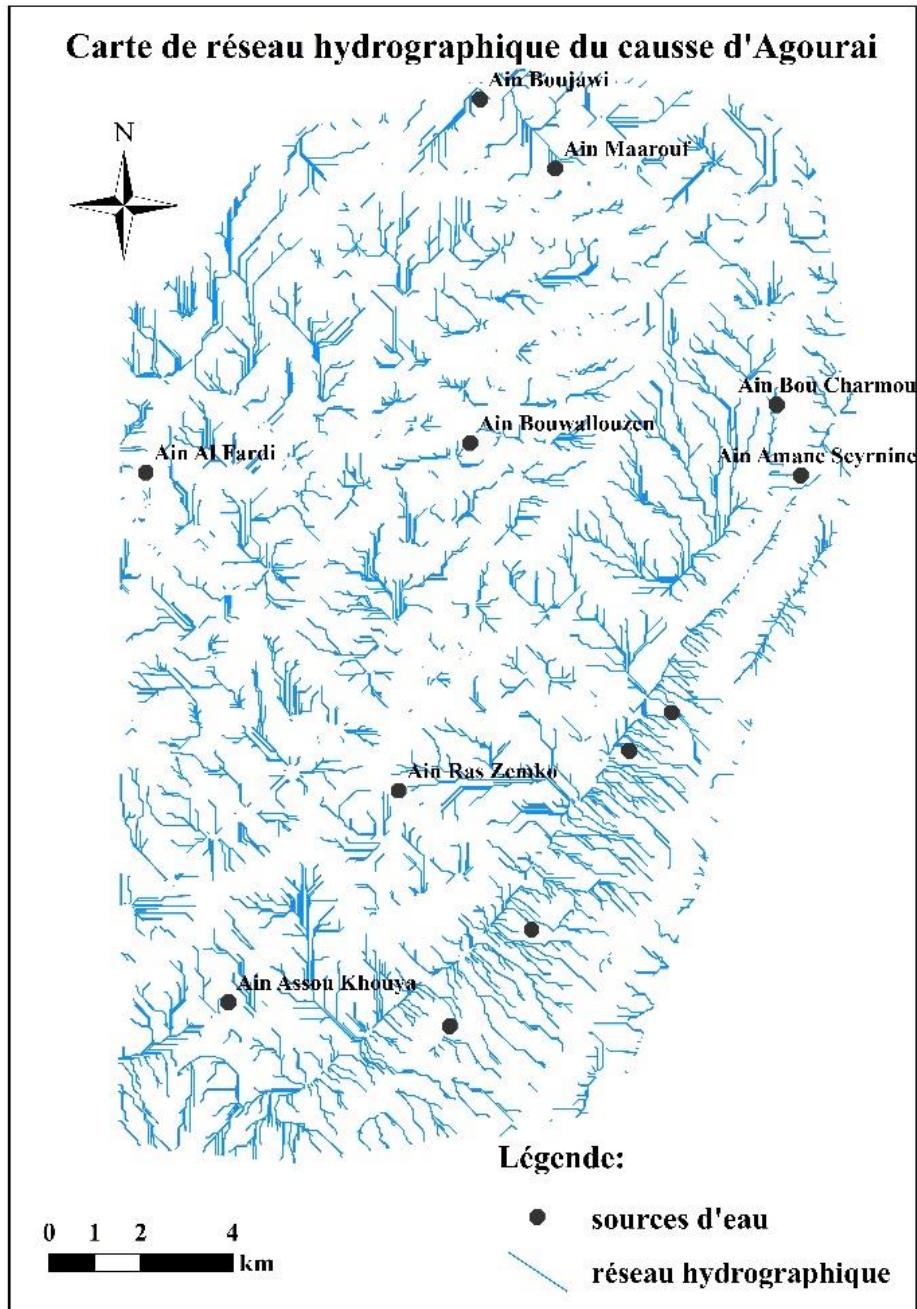


Figure 40: Carte de réseau hydrographique du causse d'Agourai

IV.3. Drainage et écoulement des eaux souterraines

Le Causse moyen atlasique est drainé par deux bassins hydrographiques : celui de l'Oum ErRbia et son affluent le Serou au Sud, celui du Sebou au Nord et de son affluent l'oued Beht au NW. L'abondance des précipitations (moyenne de 800 mm) et plus encore la masse des roches réservoirs du Lias expliquent que le causse joue le rôle de château d'eau et de régulateur hydrologique du Maroc avec le Haut Atlas.

L'écoulement des eaux dans le Moyen Atlas tabulaire a un sens de Sud vers le Nord, qui explique l'alimentation des nappes de Sais par celles du causse Moyen atlasique (figure 41).

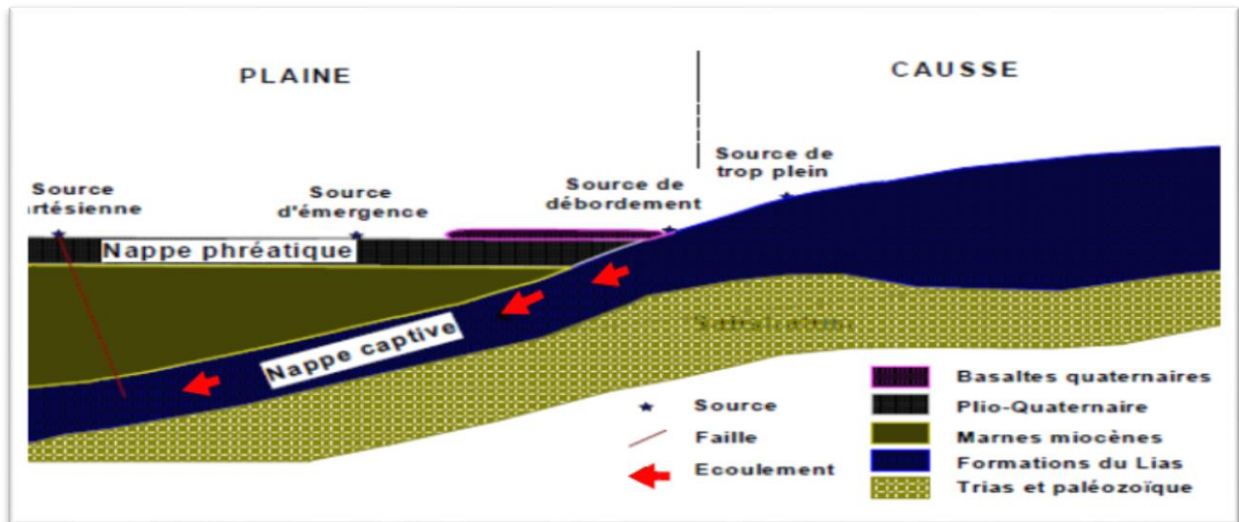


Figure 41: schéma explique le sens d'écoulement des eaux souterraines et l'alimentation du plaine de Sais (Amraoui, 2005 modifiée).

Sur le plateau, lui-même très karstifié, l'infiltration des eaux de pluies et de fonte des neiges est la règle générale. On admet que 20 à 40% du total pluviométrique s'infiltrent dans le Lias soit un débit fictif continu de 30 à 60 m³/s pour une superficie approximative de 5600 km².

L'écoulement superficiel sur le causse est exceptionnel comme en témoigne le réseau très dense de vallées sèches. Seules, les précipitations très concentrées d'averses orageuses d'été parviennent à provoquer pendant quelques heures un écoulement de crue.

Les oueds pérennes coulent dans les vallées plus encaissées. Leurs débits sont plus réguliers que partout ailleurs au Maroc en raison de leur alimentation par sources ou émergences qui s'égrènent le long des thalwegs : oued Sebou, Zra et Aggai au nord, oued El Kantra et Tizguitte au NW, l'Oum er Rbia et le Serou au sud. Seules, les branches supérieures de l'oued Beht prennent naissance sur la bordure du Causse alors que les autres cours d'eau le traversent et s'y encaissent.

C'est au niveau du Trias que les sources sont les plus nombreuses. Néanmoins, sans que le Trias affleure, les sources peuvent jaillir dans le Lias quand celui-ci a été fortement aminci comme c'est le cas dans le Causse d'El Hajeb. Les failles sont aussi jalonnées par des venues d'eau des causses : larges cuvettes séparées par des anticlinaux où affleure le Trias, succession de Horsts et de fossés d'effondrement.

La tectonique permet, d'ailleurs, de distinguer les causses drainés (El Hajeb, Sefrou) des causses secs (Imouzzer, El Hammam, Guigou). Cette distinction est explicable par la profondeur plus ou moins grande des nappes par rapport à la surface.

Le jeu de compartiments affaissés et de synclinaux explique la présence de nappes souterraines, captives ou non, dont témoigne l'abondance des lacs (dayat) permanents ou temporaires.

Le Causse Moyen Atlasique tabulaire alimente en eau la nappe profonde du bassin du Sais et également l'ensemble des sources situées à son piémont. Entre le Causse et le plateau de Mknès, deux groupes de sources d'importance inégale se mettent en évidence (figure 41) :

- Les sources du secteur Ribaa-Bittit au piémont du Causse d'El Hajeb-Ifrane ;
- Les sources Aghbal, Boujaoui, Bouchermou et Maarouf situées au piémont du Causse d'Agourai.

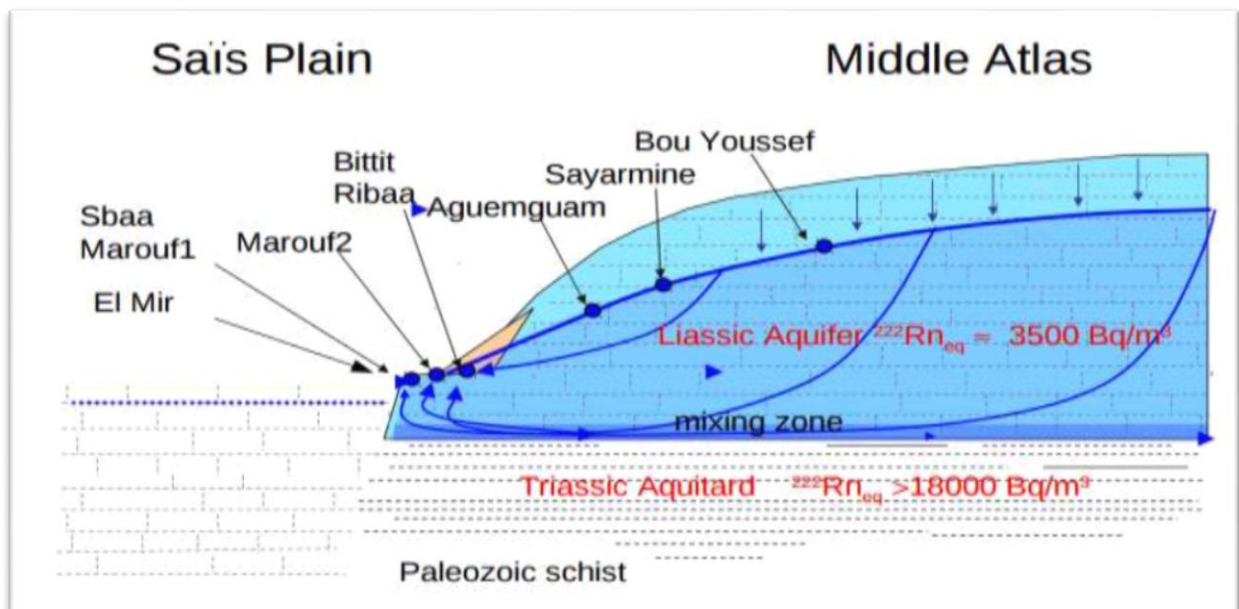


Figure 42 : Schéma explicatif d'écoulements et zones de recharge à l'échelle du bassin (Saracco Ginette, 2011).

IV.4. Caractéristiques des sources

Deux types de sources peuvent être distingués au niveau du causse: les sources de débordement sur le substratum imperméable (Ain Bouchermou par exemple) et les sources de dépression aux intersections du toit de la nappe avec un talweg (Ain Fardi par exemple). La majorité sont des sources de débordement et affleurent sur tout le pourtour du Causse avec une affluence plus importante au niveau de la limite Ouest. Le tableau suivant présente la liste des sources les plus importantes.

N°IRE	Dénomination	Débit (L/s)	Typologie
1287/22	Ain Khouda	2.5	Dépression
1260/22	Ain Amene Syrnine	13.3	Débordement
1262/22	Ain Bouchermou	10.0	Débordement
392/22	Ain la kasba	2.0	Débordement
1288/22	Ain Bou Wallouzen	5.0	Dépression
126/22	Ain Boujaoui	101.0	Débordement
124/22	Ain Maârrouf	146.0	Débordement

Tableau 3: Principales sources du cause d'Agourai.

IV.5. Caractéristiques de l'aquifère

L'analyse et l'interprétation des différentes données ont permis de caractériser le réservoir, ses limites, sa nature, sa structure ainsi que son épaisseur.

IV.5.1. Limite de l'aquifère

Le cause d'Agourai se situe entre la Meseta Centrale au Sud et la plaine du Saïs au Nord (Fassi D. 1999). Ses limites Est, Sud et Ouest sont constituées par les limites d'affleurement entre le Lias et les argiles rouges triasiques. Elles sont considérées comme imperméables. La limite Nord est matérialisée par le contact entre le Lias et sa couverture cénozoïque, le long des flexures séparant les causes du bassin du Saïs (MATEE – ABHS, 2005).

IV.5.2. Fonctionnement de l'aquifère :

L'inventaire des ressources en eau de la zone a servi de base à l'établissement de la carte piézométrique du Cause. La figure 43 présente cette carte.

a. Ecoulement :

Cette carte montre un écoulement général du Sud-ouest vers le Nord-est avec un rehaussement vers le Sud-est. Deux lignes d'écoulements majeurs peuvent être distinguées.

La première passe par Lamnakher pour alimenter Ain Fardi et se prolonge vers le Nord jusqu'à atteindre Ain Maârrouf et Ain Boujaoui. L'allure des isopièzes indiquerait un abouchement vers Fès-Meknès entre Ain Boujaoui et Koudyat Bourti.

La seconde ligne longe l'anticlinal de Ras Zemko vers l'Est et semble alimenter la nappe profonde de la plaine du Sais. Un écoulement secondaire sur le panneau de Boucharmou donne naissance à un débordement sur le substratum imperméable en rive gauche de l'oued Dfali.

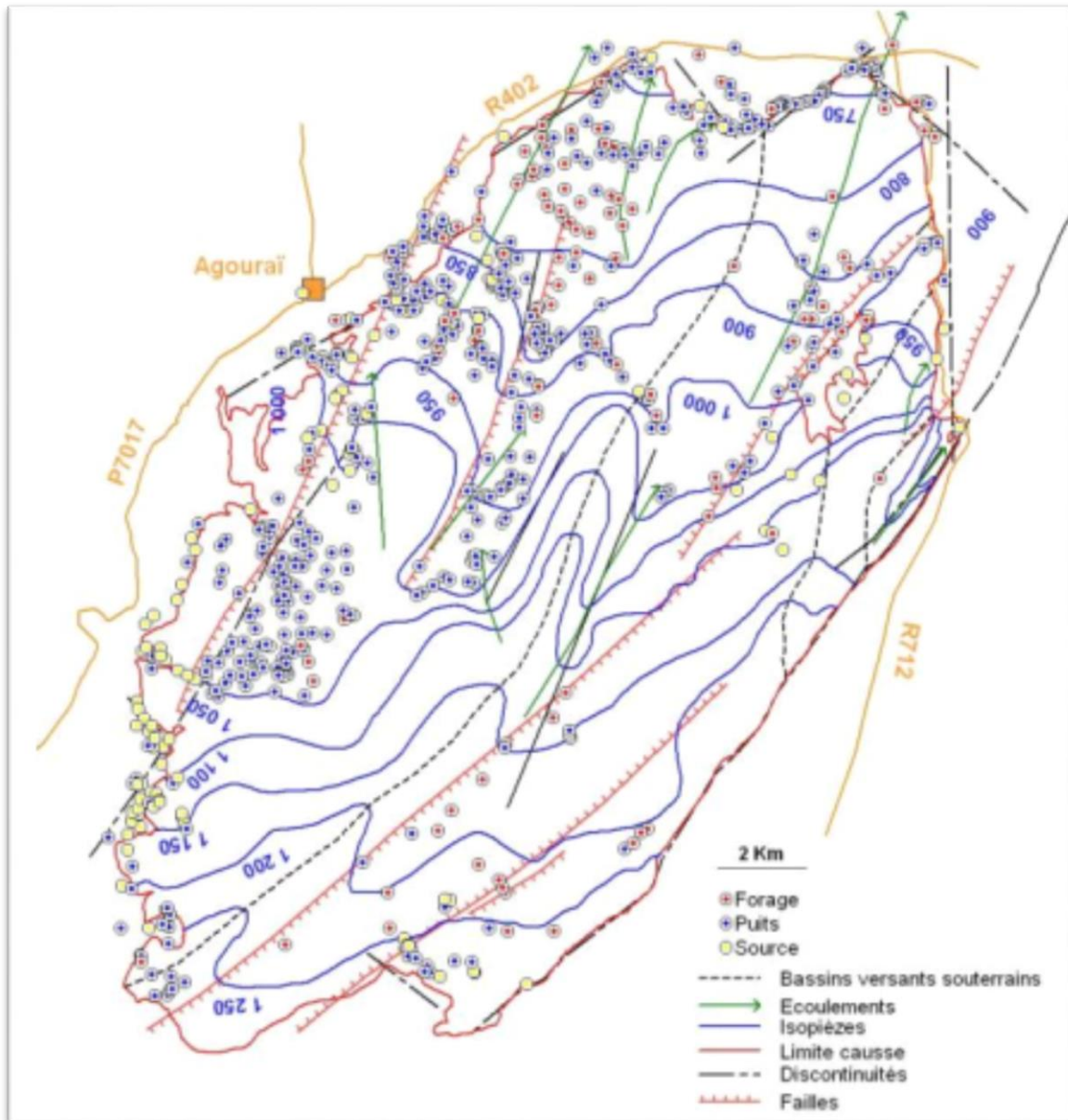


Figure 43: Carte piézométrique de l'aquifère liasique du causse d'Agourai

b. Gradient hydraulique

Le gradient moyen suivant la ligne d'écoulement majeur de direction Sud-Ouest/Nord-Est, est de 2.7%. Il est plus faible dans les plaines comme celle de Msraab et de Timelouka

(inférieur à 2%) et il est plus fort au niveau des failles principales comme celles d'Agoulmame et au niveau de l'anticlinal de Zemko (jusqu'à 3.7%).

c. Paramètres hydrodynamiques

Les caractéristiques hydrodynamiques de cet aquifère sont connues à travers les pompages d'essai réalisés au sein de neuf forages qui l'ont traversé. Le tableau présenté ci-dessous synthétise ces données.

N°IRE	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)	Débit (l/s)
1928/22	2.94 10 ⁻³	7.34 10 ⁻⁵	4.5
865/21	1.04 10 ⁻²	4.16 10 ⁻⁴	5.0
1843/22	2.90 10 ⁻⁵	4.83 10 ⁻⁵	2.9
1307/22	6.65 10 ⁻³	1.66 10 ⁻⁴	21.7
1723/22	1.86 10 ⁻²	1.24 10 ⁻⁴	6.0
1795/22	7.55 10 ⁻³	1.51 10 ⁻⁴	9.0
854/21	4.45 10 ⁻¹	4.45 10 ⁻³	5.3
857/21	6.30 10 ⁻⁴	3.15 10 ⁻⁴	1.6
1346/22	2.09 10 ⁻¹	4.18 10 ⁻³	47.8

Tableau 4 : Paramètres hydrodynamiques disponibles sur le Causse d'Agourai

Pour les perméabilités, la répartition des données met en évidence trois zones :

- En bordure du causse où l'épaisseur de la nappe est faible, et les écoulements limités, K est de l'ordre de 10⁻⁵ m/s ;
- Sur la majorité du Causse, l'écoulement favorise la dissolution du réservoir carbonaté, K augmente jusqu'à atteindre un ordre de 10⁻⁴ ;
- Dans les zones synclinales et/ou faillées, où la dissolution du réservoir carbonaté est plus intense, K peut atteindre 10⁻³ m/s.

Pour les transmissivités, ces variations peuvent être retrouvées et les valeurs de T sont comprises entre 2.9.10⁻⁵ pour les forages 1843/22 et 2,09.10⁻¹ au niveau du 1346/22.

CHAPITRE V : DISSCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

L'analyse des différentes stations microtectoniques mesurées dans le périmètre des sources d'Ain Maârouf, Ain boujaoui et Ain Bouchermou, nous a permis d'établir la hiérarchie du réseau de fractures et de déterminer leur chronologie.

Au niveau de la source de Bouchermou, la fracturation montre que cette source s'est installée dans la continuité orientée NE-SW et qui est empruntée par une faille de même direction, cette dernière serait la principale fracture drainante dans ce site.

Pour les deux sources Maârouf et Boujaoui qui sont situées le long de la bordure Nord du causse d'Agourai, à la limite causse-bassin, la famille des fractures orientées NW-SE est la plus tardive et c'est elle qui est responsable de la résurgence d'eau au niveau de ces deux sources.

Après l'analyse de la fracturation dans 14 stations microtectoniques mesurées dans les calcaires liasiques, on présente la rosace directionnelle générale (fig. 44) des trois sites :

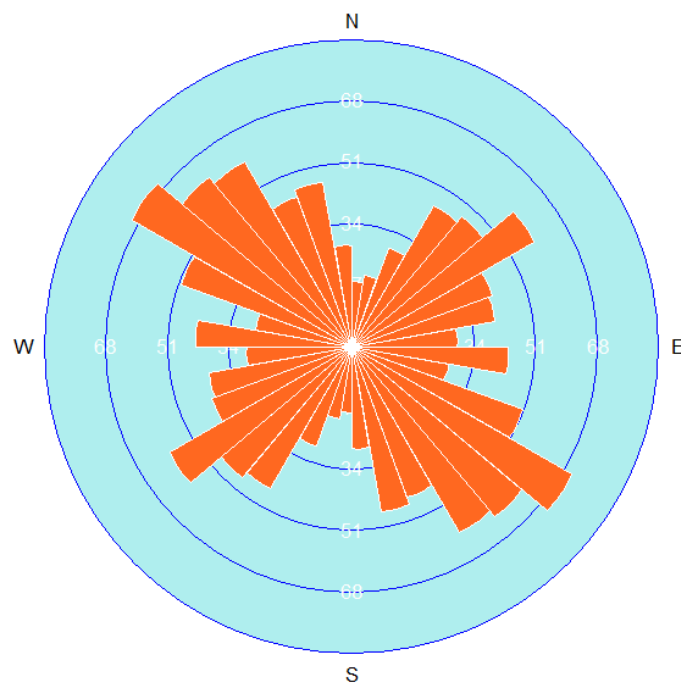


Figure 44 : Rosace directionnelle générale montrant les principales familles de fractures au niveau des trois sources.

Cette rosace nous a permis de constater que la famille la plus dominante est orientée NW-SE, puis la famille moins dominante et qui est orientée NE-SW, notons aussi la présence d'une famille E-W et qui est moins représentée et enfin la quasi-absence de la famille N-S.

La structure globale du Causse d'Agourai est plus ou moins tabulaire, inclinée vers le Nord-Est, avec une bordure Est surélevée par rapport à la bordure Ouest sous l'effet de la faille d'Adarouch de direction NE-SW. Par leur direction NE-SW, certaines failles, héritées de l'Hercynien, semblent avoir un grand rôle dans la paléogéographie secondaire et tertiaire (Chalot Prat et al., 1985): faille de Timelouka, faille d'Agoulmame et faille de Lamnakher avec dislocation de trois panneaux parallèles. Le premier est celui de Boucharmou. Il est surélevé avec une structure plus ou moins tabulaire, devenant monoclinale au Nord-ouest pour faire affleurer le substratum au niveau de la boutonnière de Timelouka. Le second, au centre, est celui de Timelouka caractérisé par l'anticlinal de Ras Zemko qui se prolonge vers le Nord par un haut fond séparant les deux parties Est et Ouest du Causse. Le dernier, le panneau d'Agourai caractérisé au Sud par le synclinal de Lamnakher et au Nord par celui d'Aïn Maârouf.

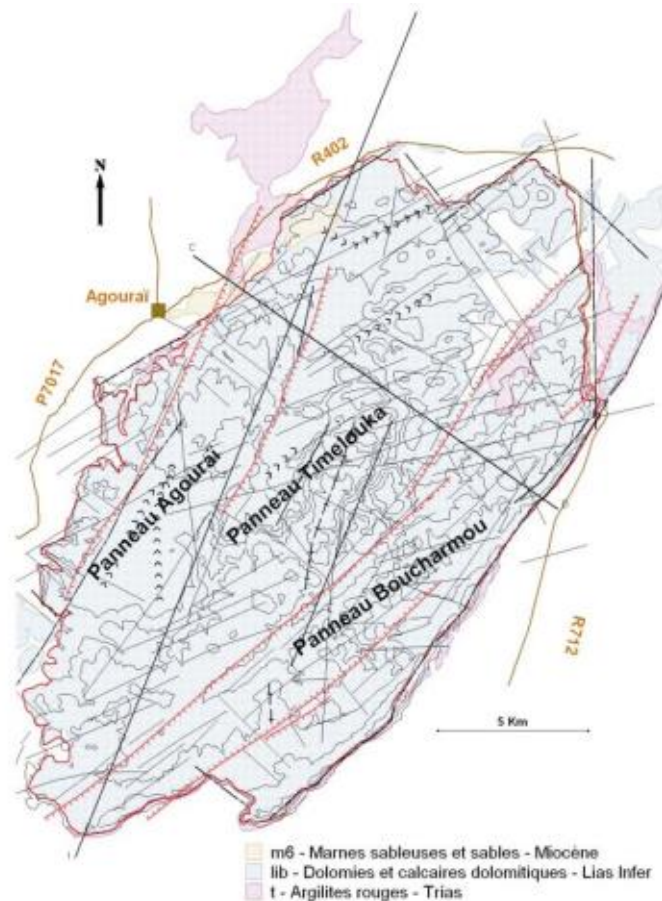


Figure 45 : Géologie et structure du Causse d'Agourai.

En effet, l'aquifère se décompose en trois panneaux structuraux orientant les écoulements vers le Nord-Est selon un gradient moyen de 2.7%. Son épaisseur moyenne est de l'ordre de 100 m allant jusqu'à 200 m. La profondeur maximale de la nappe est de 100 m pour une

épaisseur maximale de 150 m. La perméabilité de l'aquifère varie de 10^{-3} à 10^{-5} m/s pour un coefficient d'emmagasinement moyen de l'ordre de 10^{-1} .

Le profil C-D est présenté sur la coupe ci-dessous montrant la structure de l'aquifère liasique du causse d'Agourai.

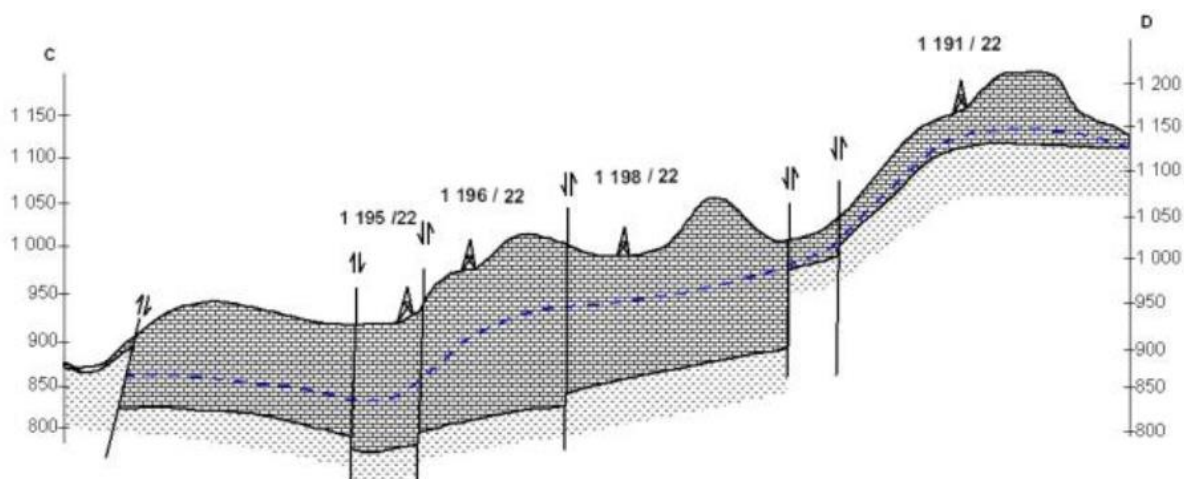


Figure 46 : Coupe transversale du causse d'Agourai.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de ce travail, on s'est intéressé à la reconnaissance hydrogéologique des systèmes aquifères karstiques par différentes méthodologies comme l'analyse de la fracturation aux alentours des sources. Le choix du causse d'Agourai se justifie par sa complexité hydrogéologique, notamment par le développement intense des karsts. De plus, ce système alimente en eau le bassin du Sais.

Les sources de Maâruf, Boujaoui et Bouchermou se situent sur la bordure Nord à NE du causse d'Agourai et peuvent nous renseigner sur la zone de recharge et d'alimentation de la nappe profonde du Sais.

De point de vue structural, l'analyse de la fracturation aux alentours de sources nous a permis de cartographier cette zone et d'acquérir les données concernant les fractures et les phénomènes associés observés au niveau des formations carbonatées liasiques, permettent de dresser un canevas structural du site étudié et d'interpréter les familles de fractures mesurées ainsi que leur chronologie.

La synthèse hydrogéologique du causse d'Agourai a donc permis de créer une base de données SIG, de dresser un état de la situation des ressources en eau du causse d'Agourai et de caractériser l'aquifère ainsi que le comportement de sa nappe.

La collecte et mise à jour des données existantes a tout d'abord permis de recenser et caractériser plusieurs points d'eau sur la zone d'étude dont un pourcentage important de sources.

Un état de la situation des ressources en eau a ensuite pu être établi à travers la synthèse et l'interprétation des données. La piézométrie de la nappe montre une baisse annuelle notable engendrée par un accroissement de la sécheresse et une surexploitation de la nappe.

De point de vue hydrogéologique, le causse d'Agourai est caractérisé par un aquifère des calcaires dolomitiques du Lias. Alors que dans le bassin de Sais, on distingue deux réservoirs aquifères : la nappe phréatique libre qui se développe au niveau de la plaine dans des formations du Plio-Quaternaire et la nappe profonde qui circule principalement dans les formations carbonatées du Lias. Cette nappe est libre au niveau du causse et s'enfonce ensuite sous les terrains imperméables du Tertiaire qui la mettent en charge sous la plaine.

Références

Amraoui, F. (2005). Contribution à la reconnaissance des aquifères karstiques, cas du Lias de la plaine de Saïss et du causse moyen atlasique tabulaire (Maroc). Thèse de Doctorat, Université Hassan II Ain Chock, Casablanca, Maroc, 227 p.

Bouya N., El Ouardi H., Habibou E.H., Mercier E. & Ansan V. (2013) - Interprétation géologique des données aéromagnétiques et leur utilisation pour la cartographie des structures du plateau d'Agourai (Moyen Atlas tabulaire, Maroc). Africa Geosc. Review, 20 (1-2), pp ; 13-20.

Bouya, N. (2014). Utilisation des données géophysiques aéroportées magnétiques et spectrométriques dans la cartographie géologique de la partie NE du massif central marocain et des causses moyenatlasiques. Thèse de Doctorat, Univ. Moulay Ismail, Meknès, Maroc, 179p.

Chalot Prat F., Charrière A. et Ouarhache D. (1985) - Découverte d'un volcanisme explosif fini-triasique sur la bordure occidentale du Moyen-Atlas (Maroc). P.I.C.G., n°183, Marrakech.

EL OUARDI H., HABIBI M., DIAS R., MAHMOUDI A. & OUAZZANI H. (2008) - Variscan and late-Variscan deformation at the NE end of the central Moroccan massif, SW of Meknes (region of Agourai). GGET'2008- 8^a Conferência Annual, 24-26 juillet, Revue de la Fac. Sciences de Porto, 13, pp. 119-121.

El Ouardi H, Boualoul M., Ouhaddach H., Habibi M., Muzarafuti A., Allaoui A., and Amine A. (2018) - Fault analysis and its relationship with karst structures affecting Lower Jurassic limestones in the Agourai plateau (Middle Atlas, Morocco). Geogaceta 63, pp. 119-122.

Fassi D. (1999) - Les formations superficielles du Saïss de Fès et de Meknès des temps géologiques à l'utilisation actuelle des sols, Notes et Mém. Serv. géol., Maroc, Rabat, n°389.

Internet Google - karstification

Matee - ABHS (2005) - Etude de modélisation des nappes de la plaine de Fès-Meknès – version provisoire.

Noraz A. et Pompougnac G. (2005) - Evaluation de la situation des ressources en eau de la commune de Tamchachate.

Saracco G. (2011) - Etude des circulations et du renouvellement des eaux souterraines du Bassin de Sais (Moyen Atlas, Maroc) par couplage de mesures isotopiques et tomographie électromagnétique multi-échelle. Région de Fès-Meknès, mémoire master, Meknès.