République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Tindouf



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

Laboratoire des Systèmes Environnementaux et Energétiques (L.S.E.E)

THESE

En Vue de l'Obtention du Diplôme de doctorat L.M.D

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Géologie de l'ingénieur

Présentée par : DIDA Moustafa

Etude intégrée géophysique - télédétection pour l'exploration des ressources en eau: application sur le Bassin de Tindouf

Soutenu le : 29/11/2026

Soutenue Devant Le Jury Composé de:

TALHI Abdelkrim	Professeur	Université de Tindouf	Président
HAMI Khelif	Professeur	Université de Tindouf	Directeur de thèse
ZAGANE Mansour	Professeur	Université de Mascara	Examinateur
ALIOUANE Leila	Professeur	Université de Boumerdes	Examinatrice
MEDDAH Amar	MCA	Université de Tindouf	Examinateur

Année Universitaire: 2025/2026

TABLE DES MATIERES

Table des matières	I
Table des figures	IV
Liste des tableaux	VIII
Résumé	XI
Abstract	XII
ملخص	XIII
Introduction générale	XIV
Remerciements	XVII

CHAPITRE I : Généralité

I. Introduction	1
II. Situation Géographique du Bassin Tindouf	1
III. Présentation de la zone d'étude	1
III.1.Situation géographique	1
III.2. Couvert végétal	3
III.3. Aspects sociaux économiques de la région	3
IV. Conclusion	7

CHAPITRE II : Etude Climatologique

I. Introduction	8
II. Etude des paramètres climatiques	8
II.1. Etude des précipitations	8
II. 2. Etude des températures	10
III. Etude du climat	12
III.1.Diagramme pluvio-thermique	12
III. 2. Calcul de l'indice d'aridité de De Martonne	12
III.3.Calcul de l'indice d'aridité de Louis Emberger	13
IV. Analyse des différents éléments du bilan hydrologique	15
IV. 1.Estimation du ruissellement	15
IV. 2.Estimation de l'infiltration	15
V. Représentation des résultats	21
V.1.Estimation du ruissellement	22
V.2.Estimation de l'infiltration	22
VI. Conclusion	23

CHAPITRE III : Géologie

I. Introduction 25
II. Historique des travaux 25
III. Contexte Géologique et Structural 26
III.1. Aperçu lithostratigraphique 28
III.2. L'effet de la tectonique sur le bassin de Tindouf 32
IV. Cadre géologique locale du secteur d'étude 34
V. Réseau hydrographique 35
VI. Les missions de terrain pour l'analyse géologique et hydrogéologique de la zone d'étude 36
VI.1.Corrélation stratigraphique interprétées 38
VI.2. Interprétation géologique 39
VI.3.Localisation des prises de vue 39
VI.4.Observations de terrain 41
VII. Conclusion 41

CHAPITRE IV : Hydrogéologique et Hydrochimique

I. Introduction 42
II. Contexte hydrogéologique régional 42
III. Contexte hydrogéologique local et Ressources en eau souterraines 49
III.1.Hydrogéologique de secteur d'étude 49
III.2.Ressources en eau souterraines 50
IV. Caractéristiques hydrodynamiques 54
IV.1.Cartographie piézométrique 54
IV.2.Calcul du gradient Hydraulique 57
IV.3.Les résultats de calcul des gradients hydrauliques 58
V. Hydrochimique 58
V. 1.Etude Hydrochimie et type d'eau 58
V.2.Aptitude des eaux à l'irrigation 62
VI. Conclusion 64

CHAPITRE V : Télédétection

I. Introduction 66
II. Notions de base sur la télédétection 66
II.1. Définition 66
II.2. Principes fondamentaux de la télédétection 67
II.3. Méthode de la télédétection 70
III. Notions sur les satellites 71
III.1.Acquisition et traitement des données satellitaires 71
III.2.Traitements des données images 72
III.3.Interprétation des données géologiques et géomorphologiques 73

IV. Approches en télédétection 73
IV.1. Approches géologiques 73
IV.2. L'analyse linéamentaire 73
IV.3. Etude compréhensive des linéaments 74
V. Méthodologie et Documents utilisés 74
V.1. Radar 75
V.2. Programme Sentinel 75
V.3. Linéamentaire 76
IV. Résultat et Analyse 76
IV. 1. Analyse et Résultats des Données Sentinel 76
IV. 2. Analyse et Résultats des Données Radar 79
IV.3. Analyse structurale de la fracturation 81
V. Conclusion 84

CHAPITRE VI : Géophysique

I .Introduction 86
II. Généralité sur la géophysique et l'Historique 86
II. 1. Définition et évolution de la géophysique 86
II.2. Justification du choix de la prospection électrique 87
II.3. La géophysique aux services des géologues 88
II.4. Prospection électrique 89
II. 5 . Propriétés électriques des roches 93
II.6. L'interprétation d'un sondage électrique 94
II.7.Construction et interprétation des cartes et profils de résistivité 95
III. L'application géophysique dans la zone étudiée 96
III.1. La prospection électrique dans la région Fort Lotfi 96
III.2. La prospection électrique dans la région de Hassi Khebbi 102
IV. Résultat et interprétation d'étude 106
IV.1. Modélisation inversée D1 de la résistivité dans la région de Fort Lotfi 107
IV.2. Présentation spatial dans la région Hassi Khebbi 110
V. Conclusion 114

Conclusions générales et Recommandations

I. Conclusions générales 115
II. Recommandations 117

Références Bibliographie 118
Annexe 123

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

		Page
Fig. 01	Situation générale du Bassin de Tindouf, source Esri, i-cubed, USDA, USGS, AEX, GeoEye.	1
Fig. 02	carte présenté la situation géographique de la zone étudiée.	2
Fig. 03	Évolution de la population.	3
Fig. 04	Répartition de la SAU.	5
Fig. 05	Répartition des effectifs au niveau de la wilaya de Tindouf.	6

CHAPITRE II

Fig. 06	Variation des précipitations annuelles à la station de Tindouf (1981/2023).	09
Fig. 07	Variation des précipitations moyennes mensuelles.	09
Fig. 08	Variation des précipitations moyennes saisonnières.	10
Fig. 09	Variation des températures annuelles à la station de Tindouf (1981/2023).	11
Fig. 10	Variation des températures moyennes mensuelles de la station Tindouf (1981/2023).	11
Fig. 11	Diagramme pluvio-thermique – station de Tindouf (1981/2023).	12
Fig. 12	Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martone.	13
Fig. 13	Climagramme d'Emberger.	14
Fig. 14	Évaluation du L'ETR annuelle en fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations (Wundt).	19
Fig. 15	Évaluation du L'ETR annuelle en fonction des précipitations moyennes annuelles (Verdeil).	20
Fig. 16	Termes du bilan hydrologique.	23

CHAPITRE III

Fig. 17	Carte géologique du bassin de Tindouf et du revers Sud de l'Anti-Atlas.(d'après Hollard, 1967).	27

Fig. 18	Coupe stratigraphique N-S de la partie occidentale du bassin de Tindouf. D'après Ibrihen et Ghoul, 2005; modifiée.	28
Fig. 19	Lithostratigraphie synthétique du bassin de Tindouf à partir des données de Hollard et al. (1958), Gevin (1960), Fabre (1976) et Guerrak (1988), Sermi (1960).Les formations qui portent un astérisque sont définies sur le flanc Nord du bassin.	29
Fig. 20	Coupe de Merkla à Targant (Gevin, 1960)	31
Fig. 21	Carte lithostructurale montrant les principaux éléments structuraux du flanc septentrional du bassin de Tindouf (Hachamuoi O. 2022).	32
Fig. 22	Extrait de la carte géologique montrant les différentes structures géologiques, Écorche géologique a la surface de la discordance hercynienne 1 : 2000 000 (d'après Geol. Service Algérien 1999) modifié.	35
Fig. 23	Carte du réseau hydrographique de la zone flanc nord de bassin.	36
Fig. 24	Corrélation entre deux coupe géologique (NB 08 bis – NB 03 bis).	38
Fig. 25	Carte CorelDRAW localisant les points de prise de vue (photo de l'auteur).	39
Fig. 26	Coupe géologique montrant la succession du tertiaire du forage NB 03bis (DHW DE TINDOUF, 2025).	40

CHAPITRE IV

Fig. 27	Log Forage bou_Grfa représenté les Différents systèmes aquifères dans la région de Tindouf d'après l'ANRH Alger, 2004 .	43
Fig. 28	Carte schématique montrant la répartition des différents aquifères du bassin de Tindouf (DHW Tindouf 2012 et Yahyaoui A. et al, 2020).	44
Fig. 29	Log du forage HT10 (DHW TINDOUF).	47
Fig. 30	Log. du forage TFC 1 TIFOUCHY (DHW TINDOUF).	48
Fig. 31	Implantation des forages dans l'aquifère Tinfouchy - Hassi Khebbi (image Google Earth).	49
Fig. 32	Localisation des forages (ArcGIS/QGIS).	50
Fig. 33	Situation des Agglomérations de la région Fort Lotfi.	52
Fig. 34	Carte piézométrique de la zone Fort Lotfi – Hassi Khebbi.	56
Fig. 35	Graphique de gradient hydraulique entre les deux forages Hdeb Elforga 1 et Khebbi 05.	58

Fig. 36	Diagramme de piper des eaux région Fort Lotfi-Hassi Khebbi.	59
Fig. 37	Diagramme de Durov des eaux souterraines de la région Tinfouchy – Hassi Khebbi	60
Fig. 38	Carte de distribution de l'indice de qualité des eaux souterraines (GWQI) de la zone d'étude.	61
Fig. 39	Carte du rapport d'adsorption du sodium (SAR) de la zone d'étude.	63
Fig. 40	Carte du rapport de Kelley (KR) de la zone d'étude.	63
Fig. 41	Carte de l'indice de perméabilité (IP) de la zone d'étude.	64

CHAPITRE V

Fig. 42	Principe de base de la télédétection.	66
Fig. 43	Principes fondamentaux de la télédétection.	67
Fig. 44	Cheminement du rayonnement électromagnétique	68
Fig. 45	Rayonnement et spectre électromagnétiques.	69
Fig. 46	Signature spectrale de quelques éléments.	69
Fig. 47	Différentes étapes de la télédétection.	70
Fig. 48	Etape d'une compagne de télédétection.	71
Fig. 49	Schéma simplifier les étapes de traitements des images.	72
Fig. 50	Schéma simplifier les étapes d’analyse les linéaments.	75
Fig. 51	Image sentinel 4-3-2 couleur naturelle de la zone d’étude.	77
Fig.52	Image Sentinel ACP de la zone d’étude.	78
Fig.53	Image radar de la zone d’étude (A), (B).	80
Fig.54	Image radar filtré de la zone d’étude.	81
Fig.55	Image de fracturation automatique de la région Fort Lotfi.	82
Fig.56	Carte linéamentaire de la région Fort Lotfi- Hassi Khebbi	82

Fig. 57	Rosace de distribution directionnelle des linéaments encaissés dans la région Fort lotfi-Hassi Khebbi.	84

CHAPITRE VI

Fig.58	Equipotentielles et lignes de courant dans un sol homogène.	89
Fig.59	Dispositif Schlumberger.	90
Fig.60	Fonction de sensibilité pour certains dispositifs (Chapellier, 2001).	91
Fig.61	Différentes configurations du dispositif Dipôle.	91
Fig. 62	Fonction de sensibilité pour certains dispositifs (Chapellier, 2001).	92
Fig. 63	Catre de prospection électrique de la région Fort lotfi.	96
Fig. 64	Coupes géoélectriques de la région Fort lotfi.	96
Fig. 65	Catre des résistivités apparentes Ligne AB=60m de la région Fort lotfi.	99
Fig. 66	Carte de résistivité apparente Ligne AB= 300m de la région Fort lotfi.	100
Fig. 67	Catre des résistivités apparentes ligne AB=600m de la région Fort Lotfi.	101
Fig. 68	Carte de résistivité apparente en AB= 100m de la région de Hassi Khebbi.	102
Fig. 69	Carte de résistivité apparente en AB= 400m dans la région de Hassi khebbi.	103
Fig. 70	Carte de résistivité apparente en AB= 2000m dans la région de Hassi khebbi.	104
Fig. 71	Modèle de résistivité apparente inversée du forage NB 03 bis en fonction de la profondeur de la région Fort Lotfi.	107
Fig. 72	Modèle de résistivité apparente inversée du forage NB 02 bis en fonction de la profondeur de la région Fort Lotfi.	108
Fig. 73	Modèle de résistivité apparente inversée du forage NB 08 bis en fonction de la profondeur de la région Fort Lotfi.	108
Fig. 74	Modèle de résistivité apparente inversée du forage TFC 01 bis en fonction de la profondeur de la région Fort Lotfi.	108
Fig. 75	Corrélation géoélectrique des quatre forges de la zone d'étude, basée sur la zone conductrice de la nappe.	109

Fig. 76	Image des étapes de traitement global pour la localisation de différents thèmes de Hassi Khebbi.	110
Fig. 77	Image spatiale de l'épaisseur géologie et son histogramme de Hassi Khebbi.	111
Fig. 78	Image spatiale de la piézométrie et son histogramme de Hassi Khebbi.	112
Fig. 79	Image spatiale de la résistivité et son histogramme de Hassi Khebbi.	112
Fig. 80	Image spatiale des Débits des forages existants et son histogramme de Hassi Khebbi.	113

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

		Page
Tab. 01	Répartition de la population par commune (Monographie de la Wilaya de Tindouf, 2024).	4
Tab. 02	Superficie agricole de la wilaya.	4
Tab. 03	SAU wilaya : superficies et productions de la wilaya.	4
Tab. 04	Structure du troupeau et productions de la wilaya de Tindouf.	5
Tab. 05	Surface irriguée par commune (DHW, DSA, Tindouf, 2024).	6

CHAPITRE II

Tab. 06	Localisation de la station de Tindouf	8
Tab. 07	Les précipitations moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles à la station de Tindouf de 1981 à 2023.	8
Tab. 08	Les températures moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles à la station de Tindouf de 1981 à 2023.	10
Tab. 09	Calcul de l'indice d'aridité de Louis Emberger - Station de Tindouf (Période 1981-2023).	14
Tab. 10	Calcul de l'évapotranspiration potentielle corrigée (ETP) par la méthode de Thornthwaite - Station de Tindouf (Période 1981-2023).	16
Tab. 11	Calcul de l'évapotranspiration potentielle corrigée (ETP) par la méthode de Serra - Station de Tindouf (Période 1981-2023).	17

Tab. 12 Évaluation du L'ETR annuelle selon la méthode de Turc. 18

Tab. 13 Évaluation du L'ETR annuelle selon la méthode de Wundt. 18

Tab. 14 Évaluation du L'ETR annuelle selon la méthode de Verdeil. 19

Tab. 15 Évaluation du L'ETR annuelle et du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (1981/2023). 21

Tab. 16 Les résultats de l'ETR par différentes méthodes. 21

Tab. 17 Estimation du ruissellement selon la méthode de Tixeront et Berkaloff. 22

Tab. 18 Résultats de la lame d'eau infiltrée. 22

CHAPITRE III

Tab. 19 Tableau récapitulatif des forages réalisés. 37

Tab. 20 Tableau récapitulatif des Descriptions et remarques. 38

CHAPITRE IV

Tab. 21 Caractéristiques des forages captant la nappe du Viséen Terminal (DHW Tindouf) 45

Tab. 22 Tableau Descriptif des forages de la région Fort lotfi. 51

Tab. 23 Consommation journalières par agglomerations. 52

Tab. 24 Besoins journalieres par agglomerations (zone 01) 53

Tab. 25 Besoins journalières par agglomerations (zone 02) 53

Tab. 26 Besoins journalières par agglomerations (zone 03) 53

Tab. 27 Les ouvrages de stockages proposés 54

Tab. 28 Les forages concernant la carte piézométrique dans la région Hassi khebbi- Fort Lotfi. 55

Tab. 29 Statistiques descriptives des paramètres de qualité de l'eau. Concentration en mg/l. 58

Tab. 30 Classification de la qualité des eaux souterraines basée sur l'indice GWQI 61

Tab. 31 Résumé statistique des paramètres des normes SAR, KR et PI. 62

CHAPITRE V

Tab. 32	Synthèse des orientations structurales des linéaments identifiés dans la zone de Fort Lotfi – Hassi Khebbi, avec un intervalle angulaire de 20°.	83

CHAPITRE VI

Tab. 33	Les méthodes géophysiques par profondeur d'investigation.	89
Tab. 34	Porosité, perméabilité et résistivité électrique (Chapellier, 2000).	94
Tab. 35	Echelle de résistivité électrique des formations lithologiques peuvent constituer ou non des aquifères.	98
Tab. 36	Proposition des points d'eau dans la région Fort lotfi.	101
Tab. 37	Echelle de résistivité électrique des formations lithologiques.	105
Tab. 38	Proposition des points d'eau dans la région Hassi khebbi	106

Résumé

Dans le cadre de cette thèse de doctorat, une approche intégrée combinant la géophysique et la télédétection a été mise en œuvre pour l'exploration et l'évaluation des ressources en eau souterraine dans le flanc nord du bassin de Tindouf. La localité de Fort Lotfi – Hassi Khebbi (superficie de 9856 km^2) a été retenue comme zone d'étude, en raison de son importance stratégique et de son impact socio-économique sur le développement durable de la région.

L'application des techniques de télédétection, notamment à travers le traitement et l'interprétation des images satellitaires, a permis la mise en évidence des structures géologiques, des linéaments, et du réseau hydrographique, autant de paramètres essentiels à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique local. Parallèlement, l'évaluation des zones favorables à l'implantation de forages à gros débits nécessite la constitution de bases de données spatiales intégrant plusieurs paramètres : lithologie, fracturation, pente, réseau hydrographique, ainsi que les caractéristiques des forages existants, dont les profondeurs varient entre 83 et 170 m, avec des débits moyens compris entre 4 et 10 L/s et des niveaux statiques situés entre 24 et 45 m de profondeur. L'analyse des images traitées a permis d'identifier près de 140 linéaments, orientés principalement NE–SW et NW–SE. Le traitement ACP de Sentinel-2 a également permis de distinguer les unités lithologiques, les structures fracturées et les zones à forte humidité relative. Dans la région du Fort Lotfi – Hassi Khebbi, la prospection géophysique électrique permet d'identifier les contrastes lithologiques et hydrogéologiques du sous-sol à partir des variations de résistivité électrique apparente , comprises entre 20 et moins de 500 Ω·m. Le traitement thématique des données, intégré dans un environnement SIG, facilite la cartographie des anomalies conductrices et résistantes, tandis que la modélisation inverse unidimensionnelle (D1) des sondages électriques verticaux permet de reconstituer la structure verticale des formations et d'identifier les horizons aquifères. L'ensemble de ces approches constitue un outil efficace pour la caractérisation du sous-sol et l'aide à la décision pour l'implantation des forages dans la zone Fort Lotfi – Hassi Khebbi.

Ces résultats ont été validés par les données hydrogéologiques disponibles sur la zone d'étude, confirmant la cohérence du modèle établi. Par ailleurs, l'analyse physico-chimique des eaux de 16 forages révèle une dominance des faciès chlorurés-sulfatés magnésiens, indiquant une évolution chimique contrôlée par la nature lithologique des formations traversées. La nappe aquifère étudiée présente une eau qui, après traitement, est conforme aux normes de potabilité de l'OMS et aux standards algériens, soulignant ainsi son intérêt pour l'alimentation en eau potable de la région.

Mots-clés: Télédétection, Géophysique, Sondages électriques, Fort Lotfi -Hassi Khebbi, Linéaments, Tertiaire continental.

Abstract

As part of this doctoral thesis, an integrated approach combining geophysics and remote sensing was implemented for the exploration and assessment of groundwater resources in the northern flank of the Tindouf Basin. The Fort Lotfi–Hassi Khebbi area, covering an area of 9,856 km², was selected as the study area due to its strategic importance and its socio-economic impact on the sustainable development of the region.

The application of remote sensing techniques, particularly through the processing and interpretation of satellite imagery, enabled the identification of geological structures, lineaments, and the drainage network, all of which are essential parameters for understanding local hydrogeological processes. In parallel, the assessment of suitable areas for the establishment of high-yield boreholes required the development of spatial databases incorporating several parameters, including lithology, fracturing, slope, drainage network, and the characteristics of existing boreholes. These boreholes have depths ranging from 83 to 170 m, average yields between 4 and 10 L/s, and static water levels ranging from 24 to 45 m below ground level.

The analysis of the processed images enabled the identification of approximately 140 lineaments, predominantly oriented NE–SW and NW–SE. Principal Component Analysis (PCA) of Sentinel-2 imagery also made it possible to distinguish lithological units, fractured structures, and areas of high relative moisture. In the Fort Lotfi–Hassi Khebbi region, electrical geophysical surveys were used to identify lithological and hydrogeological contrasts in the subsurface based on variations in apparent electrical resistivity, ranging from 20 to less than 500 Ω·m. The thematic processing of geophysical data within a GIS environment facilitated the mapping of conductive and resistive anomalies, while one-dimensional (1D) inversion modelling of vertical electrical soundings (VES) enabled the reconstruction of the vertical structure of geological formations and the identification of potential aquifer horizons. Collectively, these approaches constitute an effective tool for subsurface characterization and decision-making regarding borehole siting in the Fort Lotfi–Hassi Khebbi area.

These results were validated using the available hydrogeological data from the study area, confirming the consistency of the proposed model. Furthermore, the physicochemical analysis of water samples from 16 boreholes revealed the predominance of magnesium chloride-sulphate water facies, indicating that groundwater chemical evolution is largely controlled by the lithological characteristics of the formations traversed. The investigated aquifer contains water that, after appropriate treatment, complies with both WHO drinking-water guidelines and Algerian standards, highlighting its potential importance as a source of drinking water supply for the region.

Keywords: Remote Sensing, Geophysics, Electrical Soundings, Fort Lotfi–Hassi Khebbi, Lineaments, Continental Tertiary.

الخلاصة

في إطار هذه الأطروحة لنيل شهادة الدكتوراه، تم اعتماد مقاربة متكاملة تجمع بين الجيوفيزياء والاستشعار عن بُعد، بهدف استكشاف وتقييم موارد المياه الجوفية في الجناح الشمالي لحوض تندوف. وقد تم اختيار منطقة فورت لطفي – حاسي الخبي(Fort Lotfi – Hassi Khebbi) ، التي تبلغ مساحتها 9856 كم²، مجالاً للدراسة، نظراً لأهميتها الاستراتيجية وتأثيرها الاجتماعي والاقتصادي في تحقيق التنمية المستدامة بالمنطقة.

أتاح تطبيق تقنيات الاستشعار عن بُعد، ولا سيما من خلال معالجة الصور الفضائية وتفسيرها، تحديد التراكيب الجيولوجية والخطيات والبنية الشبكية للتصريف المائي، وهي معطيات أساسية لفهم النظام الهيدروجيولوجي المحلي. وبالموازاة مع ذلك، تطلّب تقييم المناطق الملائمة لإنجاز آبار ذات إنتاجية مرتفعة إعداد قواعد بيانات مكانية متعددة المعايير، تشمل الليثولوجيا، والتشققات، والانحدار الطبوغرافي، والشبكة الهيدروغرافية، إضافة إلى خصائص الآبار الموجودة، التي تتراوح أعماقها بين 83 و170 متراً، بمعدلات تدفق تتراوح بين 4 و10 لترات في الثانية، ومستويات مياه ساكنة تتراوح أعماقها بين 24 و45 متراً.

وقد مكّن تحليل الصور المعالجة من تحديد حوالي 140 خطية جيولوجية، تتجه أساساً وفق الاتجاهين الشمال الشرقي–الجنوب الغربي(NE–SW) والشمال الغربي–الجنوب الشرقي .(NW–SE) كما سمحت معالجة صور القمر الصناعي Sentinel-2 باستخدام تحليل المكونات الرئيسية (ACP)بالتمييز بين الوحدات الليثولوجية، والتراكيب المتشققة، والمناطق ذات الرطوبة النسبية المرتفعة.

وفي منطقة فورت لطفي – حاسي الخبي، مكّنت المسوحات الجيوفيزيائية الكهربائية من تحديد التباينات الليثولوجية والهيدروجيولوجية في باطن الأرض، اعتماداً على تغيرات المقاومة الكهربائية الظاهرية، التي تتراوح بين 20 وأقل من 500 أوم.متر. كما ساهمت المعالجة الموضوعاتية للبيانات الجيوفيزيائية، ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية(SIG) ، في رسم خرائط الشذوذات الموصلة والمقاومة، في حين سمحت النمذجة العكسية أحادية البعد (D 1) للجسات الكهربائية العمودية بإعادة بناء التوزيع العمودي للتكوينات الجيولوجية وتحديد الآفاق الحاملة للمياه الجوفية. وتشكل هذه المقاربات مجتمعة أداة فعالة لتوصيف باطن الأرض ودعم اتخاذ القرار بشأن تحديد المواقع الملائمة لإنجاز الآبار بمنطقة فورت لطفي – حاسي الخبي.

وقد تم التحقق من صحة هذه النتائج بالاعتماد على المعطيات الهيدروجيولوجية المتوفرة بمنطقة الدراسة، مما يؤكد مدى انسجام النموذج المعتمد. ومن جهة أخرى، أظهر التحليل الفيزيائي والكيميائي لمياه 16 بئراً سيادة الوجوه الهيدروكيميائية الكلورورية-الكبريتاتية المغنيسيومية، مما يشير إلى أن التطور الكيميائي للمياه الجوفية يخضع أساساً لتأثير الطبيعة الليثولوجية للتكوينات الجيولوجية التي تعبرها المياه. كما تبين أن مياه الطبقة المائية المدروسة، بعد إخضاعها للمعالجة المناسبة، تتوافق مع إرشادات منظمة الصحة العالمية (OMS) ومعايير الجودة الجزائرية الخاصة بمياه الشرب، مما يبرز أهميتها وإمكاناتها في مجال التزويد بالمياه الصالحة للشرب بالمنطقة.

الكلمات المفتاحية :الاستشعار عن بعد، الجيوفيزياء، السبر الكهربائي، فور لطفي – حاسي خبّي، الخطوط البنيوية، الثلاثي القاري.

Introduction général

Dans les régions sahariennes, marquées par des conditions arides et semi-arides, les ressources en eau constituent un levier fondamental pour le développement socio-économique durable (Kumar et al., 2017). L'identification, la gestion, la protection et l'exploitation du potentiel hydrique, notamment celui des nappes souterraines, nécessitent le recours à la télédétection, à la géophysique ainsi qu'à l'intégration d'analyses multicritères (Thapa et al., 2017 ; Nasir et al., 2018).

La wilaya de Tindouf se distingue par sa particularité administrative : elle est la seule wilaya algérienne ne comprenant que deux communes, Tindouf et Oum El Assel, regroupées au sein d'une unique daïra. Sa population est estimée en 2024 à 132 439 habitants. L'infrastructure demeure limitée, avec un réseau routier réduit et un aéroport situé à 7 km au nord-ouest de la ville. La liaison avec le Nord du pays se fait principalement par la RN n° 50 en direction de Béni Abbès. Sur le plan industriel, Tindouf ne dispose pas encore d'une véritable exploitation organisée, malgré la présence de deux gisements de fer d'importance stratégique : Gara Djebilet et Mecheri Abdelaziz.

L'eau, ressource vitale depuis l'aube de l'humanité, demeure fortement tributaire de précipitations rares, irrégulières et mal réparties. À l'échelle mondiale, la croissance démographique et l'instabilité accrue des régimes pluviométriques, accentuées par le changement climatique, rendent la gestion durable de l'eau indispensable pour maintenir l'équilibre entre disponibilité des ressources et besoins croissants.

Dans les régions sahariennes, la problématique de l'eau se pose à la fois en termes quantitatifs et qualitatifs, en raison des conditions climatiques extrêmes. L'aridité et l'irrégularité des précipitations influencent directement les ressources en eau, qu'elles soient souterraines ou de surface, tandis que la croissance démographique entraîne une augmentation continue de la demande. Cette pression accrue, combinée à une exploitation souvent irrationnelle, fragilise davantage la disponibilité de la ressource. En effet, de faibles variations de température ou de pluviométrie peuvent avoir des répercussions significatives sur l'écoulement et la recharge des nappes. Cela justifie le recours à des études hydrogéologiques et géophysiques appuyées par les outils modernes de la télédétection.

Sur le plan hydrogéologique, les eaux souterraines de cette région appartiennent principalement à un système aquifère non renouvelable (fossile), ce qui impose une gestion rationnelle afin d'assurer leur préservation. Dans la wilaya de Tindouf, notamment dans la zone dite de la Hamada, la nappe du Tertiaire continental est exploitée par plus de quatre-vingt-dix forages et plus de deux cents puits destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation. Toutefois, cette nappe a connu un abaissement notable de son niveau piézométrique au cours des dernières années. Les principales causes sont l'exploitation excessive, la multiplication des points de captage,

les épisodes de sécheresse liés au changement climatique, ainsi que les erreurs d'implantation des ouvrages hydrauliques dues à l'absence d'études hydrogéologiques et géophysiques fiables.

Ainsi, la recherche et l'exploitation des eaux souterraines doivent impérativement s'appuyer sur une connaissance approfondie de la nature géologique des formations, ainsi que de leur extension horizontale et verticale, afin d'assurer une gestion durable de cette ressource vitale.

Pour atteindre les objectifs fixés dans le cadre de cette recherche, nous avons organisé notre travail en six (06) chapitres principaux, exploitant l'ensemble des informations recueillies dans la zone Fort Lotfi–Hassi Khebbi.

Le premier chapitre présente les généralités relatives à la situation géographique et une description globale de la wilaya. Le deuxième chapitre est consacré à la géologie du bassin de Tindouf. La position géologique particulière de la zone d'étude, caractérisée par une grande variabilité lithologique et une tectonique intense, a favorisé la formation d'horsts et de grabens, ainsi que l'intrusion de dykes et de sills doléritiques (Fabre, 1976). Ces conditions structurales, associées à la présence d'aquifères tels que les grès et sables du Tertiaire continental, créent un cadre favorable à la localisation de zones de captage des eaux souterraines.

Le troisième chapitre porte sur l'hydrogéologie et l'hydrochimie du secteur étudié, tandis que le quatrième est consacré à la climatologie. Le cinquième chapitre traite de l'apport de la télédétection dans l'évaluation des zones à fort potentiel de captage. Cette approche repose sur la conception de bases de données spatiales intégrant divers paramètres : lithologie, fracturation, réseau hydrographique, pente, ainsi que les caractéristiques des forages existants (profondeur, débit, niveau statique).

Enfin, le sixième chapitre est dédié à la géophysique. Ce chapitre est consacré à l'application de la géophysique de prospection électrique dans l'étude hydrogéologique du la zone Fort Lotfi–Hassi Khebbi. Il présente les principes de la mesure de la résistivité électrique apparente et leur intérêt pour la caractérisation des formations géologiques et la détection des horizons aquifères. Le chapitre aborde ensuite le traitement thématique des données géophysiques, fondé sur leur intégration dans un système d'information géographique (SIG), permettant la production de cartes de résistivité et l'identification des principales anomalies géoélectriques. La modélisation inverse unidimensionnelle (D1) des sondages électriques verticaux est développée afin de reconstituer la structure verticale du sous-sol et de corréler les résultats géophysiques avec les données lithologiques des forages existants. L'ensemble de ces méthodes contribue à une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique du la zone Fort Lotfi–Hassi Khebbi et fournit une base scientifique pour la localisation des zones favorables à l'implantation de nouveaux ouvrages de captage.

Dans ce contexte, notre travail s'appuie sur l'analyse et l'interprétation de l'ensemble de ces données, dans l'objectif d'élaborer une base de données hydrogéologique complète. Celle-ci vise à cartographier et identifier les sites les plus favorables à l'implantation de forages, afin de proposer des solutions durables pour l'exploitation des ressources en eau souterraine dans la région étudiée.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, **Pr. HAMI Khelifa** et **Dr. ZEROUAL Ibrahim,** pour son encadrement scientifique, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ce travail. Sa rigueur, sa patience et sa passion pour la géophysique ont été pour moi une source constante d'inspiration.

Je remercie également **Pr. TALHI Abdelkrim, Dr. MEDDAH Amar, Pr. ZAGANE Mansour et Pr. ALIOUANE Liela,** pour leurs remarques constructives et leur soutien durant la préparation de cette thèse.

Mes remerciements vont aussi à **l'équipe du Laboratoire des Systèmes Environnementaux et Energétiques (L.S.E.E)** pour leur assistance technique, leur aide dans le traitement des données et les discussions scientifiques enrichissantes. Je remercie tout particulièrement **la Direction de l'Hydraulique de Tindouf, ADE et ANRH** pour leur collaboration et leur soutien dans les missions de terrain et l'analyse des données.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à mes amis et collègues pour leur encouragement et leur bonne humeur, qui ont rendu cette période de travail plus agréable.

Enfin, je dédie une pensée particulière à ma famille, pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leurs encouragements constants. Sans eux, ce travail n'aurait pas été possible.

Merci à toutes et à tous.

CHAPITRE I

Généralité

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous mettons en évidence les éléments fondamentaux permettant de situer et de délimiter notre secteur d'étude. L'analyse repose sur l'exploitation de cartes géographiques ainsi que de données statistiques, notamment relatives au couvert végétal et aux caractéristiques socio-économiques de la wilaya de Tindouf qui occupe une position géostratégique sur la partie Sud-Ouest de l'Algérie et s'étend sur une superficie de 158874 km^2. Cette démarche a pour objectif de fournir une compréhension approfondie de la géographie et de la morphologie de la zone étudiée, en préalable à la définition des objectifs fixés et à l'établissement des axes nécessaires à la construction de notre problématique.

II. Situation Géographique du bassin de Tindouf

Le bassin de Tindouf se situe dans la partie la plus à l'Ouest du Sahara algérien. Il s'agit d'un bassin asymétrique orienté ENE-WSW. Il est délimité par la longitude 4°00' et 8°30' Ouest et la latitude 27°00' et 30°00' Nord, couvrant une superficie de 200 000 km^2. Ce bassin est délimité au nord par les affleurements de l'Anti-Atlas marocain, au sud par le massif du Bouclier Réguibat, à l'ouest par les frontières algéro-marocaine et algéro-sahraouie, et à l'est par les monts d'Ougarta ainsi que l'Erg Chech **(Fig. 01)**.

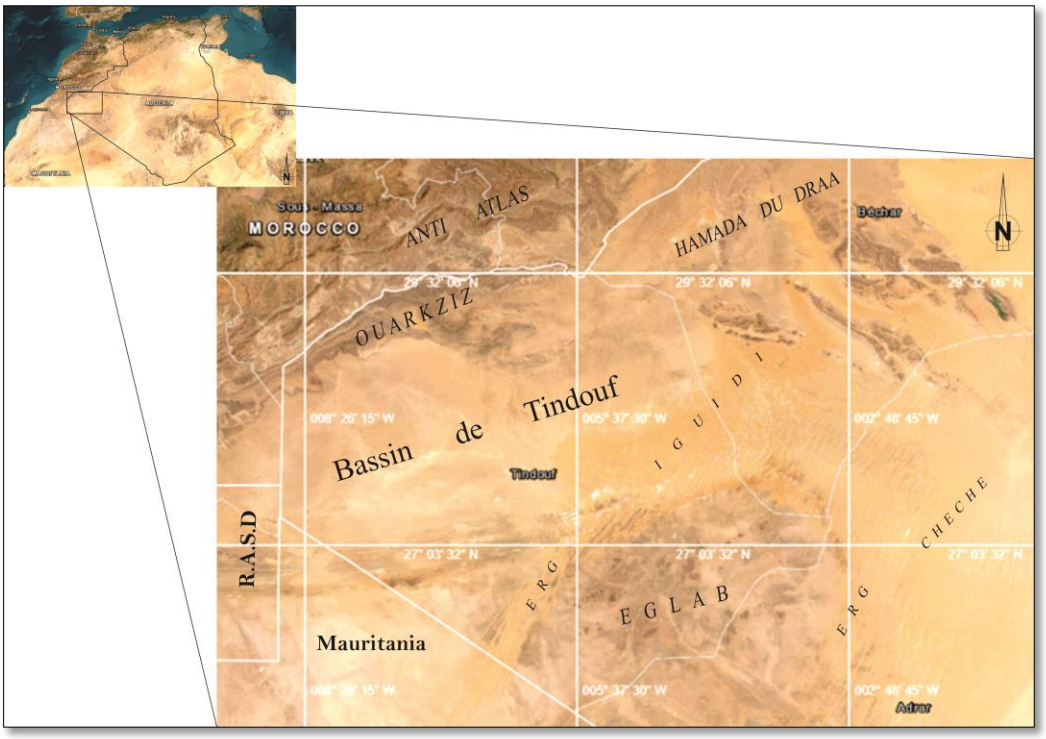


Fig.01 : Situation générale du Bassin de Tindouf, source **Esri, i-cubed, USDA, USGS, AEX, GeoEye**.

III. Présentation de la zone d'étude

III.1. Situation géographique

La zone d'étude est située dans le territoire de la commune d'Oum El Assel localité de Tinfouchy et Hassi khebbi, est limitée par les parallèles 28° 45' et 29° 30' et par les méridiens 5° 00' et 6° 30' **(Fig. 02)**. La zone

d’étude est délimitée, à l’est, par l’oued Daoura qui constitue une entité hydrographique majeure, à l’ouest par l’oued Khorb El Ethel, au nord et au nord-est par la Hamada du Draâ caractérisée par de vastes surfaces tabulaires pierreuses, et au sud par la Hamada Tounassine qui marque la transition vers les étendues désertiques méridionales.

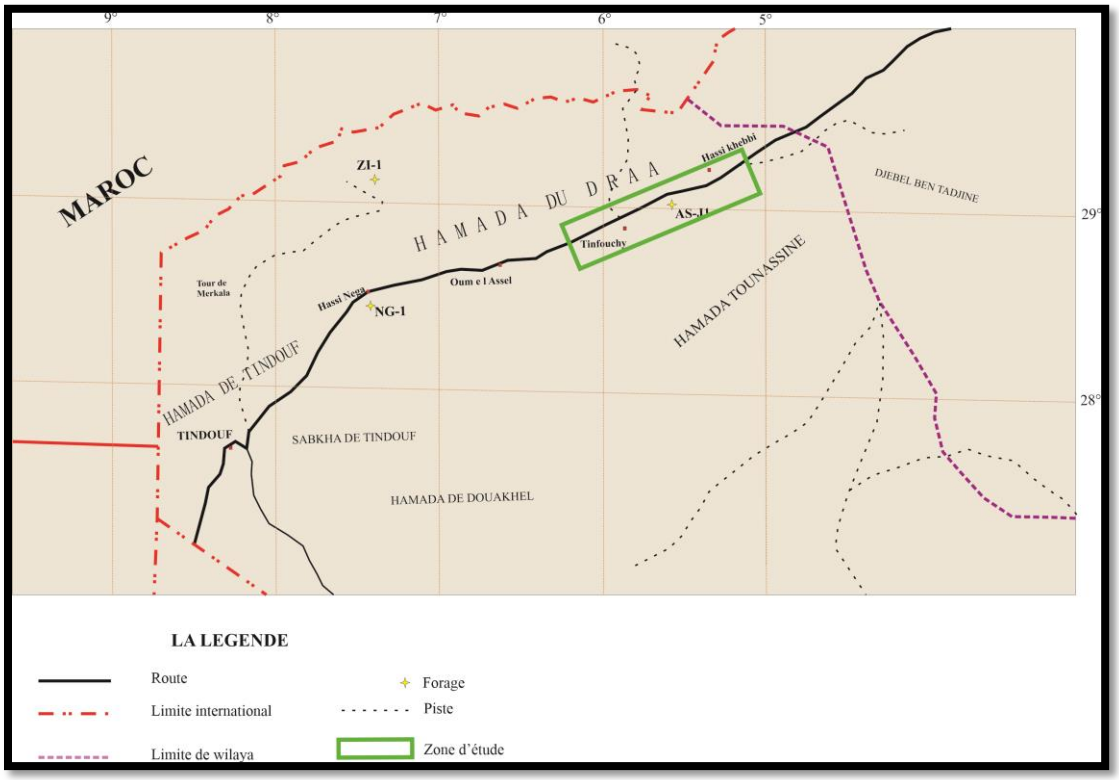


Fig.02 : carte présenté la situation géographique de la zone étudiée.

La zone d'étude est soumise à un climat saharien, caractérisé par des précipitations occasionnelles. En effet, Les pluies sahariennes, essentiellement capricieuses, tombent sous forme de pluies torrentielles localisées, séparées par des périodes de sécheresse d'une ou de plusieurs années. Il en découle qu'au Sahara les notions de moyenne pluviométrique, de station représentative et surtout de période de retour ne sont qu'indicatives. A Tindouf même, on a vu quelques années avec 60 à 70 mm, et d'autres ne bénéficiant que de 10 à 20 mm, voire beaucoup moins. En effet, si l'on se rapporte aux isohyètes qu'a tenté d'établir **(J.Dubief 1953)**, presque tout le bassin recevait de 10 à 15 m, seule la Hamada de Tindouf étant plus favorisée avec 30 à 50 mm dans ses parties nord occidentales. Les températures enregistrées dans la zone d'étude montrent la persistance de la chaleur qui atteint des valeurs absolues très élevées (50°C). La fréquence et la vitesse du vent, la faible humidité relative et la nébulosité combinées aux températures enregistrées, favorisent les fortes valeurs de l'évaporation qui atteint des valeurs considérables. La majorité des bassins versants de la zone étudiée s'étale sur de vastes superficies, d'où l'énorme volume écoulé (des centaines de millions de m3) après une pluie torrentielle **(Castany, 1967;**

Castany, 1968). En parcourant des centaines de kilomètres, avec un débit considérable, ces écoulements alimentent les différentes nappes aquifères du bassin de Tindouf.

III. 2. Couvert végétal

Le couvert végétal de la wilaya de Tindouf est très limité, dispersé et étroitement lié à la disponibilité en eau. Il constitue un indicateur précieux pour les études hydrogéologiques, la détection des zones d'infiltration ou de recharge potentielle des nappes, et peut être efficacement analysé via la télédétection couplée aux données géophysiques.

III. 3. Aspects sociaux économiques de la région

L'analyse socio-économique aide à définir la densité de la population dans les zones examinées afin d'évaluer leur progrès économique et social, tout en identifiant les besoins des communautés locales. Cette analyse repose sur des indicateurs économiques et sociaux fournis par les organismes administratifs locaux **(DSA, DPSB, APC, DTP…, 2024)** durant les recherches et investigations effectuées sur le terrain en cours de l'année 2024.

a. Population et démographie

La wilaya de Tindouf compte deux communes. Les deux communes abritent 132 439 habitants selon la dernière opération de recensement effectuée en 2024 (les services de l'office nationale de statistique).Croissance de la population dans la wilaya de Tindouf entre 2008 et 2024 : D'après les chiffres du R.G.P.H. et du D.P.S.B., en 2008 la population de la wilaya de Tindouf était de 49 149 personnes, comparativement à 132 439 en 2024 selon le D.P.S.B (**Fig.03**). Cela représente une augmentation de 83 290 habitants et un taux de croissance annuel moyen de 6,39 % sur une superficie de 158 874 km² **(Tableau 01)**.

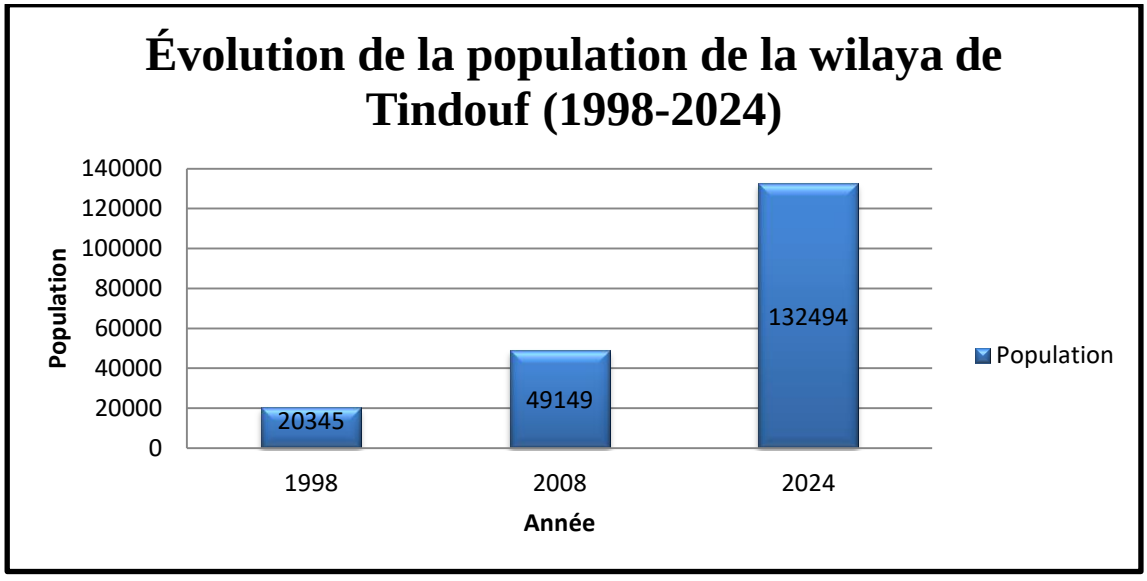


Fig.03: Évolution de la population **(Monographie de la Wilaya de Tindouf, 2024)**.

Tableau 01: Répartition de la population par commune

(Monographie de la Wilaya de Tindouf, 2024)

Wilaya	Daïra	Commune	Superficie (Km^2)	Population (hab) 2024
Tindouf	Tindouf	Tindouf	70 009 km²	123 876
		Oum el Assel	88 865 km²	8 564

b. Secteur de l'Agriculture

La wilaya de Tindouf, en 2024, possède une superficie agricole totale (SAT) de 6 002 500 hectares. Cette superficie se divise en plusieurs catégories 938 hectares sont considérés comme surface agricole utile, dont 883 hectares sont irrigués. De plus, les parcours sahariens couvrent 6 000 000 hectares, tandis que 6 011 628 hectares sont classés comme terres improductives **(Tableau 02)**.

Tableau 02 : Superficie agricole de la wilaya (Source **DSA 2024**).

	C. Tindouf	**C. Oum El Assel**	**Total Wilaya**
S.A.T	4002 484	2000 016	6002 500
Parcours	4000 000	2000 000	6000 000
S.A.U	919.5	18.5	938

Tableau 03 : SAU wilaya : superficies et productions de la wilaya (Source **DSA 2024**).

Spéculations	**Surface (ha)**	**Production (Qx)**	**Rendement (Qx/ha)**
Palmier dattier	494	14630	25
Arboriculture fruitière	164	86	5
Viticulture	15	10	6
Maraîchage	179	51006	311
Fourrages	36	6170	171
Total SAU	888	-	-

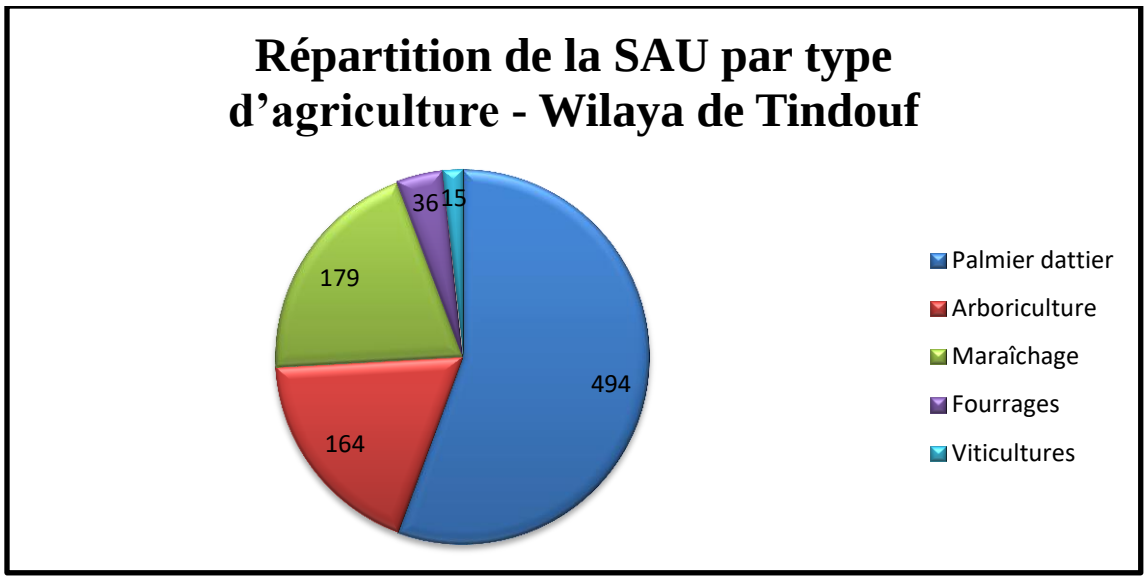


Fig.04: Répartition de la SAU (Source **DSA 2024**).

Il est important de souligner que la superficie totale utilisée pour différentes cultures (888 ha) est inférieure à la superficie agricole utile (SAU) qui est de 938 ha. Cette différence de 50 ha est due au fait que les terres restantes sont des terres arables **(Fig. 04)**.

Concernant l'utilisation de la SAU dans la wilaya, on peut faire les remarques suivantes : La culture des palmiers dattiers est prédominante, représentant 55,63 % de la SAU. En deuxième position, on trouve les cultures maraîchères, y compris celles sous serre, qui occuperont 179 ha, soit 20,15 % de la SAU. En troisième position, les terres destinées aux Arboriculture s'étendent sur 164 hectares **(Tableau 03)**. Il est important de noter que les surfaces fourragères ne peuvent pas satisfaire les besoins alimentaires d'un grand troupeau composé de 64 bovins, 34 830 ovins, 28 525 caprins et 41 051 camélidés **(Tableau 04)** et **(Fig.05)**.

Tableau 04 : Structure du troupeau et productions de la wilaya de Tindouf (Source **DSA 2024**).

Désignations		**Camelins**	**Ovins**	**Caprins**	**Bovins**	**Total des têtes**
Gros élevage		41 051	34 830	28 525	64	104 470
Petit élevage	Poule pondeuse	Sujet	Capacité 90 000 dont 30 250 mis en place			
	Poulet de chair	Sujet	Capacité 92 000 dont 12 9900 mis en place			
Viande rouge		Qx	10 980			
Viande blanche		Qx	15 573			
Lait frais		10^3 litres	2 178			
Oeufs		10^3 U	00			

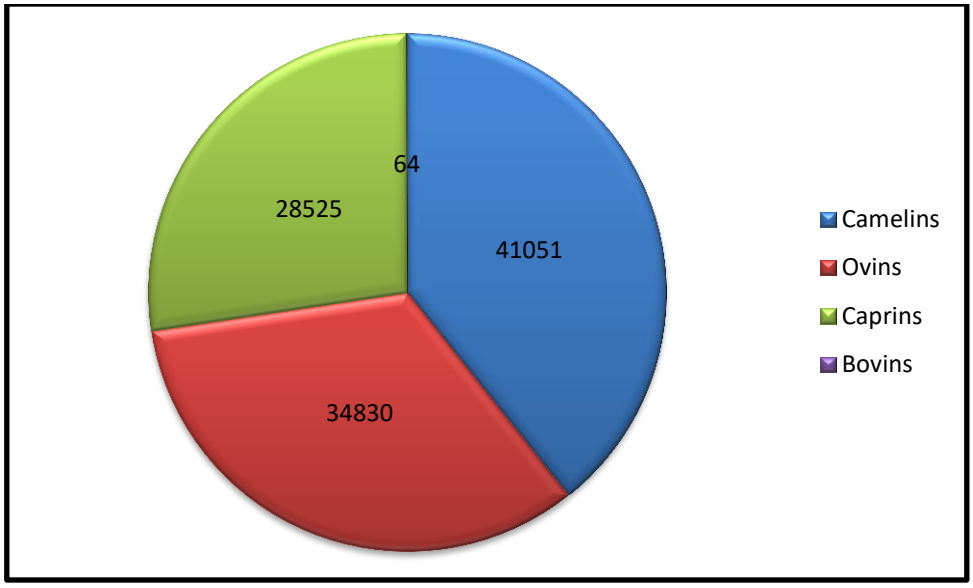


Fig.05: Répartition des effectifs au niveau de la wilaya de Tindouf (Source **DSA 2024**).

Tableau 05 : surface irriguée par commune (Source **DHW, DSA, Tindouf, 2024**).

Commune	SAU (Ha)	Forage Nbre	Puits Nbre	Sup. Irrigation (Ha)
Tindouf	919.5	34	479	869.5
Oum el Assel	18.5	04	01	18.5

c. L'activité commerciale

La wilaya de Tindouf compte 12 663 opérateurs économiques inscrits à l'année 2024. Grâce à la position géographique entre trois Etats (Algérie, Mauritanie, Maroc), Tindouf a acquis une position stratégique exceptionnelle, on peut dire que la ville de Tindouf est un centre d'échange commercial, très actif.

Une position géostratégique favorable par rapport à l'Afrique donne naissance à une fonction commerciale, ce qui permet d'explorer des possibilités pour le transit des exportations ainsi que les échanges avec les pays du Maghreb et au-delà.

d. L'industrie

Outre la richesse solaire, la wilaya de Tindouf dispose de ressources naturelles et minières qui conditionnent l'avenir de la région. La richesse minière est une réalité vivante et tangible, et de nombreux indicateurs ont été recensés pour les matières minérales utiles, au premier rang desquelles le fer dans la région de Ghara Djbilet et la région de Machri Abdel Aziz, et dont les réserves sont estimées à : 03 mille milliards de tonnes de fer métal, en plus de la chaux, de l'argile et du gypse, tous utilisés comme matériaux de construction. Outre la mine de fer, il existe des ressources naturelles de grande importance, d'autant plus que l'Etat dispose d'une importante réserve de sel située dans la région de Sebkha, notant que cette matière n'est pas encore exploitée. En ce qui

concerne la mine de Ghara Djbilet et Machri Abdel Aziz, leur activité s'inscrit dans le cadre de l'économie nationale, et ce dossier bénéficie d'une grande attention de la part de l'Etat.

Dans la ville de Tindouf, il n'existe aucune forme d'activité industrielle. Les activités présentes sont surtout artisanales et se concentrent sur des services traditionnels.

IV-Conclusion

En conclusion, ce chapitre a posé les fondements nécessaires à notre démarche scientifique en précisant le cadre spatial et les principales caractéristiques de la zone d’étude. Ces éléments constituent une référence indispensable pour orienter la suite de notre travail, notamment dans la définition des objectifs de recherche et l’élaboration de la problématique.

Chapitre II

Etude climatologique

I. Introduction

Le climat englobe toutes les variations des phénomènes (vent, précipitation, température, évaporation...) qui se produisent d'un endroit à un autre de la surface de la Terre. Il est difficile d'étudier la climatologie du Sahara en raison de la rareté des précipitations et de la faible densité du réseau de la station météorologique. Nous avons utilisé l'unique station climatologique de l'ONM de l'aérodrome de Tindouf comme référence pour caractériser le climat de la région, avec des données de période de quarante-deux années dernières (1981 - 2023). La station est située à 443m d'altitude, aux coordonnées géographiques fournies dans le **tableau 19**.

Tableau 06 : Localisation de la station de Tindouf

Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Tindouf	27° 42’ 00’’ N	08° 10’ 00’’W	443

I. Etude des paramètres climatiques

II. 1. Etude des précipitations

Les précipitations comprennent toutes les eaux météoriques collectées par un bassin versant ou une zone déterminée sur une période de temps donnée. Une période de 42 ans (1981 à 2023) permet de caractériser les conditions climatiques locales dans la région étudiée, comme nous le verrons ci-après.

Tableau 07 : Les précipitations moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles à la station de Tindouf de 1981 à 2023.

Station Tindouf	Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avi	Mai	Jui	Jul	Aou	Année
	P (mm)	7,51	11,12	9,92	6,54	6,89	9,53	9,19	6,34	3,42	1,96	0,73	2,94	**76,10**
	Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté			
	P (mm)	28,55			22,97			18,95			5,64			
	P (%)	37,52			30,18			24,90			7,40			**100**

Il est à signaler que les faibles précipitations sont une caractéristique fondamentale du climat saharien (Tab. 20).

a. Précipitations moyennes annuelles

L'analyse de la courbe des variations annuelles des précipitations sur une période de 42 ans (1981-2023) montre que les valeurs moyennes annuelles enregistrées sur cette même période varient de 14,89 à 153,61 mm, ce qui explique l'irrégularité des précipitations d'une année à l'autre. Au cours de cette période, la valeur moyenne enregistrée est de l'ordre de 76,10 mm/an **(Fig. 06)**.

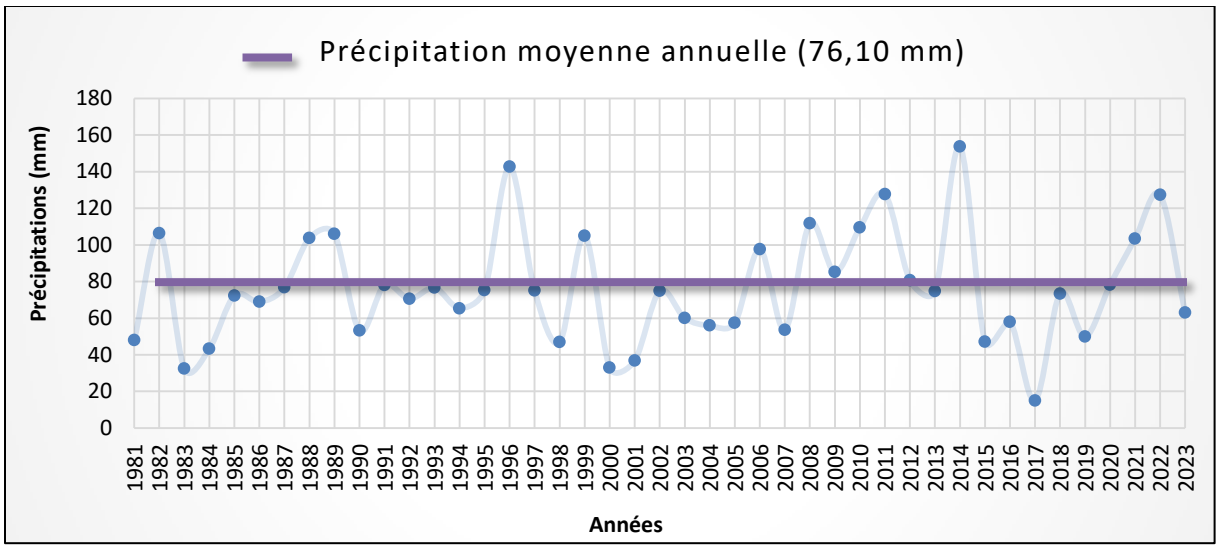


Fig.06: Variation des précipitations annuelles à la station de Tindouf (1981/2023).

b. Précipitations moyennes mensuelles

La représentation moyenne mensuelle des précipitations sur une période de 42 ans (1981-2023), nous a permis de constater que le mois d'octobre est le plus arrosé avec une moyenne mensuelle égale à 11.12 mm alors que le mois de juillet est le plus sec avec une moyenne mensuelle égale à 0.73 mm **(Fig.07)**. Dans notre région saharienne, l'automne se caractérise par une augmentation des précipitations, parfois abondantes.

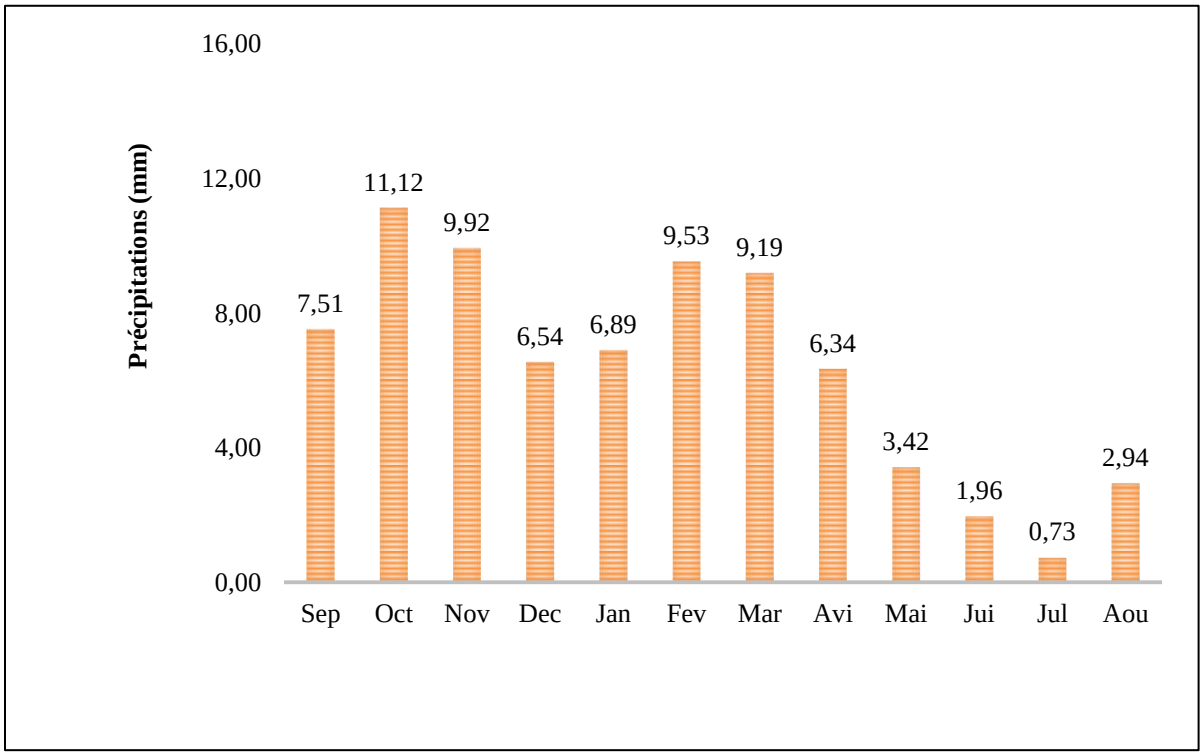


Fig. 07 : Variation des précipitations moyennes mensuelles.

c. Précipitations moyennes saisonnières

L'étude des précipitations montre que les saisons les plus pluvieuses sont l'automne avec 37,52% des pluies moyennes annuelles et l'hiver avec 30,18%. Le printemps représente 24,90% et l'été avec seulement 7,40% des précipitations moyennes annuelles **(Fig.08)**. En règle générale les pluies sont d'intensité plutôt faible pour la région.

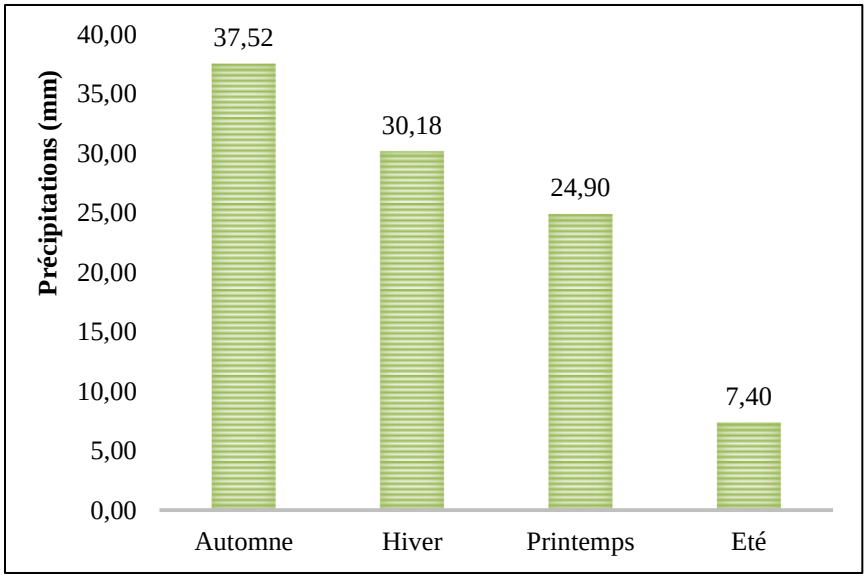


Fig. 08 : Variation des précipitations moyennes saisonnières.

II. 2. Etude des températures

La température joue un rôle essentiel l'étude climatique, car elle agit directement sur le phénomène d'évapotranspiration et par conséquent le déficit d'écoulement annuel et saisonnier.

Les données de la température disponibles pour la région portent sur la période allant de 1981 à 2023 **(Tab. 08)**.

Tableau 08 : Les températures moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles à la station de Tindouf de 1981 à 2023.

Station Tindouf	Mois T (°C)	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avi	Mai	Jui	Jul	Aou	Année
		29,84	23,50	16,78	12,20	10,90	13,53	17,76	22,01	26,47	31,28	35,21	34,45	
	Saisons T (°C)	Automne			Hiver			Printemps			Eté			**22,83**
		23,37			12,21			22,08			33,65			

a. Les températures moyennes annuelles

La représentation annuelle des températures sur une période de 42 ans (1981 à 2023), montre que l'année la plus froide est celle de 1992 avec une valeur moyenne annuelle de 21,47 °C, alors que l'année la plus chaude est celle de 2001 avec une valeur moyenne annuelle de 24,07 °C **(Fig.09)**.

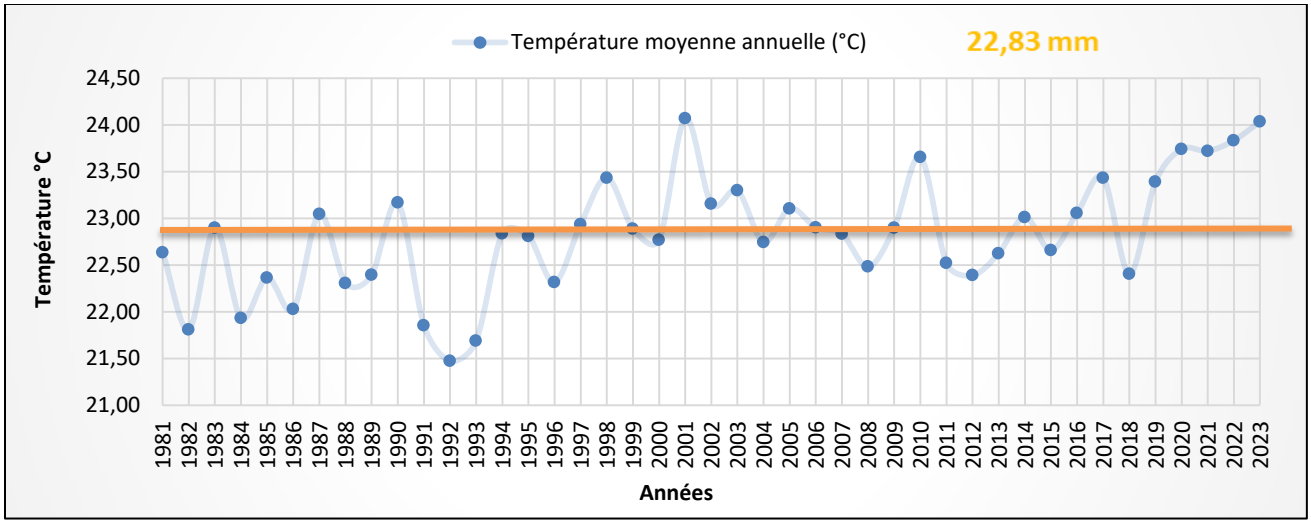


Fig. 09 : Variation des températures annuelles à la station de Tindouf (1981/2023).

b. Températures moyennes mensuelles

La courbe représentative des variations de température moyenne mensuelle **(Fig. 10)**, nous montre deux saisons thermiques.

- Une saison chaude, caractérisée par des moyennes mensuelles maximales enregistrées aux mois de juin, juillet et d'août, avec des températures comprises entre 44,68 °C et 47,89 °C.
- L'autre froide, caractérisée par des moyennes mensuelles minimales enregistrées aux mois de décembre, janvier et février, avec des températures comprises entre 0,79 °C et 2,46 °C.

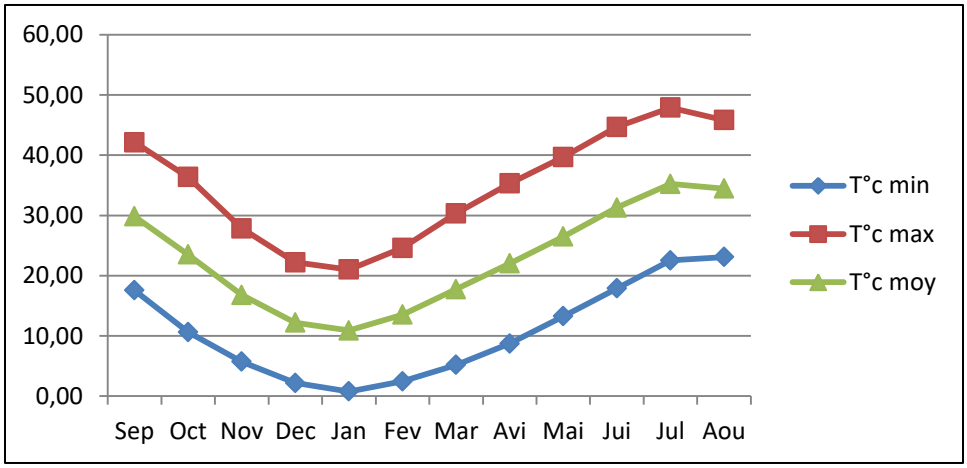


Fig. 10: Variation des températures moyennes mensuelles de la station Tindouf (1981/2023).

III. Etude du climat

III. 1. Diagramme pluvio-thermique

Le diagramme pluvio-thermique est établi selon la méthode de Bagnouls et Gaussen (1953) et dont les températures sont reportées à l'échelle double des précipitations.

Le diagramme pluviométrique de Gaussen permet de calculer la durée de la saison sèche. Il tient compte de la pluviosité moyenne mensuelle et la température moyenne mensuelle qui sont portées sur des axes où l'échelle de la pluviosité est double de la température (P = 2T).

Si P < 2T : mois sec

Si P > 2T : mois humide

En d'autres termes, lorsque les températures dépassent la courbe des précipitations, la saison correspondante est sèche ou déficitaire en eau, et lorsque la courbe des précipitations dépasse la courbe des températures, la saison correspondante est humide.

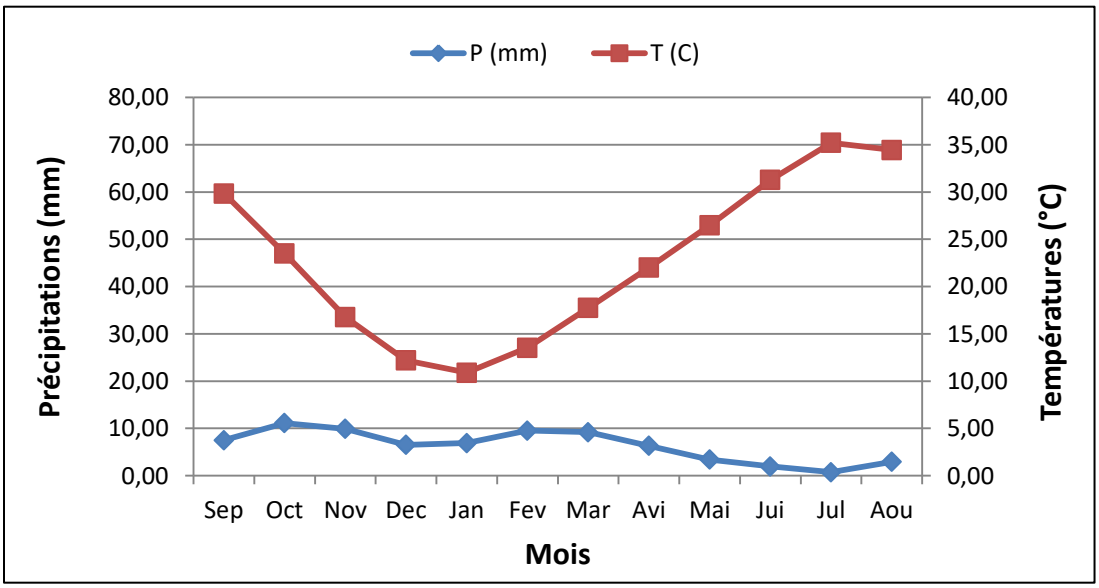


Fig. 11 : Diagramme pluvio-thermique – station de Tindouf (1981/2023).

Selon le diagramme pluvio-thermique **(Fig. 11)** on constate que la période sèche est répartie sur l'ensemble de l'année.

III. 2. Calcul de l'indice d'aridité de De Martonne

Pour la détermination du type de climat, De Martonne (1925) a proposé une formule climatologique appelée indice d'aridité qui est fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations moyennes annuelles.

Cet indice est calculé d'après la formule suivante :

$$I = P/(T+10)$$

P : précipitations moyennes annuelles en mm : **76,10 mm**

T : température moyenne annuelle en °C : **22,83 °C**

Le type de climat selon la valeur de l'indice de De Martonne :

- I < 5 : climat hyperaride.
- 5 < I < 7,5 : climat désertique.
- 7,5 < IM < 10 : climat steppique.
- 10 < IM < 20 : climat semi-aride.
- 20 < IM < 30 : climat tempéré
- 30 < IM < 55 : Humide.

L'indice I est égal à 2,32, donc la région présente un climat hyperaride **(Fig. 12)**.

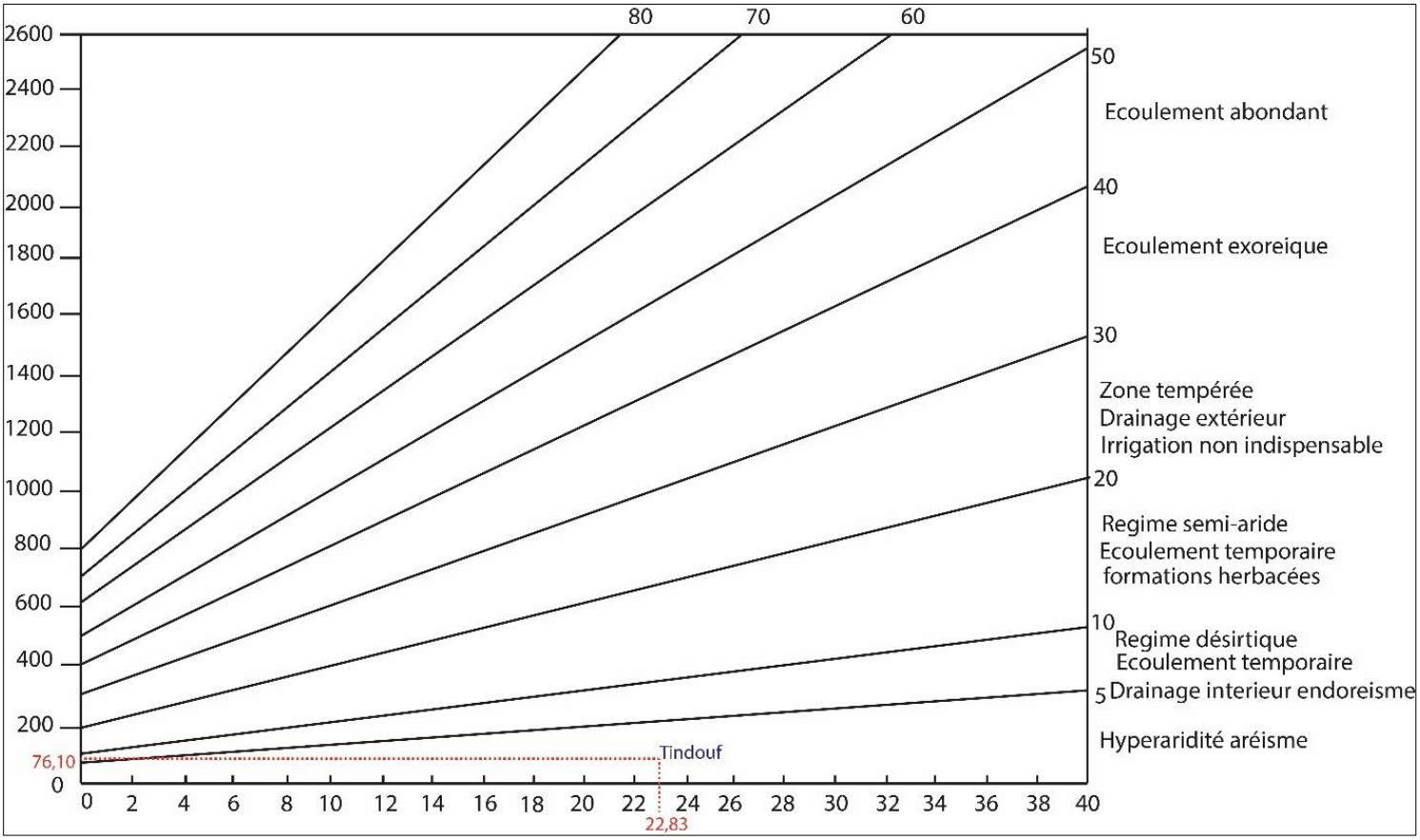


Fig. 12 : Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martone.

III. 3. Calcul de l'indice d'aridité de Louis Emberger

Emberger a proposé cet indice pour les climats de la région méditerranéenne. Il s'agit d'un indice avec les valeurs de Q_2 sur les ordonnées, et nous utilisons le climato gramme d' Emberger pour classer le climat de la région exprimé par la relation suivante :

$$Q_2 = 2000 \frac{P}{(M^2 - m^2)}$$

P: la précipitation annuelle en (mm).

M: le maximum du mois le plus chaud en degré kelvin (K°).

m: le minimum du mois le plus froid en degré kelvin (K°).

T (K°)= T(C°) + 273,15.

P : **76,10 mm**, M = 47,89 +273,15 = **321,04 K°** et m = 0,79 +273,15 = **273,94 K°**.

$$Q_2 = 2000 \frac{76{,}10}{(321{,}04^2 - 273{,}94^2)} = 5{,}43.$$

Tableau 09 : Calcul de l'indice d'aridité de Louis Emberger - Station de Tindouf (Période 1981-2023).

Station	P (mm	M (K)	m (K)	T°C moy. minima	Q_2	Type de climat
Tindouf	76,10	321,04	273,94	0,79	5,43	Saharien

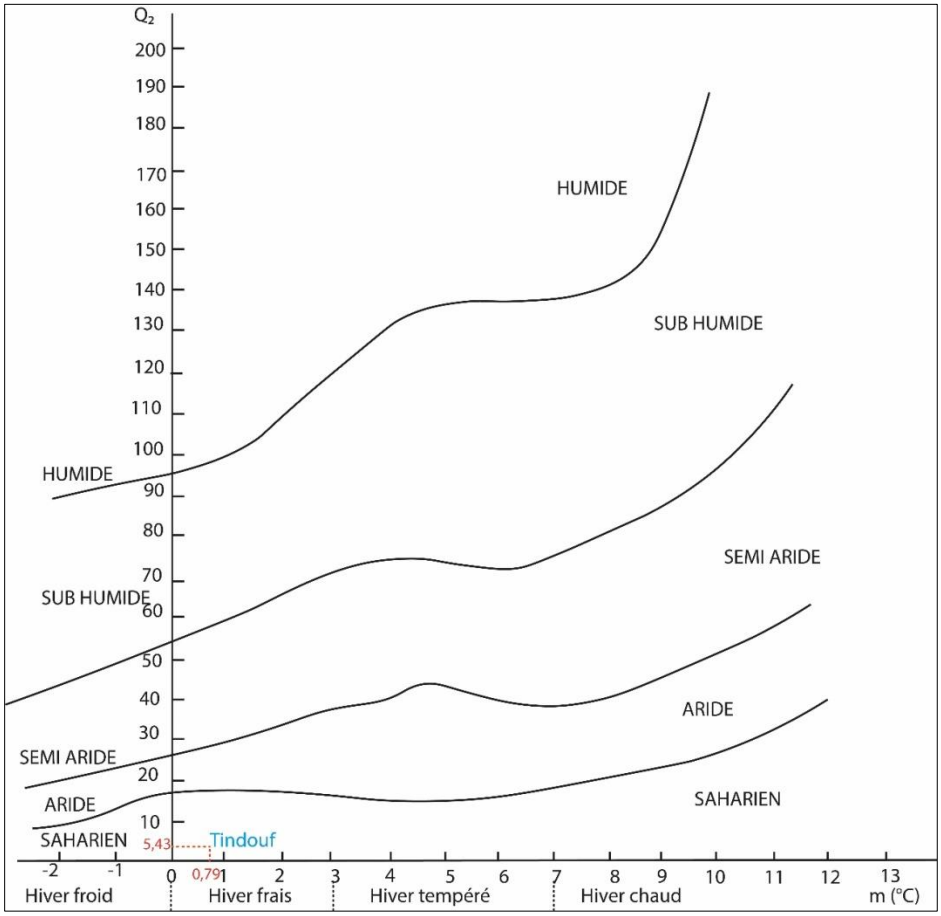


Fig. 13 : Climagramme d'Emberger.

Selon la valeur obtenue par le climato gramme pluviométrique d'Émerger, la région étudiée présente un étage climatique saharien avec un hiver frais **(Fig. 13)**.

IV. Analyse des différents éléments du bilan hydrologique

IV. 1. Précipitations

Afin d'évaluer le bilan hydrologique, nous avons utilisé les données pluviométriques mesurées à la station de Tindouf sur une période de 42 ans (1981/2023).

IV. 2. Evapotranspiration

Après les précipitations, l'évapotranspiration est l'élément le plus important du bilan hydrique. Elle est représentée par la quantité d'eau restituée à l'atmosphère sous forme de vapeur.

L'évapotranspiration englobe 02 phénomènes :

- L'évaporation : c'est le phénomène physique de la transformation de l'eau en vapeur d'eau à partir d'une surface d'eau libre (mer, lac, marais, ruisseau.....).

- La transpiration : c'est un phénomène biologique lié au couvert végétal et à son stade de développement. On distingue :

1) l'évapotranspiration potentielle (ETP).

2) l'évapotranspiration réelle (ETR).

a. Evapotranspiration potentielle (ETP)

1. **Méthode de Thornthwaite**

En vue d'estimer l'évapotranspiration potentielle, nous avons appliqué la formule de Thornthwaite, qui établit une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle. Cet auteur définit d'abord un indice thermique mensuel (i) ou :

$$\mathbf{ETP = 16.\left(\frac{10t}{I}\right)^{a}.K}$$

- ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm)
- I : indice thermique annuel (la somme des indices mensuels de l'année).

$$\mathbf{I = \sum i \ \ avec\ i = (t / 5)^{1,54}}$$

- i: indice thermique mensuel.
- t : la température moyenne du mois considéré en (°C).

- a = 0,016. I + 0,5

- K : Facteur correctif intégrant la durée d'insolation théorique tirée d'un abaque et la température.

ETP corrigée = ETP.K (Tab.10).

Les résultats du calcul de l'évapotranspiration potentielle (PET) selon la méthode de Thornthwaite sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 10 : Calcul de l'évapotranspiration potentielle corrigée (ETP) par la méthode de Thornthwaite - Station de Tindouf (Période 1981-2023).

Paramètre / Mois	T (°C)	i	E.T.P non corrigée (mm)	K	ETP corrigée (mm
Sep	29,84	15,69	135,14	1,02	137,84
Oct	23,5	10,86	72,55	0,99	71,82
Nov	16,78	6,46	30,18	0,9	27,16
Dec	12,2	3,95	13,16	0,9	11,84
Jan	10,9	3,32	9,81	0,92	9,03
Fev	13,53	4,64	17,23	0,88	15,16
Mar	17,76	7,05	34,99	1,03	36,04
Avi	22,01	9,81	61,17	1,07	65,45
Mai	26,47	13,04	98,91	1,16	114,73
Jui	31,28	16,87	152,78	1,15	175,7
Jul	35,21	20,24	207,94	1,18	245,36
Aou	34,45	19,57	196,45	1,13	221,99
Année	22,83	131,51	1030,29	/	**1132,16**

Le tableau montre une baisse de l'évapotranspiration potentielle (PET) de septembre à janvier, suivie d'une augmentation à partir de février, atteignant des taux maximaux en juillet et août, en concordance avec les températures mensuelles moyennes.

2. Méthode de SERRA

La formule de Thornthwaite a été simplifiée par SERRA avec une estimation précise des formules

$$i = 0.09.T^{3/2}$$

$$a = 1,6.\frac{I}{100} + 0,5$$

T: température moyenne annuelle
I : indice thermique égale à la somme des indices mensuels.

Les résultats du calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon la méthode de de Serra sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 11 : Calcul de l'évapotranspiration potentielle corrigée (ETP) par la méthode de Serra - Station de Tindouf (Période 1981-2023).

Paramètre / Mois	T (°C)	i	E.T.P non corrigée (mm)	K	ETP corrigée (mm
Sep	24,01	10,59	110,65	1,03	113,97
Oct	18,21	6,99	66,29	0,97	64,30
Nov	11,59	3,55	28,70	0,88	25,26
Dec	8,13	2,09	14,88	0,86	12,80
Jan	7,19	1,74	11,85	0,88	10,43
Fev	9,04	2,45	18,11	0,86	15,58
Mar	12,25	3,86	31,80	1,03	32,76
Avi	15,67	5,58	50,19	1,08	54,20
Mai	19,62	7,82	76,12	1,19	90,58
Jui	25,48	11,58	123,53	1,19	147
Jul	29,59	14,49	162,97	1,21	197,19
Aou	28,68	13,82	153,80	1,15	176,87
Année	17,45	84,55	849	/	**940,94**

Le tableau montre une baisse de l'évapotranspiration potentielle (PET) de septembre à janvier, suivie d'une augmentation à partir de février, atteignant des taux maximaux en juillet et août, en concordance avec les températures mensuelles moyennes **(Tab. 11)**.

b. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle (ETR) peut être calculée à l'aide d'un certain nombre de formules faisant intervenir deux paramètres climatiques : les précipitations et la température. Parmi ces formules nous citons :

- Formule de Turc;

- L'abaque de C .Wundt;

- Formule Verdeil.

1.Formule de Turc

M.Turc (1954) a développé une équation permettant d'estimer directement l'évapotranspiration réelle annuelle moyenne (ETR). Cette relation s'applique à tous les climats et est fonction des précipitations et de la température moyennes annuelles.

$$\mathbf{ETR} = \frac{\mathbf{P}}{\sqrt{\mathbf{0,9} + \frac{\mathbf{P^2}}{\mathbf{L^2}}}}$$

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm.

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

T : Température moyenne annuelle en °C.

L : Pouvoir évaporant = $300 + 25T + 0{,}05T^3$

Tableau 12 : Évaluation du L'ETR annuelle selon la méthode de Turc.

Paramètres / Station	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
Tindouf	76,10	22,83	1465,71	**80,10**

2. Méthode de Wundt

L'abaque de Wundt, adapté par Coutagne, peut être appliqué pour estimer la valeur de l'ETR, en tenant compte de la température moyenne annuelle (°C) et des précipitations annuelles (mm/an) **(Fig. 14)**. Les résultats de l'ETR obtenus sont présentés dans le tableau 13 :

Tableau 13 : Évaluation du L'ETR annuelle selon la méthode de Wundt.

Paramètres / Station	P (mm)	T (°C)	ETR (mm/an)
Tindouf	76,10	22,83	**120**

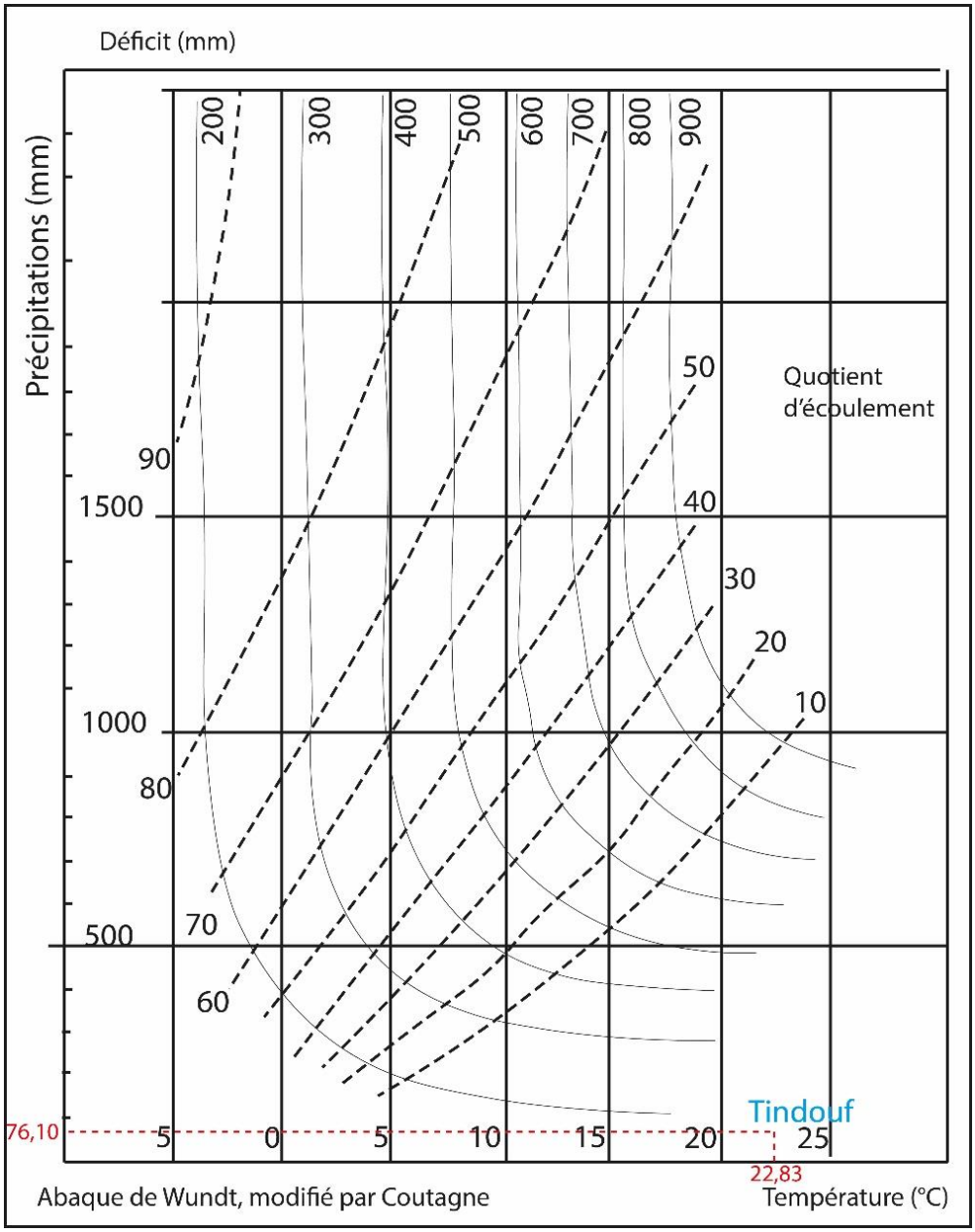


Fig. 14 : Évaluation du L'ETR annuelle en fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations (Wundt).

3. Méthode de Verdeil

L'abaque de Verdeil pour calculer le déficit d'écoulement en Algérie donne des valeurs directes de ce dernier (mm) en fonction des précipitations moyennes annuelles (mm/an) **(Fig. 15)**. Les résultats de l'ETR obtenus sont présentés dans le tableau 14 :

Tableau 14 : Évaluation du L'ETR annuelle selon la méthode de Verdeil.

Paramètres / Station	P (mm)	ETR (mm/an)
Tindouf	76,10	**75**

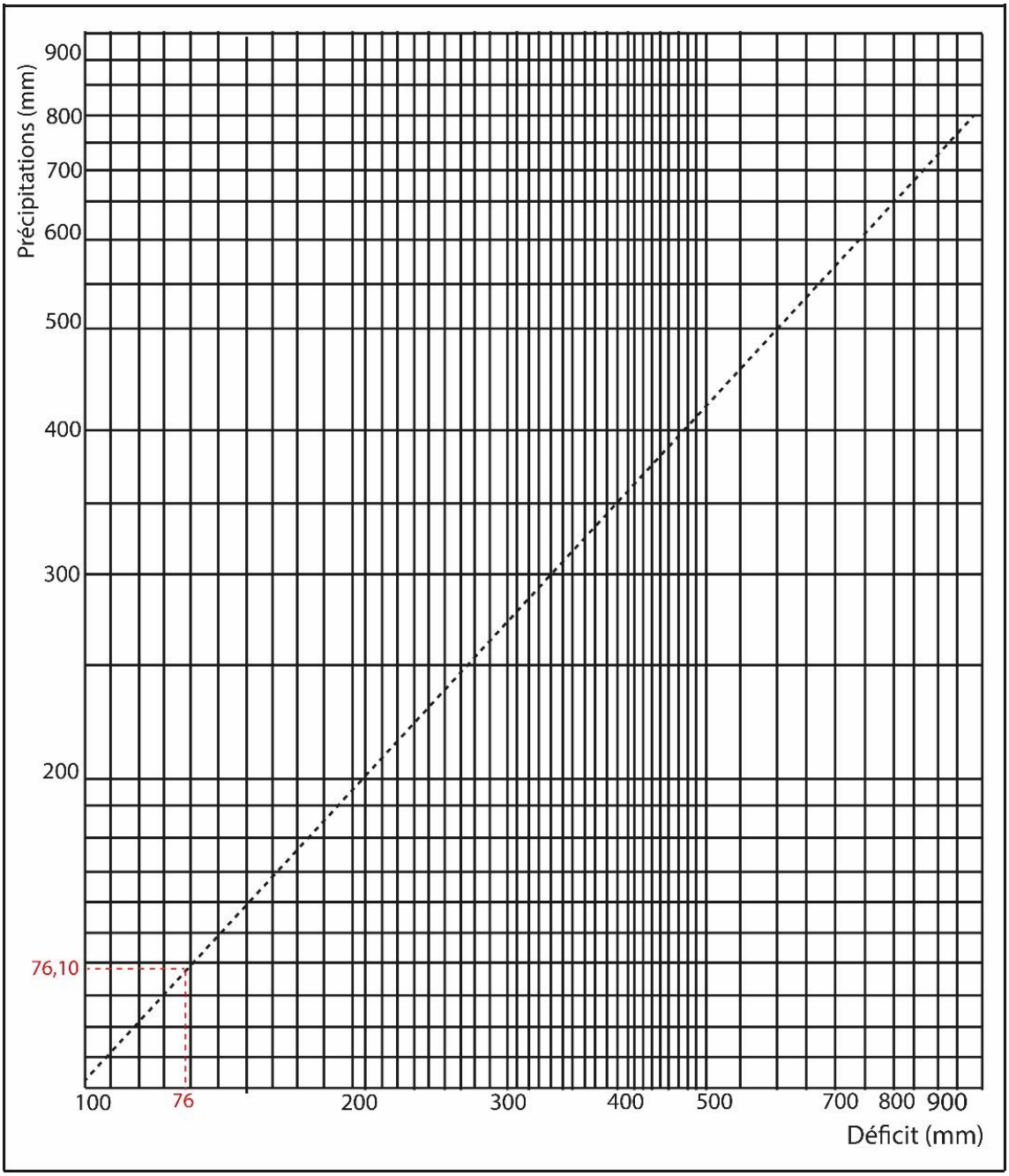


Fig. 15 : Évaluation du L'ETR annuelle en fonction des précipitations moyennes annuelles (Verdeil).

4. Méthode de Thornthwaite

Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, on utilise cette méthode, où on distingue deux cas principaux :

1. Si P-ETP > 0 ; c'est-à-dire : P > ETP, dans ce cas ETR = ETP.

2. Si P-ETP < 0 ; c'est-à-dire : P < ETP, ce cas est subdivisé encore en deux cas :

a. Si P + RFU >ETP $\Rightarrow$ ETR = ETP.

b. Si P + RFU <ETP $\Rightarrow$ ETR = P + RFU.

Tableau 15 : Évaluation du L'ETR annuelle et du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (1981/2023).

Mois	P (mm)	ETP(mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	Da (mm)	EXC (mm)
Sep	7,51	137,84	0	7,51	130,33	0
Oct	11,12	71,82	0	11,12	60,7	0
Nov	9,92	27,16	0	9,92	17,24	0
Dec	6,54	11,84	0	6,54	5,3	0
Jan	6,89	9,03	0	6,89	2,14	0
Fev	9,53	15,16	0	9,53	5,63	0
Mar	9,19	36,04	0	9,19	26,85	0
Avi	6,34	65,45	0	6,34	59,11	0
Mai	3,42	114,73	0	3,42	111,31	0
Jui	1,96	175,7	0	1,96	173,74	0
Jul	0,73	245,36	0	0,73	244,63	0
Aou	2,94	221,99	0	2,94	219,05	0
Année	**76,10**	1132,12	/	**76,10**	1056,03	0

V. Représentation des résultats

Les résultats de l'ETR obtenus par les différentes méthodes sont regroupés dans le tableau 16.

Tableau 16 : Les résultats de l'ETR par différentes méthodes.

Paramètres	Méthode	Valeur en mm
ETR	Turc	80,10
	Wundt	120
	Verdeil	75
	Thomthwaite	76,10

L'évaluation de l'évapotranspiration révèle des divergences selon les méthodes utilisées. La méthode de Thornthwaite donne une évapotranspiration égale aux précipitations (P=ETR), suggère une évaporation totale de l'eau précipitée. Les méthodes de Turc et Wundt surestiment l'évapotranspiration (ETR>P), les rendant inappropriées pour cette étude. La méthode de Verdeil apparaît comme la plus fiable, estimant

l'évapotranspiration à un niveau inférieur aux précipitations (ETR < P), soit 98,55% de celles-ci, ce qui semble plus cohérent avec les conditions réelles.

V. 1. Estimation du ruissellement

Le ruissellement correspond à la part des précipitations qui s'écoule directement sur le sol lors des pluies. Il est donc possible de le connaître en analysant l' hydrogramme d'un cours d'eau, ou en utilisant des méthodes empiriques qui permettent d'obtenir une valeur approximative. Parmi les méthodes empiriques, on peut citer celle de Tixeron et Berkaloff. Elle peut s'écrire comme suit:

$$\mathbf{R = \frac{P^3}{3.(ETP)^2}}$$

R : Ruissellement en m

P : Précipitation moyenne annuelle en mm

ETP : Evapotranspiration potentielle en mm.

Tableau 17 : Estimation du ruissellement selon la méthode de Tixeront et Berkaloff.

Paramètres / Station	P (mm)	ETP (mm)	R
Tindouf	76,10	1132,16	**0,11**

V. 2. Estimation de l'infiltration

L'estimation de la lame d'eau infiltrée est effectuée en utilisant l'équation globale du bilan hydrologique suivante :

$$\mathbf{P = ETR + R + I}$$

$$\mathbf{I = P - (ETR + R)}$$

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm)

R : Ruissellement superficiel (mm)

I : infiltration moyenne annuelle (mm).

Tableau 18 : Résultats de la lame d'eau infiltrée.

	P	**ETR**	**R**	**I**
mm	76,10	75	0,11	0,99
%	100	98,55	0,14	1,30

Les résultats du bilan hydrologique démontrent que 98,55 % des précipitations retournent à l'atmosphère par l'évapotranspiration, 0,14 % de cette pluie constitue la lame ruisselée, 1,30 % sous forme d'une lame infiltrée **(Fig. 16)**, **(Tab. 18)**.

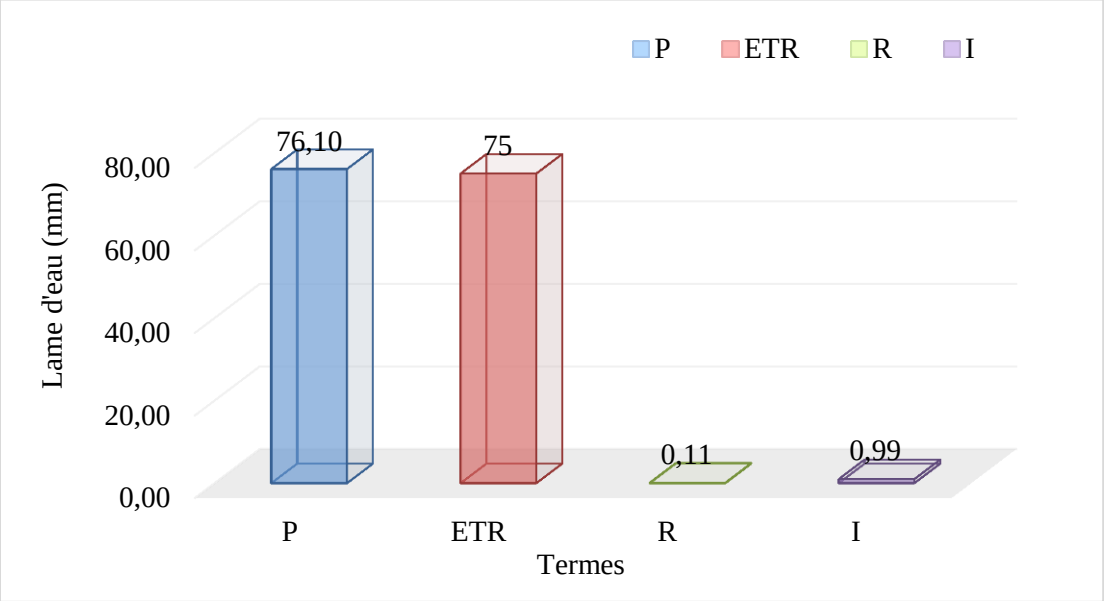


Fig. 16 : Termes du bilan hydrologique .

VI. Conclusion

Le bassin de Tindouf est situé à l'extrémité occidentale du Sahara algérien. Son réseau hydrographique comprend plusieurs cours d'eau majeurs, tels que l'Oued Zemoul et l'Oued Mounir. Au centre de ce bassin se trouvent l'Oued El Ma, l'Oued El Kountar et l'Oued Tindouf. De plus, divers oueds moins importants, notamment l'Oued Oum El Assel, l'Oued El Khorb, l'Oued Talha et l'Oudian Tetrat, sont également présents dans cette région. Le climat qui règne ici est de type saharien, caractérisé par des précipitations occasionnelles.

Dans le cadre de notre travail, nous avons tenté d'analyser les divers facteurs et paramètres climatologiques afin de définir les valeurs quantitatives (précipitation, températures, évaporation) concernant la période (1981/2023) pour la station de Tindouf.

Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre 76,10 mm et la température moyenne annuelle enregistrée est d'environ 22,83°C.

La région est soumise à un climat hyperaride caractérisé par des sécheresses estivales contrastant avec des hivers froids et secs. Le régime climatique se caractérise par des variations annuelles assez importantes, qui accentuent le phénomène d'évapotranspiration potentielle (ETP) estimée à l'aide des différentes méthodes de Thornthwaite et Serra. La moyenne de ces deux méthodes donne une valeur de 1036,53 mm. Cette

évapotranspiration potentielle intense entraîne un assèchement rapide des sols, leur dégradation et la détérioration du couvert végétal.

L’évapotranspiration réelle est estimée à l’aide des méthodes de Turc, Wundt, Verdeil, et la méthode du bilan de Thornthwaite, nous avons retenu le résultat obtenu avec le modèle de P. Verdeil qui donne une valeur égale 75mm.

Le bilan hydrologique de la région se caractérise par une prédominance de l'évapotranspiration (ETR) sur les autres éléments du bilan, avec une valeur annuelle moyenne de 75 mm. L'augmentation significative des températures pendant les mois d'été a donc entraîné une augmentation de l'évapotranspiration (98,55 %), ce qui a eu un impact sur les réserves d'eau disponibles.

Cependant, les valeurs enregistrées pour le ruissellement (0,14%) et l'infiltration (1,30%) sont très faibles, ce qui ne garantit pas un renouvellement permanent de la réserve d'eau facilement utilisable (RFU). En conséquence, le déficit agricole (Da) s'élève à 1056,03, ce qui nécessite un approvisionnement constant en eau, c'est-à-dire une exploitation excessive des réserves d'eau souterraine peu ou pas renouvelables.

CHAPITRE III

Géologie

I. Introduction

Ce chapitre porte sur l'étude géologique du bassin de Tindouf, partie intégrante de la plate-forme saharienne. L'analyse des systèmes aquifères de la région exige une maîtrise de l'évolution géologique du bassin, des propriétés pétrophysiques des roches réservoirs et de leur cadre stratigraphique. À cet effet, les principales formations géologiques de la zone d'étude sont brièvement présentées.

Les formations géologiques de la région, mises en évidence par diverses recherches scientifiques, constituent une source d'informations précieuses. Selon des sources fiables, les chercheurs français ont porté une attention particulière à l'exploration pétrolière et minière dans le Sahara algérien, contribuant ainsi au développement des études géologiques et hydrogéologiques dans cette zone.

II. Historique des travaux

Le Sud-Ouest algérien constitue depuis plus d'un siècle un terrain privilégié d'investigation scientifique. Cette région a suscité l'intérêt des explorateurs et des chercheurs, tant durant la période coloniale qu'après celle-ci. Les premières études géologiques remontent au XIX^{e} siècle, lorsque **(Lenz 1880)** identifia les séries sédimentaires paléozoïques reposant sur le socle cristallin, dans la partie sud-ouest du bassin de Tindouf, au niveau de la bordure septentrionale de l'Erg Chech. Ces recherches ont par la suite permis de préciser les périodes du Dévonien et du Carbonifère **(Gevin, 1960)**.

Entre 1923 et 1933, **Menchikoff** entreprit des travaux de reconnaissance et de cartographie géologique, aboutissant à l'élaboration de la carte géologique du Nord du Sahara occidental à l'échelle 1/1 000 000, qui offrait une première vision d'ensemble de la région. Ses recherches furent reprises entre 1934 et 1936 par **Monod**, qui mit en évidence la nature cristalline du Yetti-Eglab. Par la suite, **Gevin** poursuivit l'étude de la région entre 1941 et 1957, en apportant des contributions majeures sur les formations paléozoïques, notamment par la découverte de fossiles caractéristiques et l'analyse détaillée de séries stratigraphiques.

Entre 1951 et 1957, plusieurs avancées importantes ont marqué l'étude géologique du Sud-Ouest algérien. En 1951, les recherches portèrent sur la structure du massif cristallin du Yetti-Eglab, suivies en 1956 par l'élaboration de la carte géologique du Sahara occidental au 1/2 000 000 et l'évaluation des possibilités d'alimentation en eau du gisement de fer de Gara Djebilet. En 1957, un colloque international du **C.N.R.S.** à Paris permit d'approfondir les connaissances sur le complexe sédimentaire de base à l'extrémité orientale de la dorsale des Réguibat ; la même année, Gevin proposa un âge infracambrien pour certaines formations à stromatolithes au sud et à l'est de l'Eglab.

Parallèlement, une campagne de reconnaissance menée en 1953 par **Bourgeois**, **Fabre** et **Greber** aboutit à la réalisation d'une carte géologique du Carbonifère continental du flanc nord du bassin de Tindouf, publiée en 1955. Les travaux de **(Gevin 1941-1957)** permirent également la publication en 1958 d'une carte géologique

de reconnaissance Tindouf/Eglab au 1/500 000, accompagnée d'une notice détaillant les formations sédimentaires du flanc sud du synclinal de Tindouf ainsi que des observations sur le Hank et le synclinal de Taoudeni.

À partir de 1958, les recherches gagnèrent en précision grâce à l'utilisation de nouvelles techniques, notamment la photographie aérienne de l'**I.G.N.** à l'échelle 1/50 000. Entre 1967 et 1976, l'**ORGM**, en s'appuyant sur les travaux de Gevin, réalisa un rapport hydrogéologique assorti d'analyses géochimiques des eaux dans la région Tindouf-Gara Djebilet. Plus tard, **(Guerrak 1989)** proposa une coupe lithostratigraphique synthétique du bassin de Tindouf et expliqua la genèse du gisement de fer de Gara Djebilet, mettant en évidence une origine diagénétique des oolithes ferrugineux.

De nombreux organismes se sont par la suite intéressés à la région, parmi lesquels le Bureau d'Investissement en Afrique (1958-1960), diverses sociétés pétrolières, la Société d'Étude et de Réalisations Minières et Industrielles (1963-1965), la **SONAREM**, puis l'**EREM** et l'actuel **ORGM**. Ces initiatives ont conduit à l'élaboration de cartes géologiques et thématiques à l'échelle 1/200 000, ainsi qu'à des cartes de synthèse au 1/500 000 portant sur le massif ancien et ses bordures sédimentaires. Enfin, la découverte de pétrole dans le Paléozoïque inférieur du sud-est marocain (1999-2000) a relancé l'intérêt pour la zone, mobilisant **SONATRACH** pour de nouvelles études et synthèses **(Amrouche, 2004)**.

III- Contexte Géologique Et Structural

Le bassin de Tindouf est essentiellement un assemblage paléozoïque, largement recouvert en discordance par des strates néogènes hamadiennes. Cette bassin est asymétrique et présente un épaississement paléozoïque du sud (1500 m) au nord (7000 m). Les affleurements paléozoïques se situent entièrement au sud. Cependant, au nord, seuls le Famennien et le Carbonifère apparaissent dans le paysage.

Le flanc nord étroit et droit est influencé par des plis qui plongent fortement (8 à 12 degrés) du nord-est au sud-ouest et à l'est-ouest. Les structures connues sont le pli Adim al-Filou, l'anticlinal Zemoul-Igma et la structure de la fort Lotfi-Tinfouchy. Il y a eu peu de recherches géologiques, notamment des forages effectués par la compagnie pétrolière SONATRACH à la fin des années 1960 et dans les années 1970. La série paléozoïque au nord du bassin de Tindouf est recouverte au sud et à l'est par les formations tertiaires de la Hamada de Draa. Cette série d'affleurements au nord du bassin débute avec des argiles du Dévonien supérieur considérées comme d'origine famennien. Ces argiles sont clairement visibles au centre l'anticlinal le plus important de la région.

La région du Carbonifère occupe la plus grande superficie de la ceinture d'affleurements paléozoïques. Ils sont représentés par le Tournaisien qui entoure le Dévonien dans la région de Zemol-Igma. Cette plaine est principalement composée par des schistes et de grès du Jebel Tazou. Le Viséen inférieur est composé de schistes et de grès Betaïna. Le Viséen moyen et supérieur est constitué de calcaire avec des passages de dolomite et de marne. Le Namurien se compose de grès continentaux, calcaires, marnes gypseuses. Le

Stéphanien est constitué essentiellement de grès à argile rouge. Cette formation contient des fougères et des niveaux charbonneux. L'affleurement Westphalien est situé au centre du Stéphanien et est constitué essentiellement de grès et de conglomérats (**Fig. 17)**.

Les sédiments Mésozoïques sont absents dans la partie nord du bassin de Tindouf. La Formation Hamada est considérée comme d'âge Tertiaire et est située en discordance sur la série Paléozoïque.

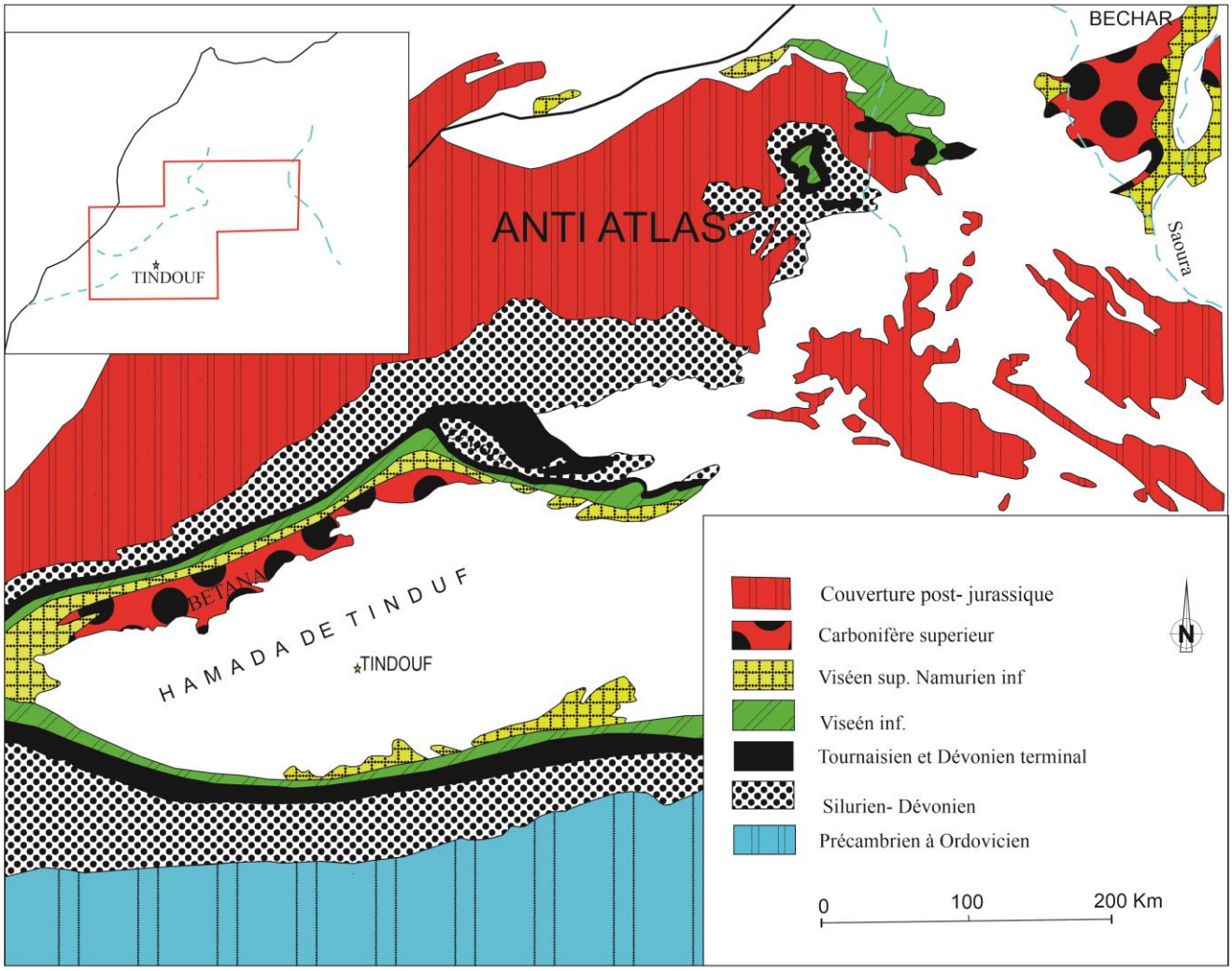


Fig. 17 : Carte géologique du bassin de Tindouf et du revers Sud de l'Anti-Atlas (d'après Hollard, 1967).

Par contre le flanc sud du bassin de Tindouf a fait l'objet de nombreuses études liées à la recherche minière après la découverte par P. Gevin dans les années cinquante du gisement de fer de Gara Djebilet situé au Sud – Est de la ville Tindouf. Il est un monoclinal à très faible pendage (3° maximum), Il s'agit d'une monoclinique à très faible pendage (jusqu'à 3°), mal définie ailleurs, sans structures secondaires **(Fabre, 1969 et 1971)**.

Les principales caractéristiques lithostratigraphiques de la zone Tindouf sont : Le socle de la dorsale Regibat dans la partie Sud-Ouest du bassin de Tindouf. Il est constitué de deux zones distinctes, Yetti à l'Ouest et Eglab à l'Est, et se caractérise par une topographie plate avec des reliefs d'inselberg épars **(Auvray et Trannoy, 1992)**. Ce socle est constituée de terre métamorphique, dépôts volcaniques et roches magmatiques d'âge éburnéen (2,2

à 2,07 Ga) **(Peucat et al., 2005)**. L'ère Paléozoïque commence avec des strates de l'Ordovicien supérieur constituées de grès grossiers entrecroisés riches en Tigillites. **(Bitam et al., 1996 ; Guerrak, 1988)**.

Cette formation s'étend de Gara Djebilet à Aouinet Belagraa. Les affleurements siluriens sont principalement composés d'argilo-schisteux. Le Dévonien est d'une grande importance et contient les grands gisements de fer oolithique d'Algérie (Gara Jebilet et Mechri Abdelaziz). Le Carbonifère complète la série paléozoïque dans cette région. Il est composé de dépôts argileux de grès et de calcaire et de dépôts argileux. Les formations sédimentaires de l'ère mésozoïque sont il n'existe pas dans le bassin de Tindouf. Néanmoins, **(Fabre, 2005)** suggère la présence d'une plateforme gréseuse du Crétacé au sud-ouest de la ville de Tindouf. La période Tertiaire comprend la Formation Hamada du Draa, les dunes de l'Erg Iguidi et les plaines des oueds qui occupent la majeure partie du bassin.

III. 1. Aperçu lithostratigraphique

La présentation de la coupe synthétique du remplissage est basée sur les données de **(Gevin, 1960)** pour le flanc sud et sur celles de **(Hollard 1970)** et **(Jacquemont 1956)** pour le flanc Nord et sera complétée par quelques sondages sélectionnés au centre du bassin (**Fig. 18**).

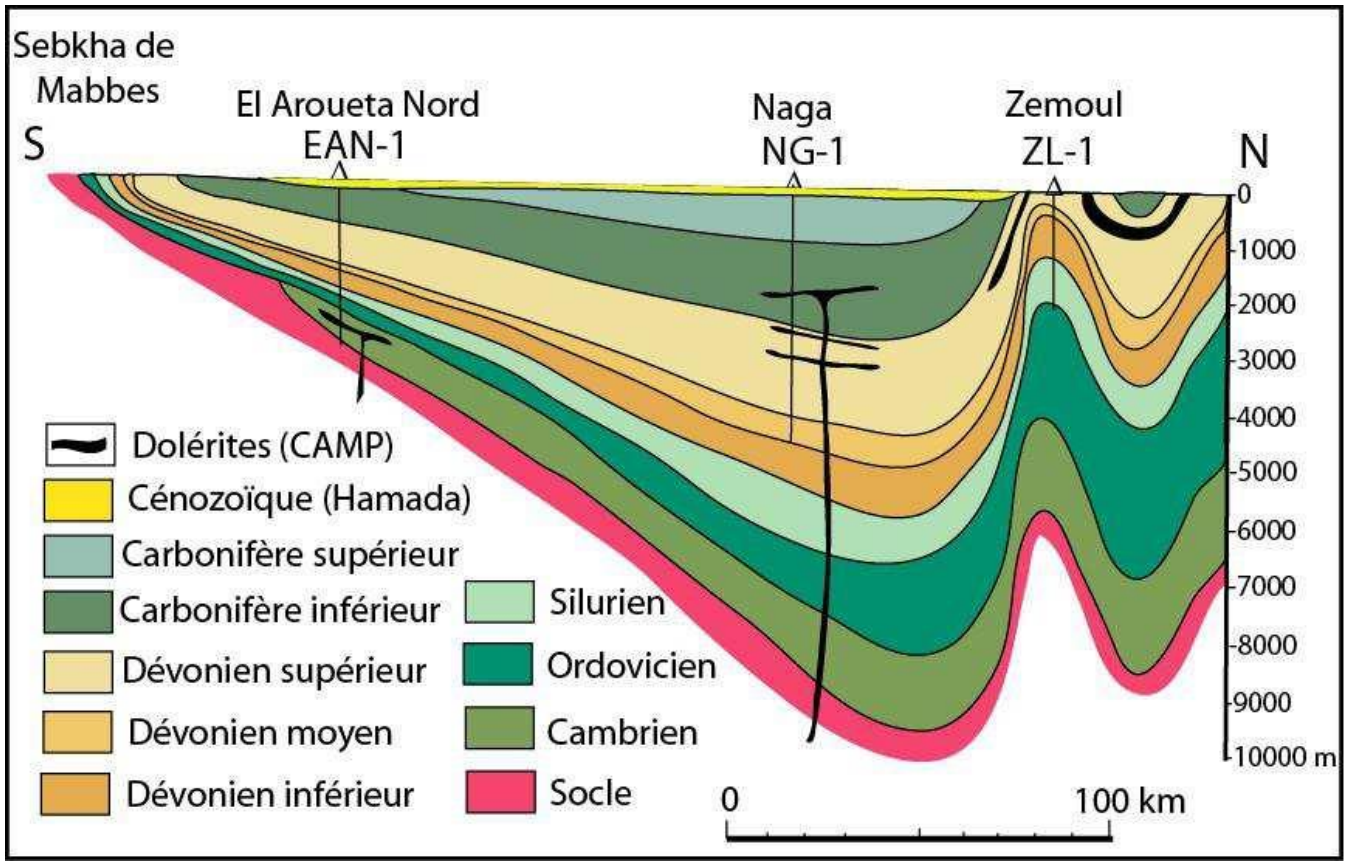


Fig. 18 : Coupe stratigraphique N-S de la partie occidentale du bassin de Tindouf. D'après Ibrihen et Ghoul, 2005 ; modifiée.

Le fondement est étudié en se basant sur les données de **(Bessoles 1977)**. Au sud, la couverture sédimentaire forme une région discordante de 100 km de large sur la dorsale granitique des Eglabs. Les terrains paléozoïques s'étendent du sud au nord de l'Ordovicien supérieur glaciaire au Carbonifère supérieur continental, avec des gradients très faibles de l'ordre de 2° vers le nord. Les formations hamadiennes, les dunes et les alluvions quaternaires les recouvrent de discordances angulaires. La couverture au nord est beaucoup plus épaisse et droite (**Fig. 19)**. Elle débute par le conglomérat de l'Ordovicien supérieur et se termine par les formations continentales du Carbonifère supérieur. La perfection de cet ensemble réside dans la création de Hamada. Il y a un lit fluvial de grès probablement crétacé qui sépare cette dernière de Merkala et Targant **(Gevin, 1960 et Fabre, 1976)**.

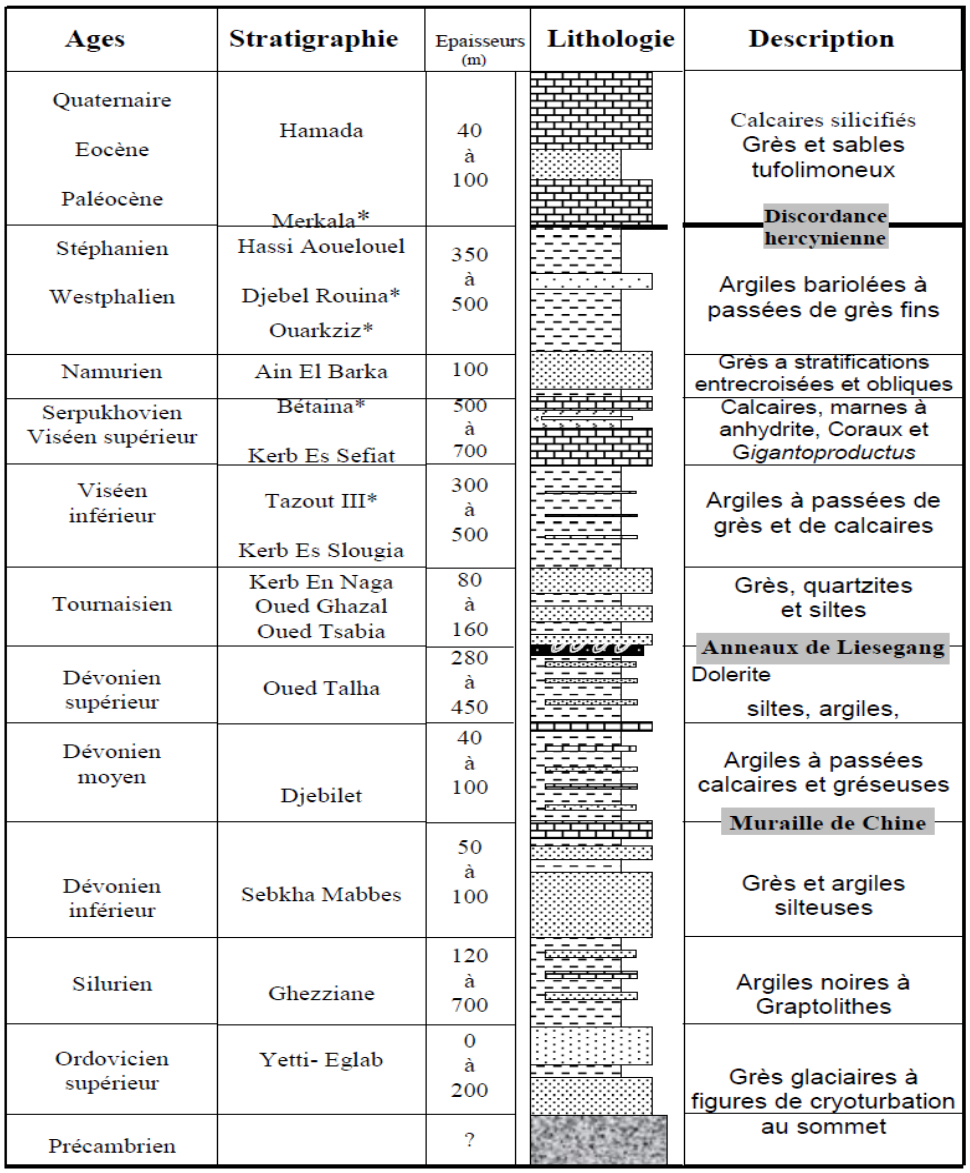


Fig. 19 : Lithostratigraphie synthétique du bassin de Tindouf à partir des données de **Hollard et al. (1958), Gevin (1960), Fabre (1976) et Guerrak (1988), Sermi (1960)**.Les formations qui portent un astérisque sont définies sur le flanc Nord du bassin.

La série stratigraphique est représentée par :

- **Le socle**

Dans la région d'étude, les affleurements paléozoïques du socle sont localisés principalement au niveau de l'Anti-Atlas marocain au nord, et dans la dorsale Réguibat au sud **(Gevin, 1960)**, **(Fabre, 1988)**. Ce dernier est traversé dans la partie méridionale du bassin par un nombre de forages et sondages. Ces ouvrages concernent le sondage EAN-1, le sondage GSL-3 et le forage profond de Bougarfa à 31 km au sud de Tindouf.

- **Le Cambro-ordovicien**

Représenté essentiellement par des grès et complètement traversé sur la bordure sud de la dépression. Il débute par les quartzites et les grès à grains grossiers, dits 'quartzites de Djebilet'. Les grès Ordoviciens à grains grossiers à stratifications entrecroisées, appelées 'grès d'Aouinet-Legraa' reposent au-dessous de cette série et parfois même directement sur les roches cristallines du socle **(Bitam et al., 1996)**.

- **Le Silurien**

Il se manifeste particulièrement par un faciès argilo-schisteux, à prédominance d'argilites multicolores et gris sombres, presque pélitiques, à graptolites, en intercalations avec les schistes gréseux et les grès à ciment fortement argileux **(Legrand, 2003)**.

- **Le Dévonien inférieur**

Cette formation est représentée localement, par des microconglomérats de base (Lumachelles), au-dessus desquels, se matérialise une série d'argiles gréseuses et de schistes argileux, surmontée par une couche d'oolites ferrugineuses, qui se termine par un niveau constitué de calcaires à Crinoïdes, fortement gréseux par endroits, et de grès à grain grossier de couleur rouge et rosâtre (Lourguioui, 2020). Les couches susmentionnées d'oolites ferrugineuses apparaissent généralement dans la région de Gara-Djebilet. À l'Est de cette région, les parties les plus hautes du Dévonien inférieur ne contiennent pas de séries argileuses et sont typiquement gréseuses.

- **Le Dévonien moyen**

Affleure par un faciès carbonaté et carbonato-argileux. Des calcaires gréseux, avec de minces bancs de grès à gros grains ont été observé en bas, tandis qu'en haut se manifeste un faciès carbonato-argileux. Ces derniers sont représentés par des marno-calcaires avec des plaques de calcaires-zoo géniques bleu gris, des schistes argileux et des marnes jaune-verdâtre à la base desquelles, se met en place un banc de concrétions ferrugineuses avec de minces bancs de gypse.

- **Le Dévonien supérieur**

Ce dernier est caractérisé principalement par un ensemble argilo-gréseux passant au toit, à un faciès argilo-silteux. Par ailleurs, trois couches caractéristiques de calcaires de teinte bleue ont été observées dans la partie inférieure de ce niveau. Des argiles fortement gréseuses apparaissent sous forme de minces bancs de gypse au toit.

- **Le Carbonifère**

Il est matérialisé par la présence deux facies principaux. Un facies marin dont ses dépôts correspondent aux formations du Strunich, du Tournaisien et du Viséen **(Amrouche, 2004)**, **(Conrad, 1984)**. Un autre faciès continental appartient au Carbonifère supérieur (Namurien-Stéfanien).

- **Le Mésozoïque**

Les dépôts de cette période seraient représentés par des grès d'environ 50 m d'épaisseur, similaires à ceux observés dans la partie méridionale du Djebel Ouarkzize **(Gevin, 1958)**. Le Crétacé marin, bien documenté dans le Sahara central, n'a pas encore été identifié dans ce bassin, et sa présence demeure incertaine dans la zone nord-occidentale du synclinal de Tindouf. Toutefois, la transgression marine crétacée aurait pu affecter le secteur nord-est de la région de Tindouf, où les formations seraient masquées par la dalle hamadienne. Entre Merkala et Targant, on signale la présence de grès à chenaux attribués au Crétacé **(Gevin, 1960 ; Fabre, 1976) (Fig. 20)**.

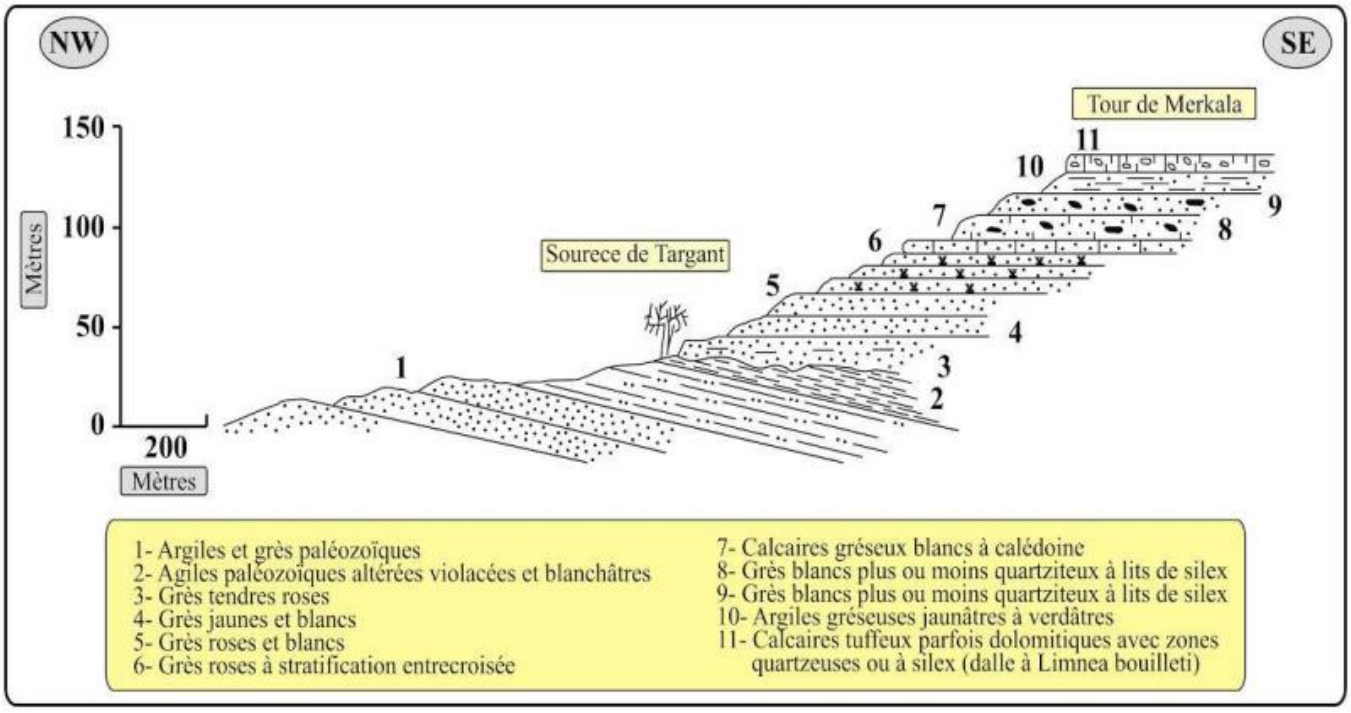


Fig. 20 : Coupe de Merkla à Targant (Gevin, 1960).

- **Le Tertiaire**

Il est constitué par les dépôts crétacés du Continental Intercalaire, les formations tertiaires des Hamadas ainsi que par les recouvrements quaternaires. Dans le reste du bassin de Tindouf, les terrains paléozoïques sont fréquemment masqués par des séries continentales d'âge éocène à pliocène, qui forment les vastes Hamadas du Sud-Ouest algérien, notamment celles du Dra et du Guir. L'épaisseur de ces dépôts dépasse rarement 100 m **(Gevin, 1960 ; Fabre, 1976 ; Benhamouche, 2003)**.

- **Les Dépôts quaternaires**

Constitués principalement par des formations alluviales, remplissant les cours d'eau, et les sables éoliens sur les ergs. Les alluvions sont constituées de matériel détritique allant jusqu'aux débris de roches, absolument non classés et très peu façonnés **(Ben hamouche, 2003)**.Les regs et les sebkhas font aussi partie de ces formations avec des étendues et des épaisseurs variables.

III. 2. L'effet de la tectonique sur le bassin de Tindouf

Selon **(Gevin, 1960)**, le bassin de Tindouf aurait été individualisé à la fin du Paléozoïque (Carbonifère supérieur). Sa limite sud est monoclinale avec un léger pendage (en moyenne 2 à 3° nord). La structure de cette limite est caractérisée par la présence de trois moles ou plateaux (Aouinet, Laroussi et Bou Bernous) séparés par les sous bassins du Ghar Djebilet et de l'Iguidi. Le sous-bassin de Ghar Djebilet est plat, mais le cours inférieur de la rivière Iguidi est fortement submergé. Certaines des failles d'orientation ouest-sud-ouest à est-nord-est ou sud-ouest à nord-est traversent tout le Paléozoïque et sont injectées de dolérite (**Fig.21)**.

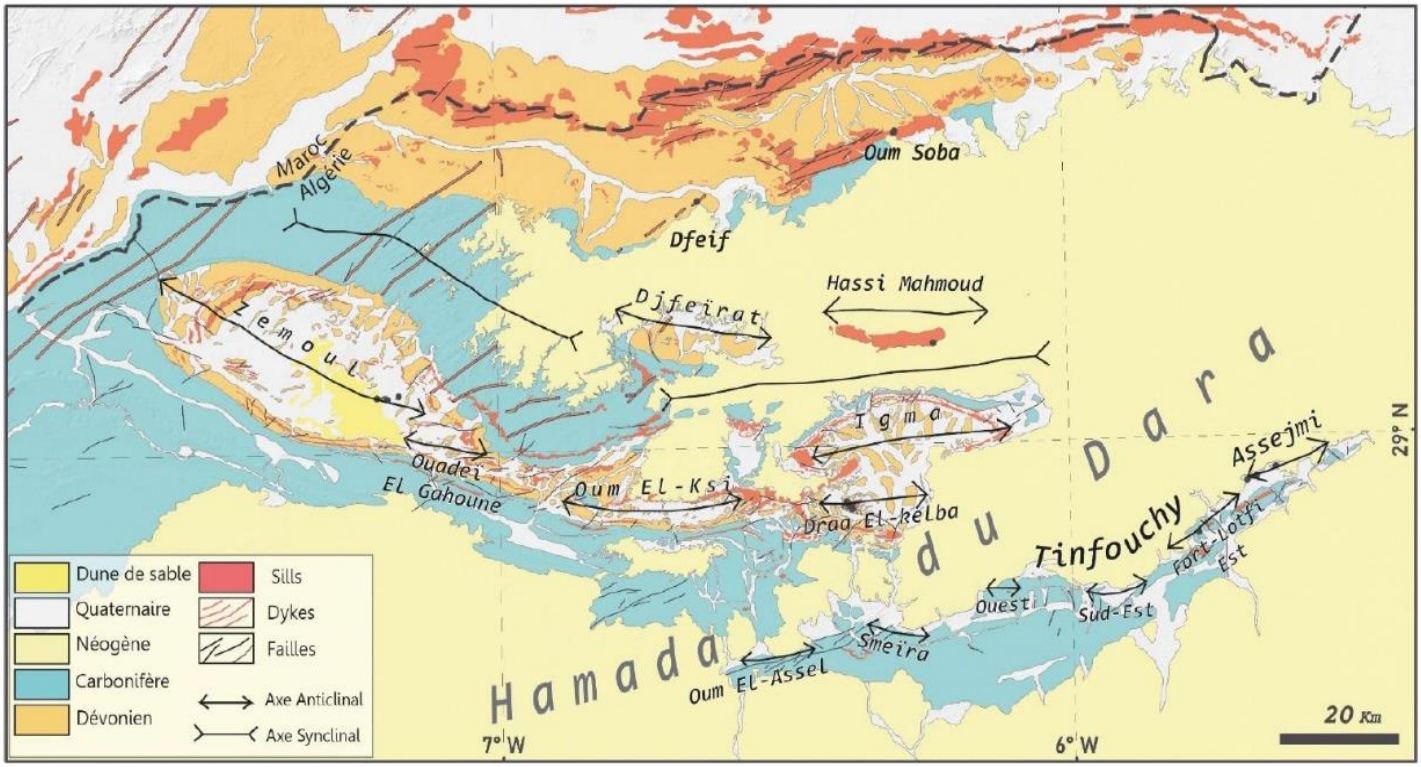


Fig. 21: Carte lithostructurale montrant les principaux éléments structuraux du flanc septentrional du bassin de Tindouf **(Hachamauoi O. 2022)**.

La limite nord du bassin est fortement redressée par rapport à l'Anti-Atlas marocain. La pente de la couche varie entre 8 et 12°. La série paléozoïque est ici fortement plissée. Les plis sont massifs à l'Ordovicien et plus souples et nombreux au Dévonien, formant la grande ceinture anticlinale Zemoul-Adim-Filou. Cette zone est

affectée par de nombreuses failles (dont certaines s'étendent sur des distances de plus de 150 km et ont des rejets d'environ 200 à 400 m) et comprend des sills et des dykes doléritiques. Dans la partie ouest de la ceinture anticlinale Zemoul-Adim-Filou, la direction des plis et des failles s'étend du nord-ouest au sud-est, c'est-à-dire parallèlement aux monts d'Ougarta. La direction à l'Est est WSO-ENE, proche de la direction Anti-Atlas. L'existence de cette dépression et de cette zone fortement plissée au nord du bassin de Tindouf serait due à l'existence d'un important accident majeur souterrain (décrochement) d'orientation est-Est-Nord-Est en profondeur **(Chabou. M.C, 2008)**. Les différentes orogénies de cette partie du désert du Sahara sont un effet direct de la collision intercontinentale qui a affecté les plaques africaine et nord-américaine **(Wilson, 1968)**.

La couverture sédimentaire a subi un certain nombre d'actions tectoniques ; selon **(Gevin 1960)** nous avons :

1. Phase cadomienne : qui a affecté les sédiments infracambriens dans un système d'ondulations NW-SE en « horsts et graben » plus ou moins prononcées. Cette tectonique n'est visible qu'au sud de la Dorsale de Reguibat, et encore mieux lorsqu'on se déplace vers l'Est.

2. Phase calédonienne : Le début de cette structuration a lieu pendant l'Ordovicien, marquée par le dépôt de 1000 mètres de grès. Au Sud, l'impact de la phase calédonienne est significatif, alors que le Dévonien inférieur est à la fois incomplet et riche en débris, présentant des lentilles de fer **(Ayad, et al., 2004)**. Elle est très visible, mais visible sous forme de quelques renflements de la base, notamment vers le méridien ouest 6°.

3. Les « Plis » hercyniens : qui ont créé le large synclinal asymétrique de Tindouf, régulier à l'Ouest, bosselé à l'Est .Elle est également à l'origine des importantes failles obliques qui s'étendent du Nord-Est au Sud-Ouest, en rapport avec l'élévation des dolérites **(Gevin, 1960)**. La phase hercynienne a été marquée par une grande intensité, étant responsable de la formation des chaînes de montagnes comme l'Ougarta, l'Anti-Atlas, ainsi que de l'axe Zemoul – Adhim Filou **(Gevin, 1958; Nedjari et al., 2009)**.

4. Phase hercynienne ultime : responsable de grandes failles obliques (NE-SW ou ENE-OSO). L'influence de la tectonique hercynienne se manifeste principalement dans le Bassin de Tindouf **(Fabre, 1976).** La forme actuelle de ce bassin est le résultat des plis hercyniens**.** Concernant la tectonique moderne, elle s'applique aux terrains hamadiens où les fractures et plissements sont moins marqués. Il est important de souligner que la table hamadienne (mio-pliocène) descend vers le Sud, ce qui a conduit à une baisse d'altitude de la hamada de Tindouf, qui atteint 535 m près de Bou-Agba, mais seulement 403 m à l'Aéroport de Tindouf. Cela a probablement entraîné le drainage du Lac le plus récent et initié le système de drainage actuel formé par les oueds **(Lavocat, 1954)**.

5. Mouvements post-hamadiens : prendre, d'une part, les courbures paléozoïques, d'autre part, les failles hercyniennes ultimes sur lesquelles sont modélisées les directions d'érosion post-hamadienne. Le reflet général du bassin est essentiel en raison de la position clé occupée par ce synclise entre un Anti-Atlas mobile et une crête de Reguibat (ancien craton stable).

6. phase Alpine: Tous les mouvements survenus après l'Hercynien et l' Hamadiens ont redonné vie à des structures anciennes, notamment à la suite de convergence des plaques africaine et eurasienne, entraînant des plissements et des soulèvements.

7. phase continue associée au tassement des couches : Connexe au phénomène de la subsidence engendrée par des mouvements lents basculant d'Est en Ouest et réciproquement, selon l'évolution tectonique des bassins sédimentaires entourant yetti-Eglab. Ce dernier est uniforme de chaque côté de l'axe cristallin dégagé, mettant en lumière des zones disharmoniques qui témoignent des cicatrices antécambriennes les plus récentes **(Gevin, 1958)**.

IV. Cadre géologique locale du secteur d'étude

La zone étudie est situé dans le flanc Nord du bassin, il n'y a que peu de travaux géologiques, notamment les forages effectués par la compagnie pétrolière SONATRACH à la fin des années soixante-dix. Le flanc Nord, étroit et fortement redressé, est marqué par des plis linéaires, réguliers et fortement accentués de direction NE-SW. Le plis d'Adam Filou, l'anticlinal Oum El Assel-Tinchouchy et l'anticlinal de Zemoul-Igma sont les trois structures qui sont identifiées (**Fig.22**).

Les dépôts présents dans notre zone datent du Tertiaire continental et ont une épaisseur qui varie de quinze mètres à plusieurs dizaines de mètres, sans que les couches hamadiennes ne dépassent les cent mètres **(Benhamouche, 2003)**. Dans cette région, l'ensemble des forages analysés révèle la présence d'une partie de la formation appelée dalle calcaire silicifiée. Les calcaires supérieurs, qui apparaissent dans tous les forages, sont très riches en silice, avec une épaisseur allant de 24 à 40 mètres. Le degré de fissuration de ce calcaire augmente avec l'épaisseurLors de la réalisation de quatre forages de remplacement, une perte partielle a été constatée, liée aux fissures dans les zones surélevées ainsi qu'aux effondrements associés à d'anciens accidents tectoniques **(Benhamouche, 2003)**. La zone d'étude se caractérise principalement par la présence de torba, de calcaires, de grès et de sables. La torba se présente parfois sous forme argileuse ou gréseuse, avec une structure pouvant être canalisée ; ces formations hamadiennes sont d'âge néogène **(Conrad, 1969, 1971 ; Mahboubi, 2000)**. L'analyse minéralogique de la fraction fine de la torba dans les hamadas du Guir a révélé la prédominance de l'attapulgite comme minéral argileux **(Conrad, 1969, 1971)**. Cette argile serait à l'origine des apports siliceux responsables des silicifications observées sur la Hamada. À côté de l'attapulgite, on identifie également la calcite et la dolomite, souvent présentes sous forme de petits rhomboèdres, ainsi que diverses silicifications **(Conrad, 1969, 1971)**. Les calcaires de la Hamada montrent une grande variabilité : ils peuvent être tuffeux, gypseux ou fortement dolomitisés, parfois enrichis en grains de quartz d'origine éolienne, et peuvent inclure des niveaux de microconglomérats ou de brèches. Les grès, quant à eux, apparaissent le plus souvent sous des teintes blanches ou rosées, avec une faible épaisseur, rarement supérieure à 70 m, et une extension latérale limitée.

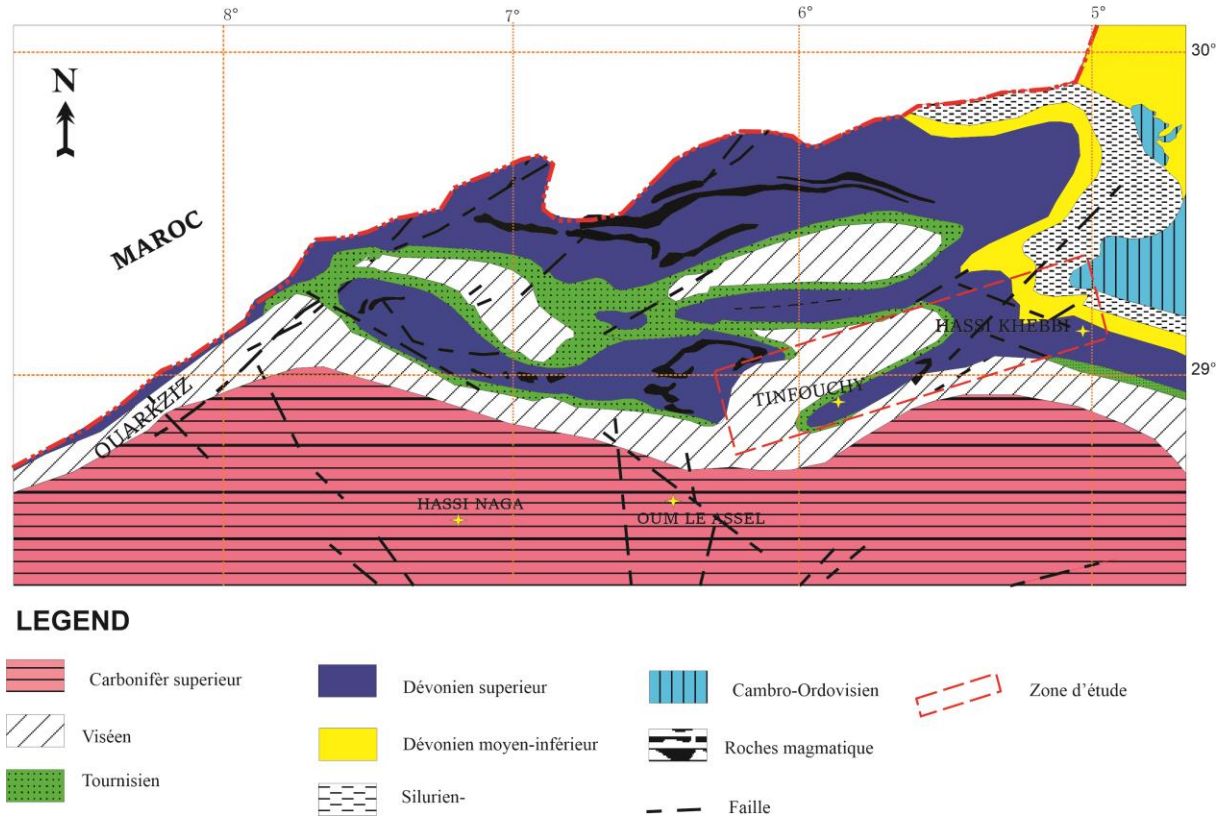


Fig.22 : Extrait de la carte géologique montrant les différentes structures géologiques, Écorche géologique a la surface de la discordance hercynienne 1 : 2000 000 **(d'après Geol. Service Algérien 1999)** modifié.

V. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la région de Tindouf **(Fig.23)** n'est développé que dans les régions où l'on observe les affleurements de marnes et d'argiles du paléozoïque, notamment dans le flanc Nord du bassin. On y trouve principalement l'oued Zemoul et son affluent oued Mounir, ainsi que d'autres moins importants qui se déversent dans l'oued Draa. Cependant, il est essentiel de recourir aux retenues en utilisant des digues et des barrages d'inféro-flux pour récupérer les eaux qui se perdent sur le côté marocain.

Au cœur du bassin, la hamada domine l'ensemble de la surface, mais la dalle silico-calcaire n'a pas permis aux cours d'eau existants de creuser leurs lits de manière profonde. Le principal affluent d 'Oued El Ma est Oued El Kountar, qui prend sa source de la localité de Touiref Bouam et s'écoule sur une distance d'environ 80 km pour se jeter dans la grande sebkha. De nombreuses quantités d'eau se perdent lors des pluies occasionnelles ou torrentielles.

Les formations hamadiennes, en particulier la dalle de 02 à 04m d'épaisseur, sont profondément entaillées par l'Oued Tindouf, qui est à l'origine de la dépression de Tindouf, en creusant son lit dans les sables indurés du tertiaire continental. Il est impératif de réguler à l'avance les eaux de cet oued en installant des retenues (digues)

dans les zones d'étranglement afin de prévenir les inondations dans la ville. Nous mentionnerons quelques autres Oueds peu importants, à titre indicatif : Oued Oum El Assel et celui de Khorb El Ethel au nord-est de Tindouf, Oued Talha et Oudian Tetrat au sud.

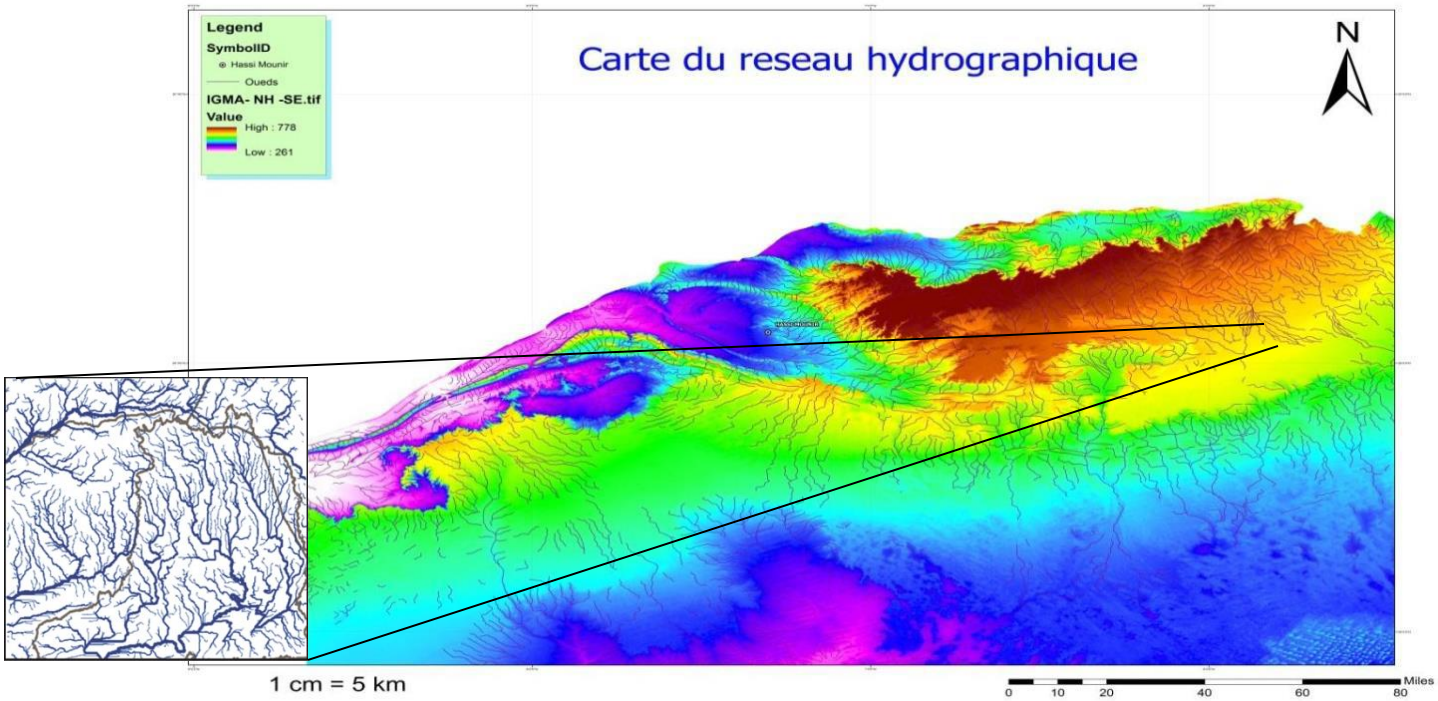


Fig. 23 : Carte du réseau hydrographique de la zone flanc nord de bassin.

VI. Les missions de terrain pour l'analyse géologique et hydrogéologique de la zone d'étude

Afin de mieux définir les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la zone d'étude, un suivi technique et scientifique des travaux de réalisation a été assuré. Ce suivi a porté sur l'exécution de deux (02) forages dans la région de Hassi Khebbi et de quatre (04) forages dans la région de Fort Loti **(Tableau 19)**. L'ensemble de ces opérations s'est déroulé sur une période s'étendant du 23 février 2023 au 18 avril 2025, permettant ainsi de collecter des données précises sur la stratigraphie, la nature lithologique et les conditions hydrogéologiques locales (**Fig.24**).

L'objectif principal de cette opération était de collecter des données in situ permettant une interprétation fiable de la stratigraphie locale, de préciser la nature lithologique des formations traversées et d'identifier les horizons aquifères potentiels. Le suivi continu des travaux a également permis de contrôler la qualité d'exécution, d'assurer la représentativité des échantillons prélevés et de documenter avec rigueur les paramètres hydrogéologiques observés (niveaux statiques, débits, perméabilité).

Ainsi, ces forages constituent des points de référence essentiels pour l'affinement du modèle géologique de la région et pour l'évaluation des ressources en eau souterraine, contribuant directement à la fiabilité des analyses et des conclusions de la présente étude.

Tableau 19 : Tableau récapitulatif des forages réalisés au niveau de la zone d'étude.

Nom Forage	Localisation	Coordonnées (Lat, Long)	Profondeur (m)	Période de réalisation	Observations lithologiques principales	Age
Oued Hassi khebbi	Hassi Khebbi	29°07' 54,82''N 05°20' 19,97''E	120	17/12/2024 15/03/2025	Grès grossiers, intercalations argileuses	Tertiaire continentale (Néogène)
Oued El Atassa	Hassi Khebbi	29°10' 49,37''N 04°59' 27,52''E	84	16/03/2023 10/04/2023	Sables fins, couches argilo-sableuses	
NB 02 bis	Fort Loti	29°13' 36,25'' N 05°52' 27,61'' E	150	06/01/2025 05/04/2025	Calcaires dures, Alternance Sables et Grès, Argiles rouge sableuses et Argiles noirâtres	
NB 03 bis	Fort Loti	29°14' 04,07'' N 05°52' 45,84'' E	160	06/01/2025 10/03/2025	Calcaires dures, Sables à ciments carbonatés, Grès, Argiles sableuses et Argiles noiratre	
NB 08 bis	Fort Loti	29°13' 20,04'' N 05°44' 39,41'' E	125	30/11/2024 18/02/2025	Calcaires dures silicifies, Sables à ciments carbonatés, Marnes sableuses, Argiles sableuses et Argiles grisâtres	
TFC 01 bis	Fort Loti	29°14' 24,35 ''N 05°40' 12,30'' E	130	06/02/2025 18/04/2025	Calcaires blanchâtres dures, Sables grossies, Grès quartzeuse, Sables, Argiles peu sableuses et Argiles grisâtres	

A partir de l'Observations lithologiques des forages nous établir les coupes suivant **:**

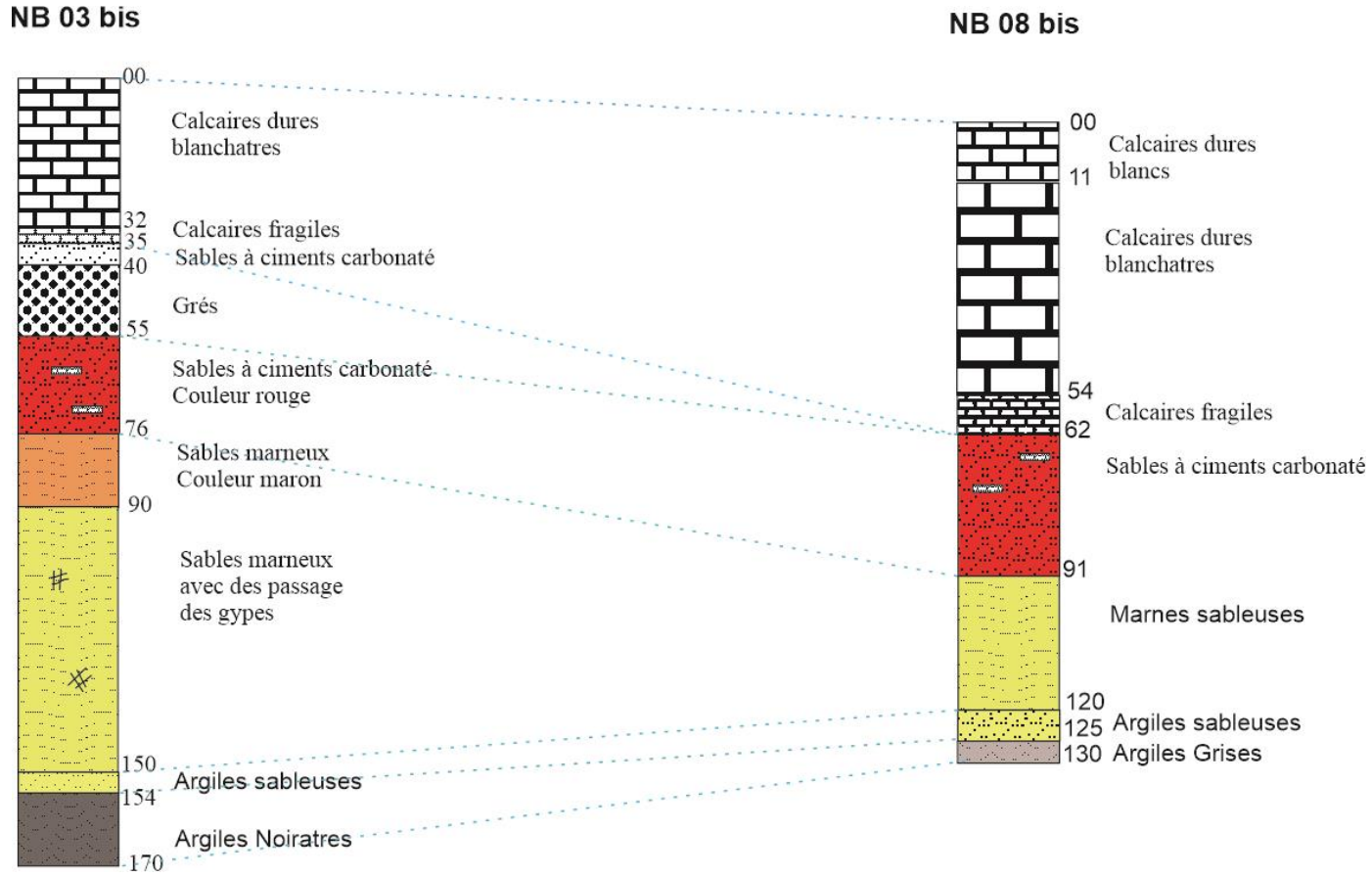


Fig. 24 : Corrélation entre deux coupe géologique (NB 08 bis – NB 03 bis).

VI. 1. Corrélation stratigraphique interprétées

Tableau 20: Tableau récapitulatif des descriptions et remarques.

Niveau	NB 03 bis	NB 08 bis	Corrélation et interprétation
1	Calcaires durs	Calcaires durs silicifiés	Couches équivalentes : même formation carbonatée, mais la silicification dans la coupe NB 08 bis indique une altération diagenétique locale.
2	Sables à ciment carbonaté	Sables à ciment carbonaté	Parfaite continuité latérale ; dépôt détritique consolidé par carbonatation secondaire.
3	Grès	Marnes sableuses	Corrélation partielle : le grès (NB 03 bis) passe latéralement à des marnes sableuses (NB 08 bis), traduisant un changement de faciès vers un milieu plus argileux.
4	Argiles sableuses	Argiles sableuses	Bonne correspondance : dépôt de transition commun aux deux coupes.
5	Argiles noirâtres	Argiles grisâtres	Formation équivalente : les différences de teinte (noirâtre ↔ grisâtre) reflètent une variation du taux de matière organique ou du degré d'oxydation.

VI. 2. Interprétation géologique

Les deux coupes géologiques présentent une succession stratigraphique globalement comparable, bien que marquée par des variations latérales de faciès. Le passage des grès aux marnes sableuses traduit une transition progressive d'un milieu continental vers un environnement plus marin ou lagunaire. Les niveaux d'argiles noires ou grises, situés au sommet de la série, constituent la couche imperméable de l'ensemble stratigraphique. Par ailleurs, la silicification observée dans les calcaires de la coupe NB 08 bis pourrait résulter d'une circulation de fluides riches en silice ou d'une altération diagénétique postérieure au dépôt.

VI. 3. Localisation spatiale des points de prises de vue

La **figure 25** montre la carte de localisation des points d'observation où les photographies ont été prises. Ces points sont identifiés par un code (1, 2, 3 et 4) correspondant aux clichés présentés plus loin.

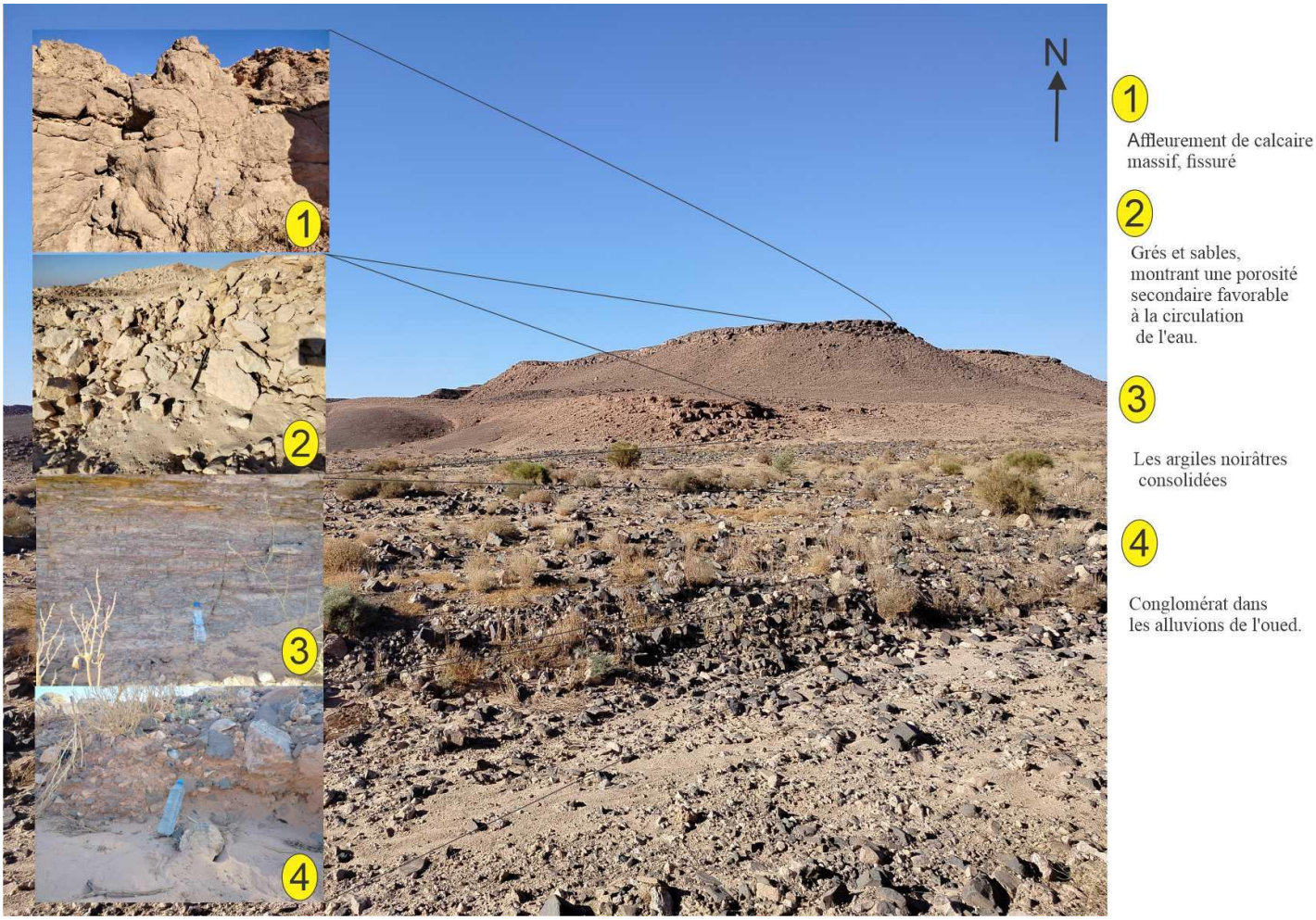


Fig. 25 : Carte CorelDRAW localisant les points de prise de vue dans la zone d'étude.

Les observations de terrain montrent une succession de formations variées : un calcaire massif fissuré à traces de dissolution, des grès et sables poreux favorables à la circulation de l'eau, des argiles noirâtres feuilletées jouant un rôle imperméable, et enfin un conglomérat alluvial où le niveau phréatique apparaît très proche de la surface. Ces affleurements traduisent une bonne hétérogénéité lithologique et une circulation souterraine localement active.

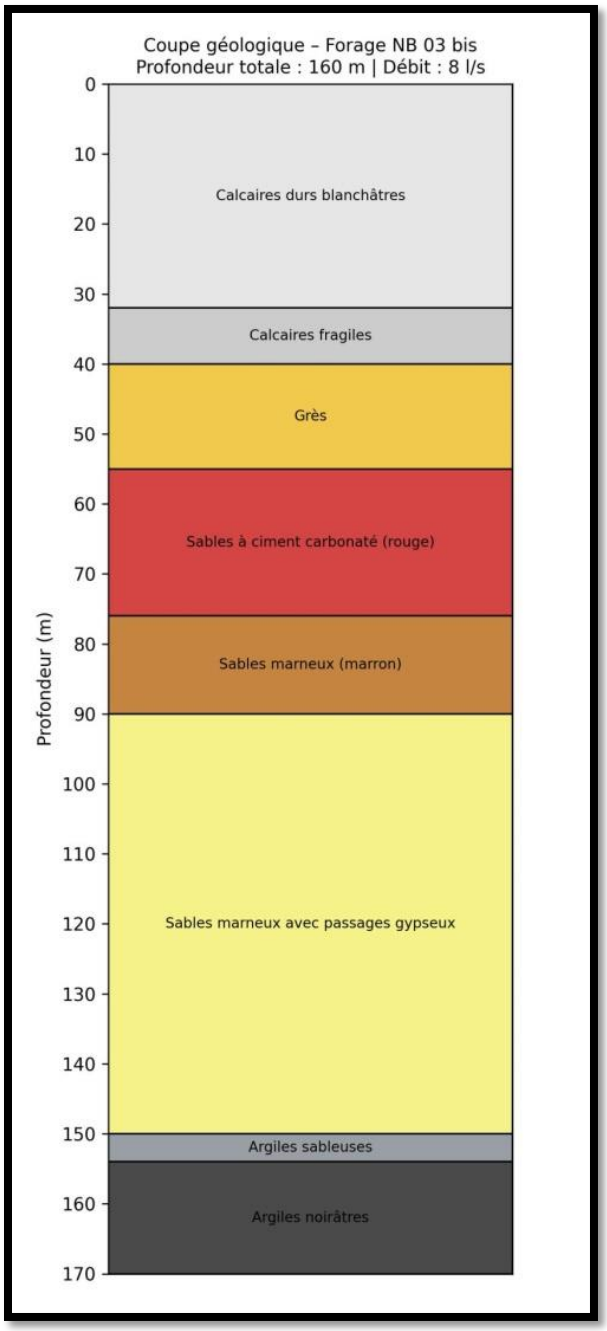


Fig. 26 : Coupe géologique montrant la succession du tertiaire du forage NB 03bis **(DHW DE TINDOUF, 2025)**

VI. 4. Les formations réservoirs, couvertures et substratums de la zone d'étude

Les principaux faciès rencontrés dans la zone de d'étude sont les calcaires, les grès et ou sables et les argiles (**Fig. 26)**. Les calcaires dures blancs et parfois silicifies puis les sables /grès faiblement consolidé et de teinte verdâtre ou jaunâtre, renferme comme minéral argileux dominant l'attapulgite, identifiée dans les hamadas du Guir **(Conrad, 1969 ; 1971)**. Cette dernière constitue probablement la principale source de silice responsable des silicifications affectant la Hamada. Elle s'associe à de la calcite, à de la dolomite en petits rhomboèdres ainsi qu'à diverses silicifications. Les calcaires, quant à eux, sont très hétérogènes : ils peuvent être tuffeux, gypseux ou dolomitisés, parfois enrichis en quartz d'origine éolienne, et comporter localement des niveaux de microconglomérats et de brèches. Enfin, les grès et ou les sables apparaissent généralement jaunâtre ou verdâtre, avec une faible épaisseur, rarement supérieure à 70 m, et une extension latérale limitée.

VII. Conclusion

L'étude géologique du bassin de Tindouf met en évidence une superposition de formations sédimentaires variées, allant du Paléozoïque au Quaternaire. Les principaux faciès identifiés (torba, calcaires, grès et ou sables) traduisent une histoire géologique complexe marquée par des dépôts continentaux et marins, des phases de dolomitisation, de silicification ainsi que des apports éoliens. Ces formations, souvent de faible épaisseur et d'extension limitée, reposent sur un substrat paléozoïque et sont localement recouvertes par les vastes couvertures hamadiennes et dunaires. Leur étude détaillée permet non seulement de mieux comprendre l'évolution sédimentaire et structurale de la région, mais aussi de mettre en lumière les processus diagénétiques (silicification, dolomitisation) qui conditionnent les caractéristiques actuelles des roches. Cette analyse constitue une base essentielle pour appréhender, dans les chapitres suivants, les aspects hydrogéologiques et les potentialités en ressources naturelles de la zone d'étude.

CHAPITRE IV

Hydrogéologie et Hydrochimie

I. Introduction

L'étude hydrogéologique et hydrochimique constitue une étape fondamentale dans la compréhension et la gestion durable des ressources en eau souterraine, particulièrement dans les régions arides et semi-arides telles que la wilaya de Tindouf. En effet, la rareté et l'irrégularité des précipitations, combinées à une forte demande en eau liée à la croissance démographique et aux besoins agricoles, accentuent la pression exercée sur les nappes souterraines, souvent considérées comme la principale source d'approvisionnement.

L'approche hydrogéologique vise à caractériser les systèmes aquifères, à déterminer leur extension, leur mode de recharge, leur dynamique d'écoulement et leur productivité. Elle permet ainsi d'identifier les potentialités et les limites de ces réservoirs d'eau fossile ou renouvelable.

Parallèlement, l'analyse hydrochimique apporte des informations précieuses sur la qualité des eaux souterraines. L'étude des paramètres physico-chimiques et des principaux ions dissous permet non seulement de déterminer l'aptitude de l'eau à différents usages (alimentation, agriculture, industrie), mais aussi de retracer l'origine des minéralisations, les processus d'interaction eau-roche et l'évolution géochimique au sein des aquifères.

Ce chapitre a donc pour objectif de présenter les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques du secteur étudié, afin d'établir une base de connaissance solide sur le fonctionnement des nappes souterraines et sur la qualité de leurs eaux. Cette analyse constitue un préalable indispensable à toute démarche visant la gestion rationnelle et durable des ressources hydriques dans la région.

II. Contexte hydrogéologique régional

L'étude et analyse des coupes géologiques des forages existants dans la région de Tindouf montrant que des formations qui pouvant être des aquifères sont mises en évidence dans les forages pétrolier ASj-1 et Forage bou_Grfa (**Fig.27)** qui traverse toute le synclinal. Pour une meilleure compréhension de l'hydrogéologie de la région de Tindouf, présentons ici les grands traits hydrogéologiques du bassin de Tindouf (**DRE Tindouf 2012, Yahiaoui A. 2020**) (**Fig.28)**:

II. 1. Nappe des calcaires à stromatholites de l'infra-cambrien

D'une manière générale, le socle cristallin ne présente pas d'intérêt hydrogéologique.Il n'est connu que dans le bassin du CHENACHENE à environ 650 km au SudEst de la ville de Tindouf et n'est exploité que par un seul forage en amont qui débite 2,50 l/s. Le socle cristallin ne constitue des réservoirs potentiels que dans les zones alluviales ; Des sables granitiqus existent par endroits, mais ils ne sont pas développés dans des épaisseurs (01 à 04m) qui ne permettent pas la création de réserves important et durable.

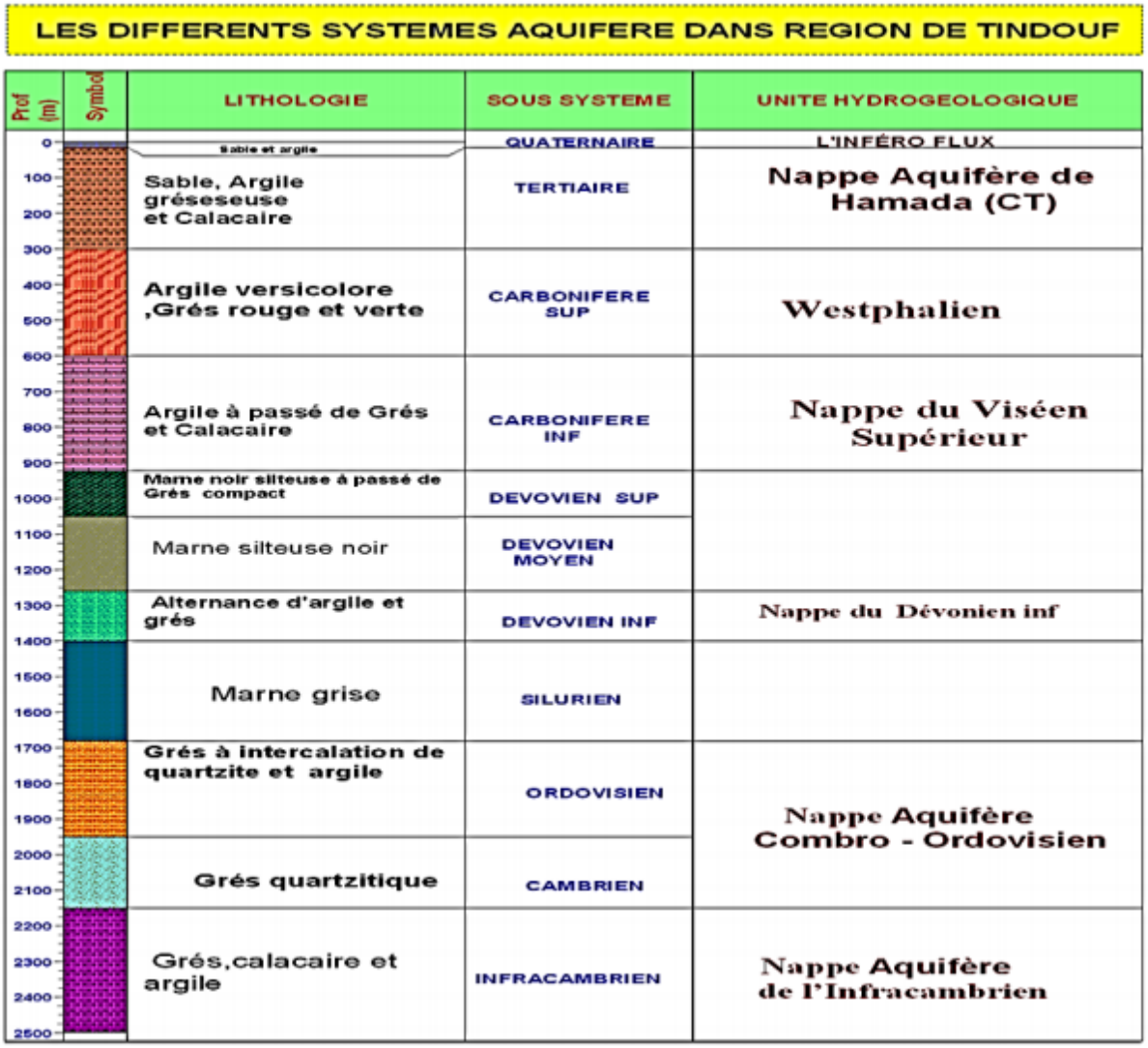


Fig.27 : Log Forage bou_Grfa représenté les Différents systèmes aquifères dans la région de Tindouf **(d'après l'ANRH Alger, 2004)**.

II. 2. La nappe des grés et quartzites de l'ordovicien supérieur

Les eaux sont de très bonne qualité pour la consommation humaine **(Messaoudi, H. 2008)**. Cette nappe est connue au sud de la ville de Tindouf, ou les débits des forages sont de l'ordre de 02 à 06 l/s. Elle est sollicitée par deux (02) forages dans la localité de Gara-Djebilet, GC1 et GC2 (06 l/s p/AEP) et deux (02) forages Dakhla 1, 2 et en plus une vingtaine de puits traditionnels dans la localité d'Aouinet Bel-Lagraa **(Mimouni. Y et Yahiaoui . A 2020)**. L'examen de la coupe géologique appuyée sur la géophysique, la reconnaissance du terrain, les données des forages ainsi que l'hydrochimie, montre que la nappe ne forme pas un système hydrogéologique continu ; cette discontinuité s'explique par la présence de failles étanches induisant des compartiments non communiquant.

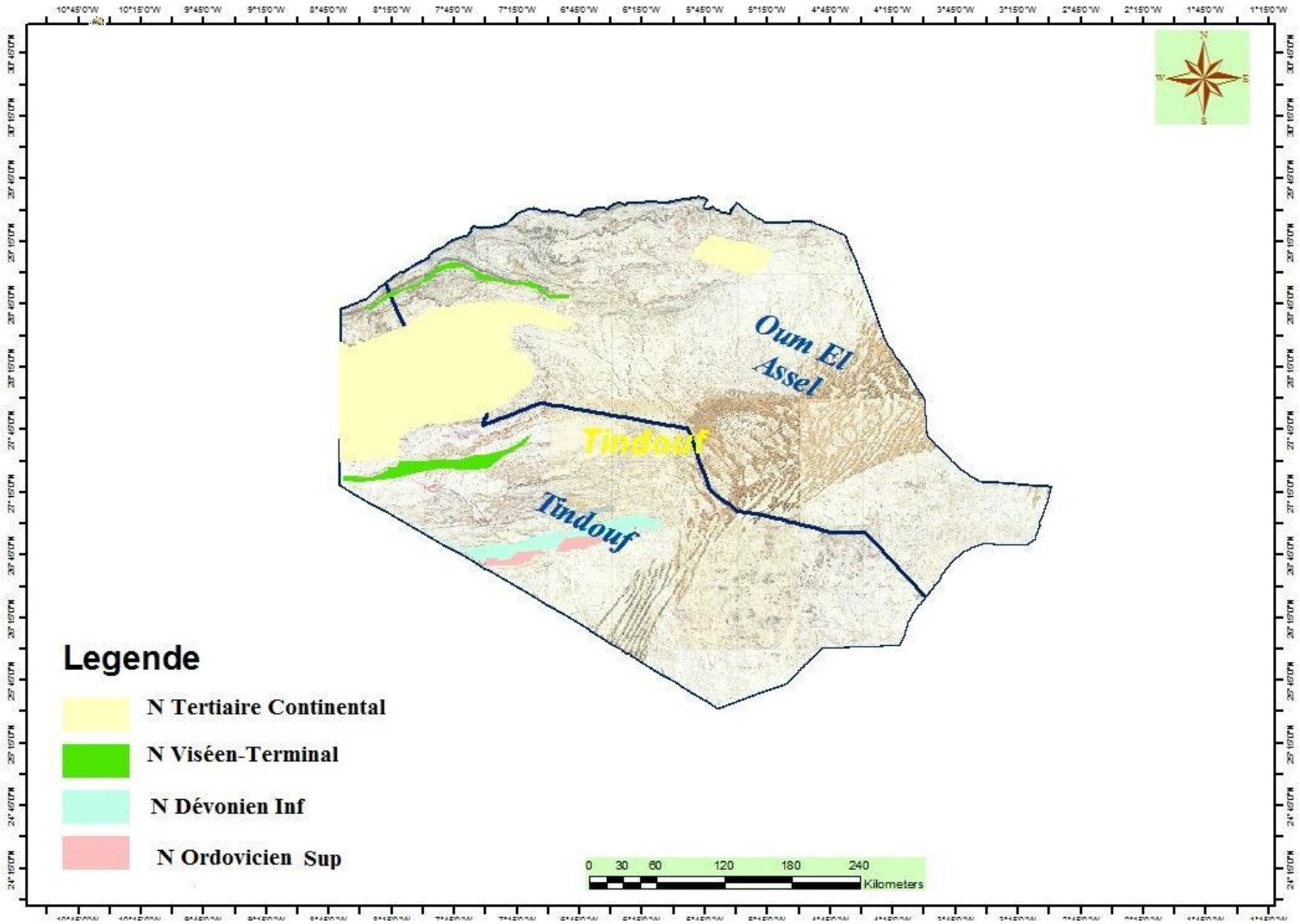


Fig.28 : Carte schématique montrant la répartition des différents aquifères du bassin de Tindouf **(DHW Tindouf 2012 et Yahyaoui A. et al, 2020)**.

II. 3. La nappe des grés du dévonien inferieur

Connu uniquement au sud de la ville de Tindouf, autour de Gara Djebilet où il est très difficile pur les forages d'exploitation d'assurer un débit supérieur à 02 l/s, on distingue deux (02) sous-bassins :

a. Le Sous bassin de Gara Djebilet

Les fondations sédimentaires du sous bassin de Gara Djebilet sont constituées de deux niveaux aquifères, l'aquifère de grès de l'ordovicien supérieur et de grès du dévonien inférieur ; cependant, comme elles se trouvent du côté sud du bassin, les couches acquièrent une pente très douce vers le nord définissant ainsi le sens de l'écoulement souterraine global Sud – Nord.

b. Le Sous bassin de Aouinet – Bel agraà

Les assises du dévonien inférieur ne revêtent aucun intérêt hydrogéologique **(Mimouni. Y et Yahiaoui . A 2020)**.

II. 4. La nappe des calcaires et dolomies du viseén-terminal

Il s'agit de la principale source d'eau potable de la ville de Tindouf. Sa capacité en eau est la plus importante de la région. Les eaux du Viséen terminal arrivent à Hassi Abdallah et semblent être bloquées par une barrière, principalement due à la discontinuité de la fissuration des calcaires et des dolomies. Par conséquent, les eaux ont tendance à remonter en surface, comme en témoigne cette zone humide de Hassi Abdallah et le jaillissement des forages. Une superficie d'environ 600 km2 est couverte par cette nappe, allant des frontières algéro-marocaines jusqu'au champ captant Hassi Abdallah. Elle mesure 60 km de long et 02 à 05 km de large, Les forages ont un débit de 04 à 06 litres par seconde à l'amont et de 17 à 35 litres par seconde à l'aval avec à une minéralisation acceptable (2.4 et 2.6g/l) **(Tableau 21)**.

Tableau 21 : Caractéristiques des forages captant la nappe du Viséen Terminal **(DHW Tindouf, 2025)**

Nom	Année de mise en service	Prof (m)	Débit exploité (l/s)	Diamétre (Métre)	Potabilité	Exploitation	Coordonnées géographique	
							Latitude	Longitude
S.A.3	1969	90	22	13"⅜	Passable	Exploité	08°04'58"	27° 28' 29"
S.A.6	1987	90	22	13"⅜	Passable	En Arret	08°04'57"	27° 28'35"
S.A.7	1997	90	25	13"⅜	Passable	Exploité	08°04'40"	27° 27' 32"
S.A.8	1996	90	17	13"⅜	Passable	Exploité	08°06'44"	27° 28' 40"
S.A.9	1997	99	20	13"⅜	Passable	Exploité	08°06'02"	27° 27' 29"
S A 12	/	85	/	13"⅜	Passable	fermé	08°08'04"	27°28'52"
S A 13	2016	83	35	13"⅜	Passable	Exploité	08°08'10"	27°28'04"
S A 14	2015	90	8	9"⅝	Passable	Fermé	08°06'14"	27°28'14"
S A 15	2015	90	10	9"⅝	Passable	Exploité	08°03'38"	27°28'06"
S A 16	2018	90	20	13"⅜	Passable	Exploité	08°07'34"	27°27'32"
S A 6 bis	2021	110	23	13"⅜	Passable	Exploité	08°05'41"	27°28'57"
S A 17	2023	85	15	13"⅜	Passable	Exploité	08°09'08"	27°26'31"
S A 18	2023	85		13"⅜	Passable	Exploité	08°08'51"	27°27'36"
S A 19	2024	90	8	13"⅜	Passable	Exploité	08°08'50"	27°28'42"
S A 20	2025	96	15	13"⅜	Passable	Exploité	08°09'30"	27°28'31"

Au Nord du bassin, cette région du Viséen terminal est productive sur le pied du versant sud de la chaîne de l'Ouarkziz, depuis la zone de Tafaggoumet-Souiyehat, en passant par les monts de l'oued Oum El-Assel et le sud de Fort Lotfi, jusqu'aux environs de la partie sud-ouest de Hamada Tounassine, avec des débits de 03 à 07 l/s et des minéralisations acceptables.

Actuellement, 09 puits de forage sont exploités à Hassi Abdallah pour l'AEP de la ville de Tindouf, générant 183 litres par seconde, tandis que 04 autres puits sont affectés à la RASD à l'Est de la ville (30 litres par seconde).

Selon (**P.Gevin 1958)**, ce niveau de récif homogène est souvent considéré comme le dernier épisode véritablement marin dans le bassin de Tindouf. En général, le toit se trouve à une profondeur de 70 mètres à Hassi Abdallah.

Les recherches de **(P.Gevin, 1969)** et l'étude des coupes géologiques des forages de Hassi Abdallah révèlent que l'aquifère est dominé par une combinaison de calcaire et d'argiles avec une forte prédominance de gypse. Dans le Viséen Terminal, l'aquifère des calcaires et dolomies repose sur un substratum appelé membre évaporitiques, d'une épaisseur d'environ 70 mètres, composé uniquement de dépôts d'anhydrites. Selon l'étude de **(l'ENHYD, 2006)**, les terrains plus ou moins perméables sont considérés comme la première interface entre les eaux stagnantes rejetées et le sous-sol, afin d'évaluer la capacité des terrains à être vulnérables à l'infiltration.

II. 5. La nappe de la hamada (Tertiaire continentale)

On distingue deux (02) nappes hamadiennes : la nappe de la hamada de Tindouf et celle de Fort Lotfi – Hassi Khebbi :

a. La nappe de la Hamada de Tindouf

Une grande partie du bassin septentrionale est concernée par cette nappe, s'étendant sur une superficie d'environ 23000 km^2. L'âge tertiaire continental, la formation réservoir est principalement composée de sables très fins, généralement teintés d'argiles jaunes verdâtres, qui leur confèrent des caractéristiques statiques et dynamiques faibles **(Azzdine B, et al ; 2010)**. Les concrétions de calcaire gréseux et les lentilles de graviers à éléments moyens sont parfois intercalées, l'ensemble étant recouvert d'une dalle de calcaire silicifié, une caractéristique de la Hamada. À l'heure actuelle, elle est utilisée dans les régions de Hassi Ammar, Oued Zez, Oued M'heiya, Graret El-Harth, Oued Naga et Oum El Assel avec un débit variant de 0.5 à 07 litres par seconde. Les eaux sont minéralisées de 0.9 à 03 g/l. La formation hamadienne a une épaisseur allant de 100 à 120 mètres à l'amont et au centre, et elle diminue vers le sud pour atteindre 10 mètres et même moins au voisinage de la Sebkha de Tindouf et de Hassi Abdallah **(Mimouni. Y et Yahiaoui . A 2020)**. L'écoulement de la nappe est principalement NW-SE, avec une origine dans les localités de Targant, Merkala et Bouagba. Lorsqu'elle atteint l'exutoire, la grande sebkha (les points les plus bas), l'eau de la nappe serait immédiatement très chargée et

soumise à une forte évaporation. Ainsi, l'eau s'évapore et les éléments dissous se déposent, ce qui entraîne la formation de la grande sebkha de Tindouf, qui s'étend sur une distance de 130 km en direction SW-NE. En ce moment, plusieurs dizaines de forages sont utilisés pour drainer la nappe, produisant un volume total d'environ 16000m^3/j **(DHW Tindouf, 2025)**. Il y a 18 forages d'irrigation à Graret El Harth et 13 forages dans le périmètre agricole Oued Mehiya (**Fig. 29)**. L'aquifère a été rechargé au Néolithique, la période la plus pluvieuse de l'histoire de la Terre. Seule l'infiltration des eaux de pluie est nécessaire pour assurer l'alimentation, même si elle est très faible et ne dépasse pas 5% des niveaux de pluie tombés. Sur le plan hydrochimique, les eaux présentent des propriétés telles que le chloruré sodique, le sulfate magnésien, le sulfate calcique et le sulfate sodique et le chloruré calcique. Ce n'est qu'à la dissolution de la fraction argileuse qui imprègne les sables fins dans lesquels circulent les eaux que peut être attribué le caractère sulfaté. Le taux de résidu sec oscille entre 896 mg/l et 5460 mg/l **(DHW, ANRH 2025)**.

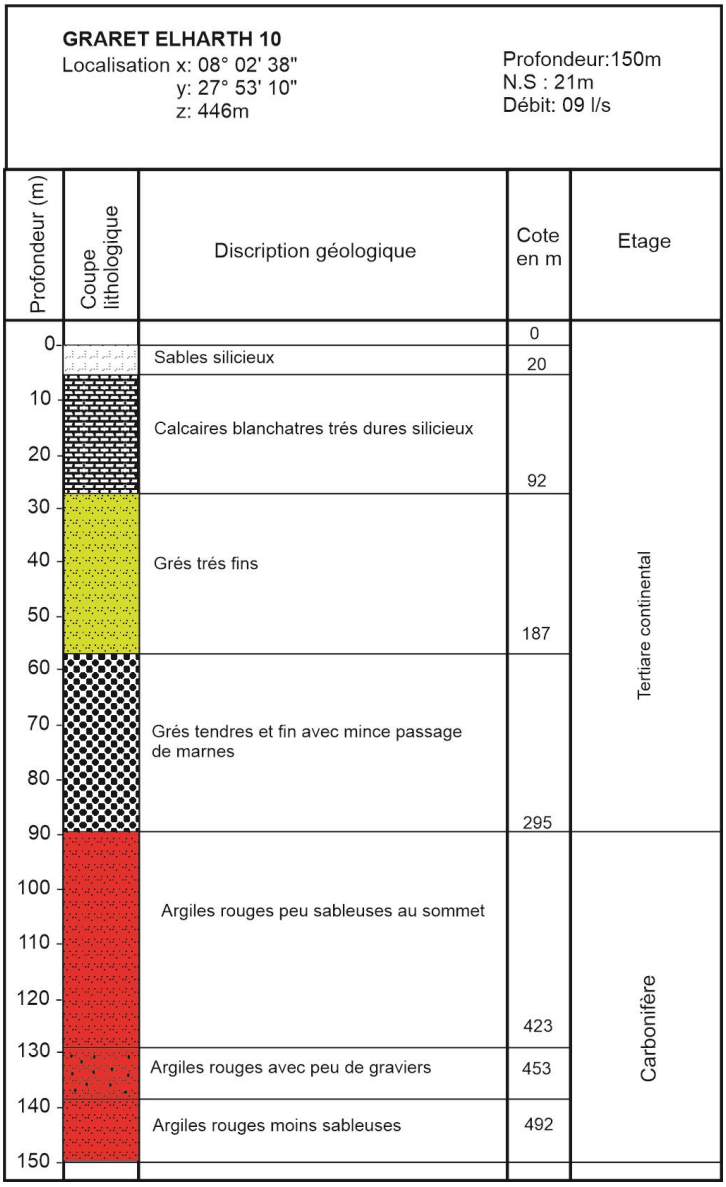


Fig. 29 : Log du forage HT10 dans le périmètre Griere El Harth **(DHW TINDOUF, 2025)**.

b. Nappe de Fort Lotfi – Hassi Khebbi

Quant à Hassi Khebbi et à Fort Lotfi, Les habitants sont également alimentés en eau potable grâce aux eaux de la nappe du tertiaire continental, qui est liée au sous bassin de Hassi Khebbi. La formation réservoir présente une lithologie pratiquement identique à celle de l'aquifère de la hamada de Tindouf, qui est détritique et hétérogène. Selon l'analyse des images de Google Earth, des cartes topographiques au 1/200000ème et des données géologiques provenant de forages existants, il est clairement évident qu'il y a une ligne de partage des eaux superficielles qui devait probablement correspondre à une ligne de partage des eaux souterraines. Par conséquent, nous pouvons estimer une superficie de la nappe d'environ 4000 km^2, avec une épaisseur moyenne de l'aquifère d'environ 70 mètres. Située parallèlement à la RN50 depuis la descente de Khorb El Ethel en passant par le branchement de Fort Lotfi jusqu'à Oued Khebbi, la limite sud de la nappe est marquée par la présence d'une faille SW-NE qui amène les formations dévoniennes à la surface (l'apparition de grès lumachelliques du dévonien inférieur avec un pendage sub-vertical à 01Km au sud du TFC 1 Tinfouchy) (**Fig. 30)**.

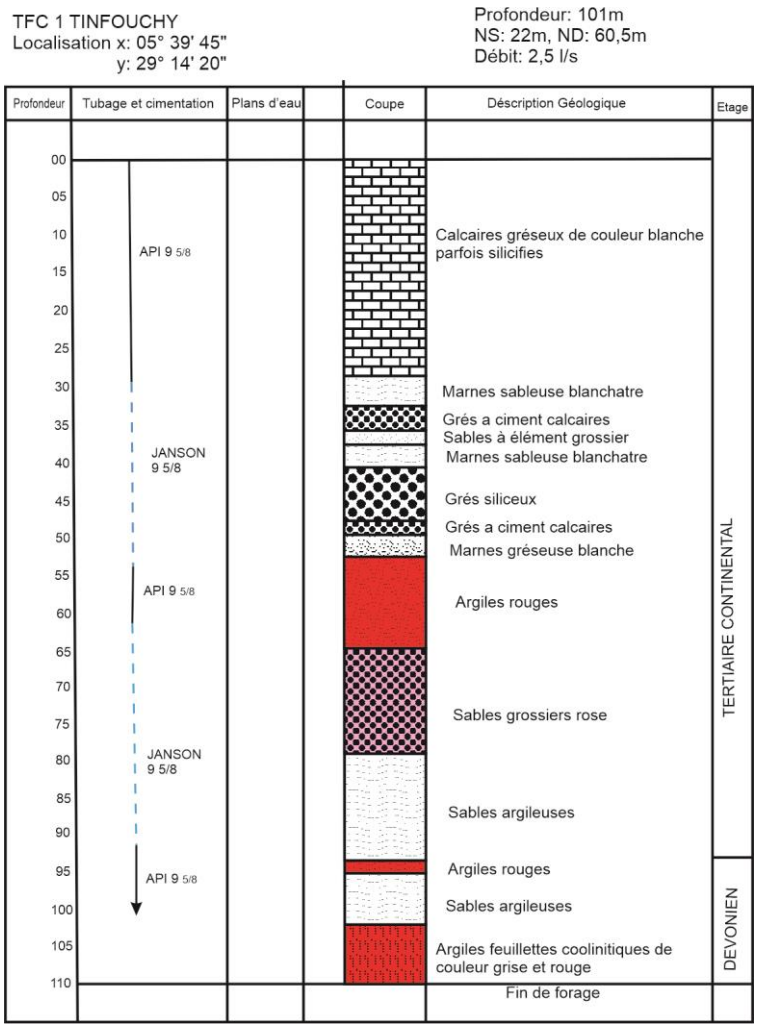


Fig. 30 : Log. du forage TFC 1 TIFOUCHY **(DHW TINDOUF)**.

Le tertiaire dans la région proche de Hassi Khebbi n'est plus détritique, mais plutôt carbonaté, comme en témoigne la coupe du forage Hassi Khebbi base. Actuellement, quatre (04) forages sont utilisés pour l'AEP de Hassi Khebbi (500 m3/jour). Sept (07) forages sont effectués pour l'alimentation en eau potable des unités militaires de la zone de Fort Lotfi (300m^3/j). La teneur en minéraux des eaux varie de 0.9 à 03 g/l.

III. Contexte hydrogéologique local et Ressources en eau souterraines de la zone d'étude

III. 1. Hydrogéologique de secteur d'étude

La localité de Tinfouchy – Hassi khebbi est alimentée par des forages forés dans la région définie par l'axe Tinfouchy-Hassi Khebi tels les forages BAL SIT-1, NB 08, NB 09, NB 02bis, NB 03bis, Hdab lforga, H.K 02, H.K 03, H.K 05 et LFI-122 **(Fig. 31)**. Les profondeurs respectives de ces forages sont de 83 m et 150 m de débit varié entre de 2 l/s à 8 l/s **(DHW.TINDOUF, 2024)**. Les fiches techniques **(DHW de Tindouf et ANRH)** montrent que celui-ci est composé essentiellement d'un faciès carbonaté au sommet et des grès et des argiles par fois sableuses à la base. Le tertiaire continental est représenté surtout par des calcaires siliceux et crayeux, durs au sommet devenant tendres et parfois fissurés. Ces calcaires passent à des calcaires argileux du gypse, des grès et des argiles à la base (LTS-V, LFI-122 et de Tinfouchy BAL SIT-1) d'une épaisseur moyenne allant jusqu'à 114m à LTS-V. L' épaisseur captée appartient à un ensemble hétérogène.

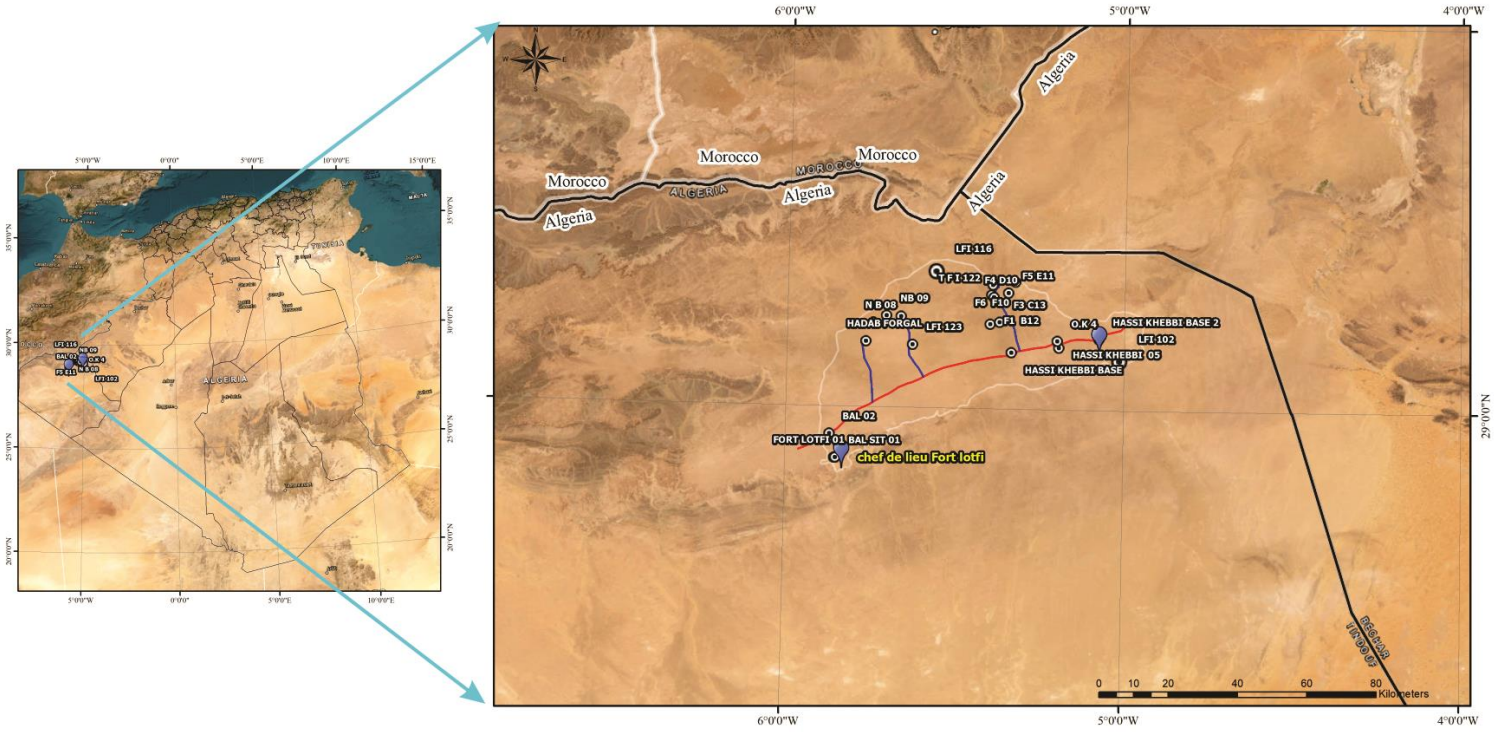


Fig. 31 : Implantation des forages dans l'aquifère Fort lotfi - Hassi Khebbi **(image Google Earth)**.

III. 2. Ressources en eau souterraines

a. Répartition des points d'eau :

Les forages forés dans la zone définie par l'axe Fort Loti-Hassi Khebbi, tels que les forages BAL SIT-1, NB 08, NB 09, NB 02bis, NB 03bis, Hdab lforga et NB 06, alimentent la localité de Tinfouchy (Fort lotfi) par système d AEP récent **(Fig. 32)**. Les profondeurs de ces forages sont respectivement de 83 m et 170 m. Sept (07) forages ont été effectués dans la région de HASSI KHEBBI (H.K 02, H.K 03, H.K 05, H.K 04, H.K base et LFI-122), passant par les grès du Tertiaire continental (Hamada) et du Dévonien inférieur, avec une profondeur allant de 73 à 180 mètres. Le niveau statique varie de 26 à 60 mètres, tandis que le débit varie de 1 à 6,5 litres par seconde **(ANRH, 2011)**.

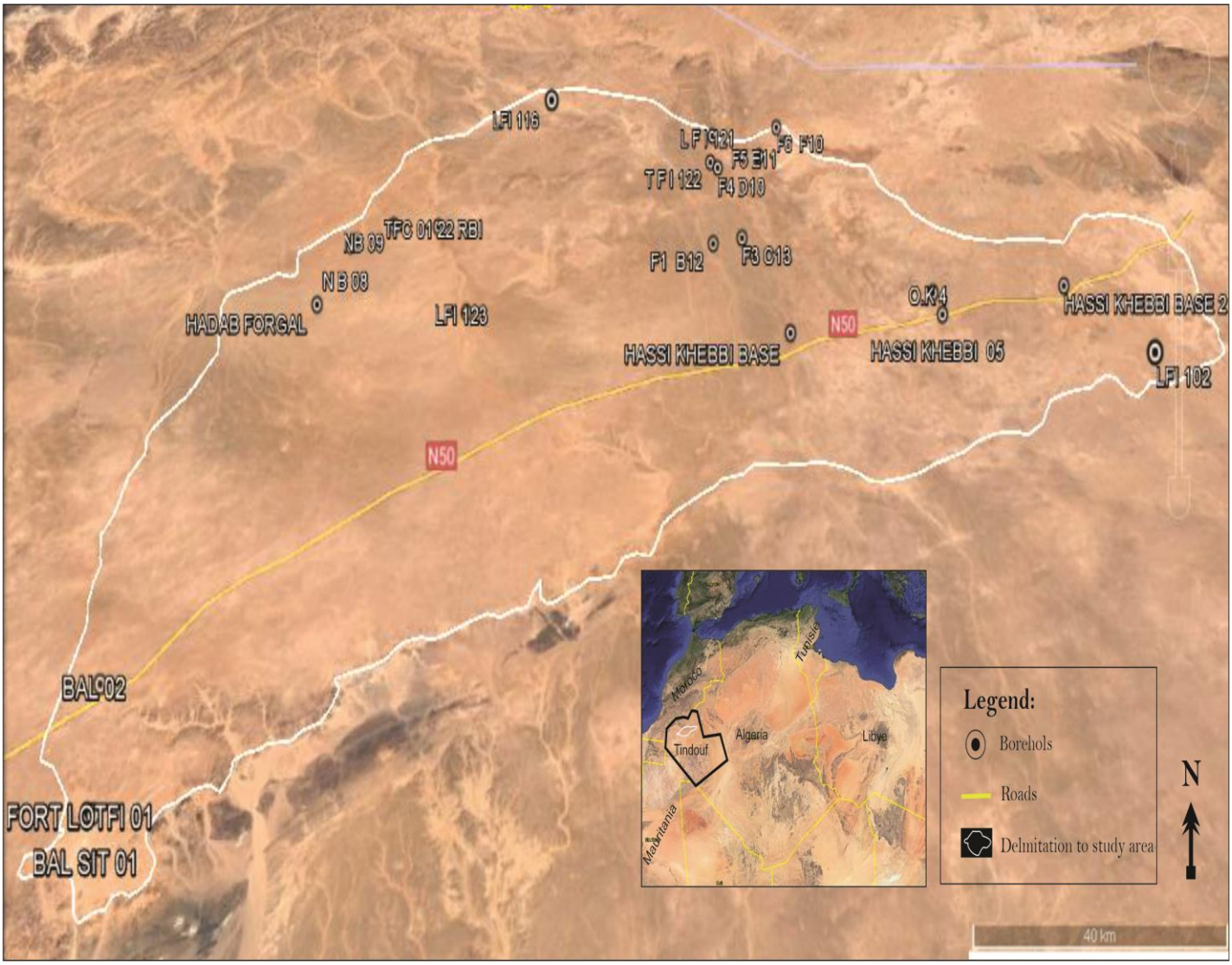


Fig. 32 : Délimitation et localisation des forages **(image Google Earth)**.

Les forages forés dans la zone définie par l'axe Fort Loti-Hassi Khebbi, tels que les forages BAL SIT-1, NB 08, NB 09, NB 02bis, NB 03bis, Hdab lforga et NB 06, alimentent la localité de Tinfouchy (Fort lotfi) par système d AEP récent. Les profondeurs de ces forages sont respectivement de 83 m et 170 m. Sept (07) forages ont été effectués dans la région de HASSI KHEBBI (H.K 02, H.K 03, H.K 05, H.K 04, H.K base et LFI-122), passant par les grès du Tertiaire continental (Hamada) et du Dévonien inférieur, avec une profondeur allant de 73 à 180 mètres. Le niveau statique varie de 26 à 60 mètres, tandis que le débit varie de 1 à 6,5 litres par seconde **(ANRH, 2011)**.

Dans la région de Fort Lotfi, une nappe continentale tertiaire a été découverte par dix-sept (17) forages, avec une profondeur de 100 à 170 mètres, un niveau statique de 24 à 40 mètres et un débit d'environ 2 à 8 litres par seconde **(DHW.TINDOUF, 2025)**.

Les informations essentielles concernant ces forages sont présentées dans le tableau 22.

Tableau 22 : Tableau Descriptif des forages de la région Fort Lotfi **(DHW Tindouf, 2025)**.

Nom de forage	Année de Réalisation	Coordonnées		Nappe	Pr. (m)	N.S (m)	N.D (m)	Débit (l/s)	Observation
		X	Y						
H'dab-Elforga	1978	5°45'53''	29°10'24''	T.C	120	/	/	08	En service
Port PC	/	5°51'11''	29°52'08''	T.C	40	/	/	03	En service
Port Sonalgaze	/	5°50'57''	29°52'06''	T.C	60	/	/	1,5	En service
CDC	/	5°50'30''	29°06'00''	T.C	/	/	/	1,5	En service
TFC01 22 RBI	2003	5°39'45''	29°14'20''	T.C	101	22	60,5	08	En service
N.B 01	2008	5°08'07''	29°14'04''	T.C	150,5	/	/	08	Fermé
N.B 02	2008	5°52'56''	29°13'65''	T.C	150	/	/	08	En panne
N.B 03	2008	5°51'78''	29°12'15''	T.C	140	/	/	08	En panne
N.B 04	2008	5°49'88''	29°12'45''	T.C	140	/	/	07	Fermé
N.B 05	2008	5°44'16''	29°14'93''	T.C	140	/	/	06	Fermé
N.B 06	2008	5°39'58''	29°13'68''	T.C	140	/	/	08	Fermé
N.B 08	2014	5°44'39''	29°13'20''	T.C	130	24,7	49,6	02	En panne
N.B 09	2014	5°42'20''	29°14'26''	T.C	120	25,6	42,2	02	Fermé
TFC01 bis	2025	5°40'12,30''	29°14' 24,35''	T.C	120	24	78	04	Fermé
N.B 02 bis	2025	5°52'27,61''	29°13' 36,25''	T.C	130	24	86	06	En service
N.B 03 bis	2025	5°52'45,84''	29°14' 04,07''	T.C	160	26	92	08	En service
N.B 08 bis	2025	5°40'12,30''	29°14' 24,35''	T.C	125	24	90	04	En service

b. Approvisionnement en eau potable

Après l'année 2021 les unités militaires reçoivent leur eau potable grâce à des camions-citernes mobiles qui effectuent des Allers Retours entre leurs sites et les forages TFC 01 et H'deb el forga. Mais actuellement

l'alimentation en eau potable avec un système d'AEP composé par de deux châteaux et deux réservoirs avec réseau d'adduction et distribution qui réalisé par les service de l'Hydraulique de Tindouf .

À noter que les forages (Fort-pc, Fort-sonelgaz et CDC) sont des sources secondaires, avec un faible débit. Le tableau ci-dessous montre la consommation quotidienne d'eau potable pour chaque Agglomération (**Tableau 23)**.

Tableau 23 : Consommation journalières par Agglomération de la région Fort Lotfi.

Nom d'Agglomération	Consommation (l/j)	Nom d'Agglomération	Consommation (l/j)
PC	42000	11eme	20000
SIM	10000	GENIE	12000
Aeroport	21000	49 BIMO	15000
P 187 (I)	10000	FAGOT	15000
41 RMSA	15000	17 BCC	20000
187 DCA	30000	R 159	15000
B 187 (II)	5000	TRANSMISSION	13000
CDC	20000	GAB	5000
APRO MATRIELLE	10000	PC 32	28000
INTANDACE	10000	G 129	10000
DEPOT	5000	RB 22	30000
TOTAL		361000 (l/j)	

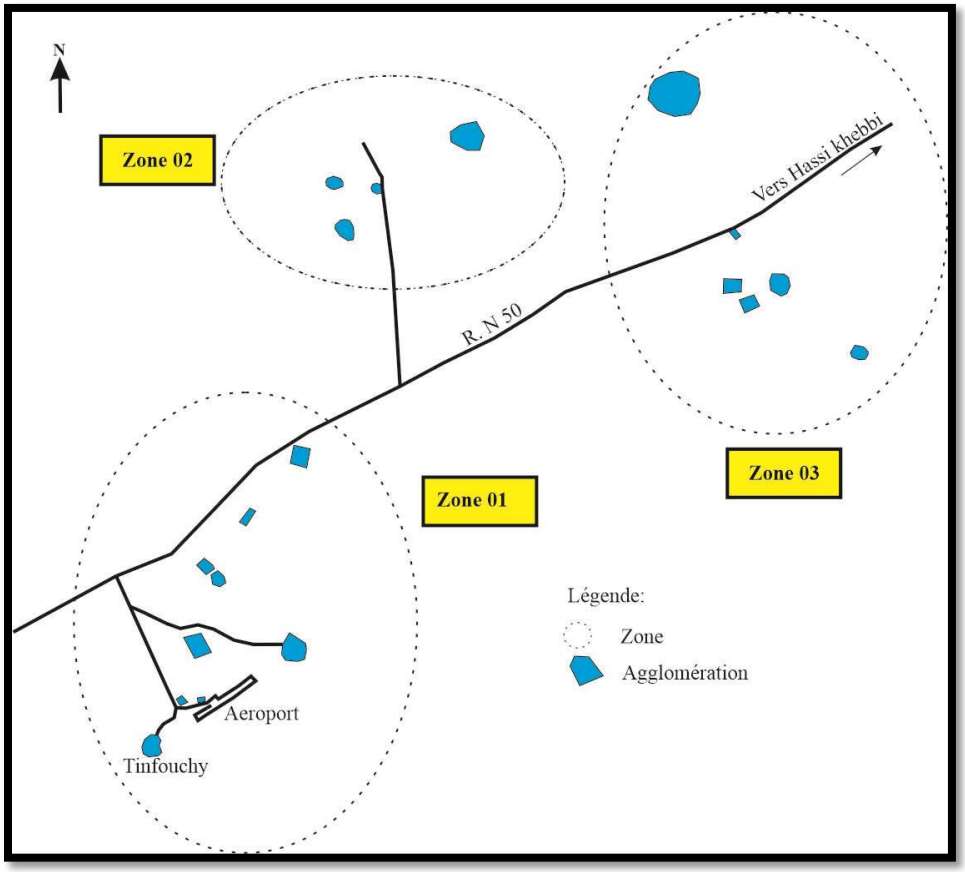


Fig. 33 : Situation des Agglomérations de la région Fort Lotfi.

La consommation quotidienne d'eau potable a été évaluée séparément pour chaque Agglomération, afin d'estimer les besoins actuels et de prévoir les besoins futurs en fonction de l'évolution démographique et des activités logistiques. Cette analyse permet d'anticiper les éventuelles contraintes d'approvisionnement et d'adapter les infrastructures hydrauliques. Les tableaux suivants illustrent la répartition de la consommation quotidienne d'eau potable au niveau des différentes agglomérations et zones étudiées **(Tab. 24, 25, 26)**.

Tableau 24 : Besoins journalières par Agglomération (zone 01)

Nom d'Agglomération	Consommation actuelle (m^3/j)	Besoins futurs (m^3/j)
PC	42	84
SIM	10	20
AEROPORT	21	42
B187 (I)	10	20
41 RMSA	15	30
187 DCA	30	60
B187 (II)	5	10
CDC	20	40
APRO MATERIELLE	10	20
INTENDACE	10	20
DEPOT	5	10
11eme MATERIELLE	20	40
TOTAL	198	396

Tableau 25 : Besoins journalières par Agglomération (zone 02)

Nombre	Nom d'Agglomération	Consommation actuelle (m^3/j)	Besoins futurs (m^3/j)
01	GENIE	12	24
02	49 BIMO	15	30
03	FAGOT	15	30
04	17 BCC	20	40
Total		62	124

Tableau 26 : Besoins journalières par Agglomération (zone 03)

Nombre	Nom d'Agglomération	Consommation actuelle (m^3/j)	Besoins futurs (m^3/j)
01	R 159	15	30
02	TRANSMISSION	13	26
03	GAB	5	10
04	PC 32	28	56
05	G 129	10	20
06	RB 22	30	60
Total		101	202

Le débit maximal journalier ($Q_{max.j}$) représente la quantité d'eau maximale consommée au cours d'une journée donnée. Il est estimé à partir du débit moyen journalier ($Q_{moy.j}$) en tenant compte d'un coefficient journalier de pointe (Kj), qui traduit les variations de la consommation en fonction des besoins quotidiens.

La relation utilisée est la suivante : $\mathbf{Q_{max.j}=K_j \times Q_{moy.j}}$

La valeur du coefficient Kj varie généralement entre 1,1 et 1,3, selon la nature de la zone étudiée et le comportement de consommation.Dans le cadre de cette étude, une valeur moyenne de Kj = 1,2 a été adoptée pour le calcul du débit maximal journalier, ce qui permet de prendre en compte les fluctuations de demande sans surestimer les besoins réels.

Débit de pointe :

$$\mathbf{Q_{max.j}=Kj \times Q_{moy.j}}$$

où :

- $Q_{max.j}$ = débit maximal journalier (m^3/j),
- $Q_{moy.j}$ = débit moyen journalier (m^3/j),
- Kj = coefficient journalier de pointe (entre 1,1 et 1,3).
- Tu as indiqué que : Kj=1,2

c. Les ouvrages de stockage

Les ouvrages de stockage sont constitués de deux châteaux d'eau d'une capacité unitaire de 500 m^3, assurant la régulation et la distribution du réseau. Chaque ouvrage est caractérisé par sa hauteur et sa cote altimétrique, permettant de maintenir une pression suffisante dans le système d'alimentation **(Tab. 27)**.

Tableau 27 : Les ouvrages de stockages.

Nom de l'ouvrage	Zone alimentée	Capacité (m3)	Hauteur (m)	Cote (m)
Château d'eau 01	Zone 03	500	20	624
Château d'eau 02	Zone 01+ Zone 02	500	25	624

IV. Caractéristiques hydrodynamiques

IV. 1. Cartographie piézométrique

Pour notre zone la carte piézométrie a été générée en fonction des points d'eau existante dans la zone d'étude.

La définition des écoulements souterrains et l'identification des zones d'alimentation et de décharge sont essentiels pour étudier le fonctionnement des aquifères. Ainsi, dans le cadre de ce travail, nous avons regroupé tous les relevés piézométriques réalisés en mai 2018 (**Tab.28**) sur la plupart des points d'eau du système aquifère. Bien qu'elles soient insuffisantes, ces informations permettent tout de même de tracer les principaux

contours des écoulements souterrains et surtout d'orienter les résultats de cette étude. Afin de créer la carte piézométrique, il est nécessaire de connaître les niveaux statiques de chaque élément et de calculer les niveaux piézométriques en utilisant la relation suivante :

Npz = Zi - Nsi (m)

Npz = Niveau piézométrique en m ; Zi = altitude (MNT) en m et Nsi = Niveau statique en m.

Tableau 28 : Les forages concernant la carte piézométrique dans la région Fort Lotfi- Hassi Khebbi.

N°	Forage	X	Y	Z	N.S	Z - N.S
1	TFC 01 22 RBI	241222.15	3237391.16	617,00	22,00	595,00
2	Bal Sit 01 Sonelgaz	221195.59	3159782.57	586,00	35,90	549.10
3	Fort Lotfi 01	221700.80	3196806.90	570	10,00	560
4	Hassi khebbi 05	286734.98	3228194.22	335,00	54,00	281
5	Hassi khebbi (base)	273029.17	3226856.49	335,00	54,10	280.90
6	Hassi khebbi base 02	298346.26	3230570.36	549	49,4	499.60
7	O.K 4	286338.88	3230141.95	557	52.5	504.5
8	Hadeb El Forga1	231111.57	3230353.59	549	23,00	526
9	LFI 116	251639.61	3250406.55	626	23.70	602.30
10	L.F.I.121	267829.86	3246366.99	554,00	20,00	534
11	L.F.I.122	267392.21	3243449.58	554,00	26,30	527.70
12	F1/B12	266951.54	3235110.81	579,00	64,27	514.73
13	F2/C8	261754.88	3132769.60	435	31,62	403.38
14	F3/C13	269690.70	3235609.60	579	65,13	513.87
15	F4/D10	268055.02	3242850.77	589	39,81	549.19
16	L F I 102	304291.32	3224246.29	543	50.30	492.7

Utilisez le logiciel Surfer 25 afin de réaliser des cartes piézométriques. Une sonde piézométrique a été utilisée pour évaluer le niveau piézométrique de la nappe du Fort Lotfi -Hassi Khebi. Ces mesures ont été réalisées en utilisant les coordonnées des forages fournies par l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH). La carte piézométrique **(Fig. 34)** constitue une synthèse essentielle dans le domaine de l'étude hydrogéologique et son interprétation permet d'étudier le comportement hydrodynamique de la nappe. À partir des mesures des niveaux d'eau dans les différents points d'eau de Fort Lotfi -Hassi khebbi, l'étude piézométrique révèle que l'écoulement des eaux souterraines se déroule dans deux directions : Nord-Ouest vers Sud Est et Nord Est vers Sud-Ouest. Ce flux est probablement influencé par la configuration structurale et topographique régionale.

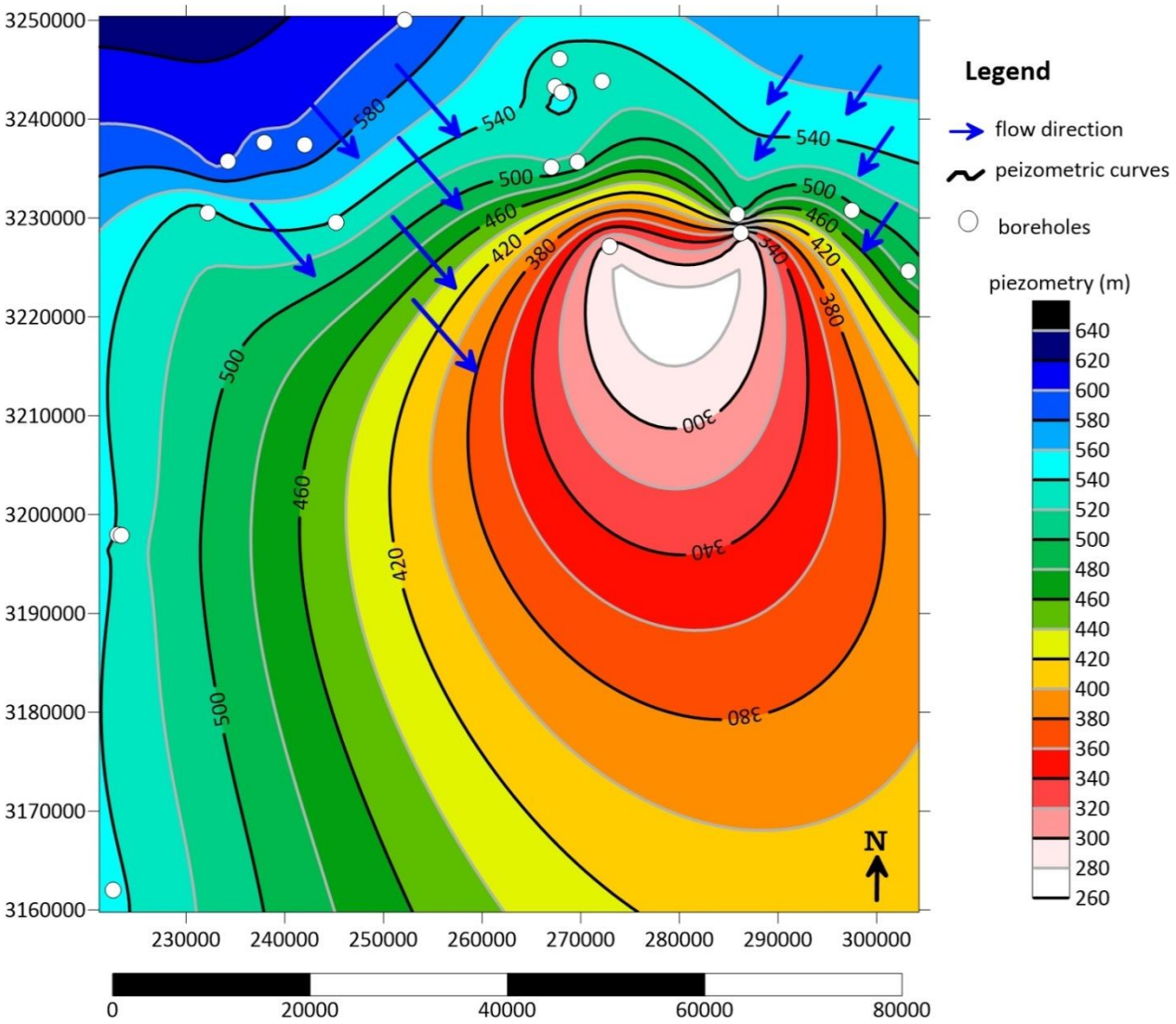


Fig. 34 : Carte piézométrique de la zone Fort Lotfi – Hassi Khebbi.

La carte piézométrique élaborée à partir des points d'eau existants illustre la répartition spatiale des niveaux piézométriques dans la zone d'étude. Ces niveaux, exprimés en mètres, varient entre 300 m et 626 m et sont regroupés en plusieurs classes isopiézométriques.

On y observe plusieurs forages de référence (BAL SIT-1, NB 08, NB 09, Hdab Lforga, NB 06, H.K 02, H.K 03, H.K 05, LFI-122, etc.), judicieusement répartis dans les secteurs central et oriental. Ces points de mesure ont permis de définir les niveaux piézométriques et de mettre en évidence la tendance générale du gradient hydraulique.

Le réseau hydrographique, bien que faiblement développé, présente une orientation partiellement concordante avec celle des écoulements souterrains, révélant une certaine correspondance entre les écoulements de surface et ceux des nappes.

La distribution spatiale des niveaux piézométriques ainsi que la direction des flux traduisent l'existence d'un gradient hydraulique régional, conditionné par la topographie, la nature des unités géologiques et probablement par des discontinuités structurales.

Les observations montrent également une dégradation progressive de la qualité des eaux souterraines, liée à la concentration accrue en sels dissous et à la minéralisation, conséquence de la diminution des volumes exploitables et de l'intrusion éventuelle d'eaux plus profondes.

Ainsi, la surexploitation constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour la durabilité des ressources hydriques. Sans une gestion rationnelle et une planification basée sur des études hydrogéologiques et géophysiques fiables, les nappes risquent de subir des impacts irréversibles, compromettant à la fois l'approvisionnement en eau et les perspectives de développement socio-économique de la région.

IV. 2. Calcul du gradient Hydraulique

a. Formule générale

Le gradient hydraulique iii se calcule ainsi :

$$i=\Delta h/\Delta Li$$

- Δh: différence de charge hydraulique (ou niveau piézométrique) entre deux points, exprimée en mètres (m).
- ΔL: distance horizontale entre ces deux points, exprimée en mètres (m).

b. Exemple de calculer :

- Niveau piézométrique au forage Hadeb El Forga1 : 526 m
- Niveau piézométrique au forage Hassi Khebbi 05 : 281 m
- Distance horizontale entre Hadeb El Forga1 et Hassi Khebbi 05 : 56 km (56000 m)

=> Δh =526-281=245m et Δl = 56000 m.

i = Δh/ΔL i= 0,004

Le gradient hydraulique est de 0,004 (0,4 %), ce qui indique que l'eau s'écoule de Hadeb El Forga1 vers forage Hassi Khebbi 05 avec une pente trés douce **(Fig. 35)**.

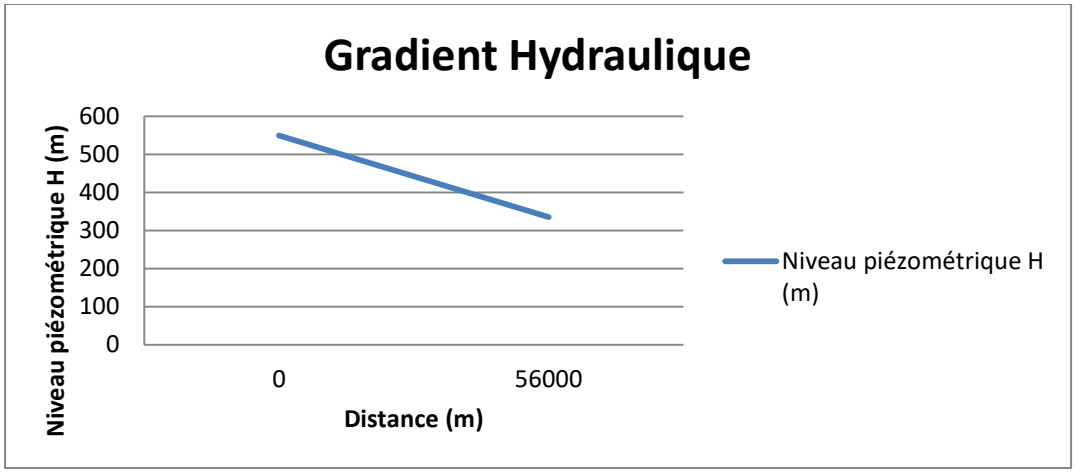


Fig. 35 : Graphique de gradient hydraulique entre les deux forages Hdeb Elforga 1 et Hassi Khebbi 05.

IV. 3. Les résultats de calcul des gradients hydrauliques

Les courbes isopièzes sont espacées dans la partie Sud, Ouest et Est avec un gradient hydraulique très faible indiquant un écoulement lent dû à la topographie de la région.

La morphologie piézométrique se caractérise par la présence d'un cône de dépression au niveau de cette zone, où les lignes de courants convergent. On observe également que les courbes piézométriques (isopièzes) sont très serrées dans la partie Nord et Nord-Est, ce qui témoigne d'un fort gradient hydraulique dû à la topographie de la région et à la prédominance des formations argileuses dans la partie nord. L'écoulement dans cette zone se fait du Nord-Ouest et du Nord-Est.

Au niveau de cet aquifère, les niveaux piézométriques varient entre de 300 m à 626 m. Les faibles valeurs sont enregistrées au centre de la dépression piézométrique.

V. Hydrochimique

V. 1. Etude Hydrochimie et type d'eau

Les données utilisées sont principalement ceux recueillies au niveau des forages hydrauliques de DHW Tindouf et l'ANRH. Les analyses ont été réalisées en laboratoire en utilisant des méthodes conventionnelles (**Rodier, 1984**). Le tableau 29 présente un résumé des résultats des analyses des paramètres physico-chimiques des eaux mesurés pour les seize (16) échantillons dans la région étudiée. La nappe Fort Lotfi-Hassi khebbi présente un pH compris entre 6,07 et 7,51.

Tableau 29 : Statistiques descriptives des paramètres de qualité de l'eau. Concentration en mg/l.

	PH	RS	Ca+2	Mg+2	Na+	K+	Cl-	SO4-2	No3-	HCO3-
Moyenne	7,26	2282,93	116,46	110,53	192	8,27	296,68	445,33	67	275,06
Max.	7,51	3020	169	180	418	13	480	482	120	372
Min.	6,07	1740	58	71	90	3,5	127,08	301	32	360
N-OMS	6,5 - 8	1000	200	150	200	12	250	250	50	250

L'analyse des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la région Fort Lotfi - Hassi khebbi avec les normes de potabilité de l'Organisation Mondiale de la Santé **(Tab.29)** a mis en évidence que l'eau de cette région n'était pas apte à la consommation. Les normes recommandées par l'Organisation mondiale de la santé (**OMS, 2004**) sont presque toujours en deçà.

- **Faciès chimique de l'eau région Fort Lotfi -Hassi Khebbi**

Les études hydro chimiques et les diagrammes d'eau des points d'eau dans la région Fort Lotfi -Hassi Khebbi ont été réalisés en utilisant le logiciel Diagrams beta version 8.0. Après le prélèvement sur site, les paramètres physico-chimiques (pH, température et conductivité) ont été mesurés directement à l'aide d'un multi-paramètre portable. Une fois que les échantillons ont été filtrés et acidifiés, ils ont été collectés dans des flacons en polyéthylène afin d'être analysés en laboratoire par **ANRH** et **ADE. TINDOUF (2019)**.

Les résultats de l'analyse de l'eau de l'aquifère de Fort Lotfi -Hassi kebbi sur la triangulation de **Piper (Fig. 36)** soulignent l'influence des faciès pétrographiques sur la qualité de l'eau et permettent également d'estimer les pourcentages d'éléments chimiques et leur classification.

Sur le diagramme de Piper, nous avons constaté que les eaux présentent des formes similaires sur les pôles :

Faciès Chloruré et sulfaté calcique et magnésien, Faciès Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique et Sulfaté sodique sont situées au centre et à l'Ouest de la région étudier et surtout dans le champ captant Hassi khebbi **(Fig. 37**).

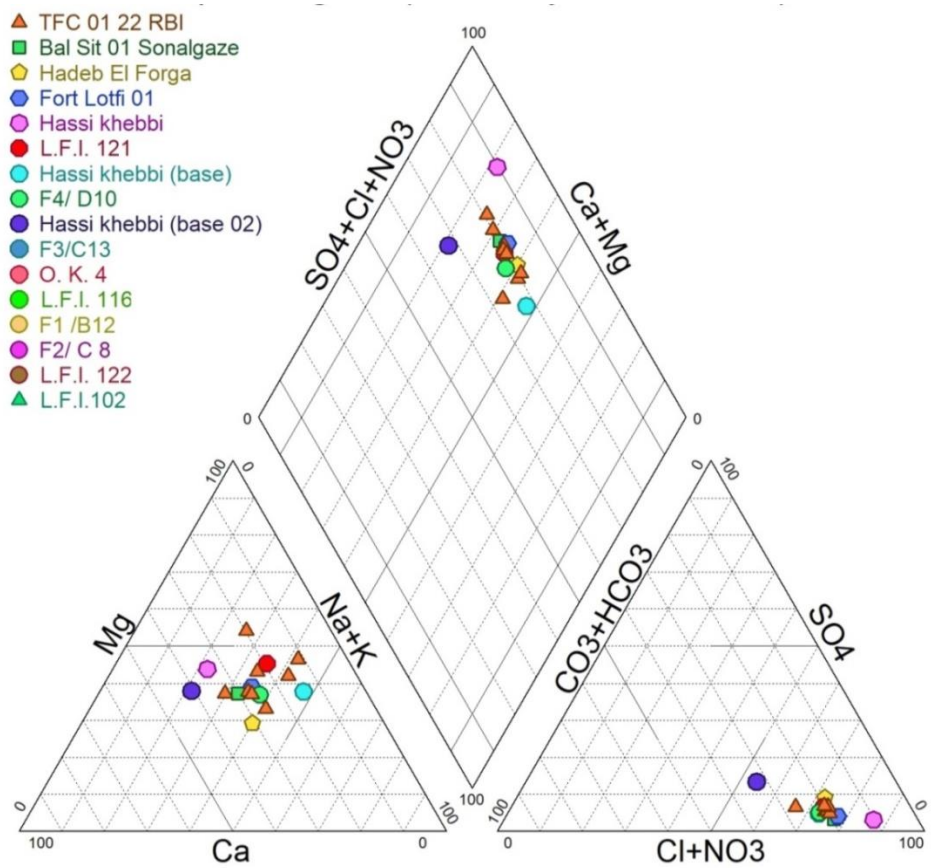


Fig. 36 : Diagramme de piper des eaux région Fort Lotfi-Hassi Khebbi.

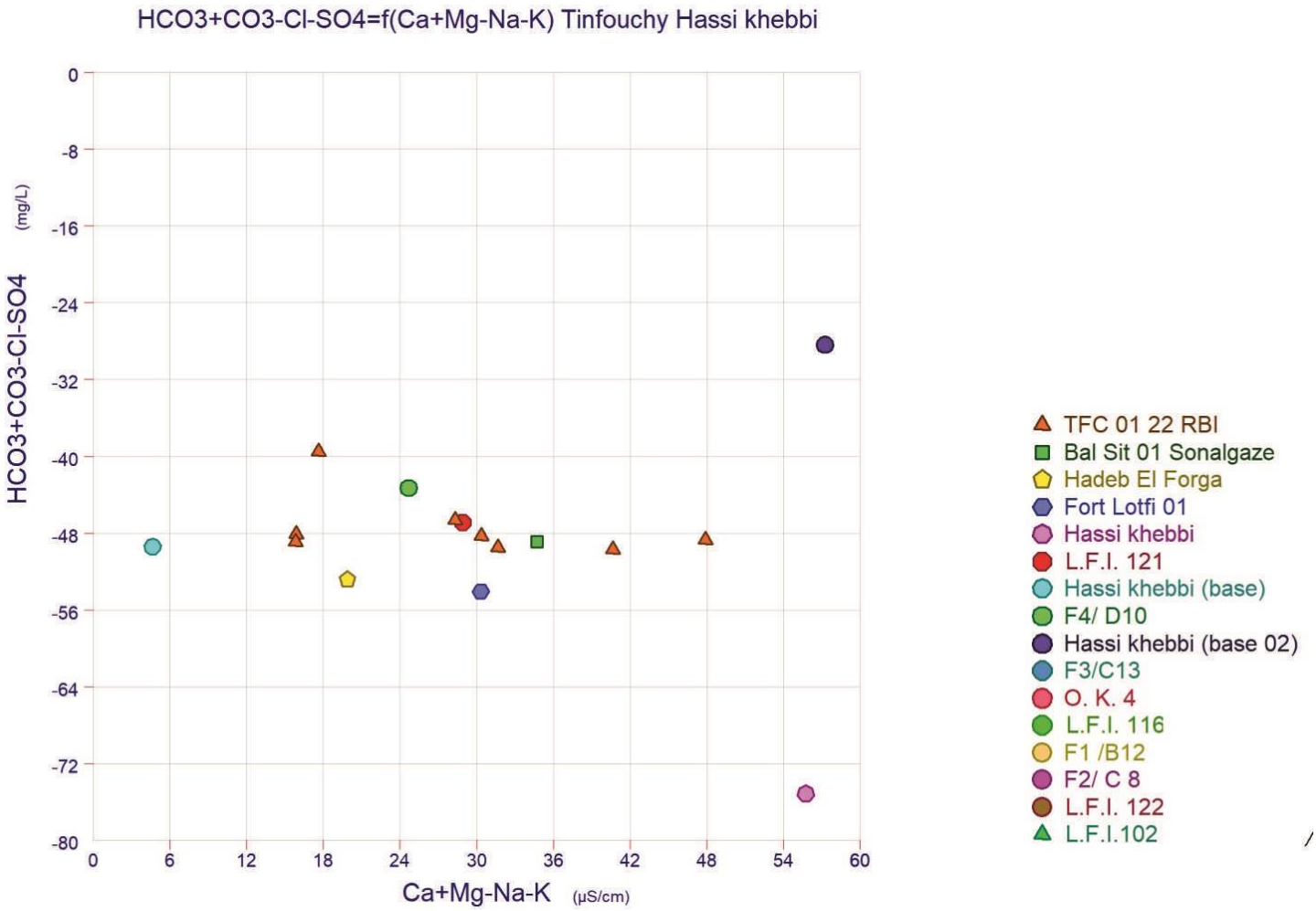


Fig. 37 : Diagramme de Durov des eaux souterraines de la région Tinfouchy – Hassi Khebbi

Ce n'est qu'à la dissolution de la fraction argileuse qui imprègne les sables fins dans lesquels circulent les eaux que peut être attribué le caractère sulfaté. La recharge de l'aquifère s'est produite au Néolithique, la période la plus pluvieuse de l'histoire de la Terre. Seules les eaux de pluie sont utilisées pour l'alimentation **(yahyaoui A. 2020**).

- **Indice chimique de la qualité de l'eau potable**

La méthode de l'indice de qualité des eaux souterraines (GWQI) reflète l'influence complexe de divers paramètres de qualité de l'eau sur sa potabilité. L'indice est calculé à l'aide de l'équation suivante selon les normes de l'OMS :

$$GWQI = \sum SI_i = \sum W_i q_i = \sum \left[\left(\frac{w_i}{\sum_n^{i=1} w_i} \right) * \left(\frac{C_i}{S_i} * 100 \right) \right]$$

Avec :

Si: valeur limite de chaque paramètre fixé par les normes OMS,

SIi : le sous-indice du paramètre i,

wi : le poids de chaque paramètres selon son importance relative dans la qualité des eaux de boisson,

Wi : le poids relatif,

Ci : concentration de chaque paramètre,

qi : notation de qualité pour chaque paramètres.

Les valeurs de l'indice GWQI pour la région d'étude sont comprises entre 132,88 à 238,53. Les résultats montrent que 81,25 % des échantillons prélevés à partir des forages captant l'aquifère étudié appartiennent à la catégorie qualité Médiocre **(Tableau 30)**. 18,75% des échantillons sont classés dans la catégorie très Médiocre.

Tableau 30 : Classification de la qualité des eaux souterraines basée sur l'indice GWQI.

Classes de l'indice GWQI	**Nombres d'échantillon**	**Pourcentage (%)**
Excellente (<50)	0	0 %
Bonne (50 – 100)	0	0 %
Médiocre (100 – 200)	13	81,25%
Très Médiocre (200 – 300)	3	18,75%
Non potable (>300)	0	0 %

La distribution spatiale de l'indice GWQI **(Fig. 38)** montre que les eaux appartenant à la catégorie qualité médiocre sont majoritaires et se localisent à l'Est et à l'ouest de la région Fort Lotfi – Hassi Khebbi. Les eaux d'excellente et bonne qualité sont absentes. Par contre la qualité des eaux très médiocres situées dans le centre et surtout dans la ville Hassi Khebbi. On observe également des eaux de médiocre qualité dans la partie sud. Une salinité élevée et la minéralisation des eaux varie entre 0,9 et 03 g/l.

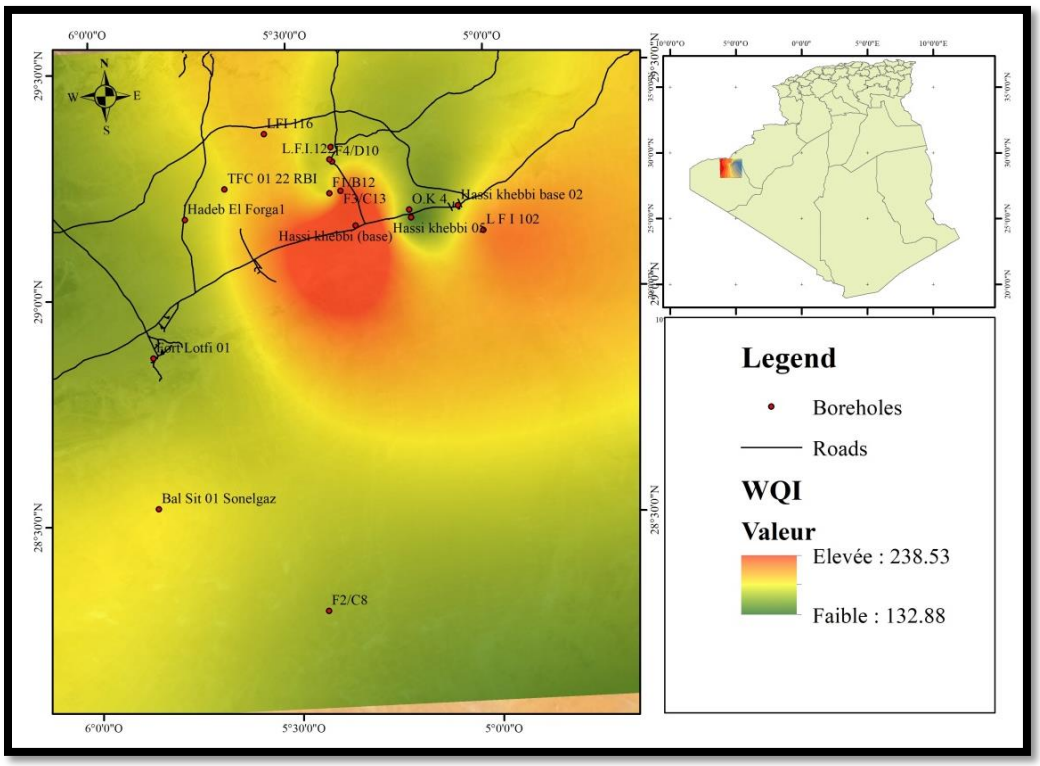


Fig. 38 : Carte de distribution de l'indice de qualité des eaux souterraines (GWQI) de la zone d'étude.

V. 2. Aptitude des eaux à l'irrigation

La qualité de l'eau et la solubilité des éléments chimiques sont les principaux facteurs qui permettent à l'eau d'être utilisée dans l'agriculture, notamment en l'absence de précipitations. La croissance des cultures et des plantes est impactée négativement par l'augmentation des concentrations d'éléments dans les eaux souterraines utilisées pour l'irrigation agricole, ce qui limite l'absorption d'eau par les plantes ou modifie les réactions métaboliques **(Wilson 1982)**.

Le diagramme de Riverside **(Richards, 1954, Shukla & Saxena, 2020)** présente deux paramètres : le taux d'adsorption de sodium (SAR) et la conductivité électrique dans son ensemble. Selon **(Li et al. 2016)**, le SAR désigne la capacité du sol à absorber le sodium Na+ à partir d'une eau d'irrigation à fortes concentrations. Cette valeur oscille entre 1,86 et 12,24 **(Fig. 39)**.

Selon **(Kelley,1963)**, le KR (Kelley ratio) est une corrélation entre la concentration de sodium et la qualité de l'eau d'irrigation. On l'emploie pour évaluer les échantillons en les classant comme bons, douteux et impropres à la culture. La qualité de ces eaux est considérée comme bonne, avec 25% et 75% de doutes **(Fig. 40)**. Le modèle de l'indice de perméabilité (IP) définit ces paramètres **(Doneen, 1962)**. Il a été créé dans le but d'évaluer la qualité de l'eau utilisée dans l'agriculture. Les résultats obtenus dans la zone d'étude **(Tab. 31)** montrent que 18,75% des élèves sont dans la classe appropriée pour l'irrigation, tandis que 68,25% sont dans la classe appropriée pour l'irrigation **(Fig. 41)**.

Tableau 31 : Résumé statistique des paramètres des normes SAR, KR et PI.

Références	Paramètre	Classification		Pourcentage (%)
Richards 1954	SAR			
	< 10 10_ 18 18_26 >26		Excellente Bonne Douteux Inapproprié	43,75% 56,25% 00% 00%
Kelly 1963	KR			
	< 1 1_ 2 >2		Bonne Douteux Inapproprié	25% 75% 00%
Doneen 1962	PI			
	<25 25 _ 75 >75		Inapproprié Bonne approprié	00% 18,7%5 81,25%

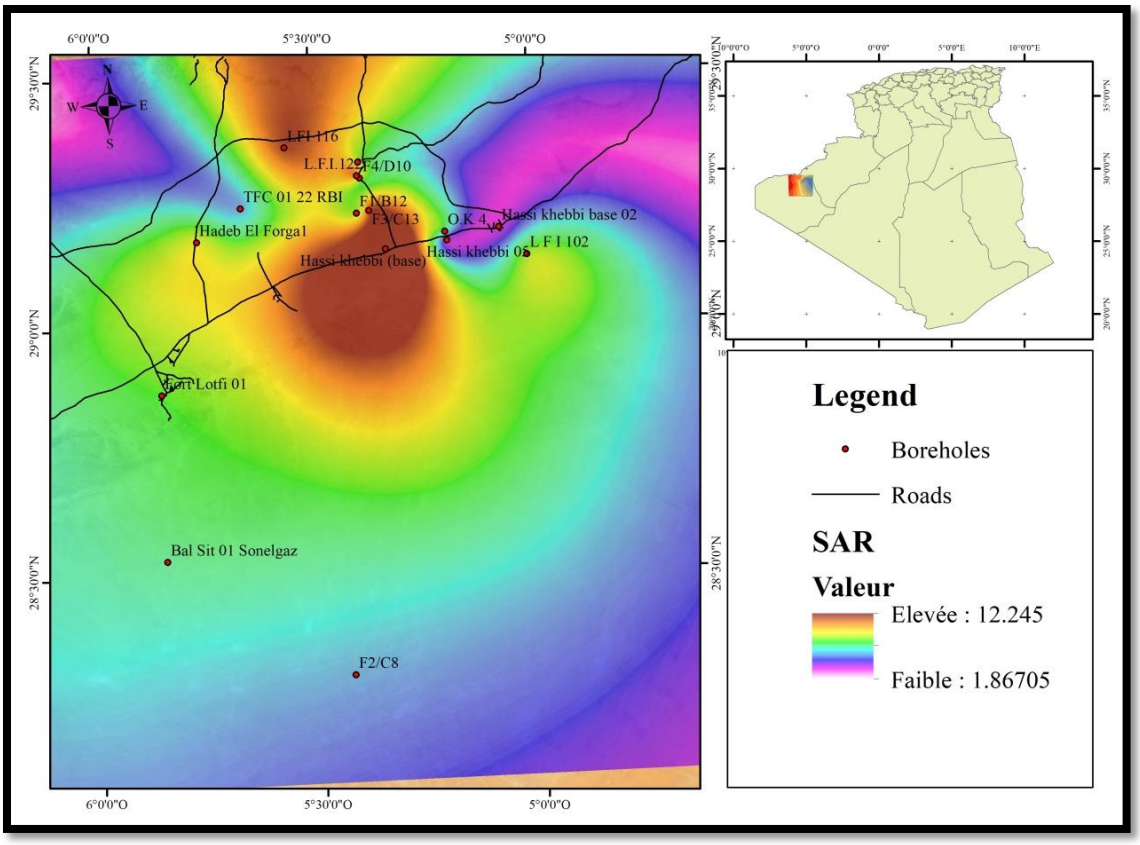


Fig. 39 : Carte du rapport d'adsorption du sodium (SAR) de la zone d'étude.

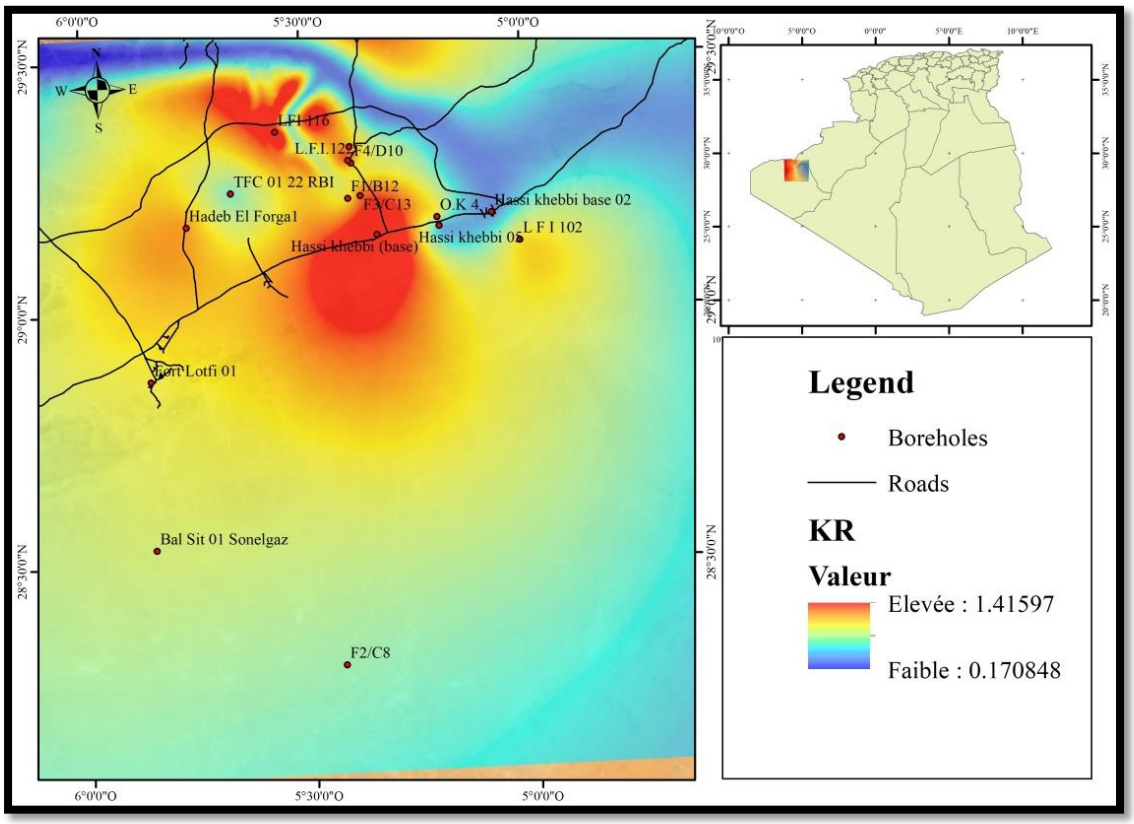


Fig. 40 : Carte du rapport de Kelley (KR) de la zone d'étude.

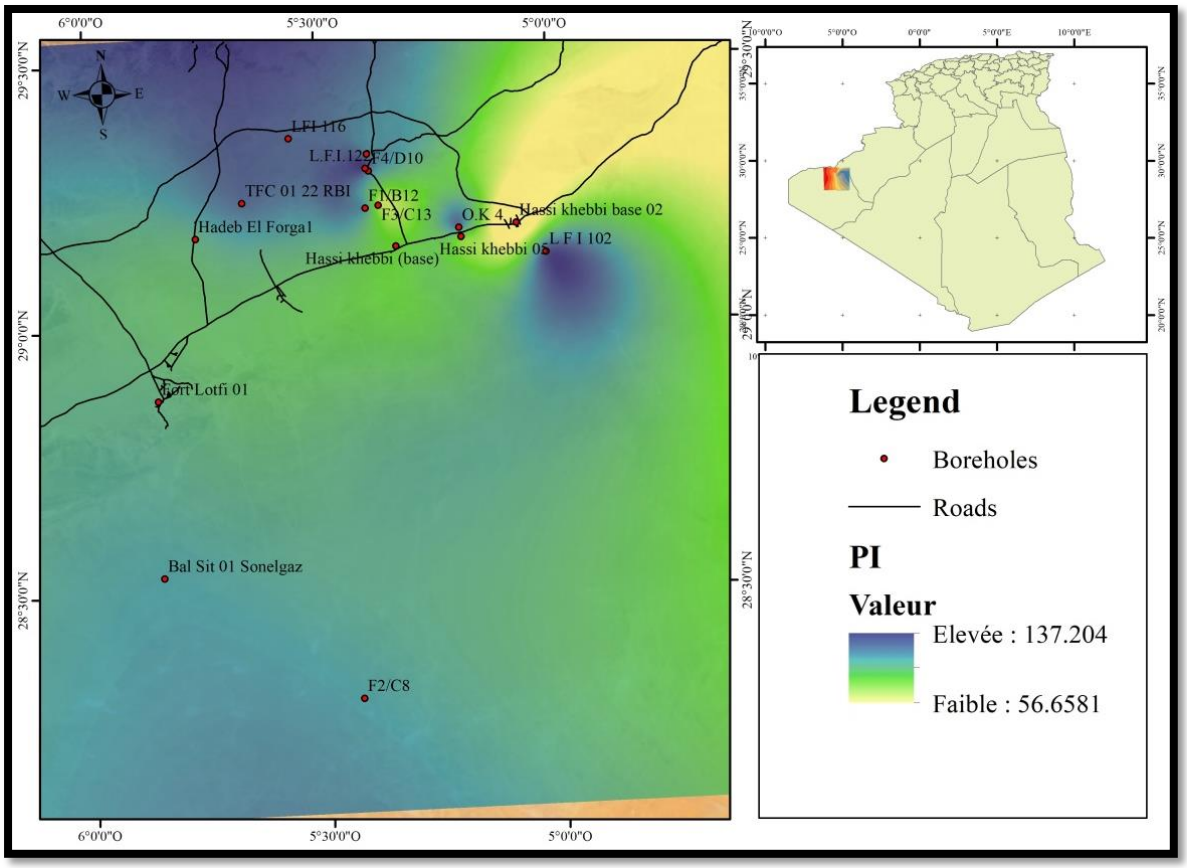


Fig. 41 : Carte de l'indice de perméabilité (IP) de la zone d'étude.

VI. Conclusion

Dans les localités de Fort Lotfi – Hassi Khebbi, la ressource en eau potable repose essentiellement sur un seul système aquifère, dont le potentiel s'avère limité. Contrairement à la nature détritique généralement attendue dans le Tertiaire, la formation y est principalement carbonatée, ce qui influe directement sur la dynamique et la qualité des eaux souterraines. Le réseau hydrographique reflète fidèlement la géométrie et le comportement de cet aquifère libre : les axes de drainage coïncident largement avec les cours d'eau de surface. Cependant, l'analyse piézométrique révèle qu'à l'ouest, l'écoulement de la nappe converge vers le champ captant de Hassi Khebbi, où le forage LFI122 présente un débit potentiel estimé à 6 l/s.

Le diagramme de Piper a identifié deux faciès : le premier faciès chloré et sulfate de calcium et de magnésium et le second faciès chlorure de sodium et sulfate de potassium ou de sodium.

L'indice GWQI fournit une vue agrégée de la qualité de l'eau en tenant compte des principaux paramètres physico-chimiques qui affectent la potabilité de l'eau. Les eaux souterraines de l'aquifère étudié appartiennent principalement à la classe des eaux médiocres et sont localisées au nord-ouest et sur toute la partie orientale de l'axe Fort Lotfi -Hassi Khebbi. Les eaux de très mauvaise qualité sont particulièrement localisées au centre de la zone d'étude.

La minéralisation des eaux souterraines est due au processus de dissolution des formations carbonatées et évaporitiques. L'eau de cet aquifère est apte à la consommation humaine après traitement, conformément aux normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). La qualité de l'eau agricole a également été évaluée à l'aide de facteurs liés à l'irrigation.

La qualité de l'eau agricole a également été évaluée à l'aide de facteurs liés à la qualité de l'eau d'irrigation. L'eau de l'aquifère de Fort Lotfi -Hassi Khebbi a été classée comme SAR [excellente (43,75 %), bonne (56,25 %)], Kelly ratio [bonne (25 %), douteuse (75 %)], PI [bonne (18,75 %) et appropriée (81,25 %)].

Ces résultats montrent que, malgré la minéralisation importante, certaines eaux peuvent être exploitées en agriculture sous des conditions de gestion adaptées.

Compte tenu du fait que cette nappe représente l'unique ressource d'alimentation en eau potable pour Fort Lotfi et Hassi Khebbi, et face aux projets d'urbanisation et de développement prévus dans la région, il devient urgent d'entreprendre une étude approfondie afin d'évaluer le potentiel réel de l'aquifère et de définir les modalités de son exploitation durable.

Chapitre V

Télédétection

I. Introduction

En ce moment, la nécessité d'eau croît à cause de différentes raisons sociales et économiques, ce qui requiert une évaluation à la fois quantitative et qualitative des ressources en eau disponibles. Les technologies de télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) sont utilisés pour estimer les ressources en eaux souterraines. Grâce à l'efficacité et à la couverture étendue de la télédétection, il est possible d'analyser les données afin d'extraire des informations clés sur la zone étudiée.

Sur le flanc nord **(Bersi et al., 2021)** ont utilisé avec succès la télédétection combinée avec les données de terrain et la géochimie pour cartographier les dykes et les sills de la CAMP. Ce travail de télédétection est mené essentiellement dans le but de rechercher des structures circulaires comme celle d'Igma et de Zemoul précédemment décrites comme des cheminées doléritiques **(Choubert, 1951; Jacquemont, 1957; Hollard, 1973; Gevin,1960; Chabou, 2008; Bersi, 2016; Bersi et al., 2021)**.

II. Notions de base sur la télédétection

II. 1. Définition

La télédétection désigne la science et la technologie qui permettent d'identifier, de mesurer et d'analyser les propriétés physiques des objets d'intérêt sans avoir besoin de les toucher directement **(Garba, 2012)**. La télédétection est un domaine relativement nouveau en géologie. Cette dernière a confirmé rapidement son intérêt dans le domaine des sciences de la terre. Conjointement, et avec l'ampleur dont se sont développés les laboratoires en moyens informatiques (logiciel de traitement des images), s'est développée une exploitation des données satellitales sous leur forme numérique. Ceci a permet aux télédétecteurs de cerner au mieux la problématique posée préalablement **(Fig. 42)**.

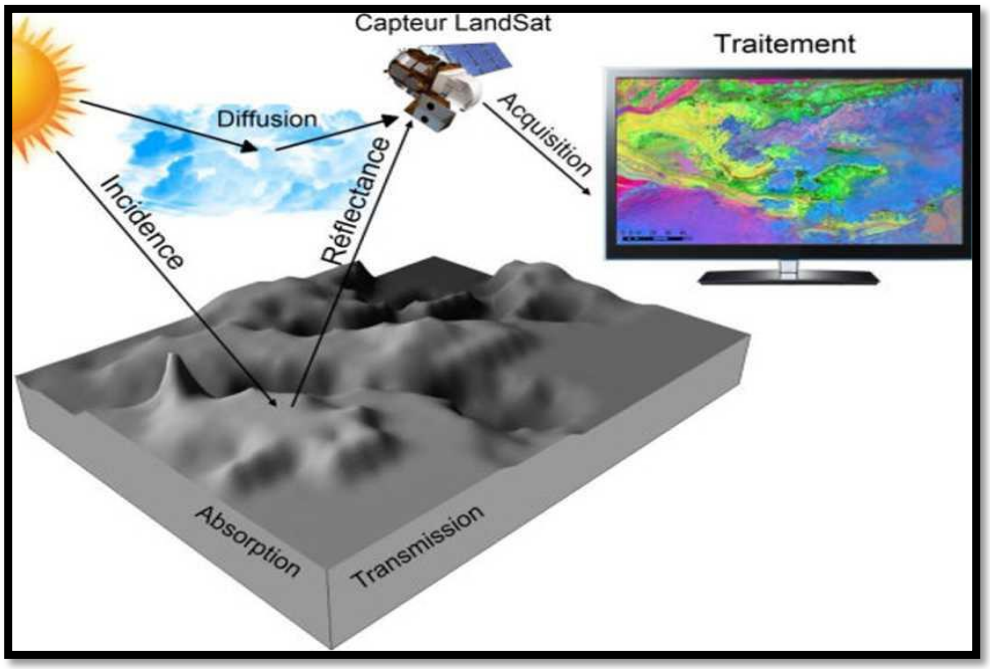


Fig. 42 : Principe de base de la télédétection **(Source : Internet)**.

II. 2. Principes fondamentaux de la télédétection

La télédétection est une technique d'observation à distance par la mesure et le traitement du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par l'objet étudier, dans le but d'en tirer des informations concernant sa nature, ses propriétés et son état (**CALOZ, 1992**). Elle est un système qui peut regrouper un ensemble de paramètre et phénomène qui interagissent, dont on peut dégager quatre éléments principaux : Le rayonnement électromagnétique, la scène (ou cible), l'environnement de l'objet et le système d'observation **(Fig. 43)**. Les sources de rayonnements sont de deux types; l'une passive et l'autre active.

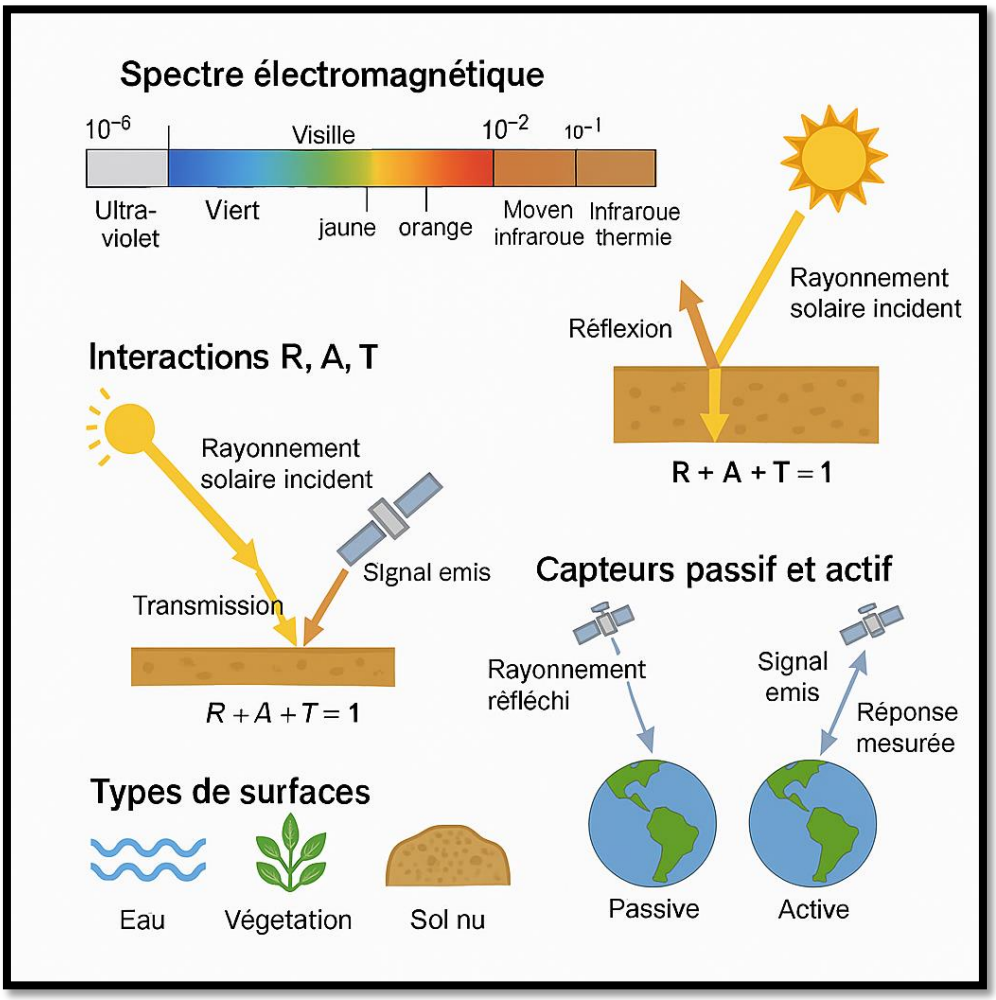


Fig. 43 : Principes fondamentaux de la télédétection.

La télédétection repose sur l'interaction de trois composantes fondamentales **(Fig. 44)** :

La source d'énergie : elle constitue l'élément initiateur du processus en "éclairant" ou en stimulant la cible par l'émission d'un flux d'ondes électromagnétiques (photons). Cette énergie peut être naturelle, telle que le rayonnement solaire ou la chaleur émise par la Terre, ou artificielle, comme les signaux produits par certains systèmes actifs, notamment les radars.

La cible : il s'agit de tout élément de la surface terrestre (eau, sol, végétation, relief, infrastructure, etc.) qui interagit avec l'énergie reçue. La réponse spectrale de cette cible dépend de ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques, ce qui permet d'obtenir des informations variées sur sa nature et son état.

Le vecteur ou plateforme de télédétection : généralement représenté par un satellite, un avion ou un drone, il a pour mission de capter et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la cible. Ces données, une fois traitées et analysées, permettent d'extraire des informations précises pour des applications multiples (cartographie, suivi de l'environnement, gestion des ressources naturelles, etc.).

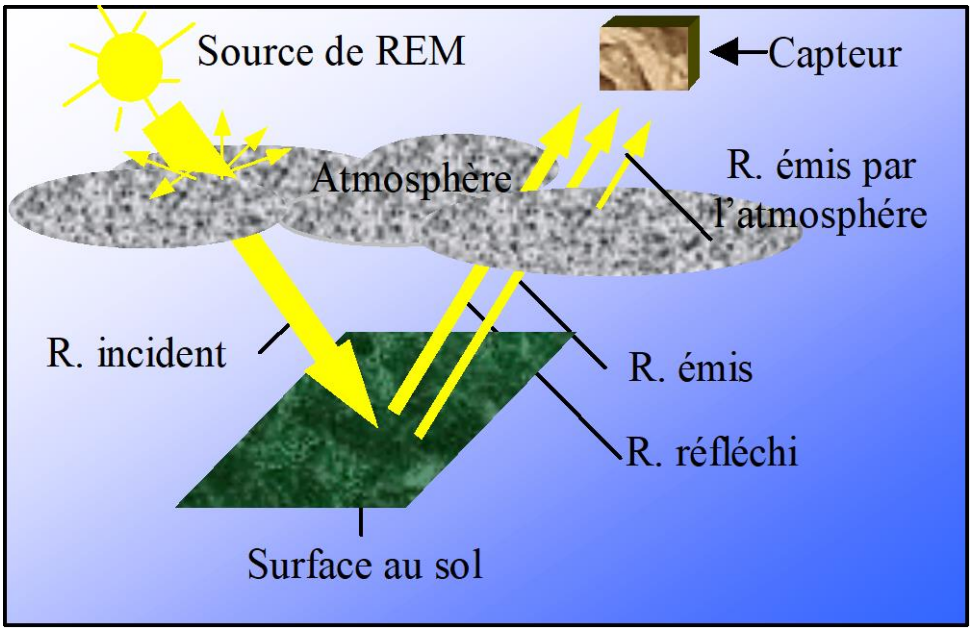


Fig. 44 : Cheminement du rayonnement électromagnétique **(Source : Internet)**.

a. Rayonnement et spectre électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique, par définition, désigne une forme d'énergie qui est présente partout autour de nous. Cela inclut différentes catégories comme les ondes radio, les rayons X et gamma, ainsi que la lumière solaire **(Coulibaly, 1996)**. Le soleil constitue la principale source de ce rayonnement électromagnétique, et sa lumière éclaire notre planète, permettant au cerveau de former une image cohérente de ce que nous percevons. La lumière visible, en fait, ne correspond qu'à une petite portion du spectre électromagnétique et comprend une grande variété de longueurs d'onde. De plus, il existe des types de rayonnements qui ne peuvent pas être perçus par l'œil humain, tels que les micro-ondes, les rayons ultraviolets et les infrarouges, entre autres **(Fig. 45)**.

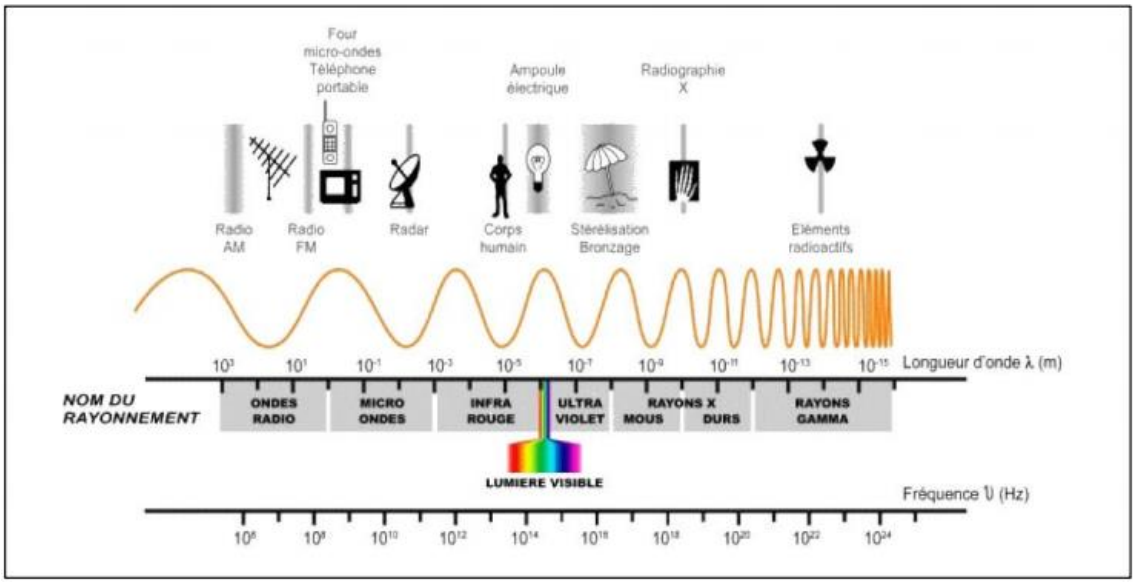


Fig. 45 : Rayonnement et spectre électromagnétiques **(Source : Internet)**.

b. Signature spectrale

Lorsque les ondes électromagnétiques se déplacent à travers un matériau, leur interaction avec ce dernier varie en fonction de leur fréquence et de la composition du matériau. Ces interactions se produisent principalement par le biais de l'absorption résonante, ce qui entraîne une réémission de lumière par les atomes du matériau. En conséquence, la signature spectrale représente la réaction d'un objet lorsqu'il reçoit de l'énergie, agissant comme une carte d'identité pour celui-ci **(Pebay-Peyroulay, 2012)**.

À titre d'exemple, l'eau reflète une faible quantité d'énergie comparée à celle que renvoient les plantes et le sol. En effet, les plantes peuvent refléter environ 50 %, le sol entre 30 et 40 %, tandis que l'eau ne renvoie qu'environ 10 % **(Fig. 46)**. Il est donc rare que la signature spectrale soit identique dans toutes les régions et à toutes les périodes de l'année.

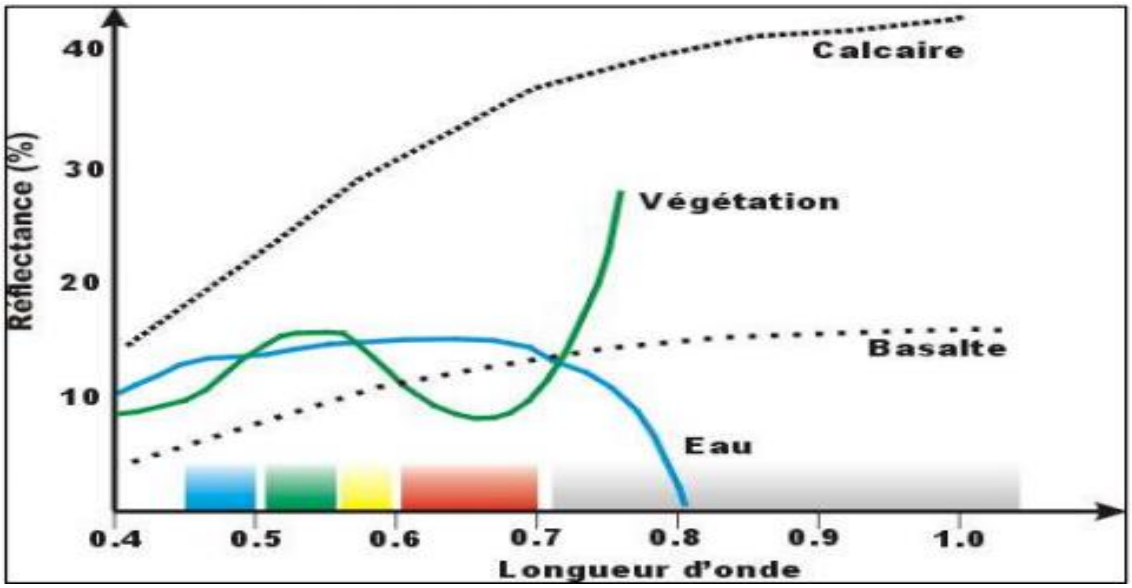


Fig. 46 : Signature spectrale de quelques éléments **(Source : Internet)**.

II. 3. Méthode de la télédétection

La télédétection se compose de sept étapes essentielles **(Fig. 47)**. Voici cette liste présentée différemment :

- Source d'énergie (A) : pour réaliser la télédétection, il est primordial d'avoir une source qui éclaire ou fournit de l'énergie électromagnétique à l'objet que l'on souhaite étudier.
- Rayonnement et atmosphère (B) : en se déplaçant entre la source et l'objet, l'énergie traverse l'atmosphère, où elle interagit. Cette interaction peut également se produire à nouveau quand l'énergie retourne vers le capteur.
- Interaction avec l'objet (C) : après que l'énergie a atteint l'objet à travers l'atmosphère, elle interagit avec celui-ci, en fonction des caractéristiques de l'objet et du type de rayonnement.
- Enregistrement par le capteur (D) : un capteur, qui doit être éloigné de l'objet, est requis pour collecter et enregistrer le rayonnement électromagnétique qui est diffusé ou émis par l'objet.
- Transmission, réception et traitement (E) : l'énergie captée par le capteur doit être envoyée, souvent par voie électronique, à une station réceptrice où un logiciel traite les données pour les transformer en images, qu'elles soient photographiques ou numériques.
- Interprétation et analyse (F) : une fois les images traitées, elles sont analysées de manière visuelle ou numérique pour en tirer les informations recherchées concernant la cible.
- Application (G) : le processus de télédétection se conclut lorsqu'on utilise les informations extraites (les données) de l'imagerie sur la cible afin de mieux comprendre, d'obtenir de nouvelles données ou de contribuer à la résolution d'un problème donné.

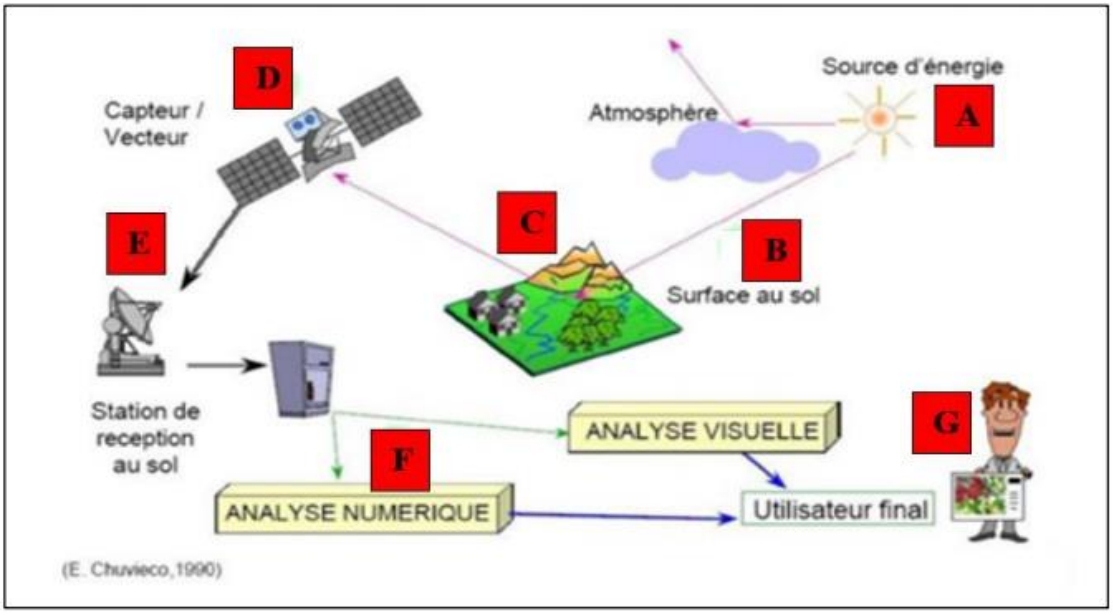


Fig. 47 : Différentes étapes de la télédétection **(Source : Internet)**.

III. Notions sur les satellites

Les vecteurs de télédétection se divisent en deux catégories principales : les satellites géostationnaires et les satellites à défilement (héliosynchrones).

Les satellites géostationnaires, placés à environ 36 000 km d'altitude, possèdent une orbite équatoriale circulaire et tournent à la même vitesse que la Terre. Ils restent ainsi fixes par rapport à un point donné, ce qui permet une observation continue, particulièrement utile pour la météorologie et les télécommunications.

Les satellites à défilement ou héliosynchrones évoluent sur des orbites inclinées, à basse altitude (200 à 1500 km). Leur passage au-dessus d'un même point à la même heure solaire locale facilite le suivi régulier de la surface terrestre, notamment pour la cartographie, l'étude environnementale et la gestion des ressources naturelles.

III. 1. Acquisition et traitement des données satellitaires

De l'acquisition des données jusqu'à l'étape de l'interprétation, obligent les étapes mentionnées dans la figure ci-dessous **(Fig. 48)**.

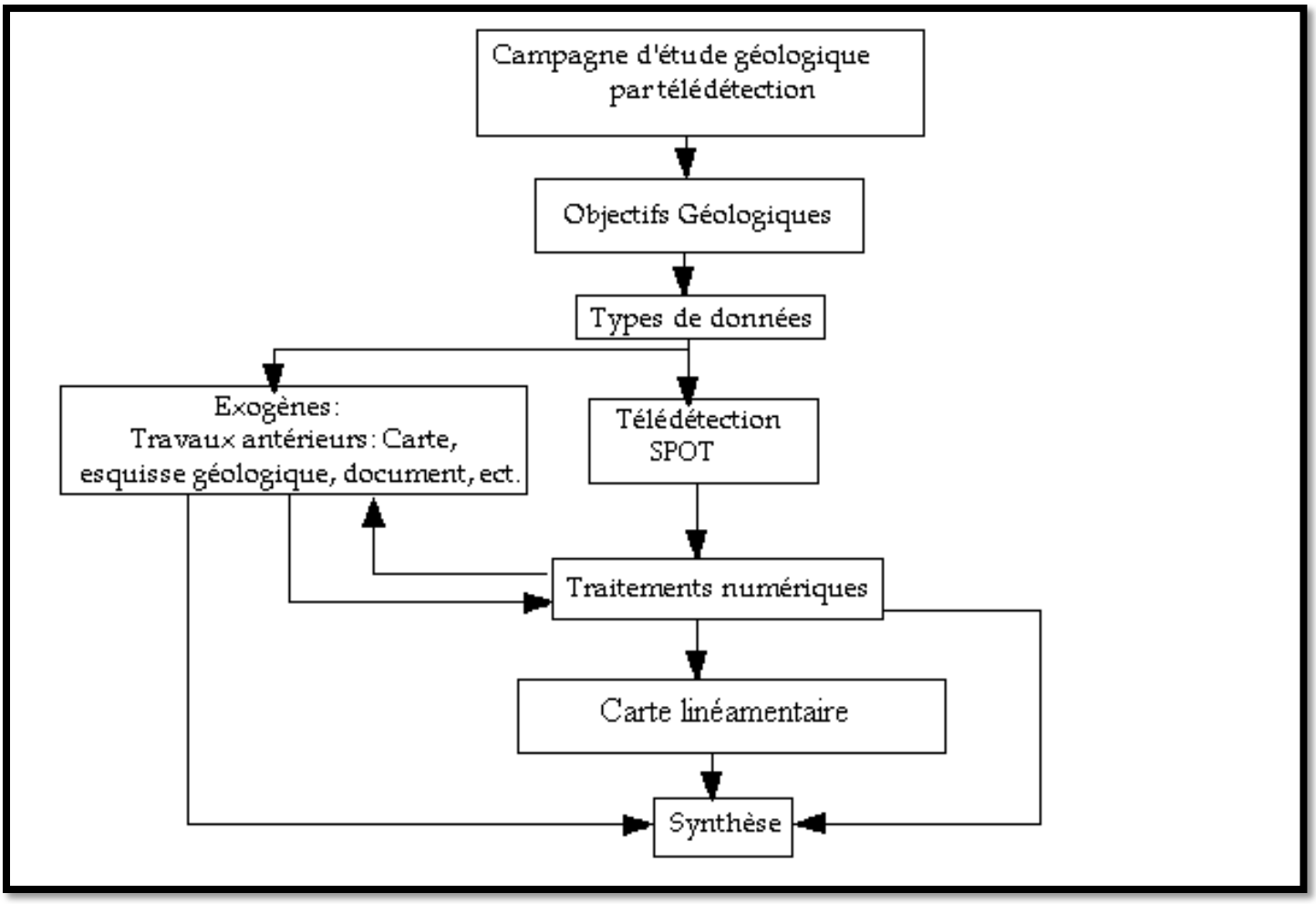


Fig. 48 : Etape d'une compagne de télédétection

III. 2. Traitements des données images

Les images de télédétection nécessitent divers traitements visant à améliorer leur qualité et à faciliter leur interprétation. La première étape, dite prétraitement**,** consiste en des corrections radiométriques et géométriques permettant d'obtenir une image cohérente et fidèle à la réalité du terrain. Ce n'est qu'après cette phase que l'image peut être soumise à des traitements numériques avancés, garantissant la fiabilité des informations extraites **(Fig. 49).**

a. La morphologie

L'aspect géométrique regroupe à la fois la forme des objets, leur mode d'affleurement ainsi que leurs dimensions. L'étude de ces paramètres constitue un outil fondamental pour le géologue utilisant la télédétection, car elle offre des indications précieuses sur l'organisation et la nature des structures géologiques. L'analyse morphologique des objets, notamment dans le cas des intrusions granitiques, joue ainsi un rôle de guide essentiel dans l'interprétation et la compréhension des phénomènes géologiques.

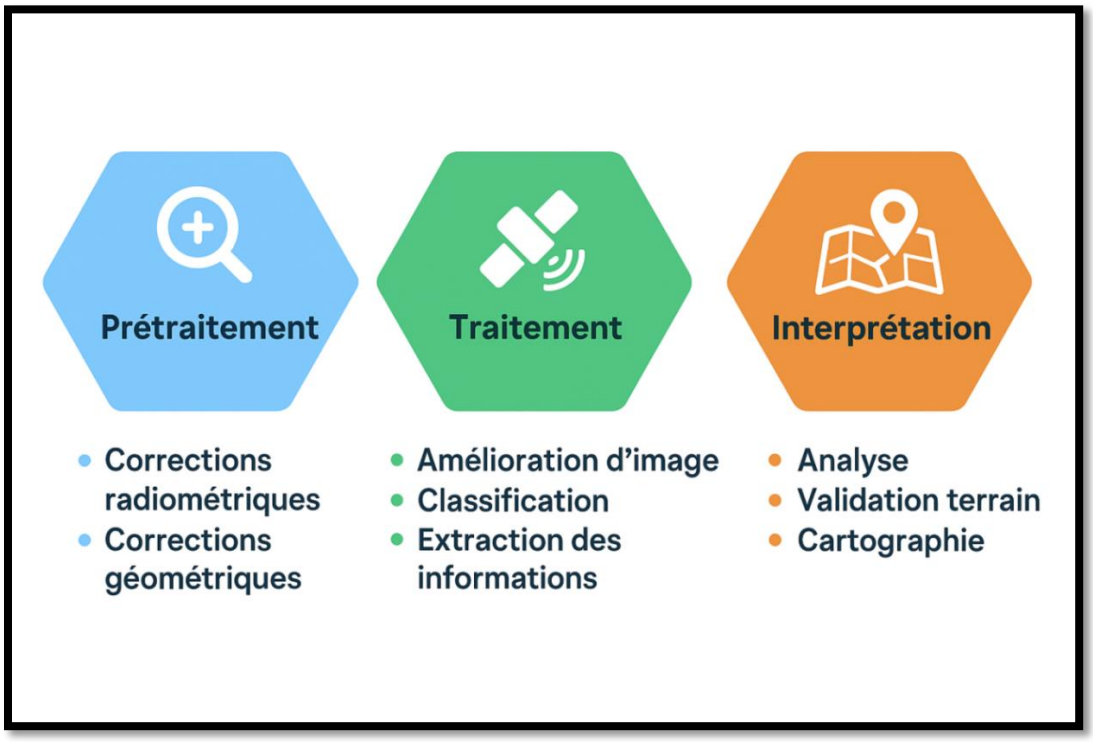


Fig. 49: Schéma simplifier les étapes de traitements des images.

b. La texture et structure

La texture se rapporte au mode d'organisation des teintes, caractérisé par des paramètres tels que l'homogénéité ou la granulométrie. Elle constitue un critère important d'identification en télédétection. Il convient de souligner qu'une texture identifiable à petite échelle peut, lorsqu'on passe à une échelle plus grande, être interprétée comme une véritable structure.

III. 3. Interprétation des données géologiques et géomorphologiques

L'interprétation d'une image satellitaire se déroule en deux phases. La première, dite interprétation brute, repose uniquement sur l'analyse de la tonalité, de la texture-structure et de la morphologie, sans recours systématique aux données exogènes. La seconde, ou interprétation approfondie, confronte ces résultats avec les cartes, documents et autres sources disponibles afin de produire une cartographie synthétique. Cette démarche s'appuie sur l'étude des caractéristiques morpho-structurales, radiométriques et texturales des formations lithostratigraphiques, en mettant en évidence les objets géologiques et géomorphologiques. Les formes observées traduisent à la fois l'action conjointe de la tectonique et de l'érosion, tandis que la nature pétrographique des roches conditionne leur expression géomorphologique.

IV. Approches en télédétection

IV. 1. Approches géologiques

Les investigations géologiques menées à travers la télédétection s'articulent principalement autour de deux approches complémentaires : l'approche spectrale, qui repose sur l'analyse des signatures radiométriques des formations, et l'approche linéamentaire, centrée sur l'identification et l'étude des structures géologiques à partir des réseaux de linéaments.

a. Approche spectrale

Les études géologiques par télédétection peuvent être abordées sous deux principaux volets : l'aspect spectral et l'aspect linéamentaire.

b. Approche linéamentaire

L'analyse morphologique et hydrographique des images satellitaires permet de cartographier le réseau de linéaments, en lien direct avec la nature du substrat. Grâce à leur vision synoptique, ces images mettent en évidence l'importance et la répartition des discontinuités linéaires du paysage. Celles-ci se distinguent en deux types : les discontinuités morphologiques, perceptibles sous forme de tracés rectilignes ou légèrement incurvés, et les discontinuités radiométriques, se traduisant par des contrastes nets de tonalité indiquant des ruptures dans les propriétés de surface.

IV. 2. L'analyse linéamentaire

Selon **Hobbs, W. H**., **(1904)** un linéament correspond à l'expression en surface d'un accident ou d'un phénomène profond. Pour sa part, **Chorowicz, J. & Paul, S. (1974)** distingue les linéaments en fonction de leur longueur et propose de réserver le terme faille aux linéaments bien visibles et corrélés à une discontinuité effectivement observable sur le terrain, tandis que le terme linéament serait utilisé pour désigner un alignement d'éléments variés dont la nature réelle demeure incertaine. Dans le cadre de cette étude, l'approche méthodologique repose essentiellement sur la reconnaissance des formes, un principe fondamental de la photo-

interprétation, appuyée par des traitements d'images standards (analyse en composantes principales, transformation RVB en IHS) ou spécifiques (ratios spectraux). L'objectif premier est d'identifier et d'interpréter les formes géologiques, notamment les linéaments. Selon **(Scanvic, J. Y. 1983)**, ces derniers se répartissent en deux catégories : (i) une classe d'objets non géologiques, liés à des phénomènes anthropiques, aléatoires ou à des artefacts, et (ii) une classe d'objets géologiques, correspondant à des accidents structuraux d'origine cassante ou ductile (failles, diaclases, etc.) ou à des structures complexes intégrant des éléments composites tels que des linéaments géochimiques ou des discontinuités géophysiques. La cartographie du réseau linéamentaire repose, quant à elle, sur l'application rigoureuse de trois critères fondamentaux de la photo-interprétation, définis en amont. Cette démarche, largement reconnue dans les travaux de télédétection appliquée à la géologie **(Howard, 1997 ; Koike et al., 1998)**, permet une extraction objective, systématique et reproductible des discontinuités structurales. Elle confère ainsi à la méthodologie adoptée un caractère scientifique solide et opérationnel, garantissant la fiabilité des résultats obtenus.

IV. 3. Etude compréhensive des linéaments

La densité et l'imprécision des linéaments rendent leur analyse difficile et nécessitent souvent une approche statistique, notamment à petite échelle (1/50 000). L'utilisation des rosaces de distribution directionnelle constitue une méthode courante, mais leur interprétation n'est réellement objective que dans le cadre d'unités géologiques homogènes et de zones restreintes. L'analyse repose alors sur plusieurs étapes successives : la pondération géologique, qui consiste à retenir uniquement les linéaments d'importance avérée ou probable (failles, escarpements, réseaux hydrographiques), tout en excluant les éléments anthropiques ; la hiérarchisation, permettant d'établir des correspondances avec les accidents tectoniques, notamment par l'observation de rebroussements de couches ; l'individualisation de provinces géologiques homogènes, au sein desquelles sont distinguées les directions de raccourcissement et celles des structures fracturées ; enfin, l'interprétation régionale intégrée, visant à mettre en évidence la relation entre les systèmes de failles et l'âge des unités affectées **(Fig. 50)**.

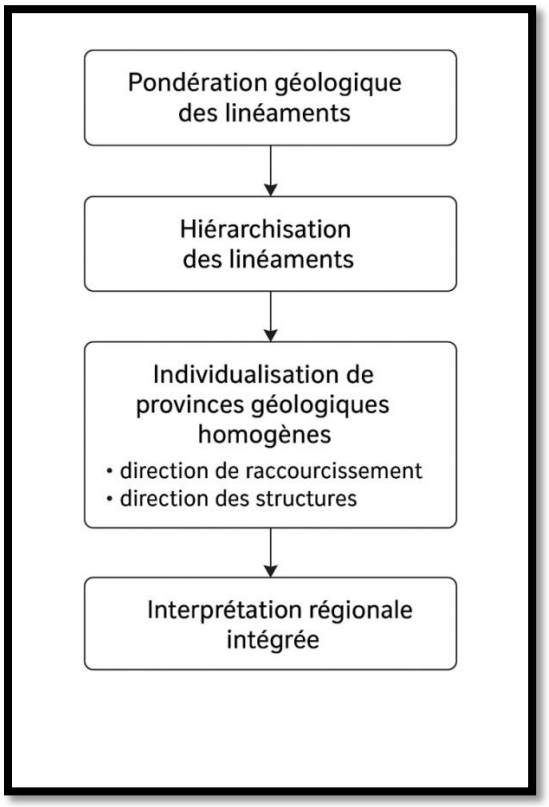


Fig. 50 : schéma simplifier les étapes d'analyse les linéaments.

V. Méthodologie et matériels utilisés aux niveaux de la zone d'étude

La méthodologie adoptée dans ce travail s'articule autour de deux volets complémentaires. Le premier s'appuie sur l'exploitation critique des travaux géologiques antérieurs réalisés par différents auteurs dans la région du Fort lotfi- Hassi Khebbi, constituant une base de référence indispensable à l'interprétation structurale. Le second repose sur l'intégration et le traitement des données satellitaires Sentinel 2 et radar couvrant la zone d'étude, lesquelles offrent une valeur ajoutée considérable dans la détection, la cartographie et l'analyse des structures géologiques **(Sabins, 1997 ; Drury, 2001)**.

V. 1. Image Radar

Le radar (Radio Detection and Ranging) est un capteur actif qui émet ses propres ondes électromagnétiques dans le domaine des micro-ondes (1 mm à 1 m), puis enregistre le signal rétrodiffusé par la surface **(Smith, 1997)**. Contrairement aux capteurs optiques, il permet l'acquisition de données de jour comme de nuit, quelles que soient les conditions météorologiques. Les capteurs radar se distinguent par trois paramètres principaux : l'angle d'incidence, la polarisation (H/V) et la fréquence, qui déterminent la nature du signal reçu et la capacité à caractériser les différentes occupations du sol.

Pour les surfaces d'eau libre, généralement lisses, la réflexion est spéculaire, entraînant une faible rétrodiffusion ; les plans d'eau apparaissent ainsi sombres sur les images radar. Parmi les bandes de fréquences utilisées (P, L,

S, C, X, Ku, Ka), la bande C est la plus courante pour la détection des surfaces aquatiques, notamment avec les satellites ERS, RADARSAT ou Sentinel-1. Selon **(Baghdadi et al. 2007)**, les meilleures configurations pour distinguer l'eau des terres avec le capteur ASAR/ENVISAT sont : une polarisation croisée (HV/VH) pour un faible angle d'incidence, et toutes les polarisations (HH/VV/HV/VH) pour les incidences fortes.

Ainsi, la télédétection radar active constitue un outil performant pour l'analyse hydrologique : elle permet la cartographie des plans d'eau, le suivi des crues, l'évaluation de l'humidité du sol et la surveillance dynamique des ressources hydriques dans diverses conditions climatiques **(Smith, 1997 ; Baghdadi et al., 2007)**.

V. 2. Programme Sentinel

Le programme Sentinel, développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dans le cadre du programme Copernicus, regroupe une série de missions satellitaires (Sentinel-1 à Sentinel-6) dédiées à la surveillance de la Terre. Chaque mission est équipée de capteurs spécifiques (radar, optique, altimétrique, etc.) permettant l'observation continue des milieux terrestres, marins et atmosphériques **(ESA, 2023 ; Copernicus, 2023)**.Ce programme vise à assurer une continuité des observations à long terme et à améliorer la gestion durable des ressources naturelles, notamment des ressources en eau et des milieux côtiers **(Aschbacher & Milagro-Pérez, 2012 ; Donlon et al., 2012)**.

IV. Résultat et analyse

IV. 1. Analyse et Résultats des Données Sentinel

L'analyse des images **Sentinel-1** (radar) et **Sentinel-2** (optique) du programme Copernicus a permis de caractériser efficacement les surfaces en eau et la dynamique hydrologique de la zone d'étude. Les données Sentinel-1 ont servi à la détection des plans d'eau indépendamment des conditions atmosphériques, tandis que celles de Sentinel-2 ont permis l'extraction d'indices spectraux (NDWI, MNDWI) pour différencier l'eau, le sol et la végétation. Après les corrections radiométriques et géométriques, les résultats montrent une bonne complémentarité entre les deux capteurs, offrant une cartographie précise et un suivi temporel fiable des ressources en eau.



Fig. 51 : Image sentinel 4-3-2 couluer naturelle de la zone Fort Lotfi.

L'image Sentinel-2 en composition 4-3-2 (couleurs naturelles) (**Fig. 51)** permet d'identifier efficacement les principales unités morpho-lithologiques du la zone d'étude. Les teintes claires et blanchâtres correspondent à des formations affleurantes sèches (carbonatées, silto-argileuses ou évaporitiques) présentant un faible potentiel hydrogéologique. Les teintes brun-ocre indiquent des formations gréseuses et des surfaces enrichies en oxydes de fer. Le réseau de paléo-drainage est bien visible et matérialise des zones d'infiltration et de recharge localisée, favorables au stockage temporaire de l'eau. L'analyse structurale révèle un réseau dense de linéaments orientés principalement NE–SW et NW–SE, contrôlant la circulation des eaux souterraines par augmentation de la perméabilité secondaire. Les zones d'intersection de linéaments associées aux axes de drainage fossiles présentent un potentiel hydrogéologique moyen à élevé et constituent des secteurs prioritaires pour l'implantation de forages.

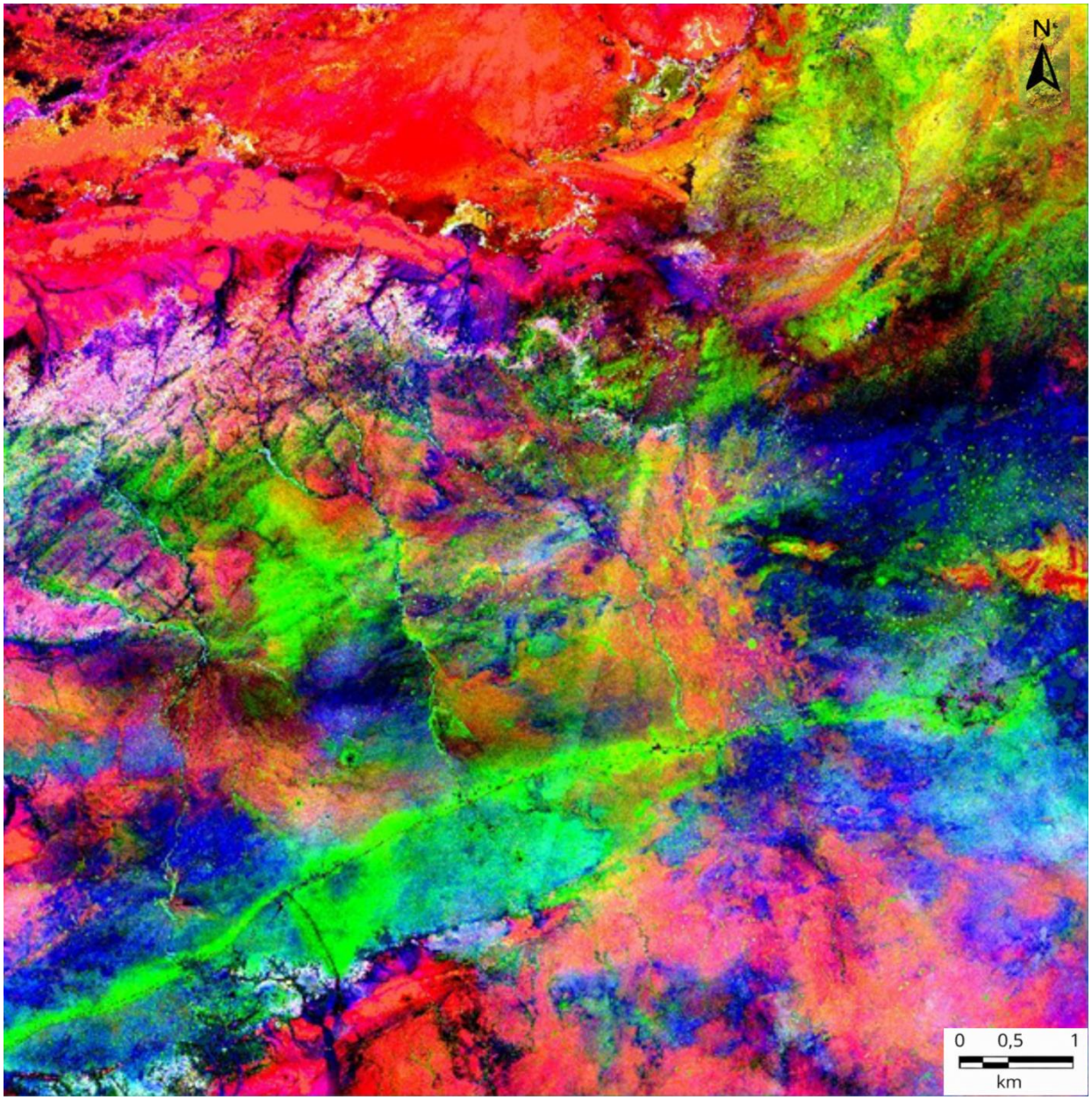


Fig. 52 : Image Sentinel ACP de la zone Fort Lotfi.

L'image présentée **(Fig. 52)** résulte de l'application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur les bandes multi-spectrales Sentinel-2. Cette méthode permet de réduire la redondance spectrale, améliorer la discrimination lithologique, mettre en évidence les structures tectoniques (failles, fractures, linéaments), identifier les zones à humidité relative et les contrastes hydrogéologiques. L'interprétation spectrale de l'image satellitaire met en évidence une organisation litho-structurale étroitement liée au contrôle tectonique régional. Les teintes rouges à orangées correspondent essentiellement aux formations paléozoïques affleurantes, dominées par des grès et des formations schisteuses peu altérées, ainsi qu'aux surfaces désertiques sèches à forte réflectance, caractéristiques des hamadas et plateaux structuraux. Ces unités présentent généralement une faible porosité primaire et une perméabilité réduite, traduisant un potentiel hydrogéologique faible. À l'inverse,

les signatures vertes à vert clair sont associées aux zones de fracturation accrue, aux formations altérées et aux couloirs de drainage, souvent en relation avec des oueds temporaires et des paléo-chenaux ; ces secteurs traduisent une humidité relative plus élevée et constituent des zones favorables à l'infiltration et à la circulation des eaux souterraines dans les aquifères fracturés. Les teintes bleues à bleu foncé sont principalement observées dans les zones topographiquement basses et déprimées, correspondant à des dépôts fins quaternaires (argiles, limons et alluvions), où l'accumulation ou la stagnation temporaire des eaux de ruissellement peut favoriser des processus de recharge localisée. Les teintes mixtes, dominées par des couleurs violettes ou multicolores, matérialisent des zones de transition lithologique et des limites structurales complexes, fréquemment affectées par des déformations tectoniques héritées. L'analyse structurale révèle par ailleurs un réseau dense de linéaments, interprétés comme des failles et des fractures majeures et secondaires, dont les directions dominantes NE–SW et NW–SE sont caractéristiques du cadre tectonique régional du nord bassin de Tindouf. Ces structures exercent un contrôle déterminant sur l'organisation du réseau hydrographique et sur la circulation préférentielle des eaux souterraines. La superposition des signatures spectrales favorables (vertes à bleutées), de la forte densité de linéaments et des zones d'intersection structurale permet ainsi d'identifier des secteurs à perméabilité élevée et à fort potentiel aquifère, constituant des cibles prioritaires pour l'implantation de forages hydrauliques dans ce contexte saharien.

IV. 2. Analyse et Résultats des Données Radar

Les images Sentinel-1 (SAR) ont permis d'analyser la rugosité et l'humidité de surface dans le bassin de Tindouf. Grâce à leur capacité d'acquisition tout temps, elles ont facilité la détection des zones humides, des lits d'oueds et des dépressions. La faible rétrodiffusion observée indique la présence d'eau libre ou de sols saturés. Ces résultats confirment l'efficacité du radar pour la surveillance hydrologique et la cartographie des zones d'infiltration en milieu aride. L'analyse de l'image radar (**Fig. 53 et Fig. 54)** met en évidence un réseau dense de linéaments tectoniques traduisant une fracturation intense du substratum. Les variations de rétrodiffusion radar sont principalement contrôlées par la rugosité de surface, l'humidité et l'orientation des structures géologiques. Les directions structurales dominantes NE–SW et NW–SE soulignent un contrôle tectonique majeur sur la circulation des eaux souterraines. Les zones à forte densité de linéaments et à forte réponse radar constituent des secteurs favorables à l'implantation de forages hydrogéologiques. Dans le contexte saharien de la zone d'étude, l'imagerie radar Sentinel-1 constitue un outil particulièrement performant pour la détection des structures tectoniques. L'absence de couverture végétale favorise une excellente discrimination des linéaments, traduisant les failles et fractures contrôlant la circulation des eaux souterraines. Les zones caractérisées par une forte rétrodiffusion radar et une densité élevée de structures apparaissent comme les secteurs les plus favorables au développement des aquifères fracturés.

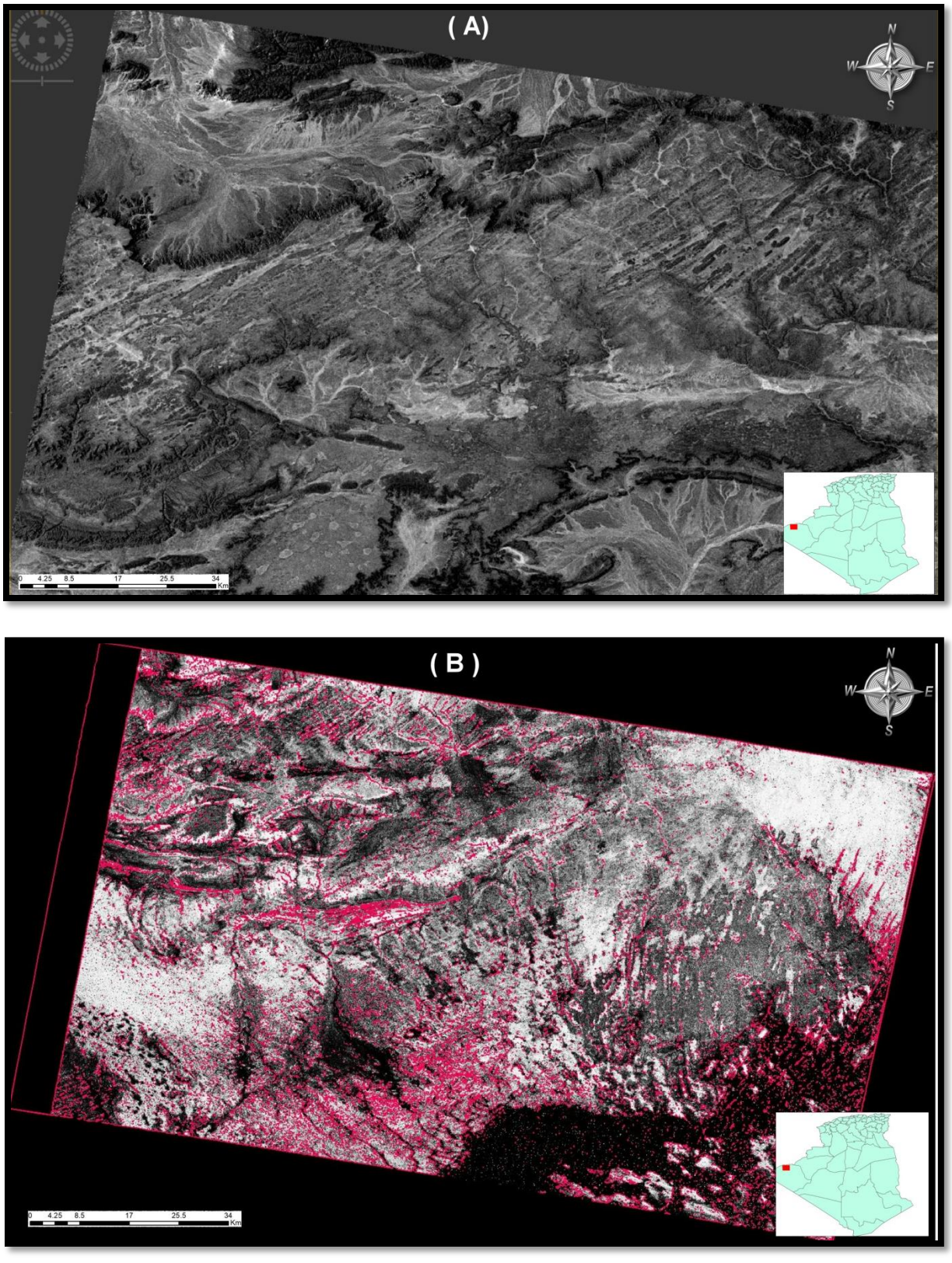


Fig. 53 : Image radar de la zone de Fort Lotfi (A), (B).

Le couplage des données radar Sentinel-1 et optiques Sentinel-2 traitées par Analyse en Composantes Principales (ACP) a permis une amélioration significative de la cartographie structurale et hydrogéologique de la zone d'étude. Les données optiques contribuent à la discrimination lithologique et à l'identification des zones altérées, tandis que les données radar mettent en évidence le réseau de failles et de fractures contrôlant la circulation des eaux souterraines. L'intégration des deux sources dans un environnement SIG permet d'identifier avec précision les secteurs à potentiel hydrogéologique élevé, particulièrement dans les milieux arides.

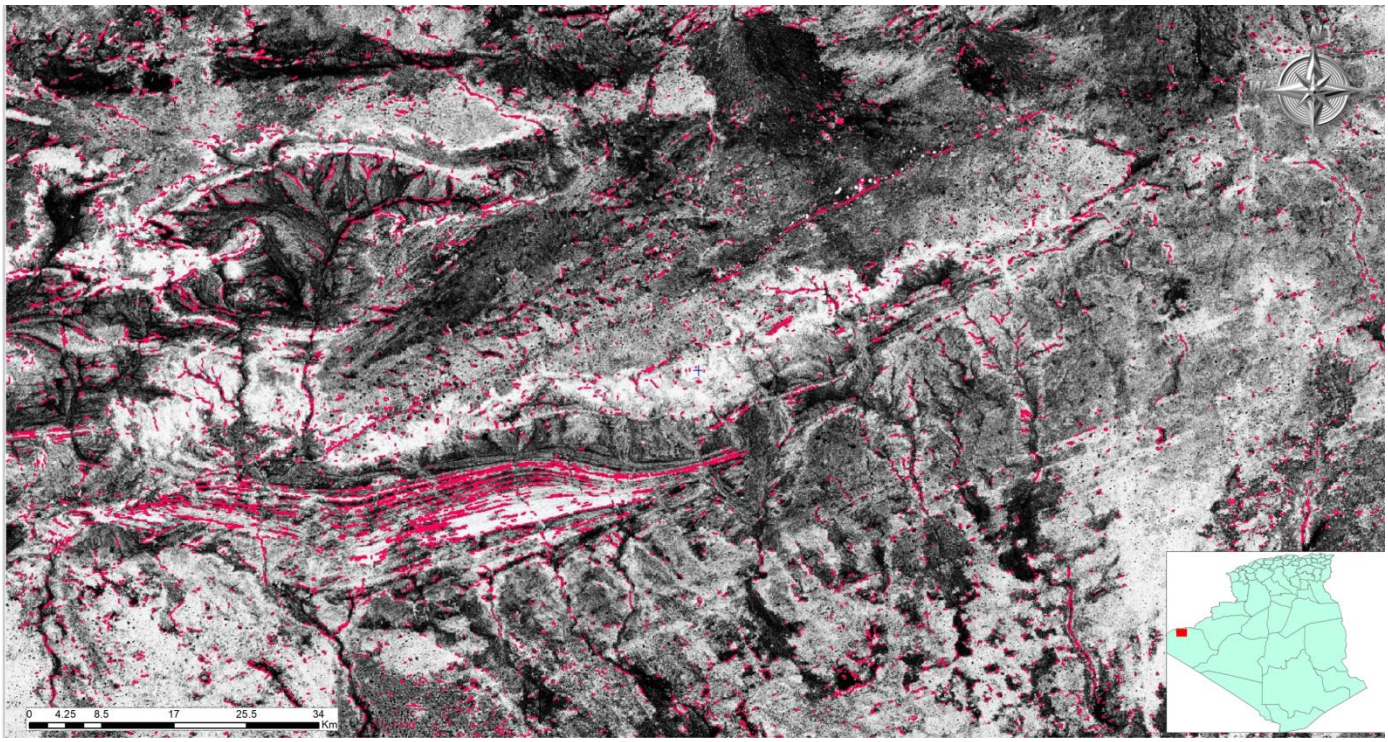


Fig. 54 : Image radar filtré de la zone Fort Lotfi.

IV. 3. Analyse structurale e la fracturation

L'analyse structurale de la fracturation a été réalisée à partir de l'interprétation des images satellitaires et des modèles numériques de terrain (MNT). Cette approche a permis de mettre en évidence les principaux réseaux de linéaments, traduisant les discontinuités tectoniques contrôlant la circulation et l'infiltration des eaux souterraines. Les directions dominantes observées correspondent aux grands accidents régionaux, orientés principalement NE-SW et NW-SE, en accord avec la structuration géologique du bassin de Tindouf. La densité et la connectivité des fractures ont été quantifiées à l'aide d'outils SIG, permettant de délimiter les zones les plus favorables à la recharge et à la migration des eaux souterraines.

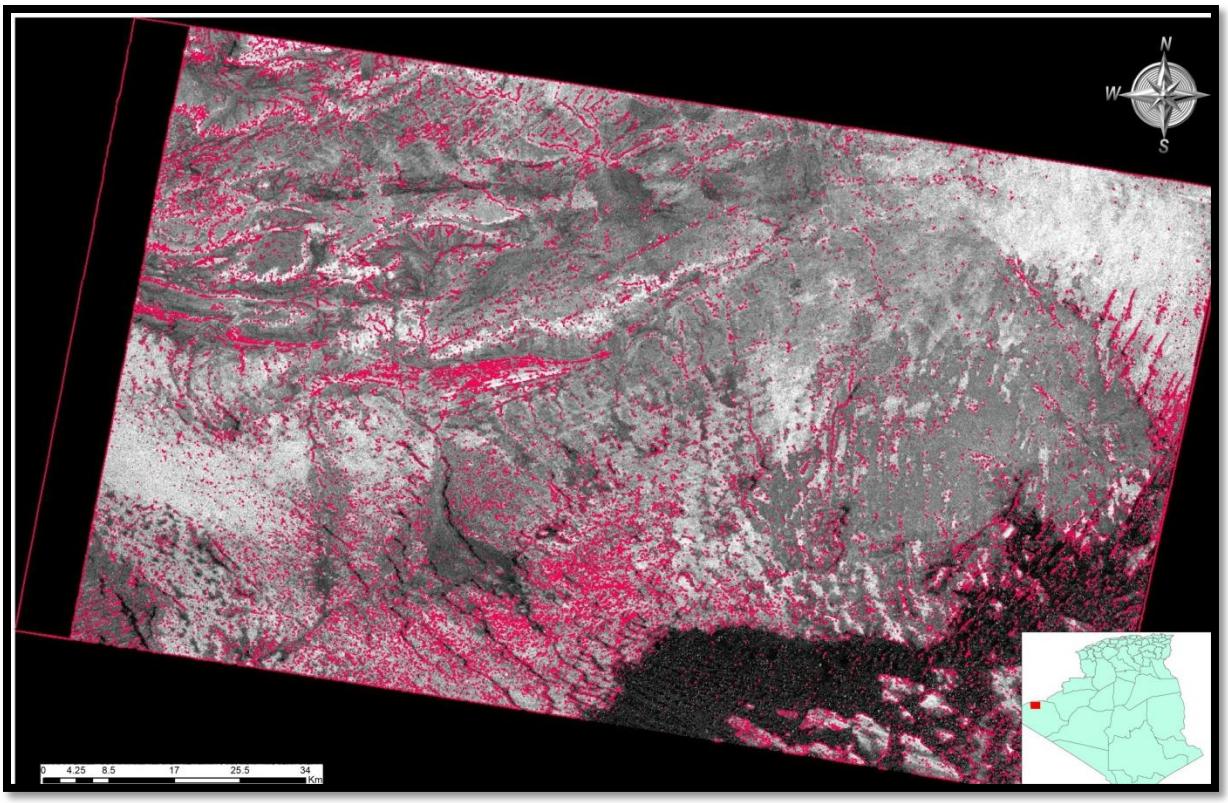


Fig. 55 : Image de fracturation_automatique de la région Fort Lotfi.

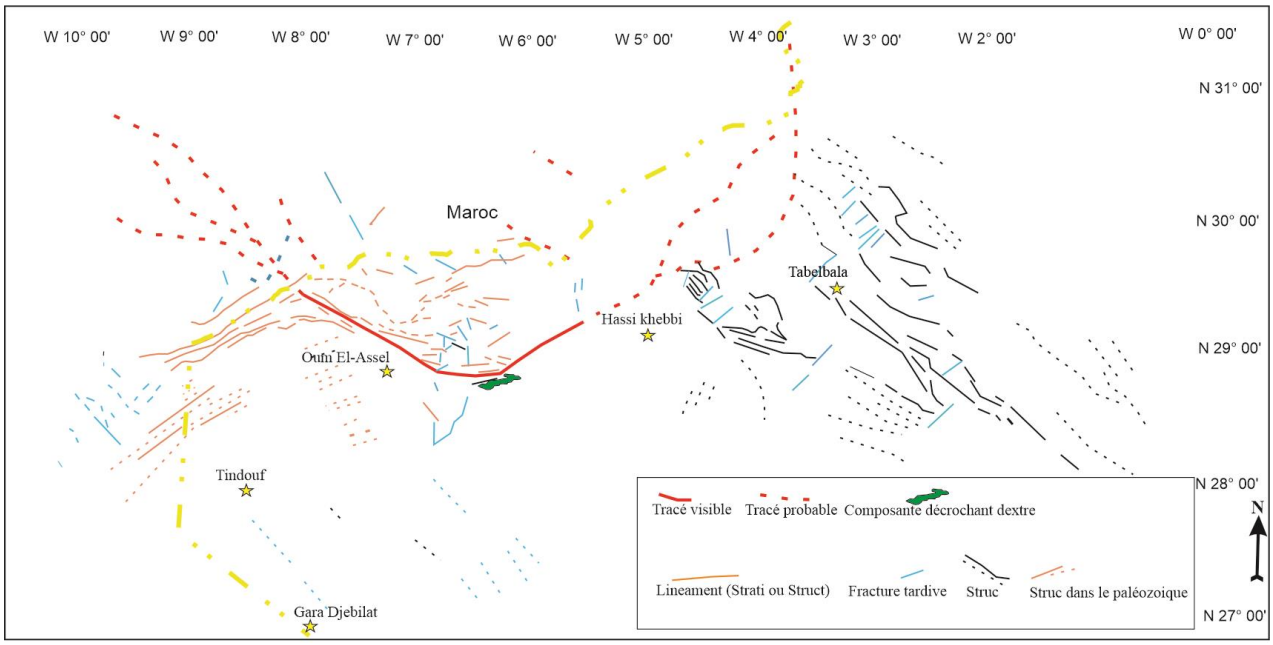


Fig. 56 : Carte linéamentaire de la région Fort Lotfi- Hassi Khebbi.

À partir des images Sentinel et radar (SAR), une analyse structurale a été effectuée sur la région de Fort Lotfi – Hassi Khebbi. Les linéaments ont été identifiés selon deux approches : directe, lorsqu'il s'agit de failles nettement visibles, et indirecte, lorsque la discontinuité est déduite d'une rupture radiométrique ou texturale.

Au total, Près de cent quarante (140) linéaments ont été recensés et caractérisés. Afin d'assurer une interprétation rigoureuse et objective, un intervalle directionnel de 20° a été adopté pour le regroupement statistique des orientations. Les principales directions obtenues sont présentées dans le **tableau 32**.

Cette analyse structurale constitue un élément essentiel pour comprendre le contrôle tectonique sur la circulation des eaux souterraines et déterminer les zones favorables à l'infiltration dans le bassin étudié.

Tableau 32 : Synthèse des orientations structurales des linéaments identifiés dans la zone de Fort Lotfi – Hassi Khebbi, avec un intervalle angulaire de 20°.

Classes de direction	**Nombre de linéaments par direction moyenne**	**Pourcentage (%)**
A- 350°-10°	10	07,40
B- 10°-30°	39	28,88
C-30°-50°	23	17,03
D-50°70°	04	02,96
E-70°-90°	02	01,48
F-90°-110°	02	01,48
G-110°130°	03	02,22
H-130°-150°	36	26,66
I-150°-170°	16	11,58
Total	135	100%

La figure de la rosace directionnelle **(Fig. 57)** illustre la répartition angulaire des linéaments encaissés dans la région **Fort-Lotfi – Hassi Khebbi**. Les linéaments ont été regroupés en classes directionnelles de 20°, et la longueur de chaque segment représente le pourcentage de linéaments correspondant à cette orientation. La rosace met en évidence deux directions prédominantes : **10–30° (NNE–SSW, 28,88%)** et **130–150° (SE–NW, 26,66%)**, suggérant que le réseau structural de la région est fortement contrôlé par ces orientations principales. Les directions secondaires, telles que 30–50° et 150–170°, présentent des fréquences moindres, tandis que les autres orientations montrent une occurrence faible (<3%). Cette distribution anisotrope des linéaments reflète la structuration tectonique régionale et peut influencer significativement l'écoulement des eaux souterraines et la localisation des structures hydrogéologiques **(Krishna et al., 2015 ; Ahmed et al., 2019)**.

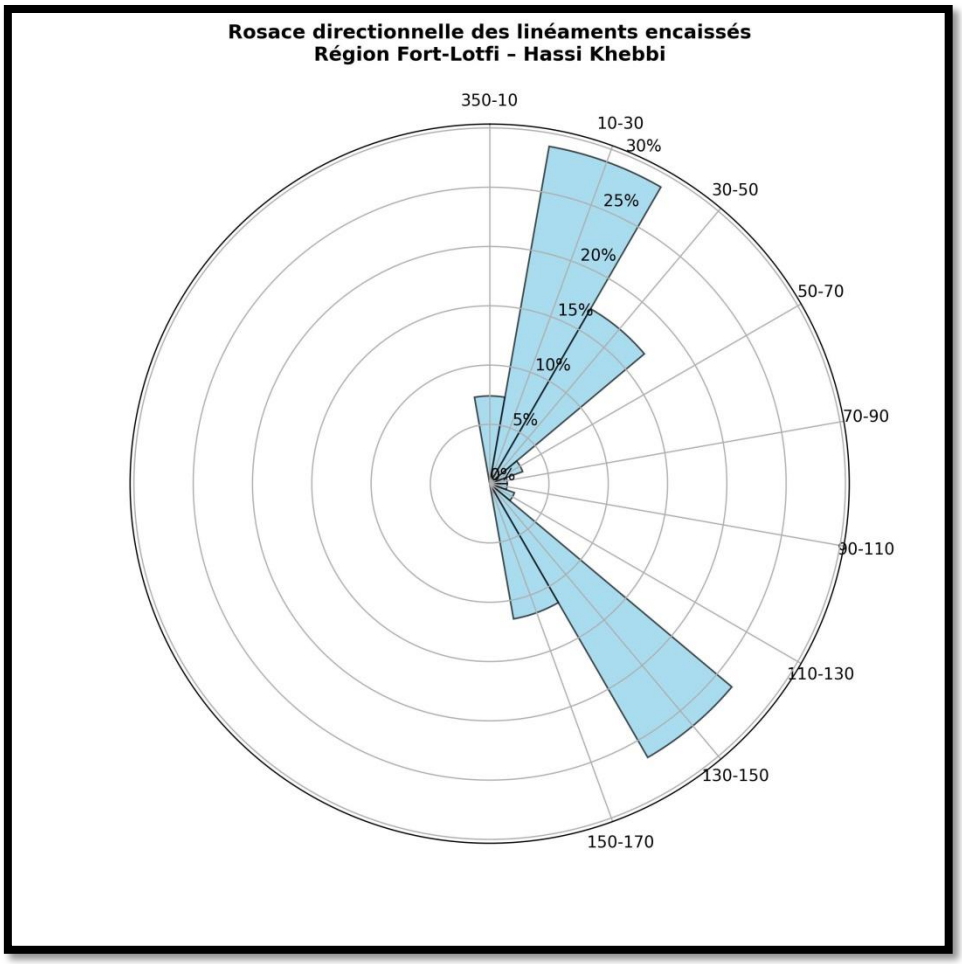


Fig.57 : Rosace de distribution directionnelle des linéaments encaissés dans la région Fort lotfi- Hassi khebbi

V. Conclusion

L'exploitation des images issues des satellites Sentinel-1 (radar) et Sentinel-2 (optique) a permis d'obtenir une vision intégrée et détaillée de la structure géologique et des caractéristiques de surface du bassin de Tindouf, notamment dans la région de Fort Lotfi – Hassi Khebbi.

Grâce à la combinaison des données optiques et radar, il a été possible de discriminer les unités lithologiques, de détecter les zones humides et de mettre en évidence les discontinuités structurales affectant la région. L'analyse des linéaments, réalisée à partir des images traitées, a permis d'identifier près de 140 fractures principales, regroupées selon des directions dominantes NE–SW et NW–SE, correspondant aux grands axes tectoniques régionaux. Ces résultats confirment la pertinence de la télédétection spatiale comme outil efficace pour la cartographie structurale, la surveillance hydrogéologique, et la compréhension du rôle tectonique dans la circulation des eaux souterraines. L'intégration de ces informations constitue une base solide pour les analyses géophysiques et hydrogéologiques présentées dans le chapitre suivant. L'image

Sentinel-2 traitée par Analyse en Composantes Principales (ACP) a permis une discrimination efficace des unités lithologiques et structurales de la zone d'étude. Les contrastes chromatiques observés mettent en évidence des formations rocheuses affleurantes, des zones fracturées ainsi que des secteurs à humidité relative élevée. Le réseau de linéaments, dominé par des directions NE–SW et NW–SE, traduit un contrôle tectonique marqué sur la circulation des eaux souterraines. Les zones caractérisées par une forte densité de fractures et des signatures spectrales verdâtres à bleuâtres apparaissent comme les secteurs les plus favorables pour l'implantation de forages hydrogéologiques. L'analyse de la carte linéamentaire de la région de Fort Lotfi – Hassi Khebbi met clairement en évidence le rôle déterminant du cadre structural dans l'organisation spatiale et le fonctionnement hydrogéologique du bassin de Tindouf. Le réseau dense de linéaments, dominé par des directions préférentielles NE–SW et NW–SE, traduit l'influence de structures tectoniques majeures héritées, responsables d'une fracturation marquée des formations géologiques affleurantes. La répartition spatiale et la densité des linéaments constituent des indicateurs essentiels de la perméabilité secondaire des terrains. Les zones caractérisées par une forte concentration de fractures et, plus particulièrement, par des intersections de linéaments, présentent des conditions favorables à l'infiltration, à la circulation et au stockage des eaux souterraines. Ces secteurs peuvent ainsi être considérés comme des zones à potentiel hydrogéologique moyen à élevé, représentant des cibles prioritaires pour la prospection et l'implantation de forages hydrauliques. En revanche, les secteurs faiblement fracturés, dominés par des unités lithologiques compactes, sont associés à un potentiel hydrogéologique plus faible. L'intégration de la carte linéamentaire avec les données issues de la télédétection optique et radar ainsi que les analyses statistiques multivariées permet d'affiner l'évaluation du potentiel hydrogéologique et constitue une étape fondamentale dans l'élaboration de la carte finale des zones favorables à l'exploitation des ressources en eau souterraine.

Chapitre VI

Géophysique

I. Introduction

Ce chapitre constitue une étape fondamentale de ce travail, car il présente les résultats obtenus à partir de la prospection géophysique par méthode électrique, appliquée dans un contexte hydrogéologique. Afin d'assurer une présentation claire et progressive, il est structuré en deux parties complémentaires.

La première partie expose les résultats détaillés issus de la prospection électrique réalisée sur les deux sites expérimentaux. Cette analyse permettra de mettre en évidence l'efficacité de la méthode pour caractériser les formations géologiques, déterminer la résistivité des différents horizons et identifier les niveaux aquifères potentiels.

La seconde partie est consacrée à l'application de cette approche à l'échelle régionale de la zone d'étude. L'objectif est d'intégrer les données électriques aux informations géologiques et hydrogéologiques disponibles, afin de préciser la structuration du réservoir, d'identifier les zones favorables à l'accumulation et à la circulation des eaux souterraines, et de valider la méthodologie adoptée.

Ainsi, ce chapitre contribue non seulement à l'évaluation de la pertinence de la prospection électrique dans un contexte aride et semi-aride, mais également à la compréhension approfondie du fonctionnement hydrogéologique de la zone étudiée.

II. Généralité sur la géophysique et l'Historique

II. 1. Définition et évolution de la géophysique

La géophysique est une discipline scientifique qui applique les principes et les méthodes de la physique à l'étude de la Terre et de ses enveloppes solides, liquides et gazeuses. Elle englobe un large éventail de branches visant à caractériser les propriétés physiques des corps planétaires et à en tirer des applications pratiques, tant pour la compréhension fondamentale des processus internes que pour l'exploration des ressources naturelles **(Dobrin & Savit, 1988 ; Telford et al., 1990)**.

Les origines de la géophysique remontent au XVIII^{e} siècle, avec les premiers travaux de calcul du rayon terrestre et la détermination de la longueur d'un arc de méridien par la Condamine et Von Humboldt. Au XIX^{e} siècle, l'étude du champ magnétique terrestre progresse grâce aux recherches de Gauss, ouvrant la voie à la géomagnétisme moderne **(Gauss, 1839)**. Le XX^{e} siècle marque un tournant majeur grâce aux avancées technologiques, notamment l'apparition d'appareils de mesure électroniques de haute précision, qui ont favorisé le développement de différentes sous-disciplines géophysiques.

Parmi celles-ci, la sismologie a permis de mieux comprendre la structure interne de la Terre, avec la mise en évidence du noyau **(Oldham, 1906)**, de la discontinuité de **(Mohorovičić, 1909)** et de la graine solide du noyau interne **(Lehmann, 1936)**. Les théories de la tectonique des plaques et de la dérive des continents, introduites par **(Wegener, 1912, 1929)** et confirmées par **(Wilson, 1968)**, ont profondément renouvelé l'approche

géodynamique. Ces avancées ont eu des retombées majeures dans la recherche appliquée, notamment dans l'exploration pétrolière, minière et hydrogéologique.

La géophysique repose sur un ensemble de méthodes d'investigation indirecte du sous-sol, fondées sur la mesure et l'interprétation des propriétés physiques des formations géologiques. Parmi les principales méthodes utilisées figurent **la méthode sismique**, basée sur l'étude de la propagation des ondes élastiques **; la méthode gravimétrique**, qui analyse les variations du champ de pesanteur liées aux contrastes de densité ; **la méthode magnétique**, qui étudie les anomalies du champ magnétique terrestre ; **les méthodes électriques**, fondées sur la mesure de la résistivité électrique des terrains ; ainsi que **les méthodes électromagnétiques**, qui exploitent la réponse du sous-sol aux champs électromagnétiques **(Aliouane, L. ,2022)**. L'intégration de ces différentes méthodes permet de mieux caractériser les structures géologiques, de cartographier les discontinuités du sous-sol et de contribuer à la prospection des ressources naturelles, notamment les ressources hydriques souterraines **(Telford et al., 1990 ; Reynolds, 2011 ; USTHB, s.d.)**. Dans les régions sahariennes algériennes, les méthodes géophysiques, en particulier les méthodes électriques et électromagnétiques, constituent des outils essentiels pour la prospection et la caractérisation des ressources en eaux souterraines. Elles permettent de déterminer la géométrie et l'extension des formations aquifères, d'identifier les variations lithologiques et les contrastes de résistivité électrique, ainsi que de localiser les structures tectoniques et les zones fracturées susceptibles de faciliter la circulation des eaux souterraines. Leur utilisation contribue également à préciser les caractéristiques géoélectriques des formations géologiques et à orienter le choix des sites favorables à l'implantation des forages hydrauliques **(Melouah et Zerrouki, 2021 ; Kessasra, 2023).**

L'identification des discontinuités structurales peut contribuer à révéler des zones de fracturation susceptibles de régir la circulation des eaux souterraines. Toutefois, les anomalies magnétiques ne suffisent pas, à elles seules, à confirmer la présence d'un réservoir aquifère ou d'une faille perméable.

En Algérie, plusieurs études ont utilisé les méthodes gravimétriques et aéromagnétiques, associées à l'analyse multi-échelle et à la transformée en ondelettes, pour identifier les principales discontinuités structurales du Hoggar. Ces travaux contribuent à la compréhension de l'organisation tectonique du sous-sol et de son influence potentielle sur la circulation des eaux souterraines **(Ouadfeul et Aliouane, 2015) ; (Ouadfeul et Aliouane, 2016) ; (Aliouane et al., 2012)**.

II. 2. Justification du choix de la prospection électrique

Dans le cadre des investigations hydrogéologiques, le choix de la prospection électrique se justifie par sa grande efficacité, particulièrement dans les zones arides et semi-arides où l'eau souterraine représente une ressource stratégique. Cette méthode repose sur la mesure de la résistivité électrique des terrains, paramètre fortement influencé par la nature lithologique, la porosité, la teneur en eau et la salinité des formations **(Parasnis, 1997 ; Loke, 2004)**. Elle permet ainsi de différencier avec fiabilité les horizons aquifères des couches stériles,

contrairement à d'autres méthodes géophysiques, telles que la sismique ou la magnétométrie, moins sensibles aux contrastes hydrogéologiques **(Tab. 33)**.

De plus, la prospection électrique présente plusieurs avantages pratiques : elle est relativement économique, facile et rapide à mettre en œuvre, et bien adaptée aux terrains difficiles d'accès **(Telford et al., 1990 ; Kirsch, 2009)**. Ces caractéristiques en font un outil de choix pour la caractérisation des aquifères, la délimitation des structures favorables à l'infiltration et l'évaluation des ressources en eaux souterraines dans des contextes géologiques variés.

II. 3. La géophysique aux services des géologues

La géophysique constitue un outil essentiel pour les géologues, car elle permet de sonder le sous-sol et d'en caractériser les propriétés physiques à différentes échelles : superficielle, semi-profonde et profonde. Ses applications couvrent de nombreux domaines, allant de l'exploration pétrolière et minière à l'hydrogéologie et au thermalisme, en passant par les travaux publics, l'archéologie, la volcanologie et la sismologie **(Telford et al., 1990 ; Kirsch, 2009)**.

Chaque méthode géophysique possède des spécificités adaptées au contexte étudié : les méthodes électriques et électromagnétiques sont particulièrement utiles en hydrogéologie, tandis que les méthodes gravimétriques, magnétiques, radiométriques et sismiques sont davantage employées pour l'exploration des ressources profondes et l'étude des structures géodynamiques. La mise en œuvre d'une étude géophysique suit généralement plusieurs étapes — acquisition, traitement et interprétation des données — aboutissant à un rapport final intégrant des résultats exploitables pour la compréhension géologique et hydrogéologique du milieu.

Tableau 33: les méthodes géophysiques par profondeur d'investigation.

Type de géophysique	Méthodes principales	Profondeur d'investigation	Domaines d'application
Superficielle	Électrique, électromagnétique, géoradar (GPR)	Quelques mètres à quelques dizaines de mètres	Hydrogéologie locale, archéologie, travaux publics, suivi environnemental
Semi-profonde	Sondages électriques verticaux (SEV), sismique réfraction, magnétométrie	De quelques dizaines à quelques centaines de mètres	Délimitation d'aquifères, recherche minière peu profonde, génie civil
Profonde	Sismique réflexion, gravimétrie, magnétisme, diagraphies de forage	Centaines à milliers de mètres	Exploration pétrolière et gazière, ressources minières profondes, structure de la croûte terrestre

II. 4. Prospection électrique

la prospection électrique est une méthode géophysique basée sur la mesure de la résistivité des terrains, influencée par la lithologie, la porosité, la teneur en eau et la salinité **(Telford et al., 1990 ; Parasnis, 1997)**. Elle se décline principalement en sondages électriques verticaux (SEV), utilisés pour étudier la stratification du sous-sol, et en profilages électriques, destinés à détecter les variations latérales et les structures conductrices.

Sa profondeur d'investigation, qui varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres, lui confère un large champ d'application : hydrogéologie (recherche des aquifères), exploration minière, génie civil (fondations, infrastructures), agriculture, archéologie et études environnementales **(Kirsch, 2009)**.

Les développements technologiques, notamment l'introduction des dispositifs multi-électrodes et de l'imagerie électrique 2D/3D, permettent aujourd'hui une meilleure résolution des structures du sous-sol **(Loke, 2004)**. Le principe de base, introduit dès **(Maxwell, 1976)**, repose sur l'utilisation de quatre électrodes pour injecter le courant et mesurer la différence de potentiel, constituant ainsi la base des configurations classiques encore en usage.

a. La Résistivité, Potentiel et Champ électriques

La résistivité est une propriété physique qui traduit l'aptitude d'un matériau à s'opposer au passage du courant électrique. Elle se définit par la relation :

$$R=\rho\, L / S$$

où R est la résistance (en Ohms), L la longueur du cylindre rocheux traversé par le courant (en m), S sa section (en m^2), et ρ la résistivité (en Ohm·m), grandeur caractéristique du matériau.

Lorsqu'une électrode injecte un courant électrique I à la surface d'un demi-espace homogène de résistivité ρ, le potentiel mesuré à une distance r de cette électrode est donné par :

$$V= I\rho / 2\pi r$$

Cette relation montre que, dans un milieu homogène et isotrope, les surfaces équipotentielles sont disposées concentriquement autour de l'électrode de courant, formant ainsi des hémisphères centrés sur celle-ci. En pratique, toutefois, le courant est injecté à travers deux électrodes (pôles A et B), ce qui modifie la répartition des équipotentielles. Celles-ci conservent néanmoins une symétrie et reflètent la répartition du champ électrique généré dans le sous-sol.

Ces principes constituent la base théorique des méthodes électriques en géophysique. Ils expliquent la sensibilité de la prospection électrique aux contrastes de résistivité, contrastes eux-mêmes liés à la lithologie, à la porosité et à la présence ou non de fluides conducteurs dans les formations géologiques.

b. Les mesures électriques

Les courbes représentées **(Fig.58)** montrent que le potentiel et son gradient, le champ, évoluent de manière sensiblement uniforme au voisinage du milieu de l'intervalle qui sépare les deux pôles, tandis que la plupart de la chute de potentiel se situe au voisinage immédiat de chacun d'eux. La résistance du volume de terrain compris entre ces deux surfaces est déterminée par la chute entre deux équipotentielles divisée par le courant émis, ce qui implique que la résistance du sol entre ces deux prises provient principalement du voisinage immédiat de ces dernières. Étant donné que le reste du terrain apporte une contribution très faible, il serait évident que l'étude de la résistance entre deux prises ne permettrait pas de déterminer sa nature **(Kunetz, 1958)**.

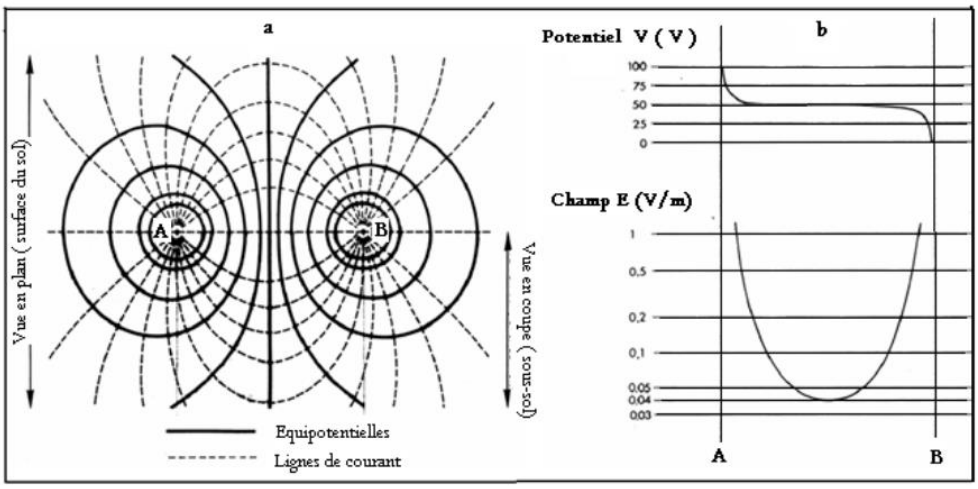


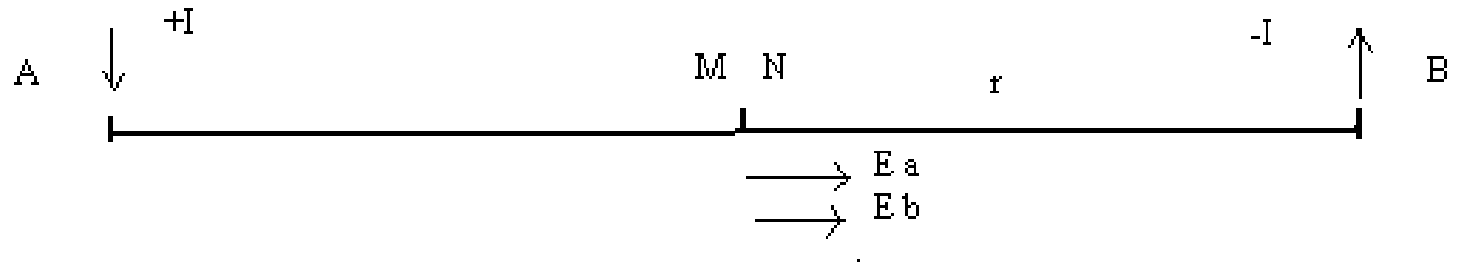
Fig. 58 : Equipotentielles et lignes de courant dans un sol homogène.

c. Les sondages électriques

Fox **(in Meunier, 1976)** a déjà employé certaines techniques électriques pour la prospection du sous-sol en 1833, puis Maxwell en 1891 suggéra l'utilisation de 4 électrodes, mais ce n'est qu'à partir de 1912 que Conrad Schlumberger a posé les fondements de la prospection électrique en développant notamment la notion de résistivité apparente. Effectivement, lorsque le demi-espace est composé de couches stratifiées, son idée a été de prendre en compte cette résistivité apparente, qui correspond à la résistivité du milieu homogène, qui offre le même potentiel avec le même dispositif d'émission et de mesure. Nous utiliserons cette définition ci-dessous. Cette valeur est déterminée pour une structure horizontale en fonction de la configuration des électrodes.

c. 1. Sondage Schlumberger

Parmi les dispositifs de mesure employés, le quadripôle **(Schlumberger, 1925)** a été jugé le plus satisfaisant dans la plupart des applications. Parmi les instruments de mesure utilisés, le quadripôle Schlumberger **(Fig.59)** a été considéré comme le plus efficace dans la majorité des cas.



MN de dimension négligeable au milieu de AB

Fig.59 : Dispositif Schlumberger.

D'après le principe de superposition, le champ au milieu de AB est la somme des champs dus aux pôles +I et –I.

c. 2. Sondage Wenner

Les électrodes de mesure sont cette fois-ci distantes le tiers (1/3) de la longueur AB. Les bénéfices par rapport au dispositif précédent sont :

- une structure d'électrodes toujours la même : AM = MN = NB
- une augmentation de la différence de potentiel mesurée, ce bénéfice étant réduit par l'augmentation des courants telluriques.

Toutefois, les bénéfices du système Schlumberger sont plus significatifs. Effectivement :

- Les différences locales perturbent davantage les mesures lorsque les électrodes de mesure MN passent à leur aplomb qu'au moment où les pôles d'envoi AB passent.

De cette manière, on évitera les coups de prise, ou plutôt on les maintiendra constants, à l'intérieur de chaque série de mesure correspondant au même MN.

En ce qui concerne le Wenner **(Fig.60)**, la sensibilité est répartie horizontalement, ce qui implique qu'il sera plus sensible à une variation verticale de la résistivité. En revanche, le Schlumberger présente un comportement intermédiaire.

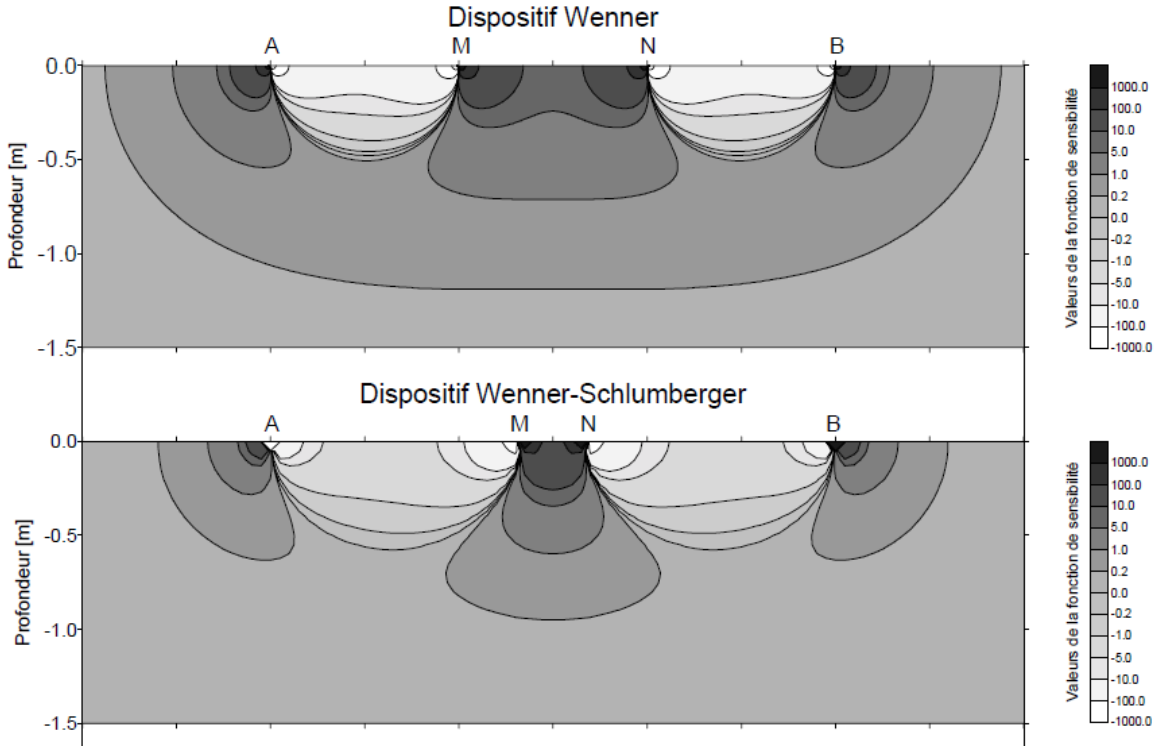


Fig. 60 : Fonction de sensibilité pour certains dispositifs **(Chapellier, 2001)**.

c. 3. Sondage Dipôle

L'introduction de cette technique relativement récente remonte à **(Alpin, 1950)**. Elle emploie des lignes de transmission AB et de réception MN de petite taille en fonction de leur distance **(Fig.61)**.

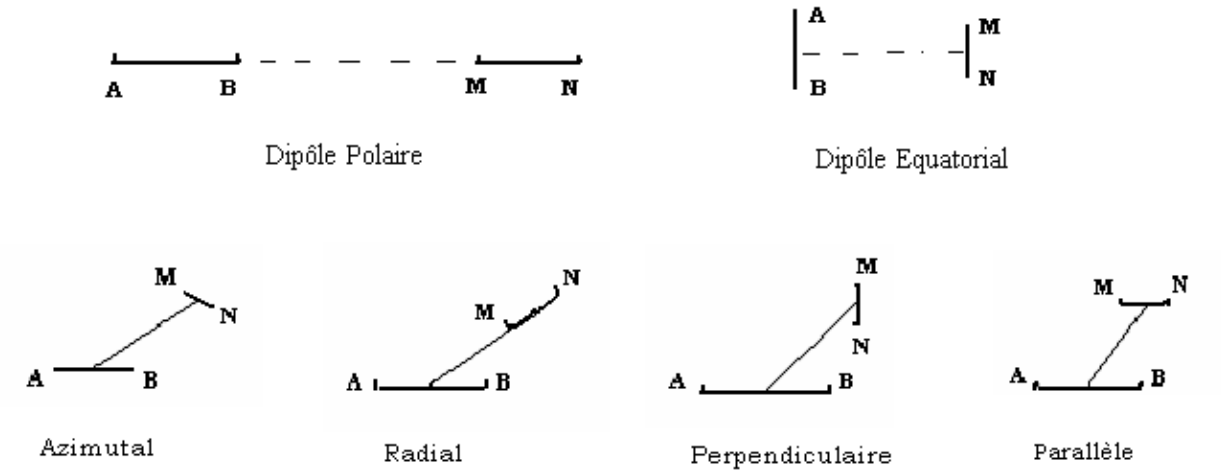


Fig.61 : Différentes configurations du dispositif Dipôle.

Ces sondages ont d'abord été testés sur des profondeurs de pénétration supérieures à quelques km. Effectivement, ils nécessitent moins de câbles à dérouler, mais il est nécessaire de fournir une puissance

supplémentaire à la source afin de compenser la faiblesse du champ. Il semble que **(Zohdy, 1969)** ait été le premier à utiliser le dispositif dipolaire dans un but hydrogéologique pour des profondeurs basses.

Afin d'y parvenir, il employa la relation essentielle (voir ci-dessous) entre les résistivités apparentes mesurées avec le dispositif Schlumberger et celles mesurées avec le dipôle. De cette manière, les outils d'interprétation largement disponibles pour les mesures obtenues avec le premier dispositif peuvent être utilisés pour traiter les mesures issues du second dispositif.

Une démonstration géométrique plus simple peut être utilisée pour établir cette relation déjà établie par **(Alpin , 1950)** dans une étude algébrique complète. Elle sert de fondement aux calculs actuels pour transformer les valeurs de résistivité apparentes d'un dispositif à un autre, en utilisant l'analyse numérique, comme nous le verrons plus loin.

Les variations latérales sont plus importantes pour le dipôle-dipôle dont la fonction de sensibilité est étalée verticalement **(Fig. 62)**.

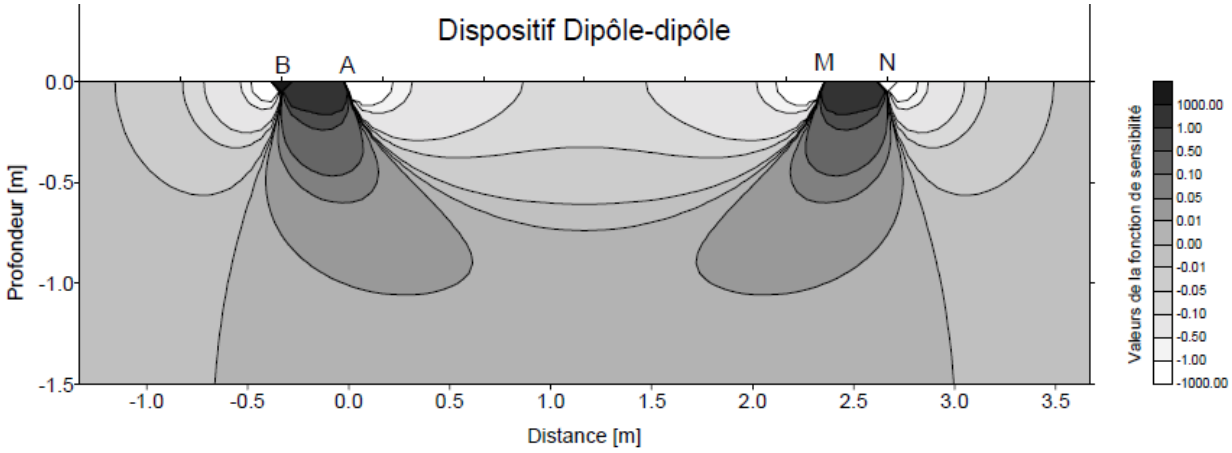


Fig. 62 : Fonction de sensibilité pour certains dispositifs **(Chapellier, 2001)**.

II. 5. Propriétés électriques des roches

Les techniques géophysiques reposent sur la mesure des caractéristiques physiques des roches ; l'objectif est de comprendre leur répartition dans l'espace. La densité, le module de Young, le coefficient de Poisson, la susceptibilité magnétique, la résistivité, la conductivité et les vitesses de propagation des ondes dans les milieux élastiques sont les principales caractéristiques de l'écorce terrestre. La résistivité ρ est la caractéristique la plus importante en prospection électrique parmi les caractéristiques mentionnées précédemment.

L'eau de mer présente une résistivité allant de 0.18 à 0.23 Ohm.m . La résistivité de l'eau provenant des sources ordinaires est généralement de 10 Ohm.m pour les roches sédimentaires et de 30 à 150 Ohm.m pour les roches ignées. Selon l'expérience, il semble que la résistivité d'une roche ne soit pas constante, même dans une région

géologiquement connue. Cependant, afin d'interpréter correctement les mesures électriques, il est essentiel de connaître les valeurs moyennes de résistivité des roches.

La résistivité des roches est influencée par les facteurs suivants : La résistivité des minéraux qui constituent la partie dure de la roche est influencée par plusieurs facteurs : l'humidité, la porosité et la structure des roches.

Les valeurs de porosité, de perméabilité et de résistivité électrique de certains types de roches sont présentées dans le **tableau 34**.

Tableau 34 : Porosité, perméabilité et résistivité électrique **(Chapellier, 2000)**.

Roches	Porosité (%)	Perméabilité (cm/s)	Résistivité (Ohm.m)
Argilite	35	$10^{-8} – 10^{-9}$	70 – 200
Craie	35	10^{-5}	30 – 300
Tuf volcanique	32	10^{-5}	20 – 300
Marnes	27	$10^{-7} – 10^{-9}$	20 – 100
Grés	3 -35	$10^{-3} – 10^{-6}$	30 – 800
Dolomite	1 -12	$10^{-5} – 10^{-7}$	200 – 10000
Calcaires	3	$10^{-10} – 10^{-12}$	200 – 10000
Métaschistes	2.5	$10^{-4} – 10^{-9}$	300 – 800
Gneiss	1.5	10^{-8}	1000 – 20000
Quartzite	< 1	10^{-10}	1000 – 10000
Granite	1	$10^{-9} – 10^{-10}$	1000 – 15000
Gabbro	1 – 3	$10^{-4} – 10^{-9}$	6000 – 10000
Basalte	1.5	$10^{-6} – 10^{-8}$	800 – 15000

II. 6. L'interprétation d'un sondage électrique

En théorie, chaque modèle de sous-sol correspond à une courbe de sondage électrique unique. Toutefois, dans la pratique, différentes distributions de résistivités peuvent générer des courbes similaires, ce qui entraîne une ambiguïté d'interprétation, constitue une limite intrinsèque des méthodes électriques **(Telford et al., 1990 ; Parasnis, 1997)**. Pour y remédier, il est indispensable de combiner l'inversion numérique aux données géologiques et hydrogéologiques disponibles.

II. 7. Construction et interprétation des cartes et profils de résistivité

a. Construction de coupes géoélectriques

Les coupes géoélectriques constituent un outil fondamental pour la représentation spatiale et l'interprétation des résultats issus des sondages électriques. Elles permettent de traduire les variations de résistivité en fonction de la profondeur et de mettre en évidence la structuration des formations géologiques et hydrogéologiques.

Leur élaboration repose sur plusieurs étapes méthodologiques : Orientation de la coupe généralement, la coupe est tracée perpendiculairement aux axes structuraux majeurs afin d'optimiser la lecture des contrastes lithologiques et tectoniques **(Parasnis, 1997)**.

Mise à l'échelle et tracé altimétrique : une échelle verticale et horizontale appropriée est choisie pour garantir la lisibilité et la précision, puis le profil altimétrique est reporté.

Intégration des résultats de sondage : chaque sondage est représenté par les niveaux de résistivité et les épaisseurs correspondantes. Lorsque l'on dispose d'un sondage de référence (ou sondage étalon) dont le log lithologique est connu, celui-ci est utilisé comme base de calage et de validation des interprétations **(Telford et al., 1990)**.

Interpolation et tracé des isorésistivités : les points de mesure et les valeurs obtenues sont ensuite interpolés afin de construire les contours (isovaleurs) qui permettent d'obtenir la coupe géoélectrique finale.

Ces coupes offrent une représentation synthétique du sous-sol et facilitent la corrélation entre les différentes stations de sondage. Elles constituent ainsi une étape essentielle pour la compréhension de l'architecture géologique et pour la détection des horizons aquifères, particulièrement dans les contextes arides et semi-arides où l'eau souterraine représente une ressource stratégique **(Milsom, 2003 ; Reynolds, 2011).**

b. Construction de la carte d'isorésistivité

Après avoir représenté toutes les coupes envisageables, on évalue les zones résistantes (généralement des résistivités supérieures à 60 Ohm.m et inférieures à 1000 Ohm.m), ce qui nous permettra de sélectionner la longueur "AB" pour la création des cartes en isorésistivité. Après avoir identifié les zones résistantes, on évalue la profondeur de ces zones, ce qui guidera le choix de la longueur "AB" (on sait que la profondeur de pénétration est généralement donnée par : $AB/10 \leq hp \leq AB/4$). Après avoir déterminé AB, la valeur de la résistivité apparente correspondant à AB déterminé précédemment est reportée pour chaque sondage.

Après avoir obtenu les valeurs, on effectue le traçage des courbes d'isovaleurs en utilisant le principe de triangulation. Les zones conductrices et résistantes sont définies par la carte d'isorésistivité.

c. Interprétation des profils et cartes de résisitivité

Souvent, les profils et les cartes de résistivité ne donnent qu'une interprétation qualitative. Il est possible de reporter les valeurs des résistivités apparentes mesurées le long des profils, ce qui permet d'obtenir des courbes dont les anomalies peuvent être corrélées de manière intéressante entre les différents profils. En plus des

données géologiques hydrogéologiques, l'interprétation nécessite également des informations géologiques. La combinaison de toutes ces informations peut conduire le géophysicien à repérer les zones conductrices ou résistantes, ce qui peut entraîner la proposition de forages d'exploitation.

III. L'application géophysique dans la zone étudiée

Pour l'hydrogéologue, les méthodes géophysiques sont des outils susceptibles de répondre à des questions relatives aux eaux souterraines **(Guérin, 2005)**. Mais pour que les méthodes géophysiques puissent apporter un maximum d'informations, il faut de la part des hydrogéologues des interrogations bien précises. Notre choix de méthodes et de techniques de mesures ainsi que leur mise en œuvre et les interprétations des données acquises sur le terrain, étaient guidés par les interrogations spécifiques au contexte de notre étude. Par conséquent, dans le cadre des présents travaux de recherche et après les premières missions de reconnaissance hydrogéologique et l'assistante de suivi de quatre forages situé dans les deux sites expérimentaux, nous avons choisi d'employer la méthode électrique. Tenant en considération les travaux déjà réalisés avec certaines techniques de mesures sur la même région.

III. 1. La prospection électrique dans la région Fort Lotfi

Dans le cadre de l'étude de détermination des ressources en eau souterraines dans la partie Nord-Ouest du bassin de Tindouf, l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et Direction de l'Hydraulique de Tindouf a planifié une étude géophysique par prospections électriques dans la région de Fort Loti, qui couvre une superficie d'environ 320 km2 **(Fig. 63)**.

a. Interprétation des coupes géoélectriques

Globalement, les coupes effectuées sont orientées sud-est, nord-ouest et présentent des similarités géologiques et tectoniques. Effectivement, tous les profils se composent de couches géologiques avec des résistivités pratiquement équivalentes pour les horizons correspondants et sont impactés par des accidents tectoniques.

Toutes les coupes géoélectriques sont divisées en plusieurs compartiments, avec une partie nord-ouest généralement surélevée et une partie sud sensiblement affaissée **(Fig. 64)**.

Trois accidents tectoniques ont eu un impact sur cette coupe géoélectrique, situés respectivement entre les SE G3 et G4, G4 et G5, G5 et G6. Les épaisseurs et les résistivités enregistrées divisent ce profil en quatre compartiments distincts.

Le premier compartiment se compose d'un horizon conducteur ($37 < \rho > 69$ Ohm/m), épais d'environ 90m et dont la lithologie est principalement argileuse en comparaison avec les formations du D3. Il est équipé d'une lentille très solide qui entre en contact avec la faille (ρ=768 Ohm/m). La résistivité de cette roche magmatique massive et compacte est liée à celle des dolérites, qui ont été identifiées dans le forage pétrolier Ng-1 où leur part a atteint 30% de la couche géologique du Dévonien supérieur.

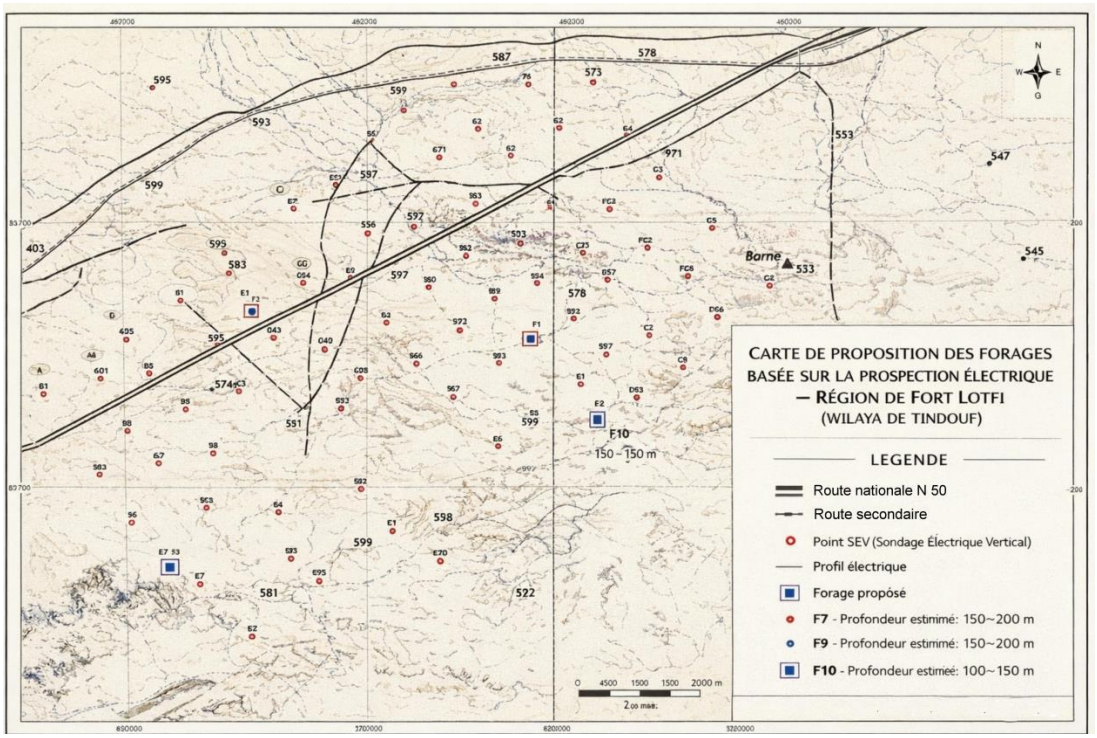


Fig. 63 : Catre de prospection électrique de la région Fort Lotfi **(ANRH, 2008)** modifié.

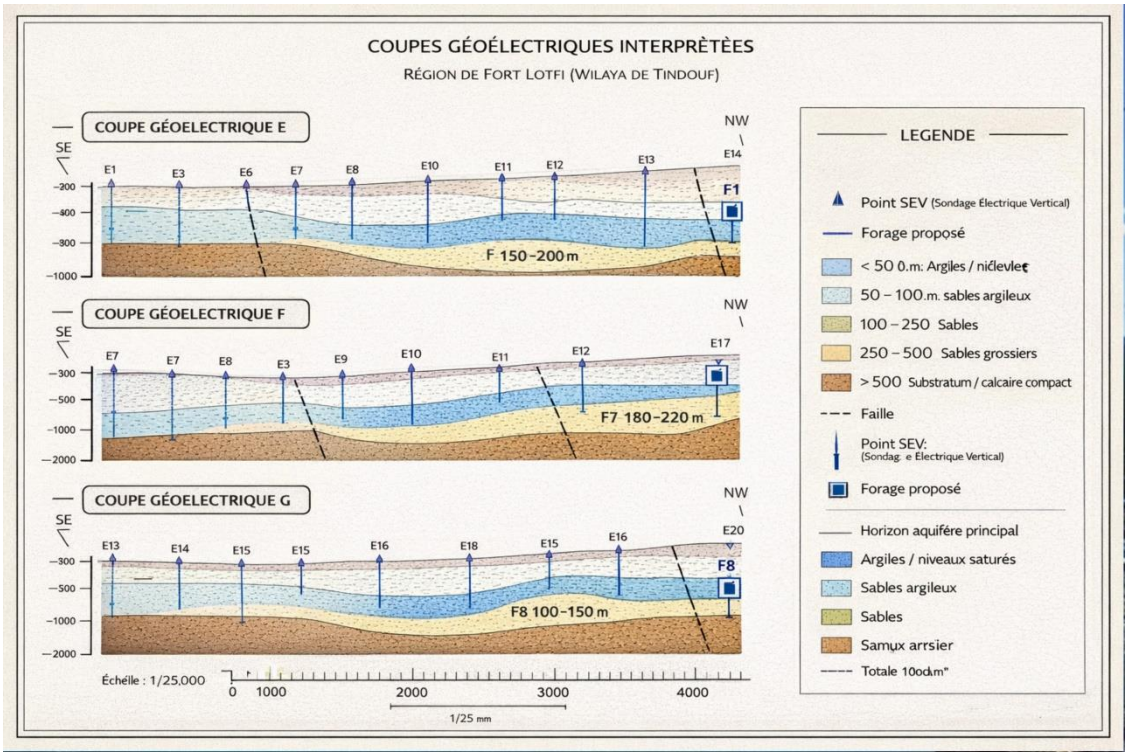


Fig. 64: Coupes géoélectriques de la région Fort Lotfi **(ANRH, 2008)** modifié.

Dans le deuxième compartiment, on constate immédiatement une grande résistance sous la couche "hamadienne" grâce aux hautes résistivités affichées (ρ = 2650 Ohm/m) des terrains composés de grès quartzeux se transformant en quartzites. C'est un niveau du Dévonien inférieur et moyen.

Les résistivités de l'horizon sous-jacent sont similaires à celles des grès du deuxième banc d'âge Ordovicien.

3ème compartiment, Un horizon épais de 80m, très résistant, se dévoile partiellement dans le troisième compartiment, avec une résistivité de 555 ohm/m. Ces formations de grès compacts et quartzeux sont des formations du Dévonien inférieur et moyen.

4ème compartiment, Quatre perspectives se succèdent dans le 4ème compartiment. Les formations du Dévonien inférieur et moyen très résistantes (ρ = 1429 Ohm/m), sous le Néogène, reposent en discordance sur un niveau assez résistant (ρ = 104 Ohm/m), même sous-jacentes aux terrains gréseux très compacts du 2ème Bani d'âge Ordovicien.

b. Tableau d'échelle de résistivités adoptées

La méthodologie suivie dans l'interprétation des valeurs de la résistivité électrique est basée sur l'existence ou l'absence d'un aquifère **(tableau 35)**.

Tableau 35 : Echelle de résistivités électriques des formations lithologiques peuvent constituer ou non des aquifères.

Lithologie	Age	Résistivités Adoptées en Ohm.m	Observations
Calcaire plus ou moins silicifié	Néogène (complexe terminal)	70-160 200-1200	Aquifère faibles débits
Argiles et argilites, grés consolidés avec intercalation de calcaires	Carbonifère supérieur	13à 58 99 à 236	Aquifère probable si ρ 90 – 100 Ohm.m
Argilites, grés friables cloisonnés par des argiles. Dolorites.	Dévonien supérieur	20- 40, 50- 120 et + 798	Aquifère probable si Le toit de la formation est proche du sol et$70< \rho < 100$ ohm.m
Argilites, passées calcaires siltstones, argilites et larnes massives pyritisées	Dévonien moyen	>500	Pas d'Aquifère
Argilites marnes massives omprenant de la pyrite, grés fins quartzeux, compacts, calcaires argileux	Dévonien inférieur	99- 253	Aquifère probable si Les grés présentent des résistivités de l' ordre de 70-110 ohm.m
Grés plus ou moins consolidés Grés compacts, quartzites	Silurien	85- 144 250- 300- 650	Aquifère probable Pas d'Aquifère
Grés quartzeux. Quartzites	Combro-Ordovicien	> 700	Pas d'Aquifère

c. **Interprétation des cartes de résistivités**

Les cartes de résistivités ont été créées en se basant sur les résistivités observées, dans le but de différencier les différentes formations présentes. Il y a trois cartes établies pour des longueurs de 60m, 300m et 600m (**Fig. 65, 66 et 67)**.

1. Carte en AB= 60m : Une profondeur d'investigation d'environ AB/ 4 a été établie pour cette carte, soit 60 / 4 = 15m **(Fig. 65)**. Dans la partie nord-ouest de la zone d'étude, l'analyse de la carte révèle que les zones intermédiaires, situées sur la ligne reliant les SE B2 à C1, B3 à C2 et B4 à D2, d'une part, et plus au sud et au sud-est sur les lignes reliant les sondages électriques A5 à B4, D5 à E5 et D5 à E5, ont respectivement des résistivités de 90, 110 et 150 à 170 ohm/m. Ces terrains sont généralement ceux du Tertiaire Continental, composé de calcaire, de calcaire marneux, de sables, de sables argileux et de petits conglomérats. Les résistivités sont moins élevées dans les autres zones, elles sont inférieures à 70 Ohm/m.

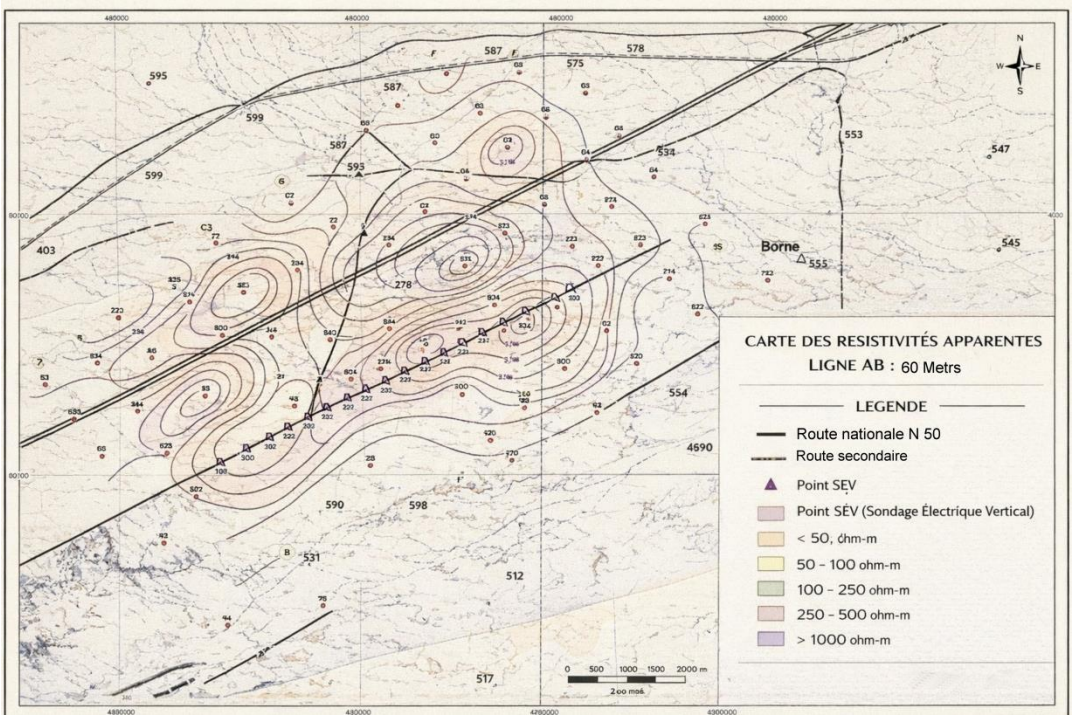


Fig. 65: Catre des résistivités apparentes Ligne AB=60 de la région Fort lotfi **(ANRH, 2008)** modifié.

2. Cartes en AB =300 : La profondeur d'investigation varie de 50 à 75 mètres **(Fig. 66)**. En examinant ces deux cartes, on constate que celles-ci présentent une configuration similaire. Au sud-est de la zone d'étude, les valeurs de résistivité allant de 200 à 260 Ohm/m et plus sont principalement localisées autour des SE B5, C6 et à l'est du SE F7. Elles concernent respectivement les formations du Silurien, qui sont constituées de grès consolidés, et les terrains du Dévonien inférieur et moyen, qui sont composés de grès compacts.

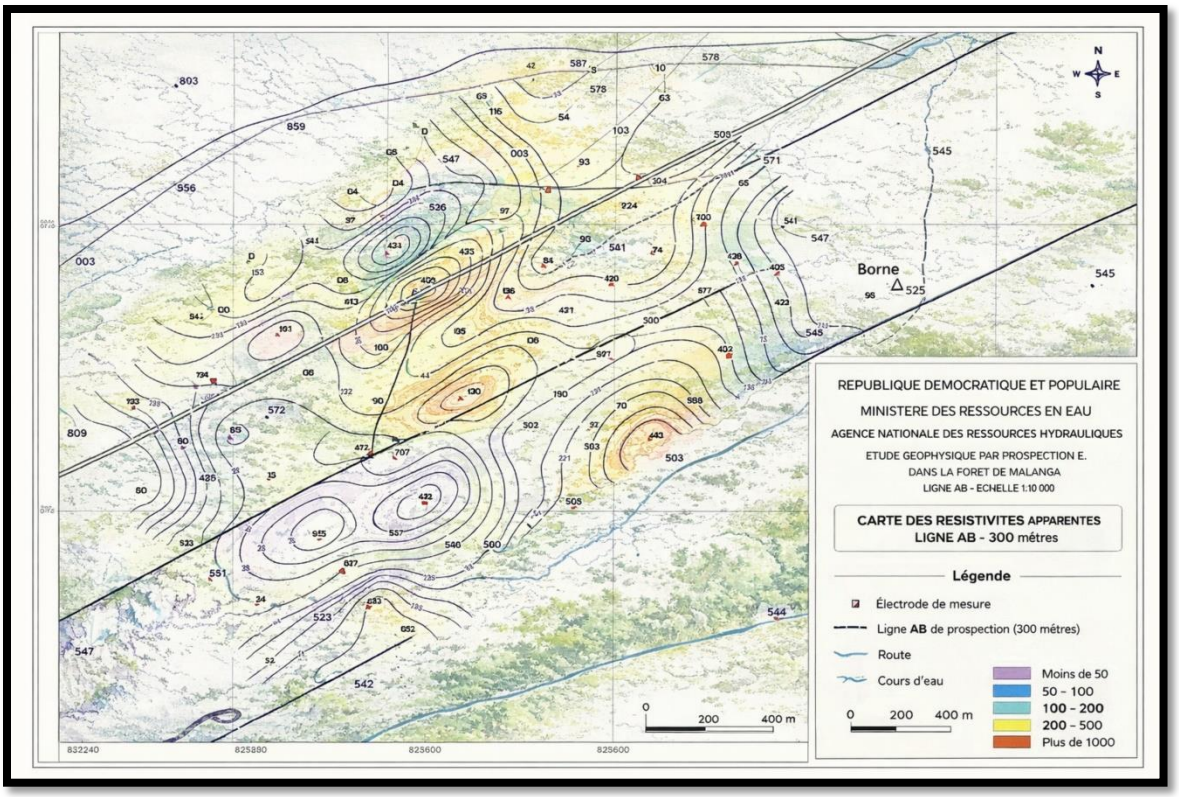


Fig. 66: Catre des résistivités apparentes Ligne AB=300m de la région Fort Lotfi **(ANRH, 2008)** modifié.

3. Cartes en AB =600 : profondeur d'investigation d'environ 150m **(Fig. 67)** l'analyse de cette carte montre que toutes les hautes résistivités (300 à 460 Ohm/m) sont concentrées entre les SE A1et B3 d'une part et des SE A4 et B4 , B6 et C6 d'autre part On remarquera ces hautes résistivités à l'est des SE F6, F7, et F8 toutes ces résistivités correspondraient aux formations en place appartenant au Silurien dont la puissance reconnue dans le forage ASj-1 est de361m dans les autres zones de la carte, les résistivités s'échelonnent 120 et 300 ohm/m. Elles seraient relatives à la zone surélevée (NW) et affectée d'accidents tectoniques à la faveur desquels les différents horizons du Silurien et du D1et D2 sont remontés vers la surface du sol.

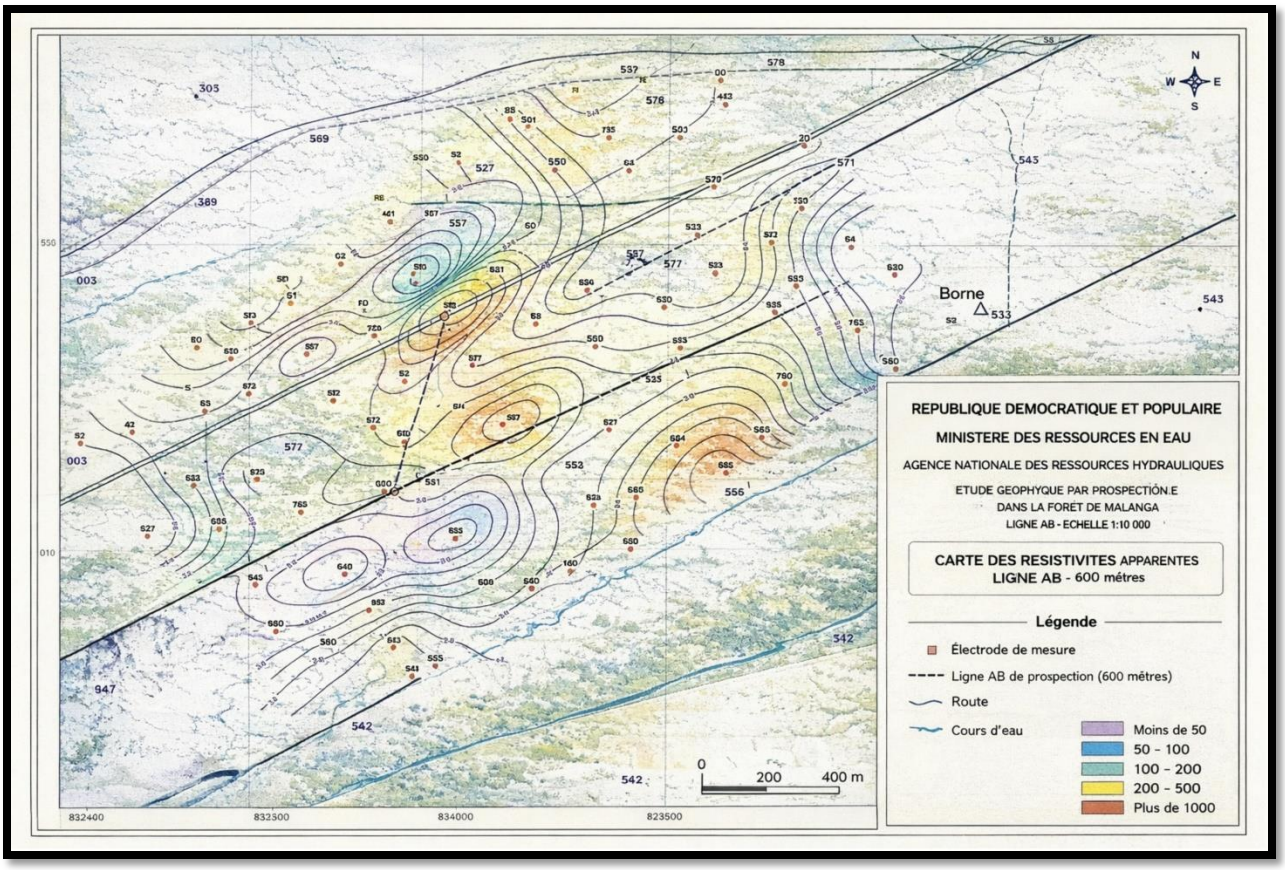


Fig. 67: Catre des résistivités apparentes ligne AB=600m de la région Fort Lotfi **(ANRH, 2008)** modifié.

d. Tableau de proposition des forages a implanté

Il présente, pour chaque site proposé, les coordonnées géographiques, la profondeur recommandée, la formation aquifère ciblée ainsi que les caractéristiques géophysiques associées, notamment les valeurs de résistivité interprétées. Ce tableau constitue un outil d'aide à la décision permettant de hiérarchiser les sites favorables à l'implantation de nouveaux forages, en tenant compte à la fois du potentiel hydrique, des contraintes géologiques et des conditions techniques d'exploitation.

Tableau 36 : Proposition des points d'eau dans la région Fort Lotfi.

Coupe	Localisation des forages/Sev	Profondeur (M)	Formation (S) A Capter	X (km)	Y (km)
A	F1 au SE A7	120	Silurien	243913	3203858
A	F2 entre SE A5 et A6	130	Silurien	241890.5	3206611.5
C	F3 entre SE C2 et C3	60	Dévonien Sup	241890.5	3206611.5
E	F4 entre SE E6	150	Dévonien Sup et D_1-D_2	255686	3215015
E	F5 entre SE E8	100	Dévonien Sup et D_1-D_2	258062	3211827

III. 2. La prospection électrique dans la région de Hassi Khebbi

Dans la région de Hassi khebbi, les affleurements sont rares. Il existe toutefois un certain nombre de documents et de travaux exploitables, il a été sollicité par autorités locales une adduction sur 38 km à partir des forages. La carte de résistivité apparente réalisée pour une ouverture AB = 100 m **(Fig.68)** met en évidence une forte hétérogénéité électrique de la zone de Hassi Khabbi. Une anomalie résistive marquée, atteignant des valeurs supérieures à 600 Ohm.m, occupe la partie centrale de la zone et pourrait correspondre à un substratum compact ou à des formations sableuses sèches. À l'inverse, des anomalies conductrices (< 100–150 Ohm.m), disposées principalement selon des axes NNE–SSW, traduisent la présence de niveaux argileux ou de zones fracturées potentiellement saturées en eau. Ces couloirs conducteurs constituent des secteurs favorables à la circulation des eaux souterraines et représentent des cibles prioritaires pour l'implantation de forages.

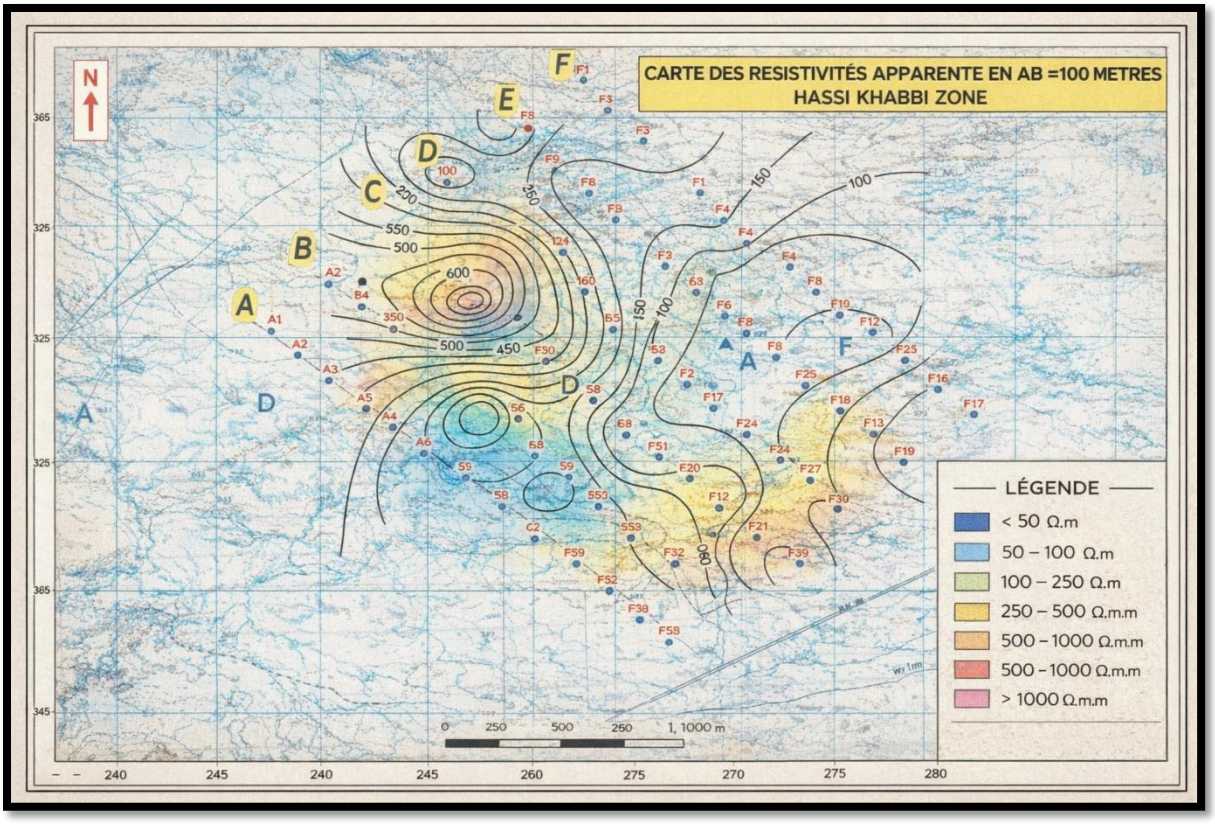


Fig. 68: Carte de résistivité apparente en AB= 100m de la région de Hassi Khebbi **(ANRH, 2004)** modifié.

a. Interprétation des coupes géoélectriques

Les coupes géoélectriques A , B , C , D , E et F sont toutes d'orientation Sud Est – Nord Ouest. Sur ces profils géoélectriques il est mis en évidence des terrains distincts sur le plan des résistivités et des épaisseurs. Dans les coupes A et B le premier niveau résistant, dans les trois compartiments de résistivités l50 à 500 ohm-m variant d'épaisseur d'une trentaine à une quinzaine de mètres du N-O au S-E, représente la carapace calcaire très dure Hammadienne.

Celles-ci correspondent à la lithologie des terrains en place représentés par des grès quartzitiques très compacts. L'ensemble décrit ci-dessus est attribué aux formations du Carbonifère inférieur (Série Tazout -Tournaisien).

Ces résistivités (20 à 40 Ohm.m) sont représentatives des formations du Dévonien supérieur où la lithologie des terrains en place est à dominante argileuse .

Les hautes résistivités (90 et supérieures à 120 Ohm-m) enregistrées dans le premier compartiment sur les deux coupes pourraient correspondre à la présence de passage de dolérites dans cette couche.

Celles-ci correspondraient aux formations du Cambro -Ordovicien**,** dont le faciès est grèso- quartzeux et quartzitique.

Le profil « C » est affecté de deux failles verticales : la première située entre les SE C 4 et C 5 et la seconde entre les SE C 9 et C 10 . Ainsi on distingue trois compartiments.

Dans sa partie sommitale des résistivités de 40 ohm-m et dans le reste de la couche des résistivités de 20 à 38 ohm-m. Celles ci sont représentatives d'une lithologie argileuse et argilo - silteuse avec présence au droit des SE C 3 et C 4 de calcaires argileux appartenant aux formations du **Dévonien supérieur.**

Le profil « D» est affecté de trois failles verticales : la première située entre les SE D4 et D5, la seconde entre les SE D9 et D10 et la troisième entre le SE D 12 et D 13. Ainsi on distingue quatre compartiments.

Sur ce profil géoélectrique il est mis en évidence des terrains distincts sur le plan des résistivités et des épaisseurs (**Fig. 69)**.

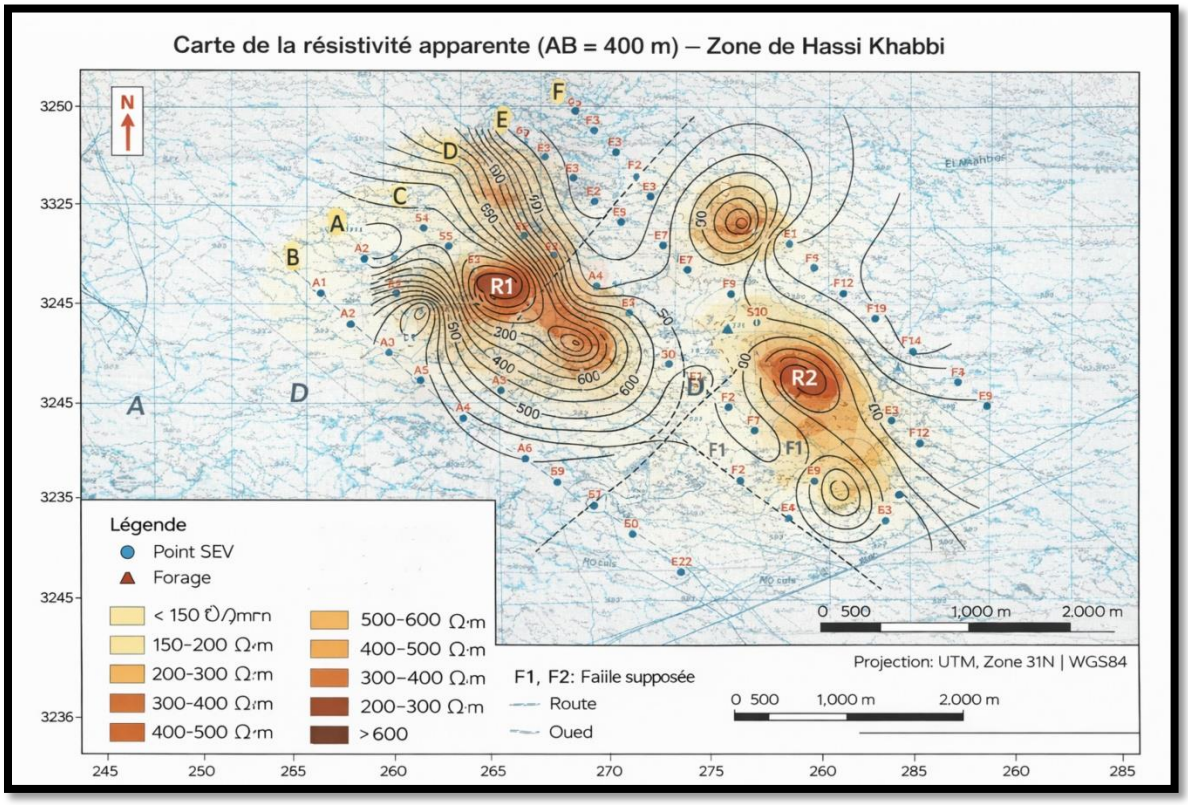


Fig. 69: Carte de résistivité apparente en AB= 400m dans la région de Hassi khebbi **(ANRH, 2004)** modifié.

Les deux profils E et F sont affectées par deux failles verticales .Elles présentent chacune trois compartiments constitués par cinq horizons distincts les uns des autres par leurs épaisseurs et les résistivités enregistrées. Tous ces horizons sont coiffés en surface par un niveau, très résistant et d'épaisseur de cinquante mètres en moyenne constituant la carapace calcaire Hamadienne .Ces couches géologiques sont inclinées sous un faible angle du S-E vers le N-O (**Fig. 70)**.

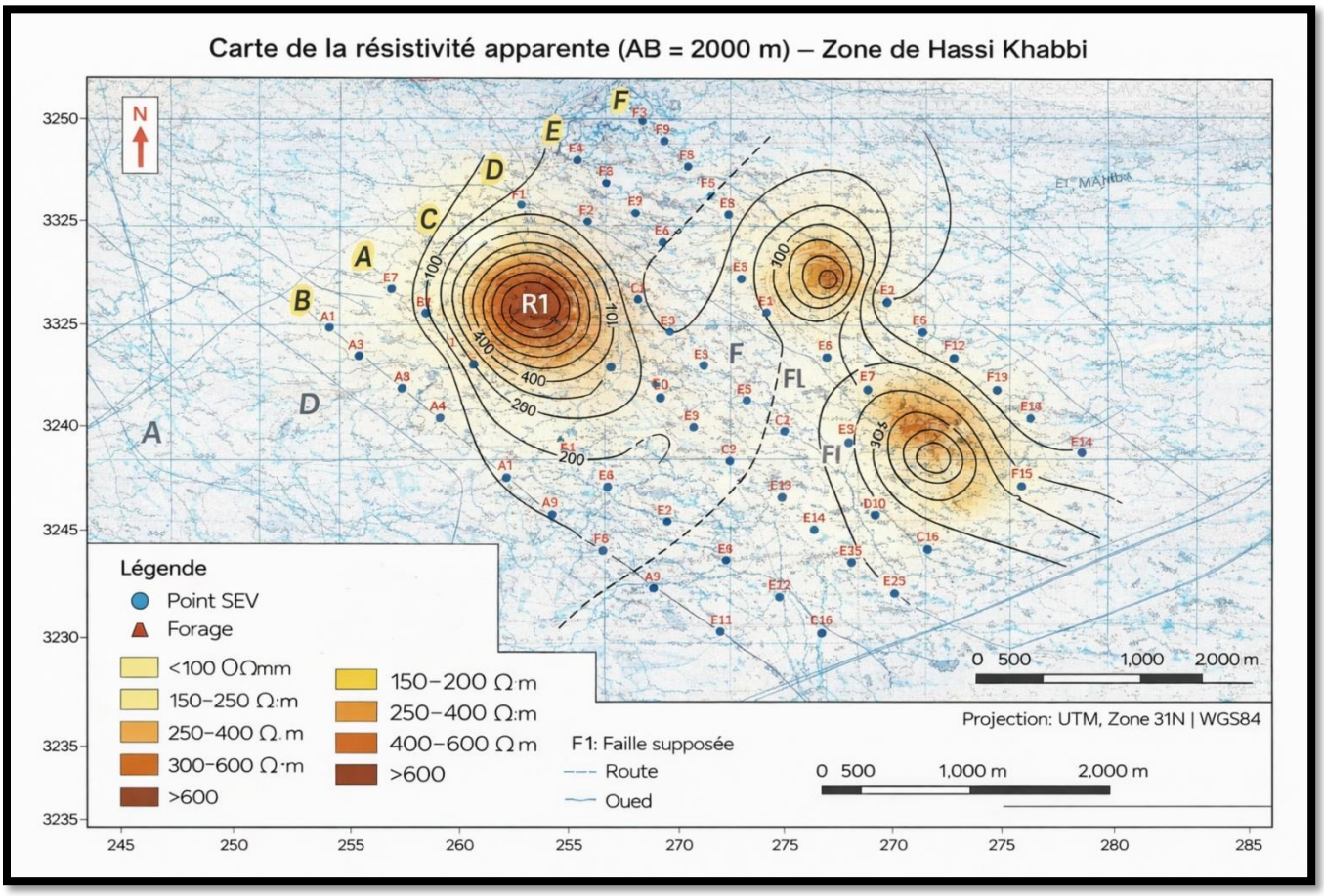


Fig. 70: Carte de résistivité apparente en AB= 2000m dans la région de Hassi khebbi **(ANRH, 2004)** modifié.

b. Tableau d'échelle de résistivités adoptées

La méthodologie suivie dans l'interprétation des valeurs de la résistivité électrique est basée sur l'existence ou l'absence d'un aquifère **(tableau 37)**.

Tableau 37 : Echelle de résistivités électriques des formations lithologiques.

Lithologie	Age	Résistivités adoptées en Ohm-m	Observations
Calcaire plus ou - moins siliciflé	Néogène (Tertiaire Continental ou TC)	150 - 500	Aquifère, faibles débits
Siltstones ,quartzites et argilites	Carbonifère	200-400	Aquifère très peu probable
Argilites, calcaires renfermant de la pyrite (FeS_2), siltstones et grès quartzeux, dolérites.	Dévonien supérieur	20 -40 , 50- 100 et >120	Aauifère probable Si le toit de la formation est proche du sol et ρ <100 ohm-m
Argilites, passées calcaires siltstones ,argilites et marnes massives pyritisées.	Dévonien moyen	>500	Pas d'aquifère,
Argile, grès fins quartzeux, compacts , calcaire argileux	Dévonien inférieur	30-150	Aquifère à capter par forage peu profond («150-300 m). En profondeur des traces de pétrole et de gaz ont été constatées dans la boue de forages pétroliers réalisés dans la région.
Argilites et marnes massives pyritisée Faciès à dominante argileuse. Schistes et grès du ''Bani ''	Silurien : Gothlandien Ordovicien	50 à 90	Aauifère probable auand ces formations sont proches du sol. En profondeur celles ci renferment des traces de pétrole et de gaz
Grès quartzitiques et quartzites	Cambro-Ordovicien	> 1000	Pas d'aquifère.

C. Tableau de proposition des Forages à implanter

Ce tableau, pour chaque site proposé, les coordonnées géographiques, la profondeur recommandée, la formation aquifère ciblée. Il présente constitue un outil d'aide à la décision permettant de hiérarchiser les sites favorables à l'implantation de nouveaux forages, en tenant compte à la fois du potentiel hydrique.

Tableau 38 : Proposition des points d'eau dans la région Hassi Khebbi.

Coupe	Localisation	Profondeur (m)	Formation(s) à capter	X UTM	Y UTM
A	F1 au SE A5	100	T Cet carbonifère	252.850	3241.459
A	F2 au SE A12	150	T C, carbonifère et dévonien supérieur	262.625	3231.375
B	F3 au SE Bll	150	T C et dévonien supérieur	264.082	3235.596
B	F4 au SE B12	150	T C et dévonien supérieur	265.477	3234.121
C	F5 au SE C8	200	T C et Dévonien inférieur	262.887	3242.618
C	F6 au SE C13	200	T C et Dévonien supérieur	269.869	3235.388
D	F7 au SE D10	150	T C et dévonien inférieur	268.510	3242.588
E	F8 au SE E10	200	T C et dévonien inférieur	271.436	3245.350
E	F9 au SE Eli	200	T C et dévonien inférieur	272.785	3243.925
F	F10 au SE F3	150	T C et Dévonien supérieur	264.561	3258.178
F	Fil au SE F10	300	T C, Dévonien moyen, et Dévonien inférieur	274.336	3248.095
F	F12 au SE F13	300	T C et Dévonien inférieur	278.432	3243.865

***** T C : Tertiaire Continentale.

IV. Résultat et interprétation d'étude

La modélisation inversée unidimensionnelle (1D) des données de résistivité électrique constitue une étape fondamentale dans l'interprétation géophysique des sondages électriques verticaux dans la région de Fort Lotfi. Elle consiste à transformer les données apparentes mesurées sur le terrain en un modèle théorique de résistivité vraie, représentant la succession verticale des couches géoélectriques caractérisées par leurs résistivités et leurs épaisseurs. Cette approche permet d'identifier les contrastes électriques liés aux variations lithologiques, au degré de fracturation et à la présence ou non d'eau souterraine. La présentation spatiale de ces modèles inversés permet d'analyser la distribution latérale des unités géoélectriques, de mettre en évidence les zones conductrices

potentiellement aquifères et de mieux comprendre l'organisation structurale et hydrogéologique de la zone de Hassi Khebbi.

IV.1. Modélisation inversée D1 de la résistivité dans la région de Fort Lotfi

Dans le cadre de cette étude, des investigations géophysiques ont été entreprises afin d'améliorer la compréhension de la structure du sous-sol et d'identifier les zones favorables à la circulation et à l'accumulation des eaux souterraines. Parmi les méthodes retenues, les modèles inversés de la résistivité apparente appliqués aux forages, Dans le cas des forages, la résistivité est obtenue par sondages électriques verticaux (SEV). L'inversion des données de résistivité apparente permet d'estimer la distribution verticale et latérale des résistivités vraies du sous-sol. Les modèles inversés, contraints par les données de forage, constituent un outil fondamental pour la caractérisation lithologique et hydrogéologique des formations traversées. Le résultat c'est Un modèle en colonnes verticales compatible avec la lithologie forage.

La modélisation inversée 1D de la résistivité a été utilisée afin d'interpréter les données de résistivité apparente acquises dans la zone de Fort Lotfi. Cette approche repose sur l'hypothèse d'un sous-sol stratifié horizontalement, constitué de couches homogènes et isotropes, chacune définie par une résistivité vraie et une épaisseur spécifique. Les données de terrain, issues principalement des sondages électriques verticaux et calibrées par les informations disponibles sur les forages, ont été soumises à un processus d'inversion itératif visant à minimiser l'écart entre les résistivités apparentes mesurées et celles calculées par le modèle théorique (Loke, 2004). L'inversion a été réalisée à l'aide d'un algorithme de moindres carrés régularisé, permettant de stabiliser la solution face au caractère non unique du problème inverse **(Tikhonov & Arsenin, 1977)**. Les paramètres initiaux du modèle ont été définis à partir des données lithologiques des forages : NB 02, NB 03, NB 08 et FTC 01 et aussi les connaissances hydrogéologiques de la région de Fort Loti, constituant ainsi des contraintes a priori essentielles pour améliorer la convergence et la fiabilité des résultats **(Fig. 71, 72, 73 et 74)**. Le modèle inversé final fournit une distribution verticale des résistivités vraies, utilisée pour l'identification des principales unités lithologiques et hydrogéologiques, notamment les niveaux aquifères potentiels **(Fig. 75)**.

a. Caractérisation géoélectrique par des modèles inversés de la résistivité apparente des forages NB 02, NB 03 bis, NB 08 bis et TC 01 bis

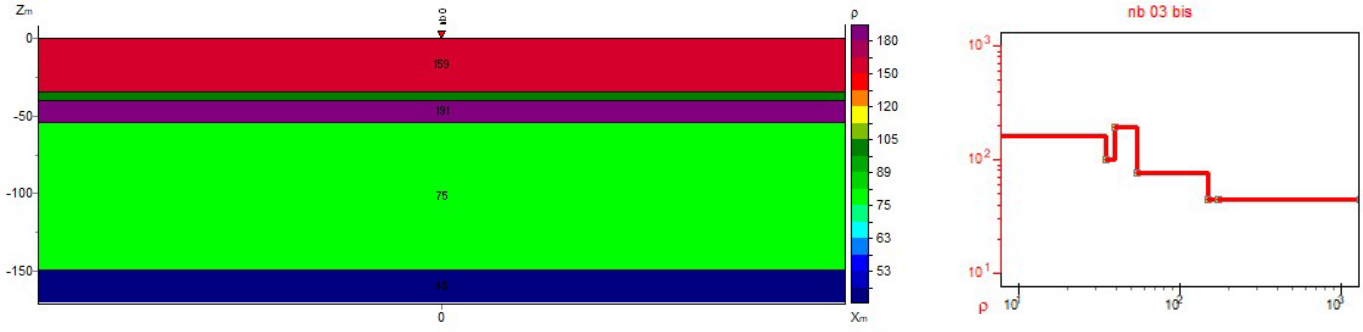


Fig. 71 : Modèle de résistivité apparente inversée du forage **NB 03 bis** en fonction de la profondeur, (calcaires, sables marneux, grés, sables marneux et argiles).

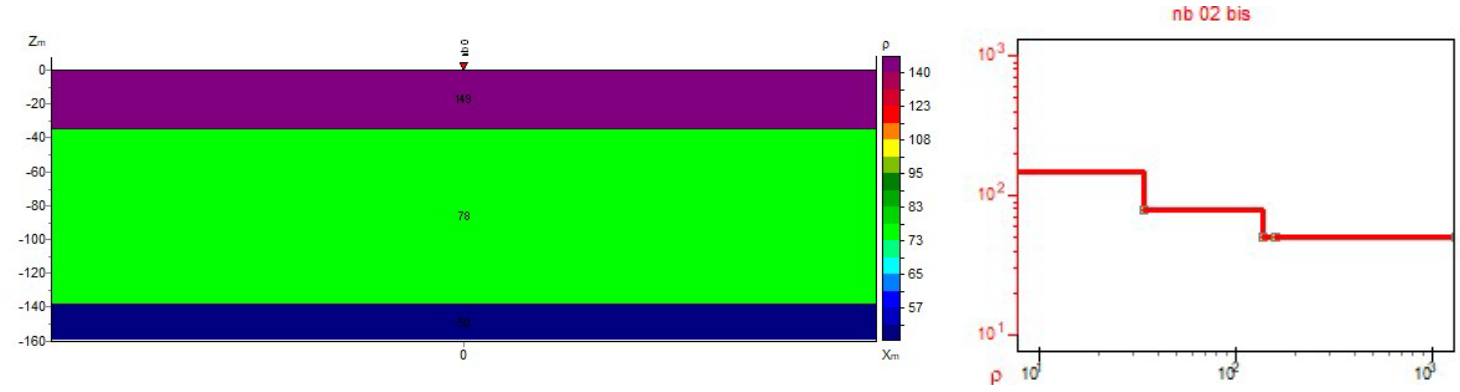


Fig. 72 : Modèle de résistivité apparente inversée du forage **NB 02 bis** en fonction de la profondeur, (calcaires, sables argileux et argiles).

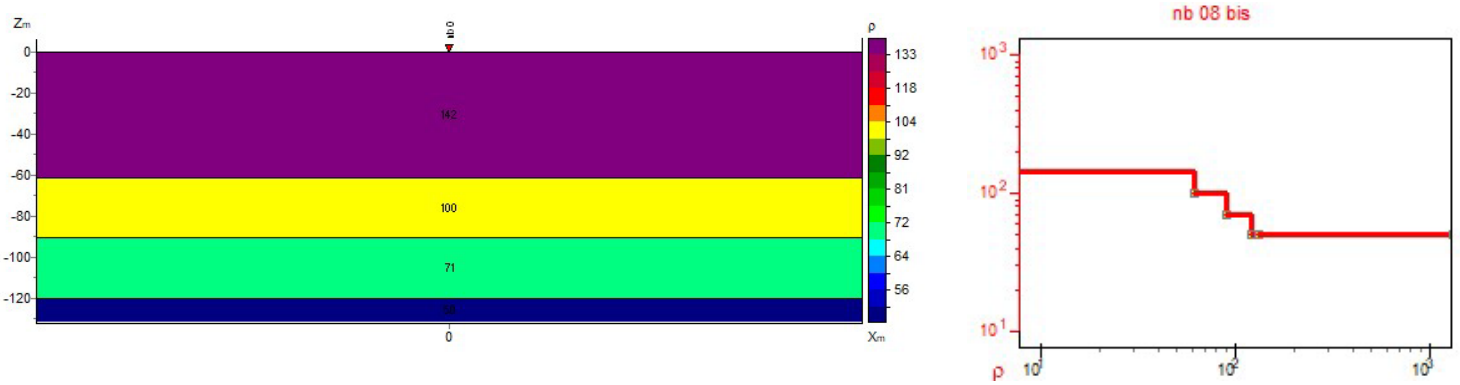


Fig. 73 : Modèle de résistivité apparente inversée du forage **NB 08 bis** en fonction de la profondeur, (calcaires, sables, sables marneux et argiles).

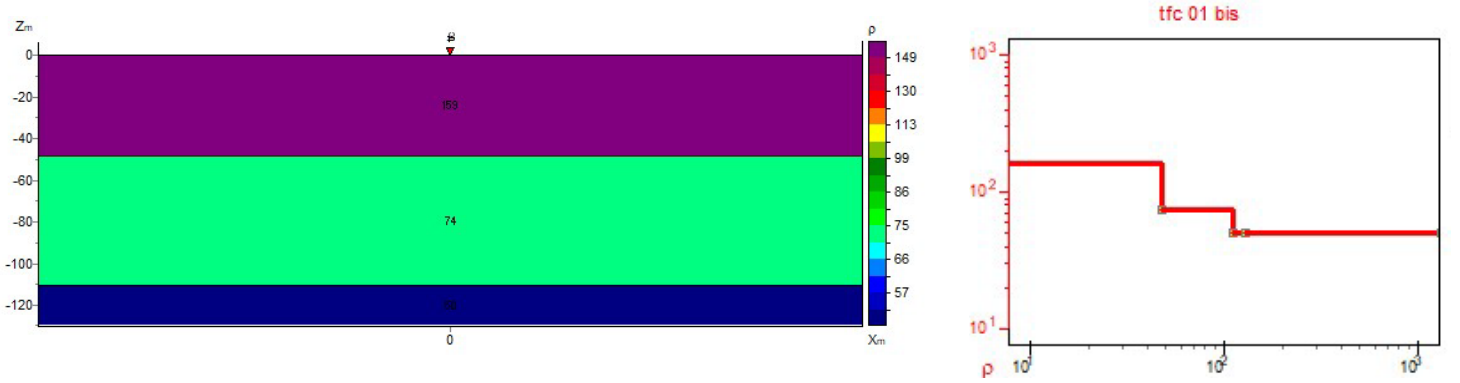


Fig. 74 : Modèle de résistivité apparente inversée du forage **TFC 01 bis** en fonction de la profondeur, (calcaires, sables gréseux et argiles).

b. Interprétation géophysique et hydrogéologique des quatre forages de la zone de Fort Lotfi

Les résultats de l'inversion 1D des données de résistivité apparente mettent en évidence une structuration verticale marquée du sous-sol, caractérisée par des contrastes résistifs significatifs entre les différentes couches (calcaires, sables, sables marneux et argiles). Les modèles inversés **(Fig. 71, 72, 73 et 74)** obtenus révèlent des niveaux de faibles résistivités, interprétés comme des formations argileuses ou des horizons saturés en eau à forte minéralisation, surmontant ou intercalés avec des niveaux de résistivité moyenne à élevée correspondant à des formations perméables telles que les sables, grès ou calcaires fracturés. Ces niveaux présentent un intérêt hydrogéologique particulier, car ils sont susceptibles de constituer des aquifères productifs **(Keller & Frischknecht, 1966)**. La corrélation de quatre modèles inversés avec les données des forages confirme la pertinence de l'approche 1D dans le contexte de la zone de Fort Lotfi **(Fig. 75)**, où les variations verticales dominent par rapport aux hétérogénéités latérales. Toutefois, certaines divergences locales entre les résistivités modélisées et les observations lithologiques peuvent être attribuées aux effets de l'anisotropie, à la présence de zones fracturées ou à des variations latérales non prises en compte par le modèle stratifié. Malgré ces limitations, l'inversion 1D constitue un outil robuste pour la caractérisation hydrogéologique du sous-sol et fournit une base fiable pour l'implantation et l'optimisation des forages d'eau **(Zohdy et al., 1974)**.

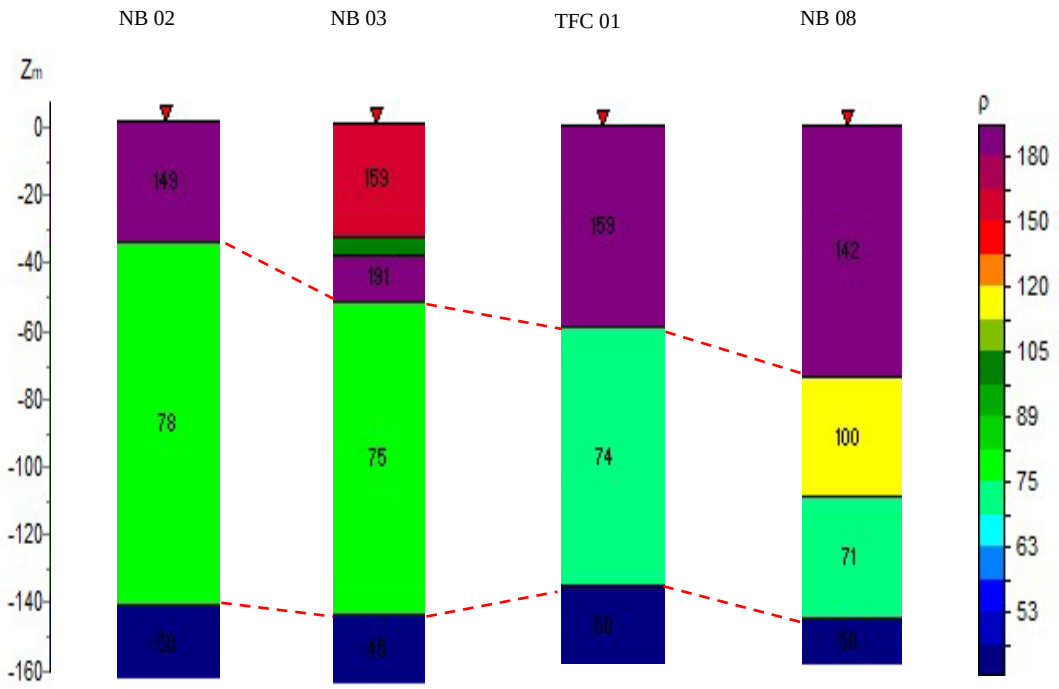


Fig. 75 : Corrélation géoélectrique des quatre forges de la zone d'étude, basée sur la zone conductrice de la nappe.

IV.2. Présentation spatial dans la région Hassi Khebbi

La configuration spatiale de cette zone est influencée par la distribution des aquifères alluviaux et la tectonique régionale, ce qui se reflète dans la cartographie piézométrique et l'évaluation de la qualité des eaux souterraines à partir d'un réseau de forages ; ces études montrent l'existence d'un réseau hydrographique souterrain structurant l'écoulement des eaux.

a. Traitement global pour la localisation des différents thèmes dans la région Hassi Khebbi

Dans cette étape on utilise le logiciel MapInfo **(Fig. 76)**. Le traitement global pour la localisation des différents thèmes dans la région de Hassi Khebbi repose sur l'intégration des données géologiques, géophysiques et hydrogéologiques à l'échelle régionale. Cette approche multidimensionnelle permet de cartographier les structures géologiques majeures, d'identifier les zones de ressources en eau souterraine, et de localiser les formations sédimentaires et les alignements structuraux influençant l'écoulement et la répartition spatiale des nappes. L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) et des analyses spatiales facilite la synthèse des informations et la production de cartes thématiques fiables pour la planification et la prospection scientifique dans la région. **(Benouar et al., 2018; Zeroual, I., Hami, K., Talhi, A., & Touhami, A. 2020)**

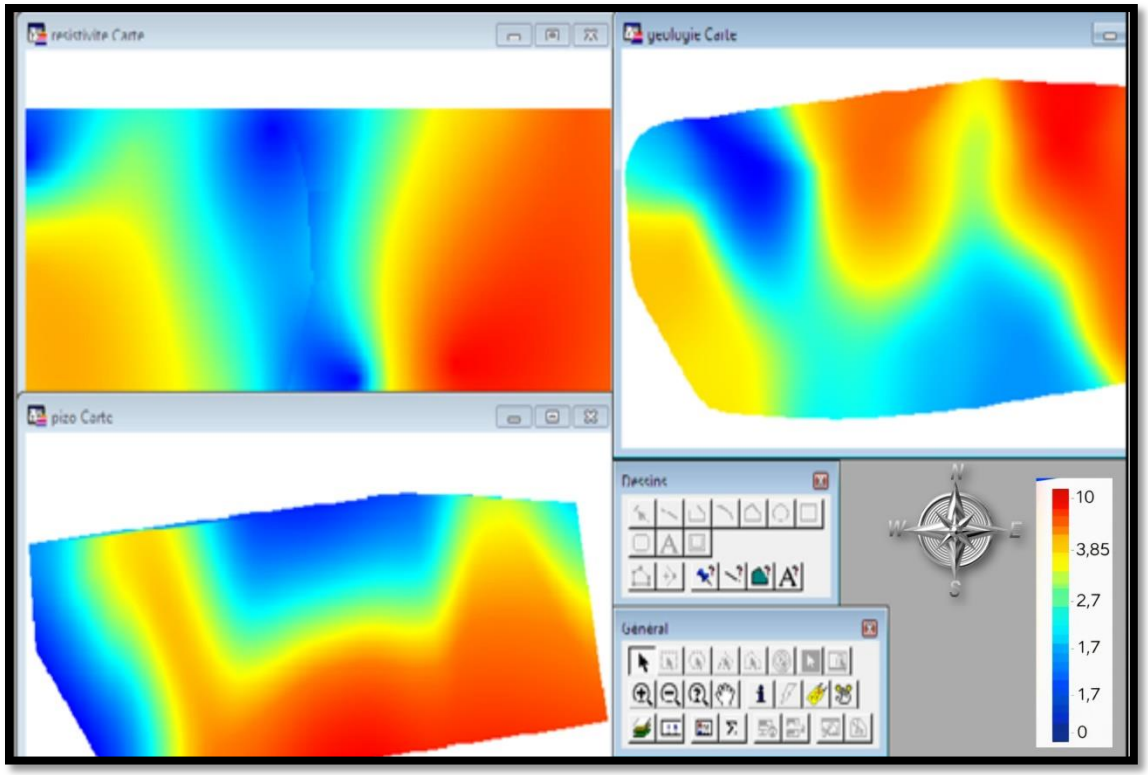


Fig. 76 : Image des étapes de traitement global pour la localisation de différents thèmes.

b. Représentation spatiale de l'épaisseur géologie et son histogramme

Cette représentation spatiale et son histogramme met en évidence de l'épaisseur des différentes formations géologiques dans la zone d'étude en fonction profondeur **(Fig. 77)**. La représentation spatiale de l'épaisseur géologique dans la région de Hassi Khebbi permet de visualiser les variations des formations sédimentaires et des aquifères à l'échelle du bassin. Cette cartographie, souvent réalisée à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG) et des données de forages, met en évidence les zones de forte et faible épaisseur, reflétant la dynamique de dépôt et les structures géologiques sous-jacentes. L'accompagnement de cette représentation par un histogramme facilite l'analyse quantitative, en montrant la distribution statistique des valeurs d'épaisseur et en identifiant les tendances dominantes pour la planification des forages et la gestion des ressources hydrogéologiques **(Benouar et al., 2018; Bouaziz et al., 2020).**

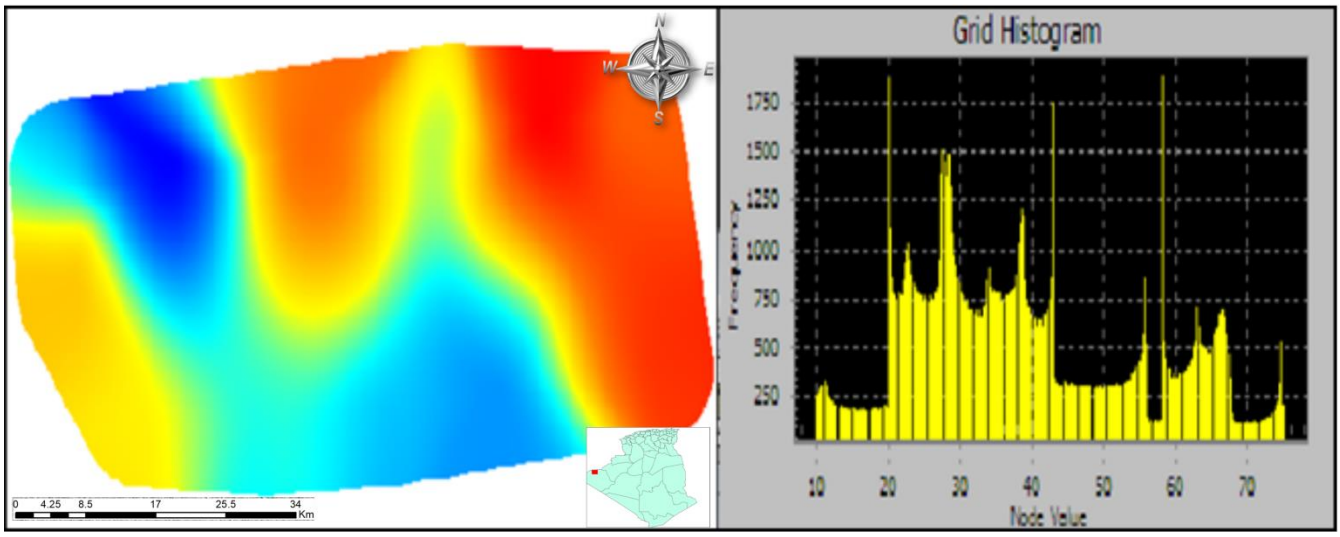


Fig. 77 : Image spatiale de l'épaisseur géologie et son histogramme.

c. Représentation spatiale de la piézométrie et son histogramme

Cette représentation spatiale et son histogramme, il s'avère de la piézométrie dans la zone d'étude **(Fig. 76)** Réalisée à partir des mesures relevées dans les forages et intégrée dans un SIG, cette cartographie met en évidence les gradients hydrauliques et les directions d'écoulement des nappes phréatiques. Elle constitue un outil essentiel pour la gestion des ressources en eau, l'identification des zones de recharge et de décharge, ainsi que pour la planification des forages et la prévention de la surexploitation des aquifères **(Zeroual et al., 2020; Bouaziz et al., 2020)**.

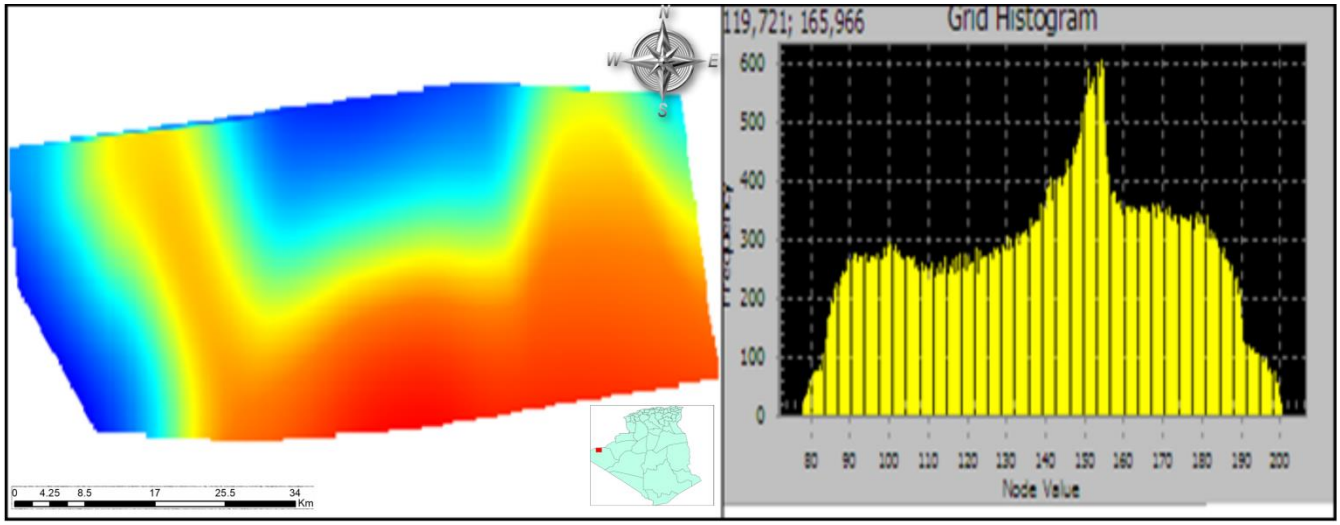


Fig. 78 : Image spatiale de la piézométrie et son histogramme.

d. Représentation spatiale de la résistivité et son histogramme

Cette représentation spatiale et son histogramme expliquer de la résistivité dans la zone d'étude en fonction profondeur (AB=100, 400 et 2000) **(Fig. 79).** Elle est réalisée à partir des mesures de résistivité électrique collectées lors des campagnes de prospection et intégrées dans un SIG pour produire des cartes thématiques. Ces cartes mettent en évidence les variations spatiales de la résistivité, permettant d'identifier les structures géologiques, les zones saturées en eau, ainsi que les différentes formations sédimentaires. L'analyse de ces variations facilite la localisation des aquifères et l'évaluation de leurs propriétés hydrogéologiques, essentielles pour la planification des forages et la gestion durable des ressources en eau.

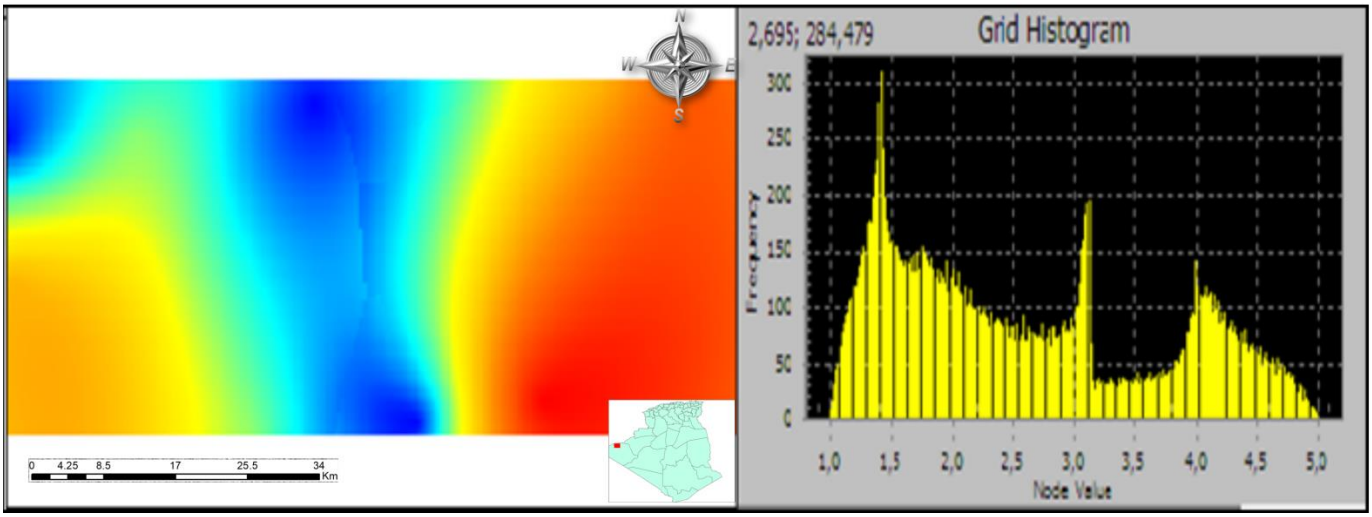


Fig. 79 : Image spatiale de la résistivité et son histogramme.

e. Représentation spatiale des Débits des forages existants

Cette représentation spatiale expliquer les différents débits de six (06) forages existants de la zone de Hassi Khebbi **(Fig. 80)**. En intégrant les mesures de débit dans un SIG, il est possible de produire des cartes thématiques illustrant les zones à fort ou faible rendement, ainsi que les variations spatiales liées à la structure géologique et aux conditions hydrodynamiques locales. Cette représentation est essentielle pour la gestion optimale des ressources en eau, la planification de nouveaux forages et la prévention de la surexploitation des nappes souterraines.

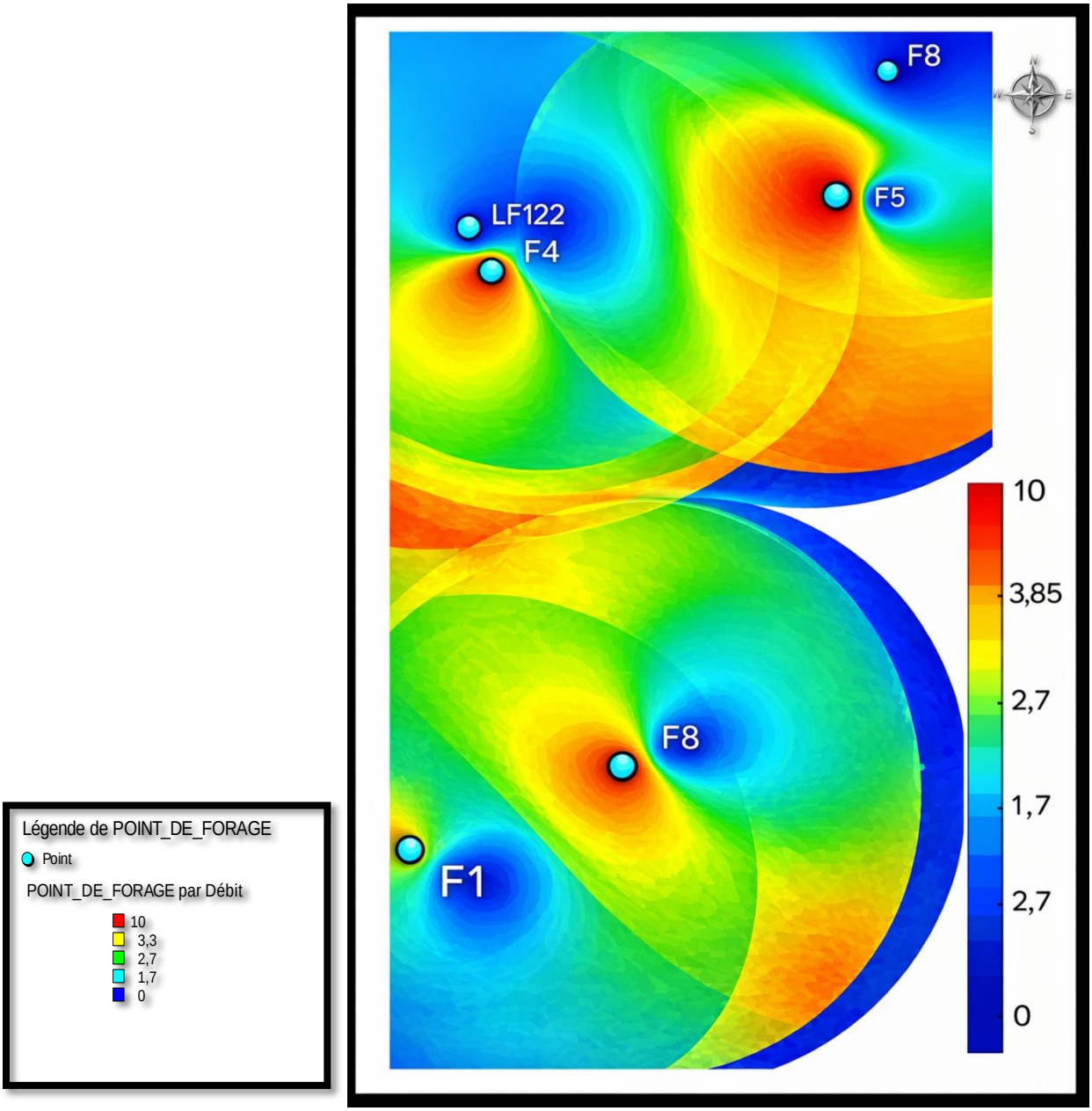


Fig. 80 : Image spatiale des Débits des forages existants et son histogramme.

V. Conclusion

Les formations susceptibles d'être aquifères se résument principalement à celles du Tertiaire Continental.

Quand les conditions le permettent, les autres formations à savoir : le carbonifère supérieur, le carbonifère inférieur, le dévonien supérieur et inférieur et le silurien peuvent être exploitées si elles présentent de bonnes caractéristiques du point de vue hydrogéologique c'est-à-dire : Une lithologie constituée de sables, grés fins et de calcaires plus ou moins fissurés. Des résistivités optimales, dénotant une bonne perméabilité des horizons à exploiter, comprises entre 70-110 Ω.m.

Le toit du Dévonien inférieur et du silurien doit être obligatoirement très proche de la surface du sol, car en profondeur des traces de pétrole et gaz ont été constatées dans la boue de forage, dans les forages pétroliers réalisés dans la région.

Le toit de ces formations, en étant su-affleurement ou très proche de la surface du sol permettrait aux rares précipitations dans la région de réalimenter les nappes d'eaux souterraines et s'infiltrer jusqu'à ces aquifères potentiels. Ainsi on pourrait obtenir une eau potable du forage qu'on aura à réaliser dans cette région.

En somme, la mise en œuvre de la prospection électrique constitue un outil efficace pour l'exploration des ressources en eaux souterraines. Les résultats présentés dans ce chapitre permettront de confronter les observations géophysiques aux réalités géologiques locales, afin de dégager des éléments de synthèse essentiels pour la suite de cette recherche.

La modélisation inversée unidimensionnelle des données de résistivité électrique a permis d'obtenir une image fiable de la structure verticale du sous-sol, en mettant en évidence la distribution des unités géoélectriques et leurs variations en profondeur. L'intégration des résultats de l'inversion 1D dans un environnement SIG a facilité la représentation spatiale des paramètres géoélectriques, offrant ainsi une vision synthétique et continue des contrastes de résistivité à l'échelle de la zone d'étude. Cette approche combinée a contribué à l'identification des zones conductrices potentiellement favorables à la présence d'aquifères, ainsi qu'à une meilleure compréhension du contexte lithologique et structural. En conséquence, la modélisation inversée 1D couplée à la cartographie spatiale constitue un outil efficace d'aide à la décision pour l'interprétation hydrogéologique et l'implantation rationnelle de nouveaux forages.

Conclusions générales et Recommandations

I. Conclusions Générales

D'un point de vue géologique, la région de Tindouf présente une structure complexe héritée de l'histoire géodynamique précambrienne. Elle est encadrée au nord par l'Anti-Atlas marocain et au sud par la dorsale des Requibat, deux unités de socle ancien constituées principalement de roches métamorphiques et granitiques. Le bassin de Tindouf forme une vaste dépression orientée est-ouest, où se succèdent des formations paléozoïques et méso-cénozoïques recouvertes localement par les dépôts continentaux de la Hamada. Ces formations présentent des variations latérales et des discontinuités sédimentaires marquées, témoignant d'une évolution géologique complexe.

Sur le plan hydrogéologique, la région est soumise à un climat hyperaride (pluviométrie moyenne de 76 mm/an et température moyenne de 22,8 °C), ce qui limite fortement la recharge naturelle des nappes. L'évapotranspiration potentielle élevée (environ 1036 mm/an) accentue la raréfaction de la ressource en eau. Dans ce contexte, il apparaît indispensable de valoriser et protéger les ressources hydriques existantes par des mesures adaptées, telles que la récupération des eaux de ruissellement, la construction d'ouvrages de retenue et de barrages d'inféro-flux, ainsi que l'adoption de techniques d'irrigation économes (goutte à goutte).

L'étude menée a montré que les formations tertiaires continentales constituent les principaux aquifères potentiels, tandis que certaines unités du Paléozoïque (carbonifère, dévonien, silurien) peuvent localement présenter des horizons aquifères exploitables, lorsque les conditions lithologiques et structurales le permettent.

L'analyse intégrée des données de télédétection Sentinel-1 et Sentinel-2, combinée à l'interprétation des données géophysiques (tomographie électrique et polarisation provoquée), a permis de mettre en évidence la disposition structurale du bassin, la distribution des linéaments et les zones favorables à la circulation des eaux souterraines. Près de 140 fractures principales ont été identifiées selon des directions dominantes NE–SW et NW–SE, correspondant aux grands axes tectoniques régionaux.

La présente étude a mis en évidence l'apport essentiel de la géophysique de prospection électrique dans la caractérisation géologique et hydrogéologique du bassin de Tindouf, notamment dans la région de Fort Lotfi – Hassi Khebbi. L'analyse des données de résistivité électrique apparente, combinée à leur traitement thématique dans un environnement SIG, a permis de cartographier les principaux contrastes géoélectriques et d'identifier les zones favorables à la présence d'aquifères. La modélisation inverse unidimensionnelle (1D) des sondages électriques verticaux a contribué à la reconstitution de la structure verticale du sous-sol et à la corrélation avec les données lithologiques des forages existants, renforçant ainsi la fiabilité des interprétations. L'intégration des approches géophysiques, géologiques et hydrogéologiques constitue un outil d'aide à la décision performant pour l'implantation de nouveaux forages et la gestion durable des ressources en eau souterraine dans cette région hyper aride. Les résultats obtenus offrent ainsi une base scientifique solide pour de futures investigations et pour l'optimisation des stratégies de développement hydrique dans le bassin de Tindouf.

Ces résultats démontrent la pertinence de l'approche intégrée combinant géologie, télédétection et géophysique dans la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du bassin de Tindouf. Ils constituent une base scientifique solide pour orienter les futurs travaux de gestion durable des ressources en eau, de planification urbaine (PDAU) et de développement local dans des zones où l'eau demeure une ressource stratégique.

II. Recommandations

Afin d'assurer une gestion rationnelle et durable de la nappe étudiée, plusieurs actions prioritaires sont à envisager.

En premier lieu, une gestion intégrée et durable des ressources en eau s'impose. Elle doit reposer sur une exploitation maîtrisée des eaux souterraines, en tenant compte des capacités réelles de renouvellement de la nappe. La mise en place de politiques de régulation, de mécanismes de contrôle des prélèvements et de programmes de sensibilisation des usagers constitue une étape essentielle pour préserver cette ressource fragile dans un contexte climatique aride.

Par ailleurs, un suivi piézométrique régulier est nécessaire afin d'observer les variations du niveau de la nappe et d'identifier rapidement toute tendance à la baisse. Ce suivi permettra d'ajuster les stratégies d'exploitation et de garantir une utilisation équilibrée et durable des eaux souterraines.

Le nivellement systématique de l'ensemble des points d'eau existants dans la région de la Hamada est également recommandé, dans la perspective de l'élaboration d'une carte piézométrique détaillée. Cette dernière constituera un outil fondamental pour la surveillance, la modélisation et la planification hydrogéologique à l'échelle régionale.

Compte tenu du caractère déficitaire du climat, il est indispensable de mettre en œuvre des techniques de récupération et de valorisation des eaux de ruissellement issues des oueds. La construction d'ouvrages de retenue et de barrages d'inféroflux contribuerait non seulement à limiter les pertes d'eau vers les sebkhas, mais aussi à protéger les zones habitées contre les crues torrentielles. À titre d'exemple, la régularisation du cours de l'oued Tindouf par la mise en place de digues en amont des zones d'étranglement apparaît comme une mesure de protection prioritaire pour la ville.

Enfin, il est fortement recommandé de renforcer les investigations géophysiques dans l'ensemble du bassin de Tindouf. L'utilisation combinée de la tomographie électrique (Terrameter LS2), des sondages électriques verticaux (SEV), ainsi que des méthodes sismiques de réflexion et de réfraction, permettra d'affiner la compréhension de la structure et du fonctionnement de l'aquifère. Ces travaux complémentaires favoriseront l'établissement de corrélations précises entre les différents secteurs du bassin, notamment Hamadinne, Oum El Assel, Fort Lotfi et Hassi Khebbi.

Références Bibliographiques

Références principales

Ahmad, I., Dar, M. A., Andualem, T. G., & Teka, A. H. (2020). *Groundwater development using geographic information system. Applied Geomatics, 12*(1), 73–82.

Aliouane, L. (2022). Levenberg-Marquardt algorithm neural network for clay volume estimation from well-log data in an unconventional tight sand gas reservoir of Ahnet basin (Algerian Sahara). Bulletin of Geophysics and Oceanography, 63(3), 443–454. DOI : 10.4430/bgo00391.

Aliouane, L. et al. (2012). Structural boundaries delimitation from geomagnetic data using the continuous wavelet transform: Application to Hoggar (Algeria).

Amrouche, F. (2004). *Le carbonifère du flanc nord du bassin de Tindouf* [Thèse de doctorat]. Université d'Alger.

ANRH, (2004). Etude géophysique par prospections électriques dans le bassin de tindouf a Hassi khebi et Oum el assal (wilaya de tindouf). Annexe.

ANRH, (2008). Etude géophysique par prospections électriques dans le bassin de tindouf a Fort Lotfi (Ex: tinfouchy). Annexe.

ANRH. (2019). *Étude hydrogéologique dans le grand bassin de Tindouf.* Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23e éd.). American Public Health Association.

Benouar, D., Khelifi, M., & Bouaziz, M. (2018). *Cartographie géologique et étude des aquifères dans le bassin du Sahara algérien*. *Revue Algérienne des Sciences de la Terre*, 14(2), 45-56.

Bouaziz, M., Zeroual, I., & Hami, K. (2020). *Analyse géostatistique et SIG pour l'évaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Tindouf–Hassi Khebbi, Algérie*. *Journal of African Earth Sciences*, 165, 103691.

Bouteraa, O., Mebarki, A., Bouaicha, F., Nouaceur, Z., & Laignel, B. (2019). *Groundwater quality assessment using multivariate analysis, geostatistical modeling, and water quality index (WQI): A case of study in the Boumerzoug-El Khroub valley of Northeast Algeria. Acta Geochimica, 38,* 796–814.

Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). *A water quality index—Crashing the psychological barrier. Indicators of Environmental Quality: Proceedings of a Symposium,* 173–182.

Campbell, J. (2011). *Introduction to Remote Sensing.* The Guilford Press.

Chorowicz, J. & Paul, S. (1974). Mise en évidence de linéaments, en Provence occidentale, sur des images obtenues par le satellite ERTS-1 ; leur signification structurale. Bulletin de la Société Géologique de France, 16, 491–497.

Constable, S. C., Parker, R. L., & Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics, 52*(3), 289–300.

Copernicus. (2023). *The Sentinel Satellites.* European Commission. https://www.copernicus.eu/en

Derdour, A., Abdo, H. G., Almohamad, H., Alodah, A., Al Dughairi, A. A., Ghoneim, S. S., & Ali, E. (2023). *Prediction of Groundwater Quality Index Using Classification Techniques in Arid Environments. Sustainability, 15*(12), 9687.

Dobrin, M. B., & Savit, C. H. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting.* McGraw-Hill.

Dobrin, M. B., & Savit, C. H. (1988). *Introduction to geophysical prospecting* (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.

Doneen, L. D. (1962). *The influence of crop and soil on percolating water. Proc. 1961 Biennial Conference on Groundwater Recharge,* 156–163.

DRE. (n.d.). *Synthèse des ressources en eau de la région de Tindouf* (p. 31). Direction des Ressources en Eau.

Drury, S. A. (2001). *Image Interpretation in Geology* (3e éd.). Nelson Thornes.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., et al. (2012). *Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. Remote Sensing of Environment, 120,* 25–36.

Edition, F. (2011). *Guidelines for drinking-water quality. WHO Chronicle, 38*(4), 104–108.

Elachi, C., & van Zyl, J. (2021). *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing* (3e éd.). Wiley.

ESA. (2023). *Copernicus Sentinel Missions Overview.* European Space Agency.

Fabre, J., & Kazi-Tani, N. (2005). *Geology of Western and Central Sahara. Tervuren African Geoscience Collection,* 211–212.

Gauss, C. F. (1839). *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus.*

Geol. Service Algérien 1999. Extrait de la carte géologique montrant les différentes structures géologiques, Écorche géologique a la surface de la discordance hercynienne 1 : 2000 000

Gevin, P. (1960). *Études et reconnaissances géologiques sur l'axe cristallin Yetti-Eglab et ses bordures sédimentaires.* Service de la Carte Géologique de l'Algérie.

Hamed, Y., Hadji, R., Ncibi, K., Hamad, A., Ben Saad, A., Melki, A., Khelifi, F., Mokadem, N., & Mustafa, E. (2022). *Modelling of potential groundwater artificial recharge in the transboundary Algero-Tunisian Basin*

(Tebessa-Gafsa): The application of stable isotopes and hydroinformatics tools. Irrigation and Drainage, 71(1), 137–156.

Hobbs, W. H. (1904). Lineaments of the Atlantic Border Region. Geological Society of America Bulletin, 15(1), 483–506.

IDRES, M., Belabbes, S., Bourmatte, A., Haddoum, H., & Samaï, S. (n.d.). *Proposition d'un modèle de morphologie du socle sous le bassin de Tindouf, Algérie, à partir de l'inversion 3D des données gravimétriques.*

Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2e éd.). Pearson.

Keller, G. V., & Frischknecht, F. C. (1966). *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford: Pergamon Press.

Keller, G. V., & Frischknecht, F. C. (1966). *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford, UK: Pergamon Press.

Kelley, W. P. (1963). *Use of saline irrigation water. Soil Science, 95*(6), 385–391.

Kessasra, F. (2023). Hydrogeological characterization of the Complex Terminal aquifer using geoelectrical investigation in the arid environment of Chetma-Biskra (South-East of Algeria). Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater, 12(1), 39–51.

Kirsch, R. (2009). *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology.* Springer.

Kortatsi, B. K. (2007). *Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra Basin, Ghana. Aquatic Geochemistry, 13,* 41–74.

Lehmann, I. (1936). *P'. Publications du Bureau central séismologique international.*

Li, P., Wu, J., & Qian, H. (2016). *Hydrochemical appraisal of groundwater quality for drinking and irrigation purposes and the major influencing factors: A case study in and around Hua County, China. Arabian Journal of Geosciences, 9,* 1–17.

Logiciels – Terre et Eau. (n.d.). *Équipements de terrain et de laboratoire.* https://terre-et-eau.univ-avignon.fr/equipements-de-terrain-et-de-laboratoire/logiciels/

Loke, M. H. (2004). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Penang: Geotomo Software.

Loke, M. H. (2004). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Penang, Malaysia: Geotomo Software.

Loke, M. H. (2004). *Tutorial: 2D and 3D Electrical Imaging Surveys.*

Masoud, A. A., & Koike, K. (2011). *Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66*(6), 818–832.

Melouah, O. & Zerrouki, H. (2021). Utility of forward and inverse modeling in 2D electric tomography for Hydrogeologic studies. Applied Water Science, 11, 15.

Mimouni, Y., & Yahiaoui, Y. (2020). *Les principales caractéristiques hydrogéologiques du bassin de Tindouf* [Mémoire de Master 2].

Mohorovičić, A. (1909). *Das Beben vom 8. X. 1909. Jahrbuch des Meteorologischen Observatoriums Zagreb.*

Oldham, R. D. (1906). *The Constitution of the Interior of the Earth. Quarterly Journal of the Geological Society.*

Ouadfeul, S. & Aliouane, L. (2015). Structural boundaries delimitation from aeromagnetic data using the horizontal gradient and the continuous wavelet transform.

Ouadfeul, S. & Aliouane, L. (2016). Multiscale analysis of gravity data using the 2D directional continuous wavelet transform with a case study from Hoggar shield.

Parasnis, D. S. (1997). *Principles of Applied Geophysics.* Chapman & Hall.

Piper, A. M. (1944). *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Eos, Transactions American Geophysical Union, 25*(6), 914–928.

Radouani, F., Najine, A., Aifa, T., & Ouzerbane, Z. (2013). *Reconnaissance du système aquifère du Nord-Ouest de la plaine du Tadla (Maroc oriental) par imagerie électrique. Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research, 4*(1), 33–41.

Ramakrishnaiah, C. R., Sadashivaiah, C., & Ranganna, G. (2009). *Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. E-Journal of Chemistry, 6*(2), 523–530.

Rees, W. G. (2013). *Physical Principles of Remote Sensing* (3e éd.). Cambridge University Press.

Reynolds, J. M. (2011). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics (2nd ed.).

Richards, J. A. (2022). *Remote Sensing Digital Image Analysis.* Springer.

Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* U.S. Government Printing Office.

Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J., Chambon, P., Champsaur, H., & Rodi, L. (1984). *L'analyse de l'eau* (7e éd.). Dunod, Paris.

Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing.* Academic Press.

Shukla, S., & Saxena, A. (2020). *Groundwater quality and associated human health risk assessment in parts of Raebareli district, Uttar Pradesh, India. Groundwater for Sustainable Development, 10,* 100366.

Sinan, M. (2000). *Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par couplage des SIG, de la géophysique et de la géostatistique : Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc)* [Thèse de doctorat]. École Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat.

Surfer | Products | Golden Software. (n.d.). https://www.goldensoftware.com/products/surfer/

Telford, W. M., Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. (1990). Applied Geophysics (2nd ed.). Cambridge University Press.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics.* Cambridge University Press.

Tikhonov, A. N., & Arsenin, V. Y. (1977). *Solutions of ill-posed problems*. Washington, DC: Winston & Sons.

Tikhonov, A. N., & Arsenin, V. Y. (1977). *Solutions of ill-posed problems*. Washington, DC: Winston & Sons.

Venkata Mohan, S., & Jayarma Reddy, S. (1995). *Assessment of overall water quality of Tirupati. Pollution Research, 14,* 275–282.

Wegener, A. (1929). *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane.* Vieweg + Teubner.

Wilson, C. P. V. (1982). *Groundwater hydrology (2nd edn) by D. K. Todd. Wiley, New York, 1980.*

Wilson, J. T. (1968). *Static and Mobile Aspects of Continental Drift. Geophysical Journal International.*

Zaidi, F. K., Mogren, S., Mukhopadhyay, M., & Ibrahim, E. (2016). *Evaluation of groundwater chemistry and its impact on drinking and irrigation water quality in the eastern part of the Central Arabian graben and trough system, Saudi Arabia. Journal of African Earth Sciences, 120,* 208–219.

Zeroual, I., Hami, K., Talhi, A., & Touhami, A. (2020). *Geo Electric Study in Hydrogeology According to the Axis Hassi Naga–Hassi Khebi of Tindouf (Southwestern Algeria). Latvian Journal of Physics and Technical Sciences,* 57(4), 51-64.

Zhdanov, M. S. (2002). *Geophysical inverse theory and regularization problems*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

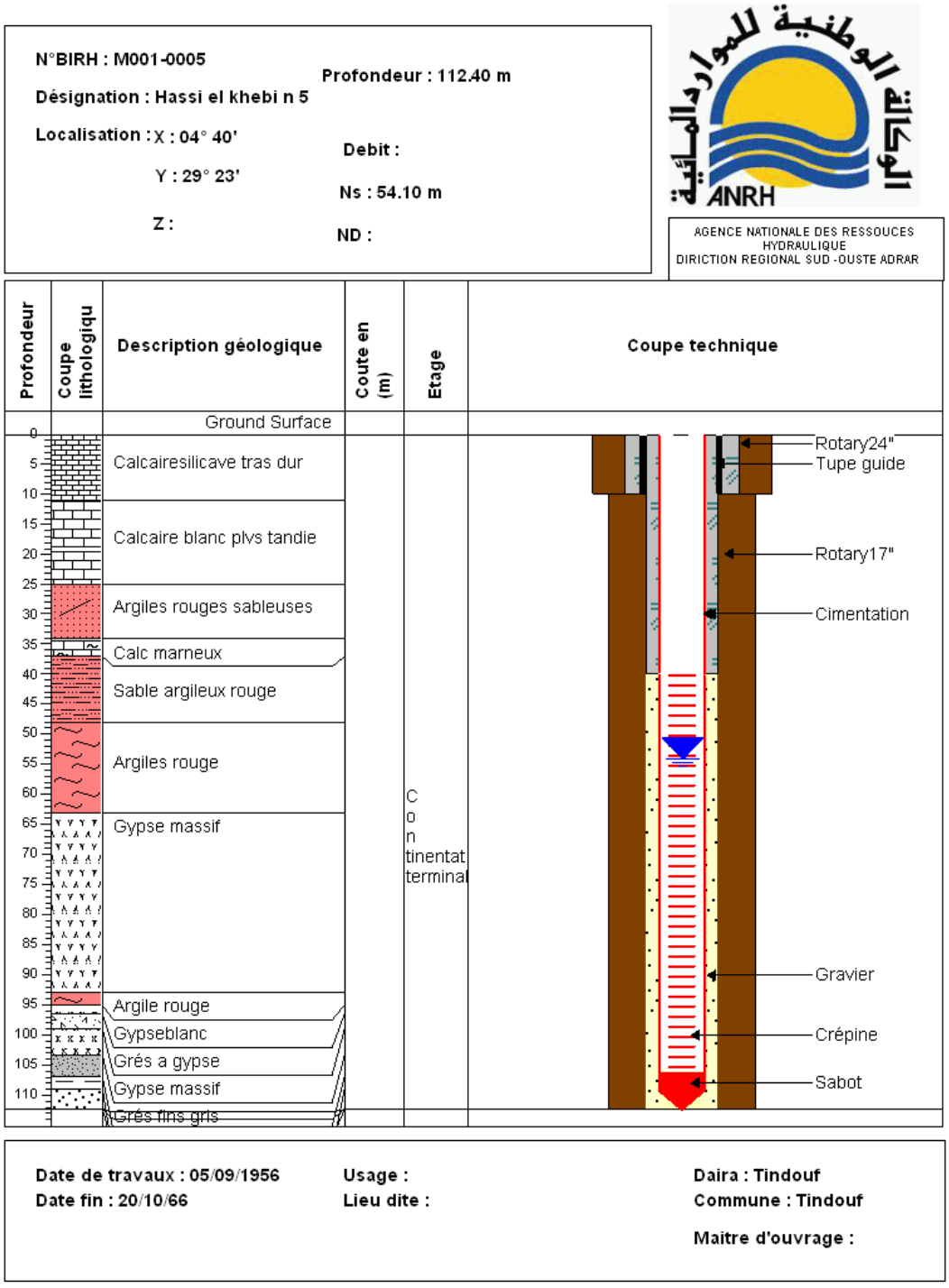
Zohdy, A. A. R., Eaton, G. P., & Mabey, D. R. (1974). *Application of surface geophysics to groundwater investigations*. Techniques of Water-Resources Investigations, Book 2, Chapter D1. U.S. Geological Survey.

Zohdy, A. A. R., Eaton, G. P., & Mabey, D. R. (1974). *Application of surface geophysics to groundwater investigations*. U.S. Geological Survey.

Zouaghi, T., et al. (2019). *Integration of radar and optical data for lineament analysis in arid areas: Application to Southern Tunisia. Journal of African Earth Sciences, 150,* 344–358.

Annexes

Annexe 1



Log stratigraphique du forage Hassi Khebbi 5 (ANRH)

Annexe 2

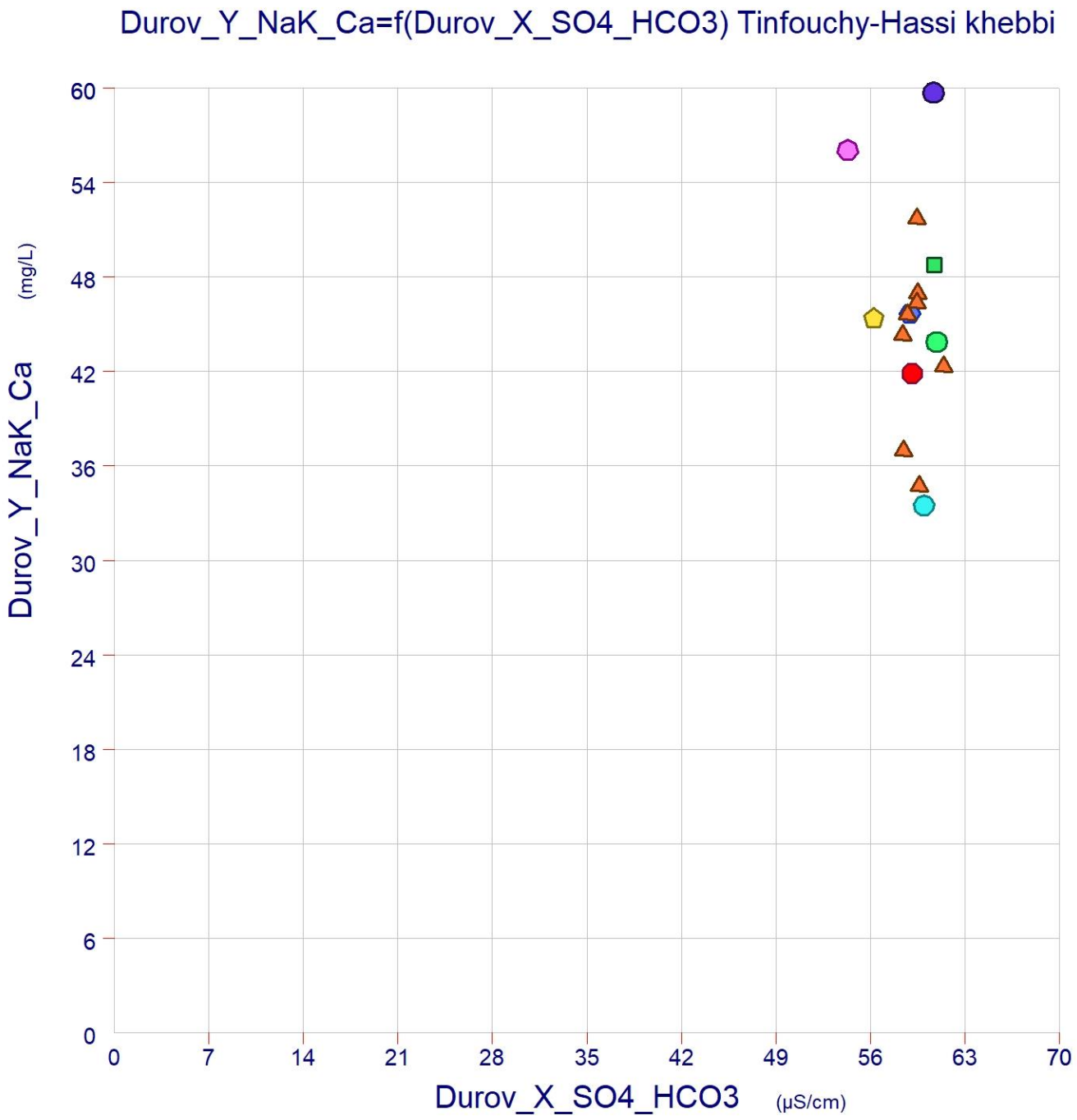
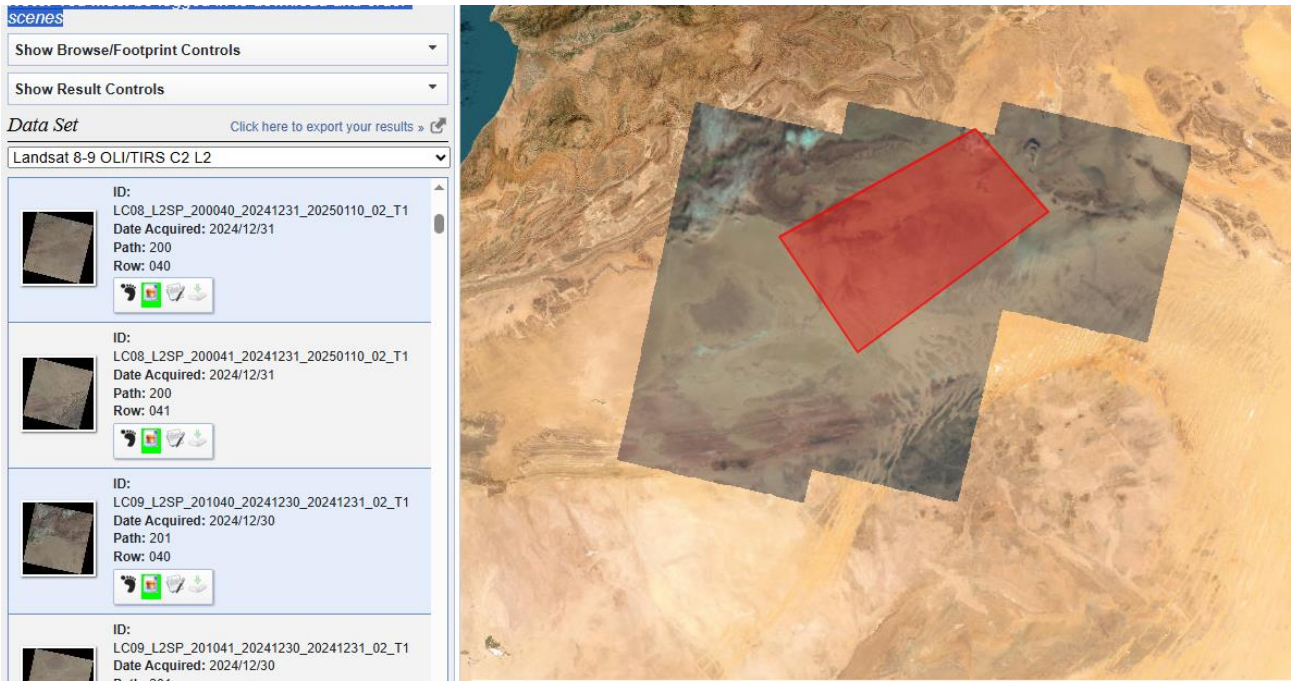


Figure : Diagramme de Durov illustrant la relation entre les ions majeurs ($Na^{+}+K^{+}/Ca^{2+}$ et SO_4^{2-}/HCO_3^{-}) des eaux souterraines de la région de Fort Lotfi – Hassi Khebbi .

Annexe 3



Capteur d'écran d'images satellitaires concernantla zone de Fort Lotfi

Annexe 4

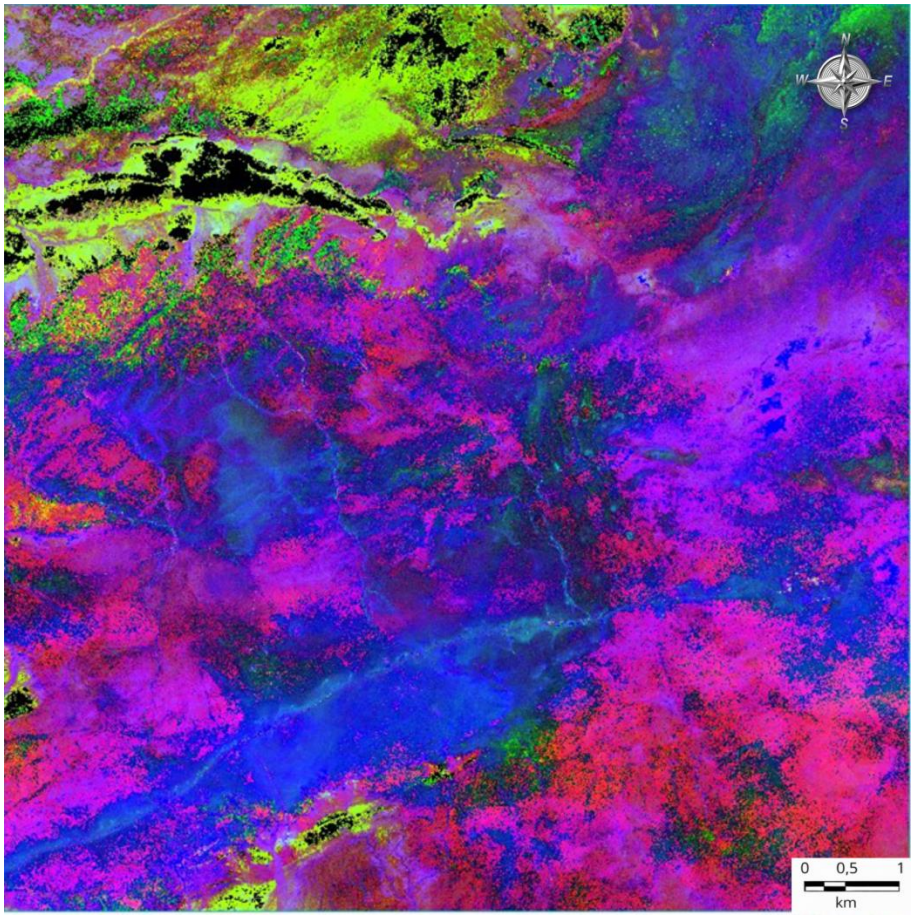
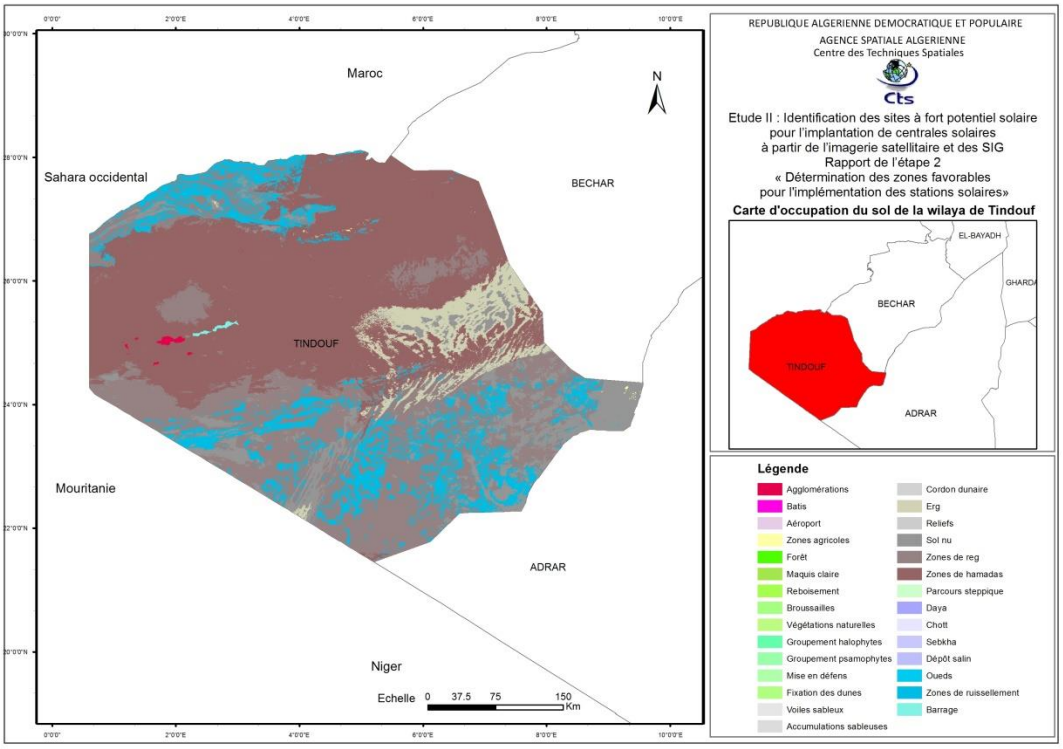


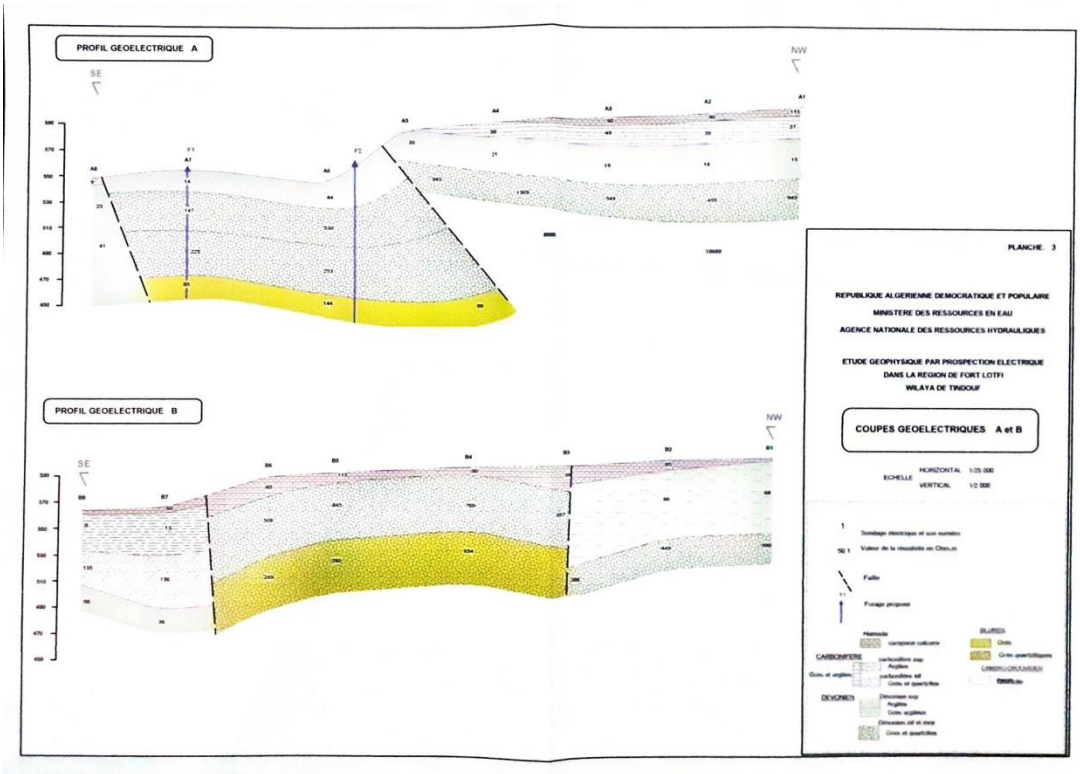
Image satellitaire RVB to ITS de la région de Fort Lotfi

Annexe 5



Carte d'occupation de sol de la wilaya de Tindouf

Annexe 6



Coupe géo électrique de deux profile A et B (ANRH.2008)

Annexe 7



Photo de formation grés



Photo de filon calcaire dans la formation gréseux



Photo de l’appareil de forage NB 08 bis

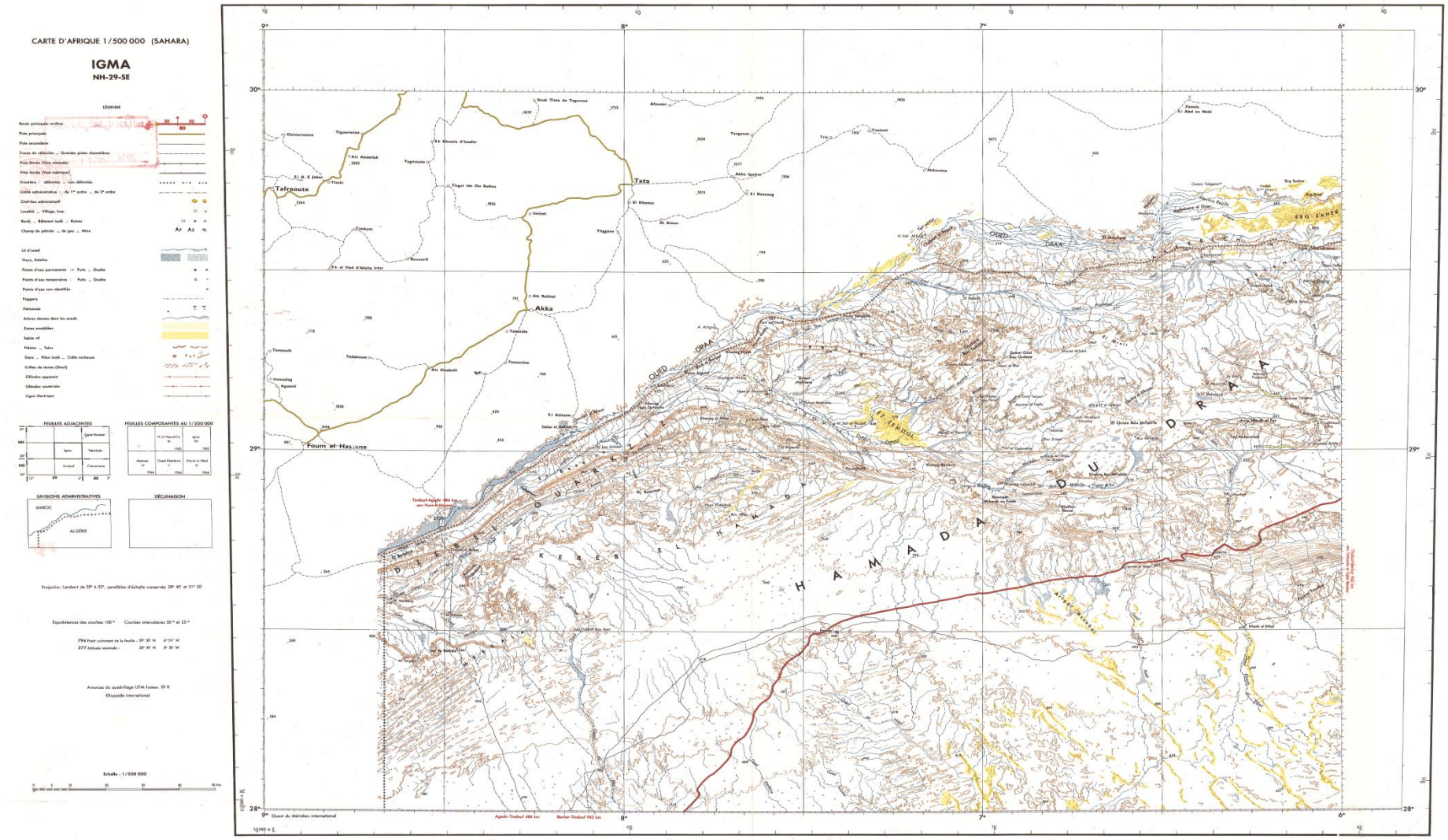


Photo de l’appareil de forage NB 02 bis



Photo des échantillonnages de forage NB 03 bis (170 échantillons)

Annexe 8


CARTE D'AFRIQUE 1/500 000 (SAHARA)
IGMA
NH-29-SE
Tafraoute
Tata
Akka
Foum el Hasane
OUED DRAA
HAMADA DU DRAA
HAMADA DE KERES
ERG CHEBBI
ERG ZAHAR
Echelle : 1/500 000