



HAL
open science

Contribution of structural, geophysical and hydrochemical studies to the understanding of groundwater flows from the Agourai cause to the Saïss basin (Morocco)

Abdelhamid Allaoui

► **To cite this version:**

Abdelhamid Allaoui. Contribution of structural, geophysical and hydrochemical studies to the understanding of groundwater flows from the Agourai cause to the Saïss basin (Morocco). Hydrologie. Université Moulay Ismail Meknès (Maroc), 2019. Français. NNT: . tel-03744159

HAL Id: tel-03744159

<https://hal.science/tel-03744159v1>

Submitted on 2 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Présentée par

ALLAOUI ABDELHAMID

En vue de l'obtention de

DOCTORAT EN GEOLOGIE

Spécialité : Hydrogéophysique, Géologie structurale

**CONTRIBUTION DES ETUDES STRUCTURALES, GEOPHYSIQUES
ET HYDROCHIMIQUES A LA COMPREHENSION DES
ECOULEMENTS DES EAUX SOUTERRAINES DU CAUSSE
D'AGOURAY VERS LE BASSIN DE SAÏSS, (MAROC)**

Soutenue le 29 juin 2019 devant le jury composé de :

Mr. Abdelhadi EL OUALI	PES, Faculté des Sciences, Meknès	Président
Mr. Abderrahim LAHRACH	PES et Directeur, ENSA, Fès	Rapporteur
Mr. Abdelaziz MRIDEKH	PES, Faculté des Sciences, Kénitra	Rapporteur
Mr. Mustapha BOUJAMAOU	PH, Faculté des Sciences, Meknès	Rapporteur
Mr. Ali ESSAHLAOUI	PES et Vice- Doyen, Faculté des Sciences, Meknès	Examineur
Mr. Abdellah EL HMAIDI	PES, Faculté des Sciences, Meknès	Examineur
Mr. Hmidou EL OUARDI	PES, Faculté des Sciences, Meknès	Examineur
Mr. El-Mostfa MILI	PES, Faculté des Sciences, Meknès	Examineur
Mr. Mustapha BOUALOUL	PES, Faculté des Sciences, Meknès	Directeur de thèse

AVANT-PROPOS

Au terme de ce travail, je tiens tout d'abord, à remercier ALLAH (mon Dieu) tout puissant qui m'a donné la capacité, la force et la patience afin de parvenir à ce niveau.

J'exprime toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude au Professeur **Mustapha BOUALOUL**, Directeur de thèse et Professeur à la faculté des sciences de Meknès, pour m'avoir guidé tout au long de ma formation à la Faculté des Sciences de Meknès et en doctorat. Je lui suis aussi reconnaissant pour m'avoir offert l'occasion de pratiquer mes connaissances scientifiques surtout en géophysique sur le terrain. Je dois signaler que ce travail n'aurait jamais abouti sans ses conseils, ses encouragements, sa patience et sa générosité.

Mes remerciements s'adressent au Professeur **Abdelhadi EL OUALI** Professeur à la faculté des sciences de Meknès, qui a accepté de présider le jury de thèse.

Je remercie également monsieur **Abdelaziz MRIDEKH** Professeur à la faculté des sciences de Kénitra qui a bien voulu rapporter ce travail et surtout d'avoir fait le déplacement pour être présent dans le jury de thèse.

Mes remerciements au Professeur **Abderrahim LAHRACH**, Directeur de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées, pour avoir rapporté ce travail et siéger dans mon jury de thèse malgré ses occupations.

Je remercie aussi le Professeur **Mustapha BOUJAMAOU** Professeur à la faculté des sciences de Meknès qui a bien voulu rapporter ce travail, pour ses remarques, ses orientations et pour être présent dans le jury de thèse.

Je tiens de remercier également le Professeur **Abdellah EL HMAIDI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Meknès, pour son soutien et son aide qui m'a présenté lors de ce travail et qui m'a honoré en acceptant d'examiner mon travail de recherche.

J'adresse mes remerciements au Professeur **Ali ESSAHLAOU**, Vice- Doyen de la Faculté des Sciences de Meknès, pour l'intérêt qu'il a apporté pour examiner ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements au professeur **Hmidou EL OUARDI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Meknès d'avoir accepté d'évaluer mon travail en tant que examinateur et de m'avoir accompagner sur le terrain.

Mes remerciements aussi à monsieur **El-Mostafa MILI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Meknès, qui a accepté d'être examinateur dans le jury de ma thèse.

Au terme de ce travail j'exprime toutes mes gratitudes et remerciements au Bureau d'études **GEOPROSPECT**, qui m'a offert l'occasion pour réaliser mes missions de terrain.

Je suis reconnaissant à mes amis qui m'ont présenté l'aide et le soutien lors de la réalisation des missions sur terrain et lors du traitement des données par les logiciels. Pour ces gentils gens je leur dis merci beaucoup.

J'adresse mes remerciements à tous mes professeurs qui m'ont donné l'information et le savoir le long de ma vie estudiantine.

Finalement je dis Merci à tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce modeste travail.

DEDICAE

A mes chers parents pour ses sacrifices et leurs soutiens depuis ma naissance
que dieu les garde et les protège.

A mon grand frère et sa petite famille, à mon petit frère et ma chère sœur et
ses enfants qui m'ont toujours aidé, encouragé et soutenu...

A ma chère femme ses aides sa patience et son soutien

A mes enfants que dieu les protège

A ma petite et ma grande famille pour leurs encouragements

A mes professeurs de la faculté des sciences de Meknès, qu'ont apporté leur
aide et leur soutien tout au long de mes études universitaires

A mes amis et mes collègues pour leur solidarité

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَإِنَّ مِنَ الْحِجَارَةِ لَمَا يَتَفَجَّرُ مِنْهُ

الْأَنْهَارُ وَإِنَّ مِنْهَا لَمَا يَشَّقُّ

فَيَخْرُجُ مِنْهُ الْمَاءُ

سورة البقرة الآية 74

Résumé

Le causse d'Agouraï représente la terminaison occidentale du Causse moyen atlasique marocain. Il est caractérisé par une structure tabulaire dominée par l'affleurement de formations calcaires dolomitiques d'âge liasique qui reposent sur des argiles rouges évaporitiques du Trias puis sur des schistes primaires. Les calcaires sont affectés par une importante fracturation et une structuration par des failles d'héritage hercynien qui ont rejoué au cours du Secondaire voire même du Plio-Quaternaire. Les calcaires du Lias de ce causse forment un aquifère très sollicité dans l'exploitation des eaux souterraines à but agricole.

Le transfert des eaux souterraines du causse vers le bassin de Saïss se fait principalement le long de grandes fractures ou karst affectant les calcaires dolomitiques du Lias et constituant des axes de drainage préférentiel. Pour une bonne compréhension du processus de ce transfert des eaux souterraines nous avons utilisé comme méthodologie de travail, la télédétection en réalisant des cartes des linéaments pour extraire les directions dominantes, l'analyse structurale par la mesure de la fracturation au niveau de différentes stations et l'investigation géophysique par méthodes électriques via la réalisation des profils de tomographie électrique de direction E-W perpendiculaires au sens d'écoulement majeur. Deux profils à l'amont d'Aïn Maarouf, un 3ème à l'amont d'Aïn Boujaoui et un autre entre les deux ; d'autres profils de trainé électrique ont été réalisés à cet endroit pour confirmer les résultats de la tomographie, sans oublier la réalisation des sondages électriques verticaux qui ont permis de suivre l'évolution des formations géologiques en profondeur.

L'étude de la qualité des eaux par le suivi périodique des paramètres physico-chimiques des sources et des points d'eaux représentatifs, permet d'évaluer le degré d'infiltration des produits chimiques utilisés en agriculture dans la nappe et qui peuvent constituer un risque de pollution très potentiel. Ce suivi a consisté à l'échantillonnage et l'analyse chimique des eaux de quatre sources et quatre puits bien répartis sur le causse d'Agouraï, puis à calculer par la suite les indices de qualité et pollution de ces eaux.

Mots clé : Calcaires, Lias, Sources, eau, Causse d'Agouraï, bassin de Saïss, géophysique, télédétection, structurale, qualité, pollution.

Abstract

The Agouraï cause represents the western part of the Moroccan Middle Atlas cause and it is characterized by a tabular structure dominated by the outcropping of dolomitic limestone formations of liasic age, which are based on triassic evaporite red clays and then on primary schists. The limestones are affected by an important fracturing and structuring by Hercynian inheritance faults which replayed during the course of the Mesozoic or even the plioquaternary. The Lias limestones of this cause form a very busy aquifer in the exploitation of groundwater for agricultural purposes.

The transfer of groundwater from the cause to the Sais basin is mainly the long of large fractures or karst affecting the dolomitic limestone and constituting preferential drainage axes. For a good understanding of the process of this transfer of groundwater we used remote sensing by making lineament maps to extract dominant directions, the structural analysis by the measurement of fractures in different places and geophysical investigation by electrical methods; via the realization of E-W electrical direction tomography profiles perpendicular to the direction of flow major, two profiles upstream of Ain Maarouf, a third upstream of Ain Boujaoui and another between them. Other electrical track profiles were made at this location to confirm the results of the tomography, not to mention the completion of the vertical electrical soundings that allowed following the evolution of geological formations in depth.

The study of water quality by periodic monitoring of the physicochemical parameters of the springs and representative water points makes it possible to evaluate the degree of infiltration of the chemical products used in agriculture into the aquifer and which may constitute a risk of pollution very potential. This follow-up consisted in the sampling and chemical analysis of the water from four springs and four well-distributed wells on the Agouraï cause, then calculate the quality and pollution indices in order to know the current status of these waters.

Key words: limestones, Lias, springs, water, Agouraï cause, Saïss basin, geophysics, remote sensing, structural, quality, pollution.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE I : GENERALITES, MOYENS ET METHODES	1
Chapitre 1 : GENERALITES.....	3
I. Moyen Atlas Tabulaire : géologie, hydrogéologie et climatologie	3
I.1. Contexte géographique.....	3
I.2. Géologie régionale	4
I.2.1. Paléozoïque	4
I.2.2. Trias.....	5
I.2.3. Le Lias	5
I.2.4. Le Crétacé.....	6
I.2.5. Le Tertiaire.....	6
I.2.6. Le Quaternaire.....	7
I.3. Cadre morphologique et Structurale	8
I.3.1 Morphologie	8
I.3.2 Cadre Structurale	9
I.4. Contexte hydrologique et hydrogéologique.....	12
I.4.1 Contexte hydrologique.....	12
I.4.2 Contexte hydrogéologique.....	12
I.5. Contexte climatique.....	14
I.5.1 Pluviométrie	14
I.5.2 La Température.....	16
I.5.3 Le vent.....	18
II. Le causse d'Agourai : géologie, hydrogéologie et climatologie.....	18
II.1. Géographie :.....	18
II.2. Géologie	18
II.3. Morphologie et structurale	20
II.3.1. Morphologie.....	20
II.3.2. Cadre Structurale	21
II.4. Aperçu sur le système karstique	21
II.5. Climatologie	23
II.5.1. Précipitation.....	23
II.5.2. Température	24
II.5.3. L'évapotranspiration réelle pour la station d'Agourai :	24
III. Conclusion	25
Chapitre 2 : MOYENS ET METHODES	26
I. Télédétection.....	26

I.1.	Principes de base de la télédétection	26
I.2.	Application.....	28
II.	Géophysique.....	28
II.1.	Introduction	28
II.2.	Méthodes électriques	29
II.2.1.	Principe d’investigation.....	29
II.2.2.	La méthode géoélectrique.....	30
II.2.3.	La méthode de tomographie électrique	37
II.3.	La méthode magnétique	40
II.3.1-	Principes théoriques de la prospection magnétique.....	41
II.3.2	Quelques filtres appliqués au traitement des donnés magnétiques	46
II.3.3	Méthode aéromagnétique.....	48
III.	Hydrochimie	48
III.1.	Analyses physico-chimiques	48
PARTIE II : ETUDE STRUCTURALE ET GEOPHYSIQUE		3
Chapitre 3 : ETUDE STRUCTURALE PAR TELEDETECTION ET ANALYSE DE LA FRACTURATION.....		51
I.	Introduction.....	51
II.	Extraction des linéaments par télédétection	52
II.1-	Cartographie des linéaments :.....	52
II.2-	Extraction manuelle des linéaments.....	52
II.3-	Extraction automatique des linéaments	53
II.3.1.	Analyse en composantes principales (ACP) :.....	53
II.3.2.	Application des filtres directionnels sur la CP1	54
II.3.3.	Résultats obtenus de l’extraction automatique des linéaments	54
II.3.4.	Traitement statistique des linéaments extraits.....	55
II.4-	Rosace directionnelle.....	56
II.5-	Histogramme.....	57
II.6-	Synthèse :	58
II.7-	Conclusion.....	59
III.	Analyse de la fracturation au niveau de la source Ain Maarouf	60
III.1.	Station1	61
III.2.	Station 2	63
III.3.	Station 3	66
III.4.	Station 4	68
III.5.	Station 5	70
III.6.	Station 6	72
III.7.	Station 7	74

III.8. Station 8	77
III.9. Synthèse	78
IV. Analyse de la fracturation au niveau de la source Bouchermou	79
IV.1. Station 1	80
IV.2. Station 2	82
IV.3. Station 3	84
IV.4. Station 4	85
IV.5. Synthèse	87
V. Conclusion	88
Chapitre 2 : REINTERPRETATION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES ET CARACTERISATION GEOPHYSIQUE	89
I. Réinterprétation des données aéromagnétiques du Causse d'Agouraï	89
I.1. Introduction	89
I.2. Le champ résiduel du causse d'Agouraï	90
I.3. La transformée de réduction au pôle (RTP)	91
I.4. Le signal analytique	92
I.5. La première dérivée verticale	93
I.6. La deuxième dérivée verticale	94
I.7. Le gradient horizontal	95
I.8. Le prolongement vers le haut	96
I.9. Le Tilt dérivative	98
I.10. Synthèse	101
II. Caractérisation géophysique des écoulements souterrains	102
II.1. Application de la géophysique sur le complexe sourcier Ain Maarouf – Ain Boujaoui	102
II.1.1. Analyse des sondages électriques :	103
II.1.2. Analyse des profils de trainé électrique :	107
II.1.3. Analyse des profils de tomographie électrique :	108
II.2. Application de la géophysique sur la structure en graben d'Ain Sidi Youssef :	111
II.2.1. Analyse des sondages électriques	112
II.2.2. Analyse des profils de trainé électrique	115
II.2.3. Analyse du profil de tomographie électrique	117
III. Conclusion	117
PARTIE III : HYDROGEOLOGIE, HYDROCHIMIE ET CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA QUALITE	51
Chapitre 1 : HYDROGEOLOGIE ET HYDROCHIMIE.....	120
I. Hydrologie et hydrogéologie :	120
II.1. Hydrologie :	120
II.2. Hydrogéologie :	121

II.	Hydrochimie	126
II.1.	Introduction	126
II.2.	Variation spatio-temporelle de la température	128
II.3.	Variation spatio-temporelle du pH	129
II.4.	Variation spatio-temporelle de la conductivité	130
II.5.	Variation spatio-temporelle l'ammonium.....	131
II.6.	Variation spatio-temporelle des nitrites.....	132
II.7.	Variation spatio-temporelle des nitrates.....	133
II.8.	Variation spatio-temporelle des ortho-phosphates.....	134
II.9.	Variation spatio-temporelle des sulfates	135
II.10.	Variation spatio-temporelle de l'oxygène dissous	136
II.11.	Variation spatio-temporelle des chlorures	137
II.12.	Variation spatio-temporelle du calcium.....	138
II.13.	Variation spatio-temporelle du magnésium	139
II.14.	Variation spatio-temporelle de la dureté totale.....	140
II.15.	Conclusion.....	141
Chapitre 2 : APPLICATION DE LA METHODE SOM DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS ET CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES		
142		
I.	Application de la méthode SOM des réseaux de neurones artificiels :	142
I.1.	Introduction :	142
I.1.1.	Acquisition des données	142
I.1.2.	Description des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA).....	143
I.1.3.	Description du modèle des cartes auto-organisatrices (Self Organising Maps ou SOM) 143	
I.1.4.	Classification hiérarchique ascendante par les cartes SOM (SOM-CHA)	144
I.2.	Présentation des résultats	145
I.2.1.	Carte SOM.....	145
I.2.2.	Classification hiérarchique ascendante	147
I.2.3.	Analyse en composante principale.....	148
II.	Contribution à l'étude de la qualité des eaux souterraines du cause d'Agourai	152
II.1.	Introduction	152
II.2.	Indices de qualité.....	152
II.2.1.	Indice global de pollution des eaux souterraines :	152
II.2.2.	Indice global de qualité des eaux souterraines	155
III.	Conclusion	157
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES		
158		
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		
161		

Liste des figures

Figure 1: géographie du moyen atlas tabulaire.....	3
Figure 2: mosaïquage des trois cartes géologique (Agouraï, Elhajeb et Sefrou) montrant la géologie du moyen atlas.....	4
Figure 3: colonne litho-stratigraphique montrant le passage Trias-Lias	6
Figure 4: colonne litho-stratigraphique du Moyen Atlas dans la localité du Haut Sebou (in Qadem 2015).....	7
Figure 5 : coupes litho-stratigraphiques au SE du Moyen Atlas (Leclerc et Bentayeb, 1975).....	8
Figure 6 : modèle numérique de terrain montrant la topographie du CMA (A : plan 2D; B : plan 3D) .	9
Figure 7 : rosace du nombre de linéament à l'échelle du causse El Hajeb Ifrane (Amraoui, 2005.....	10
Figure 8 : carte des linéaments et diagramme de rosace à l'échelle du moyen atlas tabulaire (Aouragh 2015).....	11
Figure 9 : réseau hydrographique principal du moyen Atlas tabulaire.....	12
Figure 10 : principales nappes de bassin de Sebou (El jabbouri, 2014).....	14
Figure 11 : pluviométrie des stations mensuelles (B) et annuelles (A).....	15
Figure 12 : carte des isohyètes actualisée du bassin du Sebou (El jabbouri, 2014)	16
Figure 13 : températures minimales, moyennes et maximales (1973-2003).....	17
Figure 14 : carte géologique simplifiée de la zone d'étude.....	19
Figure 15 : log lithostratigraphique donnant la succession des formations géologiques rencontrées dans le causse d'Agouraï	19
Figure 16 : modèle numérique montrant l'altitude du causse d'Agouraï	20
Figure 17 : carte de la dérivée verticale de l'ordre 1 dans la région d'Agouraï.	21
Figure 18 : schéma du système karstique qui présente les phénomènes majeurs interagissant au sein d'un karst actif (Husson, 2013).....	22
Figure 19 : précipitation moyenne mensuelles au niveau de la station d'Agouraï (2010-2013).....	23
Figure 20 : température moyenne mensuelles au niveau de la station d'Agouraï (2010-2013).....	24
Figure 21 : éléments fondamentaux de la télédétection	27
Figure 22 : les sept étapes de la télédétection.....	27
Figure 23: principe de la méthode géoélectrique.....	31
Figure 24 : technique de sondage électrique	34
Figure 25 : abaque CH1 aide à l'interprétation des sondages électriques	35
Figure 26 : technique de traîné électrique	36
Figure 27 : principe de la tomographie électrique.....	37
Figure 28 : schéma d'acquisition et de traitement d'un profil tomographique.....	40
Figure 29 : composantes du champ magnétique terrestre (Telford 1998).....	42
Figure 30 : les classes des matériaux ferromagnétiques.....	45
Figure 31 : principe de la transformation RTP sur les données magnétiques. L'interprétation d'une anomalie dipolaire (a) étant ambiguë, la transformation RTP lui confère un aspect mono-polaire plus simple à étudier (b) (Blakely, 1996).....	46
Figure 32 : image multi-spectrale sur la zone d'étude avant traitement.....	52
Figure 33 : carte de l'extraction manuelle des linéaments	53
Figure 34: carte de l'extraction automatique des linéaments	55
Figure 35 : rosace directionnelle des linéaments extrait dans le causse d'Agouraï,.....	56
Figure 36 : histogramme montrant les classes des linéaments extraits automatiquement.....	58
Figure 37 : carte des linéaments du Causse d'Agourai superposée sur image satellite.....	59
Figure 38 : plan de situation des stations de mesure de la fracturation	61
Figure 39 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 1 à Ain Maarouf.....	63

Figure 40 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 2	66
Figure 41 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 3	68
Figure 42 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 4	70
Figure 43 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 5	72
Figure 44 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 6	74
Figure 45 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 7	75
Figure 46 : schéma représentatif expliquant la résurgence d'Ain Maarouf, localisée à l'intersection de deux failles normales orientées N40 et N122.....	76
Figure 47 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 8 à Ain Maarouf	78
Figure 48 : rosace directionnelle générale des fractures mesurées dans les différentes stations au pourtour de la source Ain Maarouf	79
Figure 49 : localisation des stations mesurées dans le secteur de Bouchermou	80
Figure 50 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 1 à Ain Bouchermou	82
Figure 51 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 2 à Ain Bouchermou	84
Figure 52 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 3 à Ain Bouchermou	85
Figure 53 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 4 à Ain Bouchermou	87
Figure 54 : rosace directionnelle générale des fractures mesurées dans les différentes stations au pourtour de la source Ain Bouchermou.....	87
Figure 55 : carte du champ magnétique résiduel au niveau du causse d'Agouraï.....	90
Figure 56 : carte de la Transformée de réduction au pôle RTP au niveau du causse d'Agouraï.....	91
Figure 57 : carte du signal analytique au niveau du causse d'Agouraï	92
Figure 58 : carte de la première dérivée verticale	93
Figure 59 : projection des principales failles sur la carte de la première dérivée verticale	94
Figure 60 : carte de la deuxième dérivée verticale	95
Figure 61: carte du gradient horizontal	96
Figure 62 : carte du prolongement vers le haut 500m	97
Figure 63 : carte du prolongement vers le haut 1000m	98
Figure 64 : carte de dérivée de « Tilt dérivative ».....	99
Figure 65 : carte géologique du causse d'Agouraï assemblée à partir des cartes géologiques d'Agouraï et d'El Hajeb montrant les principales failles.....	100
Figure 66 : projection des failles principales sur la carte de TDR.....	100
Figure 67 : carte des failles principales et discontinuités magnétiques	101
Figure 68 : rosace directionnelle des failles principales (A) et des discontinuités magnétiques (B) ..	102
Figure 69 : situation des mesures géoélectriques sur image satellitaire	103
Figure 70 : courbe et modèle du sondage électrique SE1.....	105
Figure 71 : courbe et modèle du sondage électrique SE2.....	106
Figure 72 : profil de trainé électrique TE1	107
Figure 73 : profil de trainé électrique TE2	108
Figure 74 : profil de tomographie électrique PT1 d'Ain Maarouf	109
Figure 75 : profil de tomographie électrique PT2 d'Ain Maarouf	109
Figure 76 : profil de tomographie électrique PT4 d'Ain Boujaoui	109
Figure 77 : profil de tomographie électrique PT3 intermédiaire	110
Figure 78 : linéaments principaux relevés par la géophysique	110
Figure 79 : implantation des mesures géophysique sur image satellitaire.....	111
Figure 80 : courbes et modèles des sondages électriques SE1, SE2, SE3, SE4 et SE5.....	114
Figure 81 : coupe géo-électrique entre les sondages réalisés	115
Figure 82 : profil de trainé électrique 1	116
Figure 83 : profil de trainé électrique 2	116

Figure 84 : section du profil tomographique	117
Figure 85 : extraction du réseau hydrographique du causse d'Agourai à partir du MNT	121
Figure 86 : coupe hydrogéologique expliquant l'écoulement vers le bassin de Saïs (Saracco, 2011)	122
Figure 87 : coupe corrélative entre des forages dans le causse d'Agourai	124
Figure 88 : coupe corrélative entre des forages dans le causse d'Agourai	125
Figure 89 : carte piézométrique dans le causse d'Agourai (campagne Avril 2017)	126
Figure 90 : situation des stations de mesure sur image satellitaire	128
Figure 91 : variation spatio-temporelle de la température	129
Figure 92 : variation spatio-temporelle du pH	130
Figure 93 : variation spatio-temporelle de la conductivité	131
Figure 94 : variation spatio-temporelle l'ammonium	132
Figure 95 : variation spatio-temporelle des nitrites	133
Figure 96 : variation spatio-temporelle des nitrates	134
Figure 97 : variation spatio-temporelle des ortho-phosphates	135
Figure 98 : variation spatio-temporelle des sulfates	136
Figure 99 : variation spatio-temporelle de l'oxygène dissous	137
Figure 100 : variation spatio-temporelle des chlorures	138
Figure 101 : variation spatio-temporelle du calcium	139
Figure 102 : variation spatio-temporelle du magnésium	140
Figure 103 : variation spatio-temporelle de la dureté totale	141
Figure 104 : neurone artificiel à entrée multiples (Kohonen, 1995)	143
Figure 105 : représentation simplifiée de la carte auto-organisatrice SOM (Coulibaly et al., 1999) ..	144
Figure 106 : carte U-matrix	146
Figure 107 : répartition des échantillons de puits et de sources sur la carte de Kohonen à partir des variables physico-chimiques étudiées	146
Figure 108 : gradient de valeurs des paramètres physico-chimiques sur la carte de Kohonen	147
Figure 109: dendrogrammes de la classification hiérarchique des cellules de la carte de Kohonen (SOM) sur la base des paramètres physico-chimiques des eaux de puits et de sources du Causse du Moyen Atlas d'Agourai	148
Figure 110 : dendrogramme de classification hiérarchique des variables physico-chimiques	149
Figure 111 : cercles de corrélation PCA: (a) PC1 vs PC2, (b) PC1 vs PC3	149
Figure 112 : projection des échantillons sur le plan factoriel (PC1 X PC2) à partir des paramètres physicochimiques des eaux de puits et de sources du Causse d'Agourai	150
Figure 113 : projection des échantillons sur le plan factoriel (PC1 X PC3) à partir des paramètres physicochimiques des eaux de puits et de sources du Causse d'Agourai	151
Figure 114 : projection des échantillons sur le plan factoriel (PC1 X PC2) à partir des paramètres physicochimiques des eaux de puits et de sources du Causse d'Agourai	152
Figure 115 : carte de projection de PIG sur la zone d'étude	155
Figure 116 : carte de projection de WQI sur la zone d'étude	157

Liste des tableaux

Tableau 1: précipitations annuelles et mensuelles des cinq stations	14
Tableau 2 : températures annuelles et mensuelles des trois stations	17
Tableau 3 : débit des principales sources du causse d'Agourai	23
Tableau 4 : principe, grandeurs physiques mesurées et les paramètres de quelques méthodes de la géophysique appliquée	29
Tableau 5 : valeurs usuelles de la résistivité électrique des formations géologiques	31
Tableau 6 : différents types de dispositifs géo-électriques	32

Tableau 7 : protocoles des paramètres mesurés.....	48
Tableau 8 : matrices des filtres sobel	54
Tableau 9 : classes des linéaments extraits selon la longueur	57
Tableau 10 : mesures réalisées au niveau de la station 1.....	62
Tableau 11 : mesures réalisées au niveau de la station 2.....	65
Tableau 12 : mesures réalisé au niveau de la station 3.....	67
Tableau 13 : mesures réalisées au niveau de la station 4.....	69
Tableau 14 : mesures réalisées au niveau de la station 5.....	71
Tableau 15 : mesures réalisées au niveau de la station 6.....	73
Tableau 16 : mesures réalisées au niveau de la station 7.....	75
Tableau 17 : mesures réalisées au niveau de la station 8.....	77
Tableau 18 : mesures réalisées au niveau de la station 1.....	81
Tableau 19 : mesures réalisées au niveau de la station 2.....	83
Tableau 20 : mesures réalisées au niveau de la station 3.....	84
Tableau 21 : mesures réalisées au niveau de la station 4.....	86
Tableau 22 : profondeur des forages de la coupe 1	122
Tableau 23 : profondeur des forages de la coupe 2	123
Tableau 24 : Paramètres physicochimiques utilisés dans cette étude et leurs désignations.	142
Tableau 25 : grandeurs statistiques de base (Min, Moyenne, Max) pour les paramètres physico- chimiques de toutes les stations.....	145

Liste des photos

Photo 1 : morphologie du cause d'Agourai	20
Photo 2 : mise en œuvre sur le terrain	36
Photo 3 : matériel d'acquisition.....	39
Photo 4 : aspect de la fracturation mesurée à la surface d'une strate calcaire à Ain Maarouf	61
Photo 5 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 1 à Ain Maarouf	62
Photo 6 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 2 à Ain Maarouf	64
Photo 7 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 2 à Ain Maarouf	64
Photo 8: représentation de la fracturation mesurée dans la station 3.....	66
Photo 9: représentation de la fracturation mesurée dans la station 4.....	68
Photo 10: représentation de la fracturation mesurée dans la station 4.....	69
Photo 11: représentation de la fracturation mesurée dans la station 5.....	71
Photo 12: représentation de la fracturation mesurée dans la station 6.....	73
Photo 13: représentation de la fracturation mesurée dans la station 7.....	74
Photo 14: représentation de la fracturation mesurée dans la station 8 à l'amont de la source Ain Maarouf	77
Photo 15: représentation de la fracturation mesurée dans la station 1.....	81
Photo 16: représentation de la fracturation mesurée dans la station 2.....	83
Photo 17: représentation de la fracturation mesurée dans la station 3.....	84
Photo 18: représentation de la fracturation mesurée dans la station 4.....	86

INTRODUCTION GENERALE

Les formations calcaires constituent en général de bons réservoirs d'eaux souterraines offrant une eau de bonne qualité, c'est le cas des calcaires liasiques des causses moyen atlasiques. Le causse calcaire d'Agouraï objet de notre travail, constitue la partie occidentale de la grande unité structurale du Moyen Atlas tabulaire, constitué essentiellement par des terrains calcaires dolomitiques d'âge liasique ; il contient des sources d'eau avec des débits importants, qui constituent depuis longtemps la principale source d'alimentation du bassin de Saïss en eaux souterraines. Cependant le développement de l'agriculture industrielle à l'amont de ces sources et l'utilisation intensive des engrais et des pesticides constituent un risque potentiel de la dégradation de la qualité physicochimique et biologique des eaux de ces sources.

Le mécanisme de transfert des eaux souterraines du causse oriental et central vers la plaine de Saïss a fait l'objet de nombreuses études structurales, géophysiques et hydrogéologiques (Amraoui 2005, Qarqori 2015, Bouikbane 2015). Cependant la partie occidentale du Causse est mal connue et aucune étude n'a été faite sur le processus de transfert des eaux depuis le Causse vers la plaine de Saïss.

L'objectif du présent travail est de contribuer à la compréhension de ce processus de transfert à travers une étude complémentaire multidisciplinaire qui se base sur les axes suivants :

- une analyse structurale par traitement d'images satellitaires et mesures de la fracturation dans des différentes zones du causse pour élucider les principales directions dominantes dans ce causse ;
- une étude géophysique par méthodes électriques et traitements des données aéromagnétiques dont l'objectif est la mise en évidence des fractures et des failles à l'échelle régionale et locale, qui peuvent constituer des axes d'écoulements préférentiels vers le bassin de Saïss ;
- et une étude hydrochimique par le suivi des paramètres physico-chimiques d'un certain nombre d'échantillons pris au niveau des sources et des puits et cela dans deux périodes durant l'année 2017, pour caractériser la qualité des eaux dans la zone d'étude.

Le présent manuscrit est ainsi subdivisé en trois parties :

- ✓ **La première partie** est décomposée en deux chapitres, le premier consacré à la définition du contexte géographique, géologique, hydrologique et hydrogéologique à l'échelle régionale et au niveau de la zone d'étude ; alors que le deuxième regroupe les moyens et méthodes des différentes disciplines appliquées dans ce travail ;
- ✓ **La deuxième partie** est constituée de deux chapitres aussi, le premier présente les résultats du traitement des images satellitaires en les comparant avec les résultats des mesures de la fracturation, et le deuxième chapitre est réservé à la présentation des résultats de la géophysique ;
- ✓ **La troisième partie** consacrée à l'hydrochimie est subdivisée en deux chapitres, un s'articule sur le suivi des données des paramètres physico-chimiques mesurées dans les deux périodes, alors que le deuxième présente une étude statistique de ces paramètres ainsi qu'une évaluation de la qualité des eaux par l'application des indices de qualité.

Chaque chapitre contient des conclusions partielles résumant les résultats obtenus.

Le manuscrit se termine en fin par des conclusions générales et des perspectives.

**PARTIE I : GENERALITES, MOYENS
ET METHODES**

Chapitre 1 : GENERALITES

I. Moyen Atlas Tabulaire : géologie, hydrogéologie et climatologie

I.1. Contexte géographique

Géographiquement, le Causse moyen-atlasique (CMA) ou Moyen Atlas tabulaire (MAT) est compris entre les latitudes 33° et 34° nord, et les longitudes 4° et 5° ouest (figure 1), et rassemble les Causses de Sefrou, Imouzzer, Ifrane, El Hajeb et Agourai, objet de cette étude. D'une superficie de l'ordre de 4200 Km² ; il est limité au Nord par le sillon sud rifain, au Sud par la ligne de crête en rive gauche du bassin versant de l'Oum-er-Rbia à Khénifra, à l'Est, la limite Est marquée également par les falaises du Causse surplombant la boutonnière de terrains primaires de Bsabis et la limite Ouest est constituée par le Massif central.

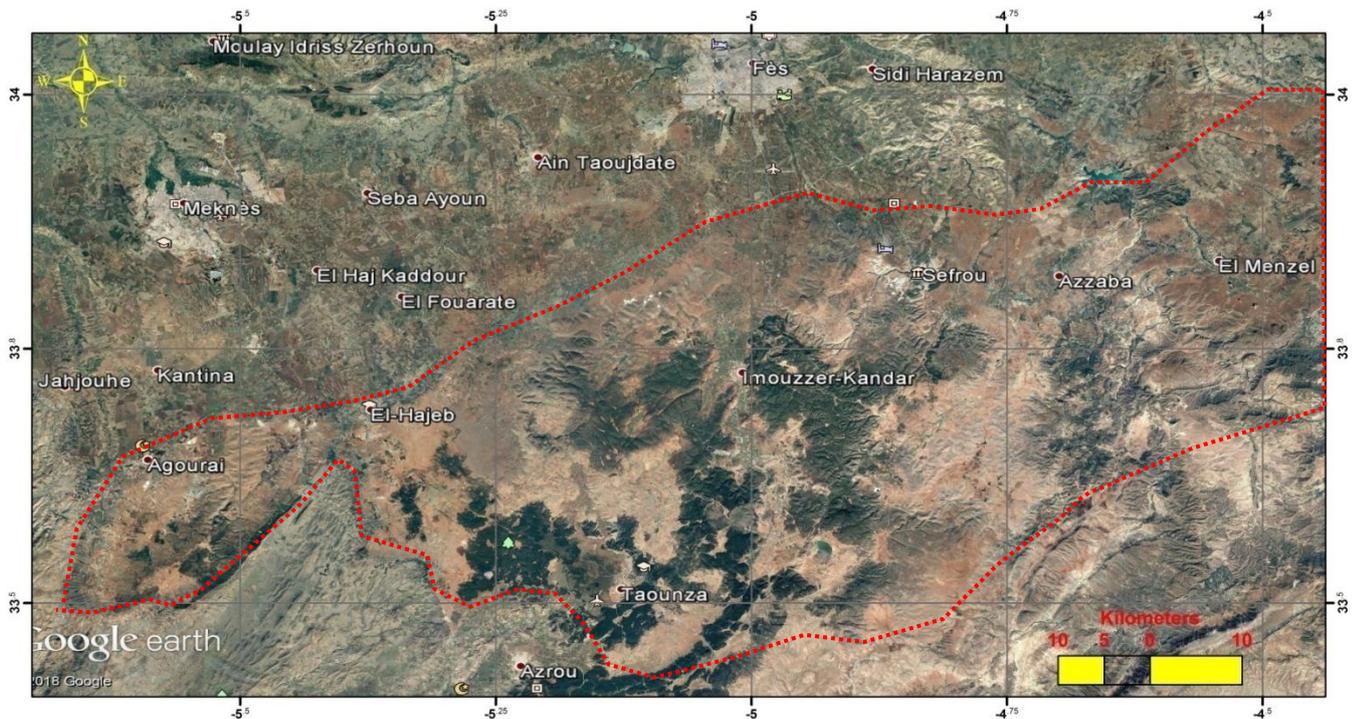


Figure 1: géographie du moyen atlas tabulaire (image Google Earth 2018)

Morphologiquement, le Causse moyen-atlasique se caractérise par une structure tabulaire à un relief monotone, il s'agit en fait de vastes plateaux karstiques, qui surplombent les plaines environnantes de la Méséta et du Saïss à des altitudes comprises entre 1000 et 2200m. Il se caractérise aussi par l'abondance des cuvettes, créant des bassins versants fermés au centre desquels existent souvent des lacs permanents ou « Dayet » (Dayet Aoua, Dayet Ifrah, etc.) (Bentayeb et Leclerc, 1975).

I.2. Géologie régionale

Le moyen Atlas tabulaire constitue avec le moyen Atlas plissé un domaine à part parmi les domaines structuraux du Maroc ; il est caractérisé par la dominance des terrains mésozoïques, et il est encadré de point de vue structural par la Méseta et le bassin de Saïss à l'Ouest et au SW; le moyen Atlas plissé à l'Est et au SE ; et le Rif au Nord (figure 2).

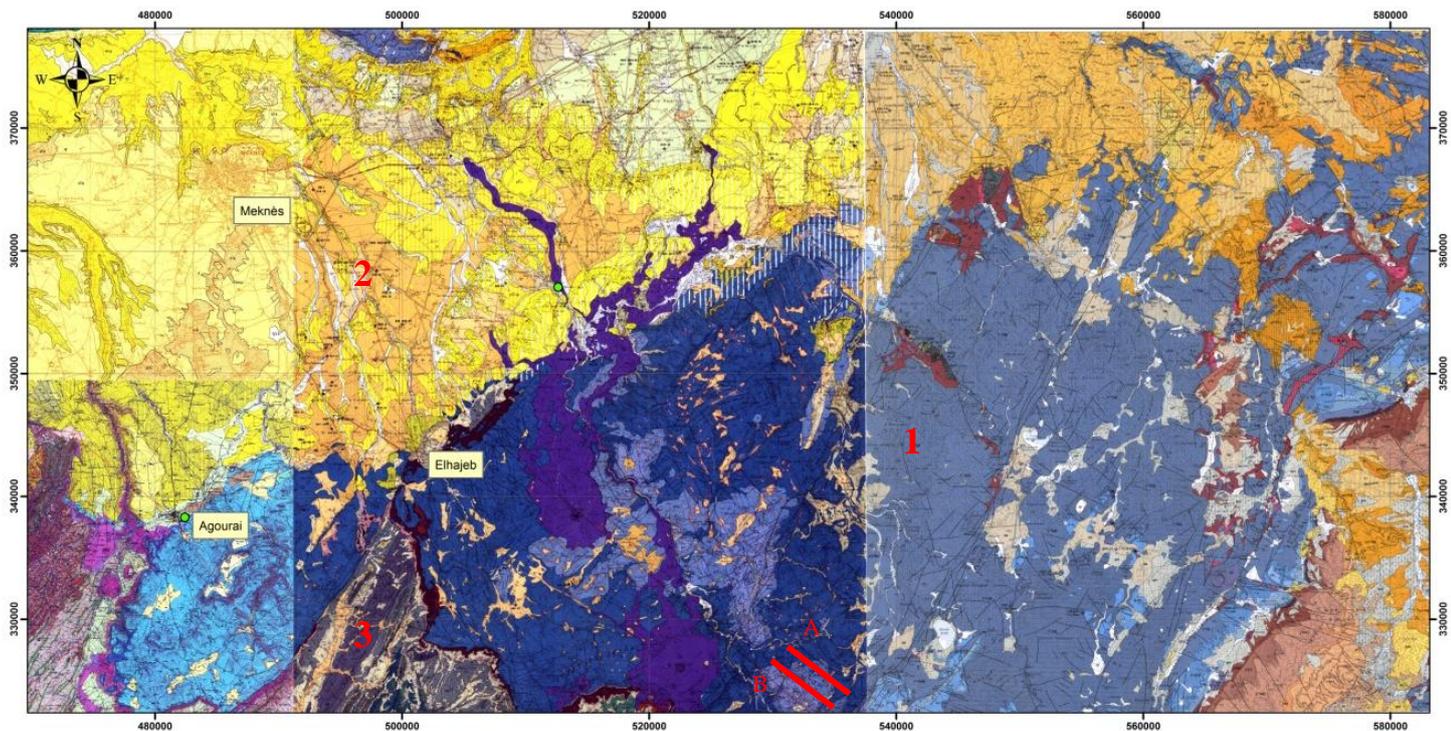


Figure 2: mosaïque des trois cartes géologique (Agourai, Elhajeb et Sefrou) montrant la géologie du moyen atlas

Légende : 1) Moyen Atlas, 2) Bassin de Saïss, 3) Maroc central, A et B : coupes

Dans le MAT les formations géologiques rencontrées sont de bas en haut : (Michard, 1976, Bentayeb et Leclerc, 1975, Piqué et al, 2006,).

I.2.1. Paléozoïque

Le socle hercynien se compose essentiellement par des schistes et des quartzites à intercalations de bancs gréseux et de calcaires d'âge plus précisément Dévonien et Ordovicien ; ils affleurent dans l'oued EL Kell qui constitue une limite géomorphologique entre ce cause et le Maroc central hercynien.

I.2.2. Trias

Les couches rouges triasiques (ou permo-triasiques) reposent sur les terrains paléozoïques plissés. Le passage des terrains primaires au Trias est matérialisé par des niveaux détritiques de base comprenant des conglomérats. Le Trias est constitué essentiellement d'argiles rouges inférieures gypsifères et salifères (dépôts évaporitiques) surmontées par des basaltes doléritiques puis des argiles rouges supérieures à passées gypseuses (figure 3).

I.2.3. Le Lias

I.2.3.1. Le Lias inférieur

Le Lias inférieur est caractérisé généralement par la dominance d'une série dolomitique d'environ 150m où on peut distinguer trois grands ensembles : des dolomies sableuses, des dolomies marneuses et des dolomies litées. Localement, le passage Trias-Lias est matérialisé par des couches de marnes vertes et jaunes légèrement sableuses (figure 3).

I.2.3.2. Le Lias moyen

Il est caractérisé aussi par une série dolomitique, son épaisseur est de l'ordre de 60 à 70m.

I.2.3.3. Le Lias supérieur et le Dogger

Cet étage est caractérisé par la présence d'un faciès nettement marneux (marnes de Boulemane), surmonté par une série de calcaires plus ou moins dolomitiques appelés généralement «calcaires corniches», cependant les sédiments du Lias supérieur et du Dogger sont beaucoup moins représentés que les séries dolomitiques et calcaires du Lias inférieur et moyen.

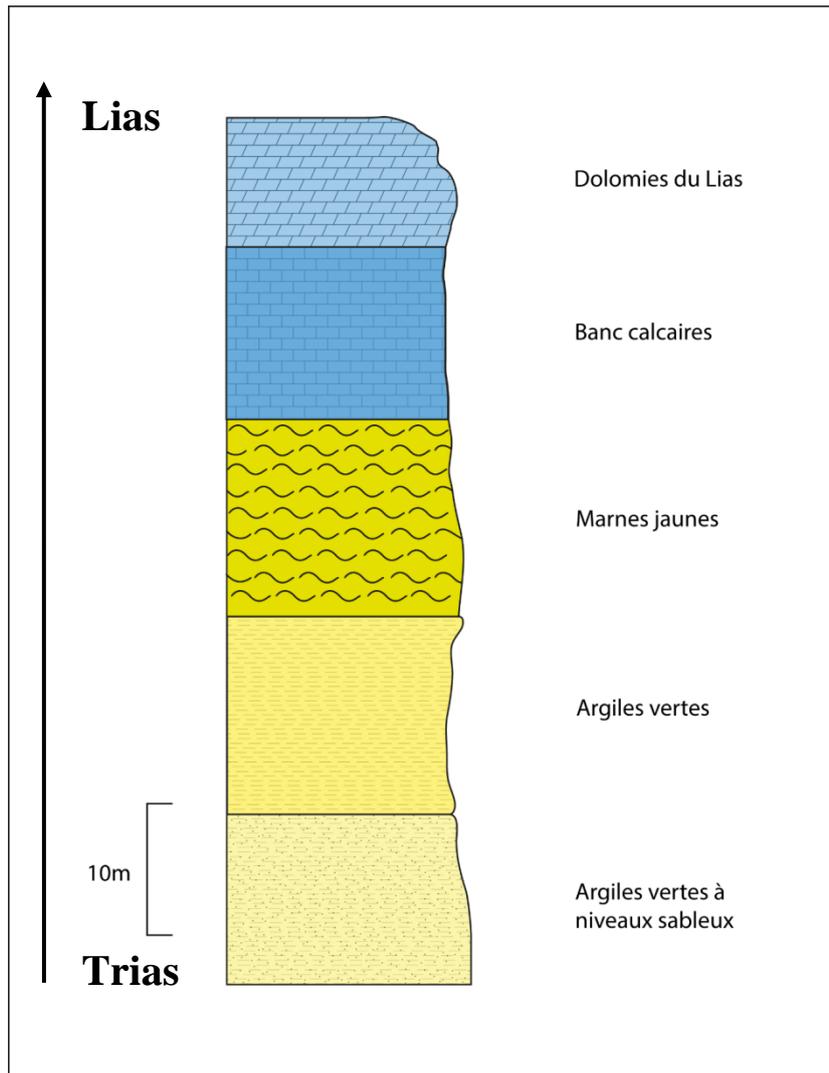


Figure 3: colonne litho-stratigraphique montrant le passage Trias-Lias

I.2.4. Le Crétacé

Les dépôts crétacés représentés uniquement dans le synclinal de Békrit - Timhadite, sont discordants sur le Jurassique. Les faciès rencontrés sont généralement calcaires et marnes au Cénomaniens et Turonien. Nous signalons aussi que cette série est très épaisse surtout au Sénonien.

I.2.5. Le Tertiaire

Dans le MAT un seul affleurement du Mio-Pliocène continental est localisé au Nord d'Almis du Guigou ; il est représenté par des marnocalcaires, des Conglomérats et dépôts molassiques et enfin des calcaires travertins (figure 4).

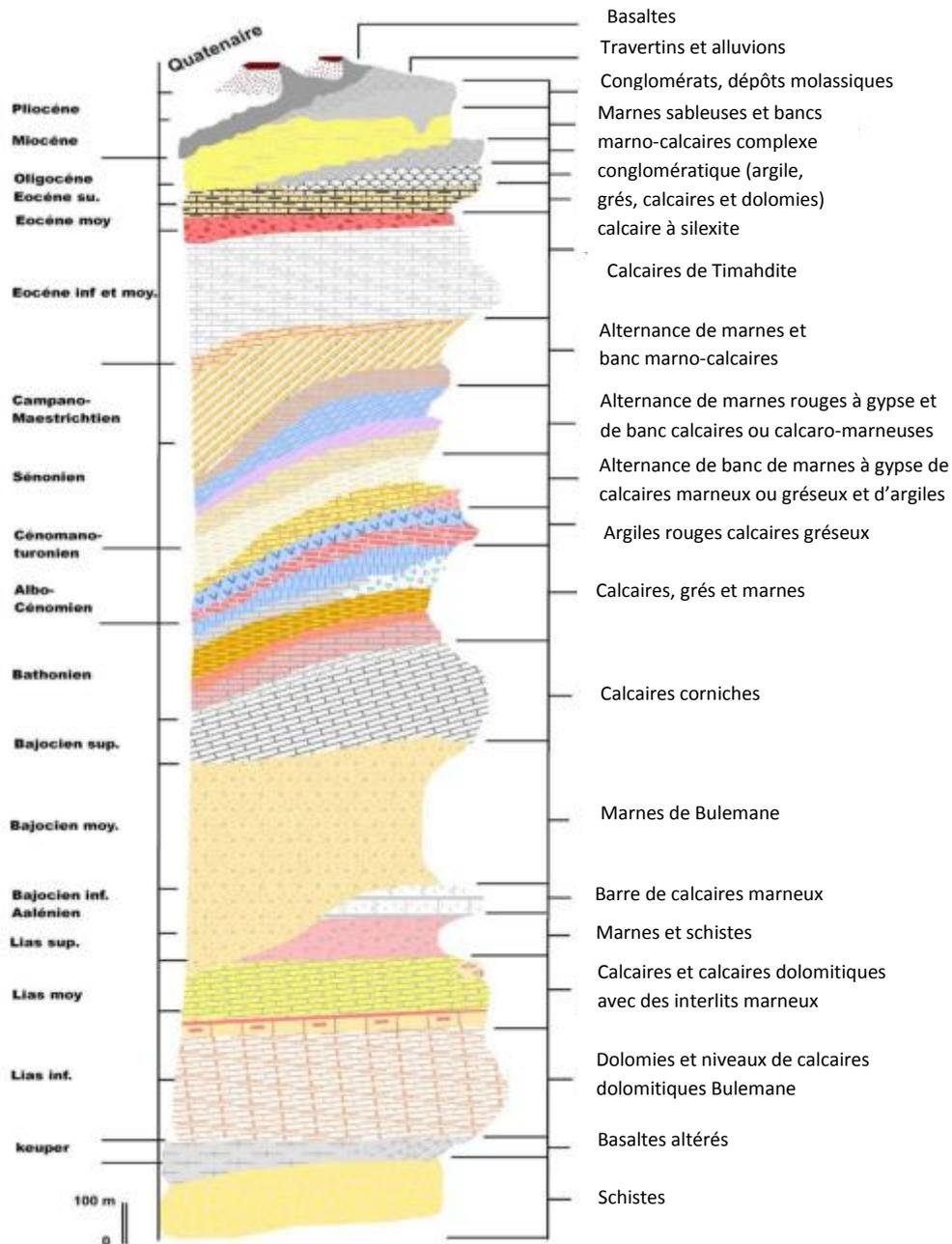


Figure 4: colonne litho-stratigraphique du Moyen Atlas dans la localité du Haut Sebou (Nejjari 2002)

I.2.6. Le Quaternaire

Les faciès représentant le Quaternaire sont (figure 5) :

- les coulées basaltiques qui sont les principales formations caractérisant le Quaternaire. Elles ont des épaisseurs importantes (de l'ordre de 150 à 200m) dans le plateau de Timhadite, au voisinage des grands cratères (Jbel Hebri) pour devenir de moins en moins importantes à la périphérie du plateau ;

- des dépôts de dayas, provenant de la décomposition sur place des calcaires et dolomies et du ruissellement périphérique ; ces dépôts, essentiellement argileux, peuvent atteindre de fortes épaisseurs ;
- les dépôts de travertins que l'on trouve à l'émergence de chaque grande source du Lias ou jalonnant l'emplacement d'anciennes émergences aujourd'hui disparues ou déplacées.

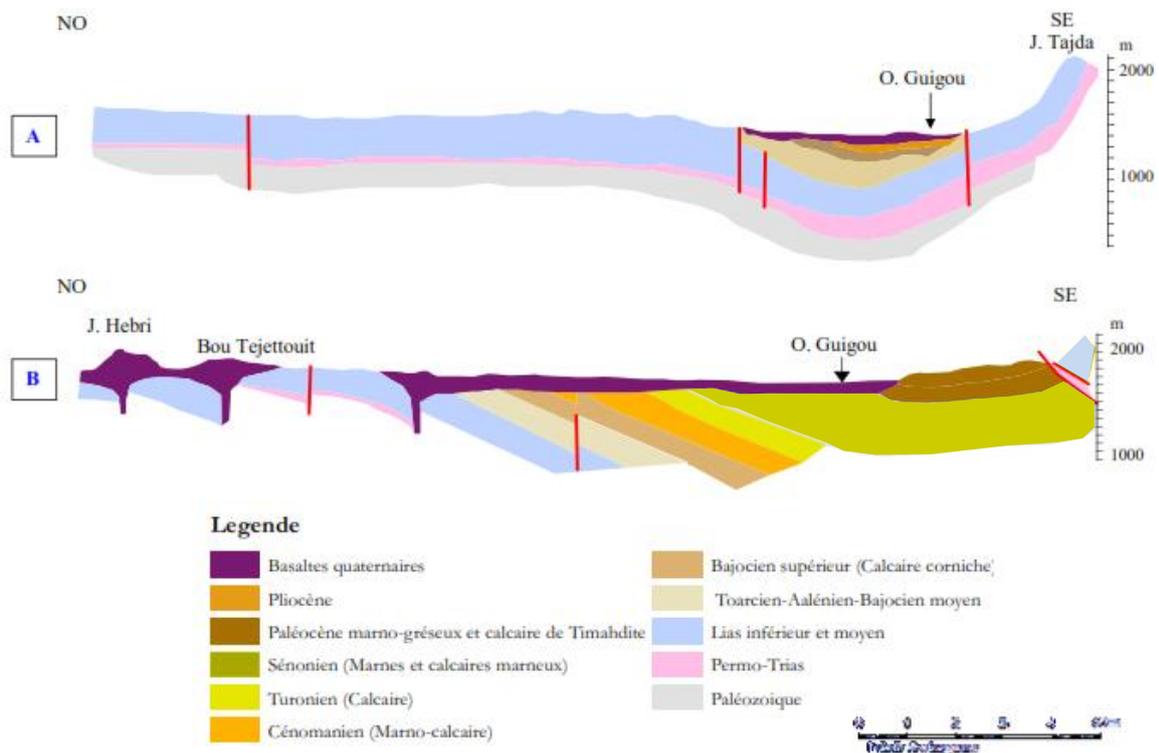


Figure 5 : coupes litho-stratigraphiques au SE du Moyen Atlas (Leclerc et Bentayeb, 1975)

I.3. Cadre morphologique et Structurale

I.3.1 Morphologie

La morphologie des causses est caractérisée par sa structure subhorizontale ou tabulaire, avec des altitudes très élevées par rapport au niveau marin, comprises entre 1000 et 2500m (figure 6), il s'agit en fait d'une lithologie monotone de calcaire dolomitique qui est responsable de cette morphologie en plateaux, parfois masquée par des formations récentes.

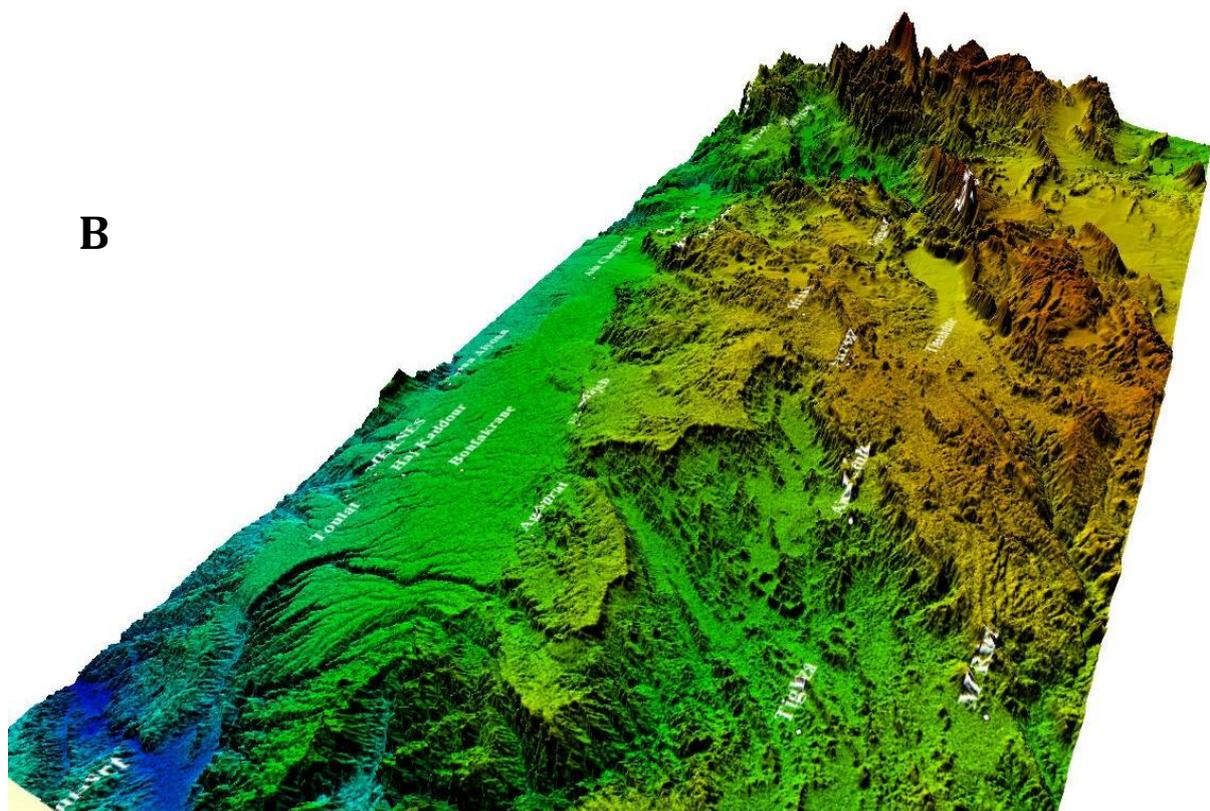
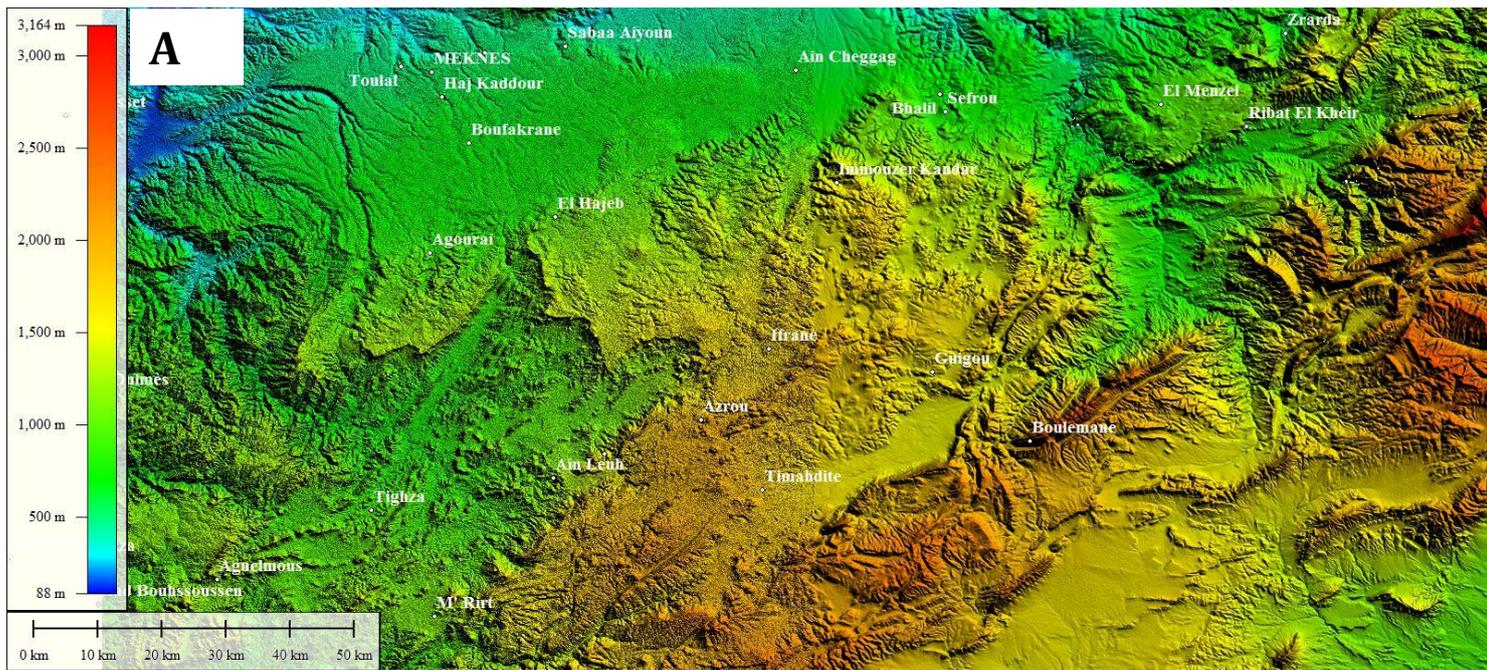


Figure 6 : modèle numérique de terrain montrant la topographie du CMA (A : plan 2D; B : plan 3D)

I.3.2 Cadre Structurale

L'accident « Nord Moyen Atlasique (NMA) » est considéré comme le plus important accident, il sépare et abaisse le Moyen Atlas tabulaire du Moyen Atlas plissé ; cette ligne est de direction NE-SW (direction la plus dominante dans les causses).

L'étude structurale à grande échelle dans le CMA, utilisant les techniques de système d'information géographique et de détection a été appliquée par plusieurs auteurs (Amraoui, 2005, Aouragh, 2015, Qarqori, 2015, ...); en effet ces études ont donné des résultats importants, quand à la mise en évidence des grandes structures (synclinaux, anticlinaux et failles).

Pour notre zone d'étude, les résultats de l'extraction des linéaments à l'échelle du moyen Atlas tabulaire (Aouragh, 2015) ont montré l'existence de deux familles de directions orthogonales, une direction dominante (NE-SW) parallèle à l'accident majeur NMA, et une direction de moindre importance (NW-SE) et qui résulte du degré de fracturation de la roche compétente (figure 8).

A l'échelle du cause d'El Hajeb-Ifrane, Amraoui (2005) a pu différencier trois principales directions de fracturation :

- 1) la direction subméridienne, elle varie de $N00^{\circ}$ à $N05^{\circ}$ et représente 18 % de l'ensemble des directions ;
- 2) la direction NE-SW, elle varie en moyenne de $N25^{\circ}$ à $N65^{\circ}$, avec une dominance de la direction avoisinant le $N45^{\circ}$. Cette direction représente 33 % de l'ensemble des directions ;
- 3) la direction NW-SE à NNW-SSE, elle varie en moyenne de $N115^{\circ}$ à $N165^{\circ}$, avec une dominance de la direction avoisinant le $N145^{\circ}$, et représente 32 % de l'ensemble des directions (figure 7)

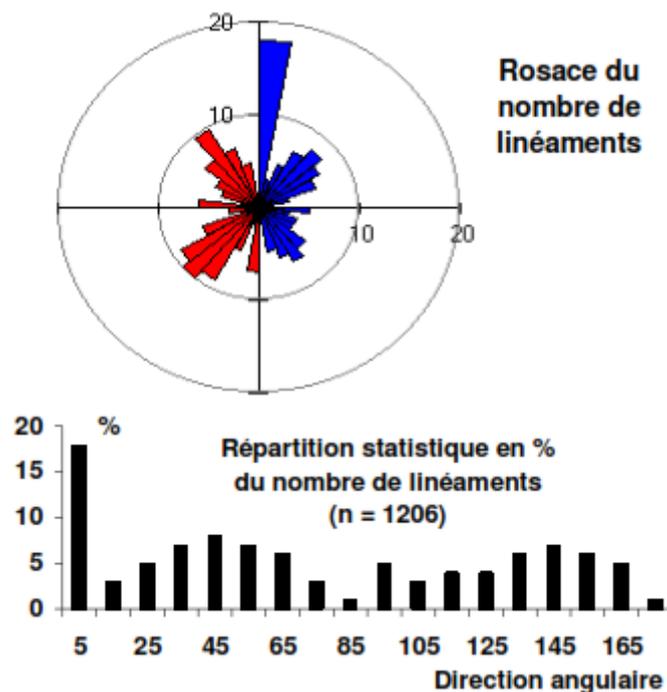


Figure 7 : rosace du nombre de linéament à l'échelle du cause El Hajeb Ifrane (Amraoui, 2005)

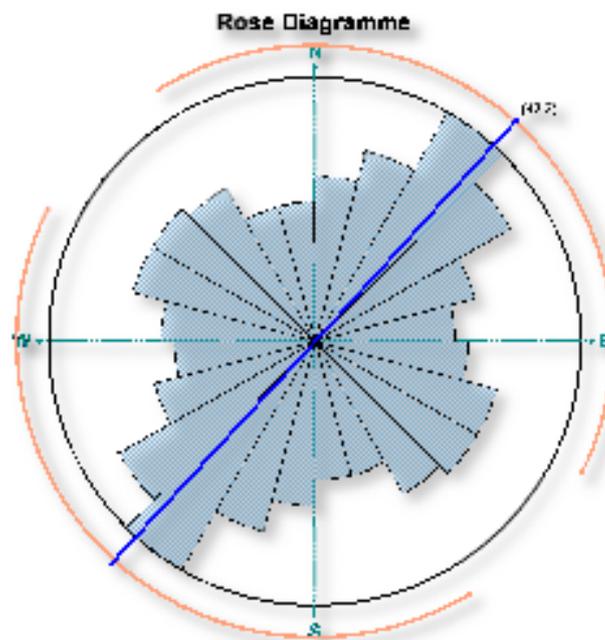
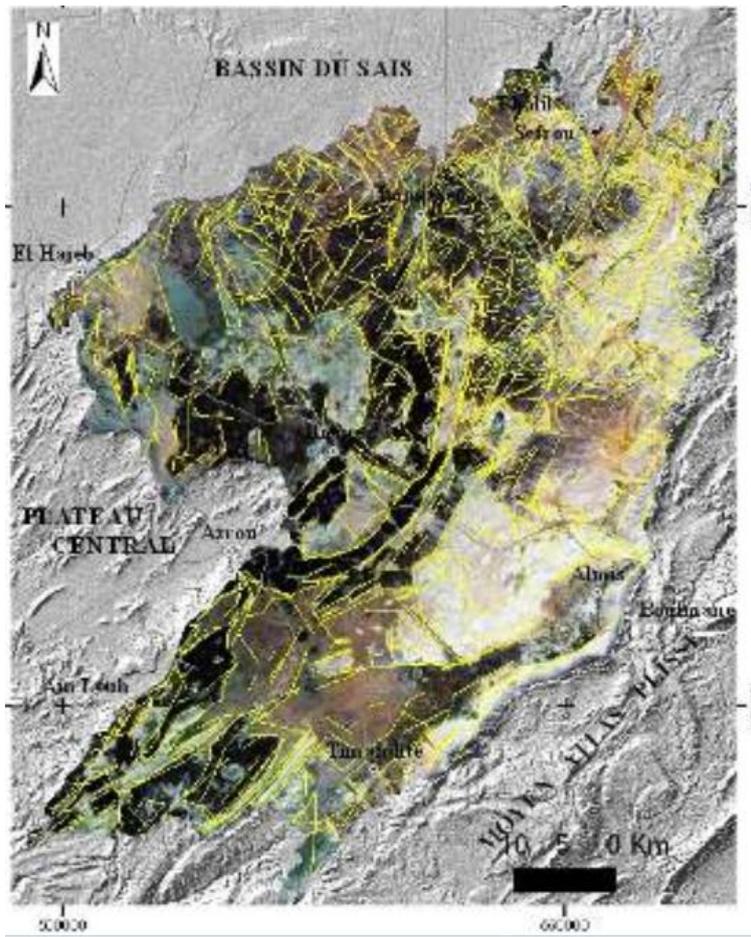


Figure 8 : carte des linéaments et diagramme de rosace à l'échelle du moyen atlas tabulaire (Aouragh 2015)

D'une manière générale la direction majeure représentative dans le causse moyen atlasique est celle NE-SW parallèle à l'accident NMA ; cet accident principale est accompagné par d'autres accidents secondaires dont l'individualisation dépend de leur densité.

I.4. Contexte hydrologique et hydrogéologique

I.4.1 Contexte hydrologique

Vue sa nature morphologique, le Moyen Atlas tabulaire connaît un réseau hydrographique peu développé (figure 9) ; les oueds Sebou, Oum-er-Rbia, Tigrigra, Aggaï et aussi dans, la région d'Ifrane, l'oued Tizguit ont connu un écoulement permanent (Bentayeb et Leclerc, 1975). En effet, l'importance des bassins endoréiques est grande, ils occupent une superficie totale d'environ 600 km² soit 14 % de la région étudiée et 17 % des terrains karstiques et jouent un rôle important dans l'alimentation des nappes souterraines.

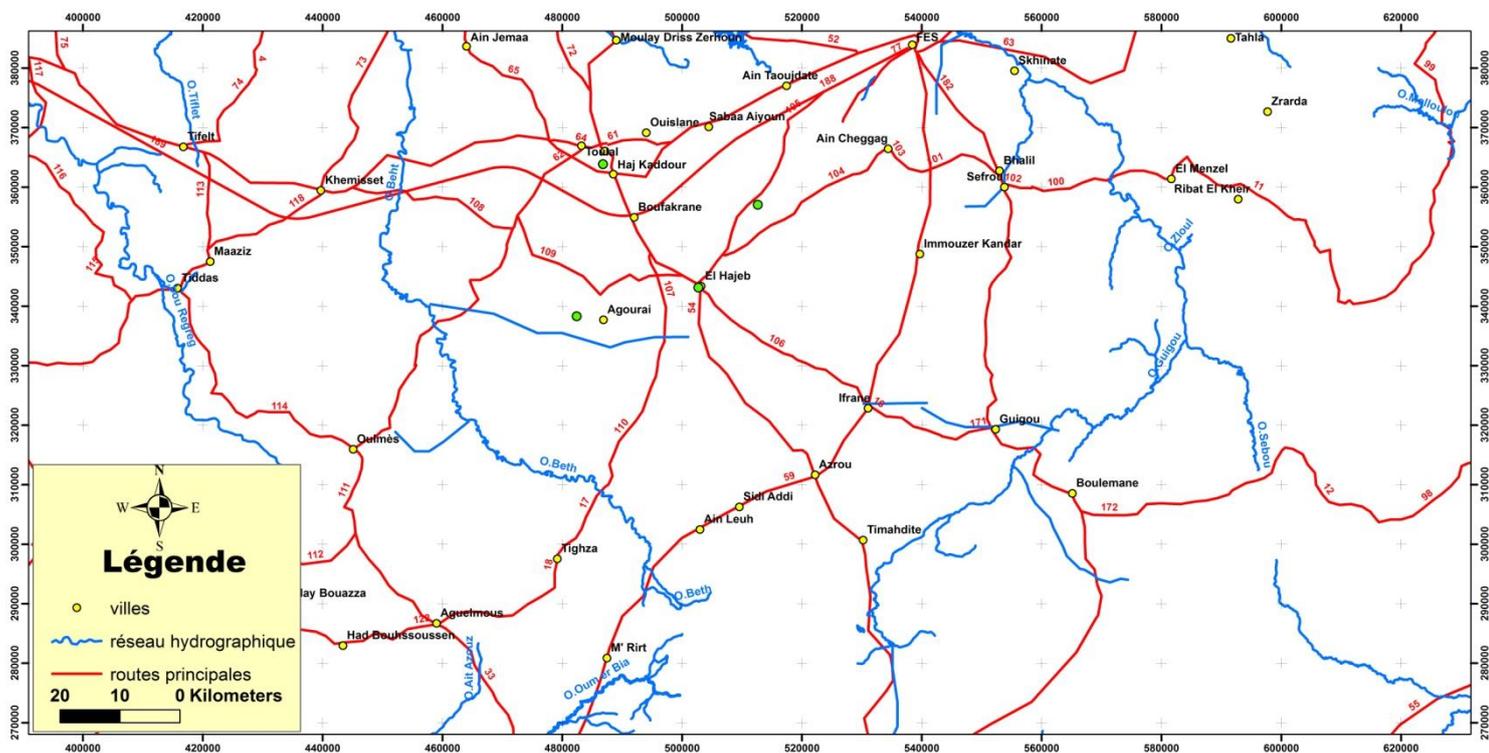


Figure 9 : réseau hydrographique principal du moyen Atlas tabulaire

I.4.2 Contexte hydrogéologique

L'origine de l'alimentation en eau souterraine des causses atlasiques est météorique (pluie ou neige). En effet, de très fortes proportions des précipitations s'infiltrent dans le karst calcaire et réapparaissent principalement à la périphérie du Moyen Atlas Tabulaire sous diverses formes d'exutoires (Bentayeb et Leclerc, 1975 ; Amraoui, 2005) :

- les émergences de bordure au contact du Lias et de son substratum triasique (Aïoun-Ras-El-Ma, Sidi-Rached, Oum-er-Rbia,...) ;
- sources de flexure à l'ennoyage du Causse sous le sillon sud-rifain (Aïoun-Ribaa, Bittit...);
- émergences au sein d'aquifères périphériques tels les calcaires lacustres (Aïoun-Akkous, Cheggag,...) ;
- drainage par l'oued Sebou des eaux souterraines des bassins de Sefrou et d'Annoeur-Bsabis ;
- drainage par les coulées de basaltes quaternaires de la vallée de l'oued Tigrigra des eaux des bassins de Ras-El-Ma et d'Aîn-Leuh.

Les basaltes caractérisés par leurs perméabilités élevées, peuvent former une nappe bien considérable, lorsqu'ils ont un substratum semi-perméable à imperméable. En effet, ce phénomène très rare dans les causses, lorsqu'on trouve les basaltes en contact directe avec le calcaires, par contre dans le moyen atlas plissé, nous constatons l'importance de cette nappe surtout dans le bassin de Guigou où les basaltes reposent sur des formation semi-perméables post-domériennes ou tertiaires qui réduisent toute infiltration vers la nappe profonde du Lias inférieur et moyen.

A l'échelle du bassin de Sebou auquel appartiennent les causses moyens atlasiques, le volume exploitable des eaux souterraines est de l'ordre de 800 Mm³ par an, soit près de 20% du potentiel national, il est caractérisé par l'existence de plusieurs nappes, les plus importantes sont celles des causses (figure 10). Nous signalons aussi que ces nappes productives sont vulnérables à la sécheresse, à la surexploitation et à la pollution ; et donc la bonne gestion et la protection est indispensable pour conserver ces atouts majeurs pour le développement agro-socio-économique de la région.

Sur le bilan du bassin les entrées d'eaux nets des nappes du bassin du Sebou s'élèvent à 1579 Mm³/an toutefois les sorties sont estimées à 1737 Mm³/an, ce qu'indique que le bilan « eau souterraine » global du bassin est déficitaire d'un volume d'environ de 158 Mm³/an (El Jabbouri, 2014).

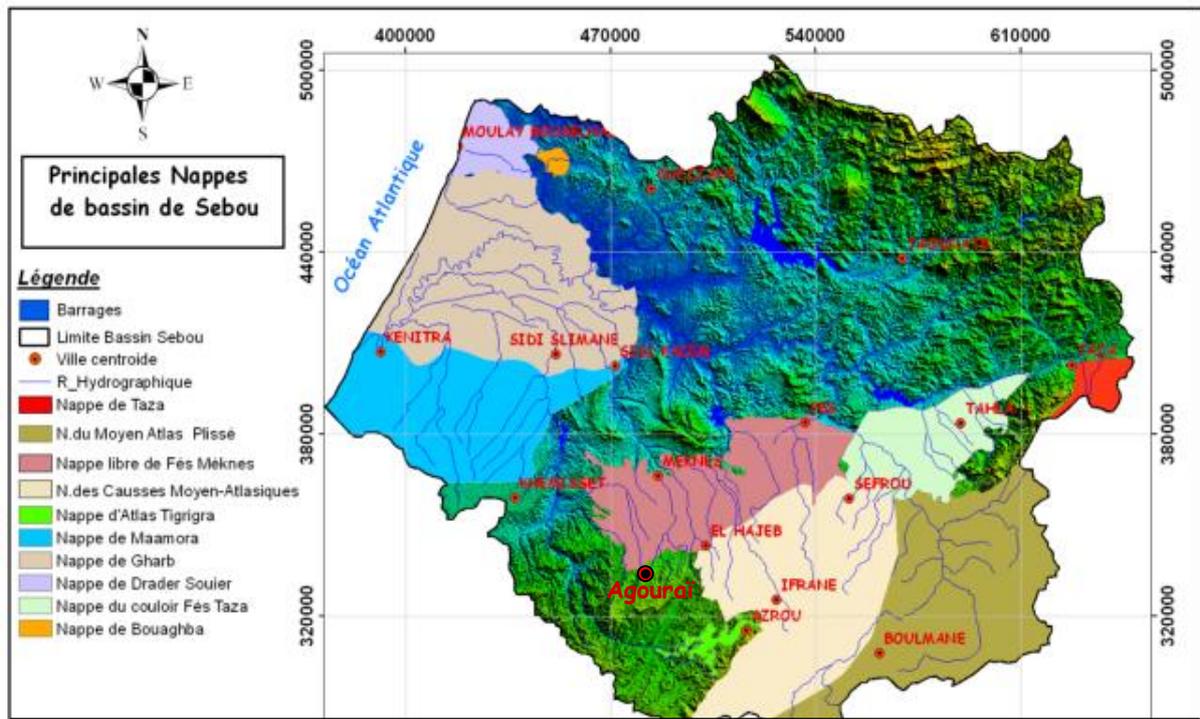


Figure 10 : principales nappes de bassin de Sebou (El jabbouri, 2014)

I.5. Contexte climatique

La grande partie du Causse Moyen atlasique appartient au bassin de Sebou, caractérisé par un climat de type méditerranéen semi aride à hiver tempéré (ABHS 2008 in El jabbouri, 2014).

I.5.1 Pluviométrie

La pluviométrie annuelle est assez importante, elle varie, durant la période 2008, entre 500 et 800 mm/an dans la partie SE du bassin de Sebou correspondant au Moyen Atlas tabulaire (tableau 1, figure 11 et figure 12). Par contre, en période 1973 à 2003 cette moyenne annuelle varie de 328 à 912 mm/an dans les stations représentatives. En outre, la moyenne mensuelle toujours pour cette période (73/2003) montre que les mois de décembre et janvier sont en général les plus arrosés, alors que les mois de juillet et août sont les plus secs, mais avec des averses orageuses très concentrées et brutales pouvant déclencher un écoulement même dans les vallées sèches. Le mois de mars constitue souvent un maximum secondaire.

Tableau 1: précipitations annuelles et mensuelles des cinq stations

Mois Station	sept	oct	nov	déc	jan	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	total	période
Ifrane	33.2	75	102.8	139.3	115.1	124.9	99.5	113.5	61.5	25.8	9	13	912.6	73/2003
Elhajeb	19.84	37.69	55.51	73.15	67.51	53.68	54.91	59.12	34.88	14.47	2.34	3.57	473.46	85/2003
Ain Bittit	19.91	36.09	58.62	74.39	66.32	53.02	57.53	59.54	34.69	14.44	1.91	3.14	479.6	85/2003
Azzaba	16.3	30.6	34.3	36.6	33.9	43.3	39.9	42.1	32.7	12.5	2.8	3.1	328.2	73/2003

Aguelmem Sidi Ali	32.4	36.5	49.6	47.1	29.5	40.2	40.2	49.6	40.6	27	12.8	15.4	422.8	73/2003
----------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	----	------	------	-------	---------

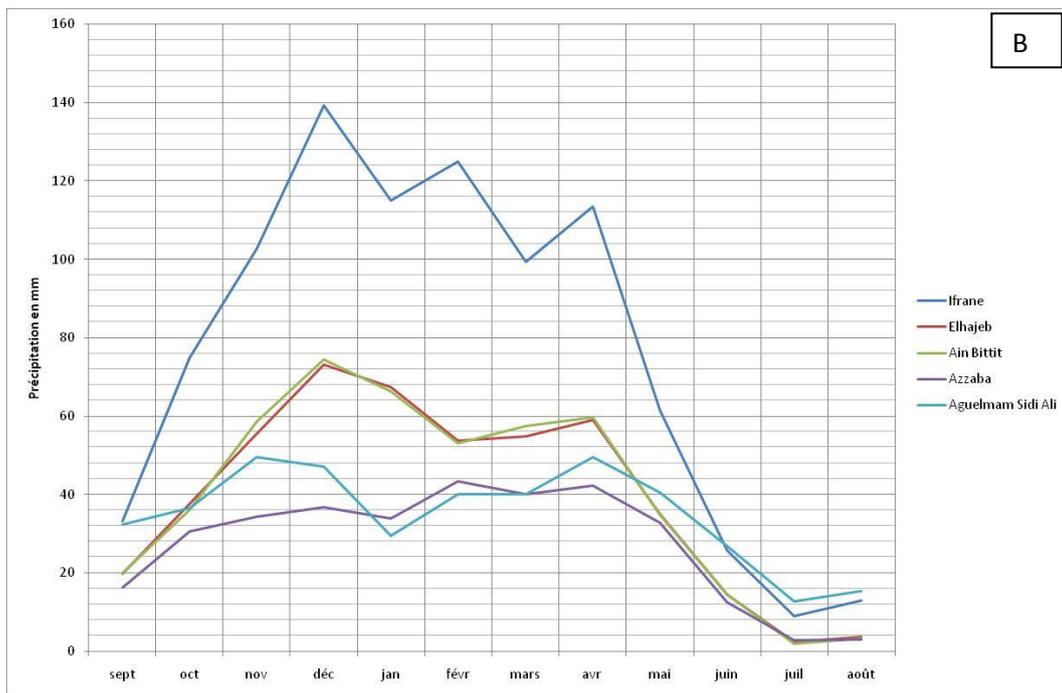
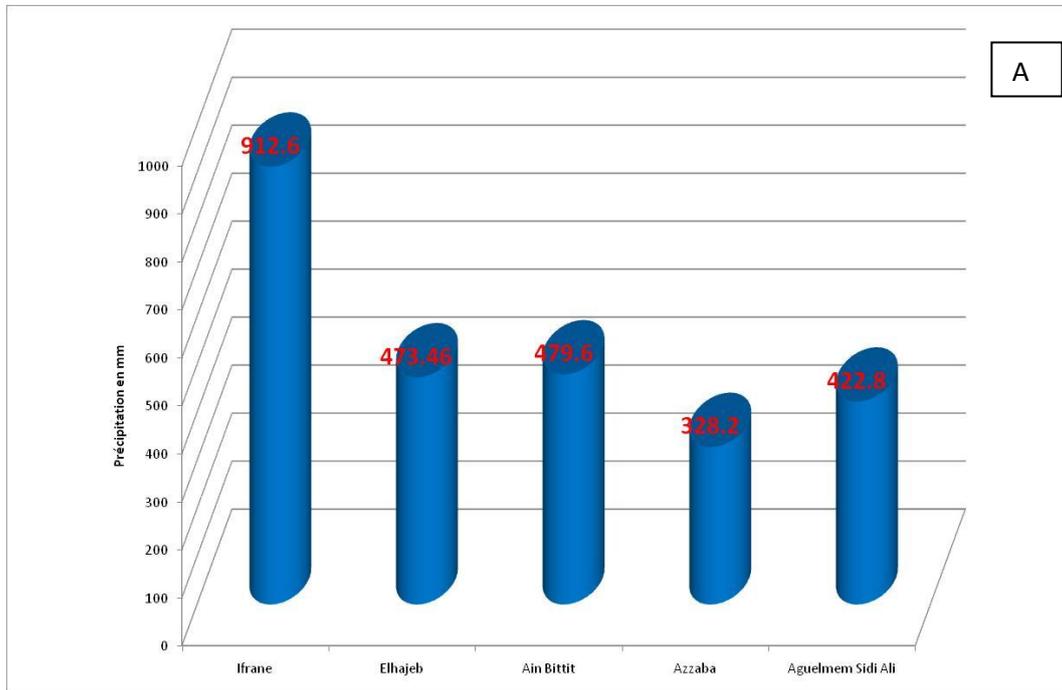


Figure 11 : pluviométrie des stations annuelles (A) et mensuelles (B)

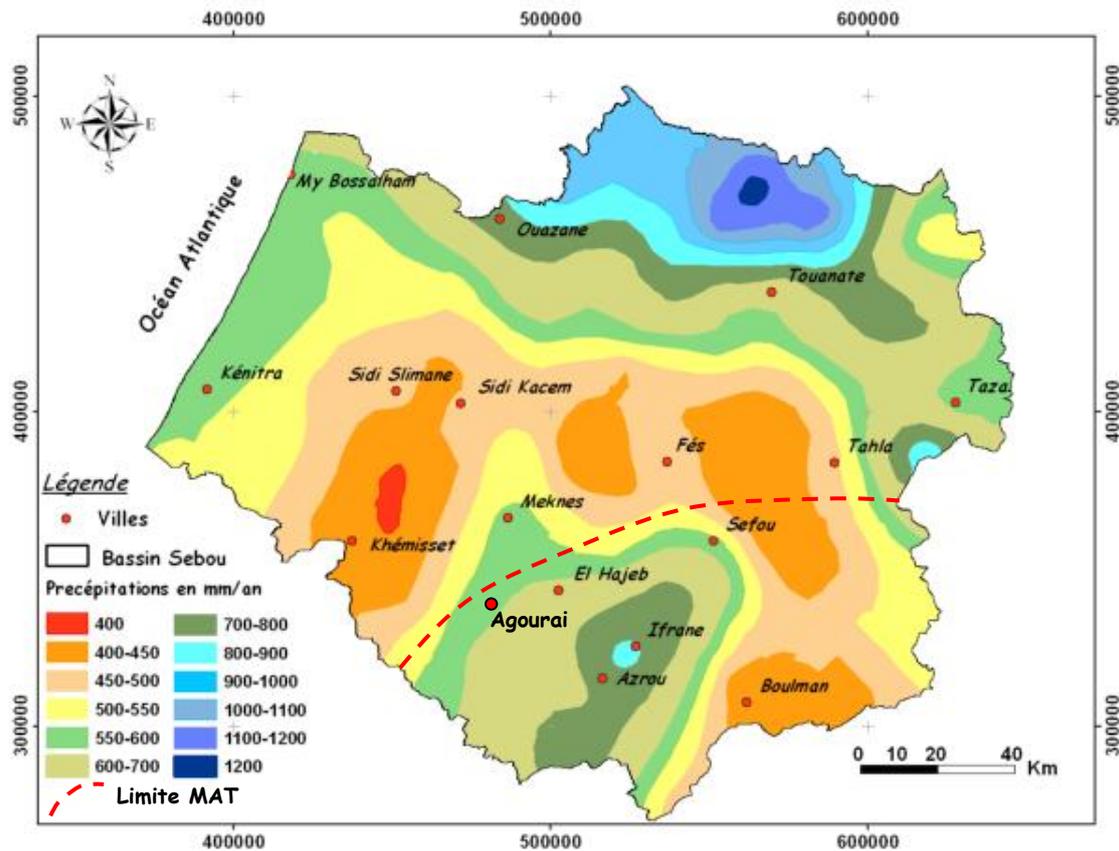


Figure 12 : carte des isohyètes actualisée du bassin du Sebou (El jabbouri, 2014)

I.5.2 La Température

Selon le climat qui règne dans la région, les températures sont maximales en juillet et août et minimales en janvier, alors que celles moyennes annuelles varient suivant l'altitude entre 10 et 20°C (tableau 2). Nous citons quelques stations à titre de comparaison (figure13) :

- à Ifrane, la température annuelle moyenne est de 11.8 °C. Elle se situe entre une valeur maximale moyenne de 17.9 °C et minimale moyenne de 4.1 °C. Les températures extrêmes peuvent atteindre 30.3 °C et -2.7 °C ;
- à Azzaba, la température annuelle moyenne est de 19.3 °C. Elle se situe entre une valeur maximale moyenne de 29.1 °C et minimale moyenne de 11.7 °C ;
- à Aguelmam Sidi Ali, la température annuelle moyenne est de 10.4 °C. Elle se situe entre une valeur maximale moyenne de 19.7 °C et minimale moyenne de 2.5 °C. Les températures extrêmes peuvent atteindre 30 °C et -2.7 °C.

Tableau 2 : températures annuelles et mensuelles des trois stations

Mois Station	sept	oct	nov	déc	jan	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	moy/an	période
Ifrane	17.9	12.5	8.1	5.3	4.1	5.5	7.3	8.5	12.1	17.1	21.8	21.9	11.8	73/2003
Azzaba	24.6	20.8	15.8	12.8	11.7	13.3	14.9	15.7	20.8	23.7	29.1	28.3	19.3	73/2003
Aguelmam Sidi Ali	16.1	11.6	7.1	4.1	2.5	3.7	5.7	8.5	11.2	15.9	18.9	19.7	10.4	75/2010

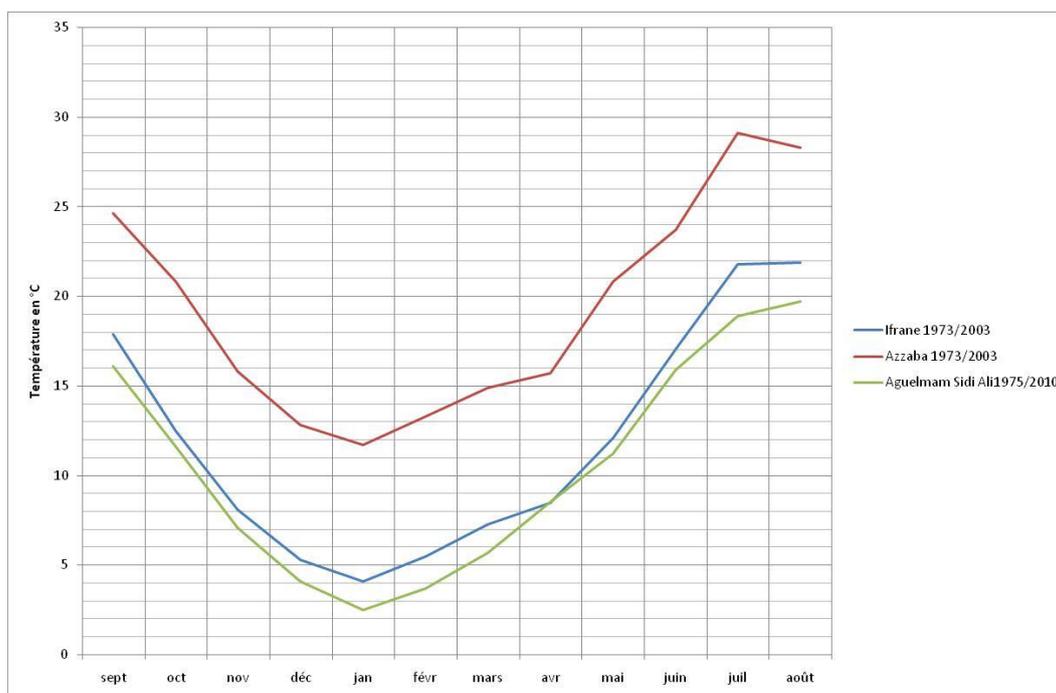
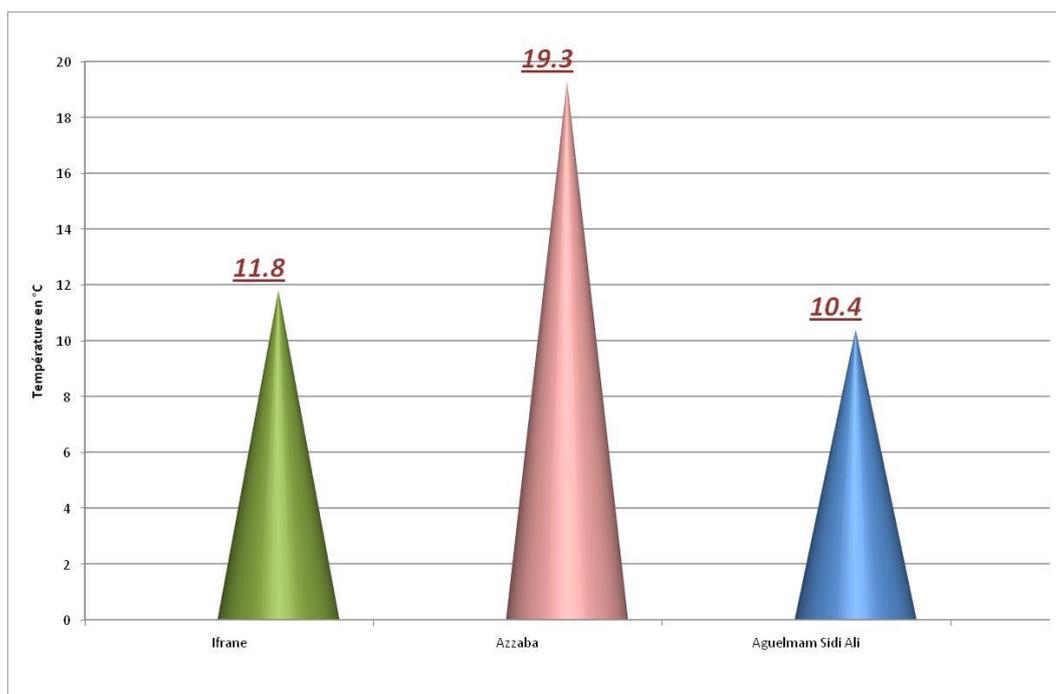


Figure 13 : températures minimales, moyennes et maximales (1973-2003)

I.5.3 Le vent

Généralement, nous pouvons parler de deux types des vents, il y a ceux dominants en hiver de provenance ouest et qui sont humides, ils apportent les précipitations ; la fréquence de ces vents, maximale en hiver, de novembre à avril, est faible ou nulle en été ; et les vents de provenance est (Sirocco ou Chergui) ont leur fréquence maximale en été (juillet), ces vents sont chauds et secs.

II. Le cause d'Agouraï : géologie, hydrogéologie et climatologie

II.1. Géographie :

Le cause calcaire d'Agouraï (partie occidentale de la grande unité structurale du Moyen Atlas tabulaire), est d'une superficie de 260km², d'une altitude moyenne de 1000m. En revanche, de point de vue administratif, ce plateau est limité par la province d'El Hajeb et Meknès. Selon les statistiques de 2014, le village abrite environ 16651 habitants dont 8382 sont féminines, 38.2% de ces habitants sont sans niveau scolaire et que 4.3% ont un niveau universitaire. L'activité économique principale dans la région est l'agriculture.

II.2. Géologie

Le Cause d'Agouraï est la partie la plus occidentale du Moyen Atlas tabulaire ; les principales formations géologiques rencontrées sont de bas en haut (figures 14 et 15):

- les schistes et les quartzites à intercalations de bancs gréseux et de calcaires d'âge Paléozoïque ; ils affleurent dans l'oued EL Kell qui constitue une limite géomorphologique entre ce cause et le Maroc central hercynien ;
- au-dessus vient le Trias constitué essentiellement d'argiles rouges inférieures gypsifères et salifères (dépôts évaporitiques) surmontées par des basaltes doléritiques puis des argiles rouges supérieures à passées gypseuses ;
- les calcaires dolomitiques d'âge liasique (Carixien) caractérisés essentiellement par une forte fracturation et une karstification intense. L'épaisseur de cette formation dépasse les 200m.

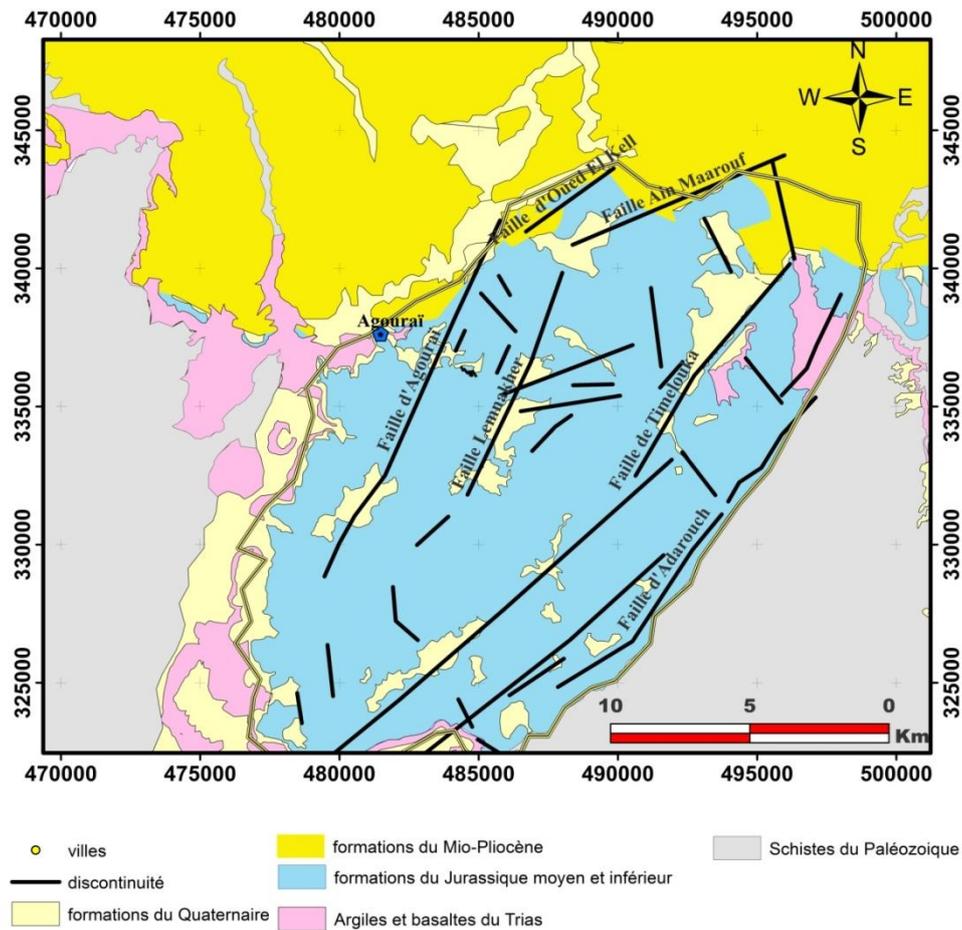


Figure 14 : carte géologique simplifiée de la zone d'étude

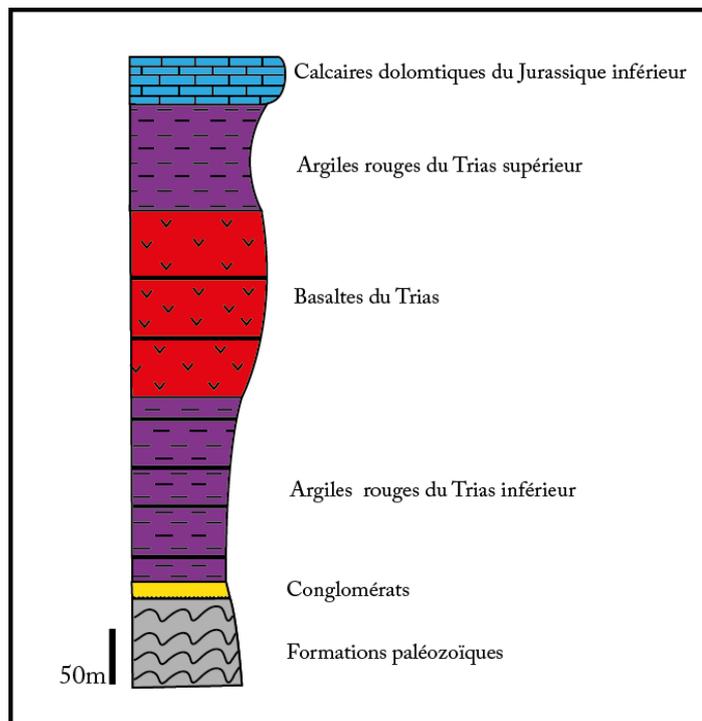


Figure 15 : log lithostratigraphique donnant la succession des formations géologiques rencontrées dans le causeway d'Agourai

II.3. Morphologie et structurale

II.3.1. Morphologie

Comme les causses d'El Hajeb, Ifrane, Imouzzar..., le causse d'Agourai est caractérisé lui aussi par sa structure tabulaire (figure 16 et photo 1), plus faillée que plissé et par un relief monotone. En effet, il s'agit d'un paléo-synclinal rempli par des terrains de nature essentiellement calcaires dolomitiques du Lias, avec une altitude varie généralement du Sud vers le Nord, donnant une pente de 2 à 3%.

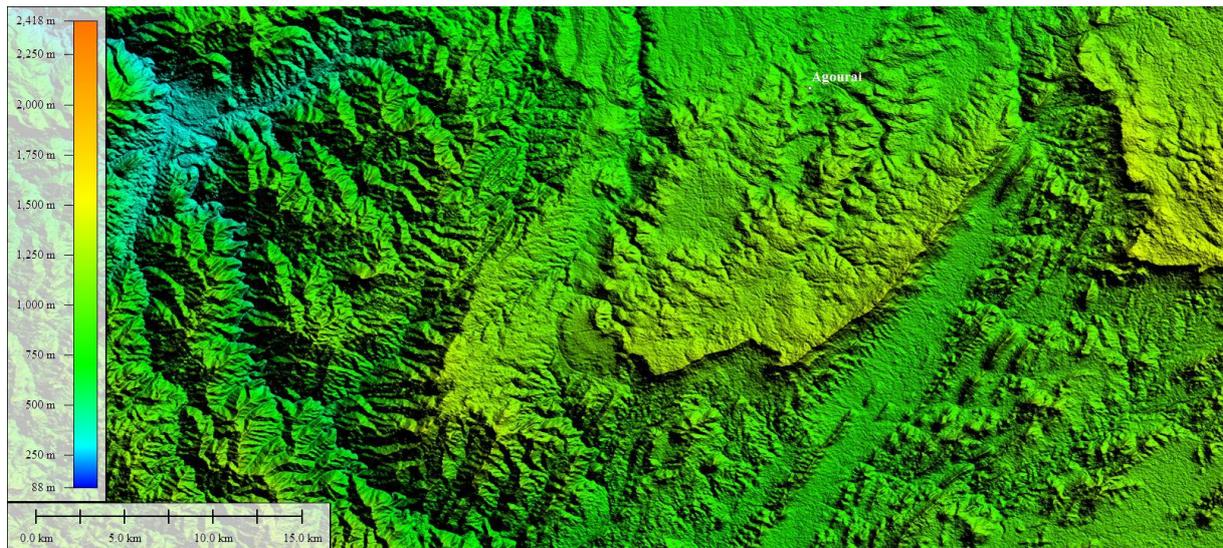


Figure 16 : modèle numérique montrant l'altitude du causse d'Agourai



Photo 1 : morphologie du causse d'Agourai

II.3.2. Cadre Structurale

Le causse d'Agouraï est d'une structure circulaire allongée NE-SW, ceinturé globalement par des terrains anciens d'âge paléozoïque. Les principales failles relevées dans le plateau sont essentiellement de direction NE-SW (exemple : faille d'Adarouch), sans oublier l'existence d'une autre famille de failles de direction NNW-SSE.

L'analyse des données magnétiques du causse d'Agouraï (Bouya, 2014) surtout par l'application de la grille de la composante verticale sur une carte résiduelle réduite au pôle, montre des anomalies linéaires allongées selon une direction NE-SW interprétées comme des linéaments structuraux correspondant à des principales failles affectant le causse d'Agouraï (figure 17).

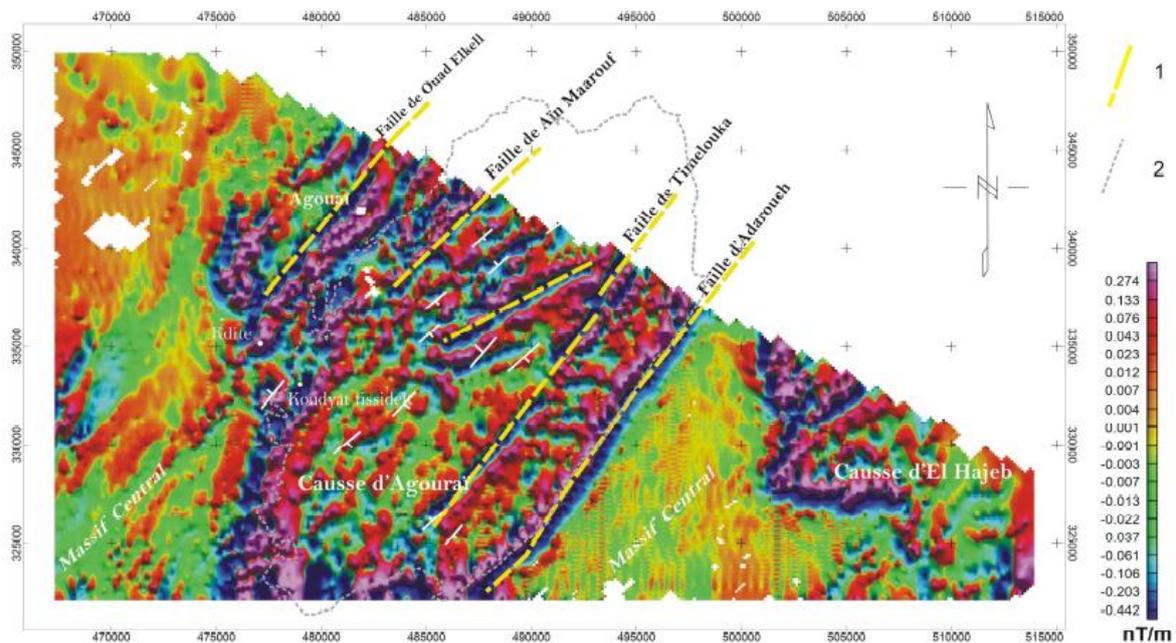


Figure 17 : carte de la dérivée verticale de l'ordre 1 dans la région d'Agouraï.
(1) failles, (2) limite du causse d'Agouraï (Bouya, 2014)

II.4. Aperçu sur le système karstique

Plusieurs définitions ont été présentées pour le karst géomorphologique et hydrogéologique, mais nous pouvons dire qu'il désigne un type de paysage particulier, comprenant des cavités et un vaste système de circulation d'eau souterraine (figure 18) développé dans les roches solubles comme les carbonates, le marbre ou encore le gypse, qui se dissolvent sous l'action d'une eau chargée d'un agent agressif (CO_2 , H_2SO_4 ...) (Husson, 2013), et nous pouvons différencier entre trois types de karst :

- karsts gravifiques, formés sous l'action de l'eau météorique et d'un gradient d'écoulement (ou potentiel altimétrique) entre la zone de recharge et la sortie de l'aquifère ;
- karsts hypogènes, formés par des remontées d'eaux hydrothermales ou de fluides profonds ;
- karsts littoraux, où la dissolution chimique liée au mélange eaux douces/eaux salées est aidée par l'abrasion mécanique des vagues, des courants et les variations du niveau marin.

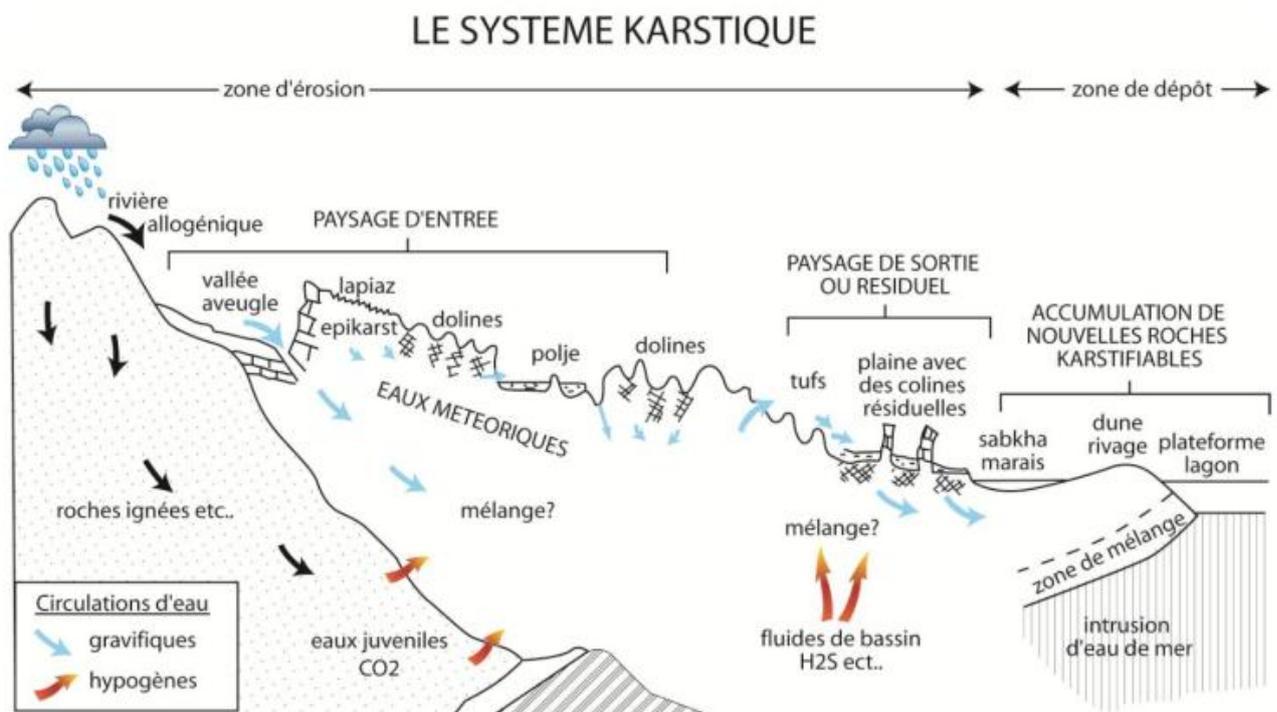


Figure 18 : schéma du système karstique qui présente les phénomènes majeurs interagissant au sein d'un karst actif (Husson, 2013)

Notre zone d'étude est caractérisée par un système karstique de type gravifique, puisque les eaux météoriques chargées en CO₂, ont un rôle important dans la formation de ces karsts, en affectant les roches carbonatés par dissolution. La zone est reconnue par une intense karstification justifiée par les débits très importants des sources rencontrées au pied du cause (Tableau 3).

Tableau 3 : débit des principales sources du cause d'Agouraï

Source	Débit (l/s)
Ain Maarouf	146
Ain Boujaoui	101
Ain Amene Syrnine	13
Ain Bouchermou	10
Ain Bou Wallouzen	5
Ain khouda	2.5
Ain Elkasba	2

II.5. Climatologie

II.5.1. Précipitation

Au niveau de la station d'Agouraï et pendant la période 2010 à 2013, nous constatons une pluviométrie mensuelle assez importante durant les mois d'octobre jusqu'au mois de mai avec un maximum enregistré pendant le mois de mars. Le reste des mois de l'année représente une période sèche avec une pluviométrie très faible surtout au mois de juillet.

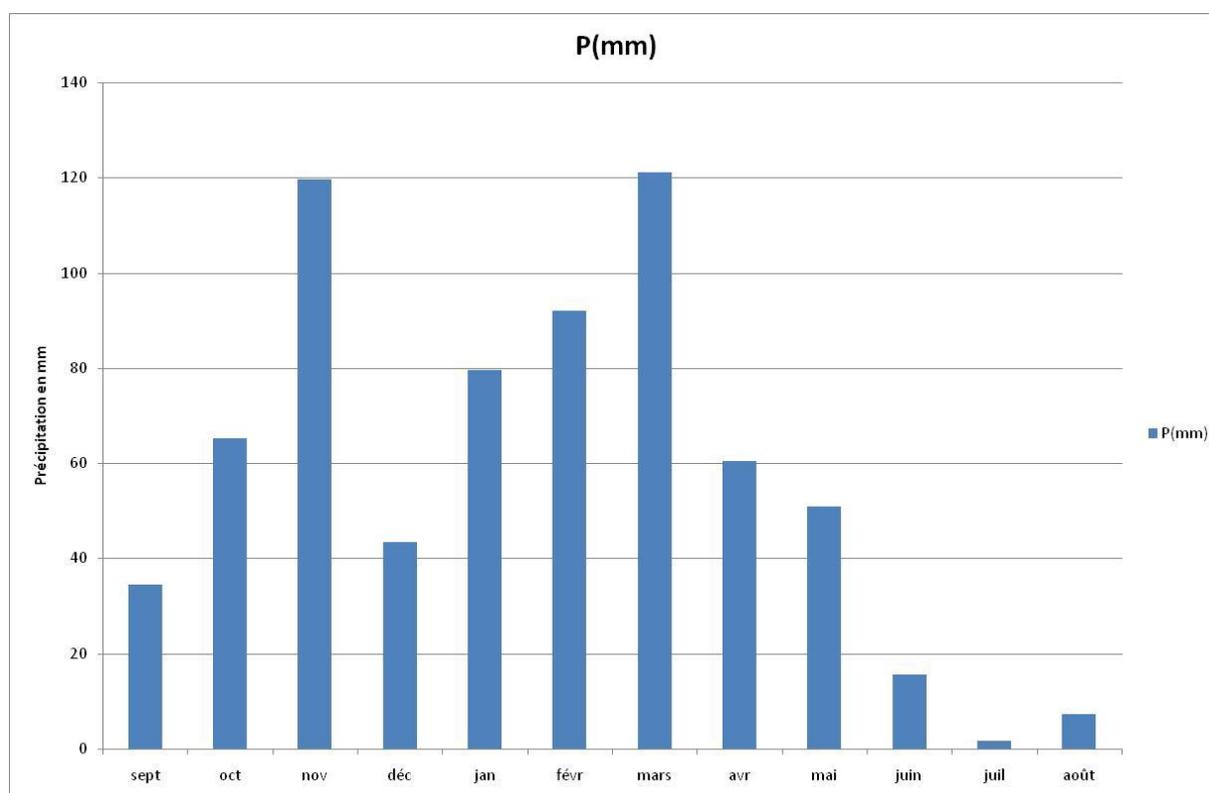


Figure 19 : précipitation moyenne mensuelles au niveau de la station d'Agouraï (2010-2013)

II.5.2. Température

Sur cette station nous remarquons que la température minimale est enregistrée pendant la période hivernale de l'année avec un minimum de 9.3°C au mois de février ; le maximum est enregistré en mois d'août, en définissant deux périodes variables centrées par ces deux mois (figure 20).

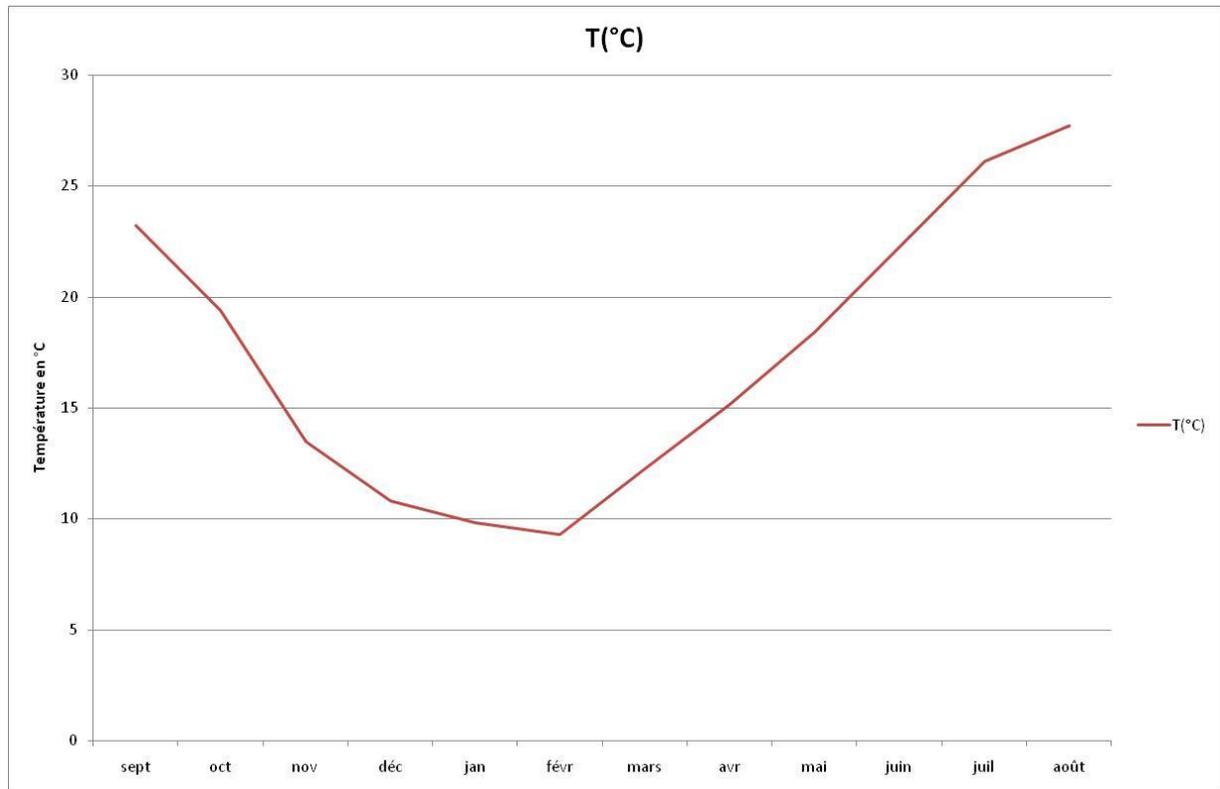


Figure 20 : température moyenne mensuelles au niveau de la station d'Agourai (2010-2013)

II.5.3. L'évapotranspiration réelle pour la station d'Agourai :

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la quantité d'eau qui, compte tenu du climat et plus particulièrement de la température, pourrait être évaporée et transpirée si l'approvisionnement en eau est suffisant pour répondre à tous les besoins de la couverture végétale (Sendide, 2002). Nous pouvons aussi parler de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui est la quantité de vapeur d'eau effectivement dégagée vers l'atmosphère par le sol et la couverture végétale ; il y a plusieurs formules pour calculer ce paramètre, la formule de Turc est la plus adoptée.

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

Avec :

- ETR : évapotranspiration réelle

- P : pluie annuelle en mm=691
- T : température moyenne annuelle °C = 17.3
- $L = 300+25T+0.05T^3=991.3$

Application numérique :

$$\mathbf{ETR= 590.5mm}$$

III. Conclusion

Le Moyen Atlas tabulaire est un domaine très vaste de point de vue surface, très riche en structures géomorphologiques, et géologiques, et très diversifié en hydrogéologie. En effet, il forme un réservoir très important en eaux souterraines, où la perméabilité est contrôlée par la fracturation et la karstification.

Des études réalisées à l'échelle régionale ont pu montrer les discontinuités majeures, sans illustrer d'une manière précise le contact et le transfert des eaux souterraines vers le bassin de Saïss (Aouragh 2015). D'autres études sont faites d'une manière locale pour caractériser le transfert de ces eaux par endroit, comme le cas du causse d'El Hajeb (Bouikbane, 2015) ou celui du causse orientale dans la région de Bittit (Qarqori, 2015).

Dans cette étude pluridisciplinaire, nous nous sommes focaliser sur le causse d'Agourai pour comprendre ce transfert dans la partie la plus occidentale du causse moyen atlasique ; ainsi en plus des caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et climatiques, nous présenterons par la suite les résultats des investigations structurales, géophysiques et hydrochimiques.

Chapitre 2 : MOYENS ET METHODES

I. Télédétection

La télédétection est une technique qui permet d'observer les objets à distance tout en basant sur la mesure et le traitement des rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis par les objets étudiés dont le but d'en tirer des informations concernant leurs natures, leurs propriétés et leurs états. La technique est une discipline de la science moderne qui a subi un développement dans le dernier siècle ; depuis 1960, elle connaît un véritable progrès grâce à l'avènement des satellites civils avec le lancement du premier satellite TIROS 1 (Television and Infrared Observation Satellite) pour la prédiction et la surveillance de la météo (Richards, 1993).

I.1. Principes de base de la télédétection

La télédétection est le résultat de l'interaction entre trois éléments fondamentaux (figure 21) (Aouragh, 2015) :

- une source d'énergie qui est l'élément qui "éclaire" la cible en émettant une onde électromagnétique (flux de photons) ;
- une cible qui est la portion de la surface terrestre observée par le satellite, sa taille peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés ;
- et un capteur qui mesure l'énergie solaire (rayonnement électromagnétique) réfléchi par la cible.

La télédétection se base sur sept étapes clés (figure 22) qui décrivent le processus à suivre du début à la fin pour répondre aux problèmes posés ; on parle ici de : A) source d'énergie (soleil) ; B) rayonnement et atmosphère (interaction) ; C) interaction avec la cible (signature spectrale) ; D) enregistrement de l'énergie par le capteur ; E) transmission, réception et traitement ; F) interprétation et analyse ; G) application.

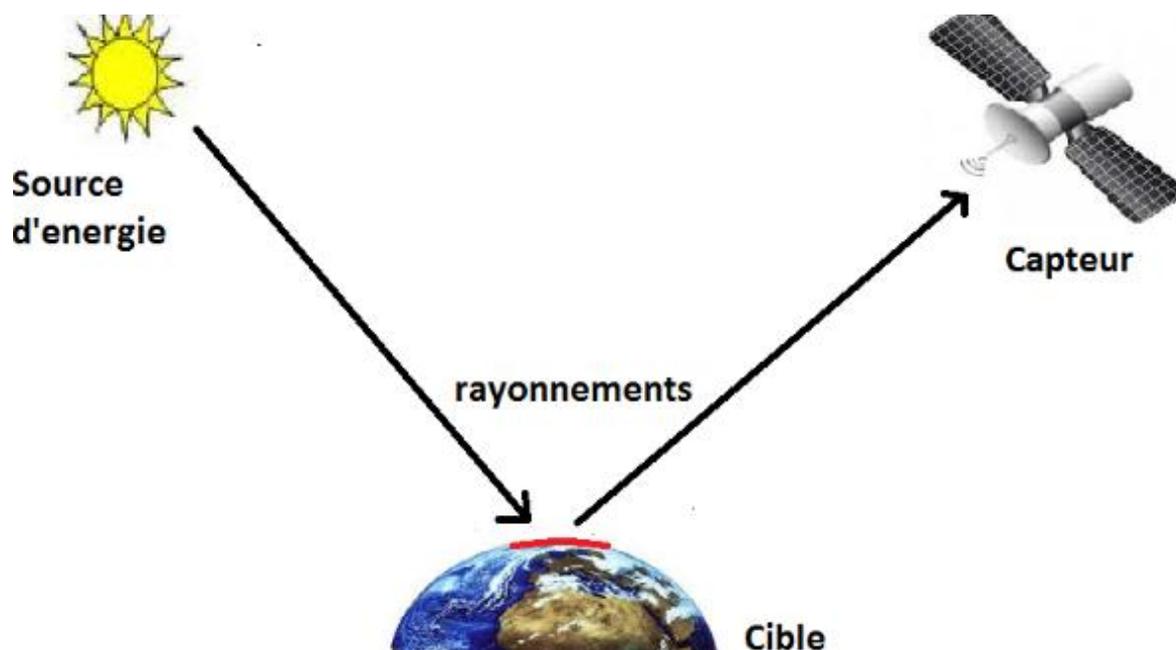


Figure 21 : éléments fondamentaux de la télédétection

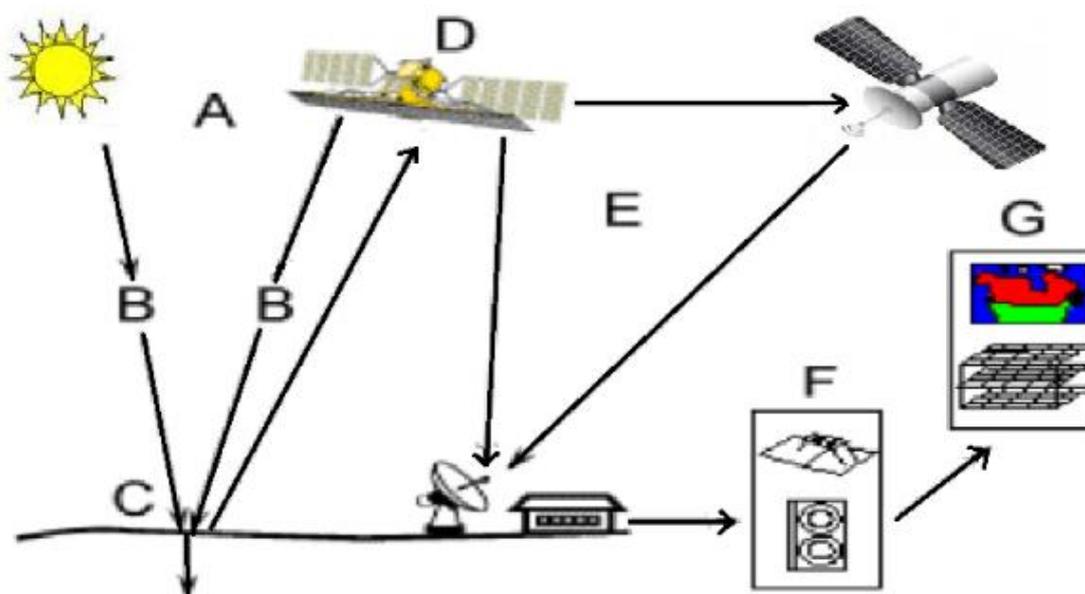


Figure 22 : les sept étapes de la télédétection

<https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriels-sur-la-teledetection/notions-fondamentales-de-teledetection-introduction/9364>

D'une manière générale, la télédétection est une discipline très vaste qui a plusieurs domaines d'application, et son traitement prend beaucoup plus de temps et d'espace.

Dans ce travail l'utilisation de cette technique est limitée à l'extraction des linéaments dans le secteur d'étude.

I.2. Application

Les données de télédétection utilisées sont celles d'ETM+ et de Landsat-7 acquises en janvier 2017, couvrant notre zone d'étude. L'image est composée de sept bandes spectrales de 30 m de résolution. Seule la bande ETM + 6 de résolution 60 m a été ré-échantillonnée pour la rendre superposable aux autres.

L'image satellitaire nécessite des opérations de prétraitement par des corrections radiométriques qui permettent de corriger les erreurs de l'image causées généralement par les perturbations atmosphériques et géométriques ; elles permettent également de corriger les différentes distorsions causées par l'environnement (courbure de la terre, variation d'altitude du sol, etc.), provenant du mouvement de la plate-forme, et dues aux erreurs des systèmes de mesures.

Notre image corrigée sera traitée dans le but d'augmenter la perception visuelle, en améliorant sa qualité et en la rendant plus expressive. Ces différentes tâches sont accomplies dans l'optique d'une meilleure visualisation ou observation des discontinuités.

Le traitement numérique des images a été réalisé à l'aide du logiciel ENVI 5.1 et d'ARCGIS 10.2.

Parmi les nombreuses techniques d'amélioration d'images, les techniques suivantes ont été appliquées : la transformée de Hotelling (ACP), les combinaisons d'images, les compositions colorées et le filtrage spatial.

II. Géophysique

II.1. Introduction

La géophysique appliquée est la discipline de la géologie qui vise la prospection des ressources naturelles en appliquant des principes physiques. La prospection géophysique consiste en la reconnaissance des terrains par des méthodes utilisant des principes physiques. Ces méthodes permettent, à partir des grandeurs physiques mesurées, de déterminer les caractéristiques physiques et géométriques du sous-sol. Cependant, elles ne sont capables de détecter que des discontinuités physiques, c'est à dire l'endroit où une zone diffère suffisamment d'une autre par l'une des propriétés physiques.

En effet, toutes les méthodes géophysiques étudient la répartition en profondeur des propriétés physiques tels que la vitesse, la densité, la résistivité, la chargeabilité, la susceptibilité

magnétique,...etc. Elle revient donc à déterminer les variations de la dite propriété sur la zone à étudier (tableau 4).

Tableau 4 : principe, grandeurs physiques mesurées et les paramètres de quelques méthodes de la géophysique appliquée

Méthode	Principe Physique	Grandeurs Physique Mesurées	Paramètres
Electrique	Fondée sur l'étude de la distribution du potentiel électrique dans le sol	Potentiel Electrique	Résistivité Electrique
Sismique	Basée sur la mesure des vitesses de propagation des ondes sismiques	Temps du Trajet	Vitesse
Gravimétrie	Mesure les anomalies de pesanteur engendrées par l'inégale distribution de roches de densités différentes	Accélération de pesanteur g	Densité
Magnétisme	Basée sur l'étude des distorsions du champ magnétique	Champs magnétique	Intensité du champ magnétique
Radiométrie	Basée sur la mesure des éléments radioactifs	Rayonnement Radioactif	Radioactivité
Géothermie	Mesure le gradient géothermique	Flux de chaleur	Température
Radar	Mesure la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques	Temps du Trajet Onde Electromagnétique	Vitesse

Les méthodes géophysiques présentent l'avantage d'être non destructives. Leur champ d'application est large et diversifié. Elles sont généralement utilisées en hydrogéologie, génie civil, recherche minière et pétrolière et en géologie de l'environnement.

II.2. Méthodes électriques

II.2.1. Principe d'investigation

Les méthodes électriques basées sur la réponse du sol à un courant électrique injecté dans le sol à travers des électrodes de courant, et en recevant une différence de potentiel afin de calculer le paramètre de la résistance d'un milieu en se basant sur la loi d'Ohm :

$$\Delta V = RI$$

Avec :

ΔV : la différence de potentiel en volts (V) ;

I : l'intensité du courant en ampères (A) ;

Et R : la résistance du milieu en ohm (Ω).

Pour calculer la résistivité électrique (ρ) (propriété physique des roches) soit la capacité des milieux de s'opposer au passage du courant électrique.

Pour calculer la résistivité électrique d'un cylindre de section S (en m²) et de longueur L (en m) nous utilisons sa résistance en appliquant la relation suivante :

$$\rho = R \frac{S}{L}$$

La résistivité d'un milieu hétérogène (milieu formé de plusieurs composants) dépend des différents milieux traversés par le courant électrique, et peut donner plusieurs résistivité, on parle ici de la résistivité apparente (ρ_a) et selon la géométrie du milieu nous définissons un autre paramètre k dit coefficient géométrique, et nous obtenons la relation suivante :

$$\rho_a = k * (\Delta V / I)$$

En utilisant la loi d'Ohm, le facteur géométrique (k) peut être calculé dans le cas général d'un quadripôle.

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)}$$

II.2.2. La méthode géoélectrique

II.2.2.1 Principe

Le principe de la méthode, consiste essentiellement à injecter, au moyen de deux autres électrodes (A et B), un courant électrique continu (ou de basse fréquence) de caractéristiques connues et à mesurer les différences de potentiels (d.d.p) créées entre deux électrodes (M et N) (Fig.23).

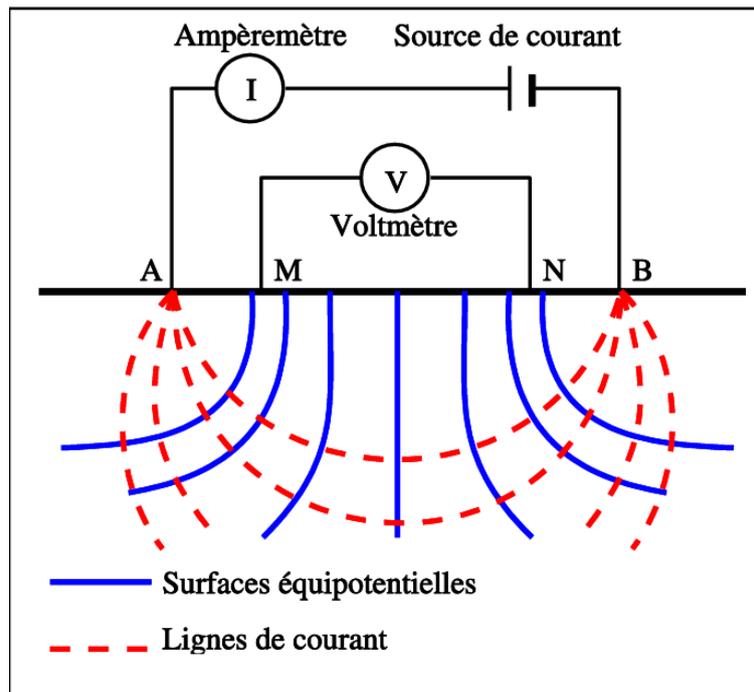


Figure 23: principe de la méthode géoélectrique

II.2.2.2 Résistivité des formations

La valeur de la résistivité électrique dépend essentiellement de la nature du matériau, de sa texture et du fluide qui remplit ses pores ou ses fissures. On peut étudier séparément l'influence de ces facteurs (textures,...) et établir des formules générales donnant la résistivité d'une formation en fonction de sa porosité, de son degré de saturation et de la teneur en sels de son eau de formation, la combinaison de ces facteurs peut individualiser électriquement une formation. Nous donnons sur le tableau suivant quelques ordres de grandeurs de la résistivité pour quelques formations géologiques.

Tableau 5 : valeurs usuelles de la résistivité électrique des formations géologiques

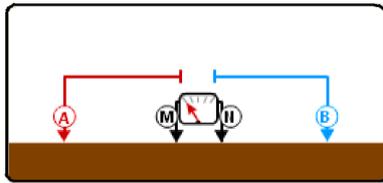
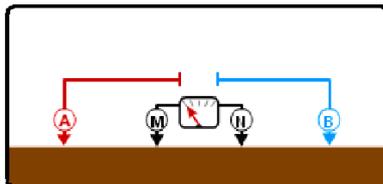
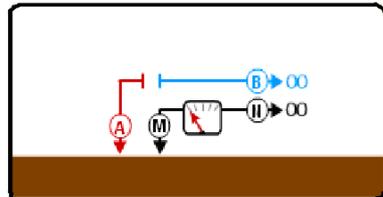
Formations Géologiques	Résistivité électrique moyennes (en ohm.m)
Argiles et Vase	2 à 30
Marne	10 à 50
Sables et Graviers secs	> 303
Sables et Graviers saturés en eau douce	80 à 350
Sables et Graviers saturés en eau salée	0.5 à 10
Calcaires compacts	2000 à 5000

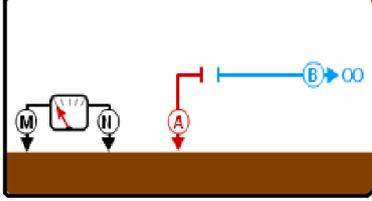
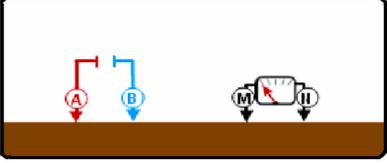
Calcaires fissurés	500 à 1500
Schistes compacts	100 à 1500
Schistes fissurés	150 à 200
Roches Cristallines Altérées	50 à 300
Roches cristallines saines	> 1000

II.2.2.3 Dispositifs de mesure utilisés

La méthode géoélectrique sur le terrain se caractérise par la disponibilité de plusieurs types de dispositifs qui influencent sur l'acquisition des mesures (tableau 6). Sachant que la configuration Schlumberger est la plus utilisée.

Tableau 6 : différents types de dispositifs géo-électriques

Dispositif	Schéma	Description
Schlumberger		Les quatre électrodes sont disposées sur un même alignement. La distance MN est petite par rapport à la distance AB . En général, la distance $MN < AB/5$.
Wenner		Les quatre électrodes sont disposées sur un même alignement et $AM = MN = NB$. Les électrodes de mesure M et N sont disposées à l'intérieur des électrodes d'émission A et B .
Pôle-Pôle		Les électrodes B et N sont cette fois placées à l'infini. Ce dispositif est théoriquement simple puisque le potentiel mesuré en M est dû seulement à A . En pratique, ce dispositif est encombrant à cause de la longueur des câbles nécessaires pour rendre négligeable l'effet des électrodes placées à l'infini.
Pôle-Dipôle		On rejette à l'infini une seule des quatre électrodes et on obtient un tripôle AMN

		<p>ou ABM. Le tripôle le plus courant est celui où les trois électrodes sont disposées sur une même ligne droite, A étant à l'extérieur de MN. En général, ces trois électrodes sont équidistantes ou la distance MN est petite par rapport à AN.</p>
Dipôle-Dipôle		<p>Les quatre électrodes sont en général disposées sur un même alignement et $AB = MN$. La distance entre les deux dipôles est variable.</p>

Le dispositif fondamental, composé généralement de quatre électrodes et d'un appareil qui permet d'injecter un courant continu et de mesurer la d.d.p résultante, offre plusieurs variantes qu'on peut regrouper en deux grandes catégories:

- la première appelée "**sondage électrique**", consiste à établir la variation de la résistivité avec la profondeur.
- la seconde, appelée "**traîné électrique**", cherche à mettre en évidence des variations latérales de résistivités, adaptées à la localisation des zones de socles fracturés sous recouvrement ou niveau d'altération.

II.2.2.3.1 Technique de sondage électrique

Le sondage électrique en courant continu, consiste à établir la variation de la résistivité, en fonction de la profondeur des terrains prospectés en surface à l'aide d'un dispositif à quatre électrodes (Fig.24). La résistivité apparente est obtenue pour différentes valeurs d'espacement entre les électrodes (Fig.24b).

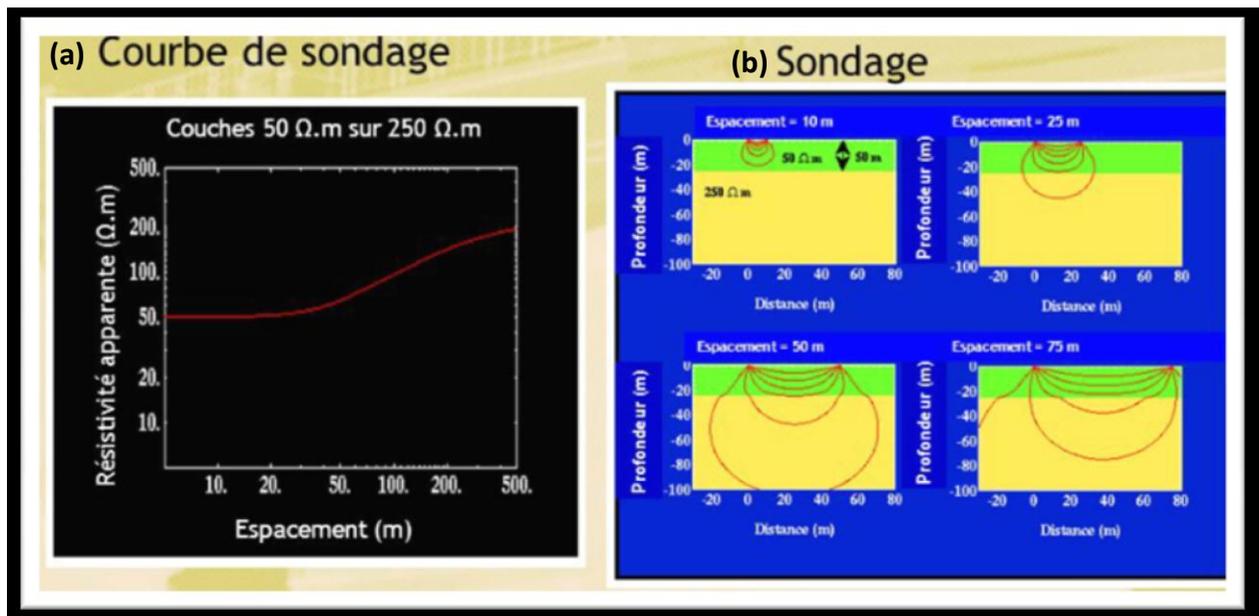


Figure 24 : technique de sondage électrique
 (a) courbe de sondage électrique, (b) mise en œuvre sur le terrain

La courbe de sondage électrique $\rho_a=f(AB/2)$ s'obtient en reportant les valeurs de résistivités apparentes ρ_a en fonction de $AB/2$ (demi-écartement des électrodes de courant qui peut atteindre jusqu'à 5km en échelle bilogarithmique (Fig.24a).

L'interprétation des mesures se fait par une méthode, par exemple semi-automatique, qui consiste à se faire donner un schéma de terrain, à calculer et à dessiner la courbe théorique correspondante à l'aide d'un abaque CH1 (figure 25) comporte plusieurs courbes reportées sur une échelle bilogarithmique de même décade que le papier bilogarithmique, chaque courbe de cet abaque correspond à la courbe d'un sondage électrique exécuté sur un sous-sol composé de deux terrains où le premier terrain a une épaisseur et une résistivité unité ; ou en ordinateur à l'aide d'un logiciel adéquat et à la comparer à la courbe de mesures réalisées sur le terrain.

Le schéma est ensuite corrigé par approximations successives jusqu'à coïncidence des deux courbes théorique et mesurée. En général, l'interprétation classique des résultats, ne sera cependant pratiquement possible que :

- lorsque les différents terrains sont stratifiés horizontalement ou sub-horizontalement,
- lorsque les résistivités des différents terrains en présence sont suffisamment contrastées,

- lorsque les différents terrains ont une extension verticale et horizontale assez importante.

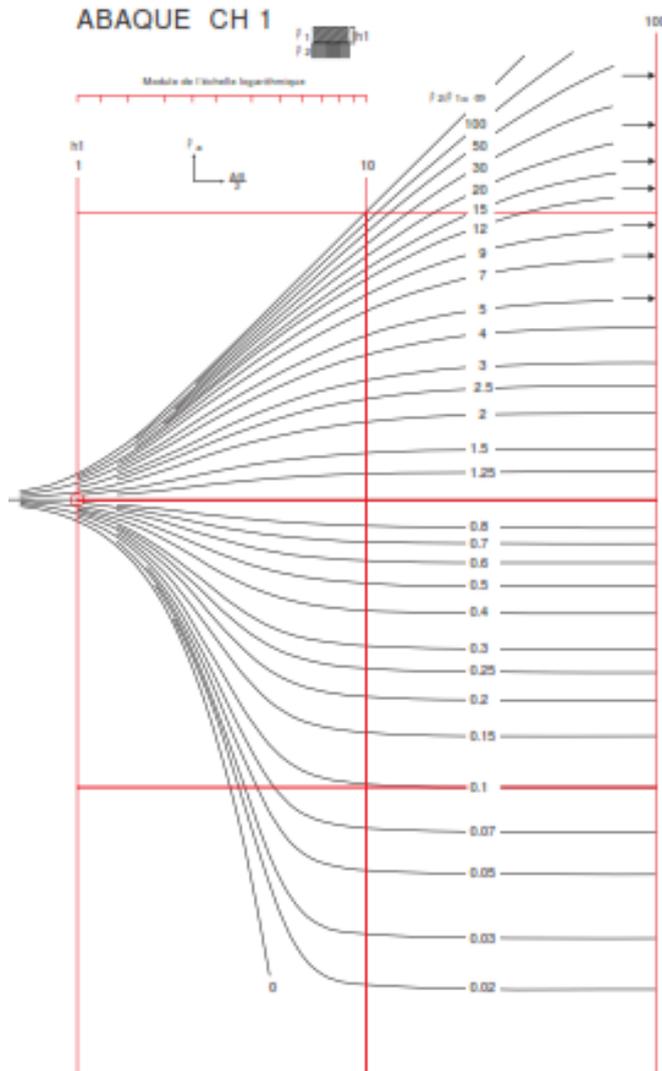


Figure 25 : abaque CH1 aide à l'interprétation des sondages électriques

L'interprétation des données de mesures est généralement qualitative et, est souvent limitée par les principes d'équivalence et de suppression limites de l'interprétation 1D en géoélectrique qui ont les conséquences suivantes:

- une couche conductrice mince entre deux terrains de résistivité élevée, ne sera définie que par le rapport épaisseur-résistivité appelé "conductance longitudinale de la couche",

- une couche résistante mince intercalée entre deux terrains conducteurs ne sera définie que par le produit épaisseur-résistivité appelé "résistance transversale de la couche",
- de plus, une couche, même épaisse, et de résistivité intermédiaire à celles des couches qui l'encadrent pourra ne pas apparaître sur la courbe de sondage électrique.

II.2.2.3.2 Technique de traîné électrique

Le traîné électrique consiste à déplacer quatre électrodes dont l'espacement reste constant et à mesurer la résistivité apparente ρ_a en fonction de la position du dispositif (Fig.26). Cette technique d'investigation permet de localiser, entre autres, les failles, les karsts, les filons, les fractures, etc.

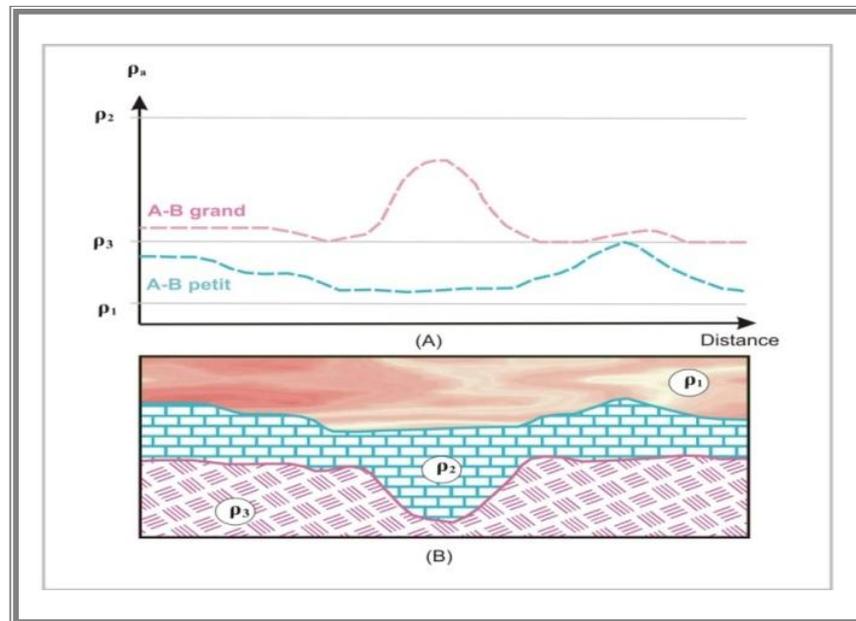


Figure 26 : technique de traîné électrique



Photo 2 : mise en œuvre sur le terrain

- L'espacement entre les électrodes,
- La longueur du profil,
- Et la dimension de la section tomographique.

Une acquisition pour la tomographie utilise en général un grand nombre d'électrodes connectées à un câble multi-conducteurs et placées selon un profil. Un ordinateur portable, dans lequel est programmée la séquence de mesure, est relié à une boîte de commutation et sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection du courant et la mesure du potentiel.

Nous signalons ici que nous pouvons faire une prolongation du profil on parle ici de ROLL ALONG si le matériel est insuffisant pour faire un long profil.

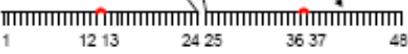
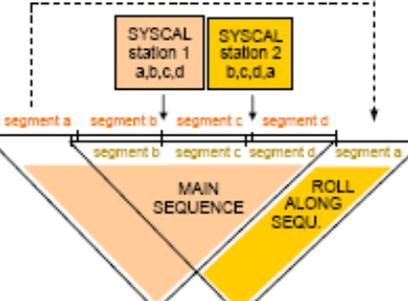
SYSCAL Pro Switch for resistivity imaging



The SYSCAL Pro Switch units use segments (seg) of multi-core cable which are reversible and interchangeable.

For instance, the SYSCAL Pro Switch 48 with 10m spacing has 4 segments of cable a, b, c, d, with 12 electrodes each, for a total line length of 480m. The SYSCAL is placed in the middle of the line, between segments b and c.

If the profile to measure is longer than the line length, a ROLL ALONG technique can be applied where, after a first set of readings with (a, b, c, d), segment a is placed after segment d to form a new (b, c, d, a) combination etc.

SYSCAL Pro Switch	48	72	96	120
5m spacing	2 seq x 24 elect	4 seq x 18 elect	6 seq x 16 elect	12 seq x 10 elect
total line length	240m	360m	480m	600m
10m spacing	4 seq x 12 elect	8 seq x 9 elect	12 seq x 8 elect	24 seq x 5 elect
total line length	480m	720m	960m	1 200m



Photo 3 : matériel d'acquisition
A : matériel de tomographie de type Syscal d'IRIS instruments, B : batterie, C : piquets métalliques, D : câble multi-conducteurs.

En outre, les câbles multi-conducteurs sont reliés à la boîte de commutation. Un contact galvanique est assuré avec le sol au moyen de piquets métalliques.

II.2.3.3. Traitement et l'inversion des mesures

Les valeurs obtenues lors de l'acquisition sur terrain qui sont des résistivités apparentes, seront traitées et filtrées. En effet, un traitement mathématique consiste à chercher et retrouver les épaisseurs et résistivités calculées des différents horizons qui seront relativement proches des résistivités vraies des corps.

L'inversion consiste en fait, de trouver une solution très rapprochée entre les mesures calculées et celles mesurées.

Les différentes étapes d'acquisition et de traitement des données sont résumées dans le schéma suivant :

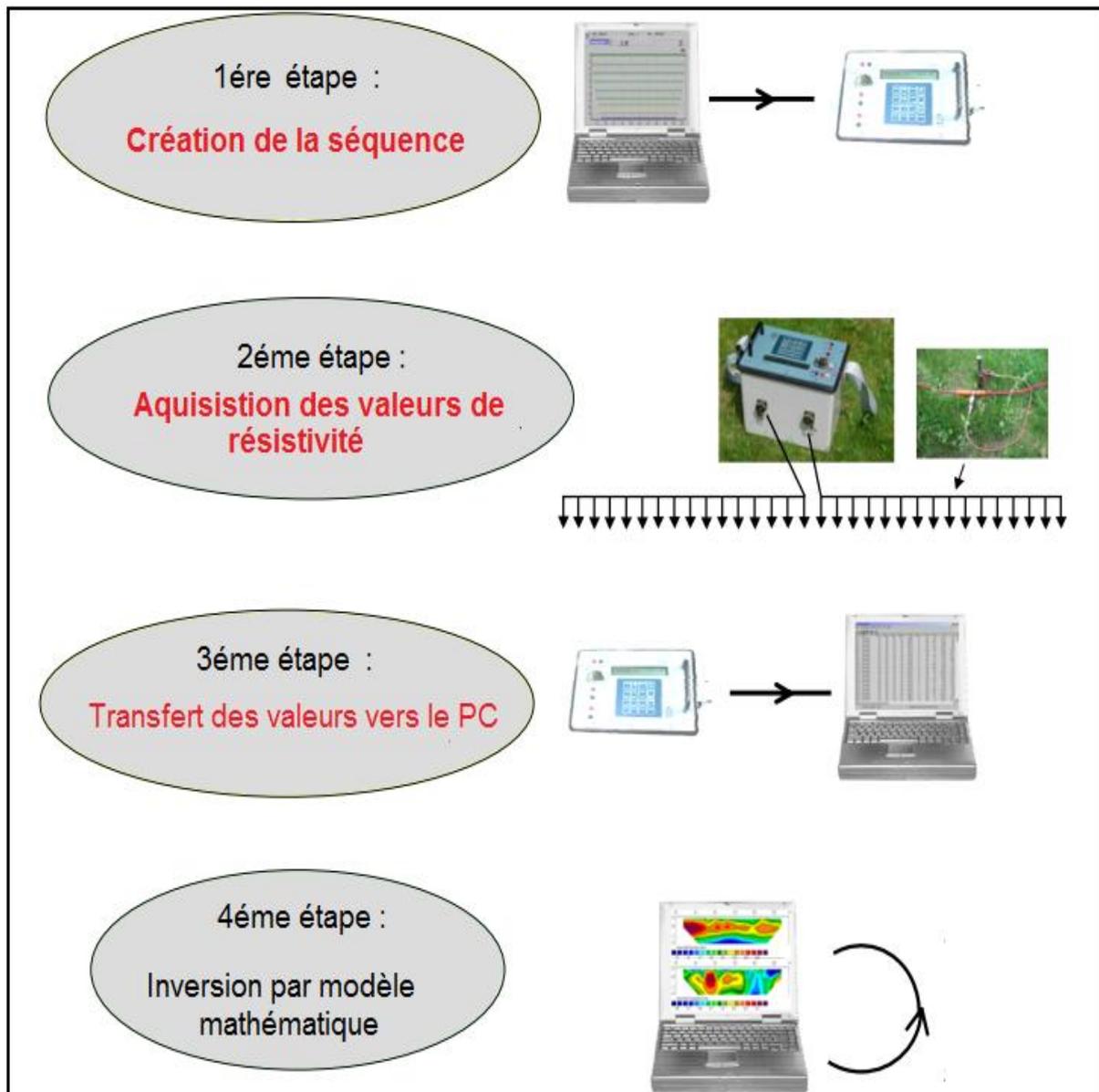


Figure 28 : schéma d'acquisition et de traitement d'un profil tomographique

II.3. La méthode magnétique

La méthode magnétique est considérée comme la méthode la plus ancienne utilisée en géophysique ; apparaissant au VI^{ème} siècle, avec les travaux de Thalès, c'est l'une des techniques de prospection géophysique les mieux documentées (Telford, 1976 ; Nabighian, 2005; Reynolds, 2011; Hinze, 2013). La première découverte majeure dans ce domaine est effectuée par P. De Maricourt en 1269, qui définit la nature dipolaire des objets magnétiques, et caractérise les pôles magnétiques de la Terre. L'utilisation des méthodes magnétiques va connaître un développement important dès le début du XIX^{ème} siècle, avec les premières campagnes menées par B. von Humbolt. Les premières applications de ces techniques ont

lieu, une fois encore, dans le milieu de l'exploration des ressources, en 1640, en Suède, puis en 1844, aux Etats-Unis, pour la recherche de minerais (Nabighian, 2005).

Les méthodes magnétiques ont été utilisées pour rechercher des structures géologiques susceptibles de renfermer des hydrocarbures, et contraindre les systèmes de failles associés (Reynolds et al., 1991; Spaid-Reitz et Eick, 1998 ; Stone et al., 2004). L'industrie minière et pétrolière emploie également ces techniques (Doyle, 1990; Teskey, 1993), en particulier pour la recherche de roches diamantifères comme les kimberlites (Macnae, 1979; Keating, 1995; Keating et Sailhac, 2004; Power et al., 2004).

II.3.1- Principes théoriques de la prospection magnétique

II.3.1.1 Champ géomagnétique :

Le champ magnétique terrestre ou champ géomagnétique, a fait l'objet de plusieurs études depuis quelques siècles, c'est un phénomène variable dans l'espace et dans le temps, caractérisé par sa direction et son intensité en chaque point de la surface du globe terrestre. Le champ géomagnétique, est la somme de deux parties (Le Mouél, 1969) :

- un champ interne, dont les sources sont intérieures à la terre. Ce dernier est la somme de deux termes :
 - ◆ un champ principal (régulier) ayant pour siège la surface du noyau externe et dont les longueurs d'onde sont typiquement de l'ordre de quelques milliers de Km. Ce champ représente en moyenne 99 % du champ observé à la surface du globe ;
 - ◆ un champ crustal d'anomalies locales dont les longueurs d'onde sont généralement inférieures à quelques centaines de Km. Ce champ est engendré par les roches aimantées situées au-dessus de la surface isotherme dite de Curie.
- un champ externe : dont l'intensité est beaucoup plus faible, plus rapidement variable dans le temps dont les sources sont pour partie externe (situées dans la haute atmosphère et au delà). Ce champ est caractérisé par :
 - ◆ des fluctuations périodiques (journalières, lunaires et annuelles) résultants de la distorsion du champ magnétique terrestre par les vents solaires ;
 - ◆ des pulsations aléatoires rapides et faibles causées par des oscillations dans l'ionosphère et la magnétosphère ;
 - ◆ des jours agités et des orages magnétiques à début brusque, dus à l'arrivée d'une bouffée de plasma émise par le soleil, et qui provoquent les aurores polaires.

II.3.1.2 Les éléments du champ géomagnétique

En chaque point de la surface de la terre, le champ géomagnétique « B » est représenté par son intensité « F » comme grandeur vectorielle, ce vecteur change son orientation d'un point à l'autre. La complexité de l'orientation du vecteur du champ total nécessite sa décomposition dans un système à 3D (Telford, 1998). Dans un système orthogonal, les éléments du champ principal sont illustrés par la figure 29 :

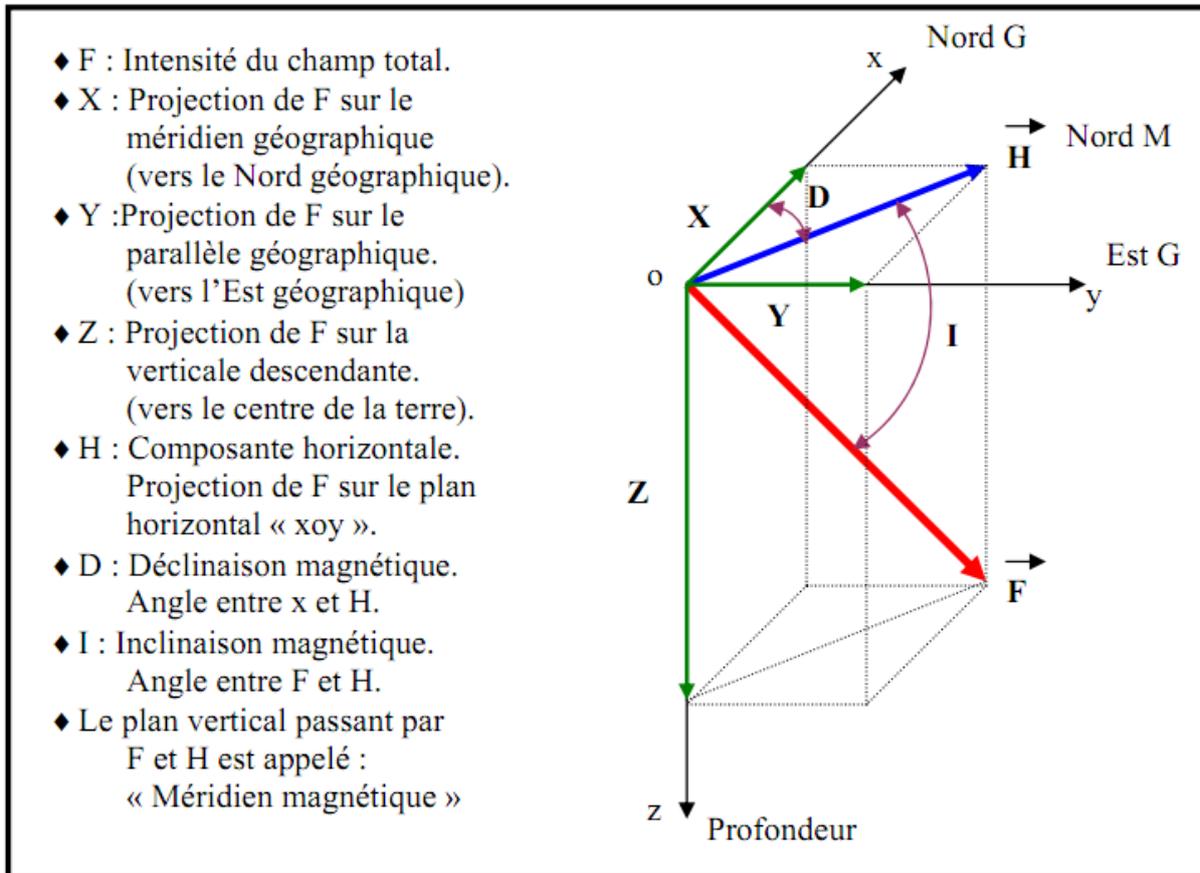


Figure 29 : Composantes du champ magnétique terrestre (Telford 1998)

II.3.1.3 Champ magnétique de référence

Le champ magnétique de référence mondial (International Geomagnetic Reference Field) est une représentation mathématique du champ géomagnétique adoptée selon un protocole d'accord international sous l'égide de l'association internationale de géomagnétisme et d'aéronomie (IAGA), branche de l'union internationale de géodésie et de géophysique (IUGG). Ces modèles de référence mondiaux sont calculés tous les cinq ans, à partir de l'expression (I.05) au dixième degré pour le champ (coefficients internes de Gauss : g_n^m, h_n^m) et au huitième degré pour les variations temporelles (dérivées premières par rapport au temps de g_n^m, h_n^m) et correspondant à des époques données (Barraclough, 1987). Ces IGRF sont établis à partir de différents modèles proposés par différentes équipes. Ils sont construits à

partir de données disponibles à une certaine époque puis prolongées par un modèle de variations séculaires à l'époque du modèle de référence. Du fait qu'il est impossible de prédire exactement les variations dans le temps du champ magnétique, on note des écarts entre le vrai champ et le modèle IGRF prolongé à cette époque. Le dernier modèle établi est celui IGRF-10, daté de 2015.

II.3.1.4 Origine du champ principal

Les analyses mathématiques du champ observé à la surface du globe démontrent qu'au moins 99% est causé par des sources internes et 1% par des sources extérieures à la terre. Pour expliquer les mécanismes des sources internes, plusieurs théories ont été avancées.

La théorie actuelle est celle de la Dynamo. Cette dernière suggère que le champ magnétique terrestre est créé et entretenu par un processus d'induction des courants électriques intenses circulant dans le noyau extérieur possédant une conductibilité électrique très forte (noyau extérieur : la partie liquide du noyau située entre 2800 et 5000 Km de profondeur).

On assume aujourd'hui que le noyau est une combinaison de fer (Fe) et de nickel (Ni), tous deux de bons conducteurs électriques. Même si le noyau était formé d'éléments moins conducteurs, l'énorme pression retrouvée presserait les électrons de façon à former des gazes à électrons libres de conductivité satisfaisante. La source magnétique est illustrée par le modèle auto-excité, c'est-à-dire, un fluide de grande conductivité bouge dans un mouvement complexe et des courants électriques sont causés par des variations chimiques produisant un champ magnétique (Le Mouél, 1969 ; Chouteau, 1999).

II.3.1.5 Variations du champ géomagnétique

Durant la réalisation d'un levé magnétique dans un endroit donné, on remarque que les mesures, prises dans le même point, varient en fonction du temps. On distingue deux types de variation (Chouteau, 1999) :

- les variations de courtes périodes (annuelles ou moindres), sont causées essentiellement par des courants électriques circulant dans l'ionosphère et la magnétosphère. Ces variations temporelles sont connues sous le nom de variations transitoires ;
- les variations de longues périodes trouvent leur origine dans le noyau et sont appelées variations séculaires. Ces dernières sont souvent représentées sous forme de cartes isopores indiquant le taux de variation en nT/an pour l'intensité du champ ou en degré/an pour l'inclinaison et la déclinaison magnétique.

II.3.1.6 L'aimantation rémanente des roches

Les roches ignées et sédimentaires possèdent un champ magnétique permanent (rémanent) à des degrés divers. La direction de ce champ rémanent peut être complètement différente de la direction du champ local, elle est caractéristique du champ local lors de la formation de la roche.

L'aimantation rémanente d'une roche est une aimantation permanente acquise par la roche appelée : aimantation rémanente naturelle ARN (Natural Remanent Magnitization NRM). Dans plusieurs cas, l'aimantation des roches dépend principalement de l'existence d'un champ magnétique ambiant en présence de minéraux magnétiques dans la roche. Ce phénomène est très compliqué, il dépend de la genèse de la roche. On distingue les principaux types suivants (Chouteau, 1999 et Bournas, 2001) :

- Aimantation Thermo Rémanente TRM (Thermo Remanent Magnetization) ;
- Aimantation Rémanente Détritique DRM (Depositional Remanent Magnetization) ;
- Aimantation Rémanente Chimique CRM (Chemical Remanent Magnetization) ;
- Aimantation Rémanente Isotherme IRM (Isothermal Remanent MagnetizationI) ;
- Aimantation Rémanente Visqueuse VRM (Viscous Remanent Magnetization).

II.3.1.7 Classes magnétiques de matériaux

Le magnétisme des matériaux dépend des moments magnétiques des atomes ou ions. Selon la susceptibilité magnétique, on distingue trois grandes classes (Chouteau, 1999) :

- *diamagnétiques* (χ faible et < 0)
- *paramagnétiques* (χ faible et > 0)
- *ferromagnétiques* (χ élevé et > 0)

Avec la susceptibilité χ est très élevée et supérieure à zéro.

Le magnétisme dans ce cas est dû à une aimantation spontanée. Toute roche possédant des propriétés magnétiques contient des minéraux ferromagnétiques, et même s'ils ne sont qu'à l'état de traces, leur effet est plus important que celui de la roche encaissante (figure 30). Un certain nombre de substances contenant du Cobalt, du Nickel, du Platine ou des terres rares est ferromagnétique, mais les ferromagnétiques naturels sont toujours des solides cristallisés contenant du Fer (Oxydes de fer, Hématite, Magnétite, Gêotite, Pyrhotites, Pyrite).

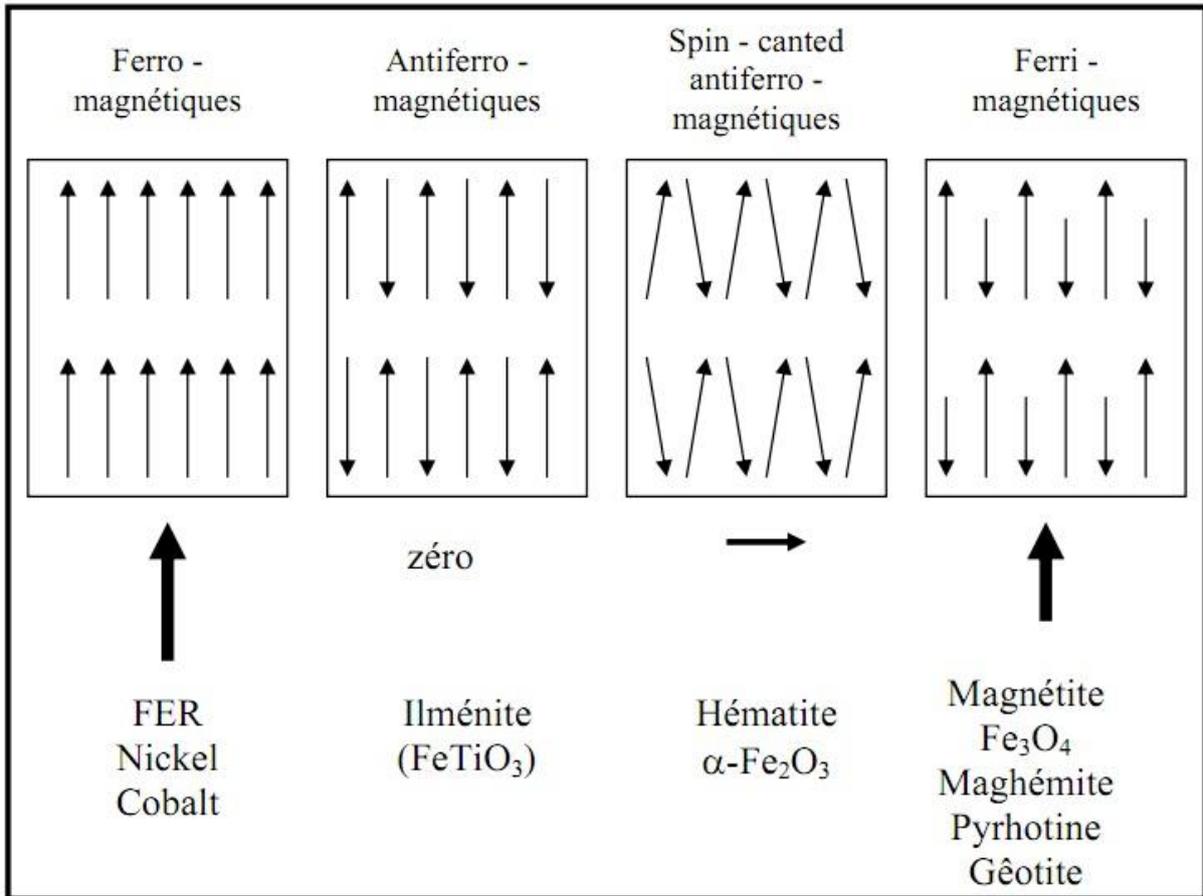


Figure 30 : les classes des matériaux ferromagnétiques

II.3.1.8 Loi de Coulomb

C'est la loi essentielle du magnétisme, contrairement aux charges électriques et aux masses, les charges magnétiques n'existent pas en réalité. Coulomb a supposé que l'existence du magnétisme est liée à la présence de ce qu'on appelle pôles magnétiques.

Le pôle est lourd comme une masse et actif comme une charge (masse chargée). La physique a démontré que dans la nature, il n'existe pas de masse magnétique en tant que substance indépendante et que les propriétés magnétiques sont dues aux mouvements des particules chargées dans les atomes de la matière. Dans un milieu de perméabilité magnétique « μ », la force « F » qui agit entre deux pôles P1 et P2 distant de « r » est donnée par :

$$F = \frac{P_1 P_2}{\mu r^2}$$

II.3.1.9 Les anomalies magnétiques

Par définition, une anomalie magnétique est la différence entre le champ observé (mesuré) et celui théorique (calculé). En prospection magnétique, c'est la mise en évidence des anomalies qui nous intéresse. Les magnétomètres permettent de mesurer le champ total tandis que le

développement des harmoniques sphériques nous permet de calculer une valeur théorique du champ magnétique terrestre en n'importe quel point. Sous l'influence des roches du sous sol, il se crée un champ supplémentaire dit champ anomal que l'on étudie (Le Mouél, 1969).

II.3.2 Quelques filtres appliqués au traitement des données magnétiques

II.3.2.1 Réduction au pôle

La réduction au pôle des anomalies magnétiques utilise donc un opérateur complexe composé de deux parties l'une réelle et l'autre imaginaire. De ce fait, ce traitement affecte la phase du signal et provoque un déplacement latéral des anomalies. Il transforme l'anomalie magnétique observée en celle qui aurait été obtenue si la magnétisation et le champ magnétique ambiant étaient tous les deux verticaux c'est-à-dire si les mesures étaient effectuées au pôle magnétique (figure 31).

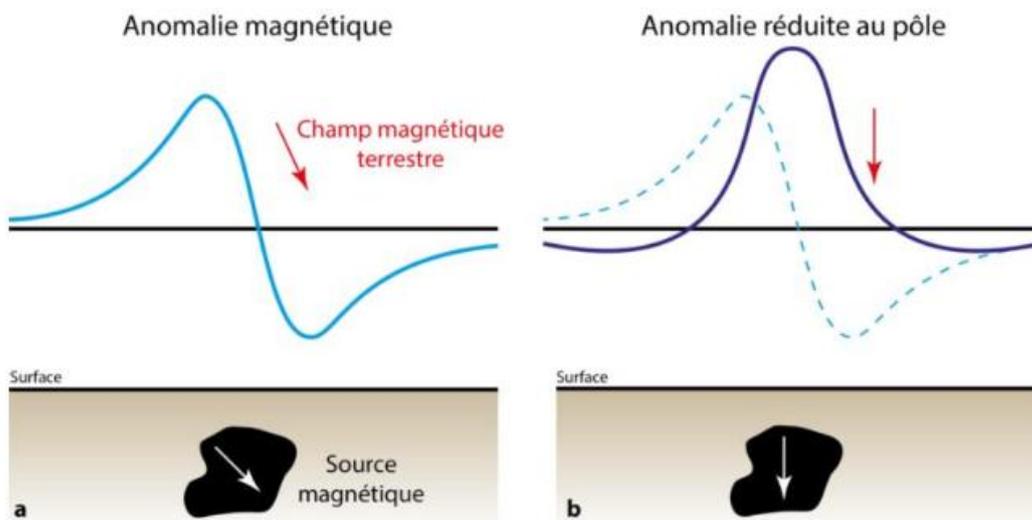


Figure 31 : principe de la transformation RTP sur les données magnétiques. L'interprétation d'une anomalie dipolaire (a) étant ambiguë, la transformation RTP lui confère un aspect mono-polaire plus simple à étudier (b) (Blakely, 1996).

II.3.2.2 Tilt angle

Le tilt angle (Miller et Singh 1994 ; Verduzco 2004 ; Salem et al. 2007), est défini comme l'arc tangente du rapport de la dérivée verticale de l'anomalie du champ total avec le module de son gradient horizontal.

$$H_{\theta}(F) = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}$$

- Si $(F) = 0^\circ$: correspond au lieu des points à l'aplomb du contact ($h = 0$)
- Si $(F) = \pm 45^\circ$: La distance entre l'une des deux valeurs et la valeur nulle. La fonction tilt étant symétrique, permet d'estimer la profondeur du toit du socle ($h = \pm Z_c$)

II.3.2.3 Le signal analytique 3D

L'expression 3D de l'amplitude du signal analytique d'un champ potentiel A est donné par :

$$AS = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)^2}$$

Avec $\partial A/\partial x$, $\partial A/\partial y$ et $\partial A/\partial z$, sont les dérivées premières du champ A dans les trois directions de l'espace.

Le signal analytique 3D est utilisé pour l'estimation approximative de la position des contacts magnétiques et de la profondeur des sources des anomalies en utilisant des données maillées. Cependant, les résultats de ces estimations, dépendent fortement de la direction de la magnétisation totale.

II.3.2.4 Le gradient horizontal

Le gradient horizontal exprime le taux de variation latérale du champ magnétique. Sa magnitude (HG) est donnée par l'expression :

$$HG(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial F(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F(x, y)}{\partial y}\right)^2}$$

Ce paramètre est utilisé pour la localisation des limites de blocs d'aimantation différentes et dans l'interprétation des données magnétiques.

II.3.2.5 Dérivations et intégrations

L'utilisation de dérivation, permet souvent d'individualiser des sources proches. Il joue le rôle de filtre passe-haut, amplifiant les courtes longueurs d'onde au détriment des grandes longueurs d'onde. Cet opérateur peut aussi être employé pour distinguer les anomalies de proche surface masquées par le signal du socle.

II.3.3 Méthode aéromagnétique

La méthode géophysique aéromagnétique consiste à couvrir une surface de la terre par la mesure du champ magnétique totale par une compagne géophysique aéroportée afin de cartographier les corps linéaires en surface comme en profondeur même les différentes structures à l'échelle régionale.

Pour notre travail nous utilisons cette méthode pour cartographier les différentes structures géologiques du causse d'Agouraï et de déterminer les principales failles et fractures affectant surtout les calcaires.

Notre objectif est la validation des résultats de la télédétection pour le dégagement des linéaments.

III. Hydrochimie

III.1. Analyses physico-chimiques

La méthodologie est basée sur la prise de huit échantillons provenant de certaines sources et puits dans la région d'Agouraï, pour faire des analyses physico-chimiques in situ et au laboratoire, et cela durant l'année 2017 en deux périodes sèche et humide.

Les analyses physico-chimiques réalisées sur l'ensemble des échantillons sont basées sur les techniques décrites par Rodier, (2009).

Sur le terrain, et à l'aide du multi-paramètre Thermo Scientific A329, nous avons pu mesurer la température, le pH, la conductivité et la salinité ; ces paramètres qui sont très sensibles aux conditions du milieu et susceptibles de subir des variations importantes s'ils ne sont pas mesurés in situ.

Après notre retour du terrain, nous entamons la réalisation des analyses au laboratoire de la faculté des sciences de Meknès. Les différentes analyses sont réalisées selon les protocoles donnés par le tableau suivant :

Tableau 7 : protocoles des paramètres mesurés

Paramètres mesurés	Protocole	Unité de mesure
Oxygène dissous	Méthode de Winkler modifiée par Alsterberg	mg/l
Sulfates	Néphélométrie	mg/l
Calcium	Titrimétrie à l'EDTA	mg/l
Chlorures	Méthode de Mohr	mg/l
Magnésium	Hydrotimétrie	mg/l

Orthophosphates	Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire	mg/l
Nitrates	Salicylate de sodium AFNOR T90-023	mg/l
Nitrites	Méthode au réactif de Zambelli	mg/l
Ammonium	Au bleu d'indophénol	mg/l
Dureté totale	Titrimétrie à l'EDTA	°F



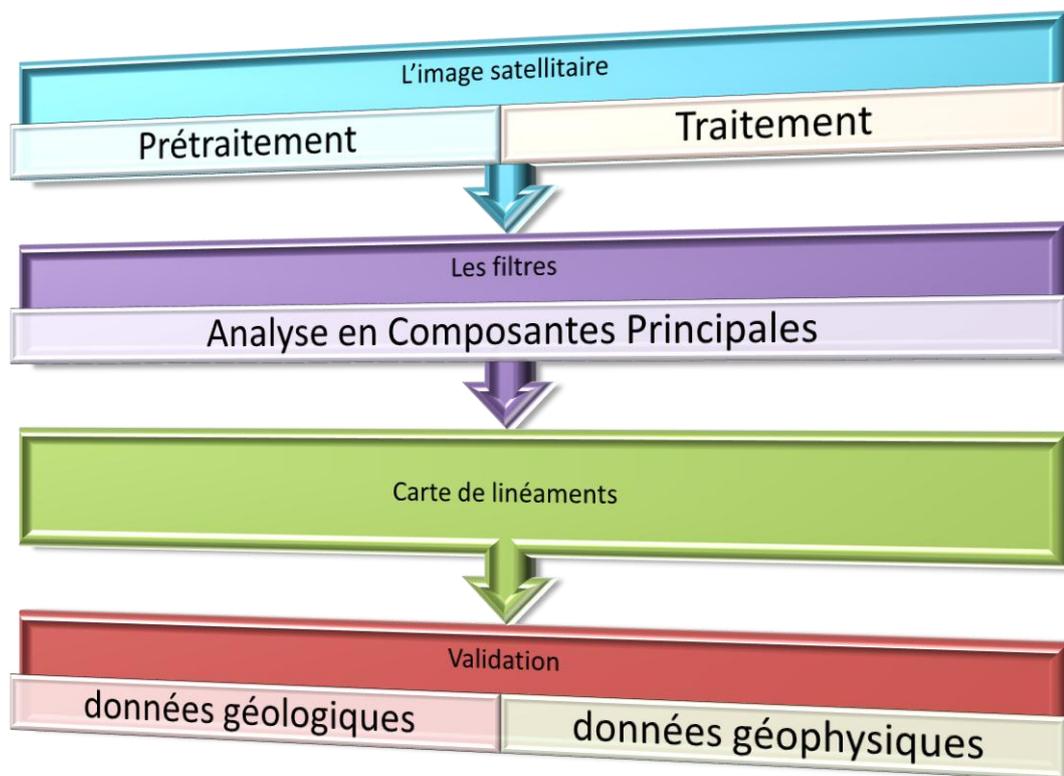
PARTIE II : ETUDE STRUCTURALE ET GEOPHYSIQUE

Chapitre 3 : ETUDE STRUCTURALE PAR TELEDETECTION ET ANALYSE DE LA FRACTURATION

I. Introduction

Aujourd'hui la télédétection spatiale satellitaire est devenue un outil important pour l'observation et le traitement des objets de la Terre. Elle permet aussi d'atténuer le sous-équipement cartographique dont souffrent la plupart des gens qui utilisent la cartographie. L'analyse des images satellitaires nous permet d'élaborer des cartes thématiques susceptibles d'être exploitées dans plusieurs domaines (agriculture, foresterie, géologie, hydrologie, océanographie, couverture et utilisation du sol...), et nous pouvons dire que l'utilisation de cette technique est obligatoire dans les étapes de la reconnaissance géologique surtout si elle est suivie de validation sur le terrain.

Après obtention de la carte finale des linéaments, nous devons la valider en la comparant avec les données géologiques (failles sur la carte géologique et fracturations relevées sur le terrain) et les données géophysiques selon le schéma suivant :



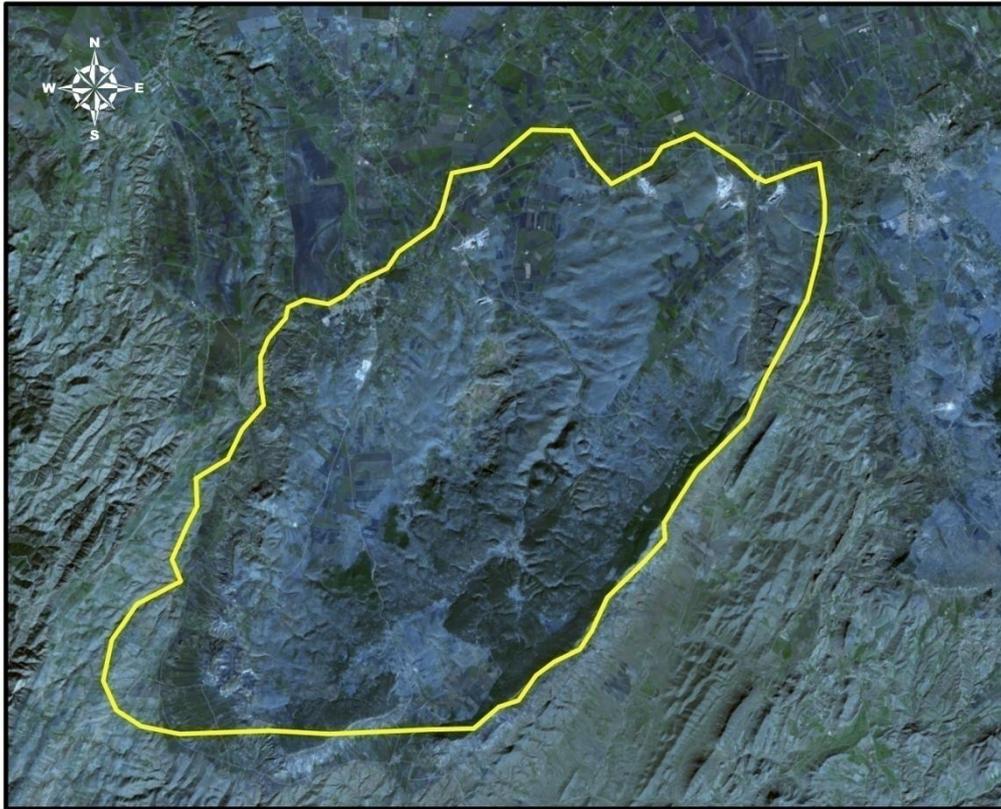


Figure 32 : image multi-spectrale sur la zone d'étude avant traitement

II. Extraction des linéaments par télédétection

II.1- Cartographie des linéaments :

La télédétection, grâce à sa vision synoptique, permet d'étudier de vastes champs géographiques et constitue un puissant outil pour l'étude de la fracturation. En effet, l'analyse des linéaments, constitue une étape importante dans l'extraction des fractures et failles géologiques. L'extraction des linéaments est établie par deux méthodes : manuelle et automatique.

II.2- Extraction manuelle des linéaments

L'extraction manuelle consiste à numériser toute structure linéaire observée sur l'image en ignorant les linéarités anthropiques (pistes, routes, fils de haute tension, ...) par superposition des couches vectorielles aux images et à l'aide de la carte géologique de la zone d'étude. La carte du réseau de fractures ainsi obtenue, nous pouvons l'utiliser pour la validation du réseau des linéaments extrait automatiquement.

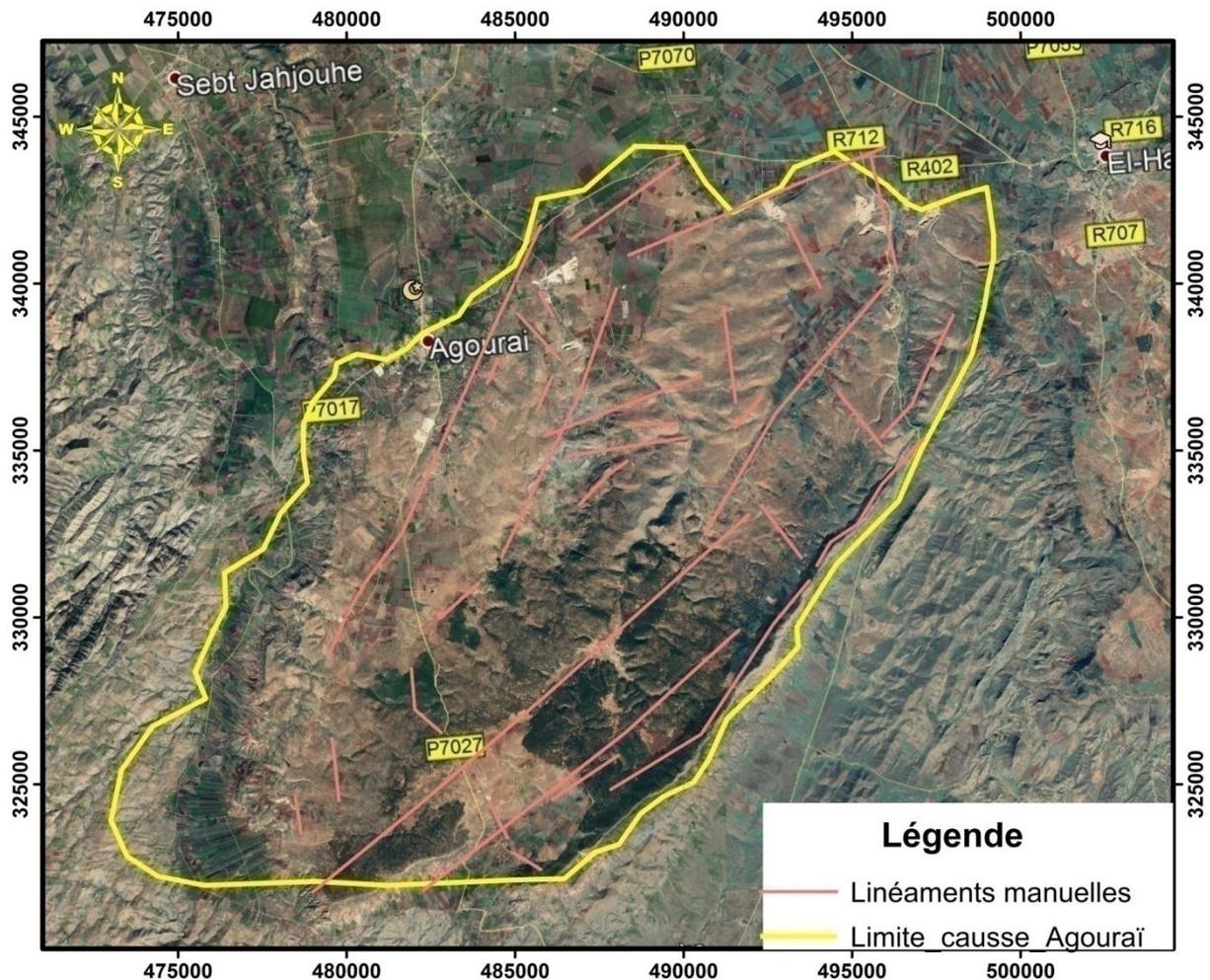


Figure 33 : carte de l'extraction manuelle des linéaments

Nous constatons sur la carte (figure 33) obtenue de l'extraction manuelle des linéaments la dominance de la direction NE-SW et qui suit les failles principales régionales et la présence aussi des autres directions des linéaments avec des densités variables et qui suivent la direction es failles secondaires comme la direction N-S et NW-SE.

II.3- Extraction automatique des linéaments

II.3.1. Analyse en composantes principales (ACP) :

La technique de l'ACP est une transformation mathématique qui consiste à calculer les valeurs et vecteurs propres de la matrice de variance-covariance à partir d'une série d'images ; elle est efficace à l'interprétation de l'image multi-spectrale et à la réduction de l'information contenue dans les composantes de cette image et à la corrélation en nombre plus restreint de composantes. Cette transformation génère des nouvelles images, composantes ou axes, qui sont en combinaison linéaire avec les images originales. Seulement, les trois premières composantes représentent un grand pourcentage de la variance totale présente dans les six bandes originales des canaux TM. La première composante est calculée dans la

direction de l'espace suivant laquelle la variance est maximale. La seconde obéit à la même règle dans l'espace restant et ainsi de suite. Cette méthode a été appliquée à toutes les bandes. Cette composante (CP1) apporte une amélioration et une précision au niveau du contraste d'une part entre les différentes structures et d'autre part entre les formations géologiques. La première composante portera plus de l'information réelle de l'ensemble de données d'origine, tandis que les autres composantes ne décriront que des variations mineures (in Aouragh, 2015).

II.3.2. Application des filtres directionnels sur la CP1

Le but dans ce chapitre est consacré à la mise en évidence des discontinuités géologiques délimitant les zones relativement homogènes et indiquant la présence de contacts normaux et/ou anormaux (failles, fractures, ...), pour cela nous essayons d'appliquer les filtres les plus adéquats.

Les filtres de matrice sont appliqués dans les directions N-S, E-W, NE-SW et NW-SE. À titre d'exemple, le tableau suivant, présente les matrices de ces filtres dans ces directions (in Vall, 2018).

Tableau 8 : matrices des filtres sobel

Filtres directionnels de SOBEL 7x7													
Sobel N-S							Sobel E-O						
1	1	1	2	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1	-1	-1	-2	0	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1
Sobel NO-SE							Sobel NE-SO						
2	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	2
1	3	2	2	2	0	-1	-1	0	2	2	2	3	1
1	2	4	3	0	-2	-1	-1	-2	0	3	4	2	1
1	2	3	0	-3	-2	-1	-1	-2	-3	0	3	2	1
1	2	0	-3	-4	-2	-1	-1	-2	-4	-3	0	2	1
1	0	-2	-2	-2	-3	-1	-1	-3	-2	-2	-2	0	1
0	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	0

II.3.3. Résultats obtenus de l'extraction automatique des linéaments

L'application de l'algorithme d'extraction automatique des linéaments par le logiciel GEOMATICA nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans la figure suivante (figure 34).

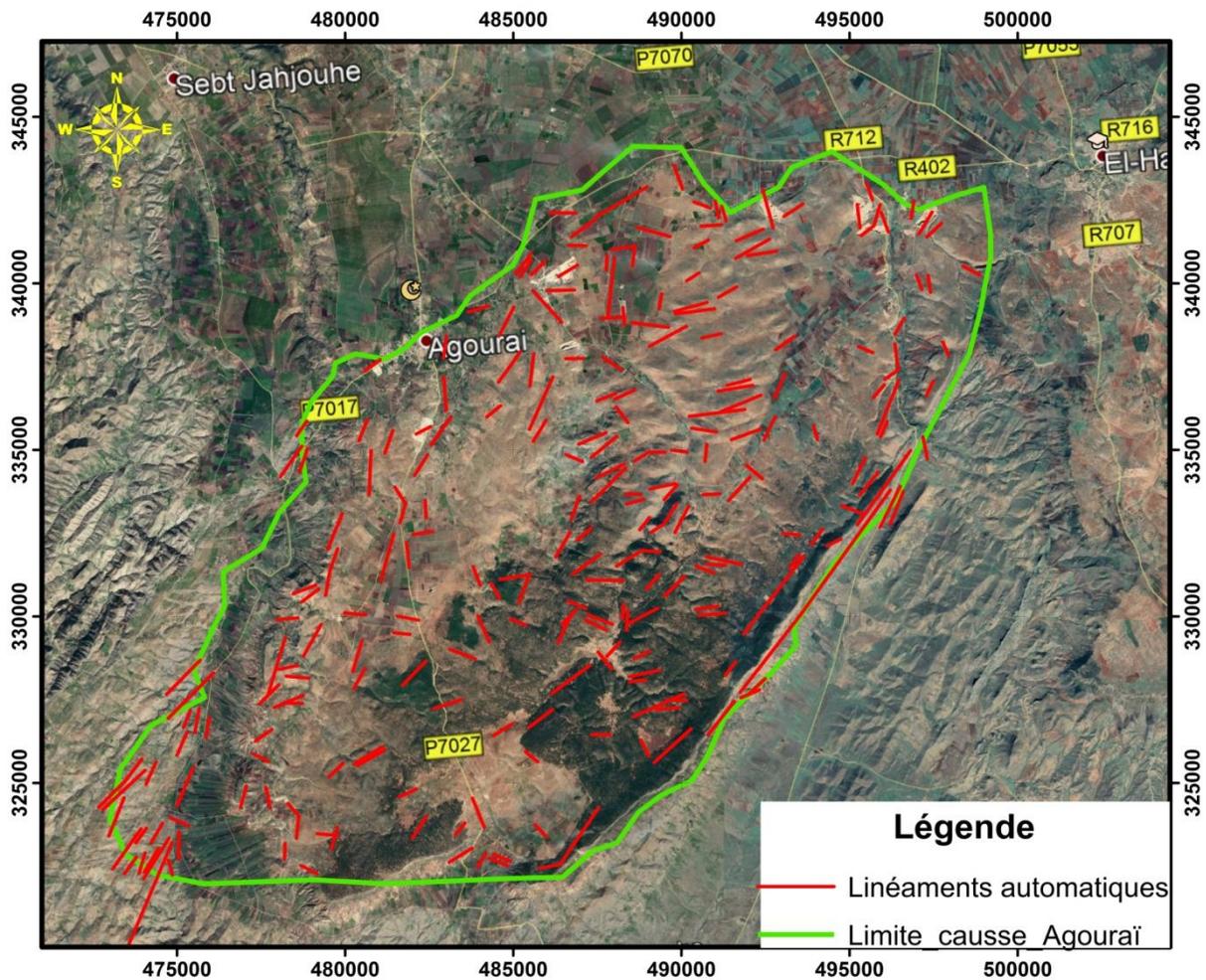


Figure 34: carte de l'extraction automatique des linéaments

La carte obtenue (figure 34) de l'extraction automatique des linéaments du causse montre comme la carte précédente des linéaments extraits manuellement, la dominance de la direction NE-SW avec cette fois la diminution au niveau de la longueur, nous constatons aussi la présence des autres directions à savoir la direction N-S et NW-SE.

II.3.4. Traitement statistique des linéaments extraits

L'analyse statistique de l'orientation des linéaments formant le réseau permet d'en dégager les directions dominantes. Ainsi les méthodes statistiques largement utilisées sont celles de la rosace directionnelle et de l'histogramme.

En effet, la méthode de la rosace consiste à produire une rosace directionnelle dont les pétales sont proportionnels à la longueur cumulative des linéaments. Alors que la méthode de l'histogramme consiste à présenter les classes prédéfinies par l'utilisateur sous forme des rectangles montrant la dominance de l'une de ces classes (Vall, 2018).

II.4- Rosace directionnelle

La Rosace directionnelle est une représentation graphique des linéaments ou structures linaires groupées en classes statistiques selon leurs directions. Cette représentation circulaire est un outil d'évaluation qui permet d'apprécier les directions des linéaments dominantes en fonction des classes. La méthode consiste à représenter les classes selon les directions présentes sur des droites circulaires comprenant le pourcentage de la fréquence de chaque classe. Pour y arriver, nous avons utilisé le logiciel « Rockworks17 » dont le principe consiste à convertir les données insérés (sous format DXF) en direction.

Les linéaments extraits doivent avoir des coordonnées de départ et de fin de chaque ligne.

Le traitement statistique de nos données par la rosace directionnelle nous a permis d'extraire les directions dominantes pour les linéaments extraits automatiquement ou celles extraits manuellement ; en effet, le diagramme de la rosace des linéaments manuels (figure 35, A) montre que la direction dominante dans le causse d'Agourai est NE-SW conforme à la direction hercynienne ; nous constatons aussi la présence des directions N-S et E-W mais de moindre importance. Le diagramme de la rosace directionnelle pour les linéaments extraits automatiquement (figure 35, B) épouse l'allure du diagramme (A) mais pour celui-ci les directions N-S et E-W sont beaucoup importantes.

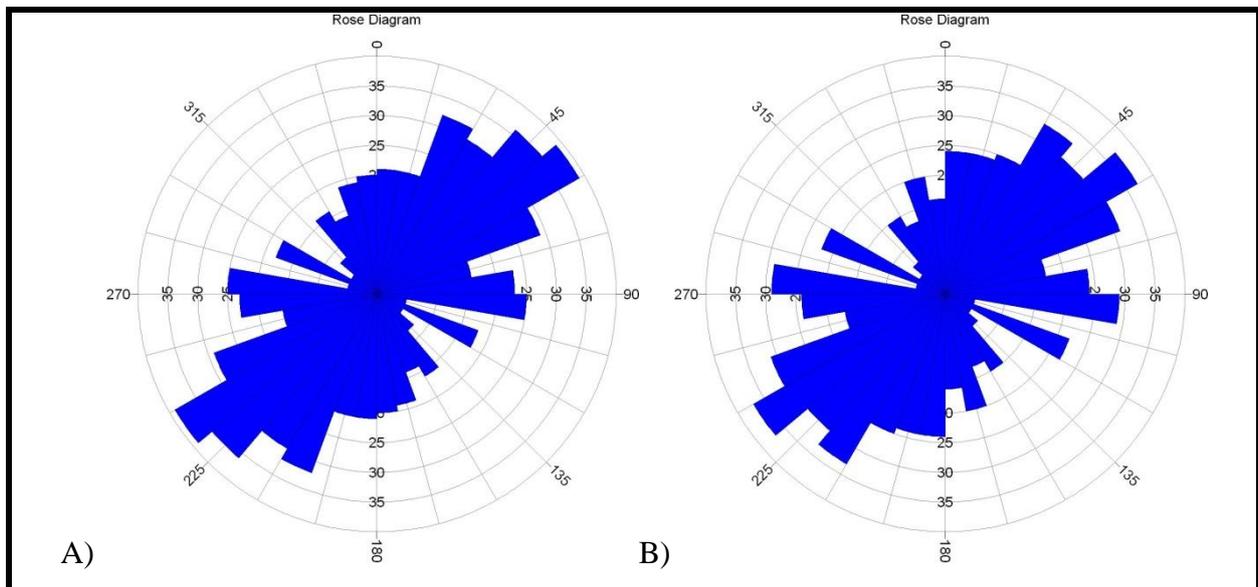


Figure 35 : rosace directionnelle des linéaments extrait dans le causse d'Agourai, A : linéaments extraits manuellement, B : linéaments extraits automatiquement

II.5- Histogramme

L'histogramme est une représentation graphique des données. Il est constitué d'une série de rectangles dont les bases sont égales aux classes et les hauteurs sont proportionnelles aux effectifs de chaque classe. Cette méthode graphique aide à ressortir les effectifs en fonction des classes les plus importantes, ainsi qu'il nous permet de déterminer la classe la plus dominante.

Pour atteindre à ce but nous avons subdivisé les linéaments extraits selon leurs longueurs en sept classes, de 500m à 3500m avec un intervalle de 500m dans chaque classe selon le tableau suivant :

Tableau 9 : classes des linéaments extraits selon la longueur

Classe	Longueur en m	Effectifs
classe 1	0 à 500	33 (13.6%)
classe 2	500 à 1000	160 (66.2%)
classe 3	1000 à 1500	36 (14.9%)
classe 4	1500 à 2000	9 (3.7%)
classe 5	2000 à 2500	1 (0.4%)
classe 6	2500 à 3000	2 (0.8%)
classe 7	3000 à 3500	1 (0.4%)

L'histogramme de la figure ci-dessous nous montre que la classe 2 (de 500 à 1000m) est la plus dominante dans notre zone d'étude avec un pourcentage de 66.2%, suivi de la classe 3 (14.9%) et la classe 1 (13.6%), c'est-à-dire que 94.7% des linéaments extraits sont de 0 à 1500m, alors que les autres classes présentent de faibles valeurs (moins de 6%) signifiant leurs faibles présence.

A la base de ces résultats obtenus nous pouvons dire que les linéaments extraits automatiquement dans notre zone d'étude sont de l'ordre des failles et des fractures locales qui pouvaient être associées aux grands accidents régionaux.

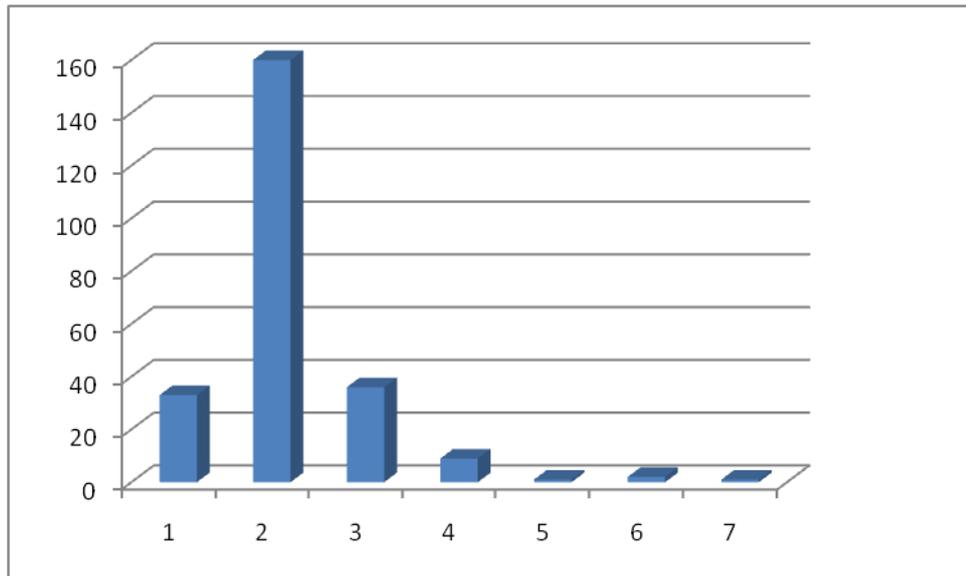
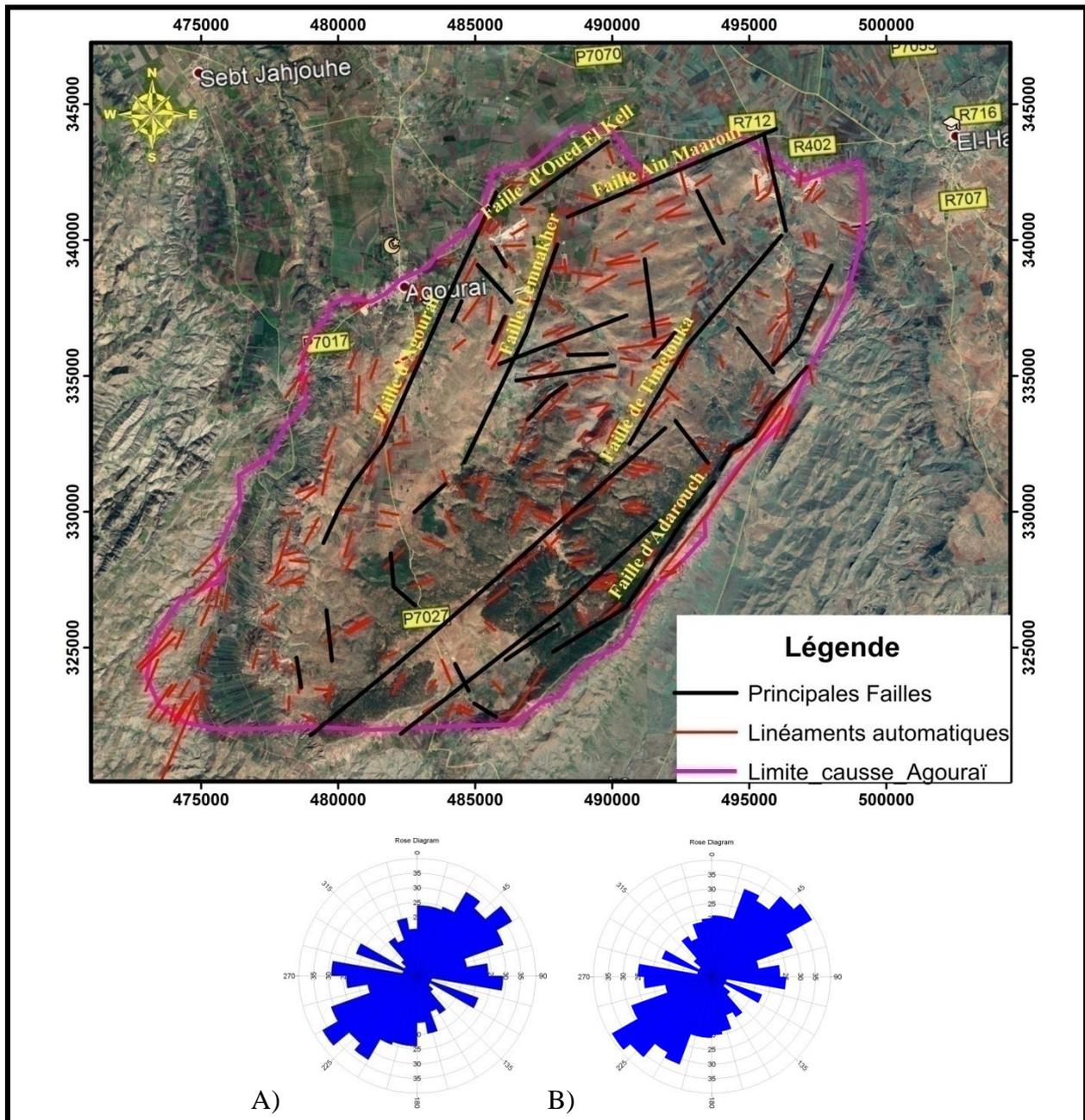


Figure 36 : histogramme montrant les classes des linéaments extraits automatiquement

II.6- Synthèse :

Les images satellitaires type Landsat-7 utilisées dans notre travail sont des images multispectrales couvrant une grande région avec une résolution spatiale assez haute pour différencier les différentes structures. Le traitement de ces images par les logiciels (ENVIE, GEOMATICA et Arcgis) et la classification des linéaments révèlent la présence des grands linéaments correspondant aux failles régionales (faille d'Adarouch, faille de Timlouka, faille d'Agourāi,...) de direction NE-SW conformes à la direction hercynienne.

Un réseau de fracturation est mis en évidence et comprend trois grandes familles, une famille NE-SW (représentée par plus de 55%), une deuxième famille N-S (moins de 25%) et une troisième famille E-W moins abondante (moins de 20%). Ces structures sont concentrées dans la partie centrale et sur les bordures Nord à Nord-Ouest et Sud-Est de la zone d'étude. Cet état structural favorise l'infiltration des précipitations et le drainage des eaux souterraines vers le bassin de Saïss, mais aussi l'intensification des processus karstiques des roches carbonatées et le développement des différentes formes karstiques.



**Figure 37 : carte des linéaments du Causee d'Agourai superposée sur image satellite
 A : linéaments extraits manuellement, B : linéaments extraits automatique**

II.7- Conclusion

Dans cette première partie de ce chapitre nous avons utilisé la télédétection pour l'extraction des linéaments dans notre secteur d'étude. En effet l'extraction manuelle et automatique des linéaments nous a permis de déterminer les directions dominantes dans la zone ; ainsi les directions relevées par les deux méthodes sont identiques avec celles retrouvées dans la carte géologiques, ce qui confirme nos résultats.

Par la suite nous essayerons de comparer ces résultats obtenus avec l'application des autres méthodes, dans un premier temps pour les valider, et dans un deuxième temps pour savoir quelle est la méthode la plus facile à recommander.

III. Analyse de la fracturation au niveau de la source Ain Maarouf

La source Ain Maarouf 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 (Allaoui 2018, El ouardi 2018). L'analyse de la fracturation est réalisée au niveau de la source d'Ain Maarouf, à la limite Ouest du Causse d'Agouraï, et a pour objectif d'abord, de comprendre le fonctionnement de la source et pour valider les résultats obtenus par télédétection.

Le travail est basé sur le relevé de huit stations, choisies d'une manière pour qu'elles soient représentatives, sur la crête calcaire liasique qui surplombe la source. :

- ✓ Sept stations autour de la source ;
- ✓ Une station à l'amont de la source ;

Les mesures réalisées au niveau de la source ont pour objectif de suivre les fractures et les regrouper en familles tout en sachant la famille la plus abondante, notons que la stratification dans cette zone est tabulaire à sub-tabulaire ; ainsi nous présentons les sept stations de mesures au niveau de la source et ensuite la station unique mesurée au niveau de la crête calcaire liasique à l'amont.





Figure 38 : plan de situation des stations de mesure de la fracturation

III.1. Station1

Sur la station 1 nous avons pu de mesurer 73 fractures, avec des directions différentes, les photos 4 et 5 montrent l'importance et l'aspect de cette fracturation.



Photo 4 : aspect de la fracturation mesurée à la surface d'une strate calcaire à Ain Maarouf



Photo 5 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 1 à Ain Maarouf

Le tableau suivant représente les résultats de mesure des directions et parfois des pendages des fractures au niveau de la station 1 :

Tableau 10 : mesures réalisées au niveau de la station 1

Direction, Pendage	Direc., Pend.				
N95	N88	N53	N173	N145	N130
N95	N70	N80	N177	N60, 40NW	N131
N93	N171	N70	N161	N55, 50NW	N160
N140	N169	N55, 70NW	N178	N60	N155
N135	N164	N53	N170	N20	N180
N140	N140	N115, 70SW	N156	N41	N100, 35N
N165	N142	N65, 80NW	N150	N45	N95
N155	N40	N165	N156	N30	N98
N90	N120	N148	N168	N26	N113
N102	N139	N157	N150	N45	N19
N140	N110	N150	N05	N155, 70SW	N150
N56, 75SW	N62, 55SW	N55, 70SE	N60	N68	N75

					N145, 65NE
--	--	--	--	--	------------

Le traitement des données de direction par le programme Georose version 0.5.1, nous a permis d'obtenir la rosace directionnelle de la figure 39, celle-ci permet d'identifier les directions dominantes des différentes familles ainsi que la densité des fractures.

Au niveau de cette station nous constatons une dominance de la direction secondaire NW-SE qui recoupe la direction principale des failles et structures régionales, suivi de la direction NE-SW moins abondante, puis la présence peu abondante d'une direction E-W, par contre la direction N-S est absente dans cette station.

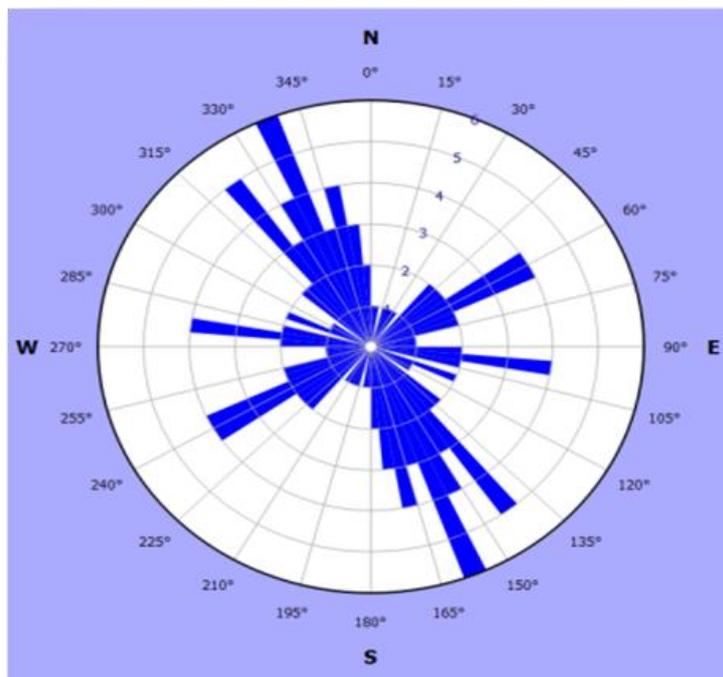


Figure 39 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 1 à Ain Maarouf

III.2. Station 2

Les mesures au niveau de la station 2 sont effectuées sur une superficie plus grande que celle de la station 1, ainsi 81 mesures ont été prises avec des directions différentes, les photos 6 et 7 montrent l'aspect de la fracturation au niveau de cette station.



Photo 6 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 2 à Ain Maarouf



Photo 7 : représentation de la fracturation mesurée dans la station 2 à Ain Maarouf

Dans cette station, nous avons enregistré les mêmes familles de fractures qu'au niveau de la station 1, à savoir les directions NW-SE, NE-SW et E-W. Nous signalons que l'abondance des fractures est presque la même qu'au niveau de la station 1. Les fractures présentent latéralement des ouvertures et des fermetures et se terminent parfois en fractures en échelons. Le tableau suivant présente les mesures prises dans cette station avec leurs directions :

Tableau 11 : mesures réalisées au niveau de la station 2

Direction, Pendage	Direc., Pend.				
N80, 50N	N145	N140	N67	N120	N31
N165	N130, 65SW	N143	N87	N95	N13
N58	N150	N70	N145	N90	N30
N57	N130	N60	N150	N115	N20
N45	N170	N63, 80S	N107	N120	N32
N36	N158	N60	N145	N109	N30
N90, 45N	N155	N73	N55	N138	N35
N92	N102	N55	N125	N124	N165
N115	N135	N59	N105	N117	N170
N130	N141	N66	N124	N128	N164
N110	N109	N95	N107	N120	N65
N90, 70S	N120	N115	N110	N165	N40
N162	N125	N124	N146	N60	N50
N45	N100, 72N	N85			

Le traitement de ces mesures sur le logiciel nous a permis d'obtenir la rosace directionnelle de la figure suivante :

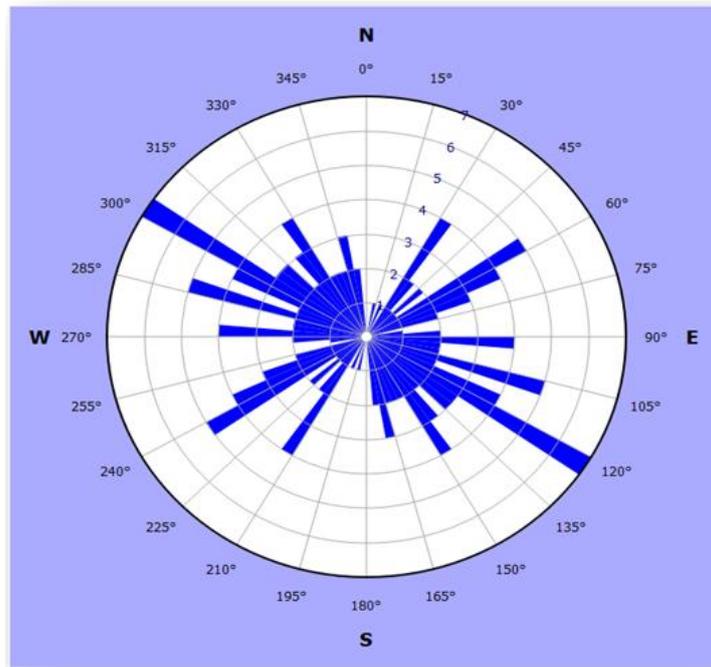


Figure 40 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 2

Dans cette station, les fractures mesurées s'agencent en trois familles principales orientées NW-SE, NE-SW et E-W.

III.3. Station 3

La station 3 occupe une petite surface et comporte 62 mesures avec des directions différentes (photo 8).



Photo 8: représentation de la fracturation mesurée dans la station 3

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 NW-SE et E-W, recoupent la famille orientée NE-SW.

Tableau 12 : mesures réalisé au niveau de la station 3

Direction, Pendage	Direc., Pend.				
N65	N55	N134	N60	N152	N116
N62	N45	N138	N65	N144	N109, 70NNE
N93	N42	N140	N66	N139	N95
N90	N50	N125	N55	N115	N93
N83	N55	N141	N56	N139	N140
N80	N60, 55NNW	N70	N63	N125	N130
N50	N61	N72	N59	N122	N110
N60, 55NNW	N90	N50	N97	N130	N110
N50	N130	N47	N145	N35	N112
N33	N135	N75	N157	N110	N80
N111	N95				

Le traitement de ces mesures s nous a permis d'obtenir la rosace suivante :

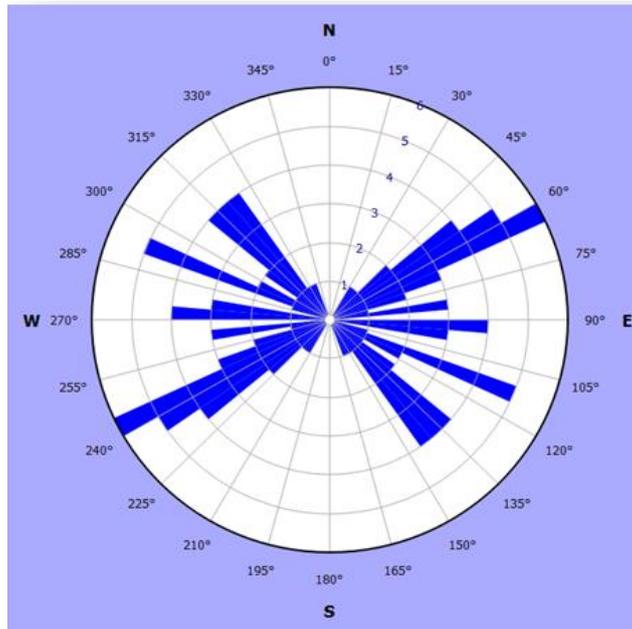


Figure 41 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 3

Sur la station 3, nous avons noté la présence de trois directions principales orientées NW-SE, NE-SW et E-W, avec une abondance de la direction des failles régionales NE-SW ; nous signalons par ailleurs l'absence de la direction N-S.

III.4. Station 4

La station 4 située en aval de la source présente une fracturation intense dans les différentes directions (photos 9 et 10).

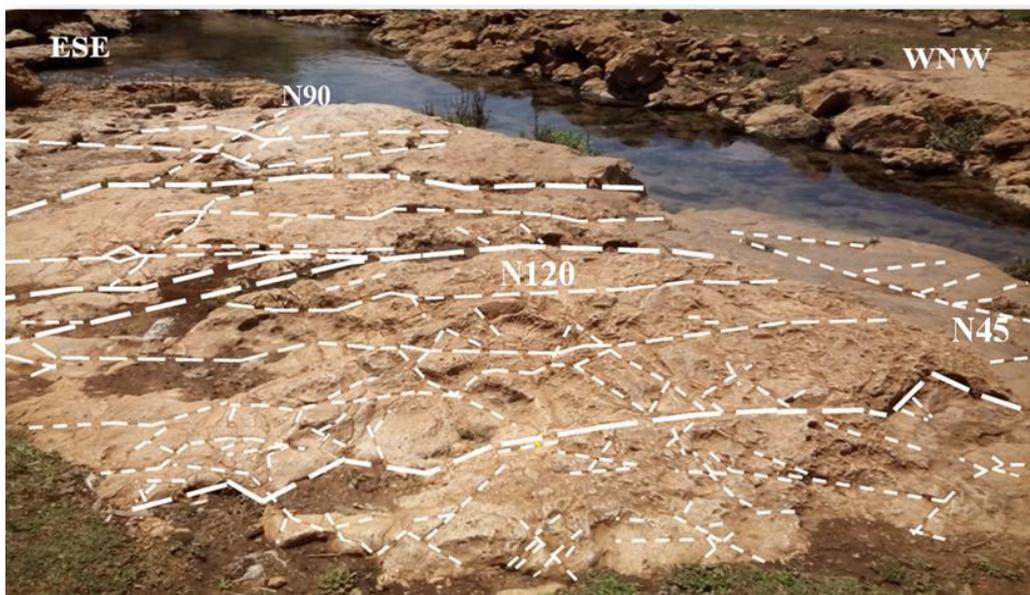


Photo 9: représentation de la fracturation mesurée dans la station 4

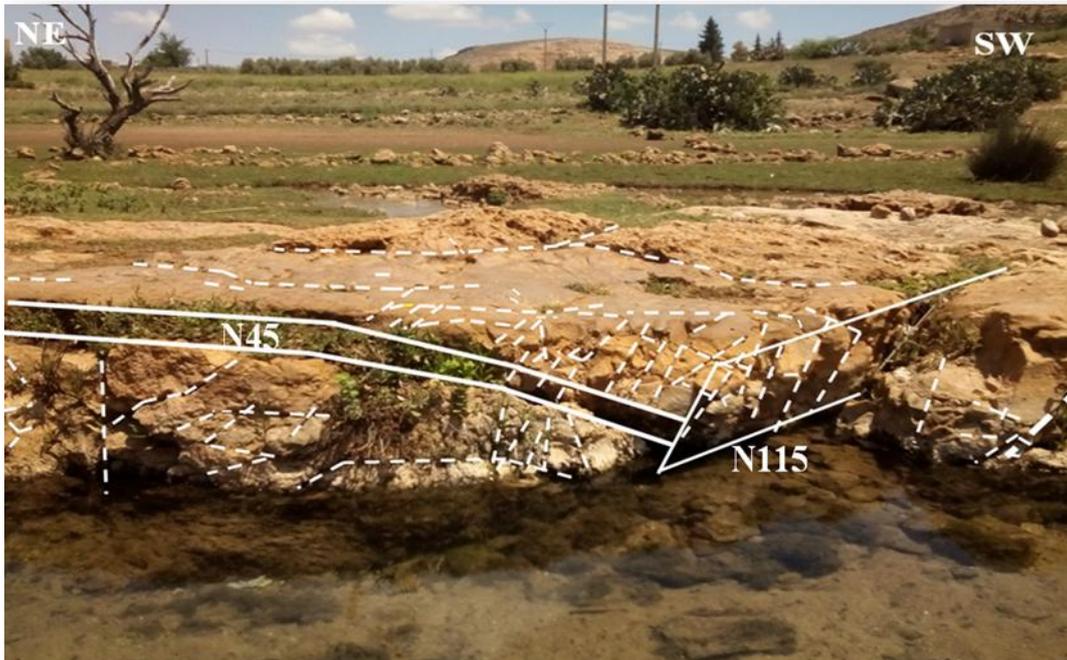


Photo 10: représentation de la fracturation mesurée dans la station 4

Dans cette station, nous avons pu déterminer 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 différentes mesures sont présentées au tableau suivant :

Tableau 13 : mesures réalisées au niveau de la station 4

Direction, Pendage	Direc., Pend.				
N35	N17	N0	N0	N126	N7
N30	N55	N30	N12	N155	N22
N34	N41	N25	N35	N125	N23
N21	N35	N25	N120	N120	N170
N0	N30	N16	N115	N111	N05
N55	N14	N57	N110	N110	N21
N62	N35	N63	N121	N119	N65
N52	N45	N30	N127	N0	N74
N17	N20	N27	N111	N03	N59

N05	N18	N11	N129	N20	N94
N110	N125	N116	N95	N102	N106
N175	N115, 50NNE	N70	N83	N115	N120
N92	N166	N80	N160	N85	N170
N70	N156	N79	N164	N72	N150
N70	N130	N75	N135	N88	N15
N165	N05	N112	N113	N121	N40

Le traitement des mesures de cette station donne la rosace directionnelle suivante :

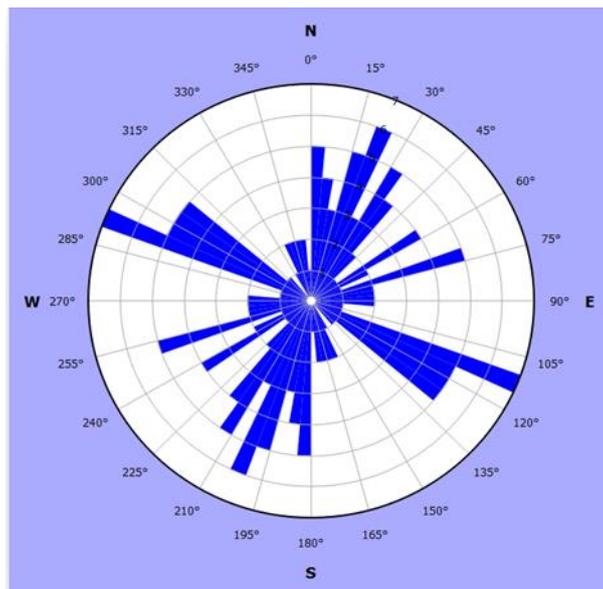


Figure 42 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 4

En plus des trois directions de fractures déterminées dans les stations précédentes, cette station est caractérisée par la présence de la direction N-S avec une intensité assez importante.

III.5. Station 5

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.

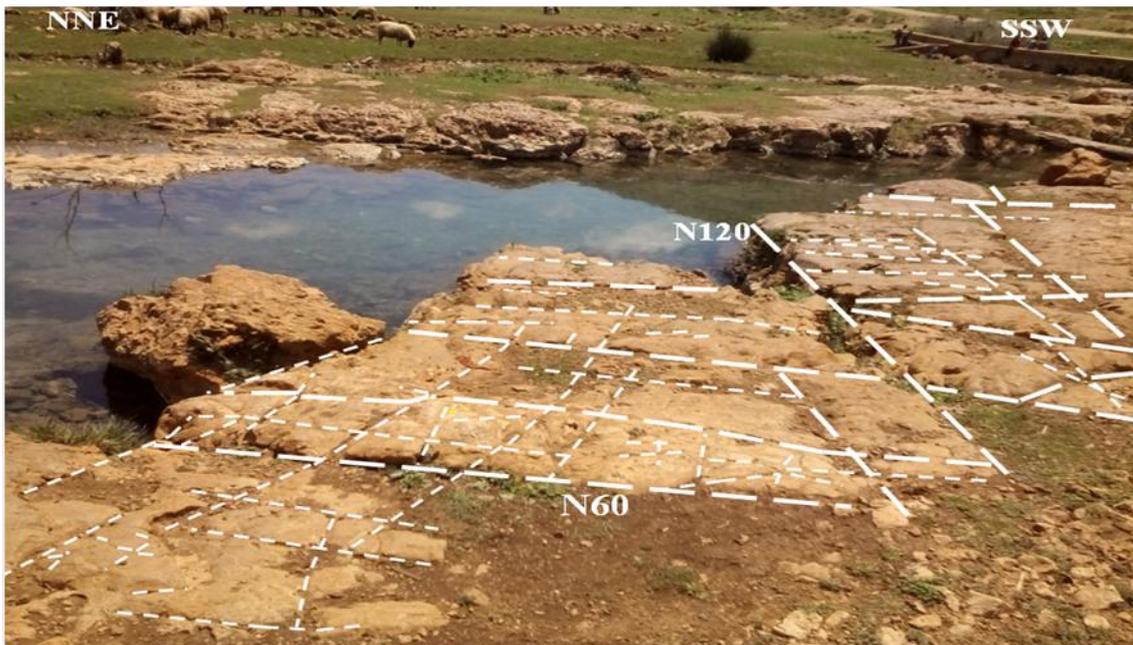


Photo 11: représentation de la fracturation mesurée dans la station 5

Au niveau de cette station nous avons pu relever 103 fractures de différentes directions selon le tableau suivant :

Tableau 14 : mesures réalisées au niveau de la station 5

Direction, Pendage	Direc., Pend.				
N90	N165	N165	N145	N45	N120
N85	N75, 80NNW	N140	N130	N55	N113
N84	N100, 80NNW	N10	N60	N40	N119
N91	N100	N40	N70	N43	N111
N94	N105	N45	N57	N45	N77
N120	N104	N175	N20	N120, 80NE	N93
N121	N101	N150	N21	N120	N121
N114	N105	N121, 50NNE	N45	N122	N130
N165	N95	N130	N125	N100	N140
N164	N35	N134	N126	N122	N30
N150	N40	N140	N135	N117	N30

N165	N39	N150	N137	N96	N40
N164	N115	N125	N135	N75, 50NW	N31
N163	N110	N27	N140	N37, 30NW	
N151	N161	N175	N40	N20, 50E	
N135	N125, 60NE	N125	N127	N125	
N124	N131	N137	N136	N70	
N125	N90	N130	N20	N34	

La rosace directionnelle est donnée à la figure suivante :

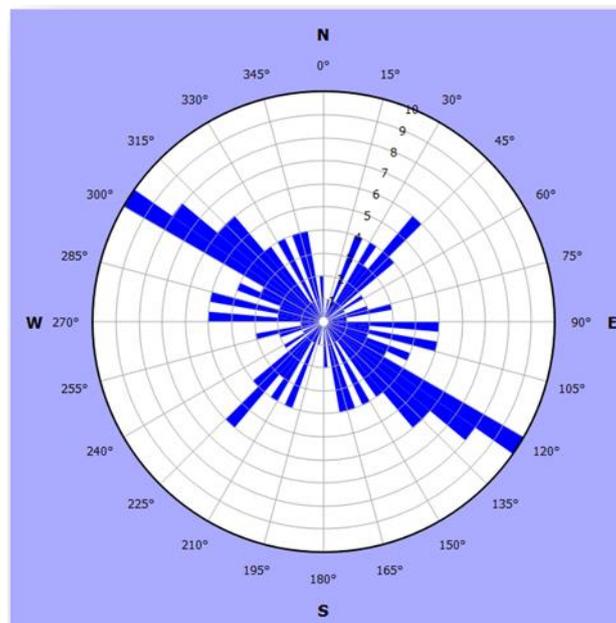


Figure 43 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 5

Sur cette station les différentes directions ont été déterminées, il s'agit des directions NW-SE, NE-SW, E-W et N-S avec des fréquences variables. La famille des fractures orientées NW-SE est la plus dominante.

III.6. Station 6

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.



Photo 12: représentation de la fracturation mesurée dans la station 6

57 fractures dans la station 6 ont été mesurées avec les directions principales à dominance de la NW-SE :

Tableau 15 : mesures réalisées au niveau de la station 6

Direction, Pendage	Direc., Pend.				
N50	N130	N160	N40	N135	N118
N30	N140	N161	N50	N125, 80NE	N40
N25	N20	N170	N45	N132	N45
N37	N25	N70	N50	N131	N36
N40	N35	N30	N120	N135	N53, 55SE
N63	N144	N52	N130	N123	N55, 50SE
N03	N145	N47	N125	N121	N98
N03	N139	N37	N115	N130, 65SW	
N75	N122, 60NE	N31	N130	N125	
N120	N130, 55NE	N36	N131	N120	

Le traitement de ces fractures par le logiciel nous permet d'obtenir la rosace directionnelle suivante :

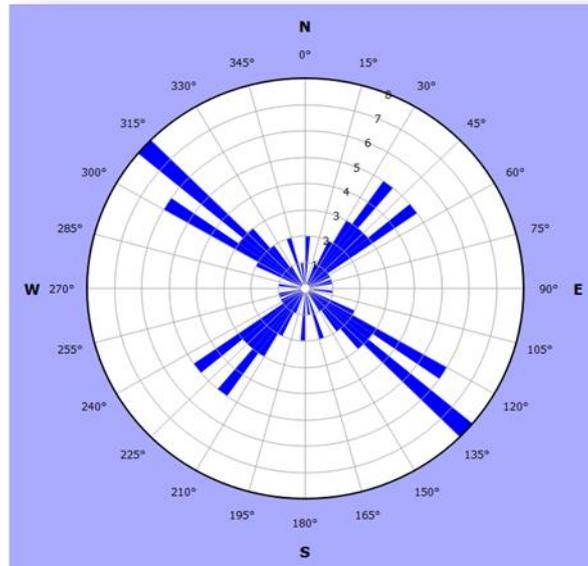


Figure 44 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 6

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, la direction E-W est absente dans cet endroit.

III.7. Station 7

Dans cette station, nous avons pu mesurer la stratification et le pendage exactement au niveau de la principale résurgence d'eau à Ain Maarouf (N25, 22SE). Les fractures observées dans cette station sont bien visibles et s'agencent en deux familles orientées NW-SE et NE-SW.

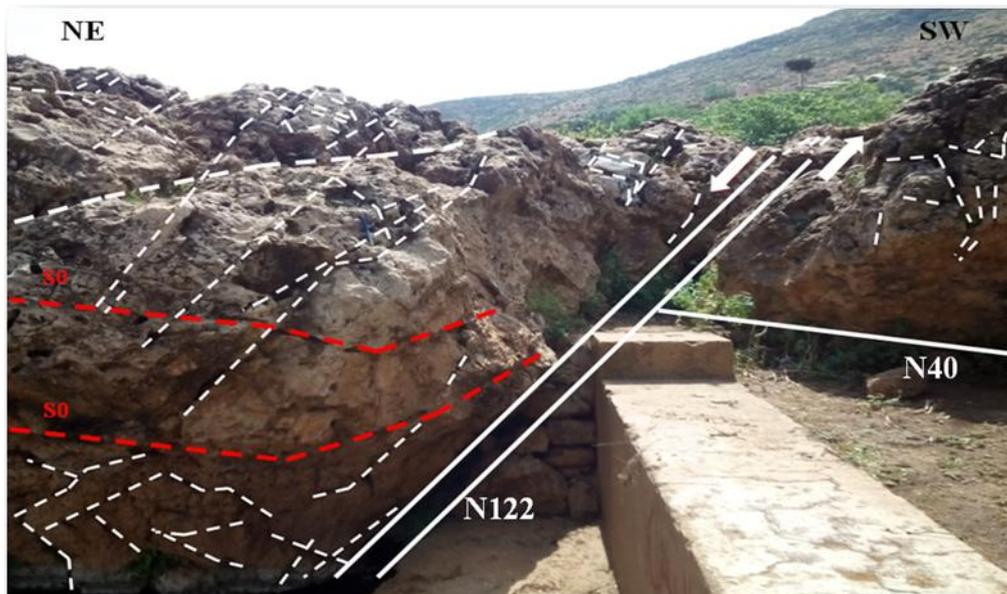


Photo 13: représentation de la fracturation mesurée dans la station 7

Les différentes mesures de la fracturation sont présentées au tableau suivant :

Tableau 16 : mesures réalisées au niveau de la station 7

Direction, Pendage	Direc., Pend.				
N122, 70NE	N175, 70W	N145	N86, 50N	N20	N95
N40, 55SE	N42	N77	N30	N90	N120
N120, 75NE	N70	N74	N138	N0	N106
N110	N52	N165	N25 5cm	N40	N135
N112	N56	N154	N130	N48	N30
N104	N0, 57W	N140	N80 7cm	N55	N90
N93, 60NE	N125, 55NE	N115	N130	N120 3cm	N75
N124	N145	N118	N40	N104	N100
N126	N150, 70SW	N130	N135	N50	N65, 50SE
N55, 35SE	N130	N130	N43	N130	

Les fractures permettent de donner la rosace directionnelle suivante :

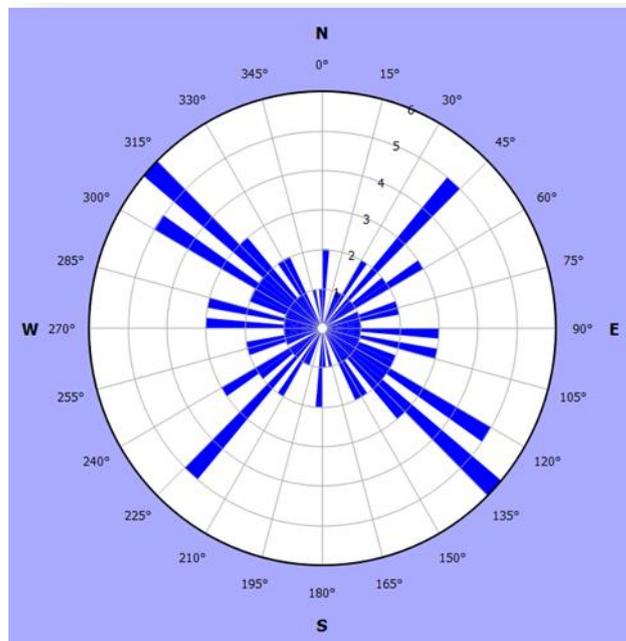


Figure 45 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 7

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

Sur cette station située au niveau de la source proprement dite nous pouvons expliquer le fonctionnement de la dite source, en effet, l'eau jaillit à l'intersection de la fracture principale orientée N122, 70NE et celle orientée N40, 50SE. Selon le schéma suivant, il s'agit de deux failles normales à jeu métrique, dont la principale est à l'origine de l'effondrement du compartiment NE en direction du bassin de Saïss.

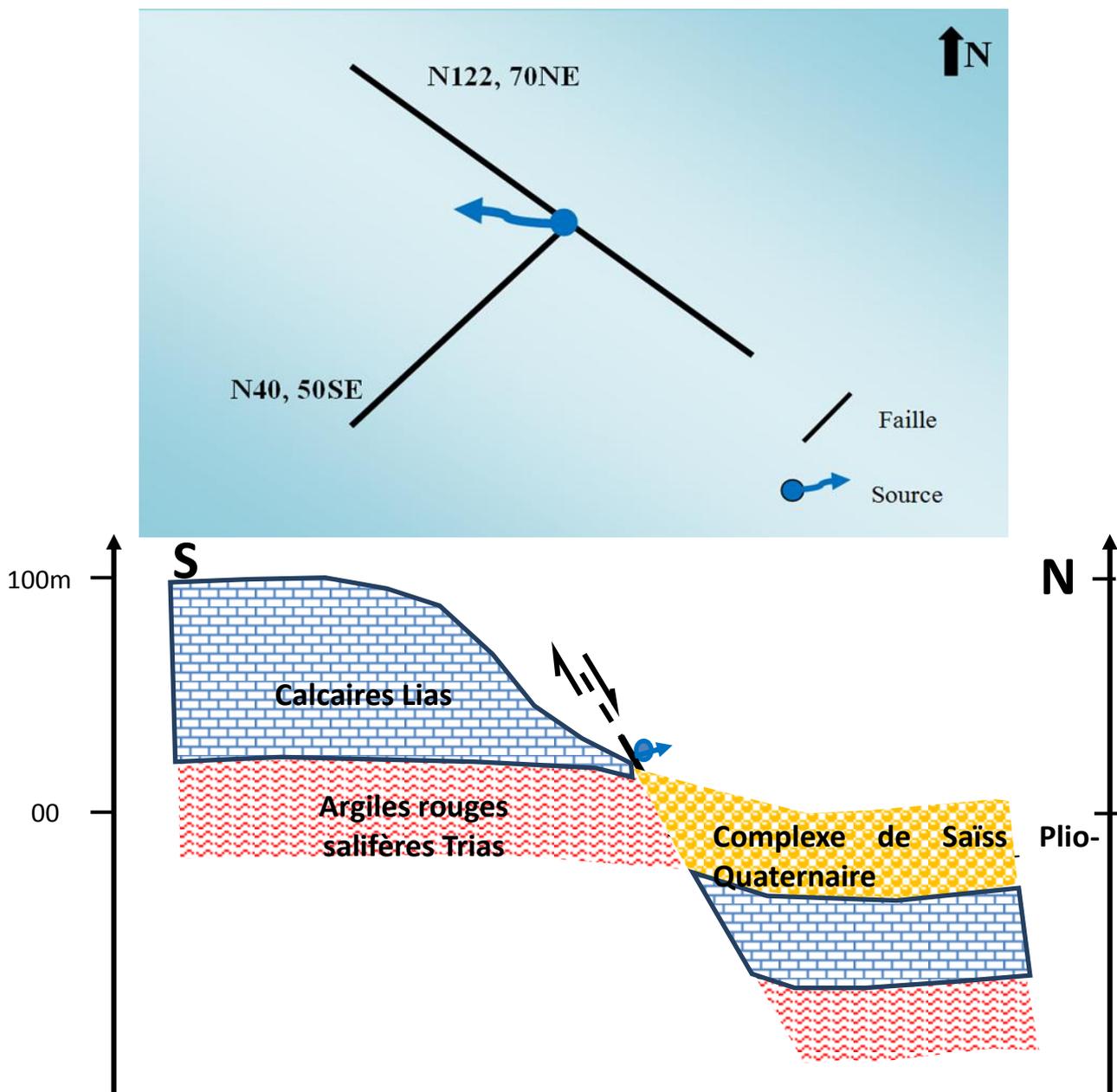


Figure 46 : schéma représentatif expliquant la résurgence d'Ain Maarouf, localisée à l'intersection de deux failles normales orientées N40 et N122.

III.8. Station 8

Cette station est située à l'amont de la source, la stratification est de direction N25 et de pendage variant entre 15 et 20° vers le Nord (en direction du bassin de Saïss). Le but de cette station est d'analyser la fracturation dans les calcaires liasiques à l'amont, loin de la source, pour étudier la fracturation régionale loin du périmètre de la résurgence.

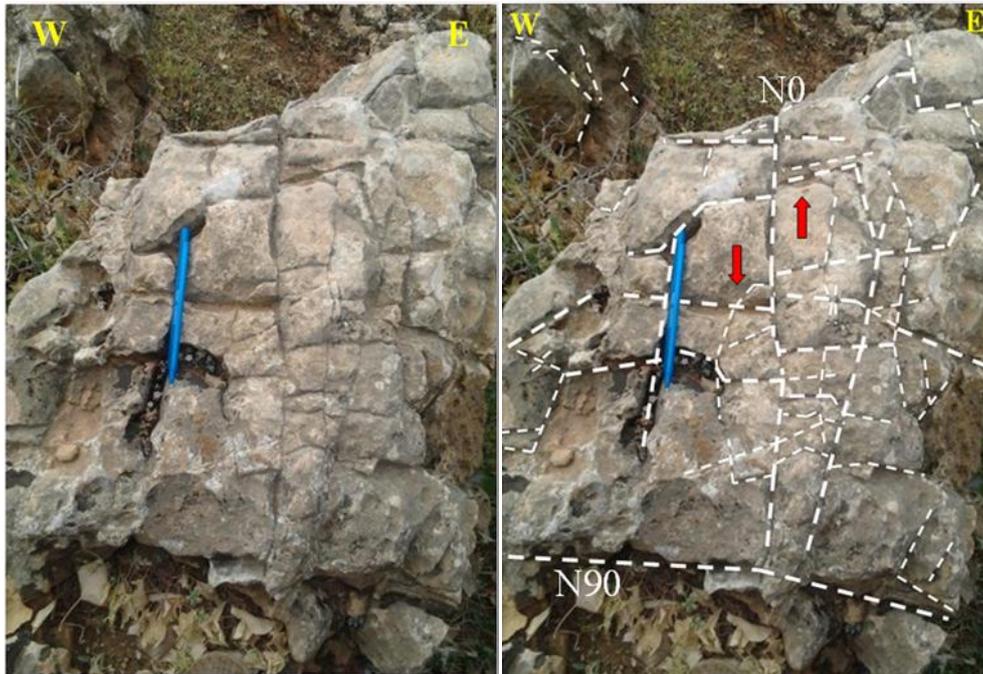


Photo 14: représentation de la fracturation mesurée dans la station 8 à l'amont de la source Ain Maarouf

Dans cette station, nous avons noté la présence de deux familles de fractures orientées E-W et N-S, découpant la roche calcaire en morceaux losangiques. Il faut noter que les fractures orientées N-S décalent en senestre celles orientées E-W, elles sont donc postérieures.

L'ensemble de ces fractures mesurées est donné au tableau suivant :

Tableau 17 : mesures réalisées au niveau de la station 8

Direc., Pend.	Direc., Pend.	Direc., Pend.
N105	N97	N0
N85	N170	N05
N81	N100	N02
N92	N102	N0

Le traitement des données a permis d'aboutir à la rosace directionnelle de la figure 47. Dans cette station, bien que le nombre de fractures mesurées ne soit pas trop élevé, nous sommes arrivés à déterminer deux grandes familles de fractures, une orientée N-S plus dominante et une autre orientée E-W qui l'est moins.

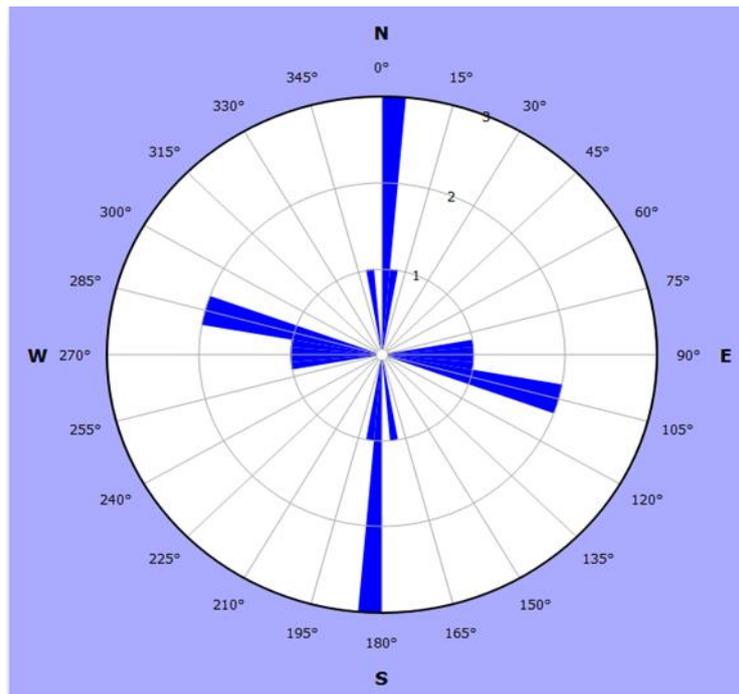


Figure 47 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 8 à Ain Maarouf

III.9. Synthèse

L'ensemble des mesures recueillies au niveau de la source d'Ain Maarouf, traitées séparément de la station 1 à la station 8, ont été regroupées et traitées dans le même diagramme. Une seule rosace directionnelle a pu déterminer la famille dominante au niveau de la source, et que nous pouvons généraliser dans la région.

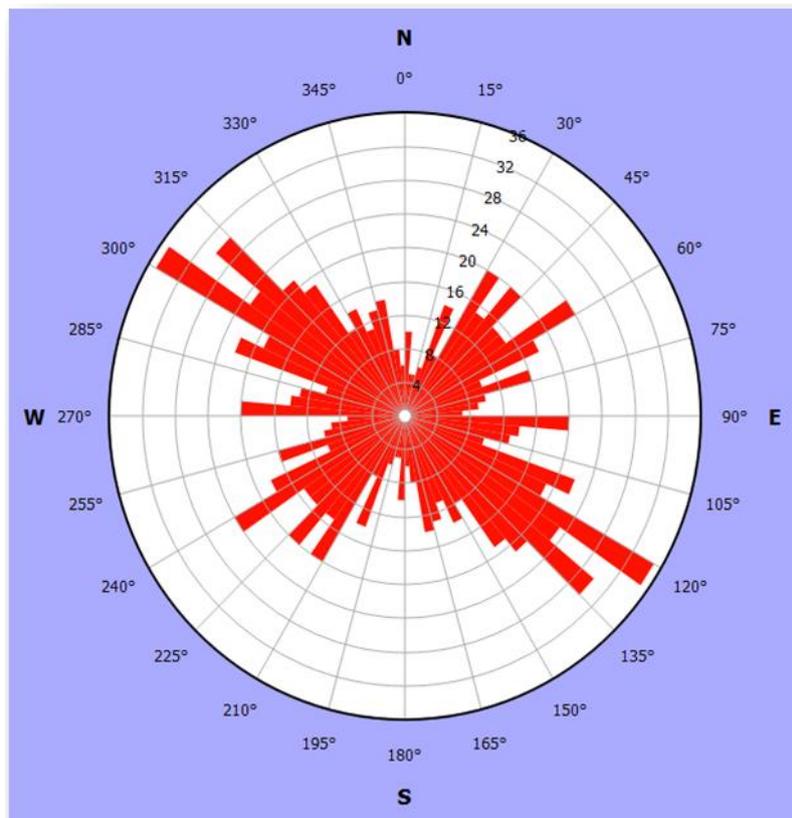


Figure 48 : rosace directionnelle générale des fractures mesurées dans les différentes stations au pourtour de la source Ain Maarouf

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, suivi par la direction NE-SW. Les fractures NW-SE sont à l'origine de la résurgence de la source d'Ain Maarouf et constituent ainsi des axes de drainage régional de la nappe depuis le causse vers le bassin.

IV. Analyse de la fracturation au niveau de la source Bouchermou

La mesure de la fracturation a nécessité une prospection des affleurements dans le pourtour de la source Bouchermou. La situation de la source d'eau le long de la route secondaire délimitant à l'Ouest les calcaires liasiens et à l'Est les argiles rouges du Trias, nous a imposé le choix des stations à l'amont de la source.

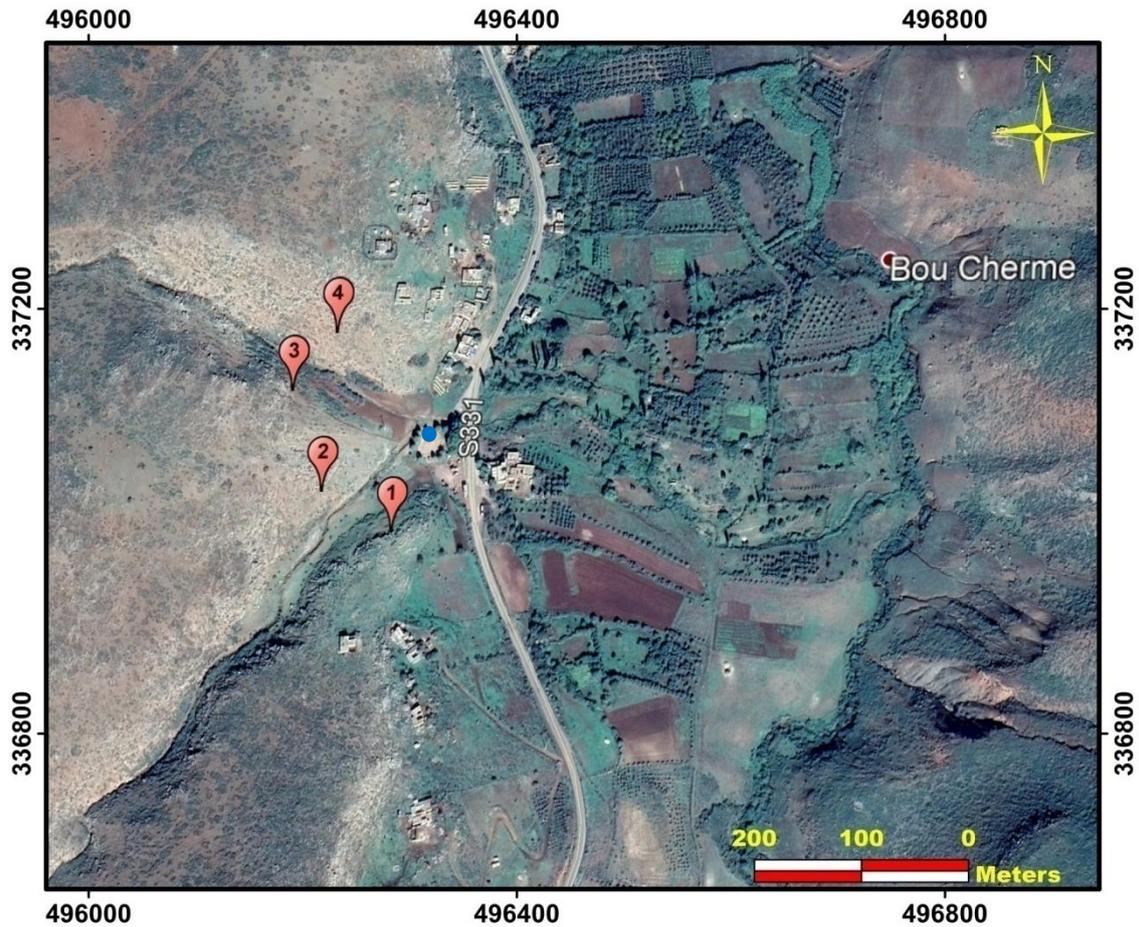


Figure 49 : localisation des stations mesurées dans le secteur de Bouchermou

Pour chaque station, nous avons relevé la direction et parfois le pendage des fractures, afin de relever les rosaces directionnelles et déterminer les familles dominantes. Ainsi quatre stations ont été choisies d'une manière pour qu'elle soit représentative.

IV.1. Station 1

Au niveau de cette station nous avons réalisé 30 mesures sur les différentes fractures, les directions sont présentées selon le tableau suivant.



Photo 15: représentation de la fracturation mesurée dans la station 1

Tableau 18 : : mesures réalisées au niveau de la station 1

Direction, Pendage	Direc., Pend.	Direc., Pend.
N55	N147	N63
N158	N165	N10, 76 W
N85	N110	N126
N46	N115, 70 NE	N84
N55	N46	N148
N160, 74 E	N163	N120
N175, 85 W	N108	N125, 75 SW
N90, 84 N	N42	N150, 85 W
N148	N75	N145
N112	N128, 78 NE	N120, 64 SW

La rosace directionnelle de cette station montre que la fracturation est subdivisée en deux familles principales de directions : NW-SE et NE-SW, avec une dominance de la famille NW-SE.

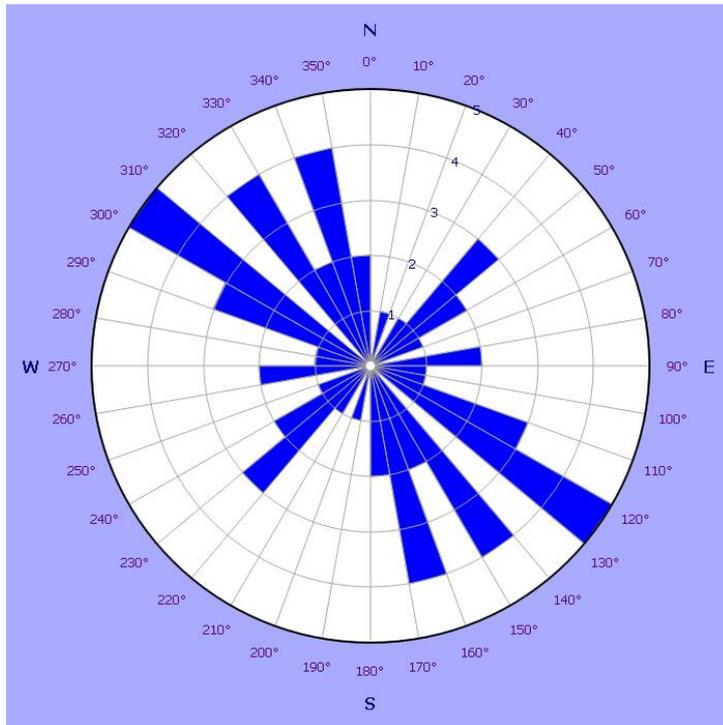


Figure 50 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 1 à Ain Bouchermou

IV.2. Station 2

Dans la station 2 nous avons effectué aussi 30 mesures sur les fractures existantes, les directions de ces fractures sont présentées sur le tableau 19.



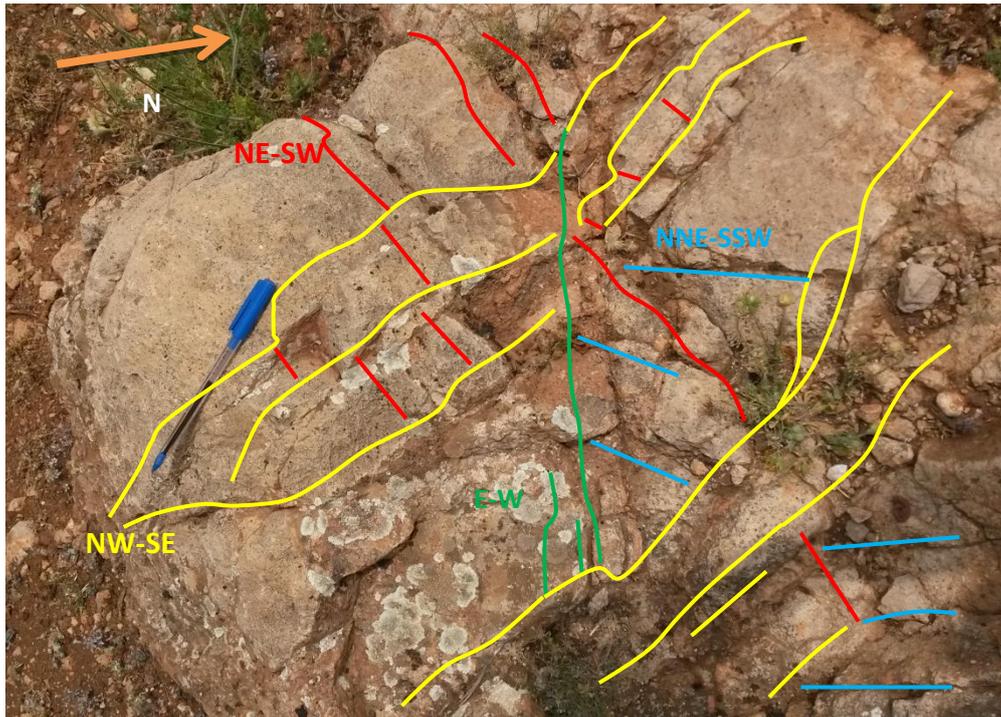


Photo 16: représentation de la fracturation mesurée dans la station 2

Tableau 19 : mesures réalisées au niveau de la station 2

Direction, Pendage	Direc., Pend.	Direc., Pend.
N20	N76	N160
N25, 65 NE	N90, 80 S	N134, 58 SW
N130	N66, 45 S	N110, 78 S
N122, 82 SW	N120	N36
N56, 80 SE	N60, 65 NW	N10
N54	N150, 80 NE	N12, 82 W
N146	N98	N82
N163, 70 E	N170	N169, 75 E
N158, 70 E	N141	N150
N170, 80 E	N81	N74

La rosace de cette station montre trois familles principales de fractures de directions : NNW-SSE ; NNE-SSW et E-W, avec une dominance des deux familles de directions NNW-SSE et NNE-SSW.

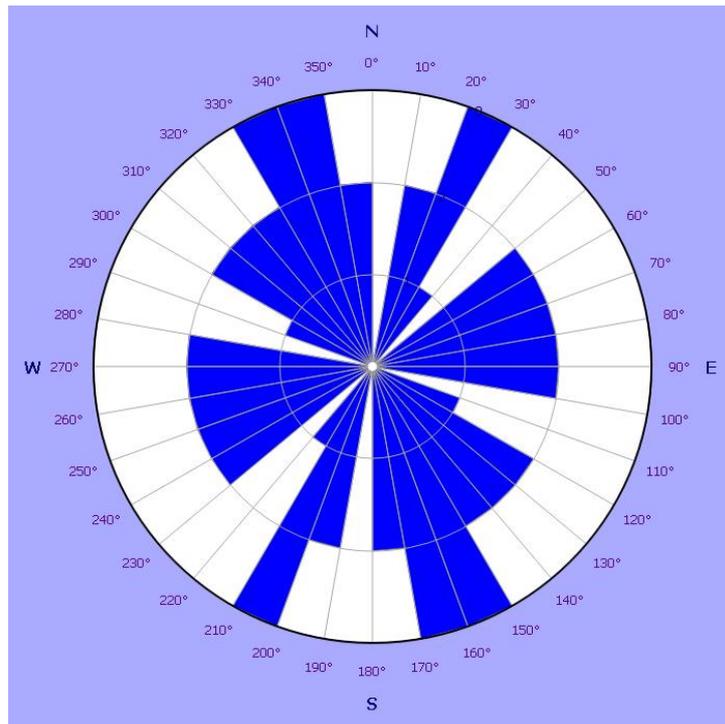


Figure 51 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 2 à Ain Bouchermou

IV.3. Station 3

La station 3 est caractérisée par la réalisation de 40 mesures selon le tableau 11.

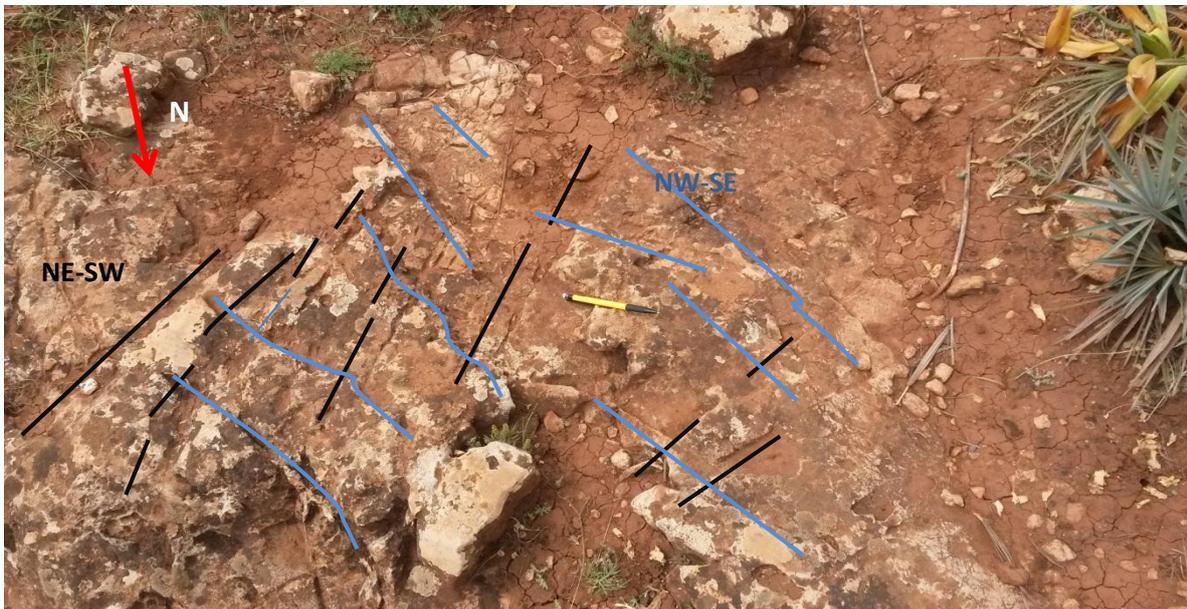


Photo 17: représentation de la fracturation mesurée dans la station 3

Tableau 20 : mesures réalisées au niveau de la station 3

Direction, Pendage	Direc., Pend.	Direc., Pend.	Direc., Pend.
N35	N26	N127	N31

N15	N19	N43	N157
N130	N30	N37	N155
N40	N30	N136	N102
N136	N50	N41	N47
N33	N96	N119	N173
N46	N90	N85	N58
N105	N68 ,83 SE	N41	N175
N100, 80 N	N122	N70	N120
N52	N144	N140	N31

La rosace directionnelle montre quatre familles des fractures avec des directions, NE-SW ; NW-SE ; E-W et N-S, avec la dominance de la famille NE-SW.

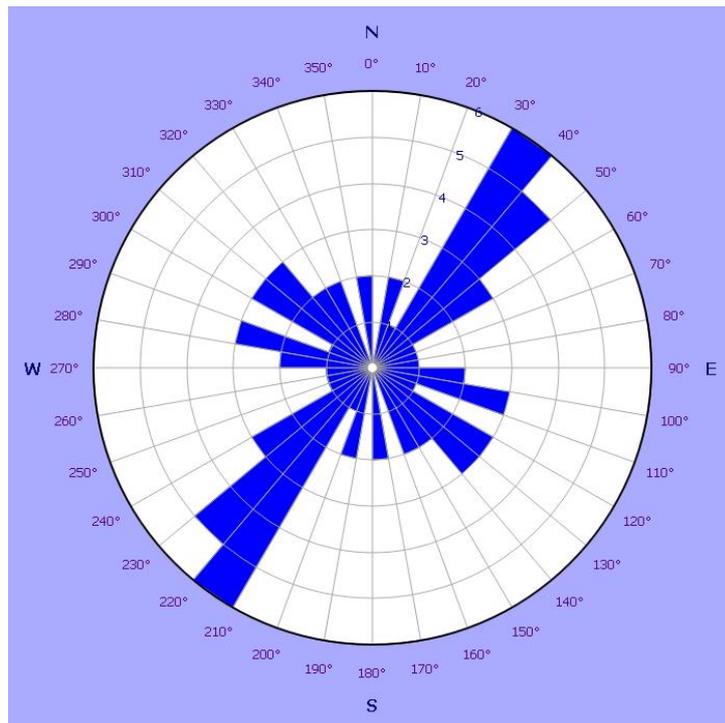


Figure 52 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 3 à Ain Bouchermou

IV.4. Station 4

Au niveau de la station 4 nous avons pu relever 55 mesures de fractures selon le tableau ci-dessous.

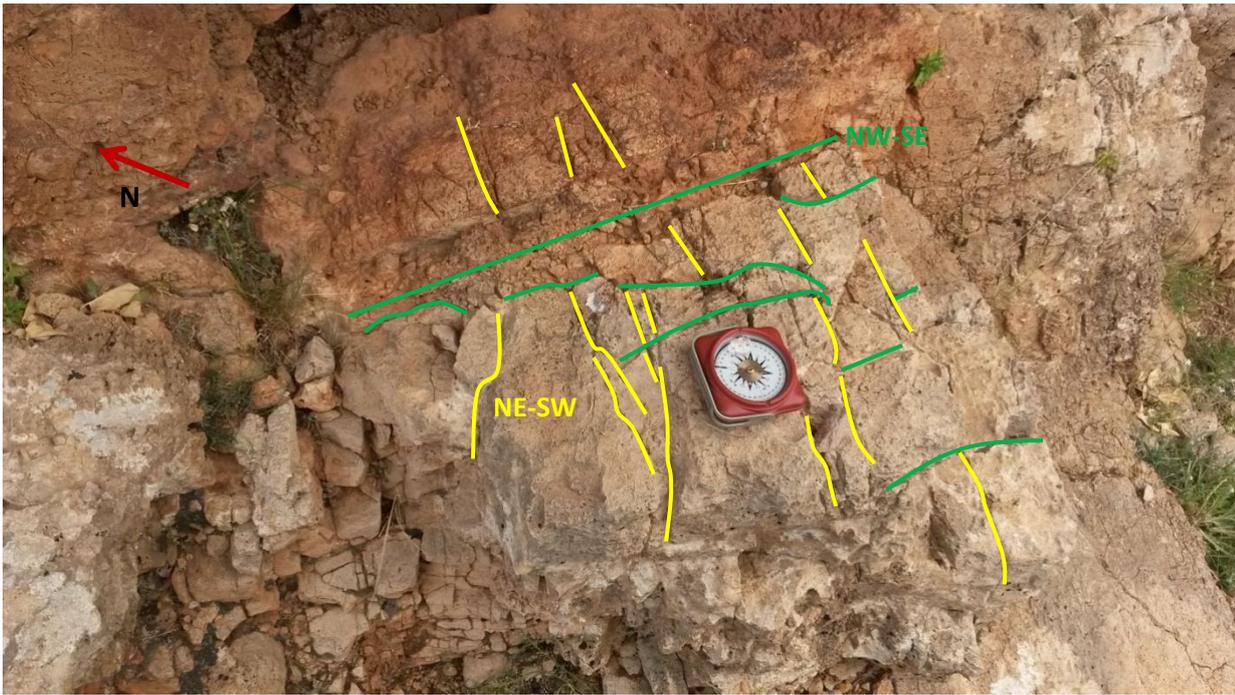


Photo 18: représentation de la fracturation mesurée dans la station 4

Tableau 21 : mesures réalisées au niveau de la station 4

Direction, Pendage	Direc., Pend.	Direc., Pend.	Direc., Pend.	Direc., Pend.
N49, 80 S	N75	N140	N135	N150, 45 W
N40	N160	N175, 75 W	N81, 65 N	N160, 35 E
N54	N70	N165	N63	N31
N59	N164, 75 W	N60	N153	N95
N150	N75	N75	N20	N40, 50 NW
N139	N130	N30	N153	N77
N70	N170	N113	N150	N50
N62	N95, 60 S	N145	N95	N20
N130, 55 SW	N106, 52 SW	N155	N15, 60 W	N115, 70 NE
N55, 65 S	N26	N170, 70 W	N60	N30
N50	N147	N175	N73	N140, 70 NE

La rosace directionnelle montre deux principales familles de directions ENE-WSW et NW-SE, avec la dominance de la famille ENE-WSW.

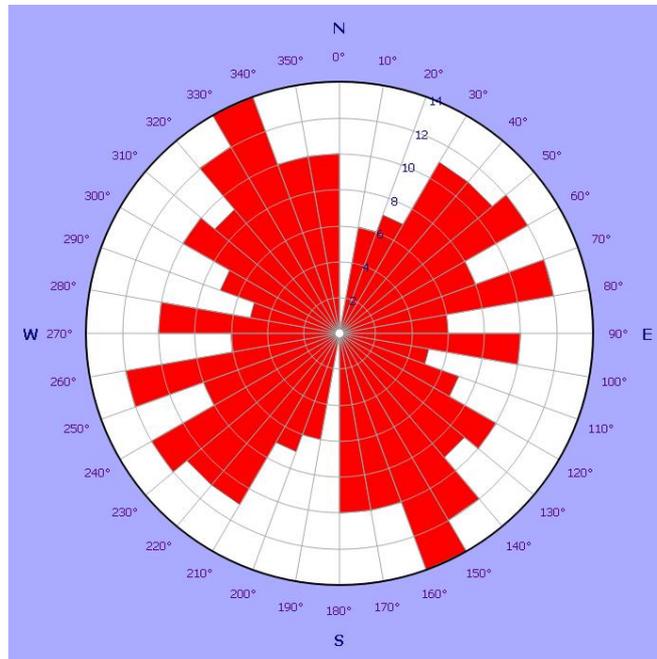


Figure 54 : rosace directionnelle générale des fractures mesurées dans les différentes stations au pourtour de la source Ain Bouchermou

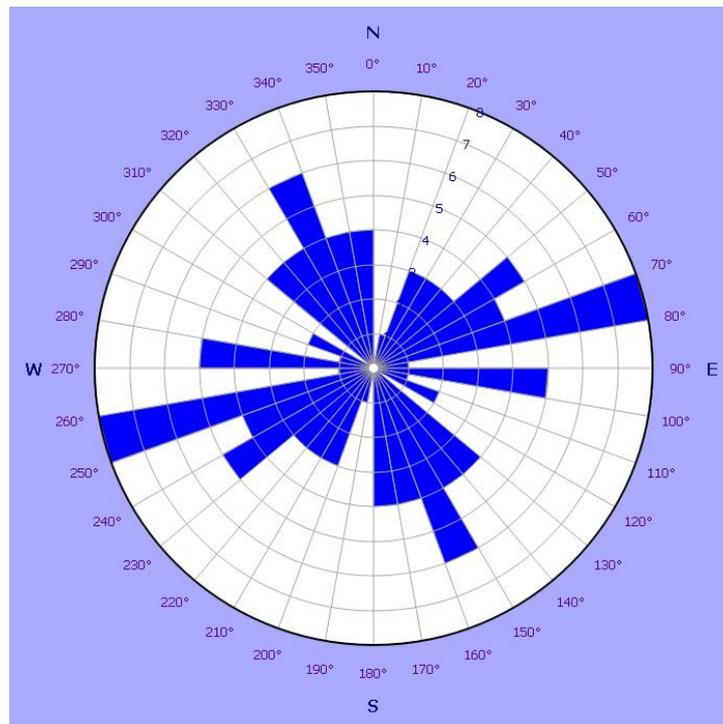


Figure 53 : rosace directionnelle des fractures mesurées dans la station 4 à Ain Bouchermou

IV.5. Synthèse

Partant du principe considérant que les quatre stations analysées séparément peuvent constituer une seule station représentant la zone de Bouchermou, nous avons construit la rosace directionnelle englobant l'ensemble des mesures des quatre stations.

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

Ainsi à partir de la rosace générale de la fracturation dans la zone de Bouchermou, les principales familles sont de directions NW-SE, NE-SW, E-W et N-S, avec la famille la plus dominante qui est celle de direction NW-SE. La comparaison de ces résultats obtenus dans la zone de Bouchermou avec ceux obtenus dans la source d'Ain Maarouf, nous a permis d'identifier la famille la plus dominante qui est la NW-SE, et qui semble être conforme avec la direction majeure régionale.

V. Conclusion

L'analyse des différentes stations microtectoniques mesurées dans le périmètre de la source d'Ain Maarouf et la source de Bouchermou, le long de la bordure Nord du causse d'Agourai, nous a permis d'établir la hiérarchie du réseau de fractures.

Quatre familles directionnelles ont été déterminées, les familles NW-SE et NE-SW qui sont les plus dominantes, et les familles E-W et N-S qui sont secondaires. Les fractures NW-SE sont responsables de la résurgence d'eau au niveau de la source d'Ain Maarouf. De plus nous pouvons dire que les résultats obtenus dans ce chapitre confirment nos résultats obtenus dans le chapitre consacré au dégagement des linéaments par télédétection. Il est à signaler ici qu'on n'a pas pris en considération la longueur des fractures.

Chapitre 2 : REINTERPRETATION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES ET CARACTERISATION GEOPHYSIQUE

I. Réinterprétation des données aéromagnétiques du Causse d'Agouraï

I.1. Introduction

L'utilisation des données aéromagnétiques est reconnue surtout dans le secteur minier que ça soit pour la détection des concentrations métallifères, ou pour l'étude structurale (failles et fractures) et la cartographie géologique à l'échelle régionale (domaines magnétiques et unités lithomagnétiques).

Des études réalisées dans la région d'Agouraï, ont utilisé les données aéromagnétiques dans un objectif purement structural (Bouya, 2014 ; Seghir et al., 2017). L'objectif de ce chapitre est d'appliquer d'autres techniques et filtres de traitement et d'interprétation des données aéromagnétiques afin d'extraire les failles et les fractures majeures dans le causse d'Agouraï. Ces structures ont un rôle primordial dans les écoulements des eaux souterraines, et de confirmer ou infirmer les résultats élaborés dans le chapitre précédant.

Nous rappelons que la méthodologie de traitement des données magnétiques est déjà traitée dans le chapitre 2, par contre le présent chapitre est consacré à la présentation des résultats de la réinterprétation de ces données.

Nous signalons que ces données ont été acquises par le laboratoire de « Géo-Ingénierie et Environnement » de l'UMI sous format papier puis numérisées et digitalisées par nos soins. Ces données aéroportées acquises au profit du Ministère de l'Energie et des Mines lors d'une campagne de géophysique héliportée organisée dans le Maroc Central et dans le massif de Tazekka entre **avril et juin 2000**.

L'hélicoptère utilisé pour cet objectif est de type **Eurocopter AS350B3**, équipé d'un système d'enregistrement vidéo (camera vidéo PAL). L'altitude nominale du vol est de **60m**. Les lignes de vol sont de direction **140° à 135°** avec un espacement de **500 m**. Ces lignes de vol sont perpendiculaires aux structures NE-SW caractéristiques de la région. Les lignes de traversées sont choisies selon une direction de vol de **50° à 45°** espacés de **5000m**.

I.2. Le champ résiduel du cause d'Agourai

La carte du champ magnétique résiduel (figure 55) au niveau du cause d'Agourai, montre une variation importante de l'intensité du champ allant de -142 à 71.8nT. Cette variation permet d'identifier des zones, avec une intensité magnétique élevée, situées surtout aux bordures Est et Sud du cause et alignées suivant une direction NE-SW, et d'autres zones caractérisées par des intensités faibles situées sur la bordure Ouest du cause.

Les zones à fortes intensités magnétiques sont attribuées à la présence des basaltes du Trias, par contre la localisation des faibles intensités magnétiques dans la bordure Ouest est due à l'amincissement voire l'absence de ces basaltes et la dominance des argiles rouges du Trias.

La direction de ces anomalies est généralement NE-SW, parallèle à la direction principale hercynienne des structures géologiques notamment les grandes failles affectant le cause d'Agourai.

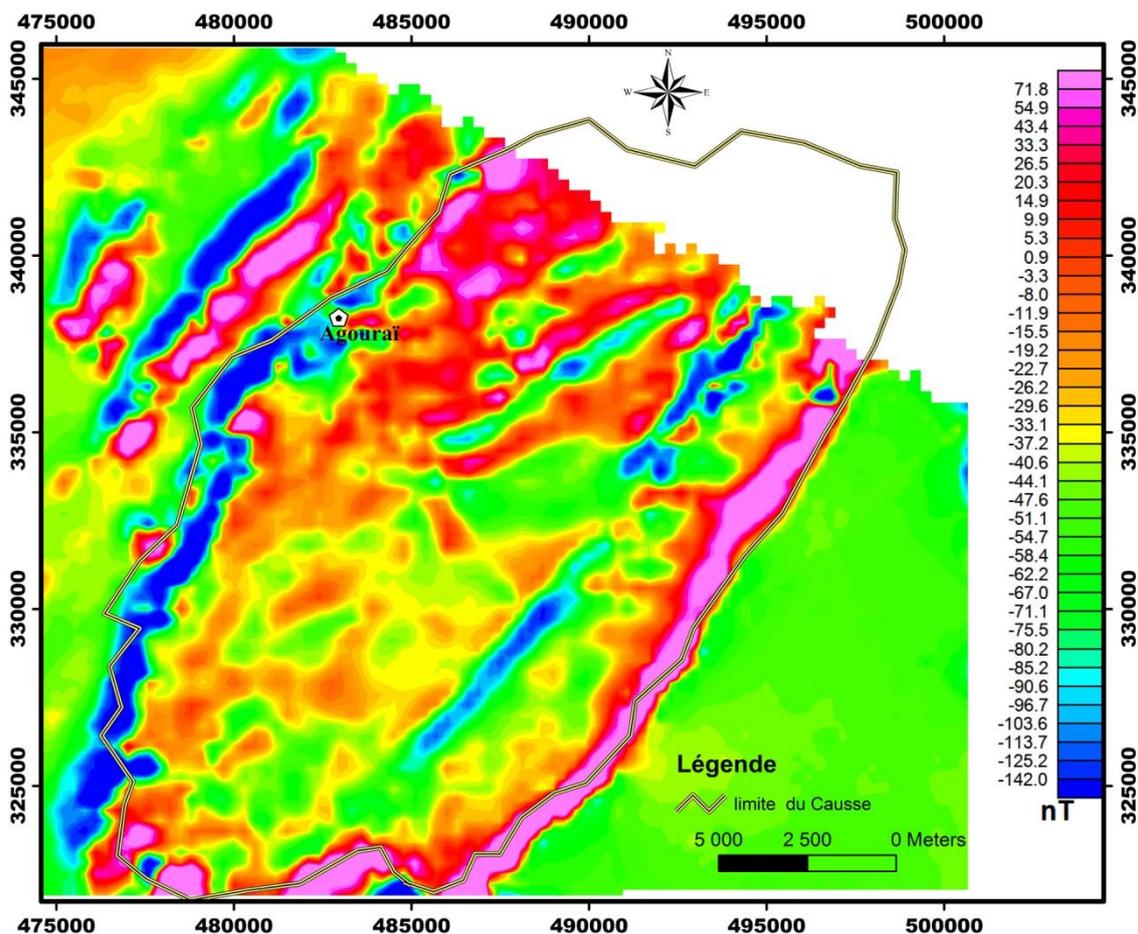


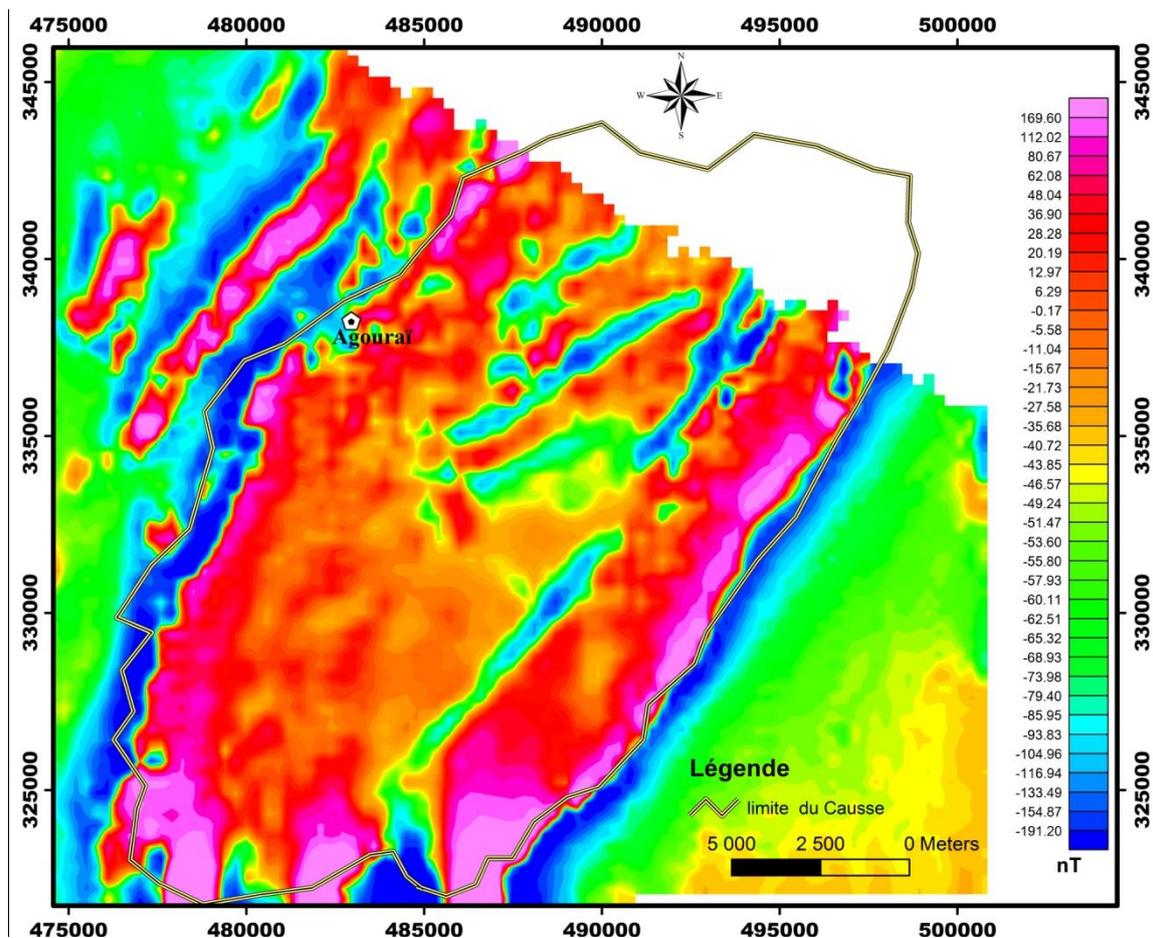
Figure 55 : carte du champ magnétique résiduel au niveau du cause d'Agourai

I.3. La transformée de réduction au pôle (RTP)

La transformée de réduction au pôle est un traitement mathématique qui vise à transformer les anomalies bipolaires en anomalies unipolaires afin d'éliminer les distorsions induites par l'inclinaison du vecteur du champ magnétique terrestre. Pour notre cas, l'inclinaison est de 46,3 Nord et la déclinaison est de 3,3 Ouest.

L'emploi de la transformée de réduction au pôle présente cependant des limitations, parmi lesquelles on trouve l'existence du magnétisme rémanent ayant une direction et un sens différent de ceux du champ actuel. L'utilisation de la réduction au pôle dans ce cas donne des anomalies réduites au pôle décentrées par rapport aux sources et non symétriques (Fabriol, 2004).

La carte de RTP (figure 56) montre que les zones fortement magnétiques sont situées aux bordures Est et Ouest du causse, cela est expliqué par l'affleurement des basaltes à ces endroits ; en revanche la présence des anomalies en forme de lentilles allongées NE-SW et faiblement magnétiques est expliquée par l'existence des failles.



I.4. Le signal analytique

Le signal analytique est un gradient total entre les dérivées horizontale et verticale ; l'amplitude du signal analytique en trois dimensions du champ magnétique total produit des maxima au-dessus des contacts magnétiques indépendamment de la direction de magnétisation. L'absence de direction de magnétisation dans les anomalies du signal analytique est un caractère particulièrement attrayant pour l'interprétation des données du champ magnétique près de l'équateur magnétique. Contrairement aux autres techniques de traitement, cette méthode n'exige pas la connaissance des paramètres de la source et ceux du champ magnétique ambiant, elle constitue donc un outil efficace pour l'interprétation préliminaire des données (Roest et al, 1992).

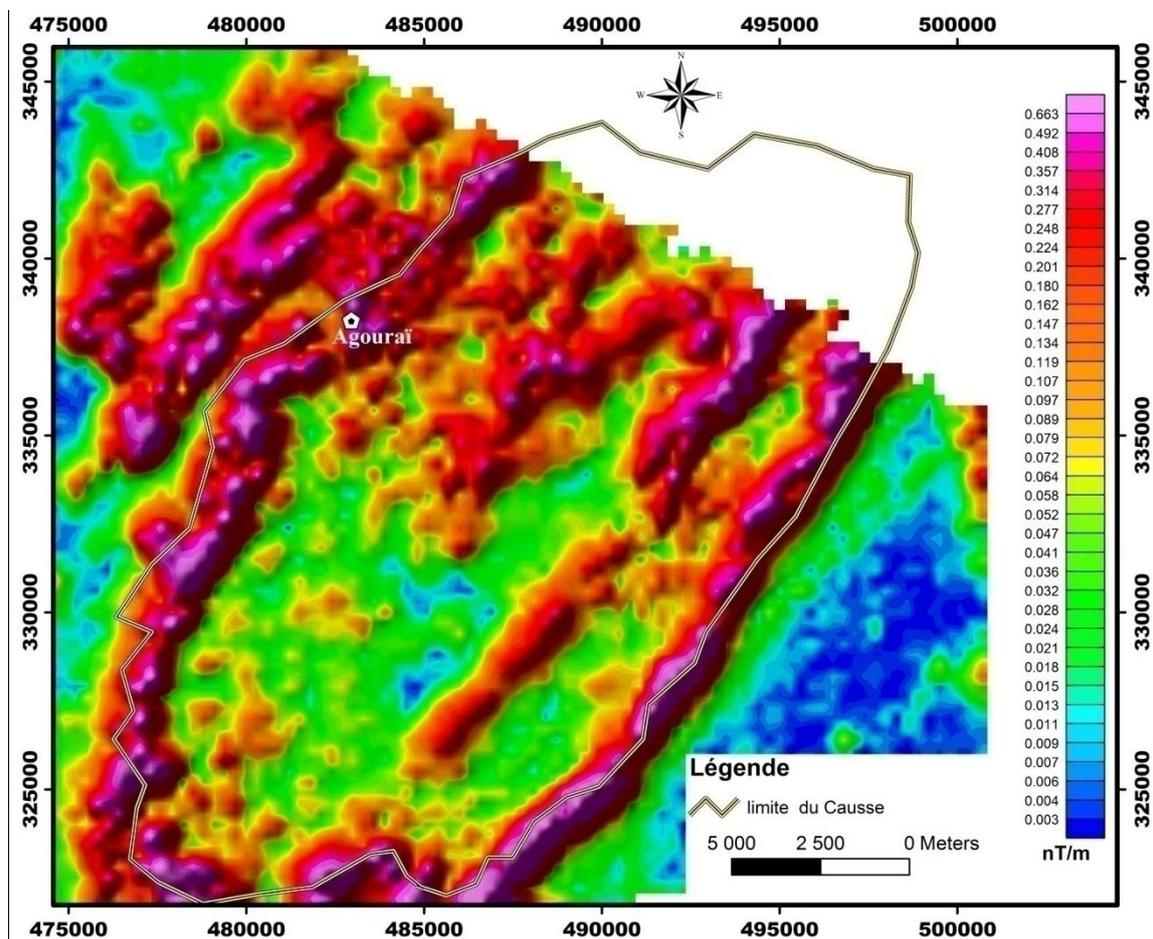


Figure 57 : carte du signal analytique au niveau du causse d'Agourai

La carte du signal analytique du causse d'Agourai (figure 57) illustre clairement l'importance des anomalies dans les bordures et au centre par endroit. Cette amplification est attribuée à la couche affleurante ou sub-affleurante des basaltes concentrés dans les bordures, par contre au cœur du causse l'importance de ces anomalies serait due à l'amincissement de la couche

calcaire ou à la présence des failles. Nous signalons ici que les anomalies sont alignées selon la direction NE-SW.

I.5. La première dérivée verticale

La carte de la première dérivée verticale obtenue pour le causse d'Agourai présente une variation allant de -0.3778 nT/m à 0.4326 nT/m ; en effet, les bordures Est et Ouest du causse montrent les valeurs assez élevées ce qui nous permet de dire que cette augmentation est due à l'affleurement des basaltes dans ces zones. Nous constatons aussi la présence d'anomalies de forme linéaires dues à la variation brutale des formations géologiques et qui peuvent être interprétée par des failles.

Le suivi de ces anomalies nous a permis de tracer des discontinuités magnétiques interprétées en termes de fractures ou failles affectant ou limitant les calcaires des argiles et basaltes du Trias. Ces fractures se situent aussi à la limite du causse avec le Massif central caractérisé par des terrains d'âge paléozoïque.

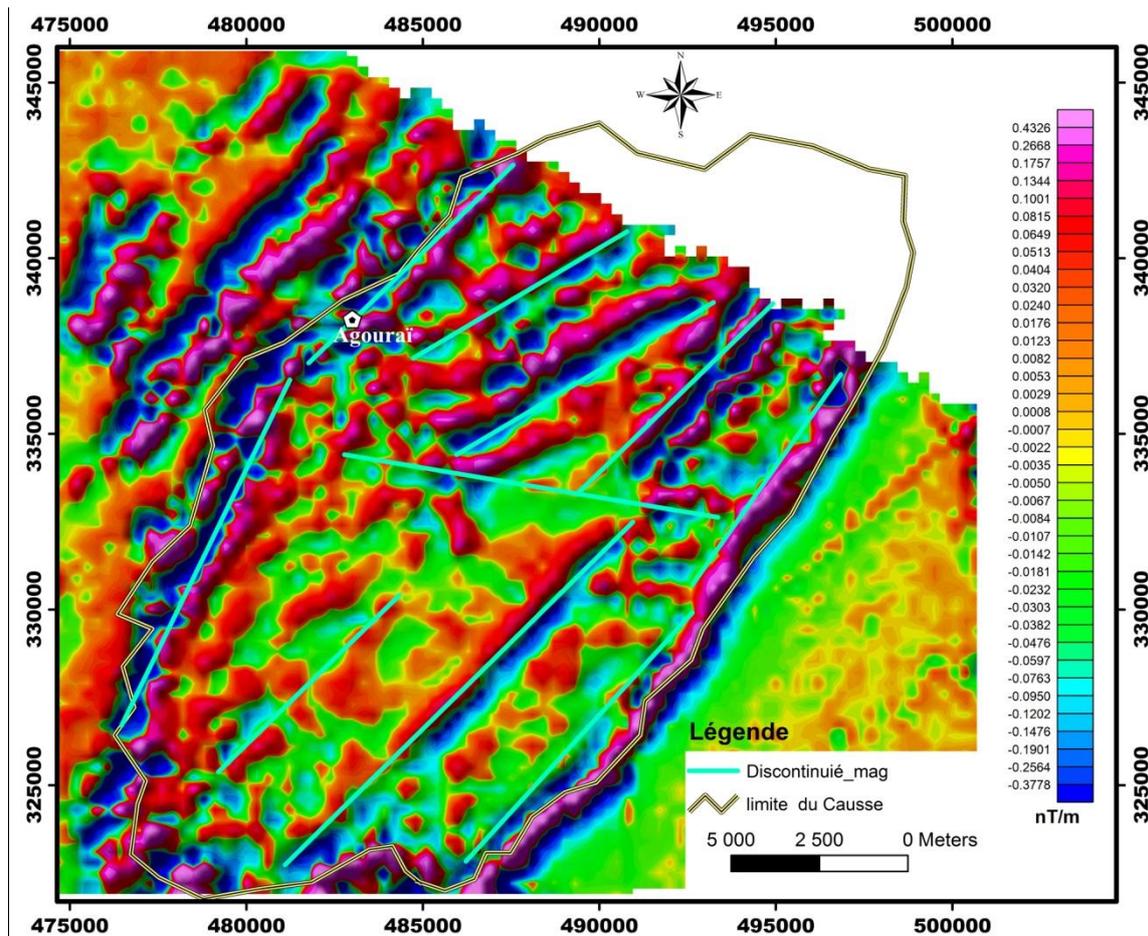


Figure 58 : carte de la première dérivée verticale

La projection des principales failles relevées à partir de la carte géologique régionale, sur la carte de la première dérivée verticale illustre la grande coïncidence de la majorité de ces failles avec les anomalies magnétiques interprétées par des discontinuités.

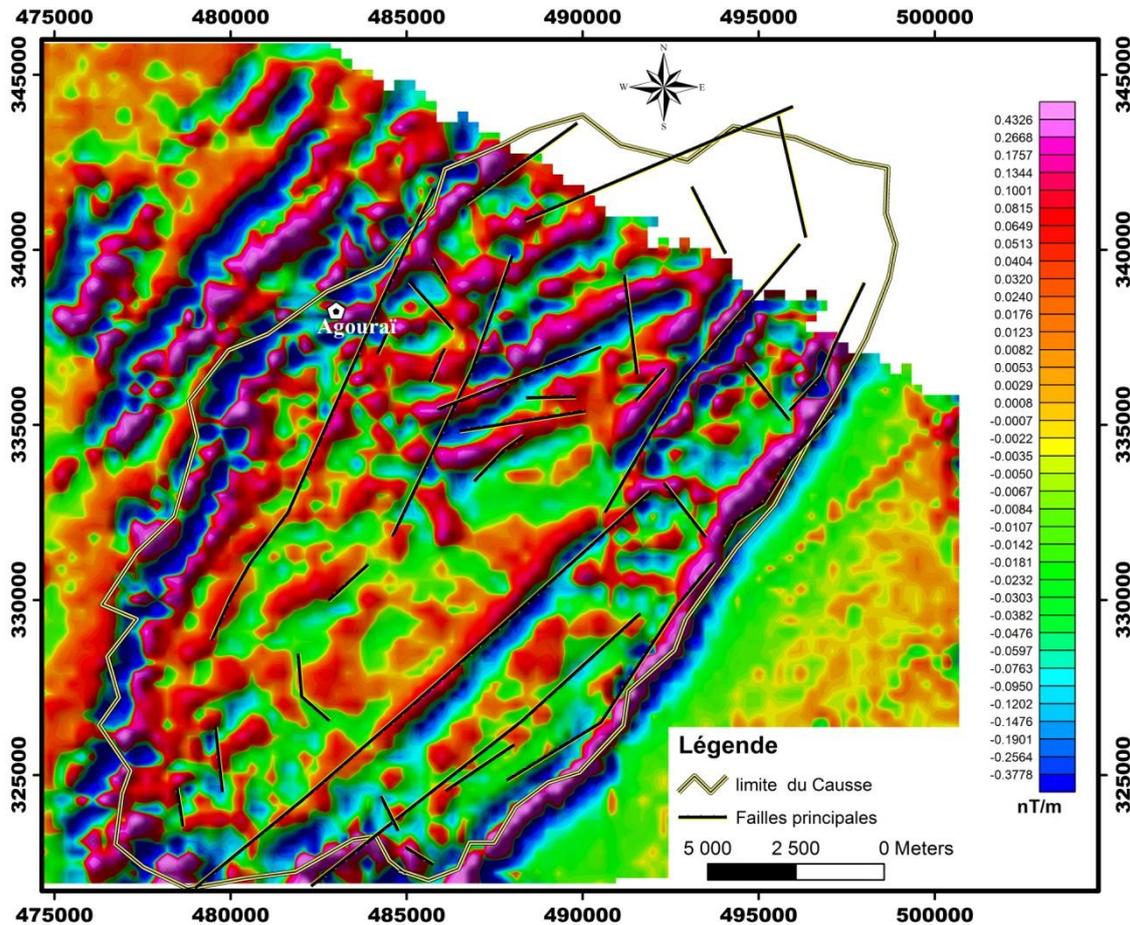


Figure 59 : projection des principales failles sur la carte de la première dérivée verticale

I.6. La deuxième dérivée verticale

La réalisation de la carte de la deuxième dérivée verticale permet une plus grande résolution en rehaussant le signal des objets superficiels et enlevant la composante verticale ; cette dérivée tend à amplifier le bruit. Nous constatons sur cette carte la continuité des anomalies sous forme de lentilles de direction générale NE-SW ; les bordures présentent aussi, dans cette carte, des valeurs assez élevées indiquant l'importance des basaltes du Trias.

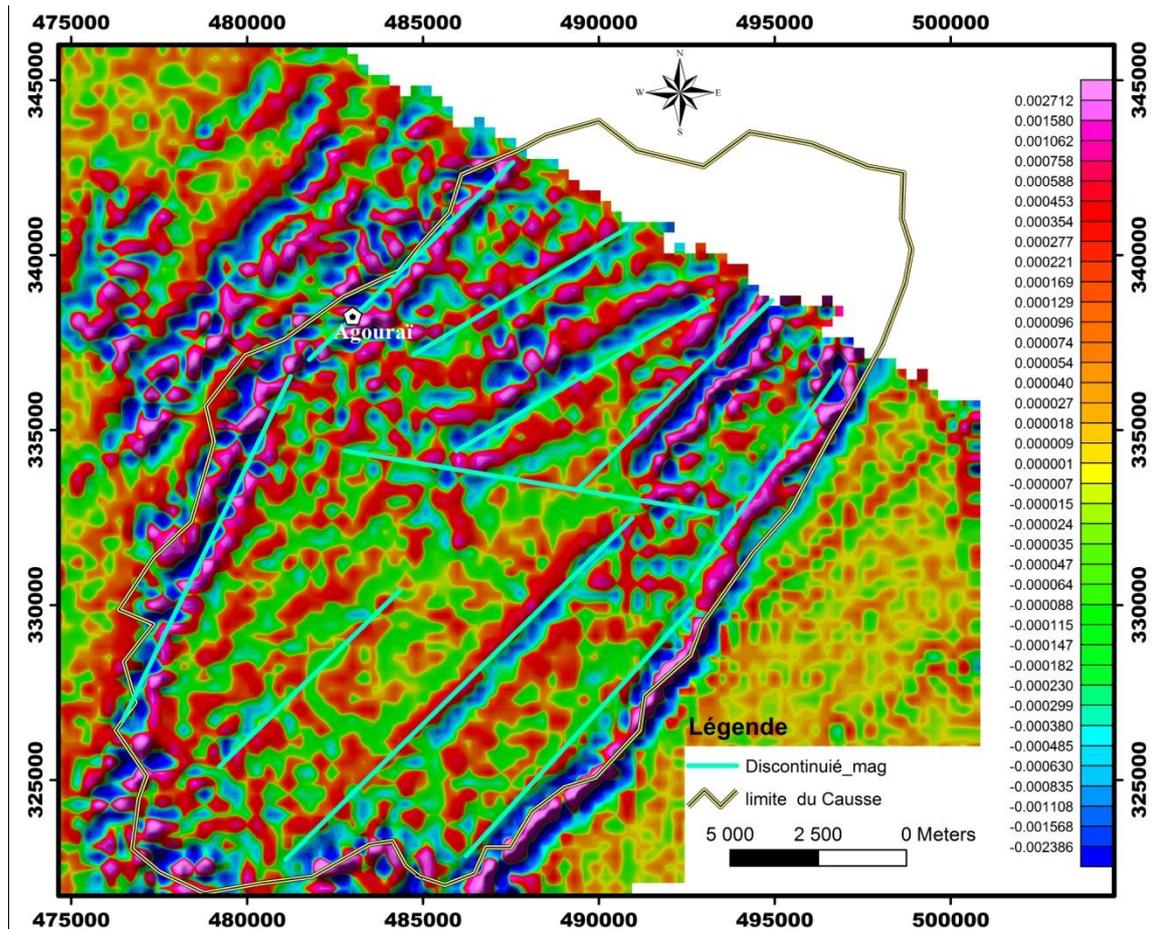


Figure 60 : carte de la deuxième dérivée verticale

I.7. Le gradient horizontal

Ce gradient est une dérivation du champ magnétique résiduel réduit au pôle selon l'axe horizontal, il permet de cartographier les anomalies linéaires représentant les maxima du gradient horizontal du champ allongées le long des failles ou les contacts lithologiques. Sur notre carte (figure 61), nous constatons que les structures ou les anomalies sont allongées en direction NE-SW ce qui nous a permis de tracer des discontinuités magnétiques interprétées en termes de fractures ou failles affectant ou limitant les calcaires des argiles et basaltes du Trias sur le Causse d'Agourai. Nous constatons aussi que les anomalies relevées sur cette carte sont identiques à celles des cartes précédentes de la dérivée.

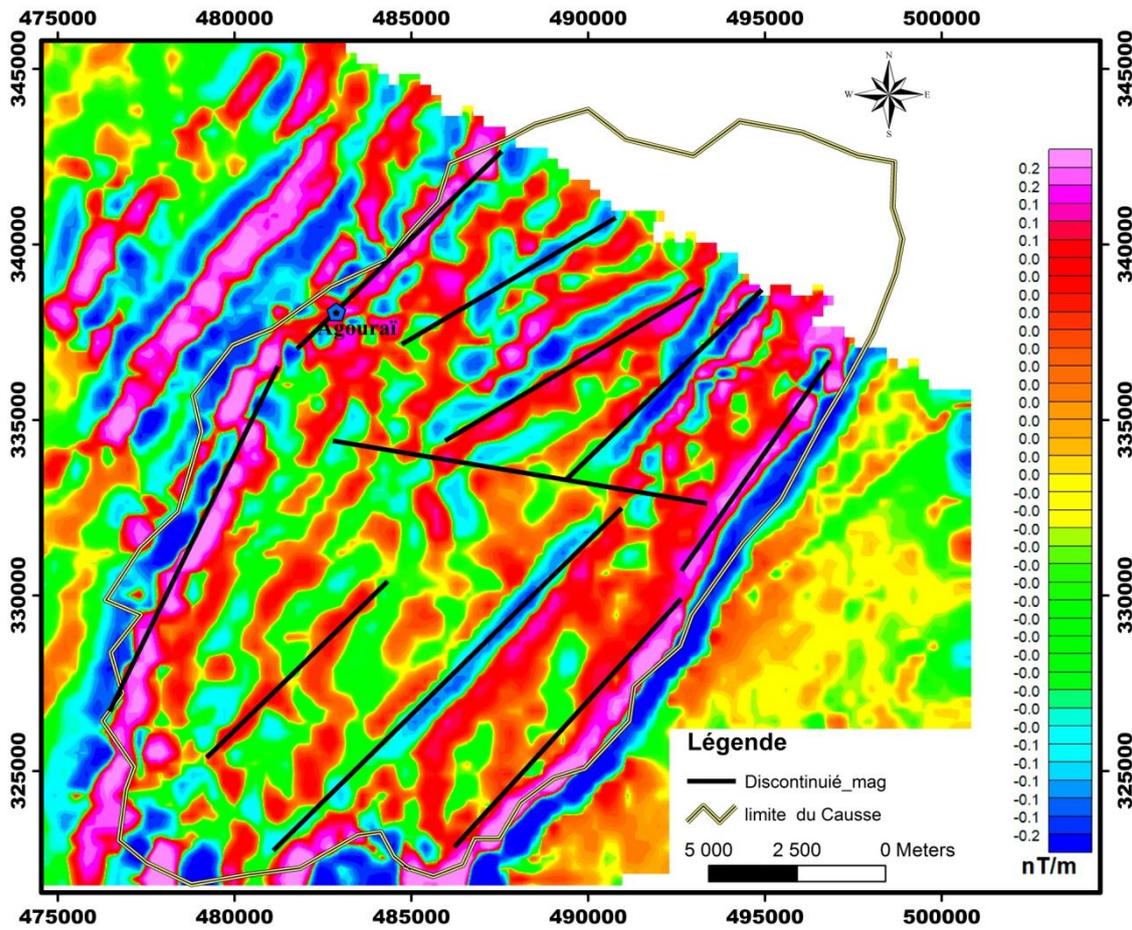


Figure 61: carte du gradient horizontal

I.8. Le prolongement vers le haut

Le prolongement vers le haut est un filtre qui permet d'atténuer les anomalies de petites longueurs d'ondes (superficielles) pour mettre en évidence les anomalies de grandes longueurs d'ondes (profondes). L'application du prolongement vers le haut nous permet d'avoir une idée sur la profondeur des anomalies magnétiques dans la zone d'étude. Pour notre cas le prolongement vers le haut pour 500m donne une amplification importante des anomalies situées dans les bordures.

Le choix de ces deux cartes de 500 et 1000m est pour monter l'amplification des anomalies ; La comparaison des cartes du prolongement vers le haut pour 500m et 1000m (figures 61 & 62), donne un élargissement des anomalies magnétiques situées aux bordures Est et Sud, surtout en allant de la carte de PVH 500m au PVH 1000m, cette élargissement due à la diminution de la couche des calcaires du Lias et des argiles supérieures du Trias sous-jacentes, qui couvrent les basaltes assez magnétiques. Ces faibles épaisseurs de calcaires sont localisées à l'Est et au Sud du causse. En revanche, la partie Ouest du causse ne montre pas le

même signal magnétique, ce qui nous permet de supposer que les basaltes sont soit profonds soit absents dans cet endroit.

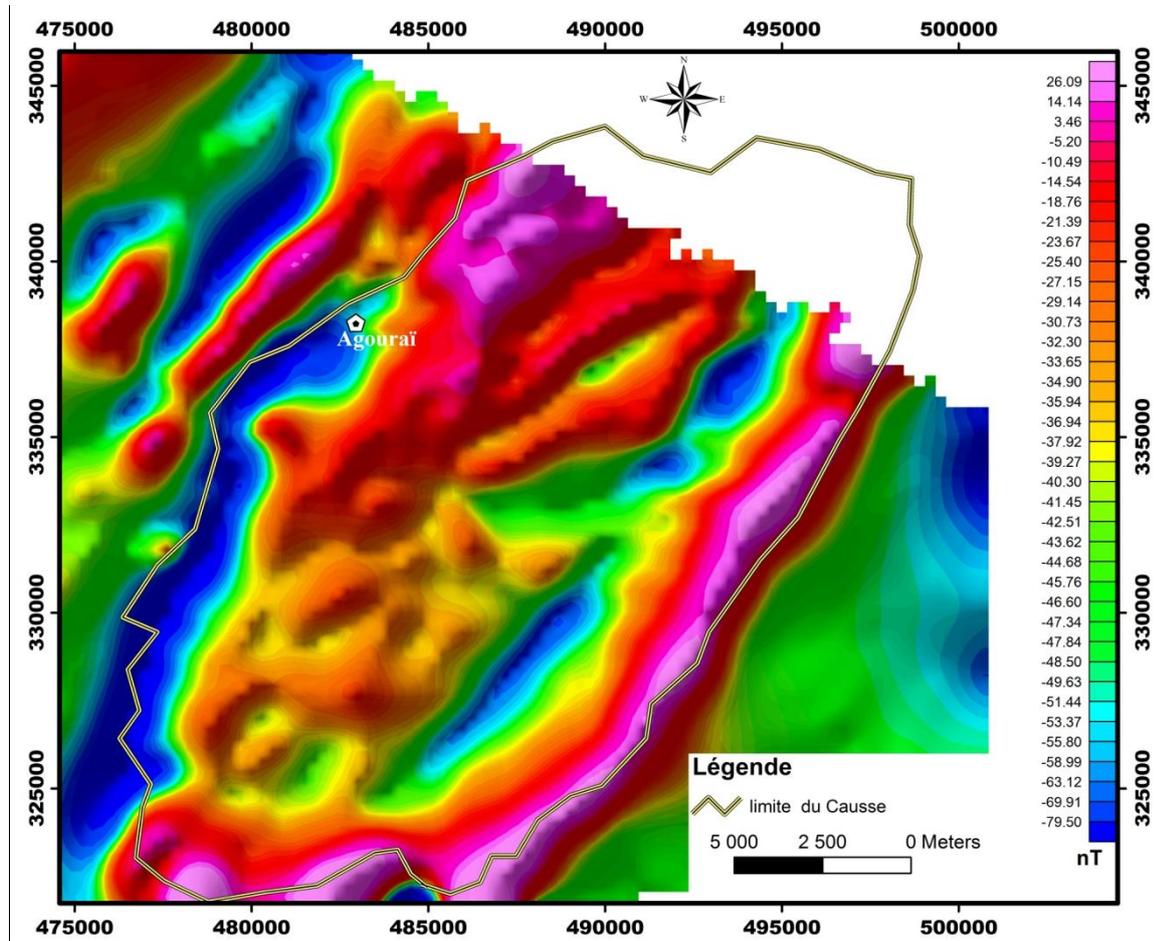


Figure 62 : carte du prolongement vers le haut 500m

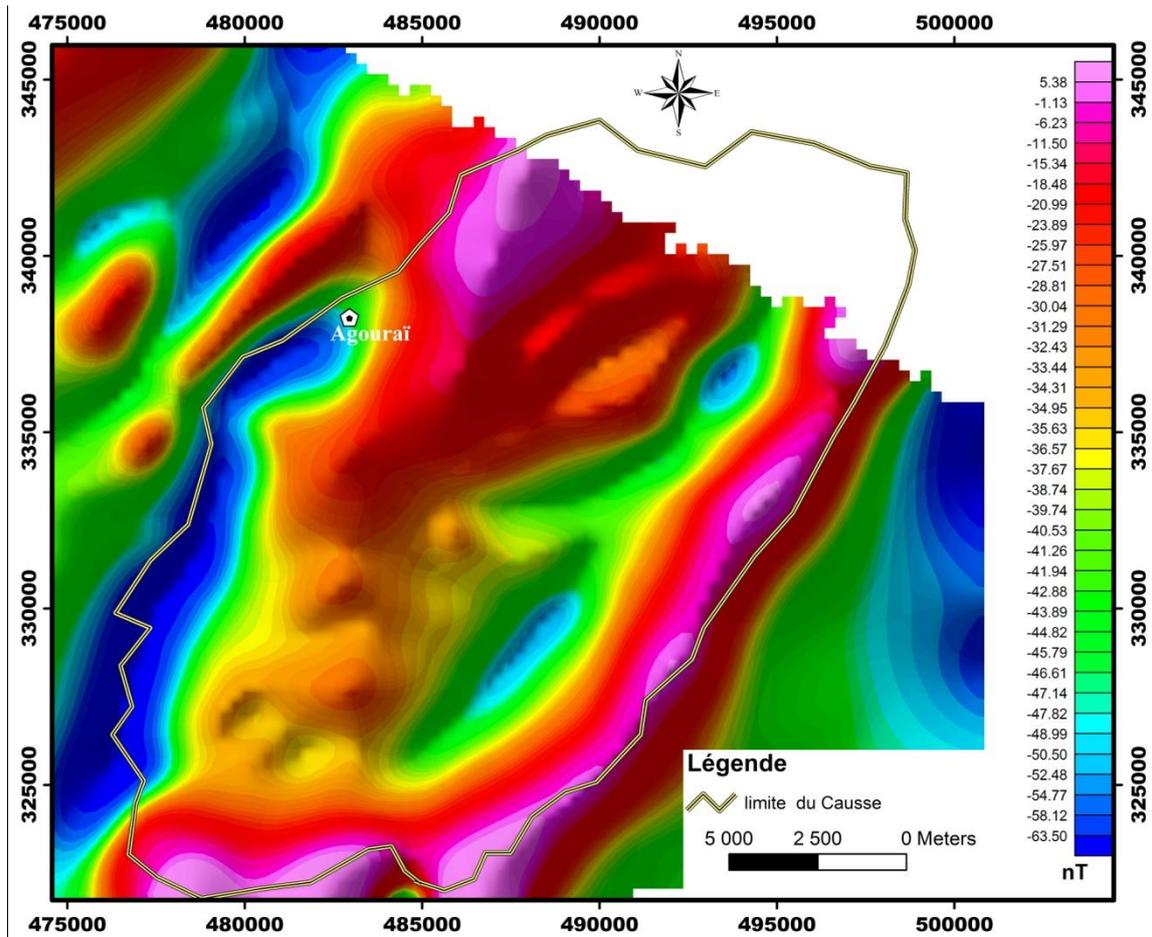


Figure 63 : carte du prolongement vers le haut 1000m

I.9. Le Tilt dérivative

La dérivée de Tilt « Tilt dérivative » (TDR), comme nous l'avons énoncé dans le chapitre 2 de la partie I, permet de calculer l'inverse de la tangente du rapport du module des dérivées partielles horizontales avec la dérivée verticale du champ magnétique. La carte obtenue par ce filtre a donné une importance aux anomalies quel que soit leur amplitude. Contrairement aux cartes précédentes qui sont exprimées en nT, la dérivée de Tilt est exprimée en Radiane et montre les anomalies alignées généralement suivant la direction principale dans le causse ; cette direction est essentiellement NE-SW, et qui corrobore l'orientation des principales structures à l'échelle régionale.

Cette carte ne montre pas une grande différence par rapport aux cartes des dérivées, en effet, les anomalies relevées et interprétées en termes de discontinuités sur les autres cartes sont les mêmes relevées sur cette carte.

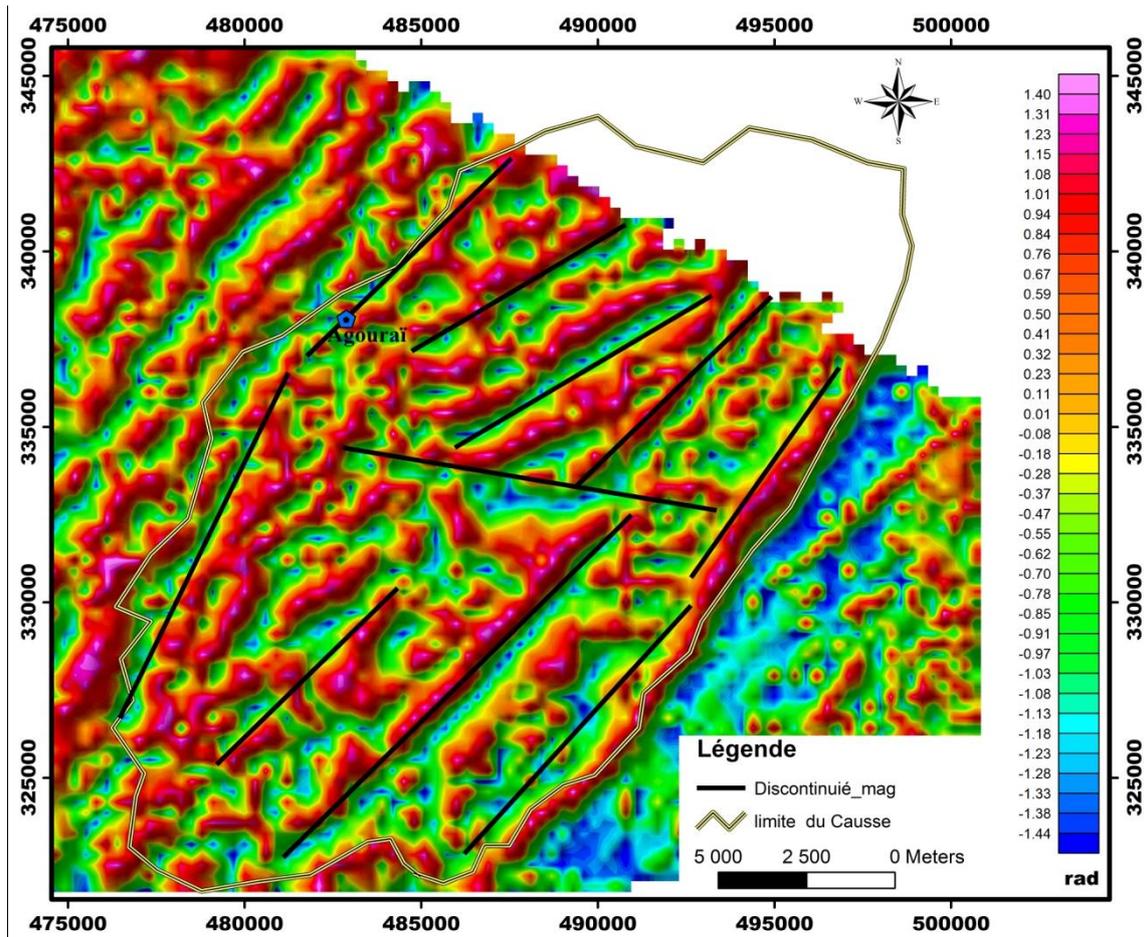


Figure 64 : carte de dérivée de « Tilt dérivative »

La projection des principales failles de la carte géologique sur la carte « Tilt dérivative » permet de montrer aussi la parfaite coïncidence de la majorité de ces failles avec les anomalies interprétées par des discontinuités magnétiques (figure 64).

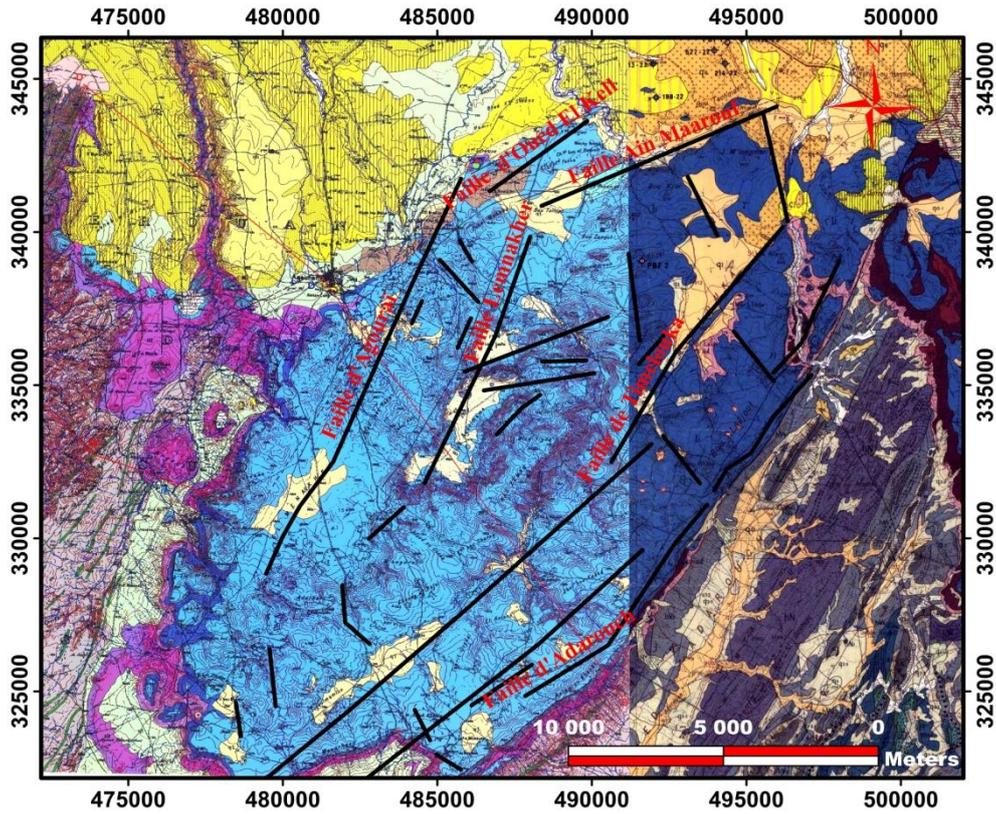


Figure 65 : carte géologique du cause d'Agourai assemblée à partir des cartes géologiques d'Agourai et d'El Hajeb montrant les principales failles

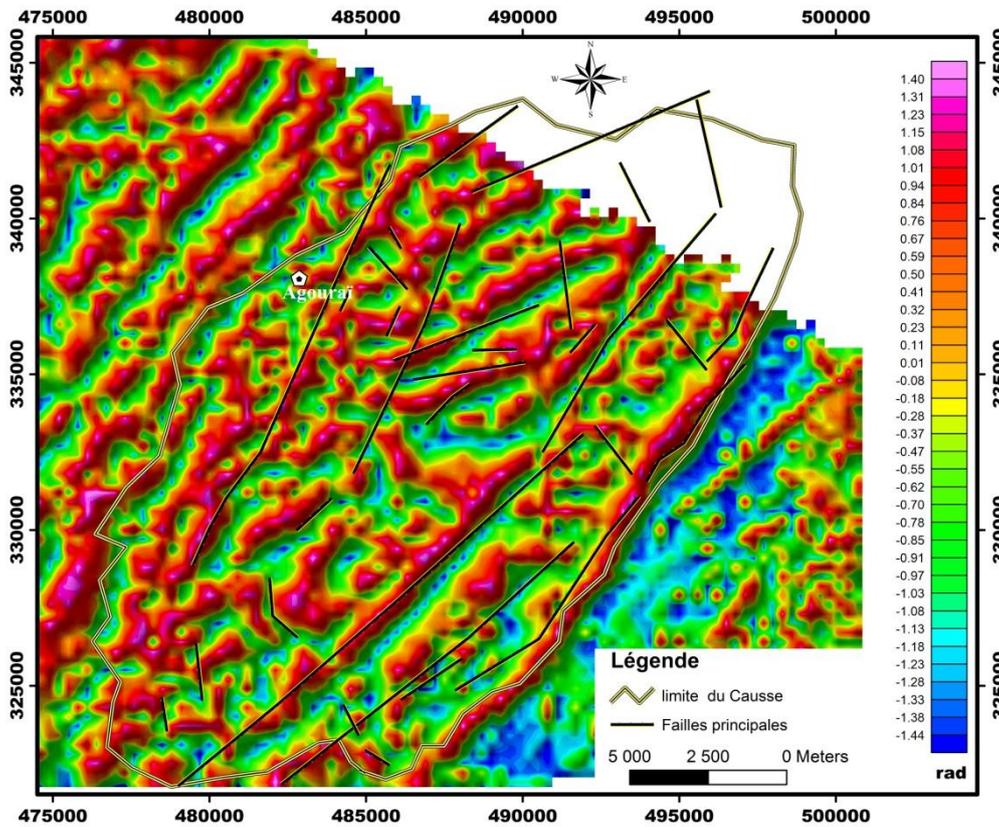


Figure 66 : projection des failles principales sur la carte de TDR

I.10. Synthèse

Dans le Causse moyen atlasique d'Agourai, les failles principales et les fractures sont orientées généralement NE-SW, cette même orientation a été mise en évidence par la télédétection des linéaments dans le chapitre précédent.

Les linéaments interprétés à partir des données aéromagnétiques par l'application des différents filtres (TDR, 1DV, 2DV,...) s'alignent parfaitement avec les grandes failles orientées NE-SW. En plus, les discontinuités relevées coïncident, dans la majorité des cas, avec les principales failles. La projection de ces discontinuités et ces failles sur un plan montre clairement cette coïncidence (Figure 67).

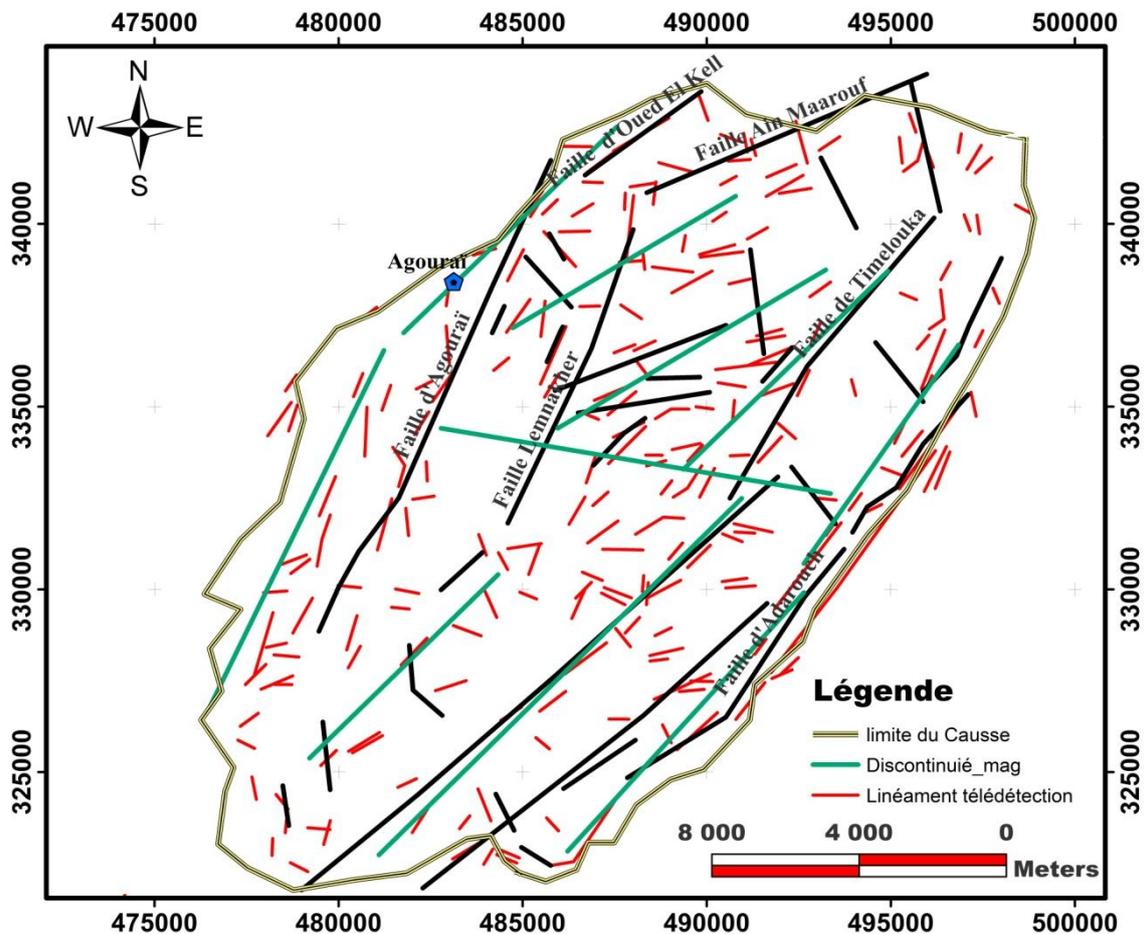


Figure 67 : carte des failles principales et discontinuités magnétiques

La rosace directionnelle des discontinuités magnétiques montre une direction majeure NE-SW et confirme ainsi la direction majeure retrouvée sur toutes les cartes.

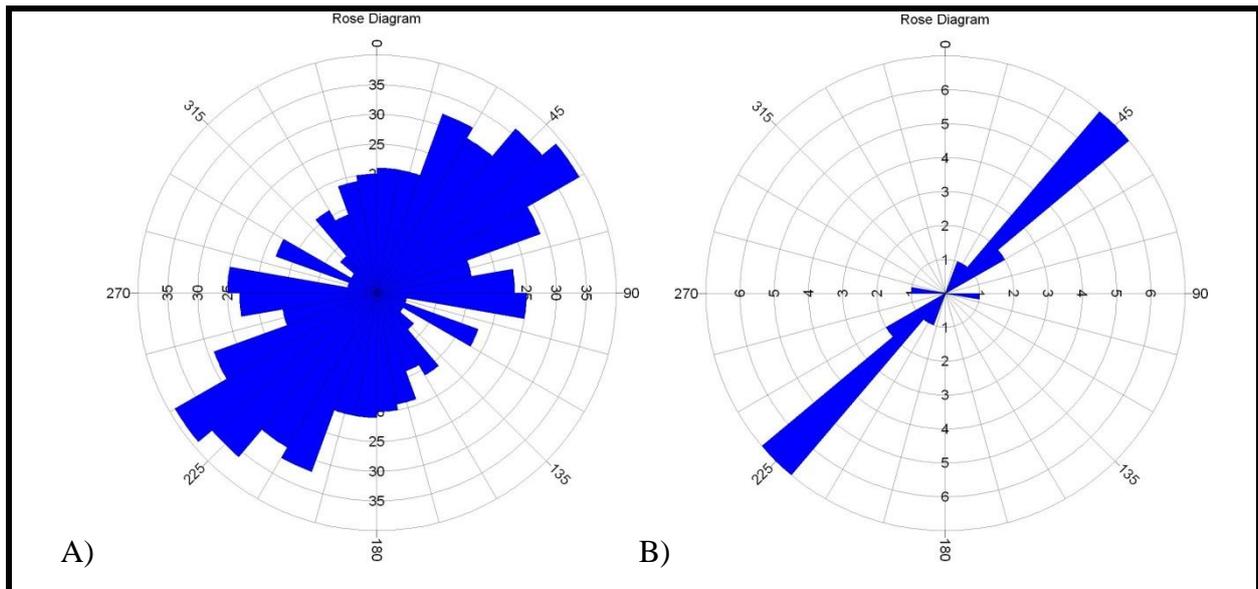


Figure 68 : rosace directionnelle des failles principales (A) et des discontinuités magnétiques (B)

II. Caractérisation géophysique des écoulements souterrains

II.1. Application de la géophysique sur le complexe sourcier Ain Maarouf – Ain Boujaoui

Pour une meilleure cartographie des axes d'écoulement des eaux souterraines entre le Causse d'Agouraï et la plaine de Saïss, une campagne géophysique a été réalisée au niveau du complexe sourcier Ain Maarouf – Ain Boujaoui qui représente l'exutoire principal de la nappe du Causse d'Agouraï. Elle a ainsi comportée la réalisation de (figure 67) :

- deux sondages électriques avec une longueur de ligne AB = 1000m afin de reconnaître le sous-sol en profondeur, le dispositif utilisé est celui de Schlumberger;
- deux profils de trainé électrique avec un espacement de ligne AB = 300m pour la mise en évidence des discontinuités électriques dans les premiers cinquante mètres ;
- quatre profils de tomographie électrique de direction E-W perpendiculaires aux directions principales des structures géologiques régionales, les profils de tomographie ont été réalisés avec le dispositif dipôle-dipôle avec un espacement de 5m entre électrodes, le choix de ce dispositif et de la distance inter-électrodes est dicté par la grande pénétration de ce dispositif et à sa meilleure résolution quant à la détection des fractures et des karsts.

Le matériel utilisé consiste en un résistivimètre GeoTrade et un générateur de courant 400W pour les sondages et trainés et un Syscal Pro à 96 électrodes pour la tomographie.

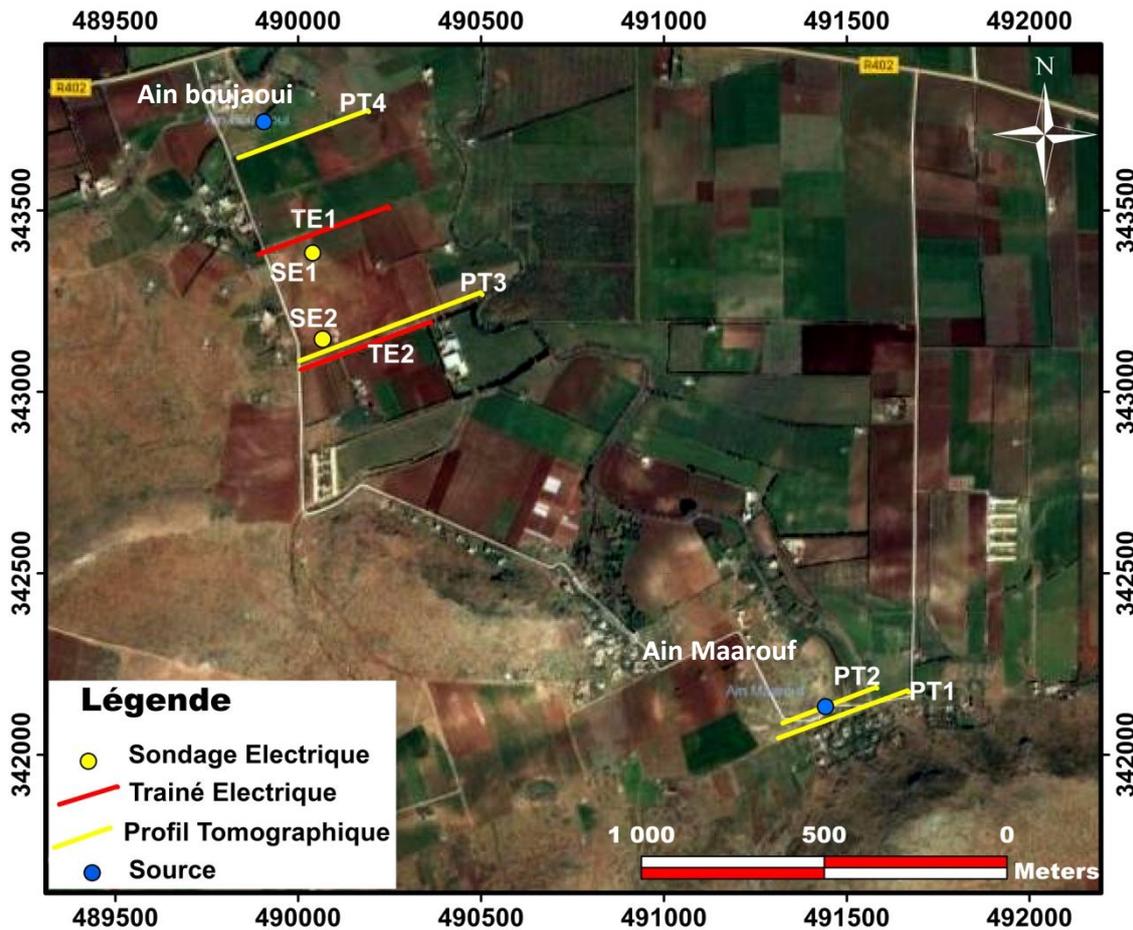


Figure 69 : situation des mesures géoélectriques sur image satellitaire

II.1.1. Analyse des sondages électriques :

L'interprétation des sondages électriques par le logiciel Winsev 6.3 de Geosoft, permet de décomposer le sous-sol en niveaux électriques correspondant aux formations géologiques caractérisant la zone du complexe sourcier.

En effet, le premier sondage électrique donne la décomposition du sous-sol suivante :

- Un niveau superficiel peu résistant correspondant au sol végétal, d'une épaisseur de 1.3 m et de résistivité de 175Ωm.
- Un complexe résistant épais représentant les calcaires dolomitiques liasiques et subdivisé en deux sous-niveaux, l'un supérieur, constitué par des calcaires secs, avec une résistivité élevée de l'ordre de 1200 et 500 Ωm et une épaisseur de 26 m ; l'autre niveau inférieur est attribué à des calcaires fracturés et aquifères de 93 m d'épaisseur et de résistivité 150 à 350Ωm ; le toit de ce sous niveau est situé à une profondeur de 27m et coïncide généralement avec le niveau statique de l'eau.

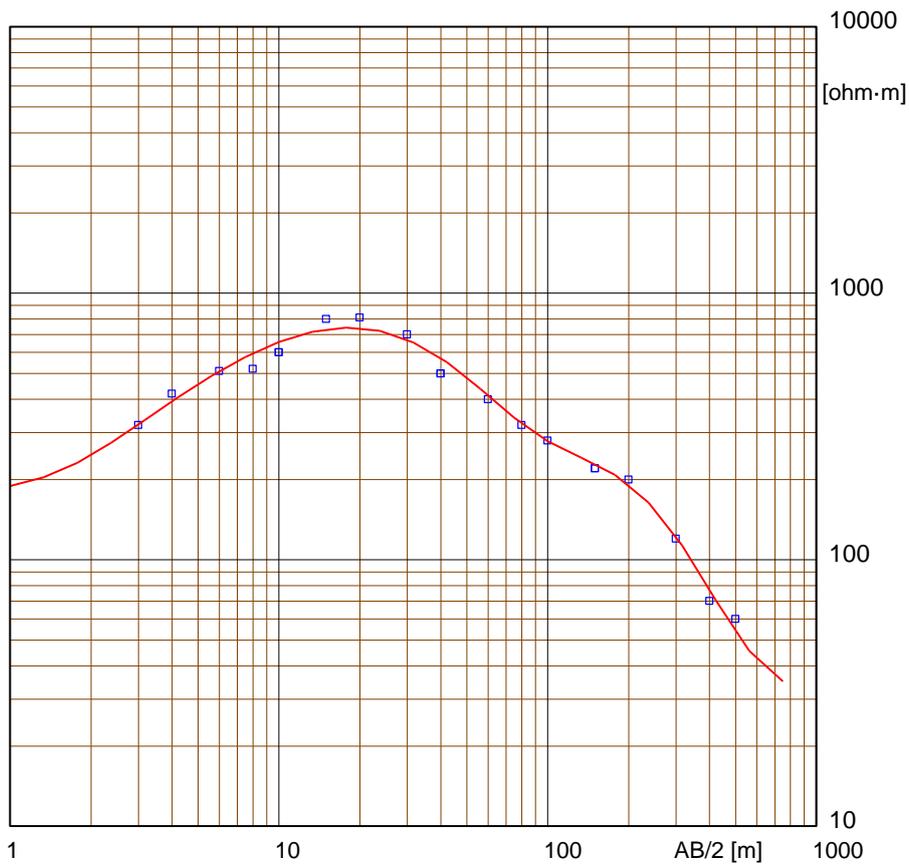
- Un niveau conducteur plus profond correspondant au substratum triasique représenté par les argiles rouges d'une résistivité d'environ $30 \Omega\text{m}$ et une profondeur de 120 m.

Le deuxième sondage électrique donne la décomposition du sous-sol suivante :

- Un niveau superficiel de 14m d'épaisseur avec une résistivité de 70 et 8 ohm.m, attribué à des formations du Quaternaire (travertins, argiles et sables) ;
- Un ensemble résistant, correspondant à des calcaires du Lias, de résistivité électrique de 365 (calcaires secs) et $70 \Omega\text{m}$ (calcaires fracturés aquifères) et d'une épaisseur totale de 70m ;
- Un niveau conducteur profond, attribué aux argiles rouges du Trias de résistivité électrique $21 \Omega\text{m}$ et dont le toit est situé à 84m de profondeur.



Sondage électrique Schlumberger - SE1.WS3

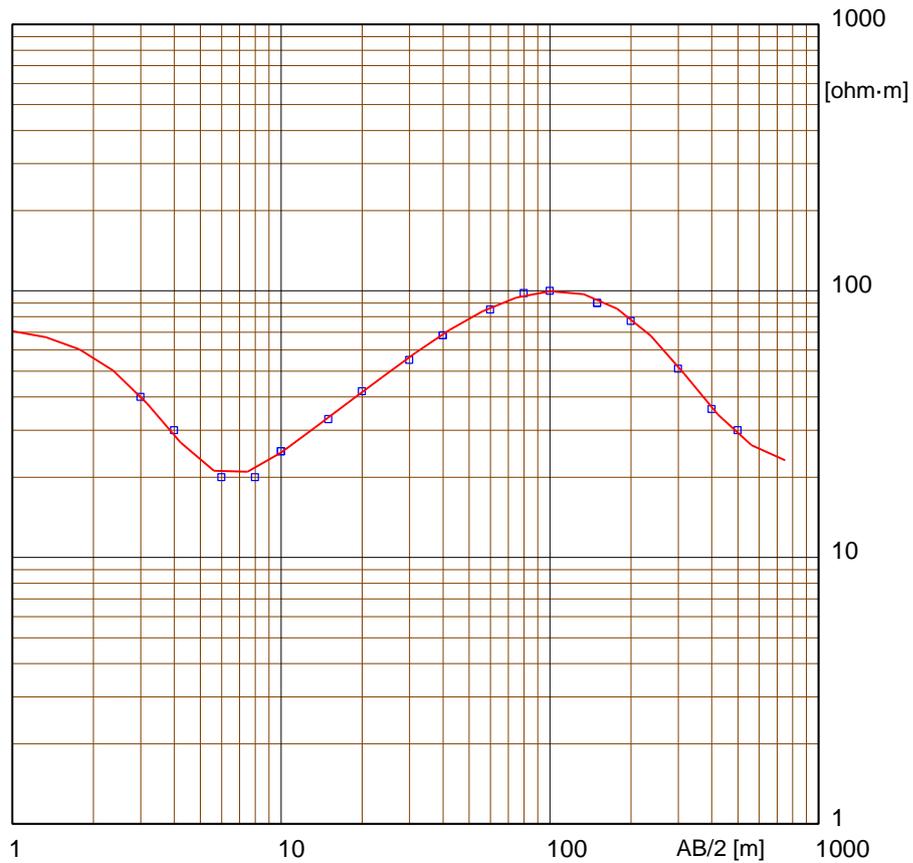


Situation du SE X = 490025 Y = 343395 Z = 772 Azim = E-W

Modèle			
Résistivité	Epaisseur	Profondeur	Altitude
[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
175	1.3	1.3	772
1200	8	1.3	770.7
500	18	9.3	762.7
150	23	27	745
350	70	50	722
30		120	652

Figure 70 : courbe et modèle du sondage électrique SE1

Sondage électrique Schlumberger - SE2.WS3



Situation du SE X = 490052 Y = 343133 Z = 772 Azim = E-W

Modèle			
Résistivité	Epaisseur	Profondeur	Altitude
[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
74	1.5		772
8	2.3	1.5	770.5
70	10	3.8	768.2
365	20	14	758
70	50	34	738
21		84	688

Figure 71 : courbe et modèle du sondage électrique SE2

Le passage du sondage SE12 au sondage SE1 est caractérisé par une augmentation de la profondeur du substratum conducteur de Trias sachant que la distance entre les deux sondages ne dépasse pas les 250 m, ceci peut être expliqué par l'existence d'une faille probable entre les deux, cette hypothèse peut être confirmée par la réalisation de profils de trainé et de tomographie électriques.

II.1.2. Analyse des profils de trainé électrique :

Dans cette zone de passage entre les deux sources d'Ain Maarouf et de Boujaoui, nous avons réalisé deux profils de trainé électrique parallèles, afin de mettre en évidence les possibles fractures et failles affectant les calcaires du Lias dans cet endroit ; le premier profil est réalisé au Nord alors que le deuxième est situé au Sud (figure 68).

La courbe du premier profil (figure 71) montre une variation de la résistivité électrique apparente entre 200 et 450 Ωm , ce qui permet d'avancer qu'on est en présence d'une seule formation géologique résistante (calcaires du Lias). Le profil est aussi caractérisé par l'apparence de changement brutale (diminution) de la résistivité correspondant à des anomalies électriques conductrices, la première à la station 70m et la deuxième à la station 110m. Ces anomalies peuvent correspondre à des fractures affectant la couche de calcaires du Lias.

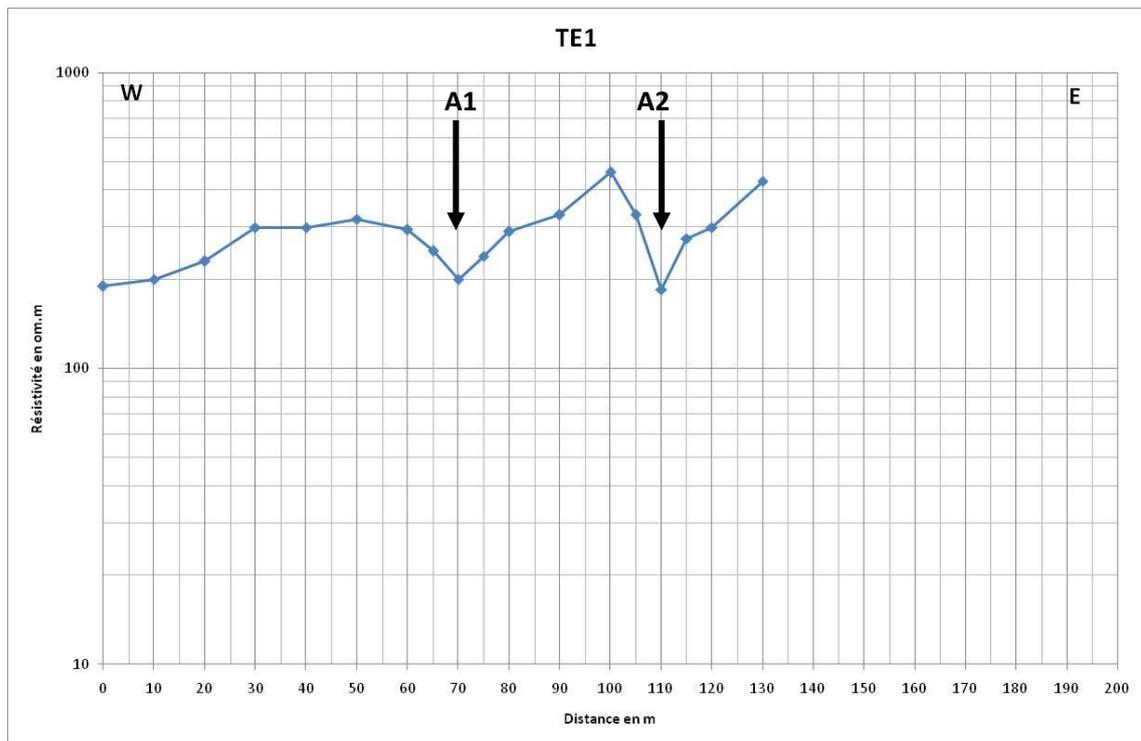


Figure 72 : profil de trainé électrique TE1

Sur le profil TE2 de direction Ouest-Est également (figure 72), l'existence d'une première anomalie très étalée (A3) vient confirmer le début du conducteur du profil TE1, il s'agit d'une possible remontée des argiles du Trias, Par contre les deux anomalies A1 et A2 du profil TE1 ont été retrouvées sur ce profil mais avec une moindre évidence.

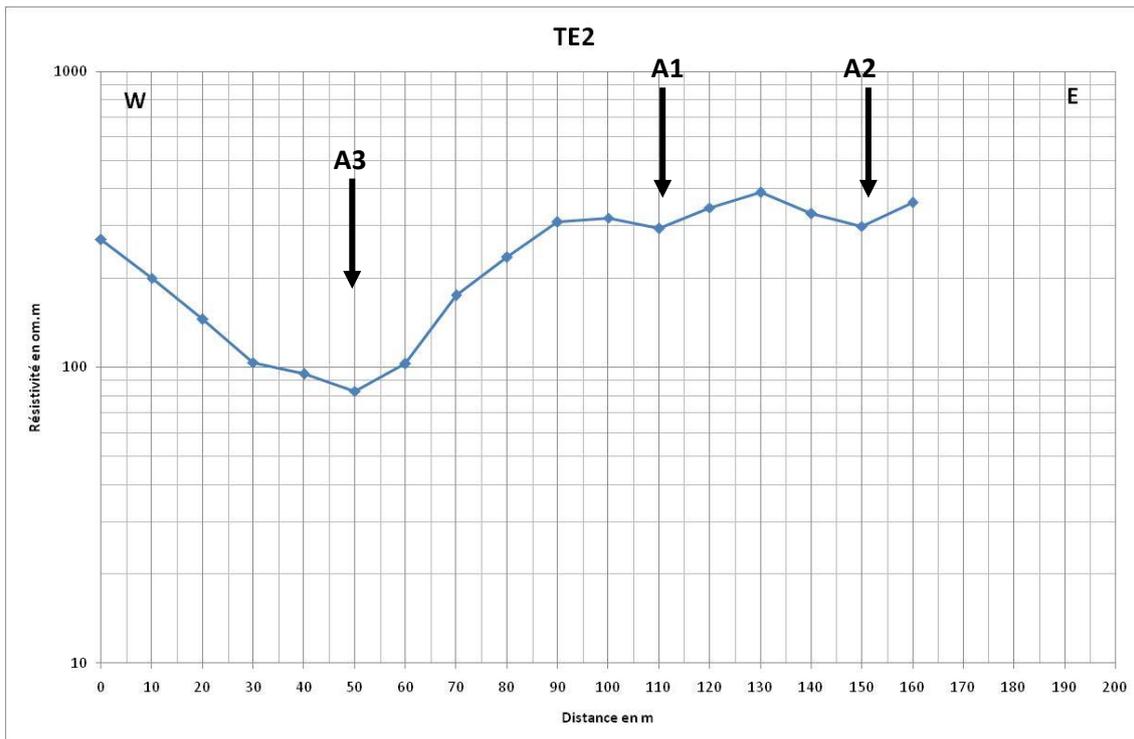


Figure 73 : profil de trainé électrique TE2

La réalisation de ces profils de trainé électrique de direction E-W perpendiculaire au sens d'écoulement N-S, a permis de relever des anomalies expliquées en terme de fractures, failles ou karst affectant les calcaires dolomitiques du Lias,

II.1.3. Analyse des profils de tomographie électrique :

Sur le complexe sourcier d'Ain Maarouf - Boujaoui nous avons effectué quatre profils de tomographie électrique (figure 68) : deux au niveau de la source Ain Maarouf, un près de la source de Boujaoui et un entre les deux.

L'inversion des données électriques par le logiciel Res2Dinv permet d'avoir une image 2D de la distribution des résistivités vraies du sous-sol.

Au niveau de la source d'Ain Maarouf, les deux profils de tomographie montrent quatre discontinuités ou anomalies conductrices dans un contexte très résistant. Ces anomalies peuvent être interprétées en termes de karsts ou failles affectant les calcaires dolomitiques du Lias et drainantes des eaux souterraines, la profondeur de ces discontinuités dépasse les 50m.

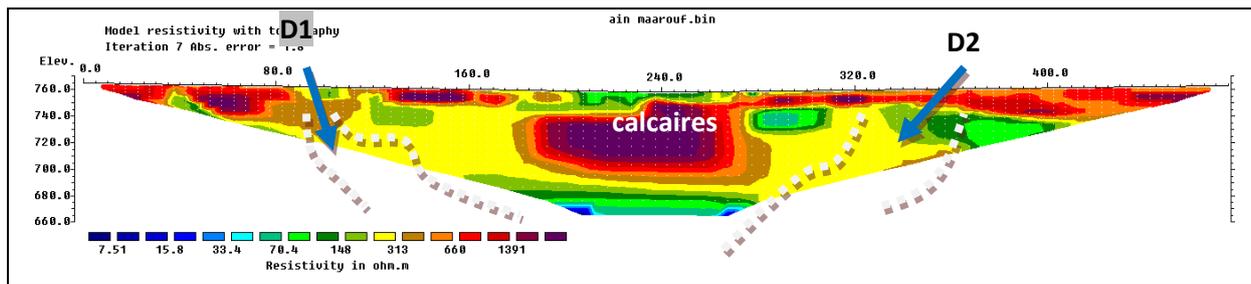


Figure 74 : profil de tomographie électrique PT1 d'Ain Maarouf

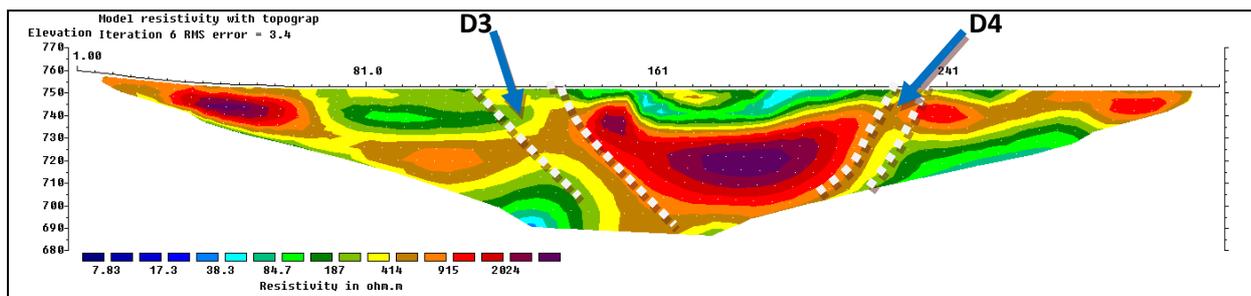


Figure 75 : profil de tomographie électrique PT2 d'Ain Maarouf

Le profil de la source Ain Boujaoui montre un panneau assez résistant à l'Est qui passe vers l'Ouest à un bloc conducteur ; cette discontinuité électrique latérale des niveaux résistants peut être interprétée par l'existence d'une faille normale responsable de l'effondrement du bloc résistant vers l'Ouest. A l'Est on note l'existence d'une discontinuité électrique conductrice (D5) qui peut correspondre à une zone de failles ou fractures.

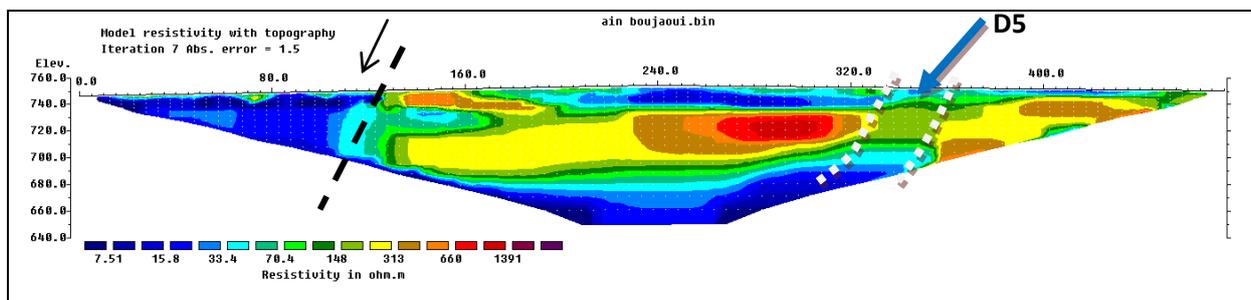


Figure 76 : profil de tomographie électrique PT4 d'Ain Boujaoui

Le profil réalisé entre les deux a permis de mettre en évidence une assez large discontinuité électrique (D6) qui peut constituer la continuité vers le sud de la zone de faille (D5) identifiée sur le profil d'Ain Boujaoui.

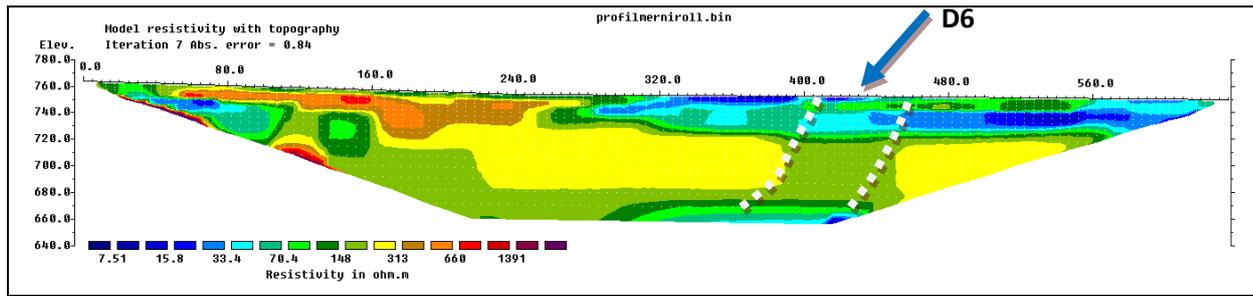


Figure 77 : profil de tomographie électrique PT3 intermédiaire

La superposition des discontinuités électriques sur un plan permet de retrouver la direction dominante NW-SE identifiée auparavant et qui constitue le linéament principal drainant les eaux souterraines depuis le causse vers la plaine de Saïss.

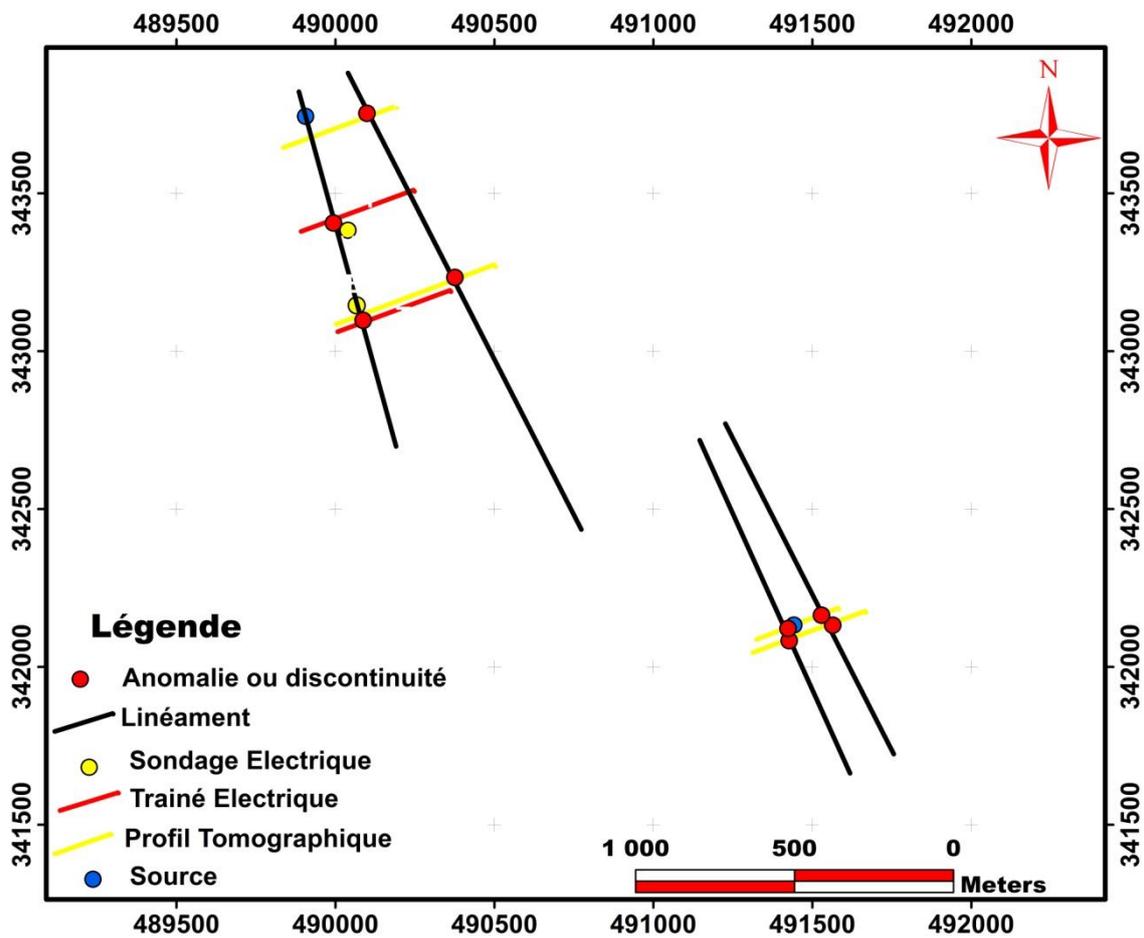


Figure 78 : linéaments principales relevés par la géophysique

II.2. Application de la géophysique sur la structure en graben d'Ain Sidi Youssef :

Plusieurs études géologiques et structurales ont interprétées la zone de Ain Sidi Youssef en un demi Graben à pendage NW et s'ouvrant vers le NE. L'approche proposée consiste en une prospection géophysique multi-méthode pour confirmer ou infirmer cette hypothèse. Cette prospection est basée, en premier lieu, sur la réalisation d'un profil de 5 sondages électriques permettant de reconnaître le sous-sol et montrant l'évolution des épaisseurs et des résistivités des formations géologiques.

Dans un deuxième temps deux profils de traîné électrique ont été réalisés sur les bordures de la structure, et en dernier lieu la réalisation d'un profil de tomographie de résistivité avec un dispositif dipôle-dipôle et un espacement de 5m inter-électrodes, ce qui permet d'imager en 2D l'évolution des structures et des résistivités.

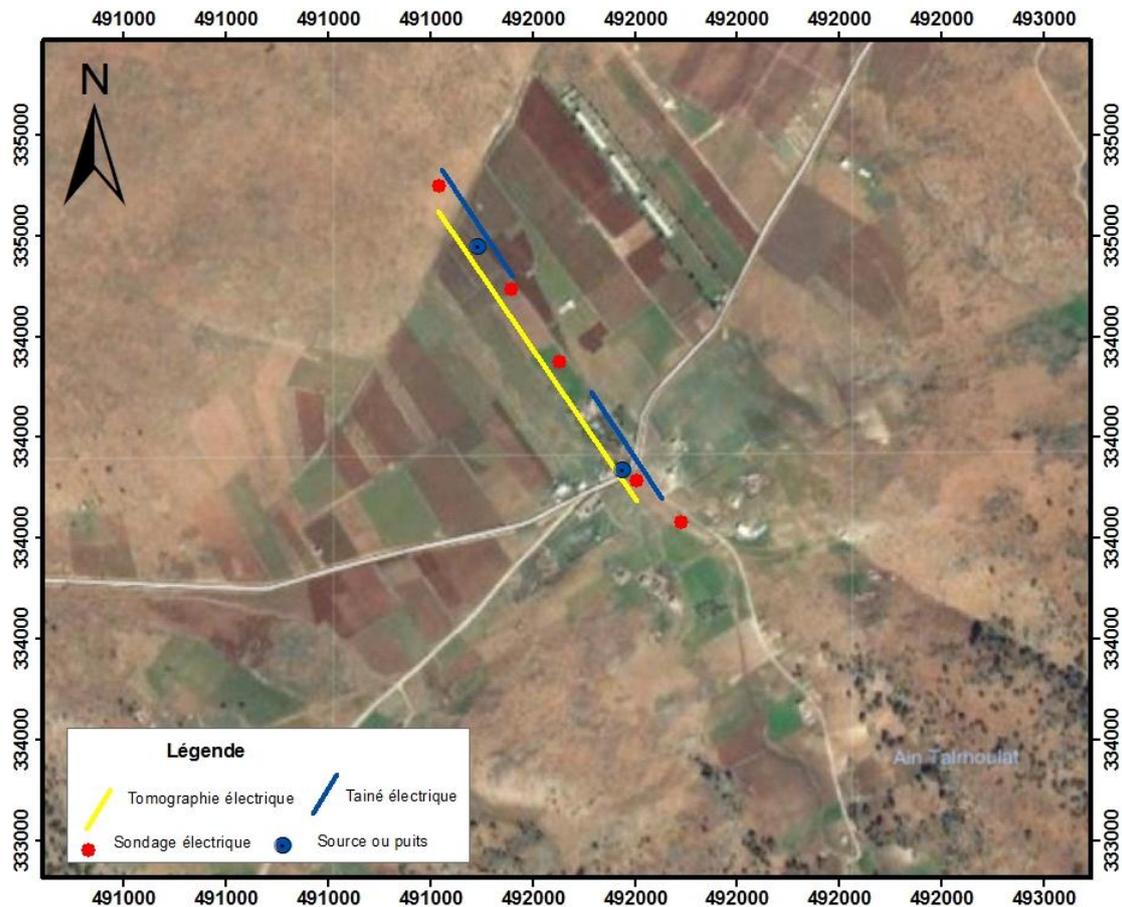


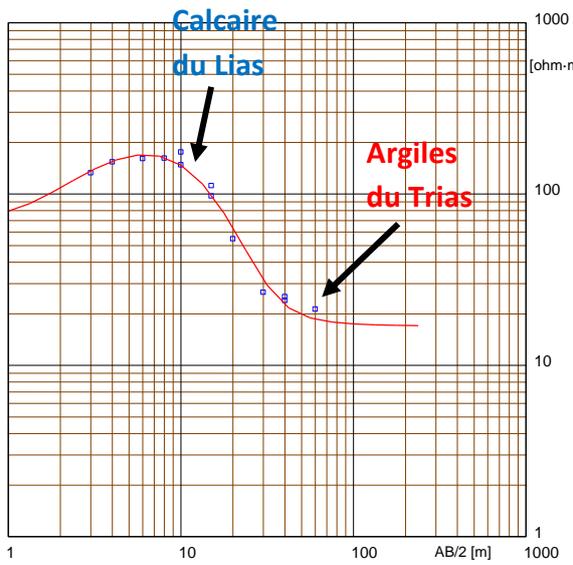
Figure 79 : implantation des mesures géophysique sur image satellitaire

II.2.1. Analyse des sondages électriques

Les sondages ont été effectués perpendiculairement à la structure pour mettre en évidence les principales variations en profondeur.



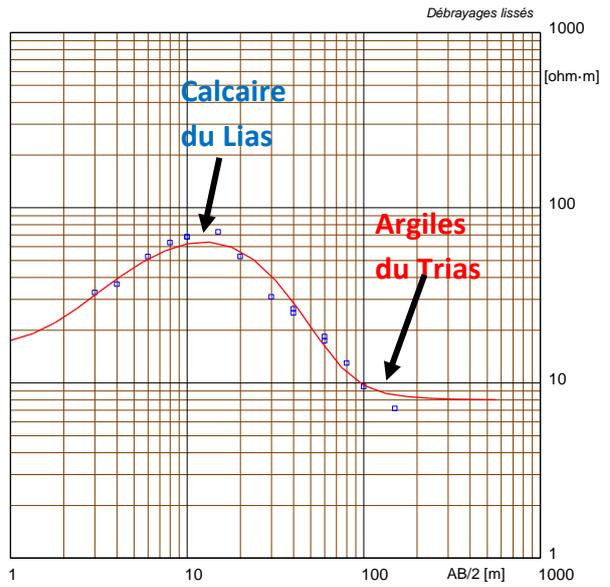
Sondage électrique Schlumberger - SE1.WS3



Situation du SE X = 492007 Y = 333808 Z = 1056 Azim = NE-SW

Modèle			
Résistivité	Epaisseur	Profondeur	Altitude
[ohm-m]	[m]	[m]	[m]
70	1		1056
360	3	1	1055
30	7.5	4	1052
17		12	1044

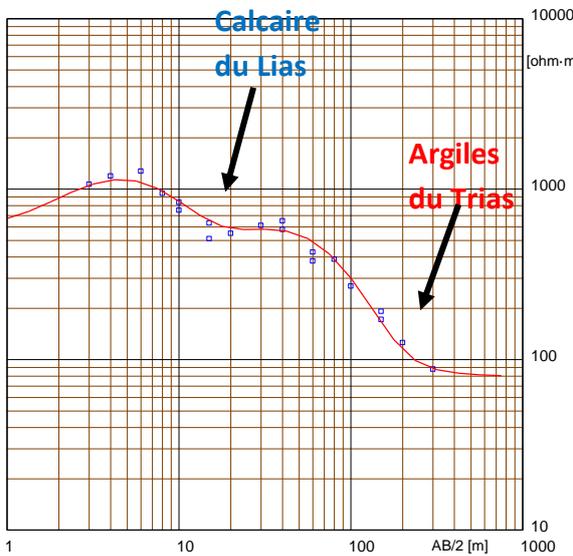
Sondage électrique Schlumberger - SE2.WS3



Situation du SE X = 499488 Y = 346278 Z = 1034 Azim = NE-SW

Modèle			
Résistivité	Epaisseur	Profondeur	Altitude
[ohm-m]	[m]	[m]	[m]
16	1.3		1034
220	3	1.3	1032.7
27	15	4.3	1029.7
8		19	1015

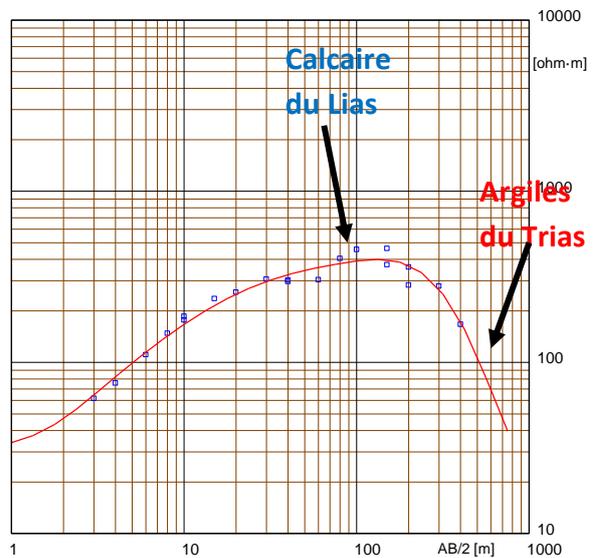
Sondage électrique Schlumberger - SE3.WS3



Situation du SE X = 491771 Y = 334279 Z = 1024 Azim = NE-SW

Modèle			
Résistivité	Epaisseur	Profondeur	Altitude
[ohm-m]	[m]	[m]	[m]
600	1		1024
3000	1.4	1	1023
400	9	2.4	1021.6
1000	15	11	1013
300	25	26	998
80		51	973

Sondage électrique Schlumberger - SE4.WS3



Situation du SE X = 499488 Y = 346278 Z = 1009 Azim = NE-SW

Modèle			
Résistivité	Epaisseur	Profondeur	Altitude
[ohm-m]	[m]	[m]	[m]
31	1.3		1009
521	5	1.3	1007.7
354	6	6.3	1002.7
465	14	12	997
237	18	26	983
1069	40	44	965
200	70	84	925
20		154	855

Sondage électrique Schlumberger - SE5.WS3

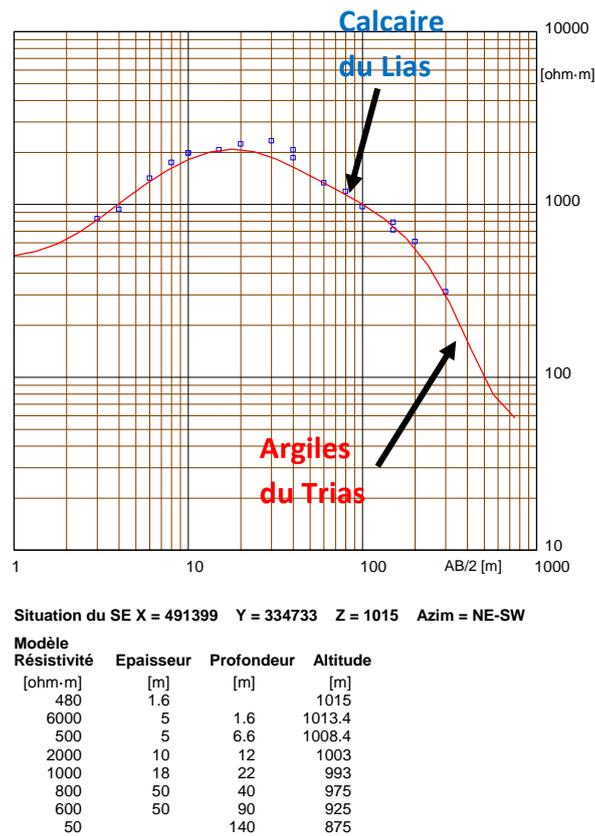


Figure 80 : courbes et modèles des sondages électriques SE1, SE2, SE3, SE4 et SE5

Le traitement et l'interprétation de l'ensemble des sondages électriques montre effectivement une grande variation des épaisseurs et des résistivités des niveaux électriques entre la bordure et le centre de la structure ; en effet, le sondage électrique SE1 situé plus à l'Est a permis de montrer que les argiles rouges du Trias comportées en substratum conducteur sont moins profondes, par contre au cœur de la structure ces niveaux deviennent plus profonds surtout au niveau du sondage SE4 à l'Ouest.

Et pour bien suivre cette évolution nous avons réalisé une coupe géoélectrique (figure 80) par corrélation entre les cinq sondages, ce qui permet de montrer l'existence de failles ou discontinuités électriques.

Nous constatons sur cette coupe :

- l'amincissement de la couche calcaire entre les sondages SE1 et SE2,
- le changement brutal de l'épaisseur de cette couche entre les sondages SE2 et SE3 ce qui permet de supposer l'existence d'une faille ; cette faille de direction SW-NE, serait responsable de la résurgence d'Ain Sidi Youssef ;
- l'augmentation de l'épaisseur des calcaires entre les sondages SE3 et SE4 probablement suite à l'existence d'une faille ;

- l'absence de discontinuité entre SE4 et SE5 et au de la de SE5

En conclusion nous pouvons infirmer l'existence d'une structure en demi graben avancée et prouvons la structure en marche d'escaliers en direction du NW.

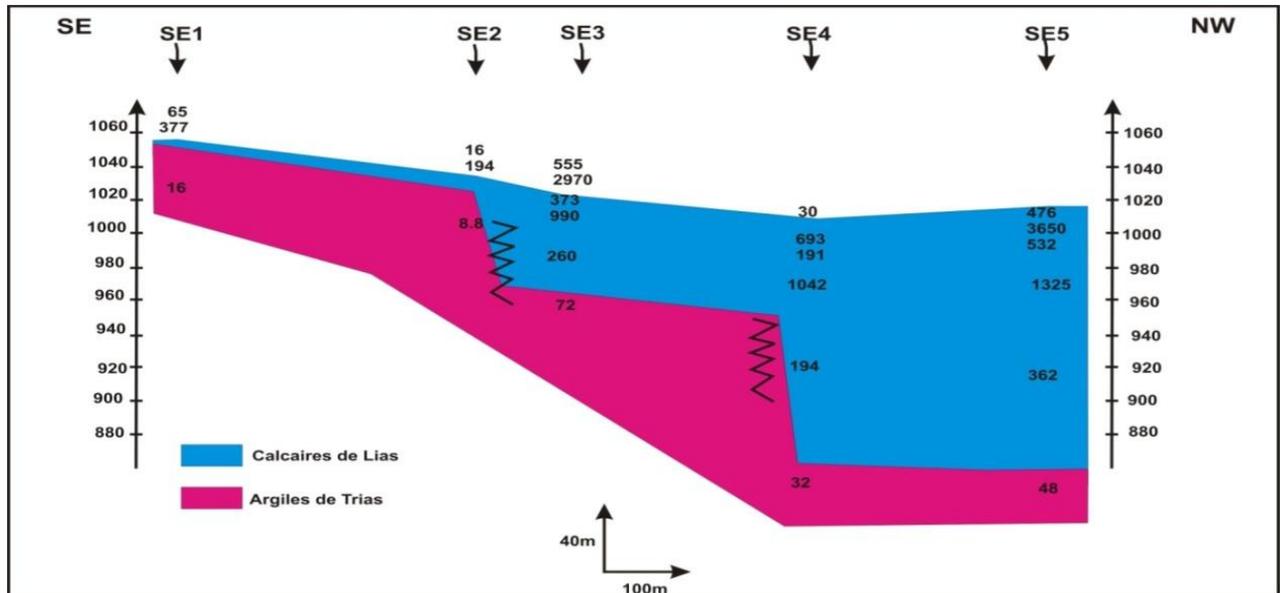


Figure 81 : coupe géo-électrique entre les sondages réalisés

Pour vérifier les discontinuités relevées par la coupe géo-électrique nous avons réalisé deux profils de trainé électrique.

II.2.2. Analyse des profils de trainé électrique

Deux profils de trainé électrique ont été effectués de part et d'autre de la coupe, le premier profil est réalisé plus à l'Est entre les sondages SE1 et SE3 alors que le deuxième est réalisé vers l'Ouest, entre les sondages SE4 et SE5.

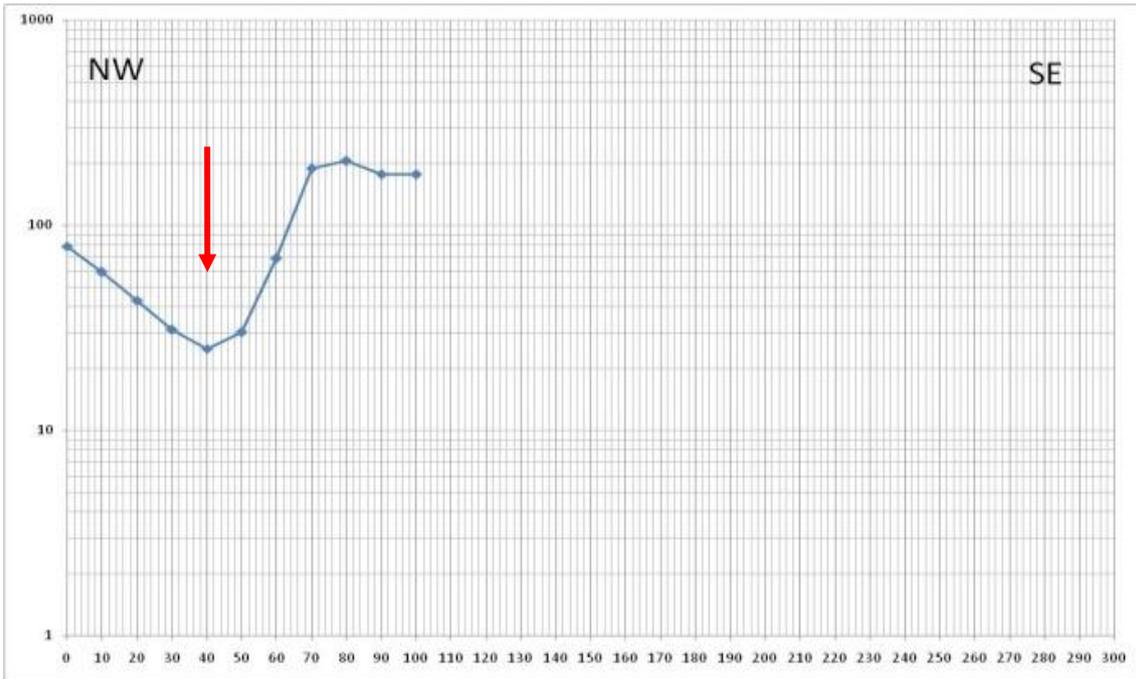


Figure 82 : profil de trainé électrique 1

Le profil 1 est réalisé avec une longueur de ligne AB=100m vue la faible épaisseur des calcaires ; ce profil montre clairement la présence d'une anomalie électrique négative correspondant à la faille relevée par la coupe précédente (faille de Sidi Youssef).

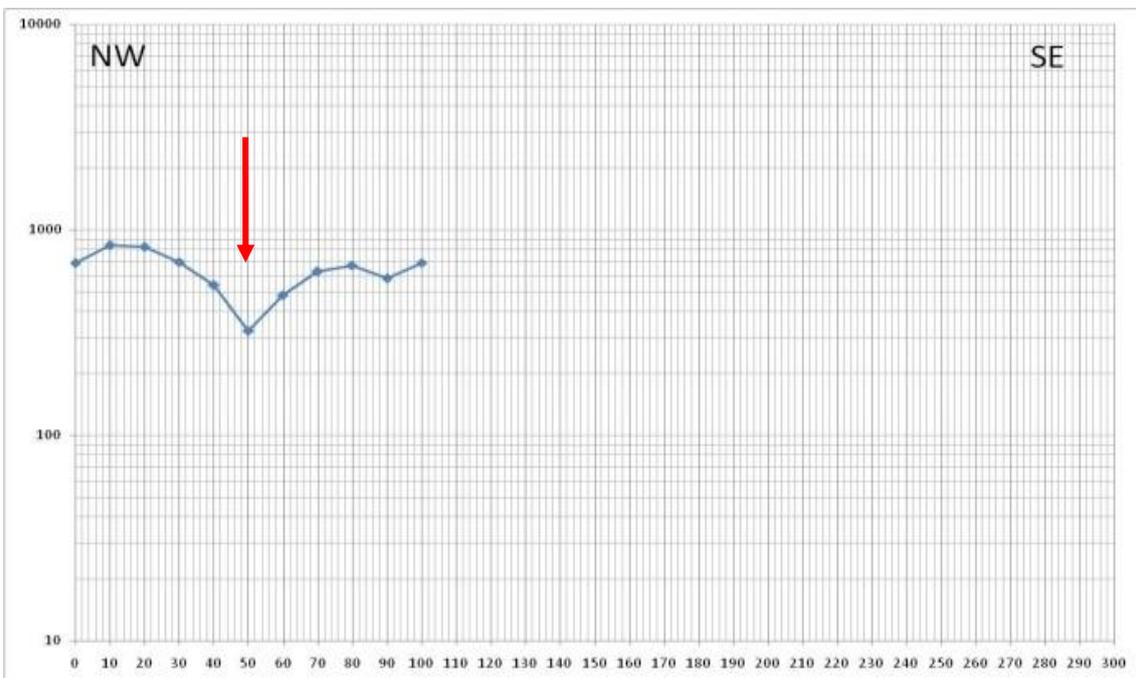


Figure 83 : profil de trainé électrique 2

Le profil 2 est réalisé avec une longueur de ligne AB=200m vue la grande épaisseur des calcaires dans cet endroit, sur ce profil nous avons constaté l'augmentation de la résistivité électrique par rapport au précédent et la présence d'une petite variation qui peut correspondre à une fracture affectant la couche calcaire.

En plus de ces résultats nous avons pu réaliser un profil de tomographie électrique le long de la coupe géoélectrique pour avoir une imagerie 2D de la structure.

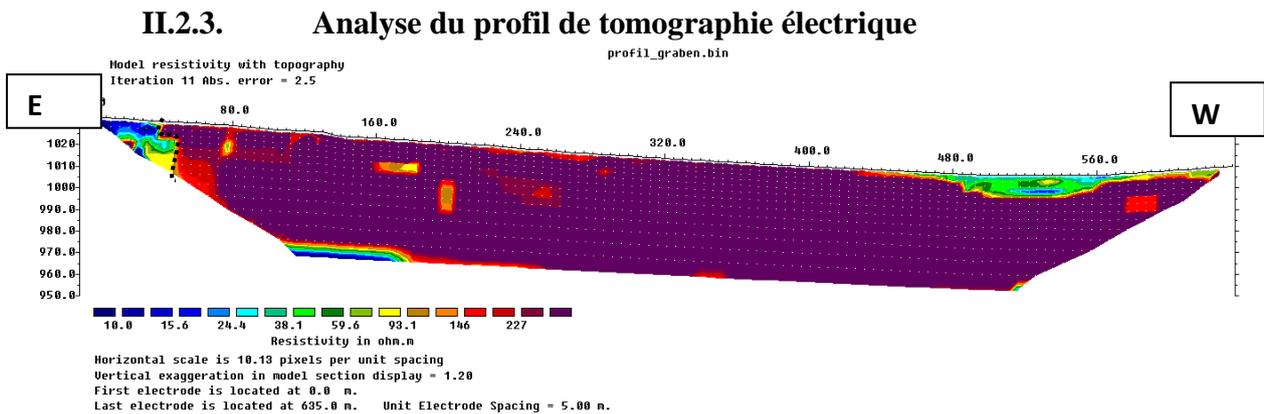


Figure 84 : section du profil tomographique

La section du profil tomographique n'est pas en faveur d'une structure en graben puisqu'elle montre dans l'extrémité Ouest un plongement régulier de la structure en direction de l'Est, plongement qui est perturbé à l'extrémité Est par la présence de la faille de Sidi Youssef à l'origine de la remontée du compartiment Est.

III. Conclusion

Le traitement et la réinterprétation des données aéromagnétiques nous a permis d'identifier les grandes failles affectant le causse d'Agouraï, et dont les directions épousent en gros celles des grandes failles cartographiées sur les cartes géologiques d'El Hajeb et d'Agouraï au 1/100 000. La direction principale mise en évidence par la rosace directionnelle issue du traitement de ces données magnétiques constitue une des directions préférentielles des écoulements des eaux souterraines depuis le causse vers le bassin de Saïss ; ces écoulements sont orientés vers le complexe sourcier d'Ain Maarouf et Ain Boujaoui, situé au Nord du causse.

L'étude géophysique par méthode électrique dans les différentes zones du causse a permis de mettre en évidence l'existence de discontinuités électriques locales de direction généralement NNW qui peuvent être interprétées en termes de failles et dont les directions coïncident avec celles mise en évidence par le traitement des données aéromagnétiques.

**PARTIE III : HYDROGEOLOGIE,
HYDROCHIMIE ET CONTRIBUTION A
L'ETUDE DE LA QUALITE**

Chapitre 1 : HYDROGEOLOGIE ET HYDROCHIMIE

I. Hydrologie et hydrogéologie :

II.1. Hydrologie :

Au pied du causse calcaire d'Agouraï de nombreuses sources d'eau avec des débits importants, constituent depuis longtemps des sources d'alimentation en eaux souterraines et superficielles du bassin de Saïss.

D'une manière générale, le Causse Moyen Atlasique connaît un réseau hydrographique moins développé vu sa nature géologique ; en outre, le causse d'Agouraï lui aussi a un réseau peu développé, il n'est pas traversé par aucun cours d'eau majeur, et la carte de la figure 85 de l'extraction de ce réseau à partir du MNT, nous montre qu'il est composé essentiellement par des Chaabas et des petits affluents, des vallées qui sont sèches toute l'année même en période des pluies ; ces affluents se déversent généralement dans l'oued R'dom, oued Boufekrane et oued El kell.

La limite SE du causse du fait qu'elle est formée par les barres de calcaires liasiques perchés, constitue en elle-même une ligne de partage des eaux superficielles ; en effet le réseau hydrographique au NW de cette limite a une direction N alors que vers le SE il présente une orientation vers le Sud en direction de la plaine schisteuse d'Adarouch.

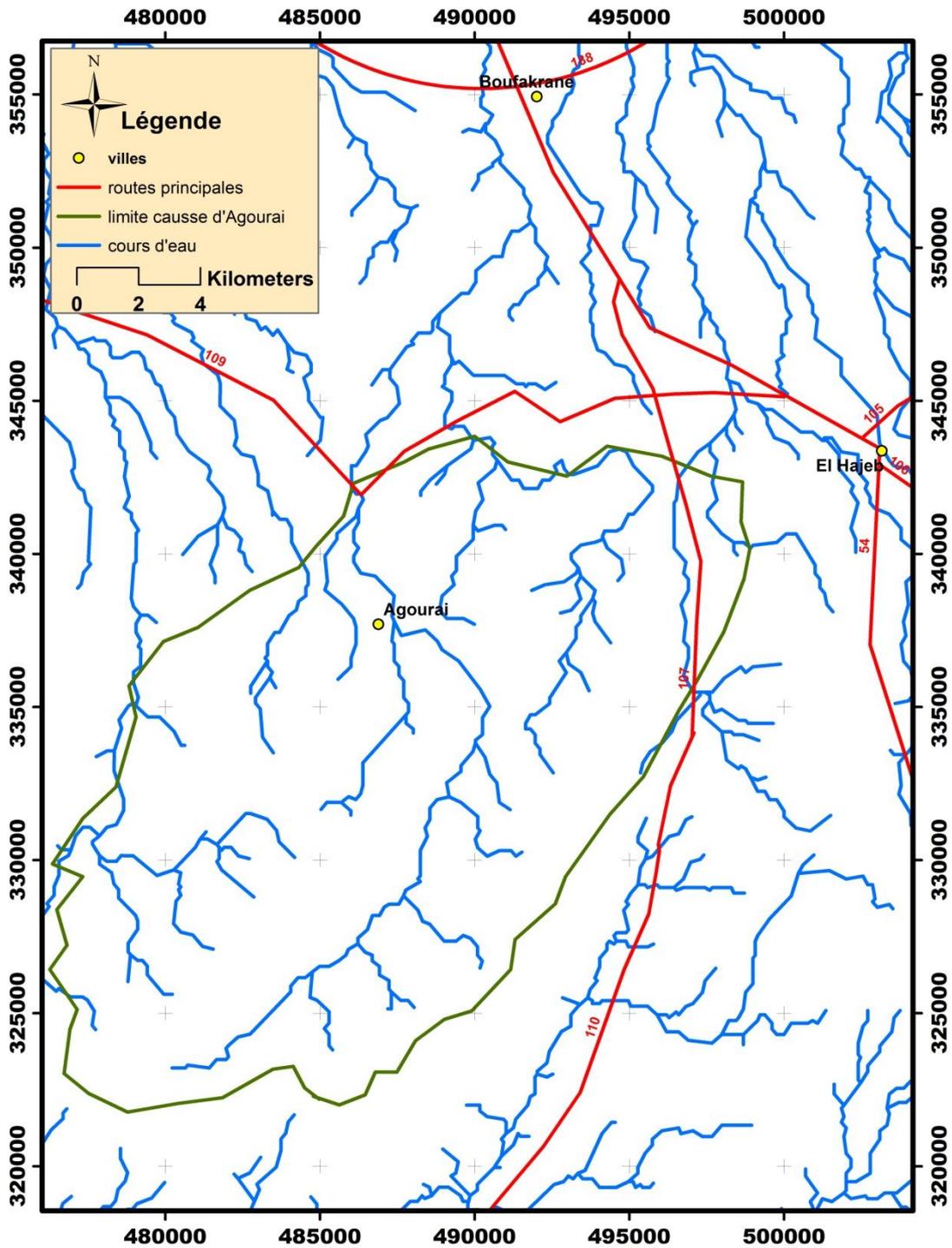


Figure 85 : extraction du réseau hydrographique du cause d'Agourai à partir du MNT

II.2. Hydrogéologie :

Le cause d'Agourai, constitue la continuité hydrogéologique vers l'ouest du cause d'El Hajeb-Ifrane avec presque le même schéma hydrogéologique des calcaires dolomitiques du Lias formant le réservoir principal de la région et reposant sur un aquitard formé par les argiles rouges du Trias ; ces calcaires sont caractérisés par une perméabilité contrôlée essentiellement par leur degré de fracturation.

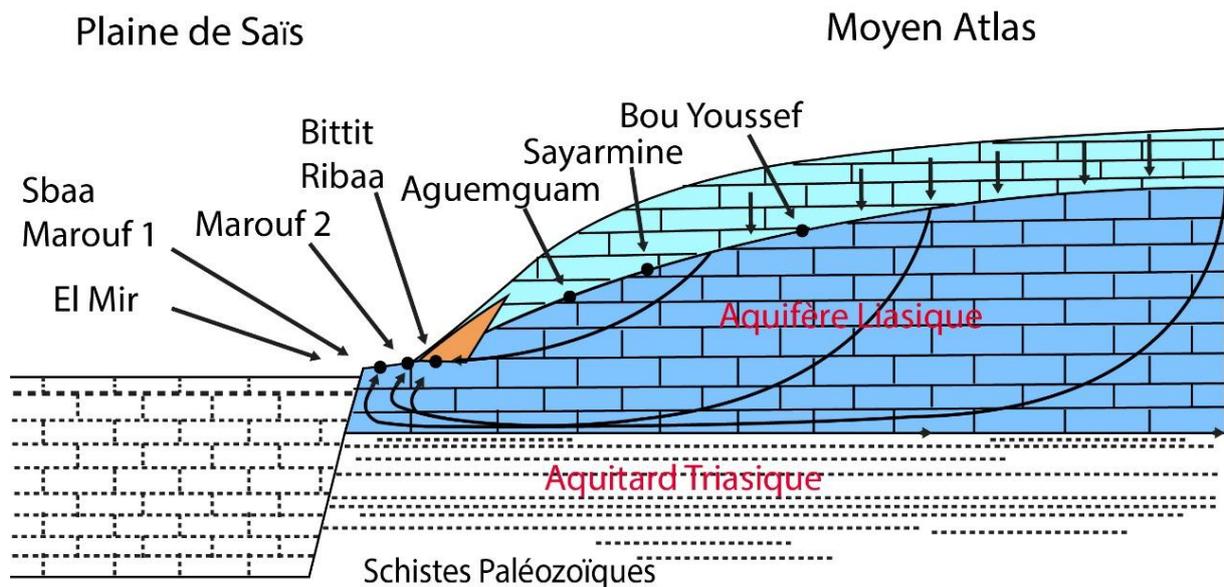


Figure 86 : coupe hydrogéologique expliquant l'écoulement vers le bassin de Saïs (Saracco, 2010)

Pour suivre l'extension des calcaires dolomitiques aquifères et leur substratum imperméable le long du causse d'Agourai, nous avons pu tracer deux coupes par corrélation entre les forages suivant deux directions, une N-S et l'autre NW-SE.

La première coupe (figure 86) de direction N-S relie entre sept forages dont les profondeurs sont données par le tableau 22 :

Tableau 22 : profondeur des forages de la coupe 1

N° IRE des forages	Profondeur en mètre
769	125
854	141
PBF3/22	466
823	163
1076	105
1346	121
1193	135

Cette coupe illustre l'évolution de l'épaisseur des calcaires qui est très variable ; en effet elle varie entre 180m au maximum au Nord, au forage 1193 et 00m au centre de la coupe, au forage 823. Cette disparition locale permet de dire que cette couche calcaire est discontinue dans le plateau ce qui rend son réservoir d'une importance variable.

La deuxième coupe (figure 87) relie entre six forages de direction NW-SE :

Tableau 23 : profondeur des forages de la coupe 2

N° IRE des forages	Profondeur en mètre
1191	76
1198	85
915	603
1077	96
1346	121
604	95

Sur cette coupe nous constatons que la couche calcaire s'amincit à disparaître de part et d'autre du causse et devient épaisse au centre ;

D'après avoir défini et suivre d'une manière générale la variation de l'épaisseur de ce réservoir qui varie de 23.4 à 46.8 km³, il faut signaler que son importance et sa puissance dépend du degré de fracturation et karstification de ces calcaires qui vont traiter par la suite.

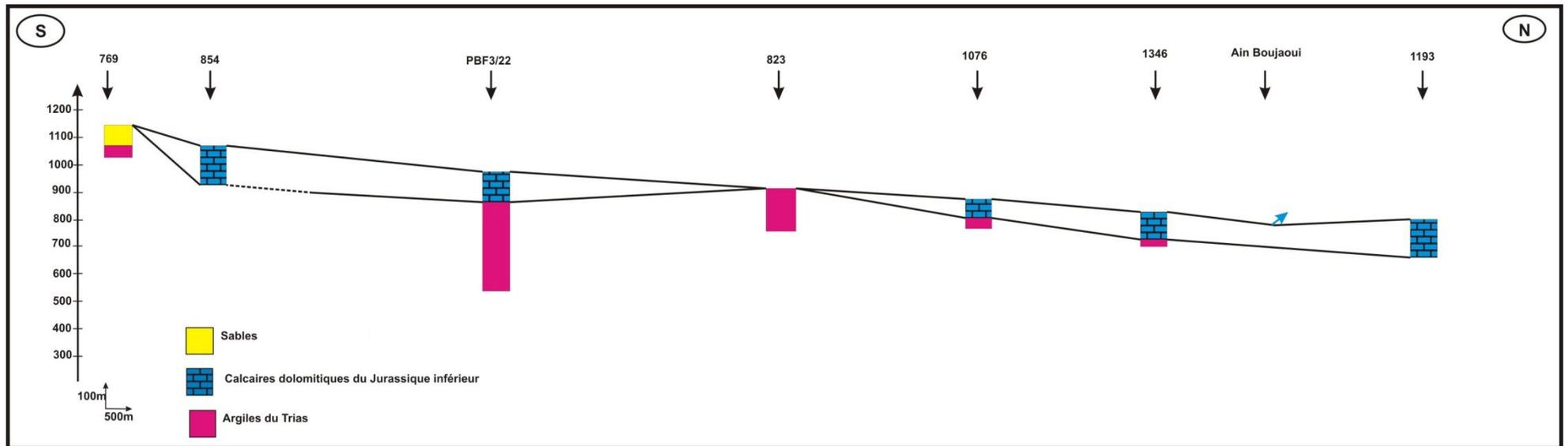
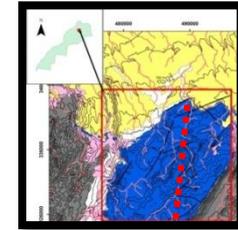


Figure 87 : coupe corrélatrice entre des forages dans le causeway d'Agourai

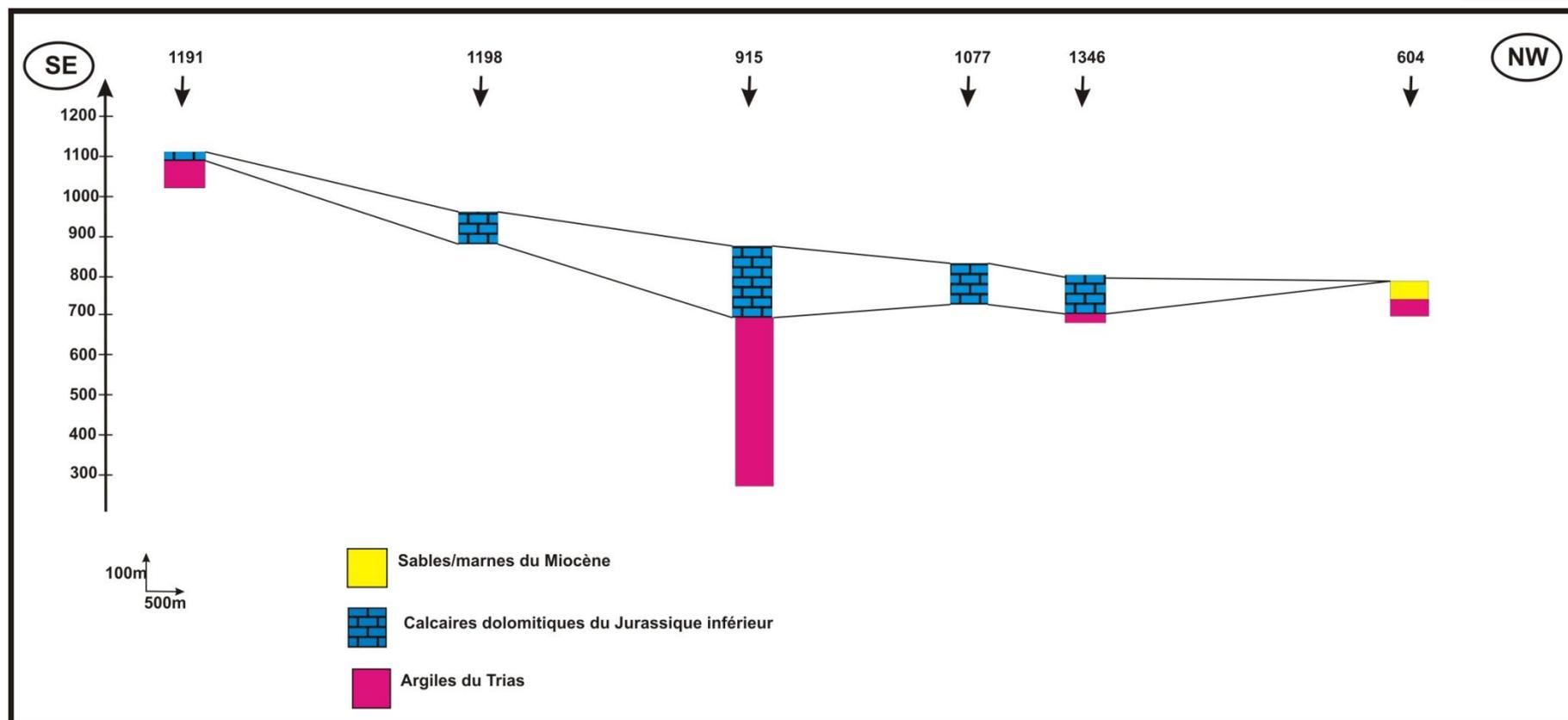
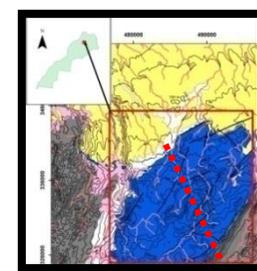


Figure 88 : coupe corrélatrice entre des forages dans le causse d'Agourai

A la base des données relevées lors d'une campagne en avril 2017, nous avons pu élaborer une carte piézométrique (figure 89) ; en effet cette carte montre que le niveau piézométrique varie dans le causse de la cote 680m à 1160m, sachant que l'altitude est entre 750m et 1250m ; les valeurs minimales sont concentrées au Nord du causse, au niveau du complexe sourcier Ain Maarouf - Ain Boujaoui, ce qui permet de déduire un sens d'écoulement de direction généralement NNE-SSW. Les écoulements se font généralement le long des grandes discontinuités structurales (failles, réseau de fractures).

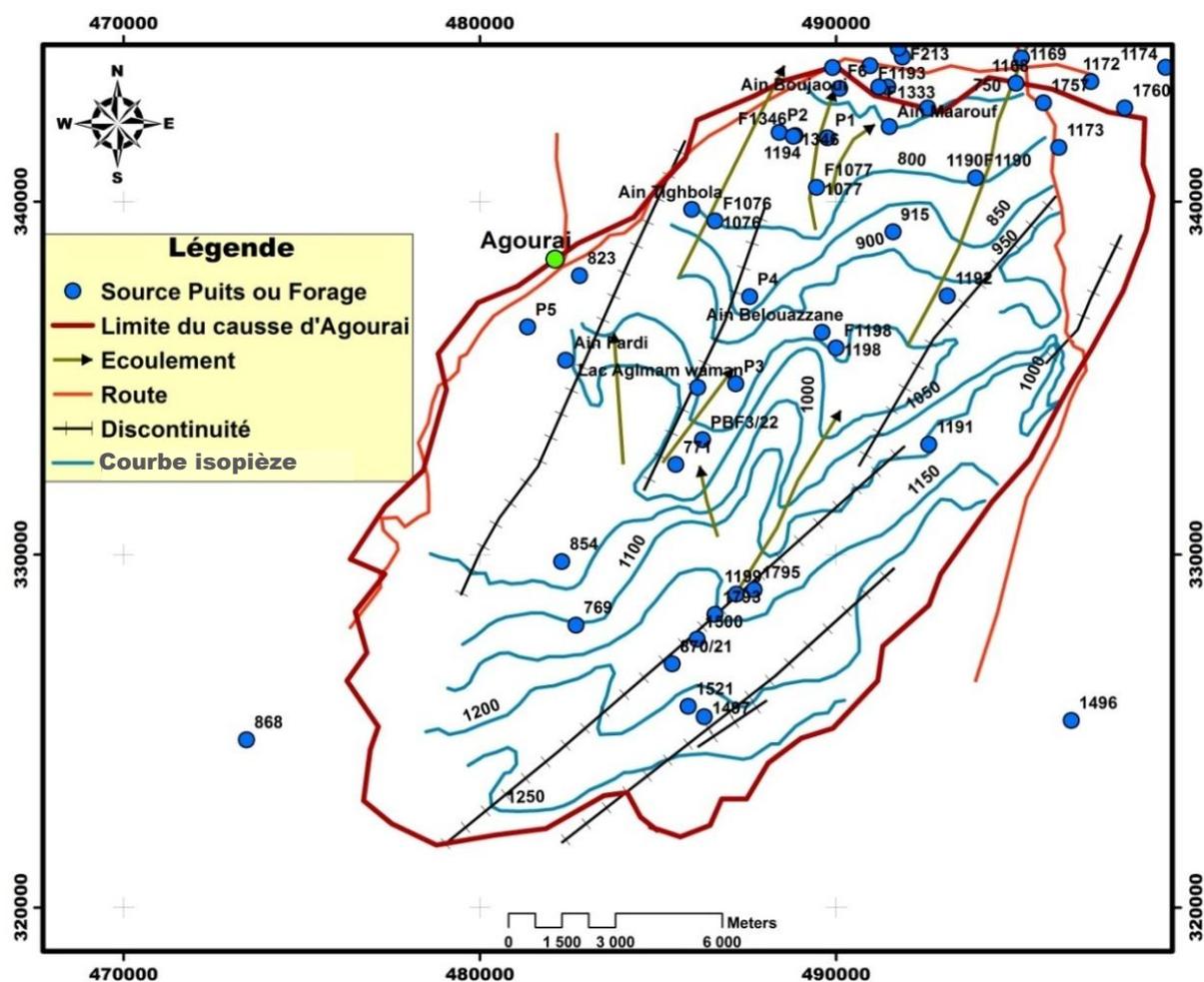


Figure 89 : carte piézométrique dans le causse d'Agourai (campagne Avril 2017)

II. Hydrochimie

II.1. Introduction

Le développement de l'agriculture industrielle à l'amont des sources situées au pied du causse d'Agourai et l'utilisation intensive des engrais et des pesticides constituent un risque potentiel

de la dégradation de la qualité physicochimique et biologique des eaux de ces sources. Les formations calcaires constituent en général de bons réservoirs d'eaux souterraines offrant une eau de bonne qualité physico-chimique, c'est le cas des calcaires liasiques des causses moyen atlasiques. L'étude de la qualité des eaux par le suivi périodique des paramètres physico-chimiques des sources et des points d'eaux représentatifs, permet d'évaluer le degré d'infiltration des produits chimiques utilisés en agriculture dans la nappe et qui peuvent constituer un risque de pollution très potentiel. Ce suivi a consisté à l'échantillonnage et l'analyse chimique des eaux de quatre sources et quatre puits bien répartis sur le causse d'Agourai.

L'objectif de notre étude est la caractérisation hydrochimique des eaux du causse d'Agourai à travers le suivi hydrochimique d'un certain nombre d'échantillons sur le causse et à son pied.

L'étude hydrochimique des eaux souterraines, basée sur quatorze paramètres physico-chimiques, s'est déroulée pendant deux périodes, sèche et humide. Elle a intéressé huit stations géographiquement bien réparties, la source Ain Belouazzane, les puits P3 et P4 se trouvant en amont du causse, alors que la source Ain Boujaoui se trouve à l'extrémité avale, le reste des stations se situent au milieu du causse et le tous répartis sur un axe orienté en gros N-S, parallèle au grand axe d'écoulement (figure 89).



Figure 90 : situation des stations de mesure sur image satellitaire

La méthodologie de travail lors de cette campagne hydrochimique consiste à prendre des échantillons d’eaux pour les stations de mesure dans des flacons bien propres et à réaliser des analyses in situ et au laboratoire afin de déterminer les paramètres physicochimiques permettant d’évaluer la qualité des eaux souterraines dans le causse d’Agourai, et les eaux transférées vers le Bassin de Saïs.

II.2. Variation spatio-temporelle de la température

La température de l’eau joue un rôle important, elle accroît les vitesses des réactions chimiques et biochimiques d’un facteur 2 à 3 pour une augmentation de température de 10 degrés Celsius (°C) (De Villers, 2005). La mesure de la température est indispensable pour l’interprétation ou le traitement d’autres paramètres. Ainsi, la saturation des gaz dissous est fonction de la température et la mesure du pH requiert la connaissance de la température.

D’après la figure 90 représentée ci-dessus, on constate généralement une faible variation de la température au niveau des différents points d’eau de l’amont en aval, elle varie entre 15,2 °C mesuré au puits P4, et 19.9 °C à la source Ain Maarouf en hiver.

En période estivale, la température maximale est mesurée au niveau de la source Ain Belouazzane (22.6°C), et la minimale mesurée au puits P2 (19.7°C).

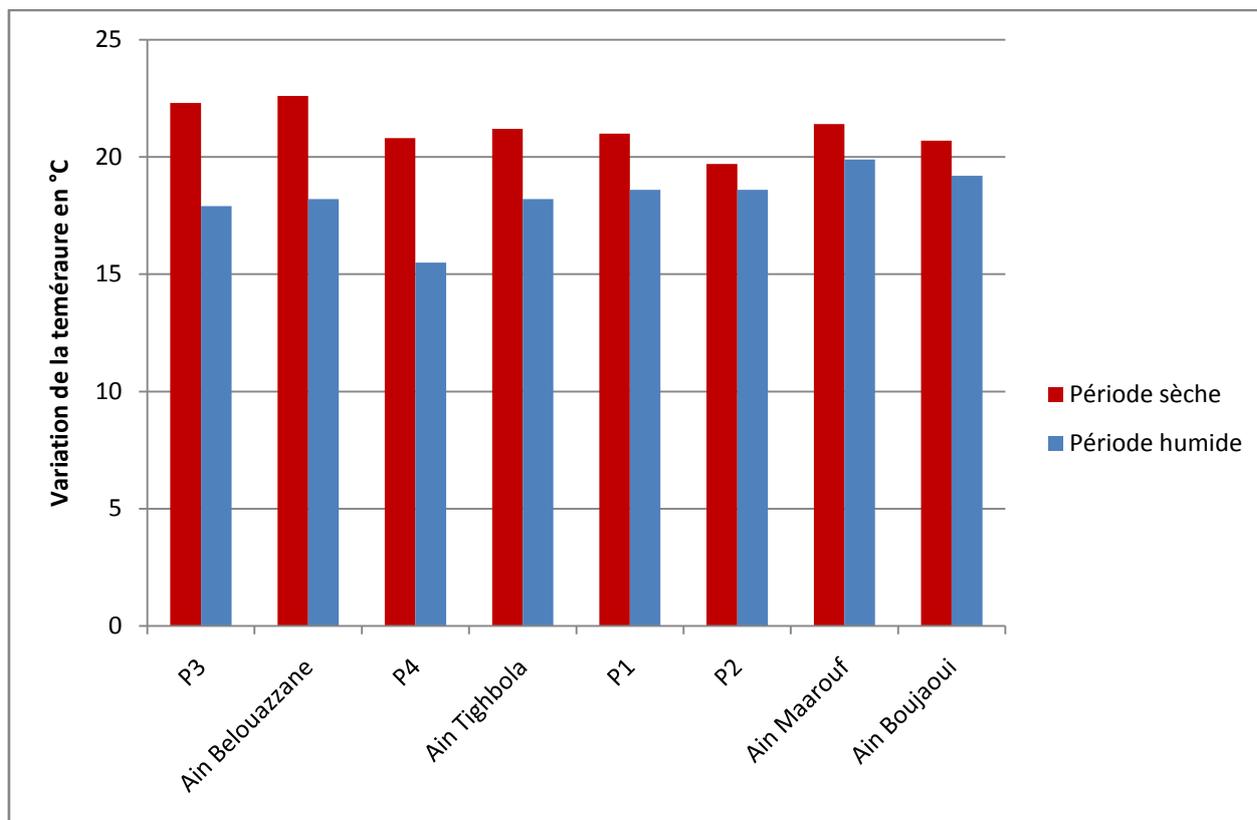


Figure 91 : variation spatio-temporelle de la température

II.3. Variation spatio-temporelle du pH

Le Potentiel d'Hydrogène (pH) est paramètre très important pour déterminer l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques ; généralement les eaux potables ont des valeurs de pH qui varient entre 7 et 8.5. Les eaux qui ont un pH inférieur à ces valeurs sont considérées comme des eaux de plus en plus acides, alors que les eaux qui ont le pH supérieur à 8.5 sont considérées des eaux de plus en plus alcalines.

Sur la figure ci-dessous représentant la variation du paramètre pH, nous constatons :

- une légère variation au niveau de tous les points entre la période humide et la période sèche ;
- aucune variation remarquable n'a été enregistrée entre l'amont et du cause ; en effet, les valeurs enregistrées sont comprises généralement entre 7 et 8.5, témoignant que ces eaux sont basiques.

Déjà à la base de ces deux paramètres (T° et pH) nous pouvons avancer que les eaux du cause d'Agouraï sont assez semblables au niveau des stations échantillonnées.

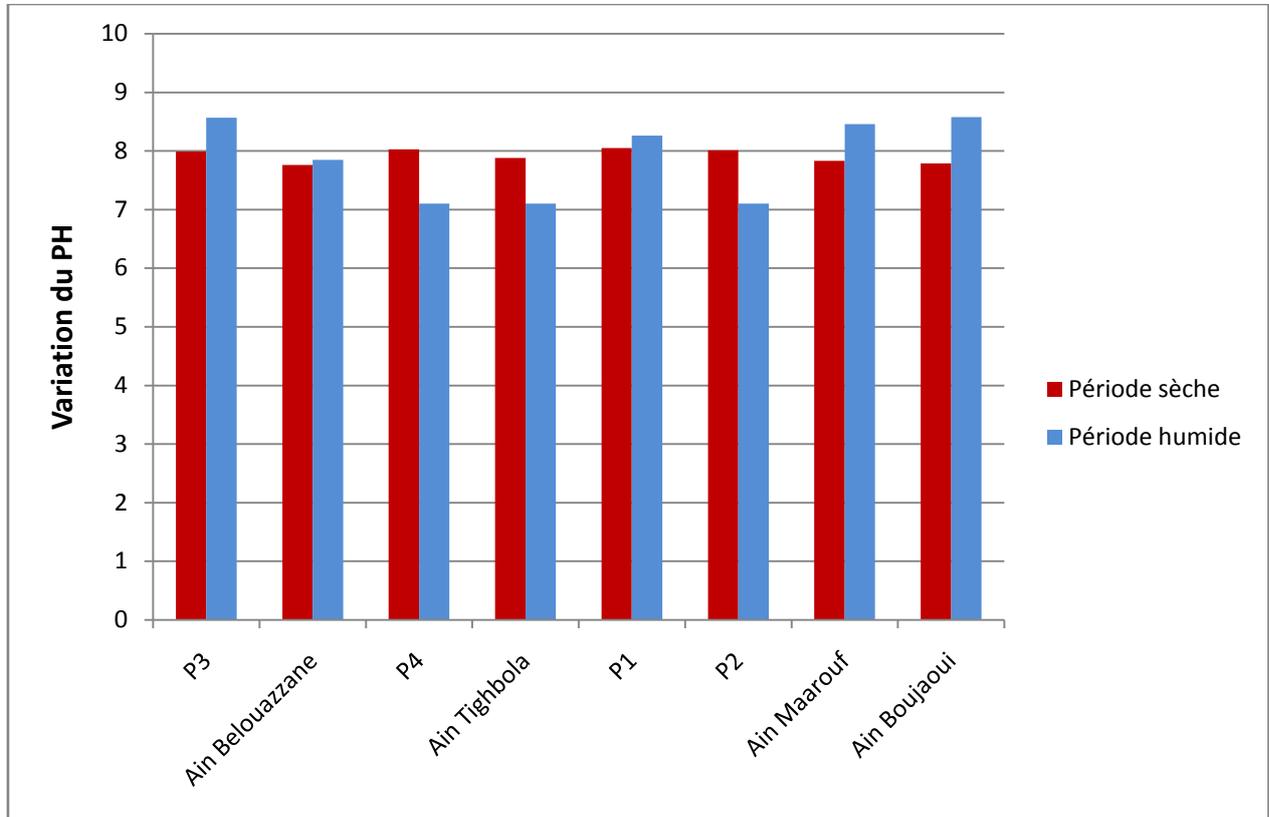


Figure 92 : variation spatio-temporelle du pH

II.4. Variation spatio-temporelle de la conductivité

La conductivité électrique est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs. Par contre, les composés organiques sont de mauvais conducteurs (De Villers 2005). La conductivité électrique standard s'exprime généralement en millisiemens par mètre (mS/m) ou en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) à 20°C . La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et $1500\ \mu\text{S}/\text{cm}$, (De Villers, 2005 ; Abrid, 2009).

Comme le montre la figure 8, la variation de la conductivité est entre $620\ \mu\text{S}/\text{cm}$ comme valeur minimale enregistrée au niveau de la source Ain Tighbola, et $780\ \mu\text{S}/\text{cm}$ comme valeur maximale mesurée à Ain Maarouf, que ça soit pour la période sèche ou humide. A l'exception d'Ain Tighbola une légère augmentation est observée en allant de l'amont vers l'aval du cause.

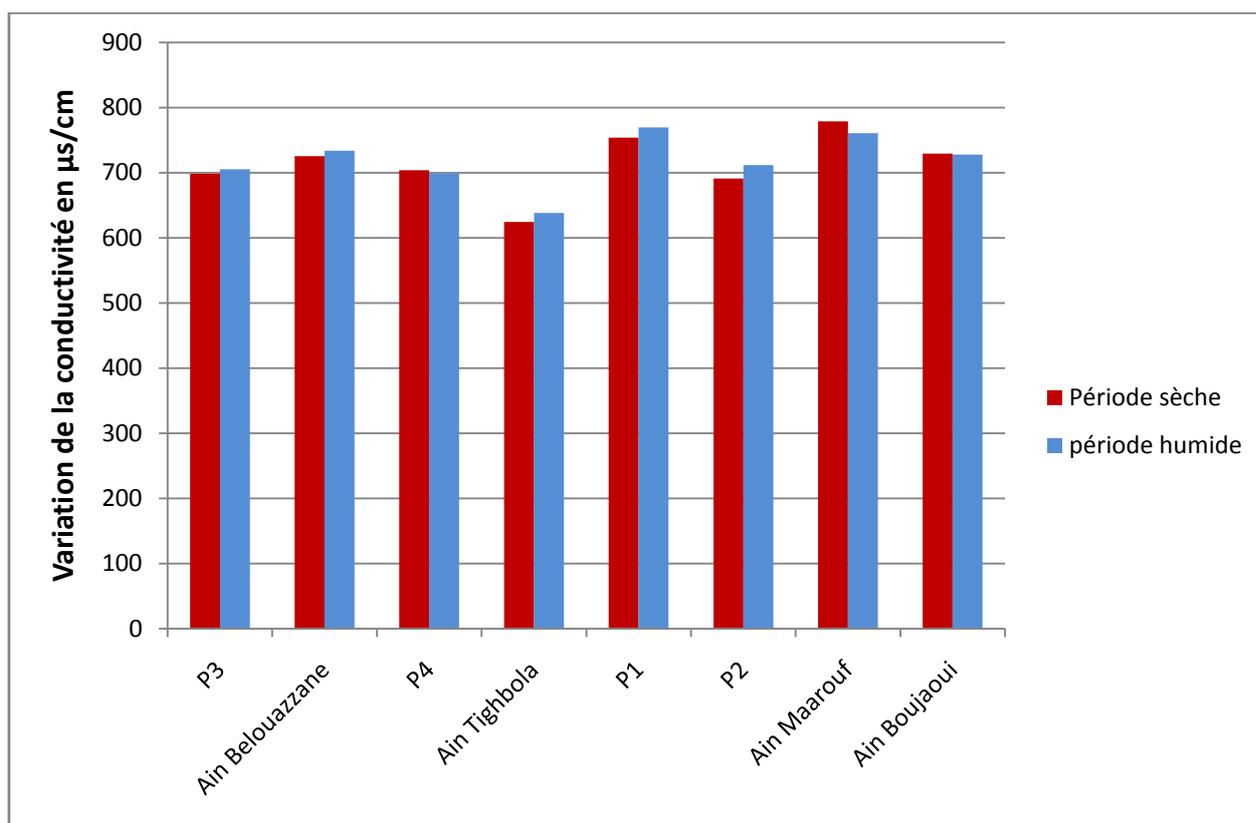


Figure 93 : variation spatio-temporelle de la conductivité

II.5. Variation spatio-temporelle l'ammonium

L'ammonium est la forme d'azote la plus toxique, sa présence dans l'eau est liée aux rejets urbains et industriels dans les oueds qui donnent des concentrations élevées.

Sur l'histogramme de la variation spatio-temporelle de ce paramètre chimique, nous observons que ses valeurs durant la période sèche sont presque constantes autour du 0.5 mg/l ; en revanche, lorsque nous passons en période humide nous remarquons une augmentation importante dans toutes les stations avec une valeur qui arrive jusqu'à 2.3mg/l à Ain Belouazzane. , ces valeurs diminuent généralement de plus en plus en allant de l'amont vers l'aval, ce qui peut s'expliquer par la dilution de cet élément par les précipitations durant l'hiver.

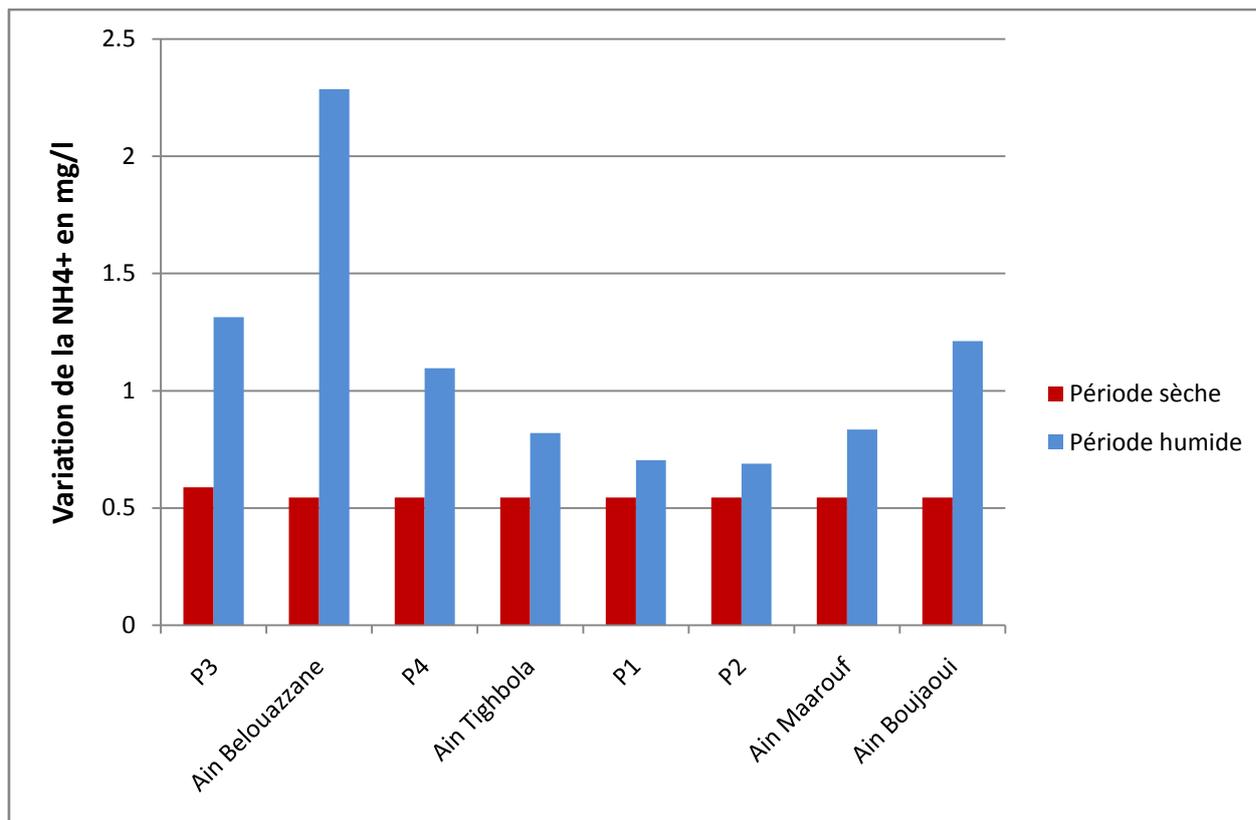


Figure 94 : variation spatio-temporelle l'ammonium

II.6. Variation spatio-temporelle des nitrites

Les nitrites ou azote nitreux, représentent une forme moins oxygénée et moins stable, elle représente la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium, c'est une forme toxique aussi et selon sa degré de présence, les eaux deviennent inutilisables ; dans les normes ce paramètre ne doit pas dépasser 100µg/l. (Badreddinne, 2014)

Au niveau de nos analyses, qui présentent des faibles valeurs, en période sèche et à l'exception d'Ain Tighbola qui enregistre 0.065mg/l, toutes les valeurs de ce paramètre sont inférieures à 0.01mg/l ; tandis qu'en période humide, les nitrites voient une augmentation sur toutes les stations de mesure surtout au puits P1 (0.05mg/l), alors qu'Ain Tighbola la valeur diminue à 0.012mg/l. L'augmentation de NO_2^- entre les deux périodes est expliquée par le lessivage des produits azotés dans le sol et à la décomposition des matières organiques.

Nous avons enregistré une légère augmentation en allant de l'amont vers l'aval, qui peut s'expliquer par le sens d'écoulement qui est dirigé vers le nord.

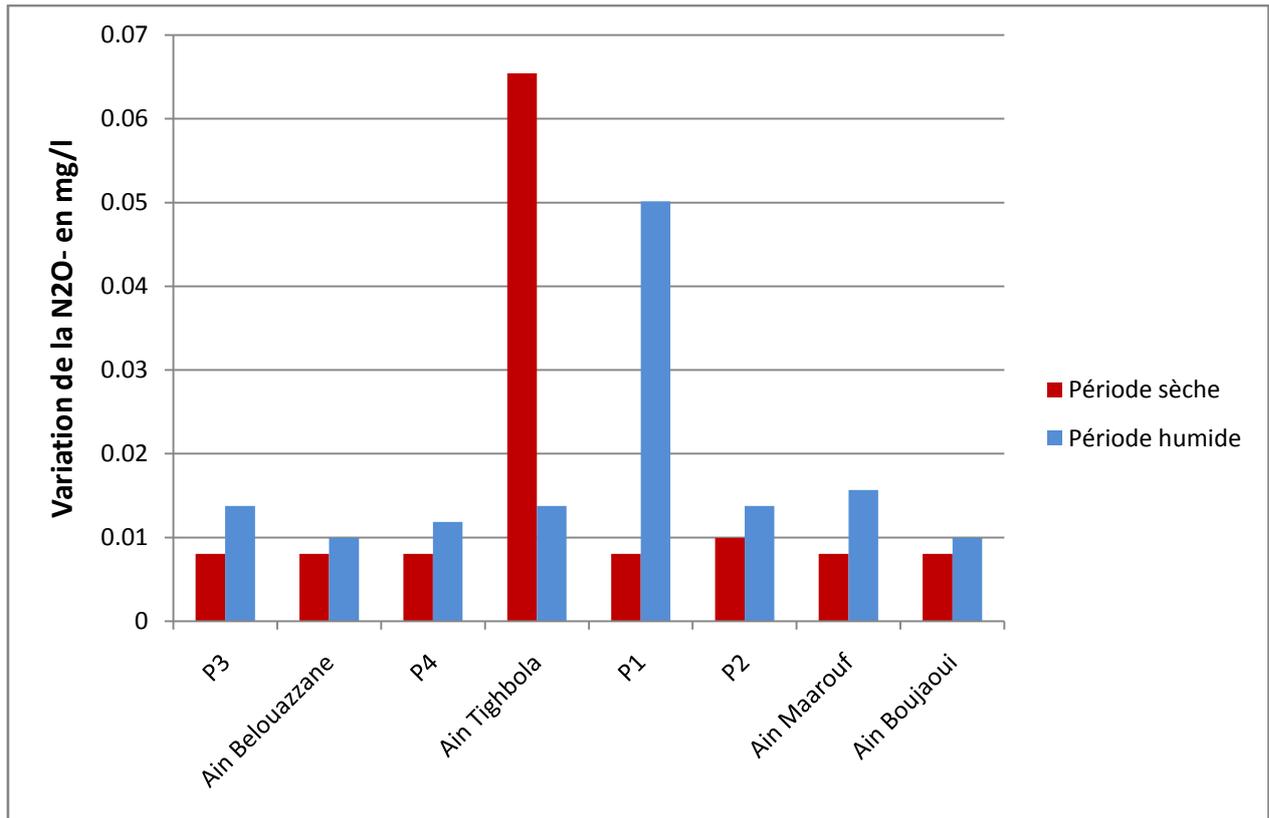


Figure 95 : variation spatio-temporelle des nitrites

II.7. Variation spatio-temporelle des nitrates

Les nitrates NO_3^- représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble, sa présence dans les eaux souterraines est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques, le taux autorisé est de 50 mg/l en NO_3^- (O.M.S, 1994).

Sur la figure 95 qui montre la variation spatiotemporelle des nitrates, nous constatons une augmentation de cet élément en allant de la période estivale à la période hivernale, qui peut s'expliquer aussi par lessivage des produits azotés dans le sol et à la décomposition de la matière organique.

Les valeurs représentées sont généralement faibles aussi bien pour les nitrites que pour les nitrates, ce qui permet de dire que cette région est encore protégée et n'est pas influencée par l'activité agricole ; nous signalons aussi une diminution de ce paramètre en allant de l'amont vers l'aval à partir de la source Ain Tighbola.

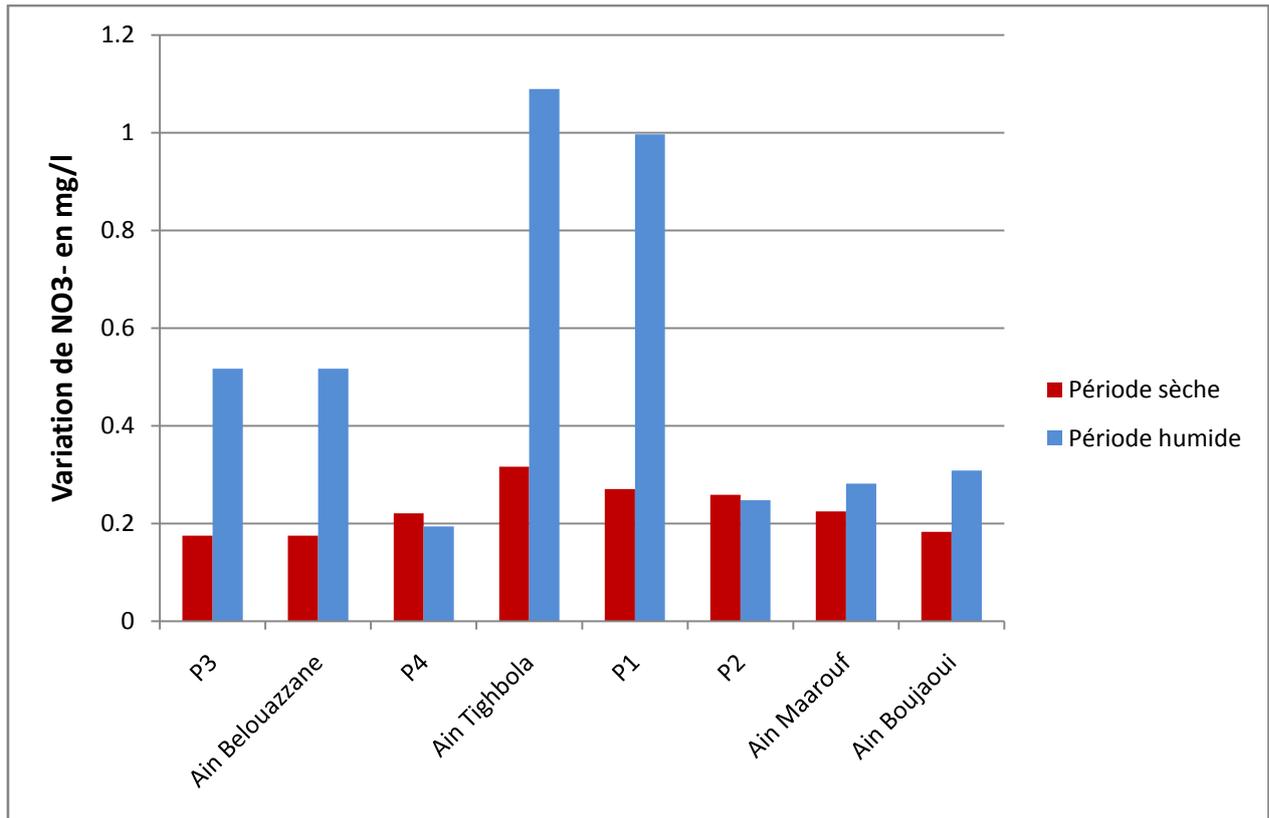


Figure 96 : variation spatio-temporelle des nitrates

II.8. Variation spatio-temporelle des ortho-phosphates

Le phosphate peut se trouver sous différentes formes oxydées, méta HPO_3 , pyro $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ et ortho H_3PO_4 , le phosphore n'est pas toxique pour l'homme ou les animaux et c'est principalement pour ralentir la prolifération des algues dans les milieux aquatiques que la concentration en phosphore doit être limitée (CEAEE, 2010)

Pour notre cas la concentration de cet élément est presque nulle, il ne dépasse pas la valeur de 0.0009mg/l ; durant la période humide, il est presque constant dans toutes les stations à environ 0.00025mg/l , à l'exception de deux stations P1 et Ain Boujaoui qui ont des teneurs supérieures. Durant la période sèche ce paramètre augmente dans trois puits P3, P4 et P1 et à Ain Belouazzane ; il devient constant à 0.00025mg/l dans les autres stations.

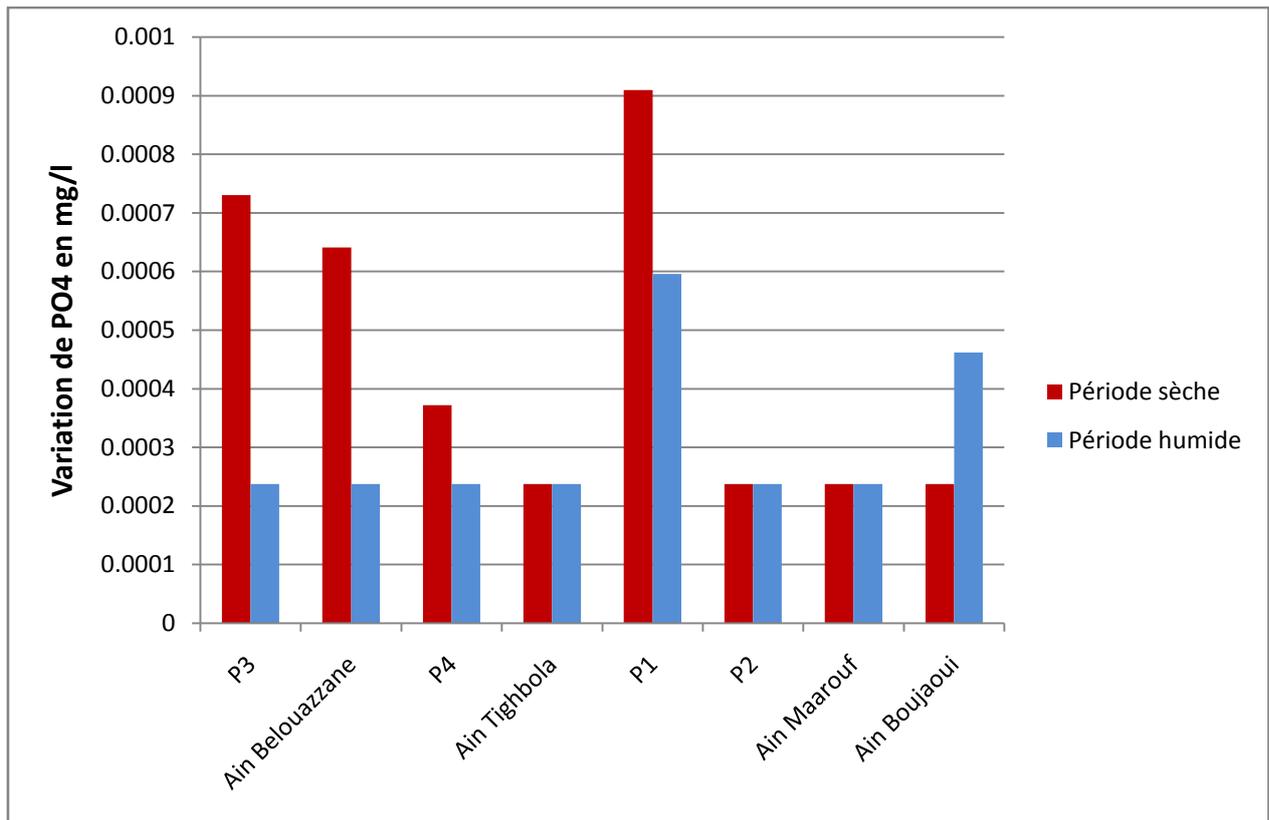


Figure 97 : variation spatio-temporelle des ortho-phosphates

II.9. Variation spatio-temporelle des sulfates

La présence des ions sulfate dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses ce qui entraîne un excès des sulfates au voisinage des terrains gypseux.

Une concentration assez importante a été enregistrée aux différentes stations de mesure, elle varie entre 15 et 61 mg/l ; nous constatons aussi une variation entre les deux périodes, en effet, la période estivale présente des teneurs importantes de sulfates qui sont de l'ordre de 45 à 61mg/l ; par contre la période hivernale présente des faibles valeurs qui varient de 15 à 48 mg/l. Cette variation peut s'expliquer par le taux d'infiltration des éléments chimiques entre les deux périodes, en outre, la présence de ces sulfates dans les stations demande un certain temps d'infiltration. En allant de l'amont vers l'aval nous ne remarquons pas une variation importante de ce paramètre surtout en période sèche, la teneur est presque égale ; par contre, en période humide une diminution est remarquable de part et d'autre de cet axe amont – aval.

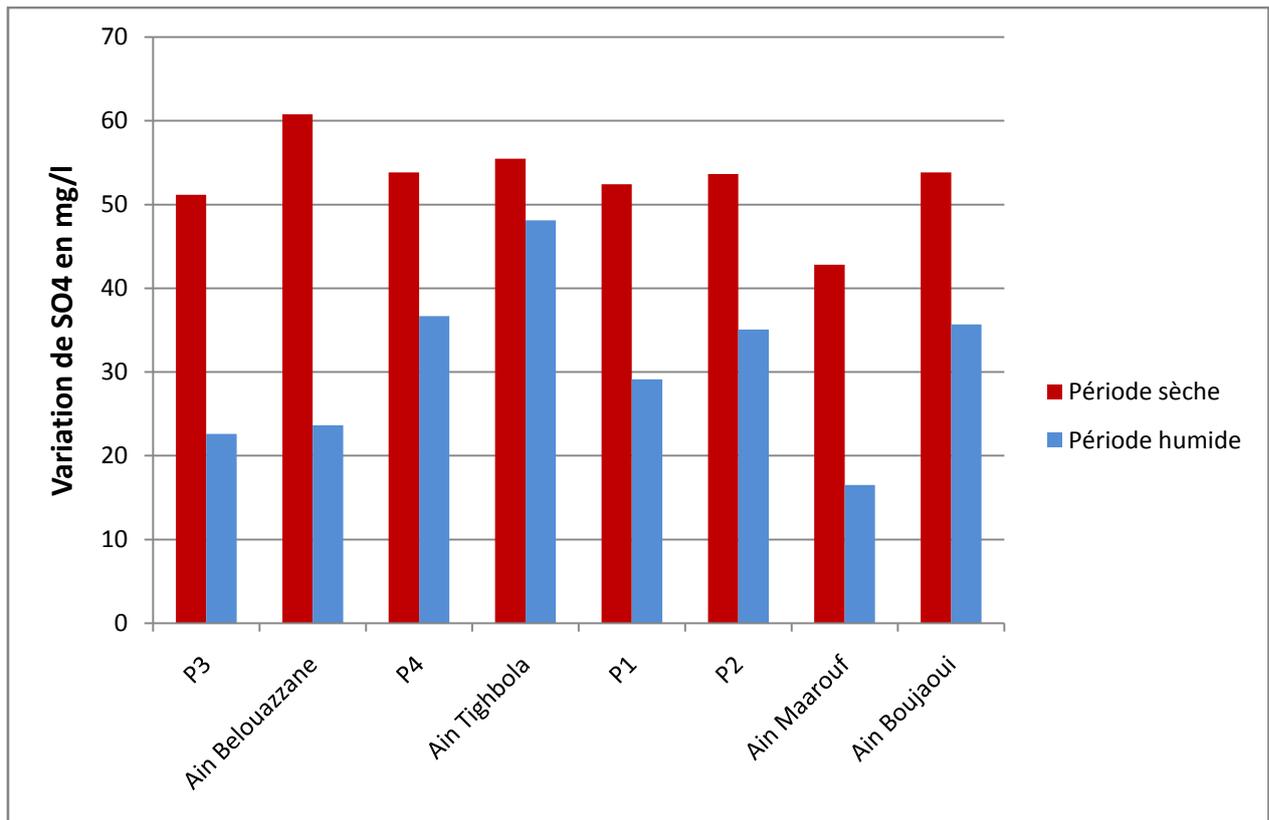


Figure 98 : variation spatio-temporelle des sulfates

II.10. Variation spatio-temporelle de l'oxygène dissous

L'eau contient toujours de l'oxygène dissous dont les concentrations varient avec la température et la pression partielle dans l'atmosphère ; il provient de la diffusion de l'oxygène en surface, de l'aération ou du mouvement de l'eau et de la photosynthèse, environ 3/4 de l'oxygène disponible sur terre sont produit par le phytoplancton.

La variation de l'oxygène dissous dans les différentes stations de mesure représentées dans la figure 98, sont de l'ordre de 0.5 mg/l comme valeur minimale à Ain Tighbola et 8.2 mg/l comme valeur maximale enregistrée à Ain Maarouf, avec une douce augmentation de l'amont vers l'aval. Nous constatons aussi sur cet histogramme qu'il n'y a pas une variation régulière entre la période sèche et la période humide.

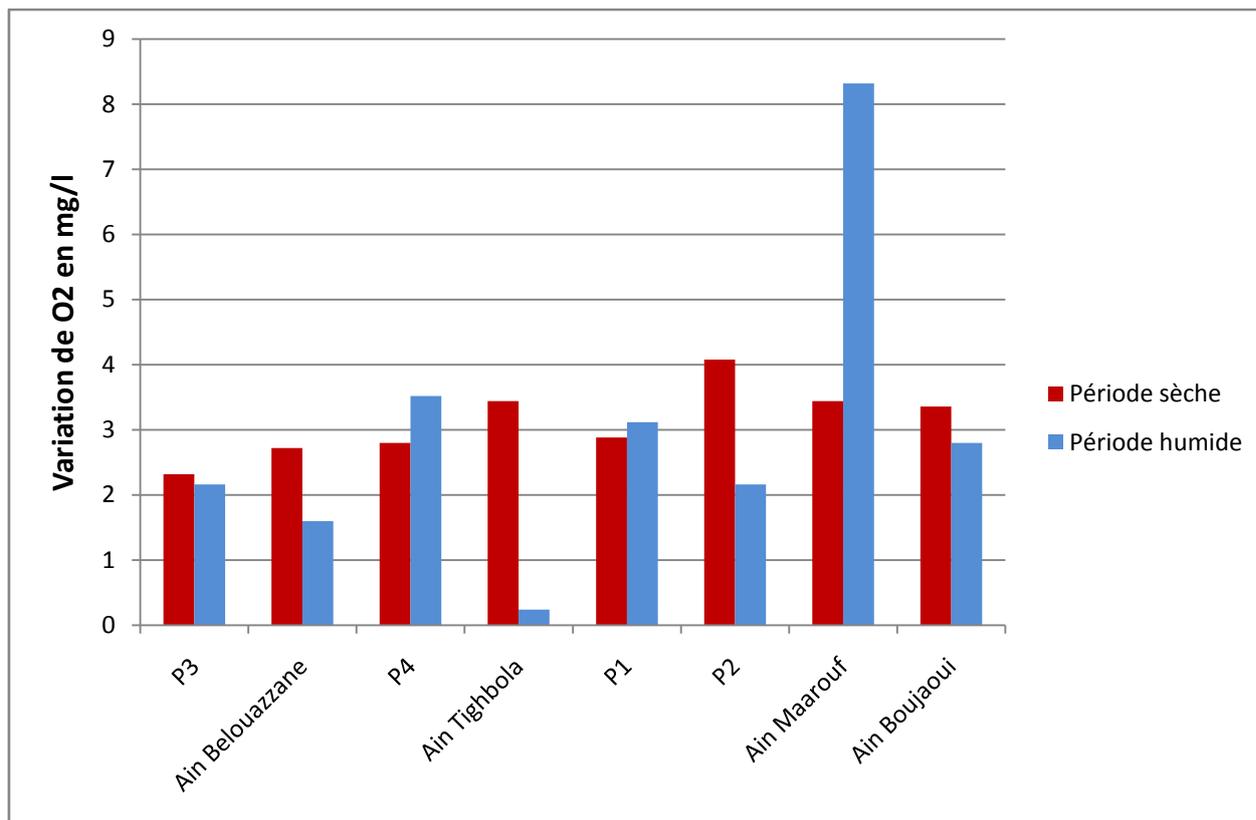


Figure 99 : variation spatio-temporelle de l'oxygène dissous

II.11. Variation spatio-temporelle des chlorures

Les chlorures se trouvent dans la nature, soit sous forme de sel de sodium (Na Cl), ou de potassium (KCl) ou de calcium (Ca Cl₂), mais la plus grande partie se trouve dans les océans. D'une façon générale, l'ion chlorure est présent dans toutes les eaux à des concentrations variables. Selon les normes marocaines relatives à la potabilité des eaux, la concentration en chlorure maximale recommandée (CMR) est de 300 mg/l alors que le maximum admissible (CMA) est de 750 mg/l.

Dans l'analyse de nos données nous remarquons que les sources Ain Maarouf et Ain Boujaoui situées à l'aval du cause, enregistrent les valeurs les plus élevées, que ça soit en été ou en hiver. Généralement ces valeurs sont importantes dans toutes les stations et 45mg/l est la valeur minimale enregistrée.

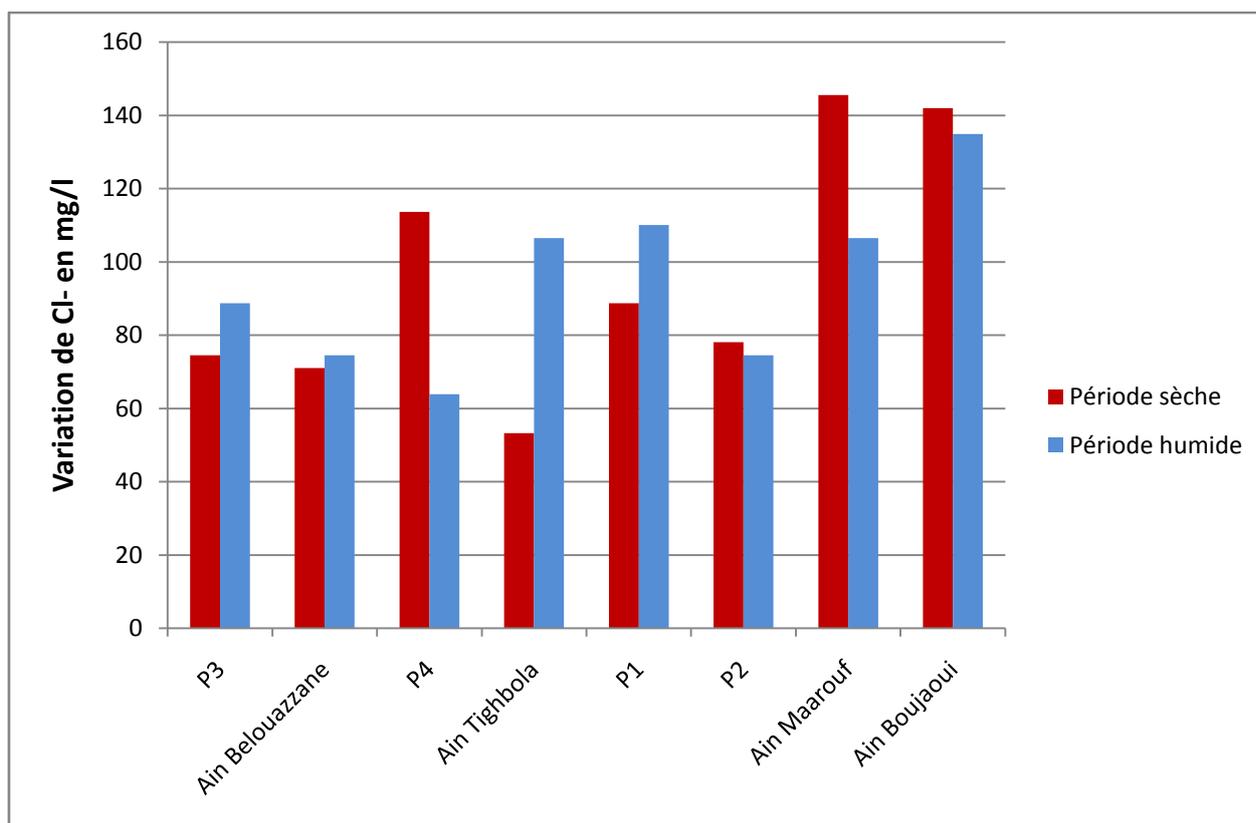


Figure 100 : variation spatio-temporelle des chlorures

II.12. Variation spatio-temporelle du calcium

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier sous formes de carbonates. Les eaux naturelles présentent des concentrations variables de cet élément qui est directement lié à la nature géologique du terrain traversé, du pH et de l'alcalinité de l'eau.

Dans notre cas les valeurs ont varié de 19 mg/l au minimum et 68 mg/l au maximum, ce qui reflète la nature géologique des stations de mesure. Généralement les valeurs de la période sèche sont inférieures à celles de la période humide, cette variation peut s'expliquer par des réactions chimiques qui peuvent se dérouler en période sèche (augmentation de la température) et qui entraînent une libération de cet élément en excès. De point de vue spatial nous constatons une augmentation de l'amont vers l'aval qui peut s'expliquer par un lessivage de cet élément et son transport vers le bassin de Saïss.

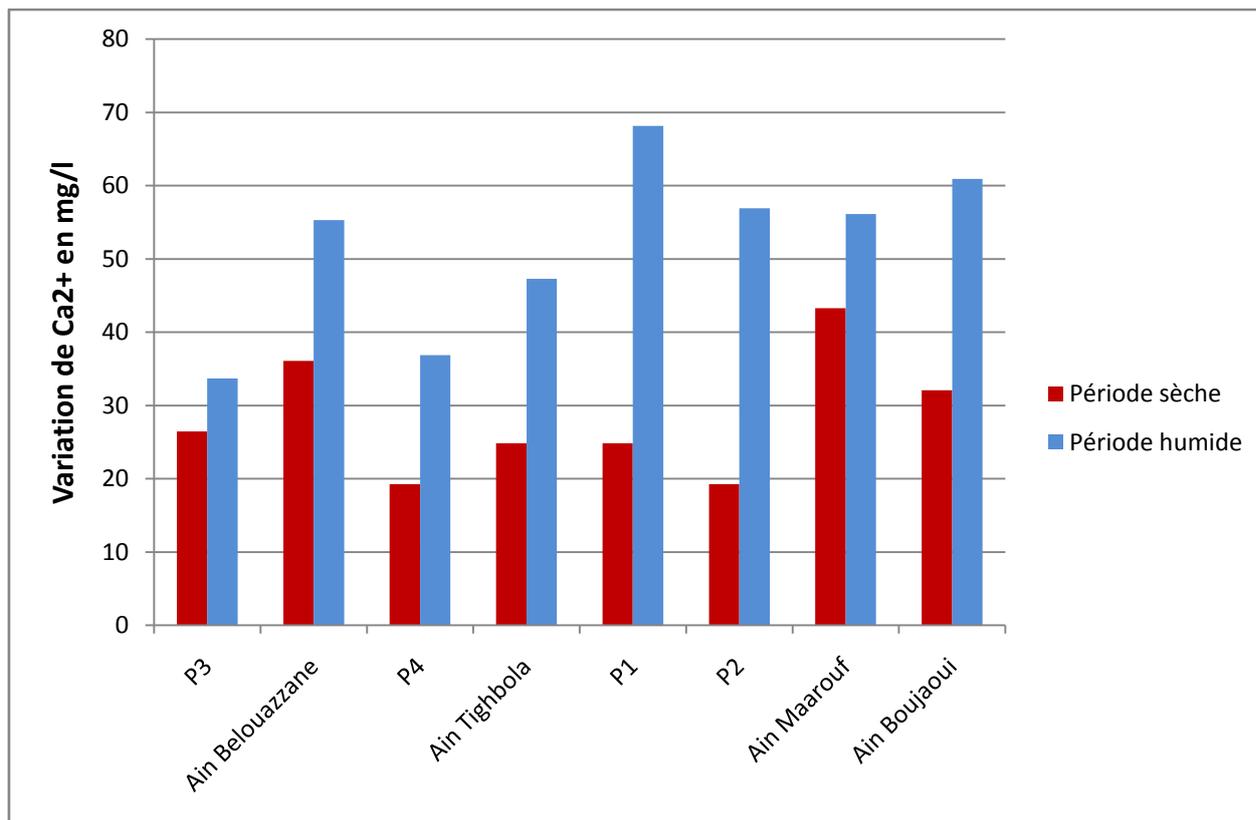


Figure 101 : variation spatio-temporelle du calcium

II.13. Variation spatio-temporelle du magnésium

Les eaux naturelles présentent des teneurs en magnésium comprises entre 5 et 10 mg/l, (Badreddinne, 2014) le magnésium dans l'eau provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes ($MgCO_3$) et de bicarbonates (Mg^{2+} , $2HCO_3^-$). Le magnésium contribue à la dureté de l'eau sans être l'élément essentiel ; généralement le magnésium est un élément très présent dans la nature soit comme minéral libre soit dans les calcaires dolomitiques par emplacement du calcium. Le magnésium provient généralement de son abondance géologique et sa grande solubilité.

La teneur du magnésium est spatio-temporellement semblable à celle du calcium dans toutes les stations ; nous remarquons aussi une augmentation du Mg^{2+} en période humide par rapport à la période sèche, ce qui peut s'expliquer par des réactions chimiques qui se déroulent à l'amont en été, d'où les valeurs les plus élevées à l'aval.

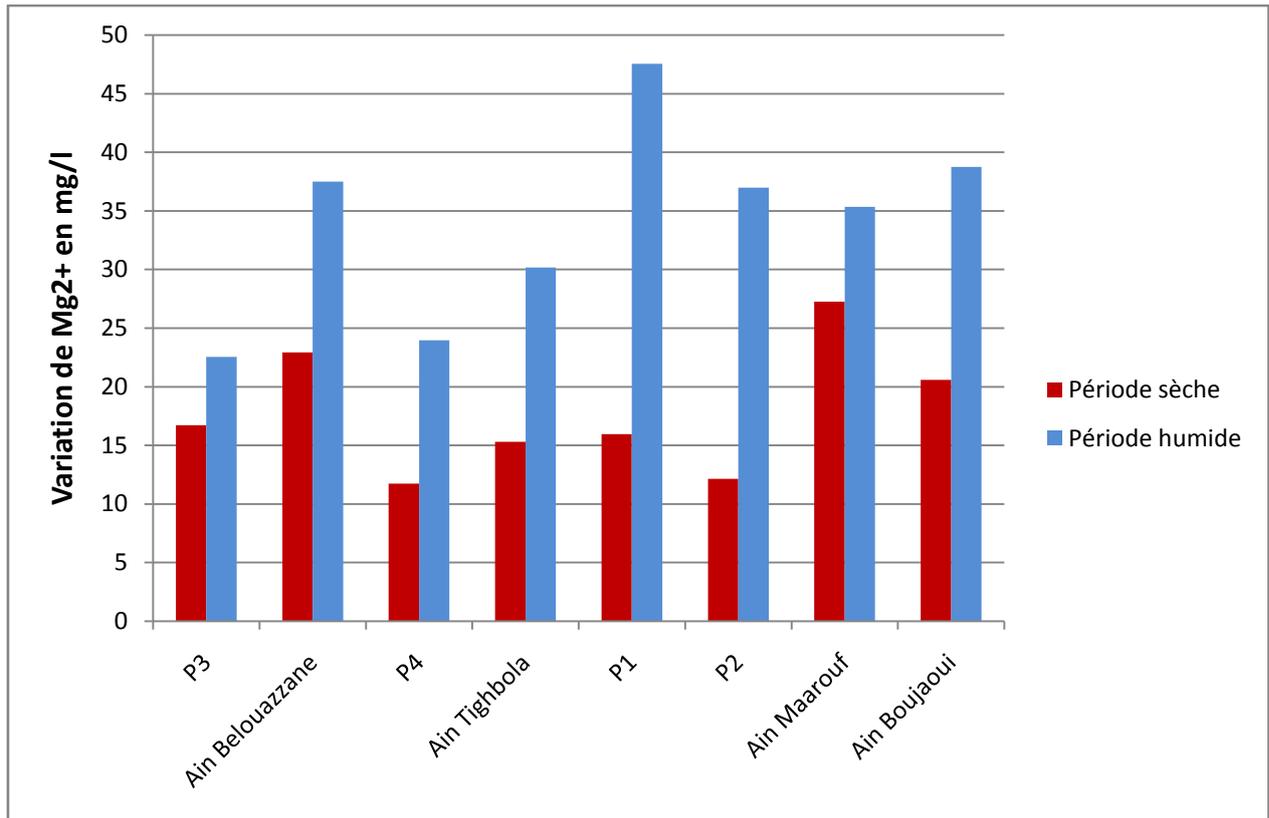


Figure 102 : variation spatio-temporelle du magnésium

II.14. Variation spatio-temporelle de la dureté totale

La dureté ou titre hydrotimétrique total (THT) correspond essentiellement à la présence de sels de calcium et de magnésium, elle dépend fortement de la composition de formations géologiques traversées. Généralement un sol calcaire donnera une eau dure (donc fortement minéralisée en calcium et magnésium), alors qu'une eau traversant un sol cristallin ou un sable sera donc douce. La figure ci-dessus qui représente la variation de la dureté montre que cette variation est semblable pour toutes les stations (de 30.5 à 34.8 °F), avec une légère augmentation en période sèche.

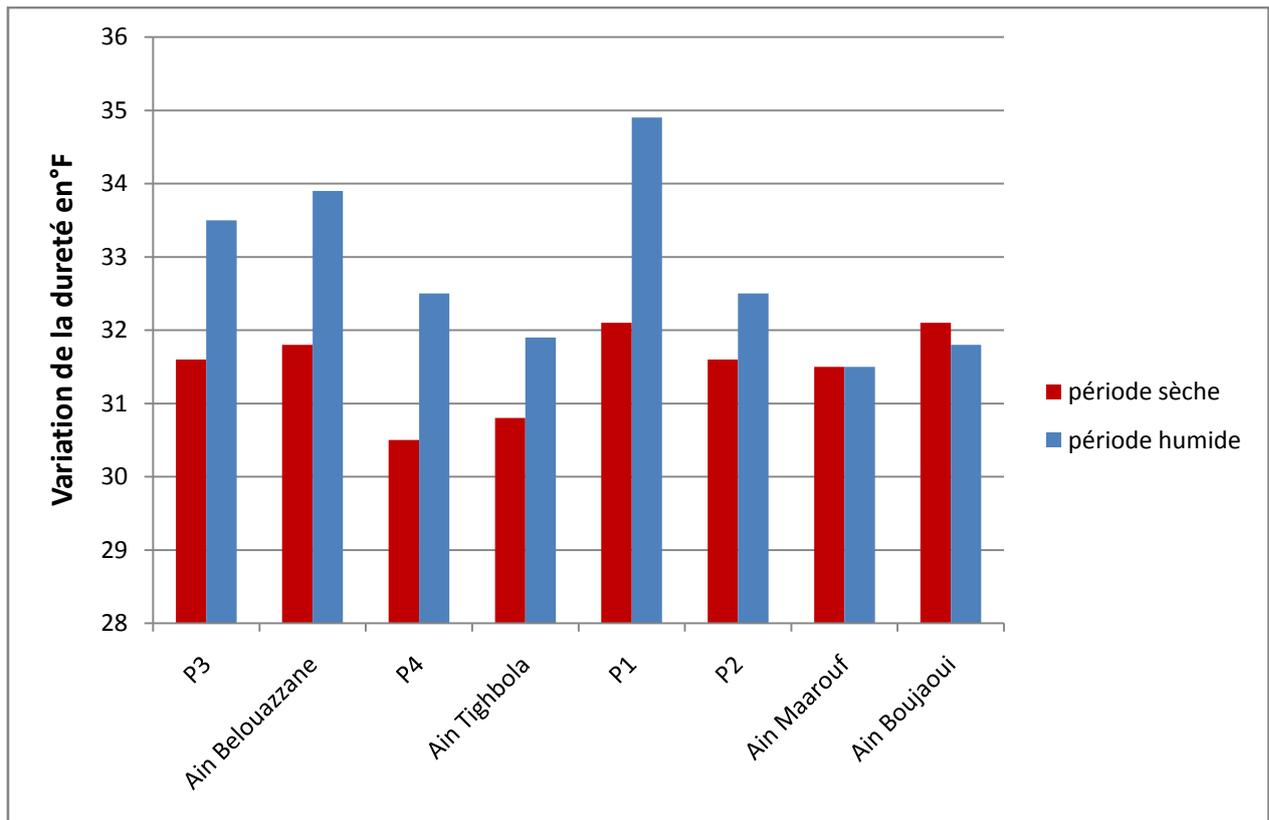


Figure 103 : variation spatio-temporelle de la dureté totale

II.15. Conclusion

La combinaison de l'ensemble de ces analyses effectuées au laboratoire et des mesures prises sur terrain, montre que le cause a en général des eaux de bonne qualité physicochimique ; en outre, presque toutes les stations montrent des faibles valeurs pour les éléments toxiques (Indicateurs de pollution) tels que les nitrites et les nitrates (<1mg/l), alors que les autres paramètres déterminant de la qualité sont toujours dans les normes. De ce fait nous pouvons conclure que les eaux souterraines transitaires du cause au bassin de Saïss sont faiblement affectées par les activités agricoles et anthropiques à l'origine de la pollution des eaux souterraines.

Chapitre 2 : APPLICATION DE LA METHODE SOM DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS ET CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

I. Application de la méthode SOM des réseaux de neurones artificiels :

I.1. Introduction :

I.1.1. Acquisition des données

Pour mener à bien cette étude, deux missions d'échantillonnage ont été réalisées en 2017 respectivement pendant le mois de janvier (saison humide) et pendant le mois de juin (saison sèche). Pendant chaque saison, 8 échantillons d'eau de puits, dont les eaux servent à l'alimentation en eau de boisson des populations et à l'agriculture, ont été prélevés suivant un transect du sud vers le nord suivant la direction de l'écoulement des eaux souterraines (Figure 90). En somme, la base de données obtenue est constituée de 16 échantillons. Cet échantillonnage permettrait une caractérisation générale et une identification des secteurs où la qualité environnementale est dissemblable. Les échantillons prélevés ont fait l'objet de mesures des paramètres physico-chimiques cités dans le tableau 24.

Tableau 24 : Paramètres physicochimiques utilisés dans cette étude et leurs désignations.

Paramètre mesuré	Désignation	Unité
Oxygène dissous	Ox.D	mg/l
pH	pH	-
Conductivité	Cond.	µs/cm
Température	T	°C
Sulfates	SO ₄	mg/l
Salinité	Salinité	g/kg
Calcium	Ca ²⁺	mg/l
Chlorures	Cl ⁻	mg/l
Magnésium	Mg ²⁺	mg/l
Orthophosphates	PO ₄	mg/l
Nitrates	NO ₃ ⁻	mg/l
Nitrites	NO ₂ ⁻	mg/l

Ammonium	NH^{4+}	mg/l
Dureté totale	Dureté	°F

I.1.2. Description des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

Les réseaux de neurones artificiels sont en principe du même modèle que le cerveau de neurones de l'être humain. En effet, chaque neurone représente une fonction algébrique (Dreyfus et al., 2002) et chaque point de connexion (ou poids) entre deux cellules joue le rôle d'une synapse qui est l'élément principal d'interaction entre les neurones (Figure 103).

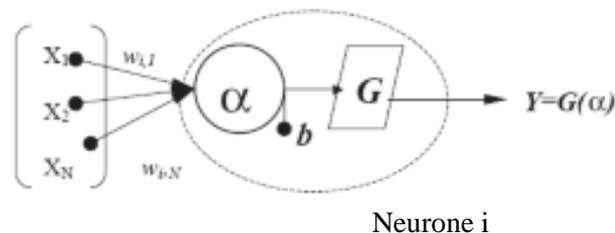


Figure 104 : Neurone artificiel à entrée multiples (Kohonen, 1995).

D'après la représentation mathématique du neurone artificiel, chaque cellule reçoit des entrées sous forme vectorielle (X), effectue une somme pondérée (α) et génère à l'aide d'une fonction de transfert (G), linéaire ou non, un résultat réel (Y) de la forme : $Y = G(WX + b)$, où W sont les poids de neurone i , X sont les entrées du neurone i (ou vecteur d'entrée) et b est le biais de neurone.

$\alpha = (b + WX)$ est la somme pondérée des entrées appelées entrées nettes du neurone i . Cette somme constitue l'argument de la fonction de transfert ou d'activation G du neurone i . La fonction d'activation non linéaire classique est la fonction sigmoïde qui s'écrit comme :

$$G(\alpha) = (1 - e^{-\alpha})^{-1}$$

I.1.3. Description du modèle des cartes auto-organisatrices (Self Organising Maps ou SOM)

Les cartes auto-organisatrices ou SOM de Kohonen sont des réseaux de neurones non-supervisés qui permettent d'ordonner et de classer des espèces en fonction de leur similarité ; en effet ces cartes traitent avec beaucoup d'aisance les données extrêmes c'est-à-dire de

grande abondance ou extrême rareté. Leur application est basée sur une technique de classification non linéaire capable de montrer des patrons simplifiés à partir des bases de données complexes en identifiant des groupes semblables. Elles se composent d'une couche d'entrée qui est la matrice de présence-absence des espèces directement reliée à une couche bidimensionnelle de sortie dite carte de Kohonen (Dao, 2014). Elles estiment les intensités de connexion entre les couches d'entrée et de sortie en utilisant un procédé concurrentiel non supervisé. Les SOM produisent une matrice de sortie avec les valeurs finales des poids, où les neurones de sortie se trouvent en lignes, et les points de mesure en colonnes (figure 104).

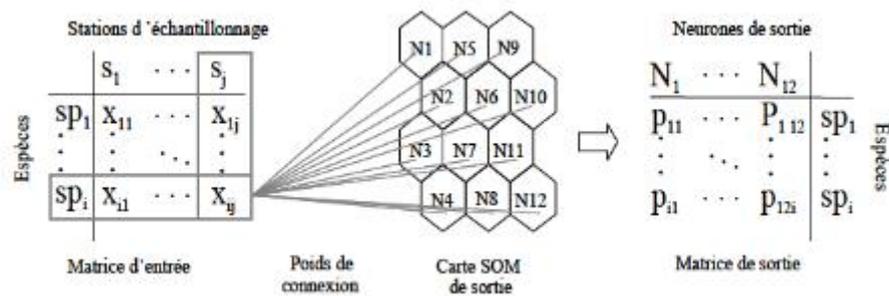


Figure 105 : représentation simplifiée de la carte auto-organisatrice SOM (Coulibaly et al., 1999).

Les deux dimensions (axes) permettent de préserver la topologie (distance relative) et de visualiser la proximité entre les espèces. L'apprentissage se fait avec différentes tailles de carte SOM et après le calcul des erreurs de quantification (QE) et de Topologie (TE) de chaque matrice possible, celle à retenir est celle qui a QE et TE simultanément les plus faibles (Park et al., 2003 ; Konan et al., 2006).

I.1.4. Classification hiérarchique ascendante par les cartes SOM (SOM-CHA)

Une fois la carte SOM de Kohonen obtenue, un algorithme d'analyse de classification hiérarchique basée sur la méthode Ward (Ward, 1963) et la distance Euclidienne permet de mettre en évidence des assemblages des objets réels sur la carte (Kohonen, 2001). Ces regroupements sont effectués sur la base des affinités en termes de composantes analytiques des échantillons projetées dans les cellules de couche de sortie.

A l'aide du test de corrélation de Spearman, les coefficients de liaison ont été calculés entre les variables. L'interface SOM Toolbox (Version 2) sous Matlab est utilisée pour la réalisation de la carte de Kohonen.

I.2. Présentation des résultats

I.2.1. Carte SOM

Dans le cadre de cette étude, la couche d'entrée est constituée de 17 neurones représentés par les 17 paramètres physico-chimiques étudiés. Ces neurones sont connectés à chacun des 8 échantillons ou vecteurs (8 échantillons d'eau de puits et sources prélevés en janvier et juin : 8×2) de la base de données. Les ' poids ' sont estimés à la sortie dans des cellules sur la carte de Kohonen. La couche bidimensionnelle de sortie, de topologie hexagonale et quadrant, est composée de 16 neurones (avec une matrice 4 lignes \times 4 colonnes). Cette taille a été choisie pour la carte de sortie car elle minimise les deux types d'erreurs (QE=0,777 et TE=0,00).

Tableau 25 : grandeurs statistiques de base (Min, Moyenne, Max) pour les paramètres physico-chimiques de toutes les stations

nom	min	moyenne	max	dst
NP	0.0	15.7	42.6	18.3
sal g/Kg	0.36	0.4	0.451	0.025
pH	7.1	7.9	8.58	0.47
T°C	15.5	19.7	22.6	1.87
NH4+(mg/l)	0.54	0.8	2.3	0.46
NO2-(mg/l)	0.008	0.0	0.065	0.017
NO3-(mg/l)	0.18	0.4	1.09	0.28
PO4	0.0002	0.0	0.001	0.0002
SO4(mg/l)	16.5	42.0	60.8	13.7
Ox.D	0.24	3.1	8.32	1.67
Durté (°F)	30.5	32.2	34.9	1.13
Cl-(mg/l)	53.25	95.4	145.55	28.4
Ca2+(mg/l)	19.24	40.1	68.14	15.7
Cond (µs/cm)	0.64	357.0	778.8	369.3
Mg2+(mg/l)	11.74	26.0	47.6	10.8
TAC(°F)	2.0	3.1	4.0	0.47
HCO3(mg/l)	24.4	37.7	48.8	5.8

Notre analyse préliminaire des données commence par un examen de la carte U-matrix et du codage couleur. Elle indique la cartographie de classification de la carte SOM, obtenue à partir de la formation des données. La carte U-matrix et le codage couleur montrent qu'il existe deux grappes principales dans les données en fonction de la différence de taille et de la similarité de couleur des nœuds. Ainsi, on distingue clairement deux groupes avec du bleu et du vert, en haut et en bas de la carte, séparés au milieu de la carte par un trait horizontal de couleur rouge brique (Figure 106).

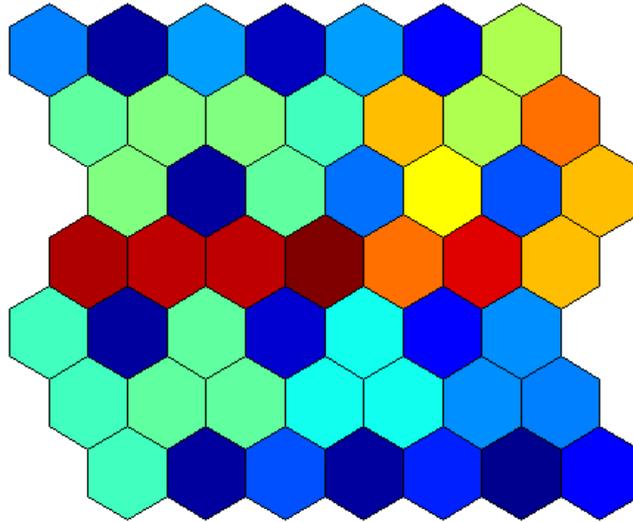


Figure 106 : carte U-matrix

Sur la carte SOM obtenue nous constatons l'apparition de deux grandes familles bien différenciées correspondant à la période sèche en couleur verte avec la présence d'un seul neurone qui rassemble tous les échantillons ; puis la période humide en couleur violette, et cette fois les échantillons sont subdivisés en quatre neurones (figure 107).

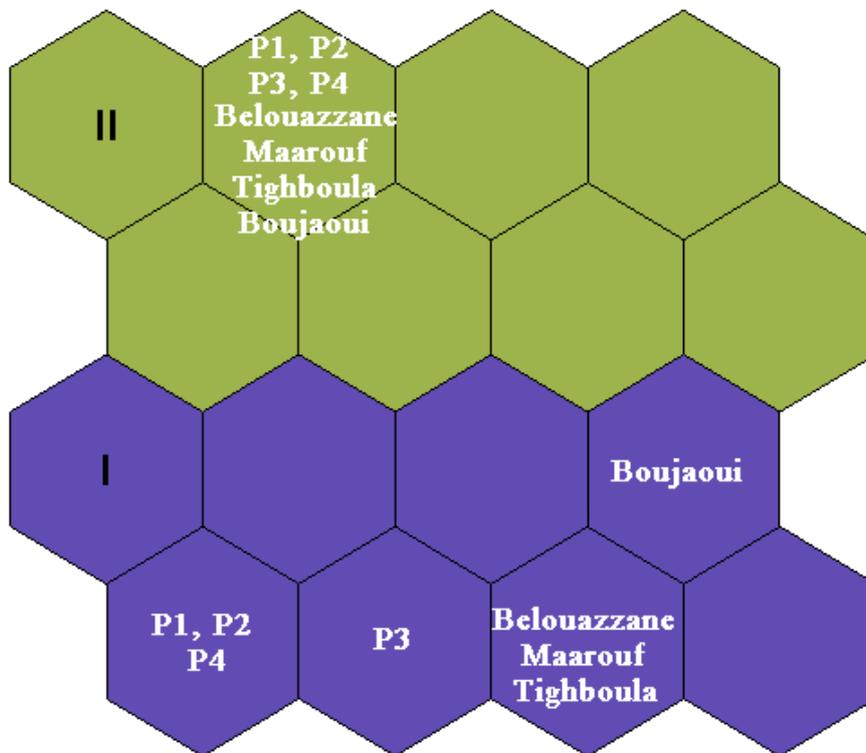


Figure 107 : répartition des échantillons de puits et de sources sur la carte de Kohonen à partir des variables physico-chimiques étudiées

La carte de répartition des échantillons selon le poids des paramètres physico-chimiques, présente des corrélations négatives ou positives entre ces éléments. Ainsi, le NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NO_3^- et la dureté sont corrélés positivement entre eux et négativement avec la température (Figure 108).

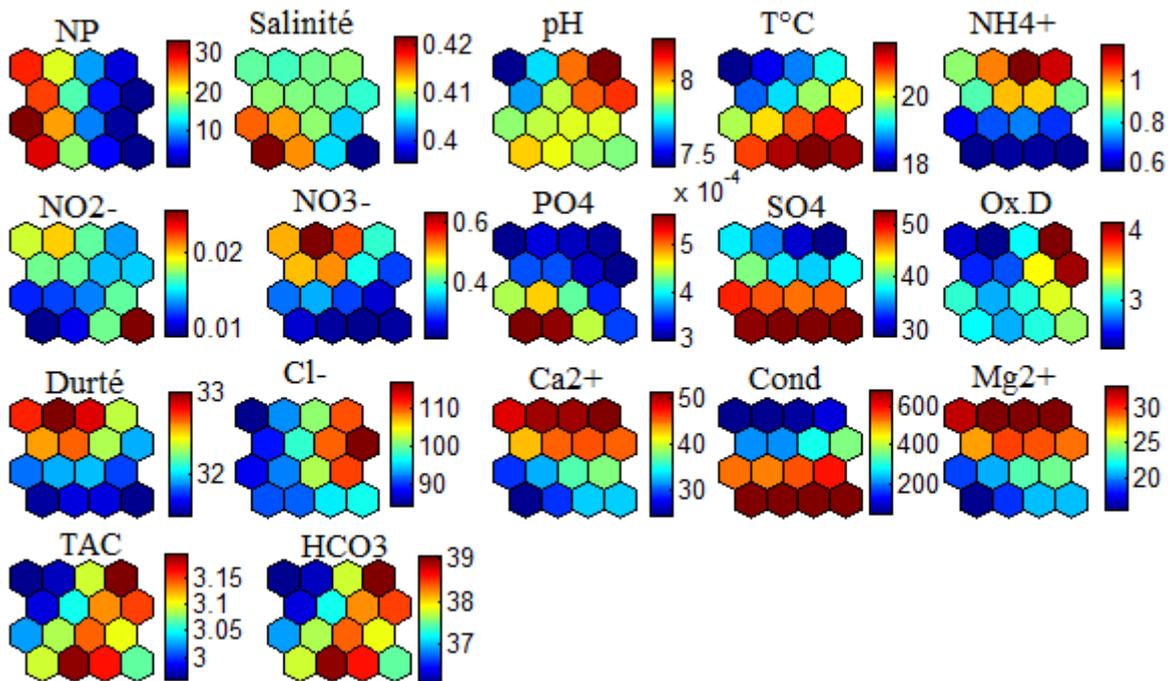


Figure 108 : gradient de valeurs des paramètres physico-chimiques sur la carte de Kohonen

I.2.2. Classification hiérarchique ascendante

La classification des échantillons est basée sur les dendrogrammes issus de la classification hiérarchique de toutes les entrées. En effet, cette classification nous a permis de définir deux classes principales sur la base du critère de l'axe dont la distance euclidienne est 1,2 sur l'ensemble des neurones. Le choix de cette classification est dans l'objectif de garder la même décomposition de la carte précédente. Le dendrogramme obtenu par CHA-SOM suggère donc que les 16 échantillons (8 par saison) sont regroupés en deux groupes désignant les deux saisons humide et sèche de l'année 2017 (Figure 109).

La classe I, relative à la période humide montre clairement la séparation entre les eaux de puits et les eaux de sources reflétant ainsi une différenciation hydrochimiques. En effet, les puits 1, 2 et 4 se trouvent dans le neurone 4 et le puits 3 dans le neurone 8, alors que les sources Belouazzane, Maarouf et Tighboula dans le neurone 12 et la source Boujaoui dans le neurone 15.

La classe II, relative à la saison sèche est caractérisée par la concentration des 8 échantillons dans le même neurone 5 montrant ainsi les caractéristiques physico-chimiques très proches et sans variations notables pendant cette saison (Figure 8 et Figure 109).

Pour donner les caractéristiques hydrochimiques de chacune des deux classes, il faut ajouter le tableau Excel qui montre les valeurs Moy, Min, Max de chaque classe et comme ça tu peux les ajouter au texte également.

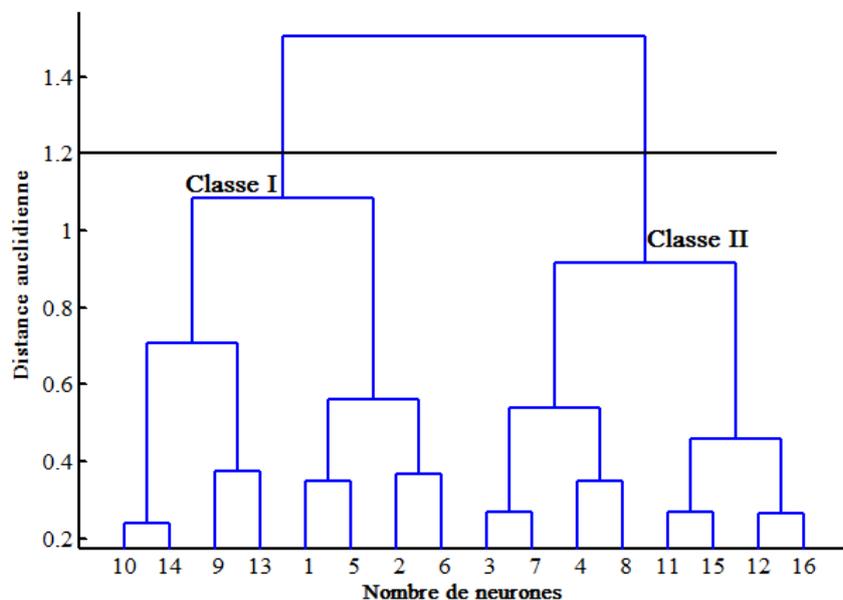


Figure 109: dendrogrammes de la classification hiérarchique des cellules de la carte de Kohonen (SOM) sur la base des paramètres physico-chimiques des eaux de puits et de sources du Causse du Moyen Atlas d'Agourai

I.2.3. Analyse en composante principale

L'ACP a été utilisé pour identifier les relations cachées entre les paramètres physicochimiques examinés et les facteurs qui favorisent leur formation. Les deux premières composantes du cercle des corrélations entre les variables dans le sous-espace PC1 X PC2 contiennent 46 % de la variation des données (Figure 110(a)). La troisième composante, PC3, présente 13,1 % de l'information (Figure 110 (b)). La somme des trois composantes représente presque les deux tiers de la variation de données (59%) ce qui rend ces résultats corrélatifs et comparables. Les résultats présentés par la figure x montrent bien les corrélations trouvées par les cartes SOM (Figure 107) et la classification hiérarchique des variables (Figure 109).

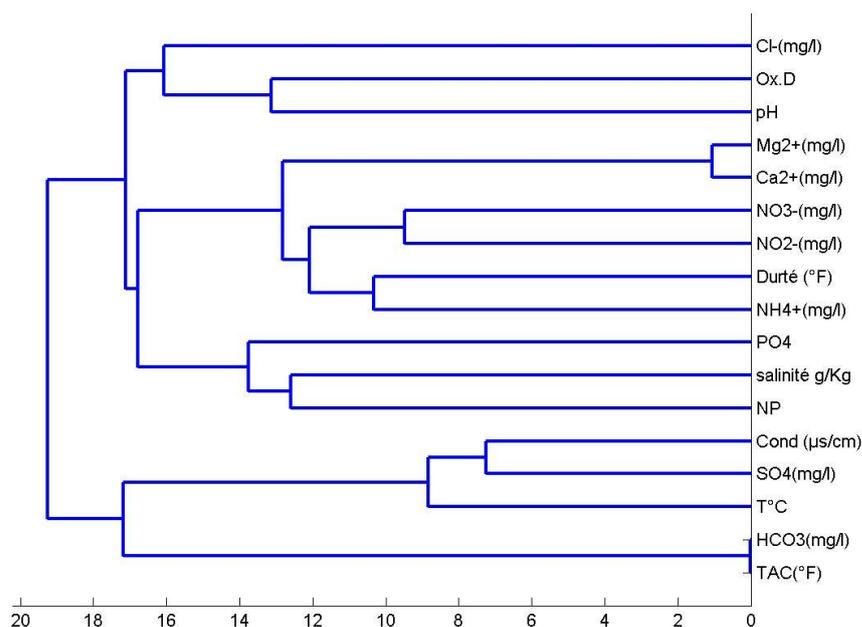


Figure 110 : dendrogramme de classification hiérarchique des variables physico-chimiques.

Sur le dendrogrammes de la classification hiérarchique et sur le premier cercle de l'ACP et selon l'axe PC2, la température, la conductivité et SO4 sont corrélés positivement ; de même pour le NH4+ la dureté Ca2+ et Mg2+ sont aussi corrélés positivement, par contre ces deux groupes sont corrélés négativement entre eux. La salinité, le pH, HCO3, PO4 et Cl- sont corrélé positivement selon l'axe PC1.

Le deuxième cercle semble identique avec le précédent et l'axe PC3 présente presque la même corrélation que l'axe PC2.

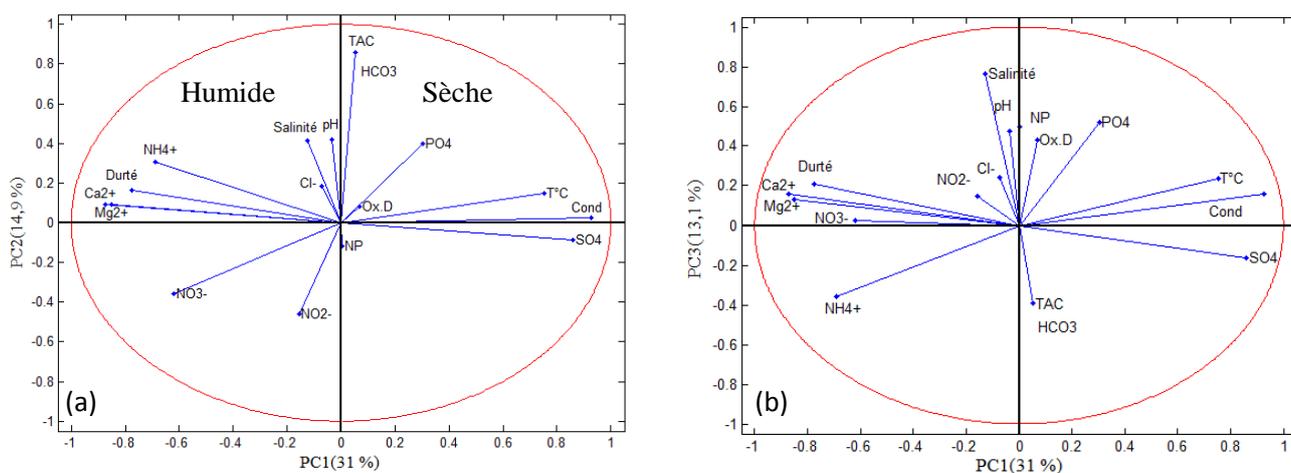


Figure 111 : cercles de corrélation PCA: (a) PC1 vs PC2, (b) PC1 vs PC3

La projection de l'ensemble des échantillons sur le plan factoriel (PC1 X PC2) à partir des paramètres physicochimiques des eaux de puits et de sources du Causse d'Agourai montre clairement l'individualisation des deux principales classes selon les axes PC1 et PC2 (figure) et selon les axes PC1 et PC3. Nous constatons que les deux campagnes d'échantillonnage sont bien réparties de part et d'autre du point zéro de l'axe PC1 avec la saison humide (échantillons de 1 à 8) dans le côté négatif et la saison sèche (échantillons de 9 à 16) dans le côté positif de l'axe (Figure 111).

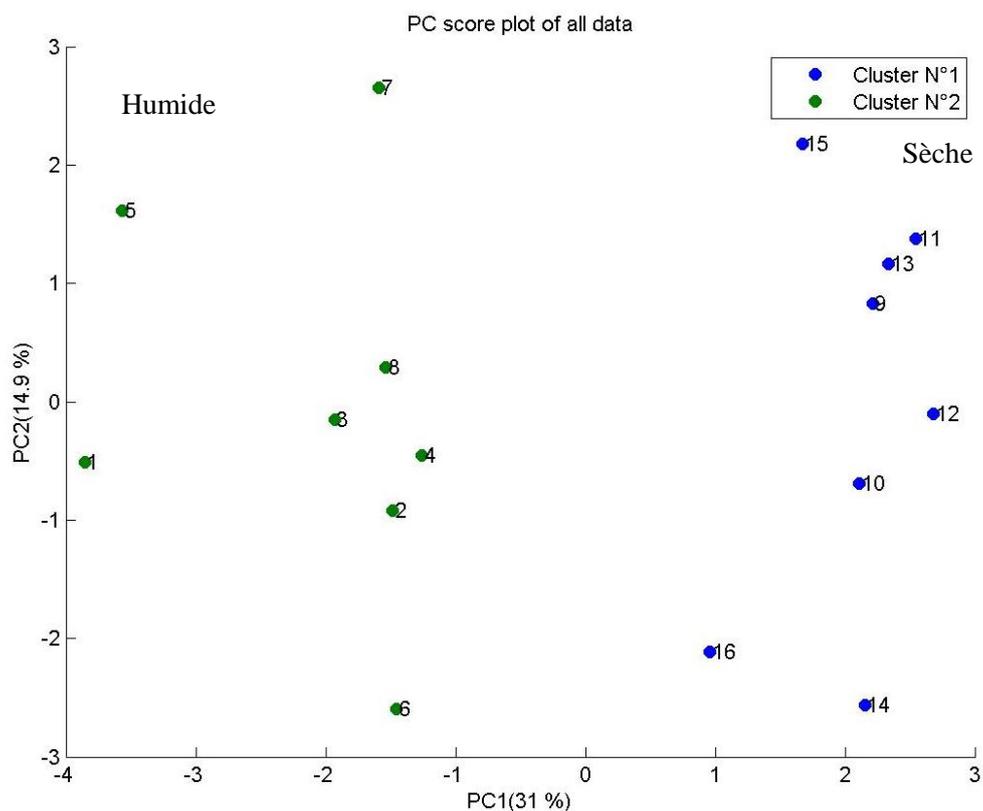


Figure 112 : projection des échantillons sur le plan factoriel (PC1 X PC2) à partir des paramètres physicochimiques des eaux de puits et de sources du Causse d'Agourai

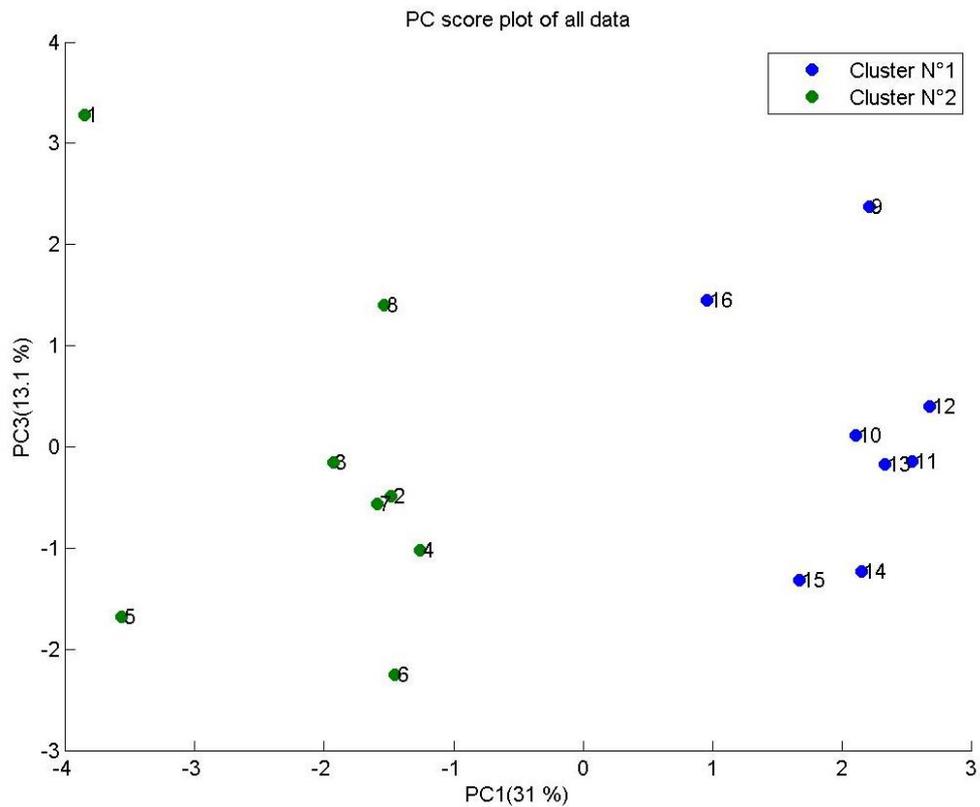


Figure 113 : projection des échantillons sur le plan factoriel (PC1 X PC3) à partir des paramètres physicochimiques des eaux de puits et de sources du Causse d'Agourai

La correspondance de ces neurones avec les noms des échantillons nous a aboutis aux résultats suivants (figure 111) : la classe N°1 attribuée aux échantillons prélevés dans la période sèche alors que la N°2 correspondant aux échantillons prélevés dans la période humide.

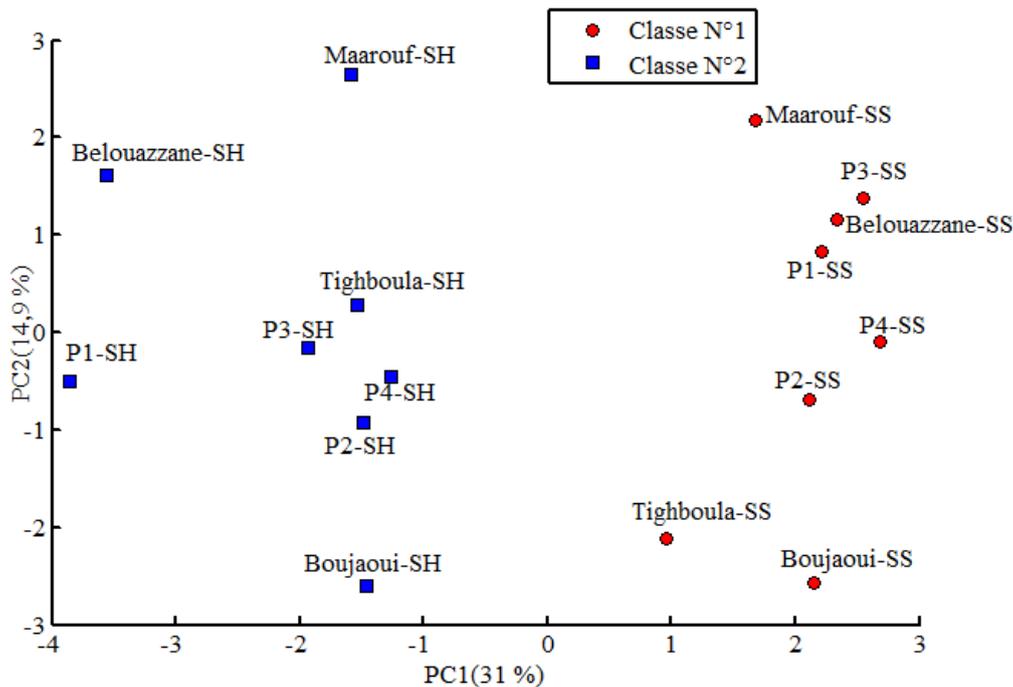


Figure 114 : projection des échantillons sur le plan factoriel (PC1 X PC2) à partir des paramètres physicochimiques des eaux de puits et de sources du Causse d'Agourai

II. Contribution à l'étude de la qualité des eaux souterraines du causse d'Agourai

II.1. Introduction

L'étude de la qualité des eaux pose un vrai challenge pour nombreuses pays, en raison de la nature régénératrice de cette matière vitale et sa vulnérabilité à la pollution. Cependant, les eaux des nappes profondes sont moins affectées aux contaminations par rapport aux eaux de surface ou celles des nappes superficielles où le contact est direct avec les déchets industriels, agricoles et anthropiques en général.

Plusieurs études ont été consacrées à l'étude de qualité des eaux et qui ont permis d'élaborer des indices de qualité des eaux et des indices de pollution ; dans cette partie on se limite à l'application de deux indices IWQ et IP pour qualifier l'état des eaux du causse d'Agourai et celle transférées vers le bassin de Saïss.

II.2. Indices de qualité

II.2.1. Indice global de pollution des eaux souterraines :

L'indice de pollution des eaux souterraines est une échelle numérique permettant de quantifier l'étendue de la contamination. Elle reflète une influence composite des mesures individuelles

de la qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau de l'aquifère. L'algorithme à calculer PIG est donné par une série des étapes (Subba Rao 2017) :

Étape I: poids relatif

Un poids relatif (R_w) est attribué à chaque mesure de la qualité de l'eau, en tenant compte de son impact sur la santé. La plage de R_w est comprise entre 1 et 5, en effet, une valeur minimale de 1 du R_w correspond au rôle le moins significatif, alors que la valeur maximale de 5 du R_w correspond au rôle le plus important en matière sur la santé.

Étape II: paramètre de poids

Le paramètre de poids (W_p) pour chaque paramètre est calculé (équation) pour obtenir la part relative de chaque paramètre sur la qualité globale de l'eau. C'est le rapport entre R_w de chaque paramètre et la somme de tous les poids relatifs.

$$W_p = \frac{R_w}{\sum R_w}$$

Étape III: État de la concentration

L'état de concentration (S_c) de chaque échantillon d'eau est estimé par rapport à sa norme de qualité de l'eau potable. Le (S_c) est calculé en divisant la concentration (C) de chaque mesure d'échantillon d'eau par son standard de qualité de l'eau potable (D_s).

$$S_c = \frac{C}{D_s}$$

Étape IV: Qualité globale de l'eau

Le paramètre de poids (W_p) pour chaque paramètre est multiplié par son S_c correspondant pour quantifier la qualité globale de l'eau (O_w). Il reflète le nombre de fois que W_p est augmenté en fonction de la concentration de chaque mesure de la qualité de l'eau.

$$O_w = W_p * S_c$$

Étape V: Indice de pollution des eaux souterraines

L'indice de pollution des eaux souterraines est calculé en ajoutant toutes les valeurs de (O_w) calculées pour tous les paramètres de chaque échantillon d'eau.

$$PIG = \sum O_w$$

Étape VI: Classification du PIG

Si une qualité d'un échantillon d'eau particulier présente les mêmes valeurs que la qualité de l'eau potable, les incidences sur la santé pourraient être négligeables. Dans ces conditions, la valeur calculée du PIG est de 1. Ainsi, si PIG est inférieur à 1, il peut être considéré comme un indice de non-pollution, alors que celui qui dépasse 1, cela peut être par la contribution des concentrations supplémentaires de matières étrangères dans l'aquifère qui ont causé cette pollution. Et finalement nous pouvons baser sur la classification suivante :

- Si $PIG < 1$ la pollution est insignifiante
- Si $1 < PIG < 1,5$ la pollution est faible
- Si $1,5 < PIG < 2$ la pollution est modérée
- Si $2 < PIG < 2,5$ pollution est forte
- Si $PIG > 2,5$ pollution est très forte

Après le calcul de PIG pour tous les échantillons et pour les deux périodes sèche et humide, nous constatons que nos résultats appartiennent à un seul intervalle de PIG et qui est de **(0 à 1)** ce permet de dire que la pollution dans cette zone est insignifiante. La projection de ces résultats est donnée à la carte de la figure suivante.

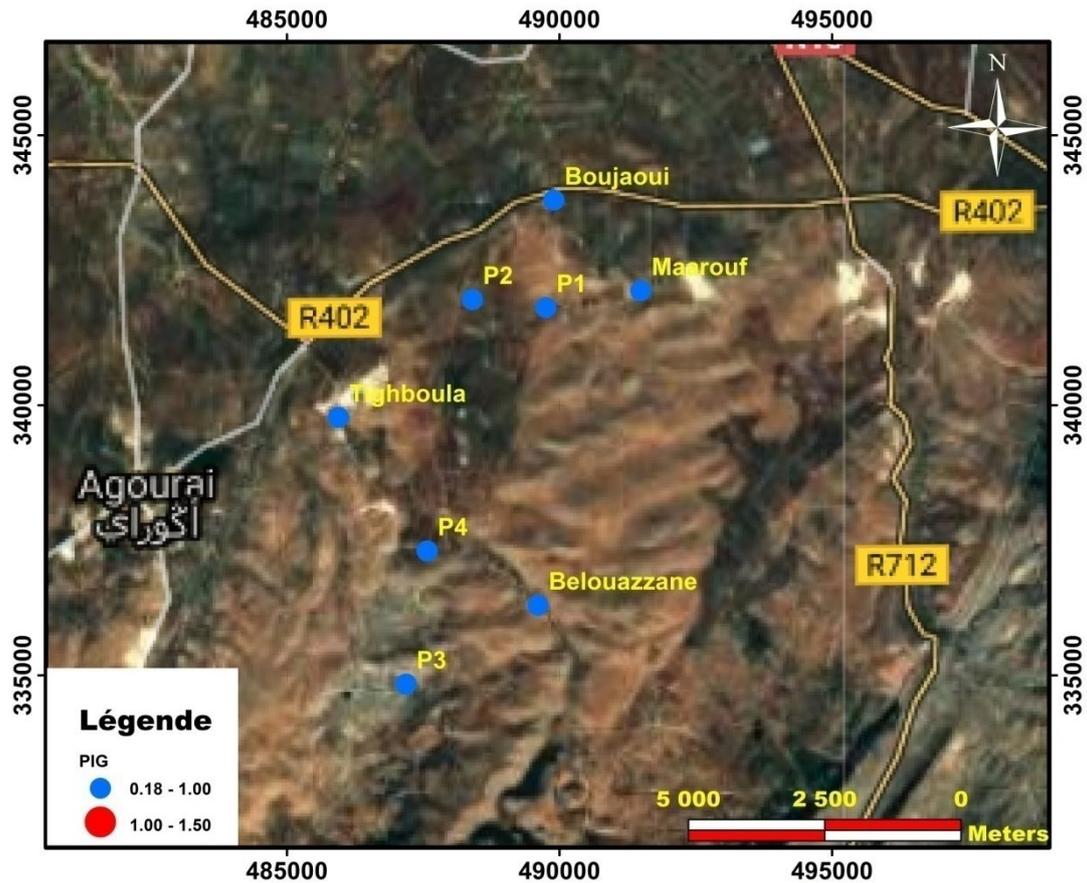


Figure 115 : carte de projection de IGQ sur la zone d'étude

II.2.2. Indice global de qualité des eaux souterraines

L'IQE est défini comme une technique de classement fournissant l'influence composite de différents paramètres de qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau destinée à la consommation humaine (Sajil Kumar, 2015).

Lors de l'étape préliminaire du calcul de l'IQE, des poids (A_{wi}) sont attribués aux paramètres mesurés en fonction de leur importance relative dans la qualité de l'eau et ses effets possibles sur la santé. Le poids maximum de 5 est attribué à des paramètres tels que sodium, chlorure, et sulfate en raison de leur importance dans les évaluations de la qualité de l'eau. Le bicarbonate a un poids inférieur de 1 car il joue un rôle comparativement moins important dans l'évaluation de la qualité de l'eau.

Dans la deuxième étape, les poids relatifs (R_{wi}) sont calculés à l'aide de l'équation :

$$R_{wi} = \frac{A_{wi}}{\sum_1^n A_{wi}}$$

Où, R_{wi} = poids relatif, A_{wi} = poids attribué à chaque paramètre, n = nombre de paramètres.

L'évaluation de la qualité (q_i) de chaque paramètre est calculée en divisant leur concentration par les normes de qualité de l'eau. Cette valeur est multipliée par 100 comme indiqué dans l'équation :

$$q_i = (C_i/S_i) \times 100$$

Où : q_i est un indice de qualité, C_i est la concentration de chaque paramètre chimique dans les échantillons d'eau prélevés en mg/L et S_i : la norme relative à l'eau de boisson pour chaque paramètre chimique, en milligrammes par litre. L'IQE final de chaque échantillon est déterminé comme expliqué dans l'équation :

$$S_i = R_{wi} \times q_i$$

$$WQI = \sum S_i$$

Pour l'interprétation de cet indice nous se basons sur les classes suivantes :

- <50 Excellente eau
- 50–100 bonnes eaux
- 100–200 Mauvaise eau
- 200–300 eaux très pauvres
- 300 Eau non potable

L'étude de qualité des eaux souterraines par le calcul de cet indice WQI dans le casse d'Agourai montre l'excellence des eaux dans la majorité des cas pour les échantillons prélevés dans la période sèche et humide. La projection des résultats de ce paramètre sur la carte est donnée à la figure ci-dessous.

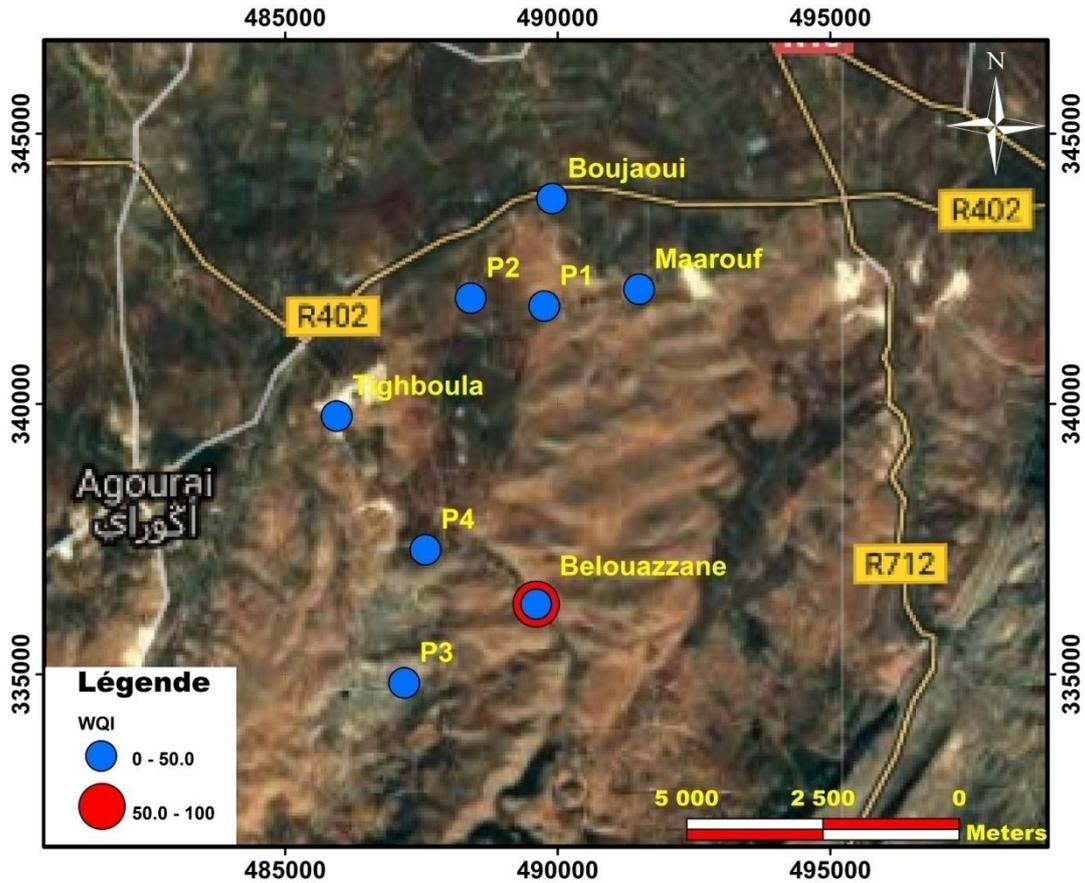


Figure 116 : carte de projection de WQI sur la zone d'étude

III. Conclusion

L'évaluation de la qualité de l'eau dans le causse d'Agourai par l'étude des indices de qualité et de pollution, a montré que les eaux souterraines dans cette zone sont de bonne qualité et non encore affectées par les activités agricoles. Toute fois une action de sensibilisation est à programmer par les décideurs afin de limiter toute forme de pollution, notamment par la limitation des surfaces agricoles au dépend de la forêt, par la rationalisation de l'utilisation des engrais, et tout produit chimique.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Le causse d'Agouraï constitue la terminaison occidentale du grand causse moyen atlasique ; c'est aussi la continuité hydrogéologique de ce causse vers l'Ouest et qui forme avec celui d'El Hajeb-Ifrane au centre et d'Imouzzet-Bsabis à l'Est le « château d'eau » du bassin de Saïss. C'est un grand réservoir d'eaux souterraines caractérisées par la dominance des calcaires dolomitiques fracturés et karstifiés d'âge liasique permettant la circulation des eaux facilement et en grandes quantités. Cette formation calcaire repose sur un substratum imperméable formé par les argiles rouges du Trias permettant d'arrêter les infiltrations en profondeur.

Ce réservoir est caractérisé par des eaux très vulnérables à toute forme de pollution et exige des mesures préventives afin de protéger ce patrimoine souterrain national.

L'objectif de notre travail était de mettre en valeur les principales caractéristiques de ce causse de point de vue ressources en eau quantitativement et qualitativement par la réalisation d'une approche multidisciplinaire. Cette approche est basée :

- d'abord sur une étude bibliographique complète de l'existant permettant de synthétiser les principaux travaux réalisés dans ce sens ;
- puis, une analyse de l'imagerie satellitaire par la télédétection afin de déterminer les grands axes d'écoulement à travers la réalisation des cartes de linéaments ;
- ensuite nous avons utilisé la géophysique comme méthode indirecte par la réinterprétation des données aéromagnétiques, pour confirmer les résultats élaborés auparavant ;
- l'étude de détail du sens d'écoulement sur le terrain est faite par une étude de la fracturation au droit du complexe sourcier Ain Maarouf- Ain Boujaoui qui a donné de très bons résultats permettant de comprendre la résurgence des eaux à ces endroits ;
- ce travail a été enrichi par la géophysique utilisant les méthodes électriques (sondages, traînés et tomographie électrique). pour la mise en évidence et la cartographie des anomalies et discontinuités interprétées en termes de failles, fractures drainantes des eaux du causse vers le bassin ;
- En fin une contribution à l'étude de la qualité de ces eaux souterraines a été réalisée à l'aide d'une étude hydrochimique qui permet le suivi des paramètres physico-

chimiques dans deux périodes sèche et humide ainsi que par le calcul des indices de qualité et de pollution des eaux.

Au niveau de la télédétection, l'extraction manuelle et automatique des linéaments nous a permis de déterminer les directions dominantes dans la zone ; ainsi les directions relevées par les deux méthodes sont identiques avec celles retrouvées dans la carte géologiques.

L'analyse microtectoniques dans la source d'Ain Maarouf et la source de Bouchermou, le long de la bordure Nord du causse d'Agouraï, nous a permis de déterminer quatre familles directionnelles, les familles NW-SE et NE-SW qui sont les plus dominantes, et les familles E-W et N-S qui sont secondaires. Les fractures NW-SE sont responsables de la résurgence d'eau au niveau de la source d'Ain Maarouf.

Le traitement et la réinterprétation des données aéromagnétiques nous a permis d'identifier les grandes failles affectant le causse d'Agouraï, et dont les directions épousent en gros celles des grandes failles cartographiées sur les cartes géologiques d'El Hajeb et d'Agouraï au 1/100 000. La direction principale mise en évidence par la rosace directionnelle issue du traitement de ces données magnétiques constitue une des directions préférentielles des écoulements des eaux souterraines depuis le causse vers le bassin de Saïss ; ces écoulements sont orientés vers le complexe sourcier d'Ain Maarouf et Ain Boujaoui, situé au Nord du causse.

L'étude géophysique par méthode électrique dans les différentes zones du causse a permis de mettre en évidence l'existence de discontinuités électriques locales de direction généralement NNW qui peuvent être interprétées en termes de failles et dont les directions coïncident avec celles mise en évidence par le traitement des données aéromagnétiques.

La combinaison de l'ensemble des analyses effectuées au laboratoire et les mesures prises sur terrain, montre que le causse a en général des eaux de bonne qualité physicochimique ; en outre, presque toutes les stations montrent des faibles valeurs pour les éléments toxiques (Indicateurs de pollution) tels que les nitrites et les nitrates (<1mg/l), alors que les autres paramètres déterminant de la qualité sont toujours dans les normes. De ce fait nous pouvons conclure que les eaux souterraines transitaires du causse au bassin de Saïss sont faiblement affectées par les activités agricoles et anthropiques à l'origine de la pollution des eaux souterraines.

En Conclusion générale l'approche multidisciplinaire utilisée dans cette étude a permis d'aboutir à de très bons résultats sur la connaissance du mode de transit des eaux depuis le causse vers le bassin ce transit qui se fait selon de grands axes d'écoulement N-S à NW-SE; puis sur la qualité de ces eaux qui est généralement bonne et nécessite un sauvegarde et une protection de toute forme de pollution anthropique.

Les contraintes des temps et des moyens ne permettent pas de tous réaliser dans cette étude, nous recommandons par la suite en perspectives et dans le but d'enrichir ce travail, les points suivants :

- ✓ Réalisation d'une étude complète et détaillée de la fracturation pour valider les cartes établies par télédétection ;
- ✓ Réaliser des campagnes géophysiques à grande échelle par la méthode de tomographie électrique sur les autres sources du causse ;
- ✓ Actualiser la carte piézométrique de la campagne de 2017 ;
- ✓ Faire une étude hydrochimique plus large en augmentant le nombre des échantillons pour couvrir tout le causse sur quatre période de l'année, et en utilisant d'autres techniques complémentaires et plus précises comme le traçage isotopique ;
- ✓ Modéliser le réservoir liasique et estimer ses capacités ;
- ✓ Réaliser une étude de l'impact des carrières et des points de pollution (décharges) sur la nappe libre du causse.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Abrid D. 2009.** Contribution à l'étude de l'impact de la pollution sur les cours d'eaux marocains -cas de l'oued Boufekrane. Master, Université My Ismail. 101p.
2. **Allaoui A., Boualoul M., El ouardi H., Habibi M., Muzirafiti A., Ouhadache H. 2018.** Contribution de la télédétection, de la tomographie électrique et de l'analyse de la fracturation à la compréhension du transfert des eaux souterraines cause - plaine : cas du complexe sourcier ain Maarouf-ain Boujaoui, Maroc. IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG) e-ISSN: 2321-0990, p-ISSN: 2321-0982. Volume 6, Issue 1 Ver. II (Jan. – Feb. 2018), pp 12-19.
3. **Amar M., Manar A. et Boualoul M. 2012.** Apport de la cartographie aéromagnétique à l'identification structurale du système aquifère des sources de l'oasis de Figuig (Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, n° 34, pp 29-40.
4. **Amar M. et Boualoul M. 2017.** Système aquifère du Haut Atlas oriental, Maroc. Livre Edition Noor Publishing. ISBN-13: 978-3-330-84528-2. 144p.
5. **Amraoui F. 2005.** Contribution à la connaissance des aquifères karstiques du liais de la plaine du Saïs et du Causse moyen Atlasique Tabulaire (Maroc). Thèse d'Etat, Université Hasan II. 249p.
6. **Aouragh H. 2015.** Cartographie et identification par télédétection et analyse multicritère sous SIG des zones potentielles des aquifères du cause moyen atlasique (Maroc). Thèse de doctorat. Université My Ismail, 211 p.
7. **Badreddinne R. 2014.** Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 1^{er} décembre 2013. Rapport d'étude INERIS-DRC-14-142522-01489A. 128p.
8. **Barracough D. R. 1987.** International geomagnetic reference field: the fourth generation, Phys. Earth Planet. Int., pp 279-292.
9. **Belabed M., Benmohammadi A., Boualoul M., Oubbih J., and Saltani Z. 2015.** Application of electrical prospecting to lithological facies mapping in the Tselfat ridge, Morocco. International Journal of Innovation and Scientific Research. ISSN 2351-8014 Vol. 14 No. 2, pp. 188-197.

10. **Bentayeb A. et Leclerc C. 1975.** Le cause moyen atlasique, in ressources en eau du Maroc. Tome 3, notes et mémoires du service géologique du Maroc, n°231, pp.37-66.
11. **Berrada M., El Hmaidi A., Monyr N., Abrid D., Abdallaoui A., Essahlaoui A. et El Ouali A., 2016.** Self-organizing map for the detection of seasonal variations in Sidi Chahed Dam sediments (Northern Morocco). Hydrological Sciences Journal, ISSN: 0262-6667 (Print) 2150-3435. pp 1-8.
12. **Blakely R. J. 1996.** Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press.
13. **Bouikbane H. 2015.** Apport d'un couplage géophysique et hydrochimique à l'étude du transfert naturel des écoulements souterrains entre le cause calcaire d'El Hajeb-Ifrane et la plaine de Saïs (MAROC). Thèse Doctorat, Université My Ismaïl, 175p.
14. **Bouikbane H., Benamara A., Boualoul M., Sahbi H., Chahlaoui A. et Ouhmidou M. 2013.** Contribution de l'hydrochimie a l'étude du transfert entre le réservoir karstique du cause d'El hajeb et la plaine de Saiss (Maroc). Science lib Editions Mersenne volume5, n°131007 ISSN 2111-4706. pp 1-23.
15. **Bouikbane H., Boualoul M. et Benamara A. 2017.** Prospection par méthode de sondages électriques au niveau du piedmont du cause moyen atlasique d'El Hajeb Ifrane (Maroc). OSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG) e-ISSN: 321-0990, p-ISSN: 2321-0982. Volume 4, Issue 4 Ver. II (Jul. -Aug.016), pp 42-52.
16. **Bouikbane H., Boualoul M., Benamara A and EL Kourchia A. 2016.** Contribution of Tomography Electrical Resistivity in Hydrogeological at the Middle Atlas Cause (El Hajeb-Morocco). International Journal of Engineering Science Invention. ISSN (Online): 2319-6734, ISSN (Print): 2319-6726, Volume 5 Issue1. pp 12-18.
17. **Bouikbane H., Boualoul M., Benamara A., Sahbi H. and Qarqori Kh. 2015.** Coupling Electrical Tomography And VLF Electromagnetic Geophysical Methods To Detect Water-Bearing Fractured Zones At The Cause Of El Hajeb (Morocco). Journal of Applied Physical Science International. Volume 3 [Issue 4]. pp 122-129.
18. **Bournas N. 2001.** Interprétation des données aérogéophysique acquises au-dessus du Hoggar du Hoggar Oriental. Thèse pour obtenu le doctorat. Université USTHB, 2001. pp12-16.

19. **Bouya N. 2014.** Utilisation des données géophysiques aéroportées magnétique et spectrométriques dans la cartographie géologique de la partie NE du massif central et des causses moyen-atlasiques. Thèse Doctorat, Université My Ismaïl, 176p.
20. **Bouya N., El Ouardi H., Habibou E., Mercier E. et 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 Géoscience Review*, vol.20, N 1, pp 13-20.
21. **Chouteau M. & Giroux B 1999.** Géophysique appliquée II 7.449. Méthodes électromagnétiques, Notes de cours. 164p.
22. **Chouteau M. & Giroux, B. 2006.** Géophysique appliquée II, Méthodes électriques, Notes de cours, Ecole Polytechnique de Montréal, été 2006, GLQ 3202, 81 p.
23. **Chouteau M. 2002.** Géophysique appliquée, tome I, Magnétisme, Ecole Polytechnique de Montréal. 98p.
24. **Coulibaly P., Anctil F. & Bobée B., 1999.** Préviation hydrologique par réseaux de neurones artificiels : état de l'art. *Can. J. Civ. Eng.*, 26, pp 293–304.
25. **David J. Isles and Leigh R. Rankin. 2013.** *Geological Interpretation of Aeromagnetic Data.* Livre. 365p.
26. **De Villers J., Squilbin M. & Yourassowsky C. 2005.** Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface: cadre général. Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement. 16p.
27. **Deslandes S. et Gwyn Q. H. J. 1991.** Evaluation de SPOT et SEASAT pour la cartographie des linéaments : comparaison basée sur l'analyse du spectre de Fourier. *Canadian Journal of Remotesensing* Vol n°2, pp. 98-110.
28. **Douagui A. G., Kouame I. K., Koffi K., Dibi B., Konan F. K. et Savane I. 2009.** Origines et modélisation de la minéralisation des eaux du Quaternaire d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International journal of biological and chemical sciences.*ISSN 1991-8631, pp 856-869.
29. **Doyle H. A. 1990.** « Geophysical exploration for gold—a review ». *Geophysics* 55 (2). Society of Exploration Geophysicists: pp134-46.
30. **Dreyfus G., Martinez J. M., Samuelides M., Gordon M. B., Badran F., Thiria S. and Herault L. 2002.** Réseaux de neurones: cartes auto-organisatrices et classification automatique, Eyrolles, 2, pp 287-335.
31. **El jabouri M. 2014.** Etat de qualité des eaux de surfaces du bassin de Sebou. Mémoire de master. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès. 64p.

32. **El Ouardi H., Boualoul M., Ouhaddach H., Habibi M., Muzarafuti A., Allaoui A. & Amine A. 2018.** Fault analysis and its relationship with karst structures affecting Lower Jurassic limestones in the Agourai plateau (Middle Atlas, Morocco). *Geogaceta*, 63 (2018), 119-122 ISSN (versión impresa): 0213-683X, ISSN (Internet): 2173-6545. pp 119-122.
33. **Elouazani K. A. 2006.** Reconnaissance hydrogéologique des systèmes karstiques du causse moyen atlasique apport de la géophysique et l'étude combinée des débits de sources et de la pluviométrie. Thèse Doctorat, Université My Ismaïl, 197p.
34. **Fabriol H. 2004.** Méthodes géophysiques appliquées à l'exploration géothermique en contexte insulaire volcanique. Synthèse bibliographique. Rapport final. BRGM/RP-53137-FR, pp 19-20.
35. **Faure S. 2009.** Identification des linéaments géophysiques et leurs relation avec la minéralisation. Notes de cours. 37p.
36. **Gasquet C. et Witomsky P. 1995.** Analyse de Fourier et applications. Filtrage, calcul numérique, ondelettes. Edition Masson. 356p.
37. **Groun, D. 2009.** Analyse Magnéto-Spectrométrique des Données Aérogéophysiques du Grand Fossé Pharusien (Hoggar Occidental), Mémoire de magister en géophysique, UMB, Boumerdes. 143p.
38. **Gunn P. J. 1975.** Linear transformations of gravity and magnetic fields, *Geophys. Prosp.* N°: 23: pp 300-312.
39. **Hinze W. J., Von F., Ralph R. B. et Afif H. S. 2013.** Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications. Cambridge University Press. 13p.
40. **Hritta D. 2015.** Contribution à l'étude hydrogéophysique des rides pré-rifaines (Maroc) apport du SIG et de la géophysique appliquée. Thèse Doctorat, Université My Ismaïl, 211p.
41. **Hsu S.K., Coppens D., and Shyu C.T. 1998.** Depth to magnetic source using the generalized analytic signal, *Geophysics*, n°: 63 pp 1947-1957.
42. **Hsu S.K., Sibuet J.C. and Shyu C.T. 1996.** High resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique, *Geophysics*, n °: 61 pp 373-386.
43. **Husson E. 2013.** Interaction géodynamique/karstification et modélisation géologique 3D des massifs carbonatés: Implication sur la distribution prévisionnelle de la karstification. Thèse Doctorat, Université Montpellier II. 327p.

44. **Keating P. 1995.** « A simple technique to identify magnetic anomalies due to kimberlite pipes ». *Exploration and Mining geology* 4 (2), pp 121-25.
45. **Keating P. and Sailhac P. 2004.** « Use of the analytic signal to identify magnetic anomalies due to kimberlite pipes ». *Geophysics* 69 (1). Society of Exploration Geophysicists: pp 180-90.
46. **Kohonen T. 1995.** *Self-Organizing Maps*. Springer-Verlag, Series. in Informatique Sciences, 30, Heindelberg, 362p.
47. **Kohonen T. 2001.** *Self-organizing maps*. 3rd ed. Springer, Berlin.
48. **Konan K.F., Leprieur F., Ouattara A., Brosse S., Grenouillet G., Gourène G., Winterton P. and Lek S. 2006.** Spatio-temporal patterns of fish assemblages in coastal West African rivers: a self-organizing map approach. *Aquat. Living Resour.*, 19, pp 361–370.
49. **Le Mouël J.L. 1969.** Sur la distribution des éléments magnétiques en France. Thèse, Faculté des sciences de l'Université de Paris.
50. **Leclerc, C. 1973.** Ressources en eau du Moyen Atlas tabulaire. Thèse 3ème cycle. Rapp. DRPE, inédit, 150, pp13-20.
51. **Macnae J. C. 1979.** « Kimberlites and exploration geophysics ». *Geophysics* 44 (8). Society of Exploration Geophysicists, pp 1395-1416.
52. **Mamouche Y. 2018.** Apport des données géologiques et géophysiques à l'étude des potentialités minières du Maroc nord oriental (secteur de Tiouli). Mémoire de master Faculté des sciences et techniques, Université Hassan I Settat, 94p.
53. **Marson I. and Klingele E. E. 1993.** Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation, *Geophysics*, n°: 58, pp 1588-1595.
54. **Menke W. 1989.** *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*, Academic Press. Inc.
55. **Mhiyaoui H., Manar A., Remmal T, Mustapha Boujamaoui M., El kamel F., Amar M., Mansour M., & El amrani E. I., 2016.** Structures profondes du volcanisme quaternaire du Moyen Atlas central (Maroc): Apports de la cartographie aéromagnétique. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 2016, n° 38, e-ISSN : 2458-7184, 111-125p.
56. **Michard A. 1976.** *Géologie du Maroc*. Livre 439p.
57. **Miche H., Saracco G., Mayer A., Qarqori K., Rouai M. Dekayir A. Chalikakis K. and Emblanch C. 2017.** Hydrochemical constraints between the karst Tabular Middle

- Atlas Causses and the Saïss basin (Morocco): implications of groundwater circulation. *Hydrogeology Journal*. ISSN: 1431-2174 (Print) 1435-0157. pp 71-87.
58. **Mili EM., Sahbi H. et Boualoul M. 2018.** Conception d'un SIG pour la construction de la carte géologique régionale du Nord-Est du Maroc oriental. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, N° 588, ISSN 0374-9789. pp 148-154.
59. **Miller H. G. and Vijay S. 1994.** « Potential field tilt—A new concept for location of potential field sources ». *Journal of Applied Geophysics* 32 (2-3). Elsevier: 213-17.
60. **Mohamed V. M. 2018.** Exploitation des techniques géospatiales pour la cartographie géologique et l'exploration minière : Application à l'Anti-Atlas centro-oriental (Maroc). Thèse de Doctorat d'es-science. Université Moulay Ismail, Faculté des sciences, 269 p.
61. **Mousaid A., Aissa M., Boualoul M., Mezougane H. et El Azmi D. 2018.** Apport de la tomographie et de la prospection géoélectrique à l'étude des tourmanilites stannifères d'Achmmache (Maroc central). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, N° 588, ISSN 0374-9789. pp 50-63.
62. **Mushayandebvu M. F., Driel P. V., Reid A. B. and Fairhead J. D. 2001.** Magnetic source parameters of two-dimensional structures using extended Euler deconvolution. *Geophysics*, vol 66, N° 3(May-june 2001), pp 814-823.
63. **Nabighian M. N. 1972.** The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, n°: 37 pp 507-517.
64. **Nabighian M. N. 1974.** Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, n°: 39 pp 85-92.
65. **Nabighian M. N. 1984.** Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations, *Geophysics*, n°: 49 pp 780-786.
66. **Nabighian M. N. and Hansen R. O. 2001.** Unification of Euler and Werner deconvolution in three dimensions via the generalized Hilbert transform. *Geophysics*, vol 66, N° (6 November-December 2001), pp 1805-1810.
67. **Nabighian, M. N, Grauch V. J. S., Hansen R. O., LaFehr T. R., Li Y., Peirce J. W., Phillips J. D. and Ruder M. E. 2005.** « The historical development of the magnetic method in exploration ». *Geophysics* 70 (6). Society of Exploration Geophysicists: 33ND-61ND.

68. **Nejjari, A. 2002.** La sécheresse, l'eau et l'homme dans le bassin versant du haut Sebou (Moyen Atlas Septentrional-Maroc). Thèse de Doctorat de l'université de Metz, 304p.
69. **Park Y.S., Cereghino R., Compin A and Lek S. 2003.** Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters. *Ecol., Model.*, n°:160: pp 265– 280.
70. **Piqué A., Soulaïmani A., Laville E., Bouabdelli M., Hoepffner C. et Chalouan A.2006.** Géologie du Maroc. Livre 271p.
71. **Power M., Belcourt G., and Rockel E.D. 2004.** « Geophysical methods for kimberlite exploration in northern Canada ». *The LeadingEdge* 23 (11). Society of Exploration Geophysicists: pp 1124-29.
72. **Qadem A. 2015.** Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du haut Sebou (Maroc). Thèse de doctorat de l'université Sidi Mohamed Ben Abdelah et l'université de Lorraine, 360p.
73. **Qarqori K. 2015.** Contribution à l'étude du réservoir discontinu et karstique des causses moyen-atlasiques et de sa jonction avec le bassin de Saïs par télédétection spatiale et imagerie géophysique. Thèse Doctorat, Université My Ismaïl. 183p.
74. **Reynolds J. M. 2011.** «An introduction to applied and environmental geophysics » (Edition John Wiley).
75. **Reynolds R. L., Fishman N. S. et Mark R. H. 1991.** « Sources of aeromagnetic anomalies over Cement oil field (Oklahoma), Simpson oil field (Alaska), and the Wyoming-Idaho-Utah thrust belt ». *Geophysics* 56 (5). Society of Exploration Geophysicists: pp 606-17.
76. **Roest W. R., Verhoef J., and Pilkington M., 1992.** Magnetic interpretation using the 3-D signal analytic, *Geophysics*, n°: 57 pp 116-125.
77. **Rodier J. 2009.** L'analyse de l'eau, 9ème édition Dunod (éditeur), Paris, France 1579p.
78. **Sailhac P. 1999.** Analyse multiéchelle et inversion de données géophysiques en Guyane France, Thèse d'Etat, Institut de Physique de Globe de Paris, France.
79. **Saracco G. 2010.** Etude des circulations et du renouvellement des eaux souterraines du Bassin de Saïs (Moyen Atlas, Maroc) par couplage de mesures isotopiques et tomographie électromagnétique multi-échelle. Région de Fès-Meknès. Congrès European Geophysics Union Vienne.

80. **Scintrex 2013.** Geophysical and Geochemical instrumentation and services.
81. **Sefrioui S. 2013.** Caractérisation Hydro-Structurale et Quantification des Ressources en eau Souterraine dans le bassin de Sebou-Maroc: apport des Outils Isotopiques et du SIG. Thèse Doctorat, Université My Ismaïl. 229p.
82. **Seghir E., El Ouardi H. and Lindhorst J. 2017.** Structural analysis of tin-bearing mineralization in bou El Jaj district (Hercynian Central Massif, Morocco). Arab J Geosci (2017) 10:467.<https://doi.org/10.007/s12517-017-3246-z>.
83. **Sendide O. 2002.** Etude qualitative des eaux de la nappe phréatique du bassin de Fès-Meknès: caractérisation évolution modélisation mathématique et moyens de protection. Thèse Doctorat, Université de Tunis El Manar, 356p.
84. **Smith R. S., Thurston J. B., Dai T. F., and Macleod I. N. 1998.** ISPI™ -The improved source parameter imaging method, Geophys. Prospec. N°: 46 pp 141-151.
85. **Spaid R., Malia K. and P M Eick. 1998.** « HRAM as a tool for petroleum system analysis and trend exploration: A case study of the Mississippi Delta survey, southeast Louisiana ». Canadian Journal of Exploration Geophysics 34 (1-2): pp 83-96.
86. **Stone V. C. A., Derek J. F. and Heiko O. W. 2004.** « Micromagnetic seep detection in the Sudan ». The Leading Edge 23 (8). Society of Exploration Geophysicists: pp 734-37.
87. **Subba R. N. 2012.** PIG: a numerical index for dissemination of groundwater contamination zones. Hydrological processes 26, DOI:10.1002/hyp.8456, pp3344-3350.
88. **Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E. and Keys D. A. 1976.** « Applied Geophysics, 860 ». Cambridge University Press, New York.
89. **Telford W.M., Geldart L.P. and Sheriff R.E., 1998.** Applied Geophysics, second edition, Cambridge University Press,
90. **Teskey, D. J., Hood P. J., Morley L. W., Gibb R. A., Sawatzky P., Bower M. and Ready E. E. 1993.** « The aeromagnetic survey program of the Geological Survey of Canada: contribution to regional geological mapping and mineral exploration ». Canadian Journal of Earth Sciences 30 (2). NRC Research Press: pp 243-60.
91. **Thompson D. T. 1982.** EUDPH, A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data, Geophysics, pages, n°: 47, pp 31-37.

92. **Thurston J. B. and Smith R. S. 1997.** Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI™ method, *Geophysics*, n°: 62, pp 807-813.
93. **Thurston J. B., Smith R. S. and Guillon J. C. 2002.** A multimodel method for depth estimation from magnetic data, *Geophysics*, n°: 67 pp 555-561.
94. **Verduzco B. and Fairhead J. D., Chris M. G. and Chris M. 2004.** « New insights into magnetic derivatives for structural mapping ». *The Leading Edge* 23 (2). Society of Exploration Geophysicists: pp 116-19.
95. **Ward J. H. 1963.** Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, Volume 58, Issue 301, pp. 236-244.

Logiciels :

- ArcGis
- CorelDraw
- Envi
- Geomatica
- Georose
- Global Mapper
- Google earth
- Matlab
- Oasis montaj
- Res2d
- Surfer
- Winsev