ROYAUME DU MAROC
Université Mohammed V - RABAT -
جامعة محمد الخامس – الرباط –
Faculté des sciences
كلية العلوم

CENTRE D'ÉTUDES DOCTORALES - SCIENCES ET TECHNOLOGIES

N° d'ordre :**4094**

THÈSE

En vue de l'obtention du : DOCTORAT

Centre de Recherche : Centre Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable
Structure de Recherche : Géosciences, Eau et Environnement (L-G2E)
Discipline : Science de la Terre
Spécialité : Géophysique en forage / Hydrogéologie

Présentée et soutenue le : 14 /06 / 2025

Par :

Moulay Ahmed BEN DRISS

Hydrogéologie et ressources en eau souterraine du bassin de la moyenne Moulouya, Maroc. Approche multiméthodes pour la prospection et l'exploitation

Devant le JURY :

Larbi BOUDAD	PES	Faculté des sciences, Université Mohammed V de Rabat	President
Mostafa SERROUKH	PES	Faculté des sciences, Université Abdelmalek Essaâdi de Tétouan	Rapporteur/Examinateur
Mohamed HILALI	PES	Faculté des sciences, Université Moulay Ismail de Meknès	Rapporteur/Examinateur
Tarik BAHAJ	PES	Faculté des sciences, Université Mohammed V de Rabat	Rapporteur/Examinateur
Ilias KACIMI	PES	Faculté des sciences, Université Mohammed V de Rabat	Examinateur
Mohamed EL AMRANI	PH	Faculté des sciences, Université Mohammed V de Rabat	Examinateur
Said ETTAZARINI	PES	Centre Régional des Métiers de l'Education et de la formation de Casablanca-Settat	Co-Directeur de thèse
Youssef HAHOU	PES	Faculté des sciences, Université Mohammed V de Rabat	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2024 - 25

✉ Faculté des Sciences, avenue Ibn Battouta, BP. 1014 RP, Rabat –Maroc
☎ 00212 (05) 37 77 18 76 🖷 00212(05) 37 77 42 61; http://www. fsr.um5.ac.ma

Dédicace

A la mémoire de mon père

A la mémoire de ma mère

A mes frères et ma sœur,

A toute ma famille,

A mes amis,

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein du **Laboratoire de Géosciences, Eau et Environnement (LG2E)**, du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V-Agdal de Rabat, en collaboration avec le **Département des Sciences de la Vie et de la Terre** du **Centre Régional des Métiers de l'Éducation et de la Formation (CRMEF) de Casablanca-Settat**.

Je remercie très chaleureusement mon Directeur de thèse, Monsieur **Youssef HAHOU**, Professeur de l'enseignement supérieur au Département de Géologie de la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V-Agdal de Rabat. Je lui suis profondément reconnaissant pour son accompagnement, sa patience, sa disponibilité et ses conseils avisés tout au long de ce parcours. Ses orientations rigoureuses et ses interventions toujours pertinentes ont grandement contribué à l'avancement de ce travail.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à Monsieur **Said ETTAZARINI**, Professeur de l'enseignement supérieur au Département des Sciences de la Vie et de la Terre du Centre Régional des Métiers de l'Education et de la Formation CRMEF de Casablanca-Settat, pour son implication constante dans le suivi de cette recherche. Ses critiques et ses suggestions scientifiques ont été d'une grande aide. Je le remercie sincèrement pour sa confiance et son soutien.

J'adresse ma profonde reconnaissance à Monsieur **Mostafa SERROUKH**, Professeur de l'enseignement supérieur au Département de Géologie de la Faculté des Sciences de l'Université Abdelmalek Essaâdi de Tétouan, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être rapporteur de cette thèse. Sa contribution a enrichi ce travail, et je lui suis reconnaissant pour son engagement.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **Larbi BOUDAD**, Professeur de l'enseignement supérieur, Chef du Département de Géologie à la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V-Agdal de Rabat, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et le soutien constant qu'il m'a accordé tout au long de cette thèse. Je le remercie également d'avoir accepté de présider le jury.

C'est un grand honneur d'avoir parmi les membres du jury Monsieur **Ilias KACIMI**, Professeur de l'enseignement supérieur au Département de Géologie de la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V-Agdal de Rabat. Je le remercie sincèrement pour sa participation comme rapporteur et examinateur à cette recherche.

J’adresse mes remerciements et ma considération à Monsieur **Mohamed HILALI**, Professeur de l’enseignement supérieur au Département de Géologie de la Faculté des Sciences de l’Université Moulay Ismail de Meknès, pour avoir accepté de rapporter ce travail malgré un emploi du temps chargé. Sa présence au sein du jury en temps rapporteur et examinateur m’honore.

Je remercie vivement Monsieur **Tarik BAHAJ**, Professeur de l’enseignement supérieur au Département de Géologie de la Faculté des Sciences de l’Université Mohammed V-Agdal de Rabat, pour avoir accepté de rapporter cette thèse. Sa participation au jury, examinateur de cette recherche m’honore particulièrement.

Je remercie également Monsieur **Mohamed EL AMRANI**, Professeur habilité au Département de Géologie de la Faculté des Sciences de l’Université Mohammed V-Agdal de Rabat, pour ses conseils pertinents et sa rigueur scientifique. Sa participation au jury en temps examinateur est pour moi un grand honneur.

Au terme de ce travail, je souhaite exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **Mohammed REGRAGUI**, Professeur, Doyen de la Faculté des Sciences de Rabat, pour m’avoir permis de poursuivre mes études doctorales au sein de l’Université Mohammed V-Agdal, Département de Géologie.

Je remercie très chaleureusement Madame **Souad EL HAJJAJI**, Professeure, Vice-Doyenne chargée de la Recherche et de la Coopération à la Faculté des Sciences de Rabat, Directrice du CEDoc, ainsi que toute l’équipe du Centre de Doctorat pour leur accueil bienveillant et leur soutien essentiel à la réussite de ce travail.

Je tiens également à remercier **l’ensemble de mes collègues du Laboratoire LG2E** et tout le **personnel enseignant du Département de Géologie** de la Faculté des Sciences de l’Université Mohammed V-Agdal de Rabat pour leur soutien, leur amitié et leur collaboration, qui ont rendu ce travail plus agréable.

Je remercie infiniment **l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya d'Oujda** (ABHMO), la **Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau** (DRPE) de Rabat et la **Direction Provinciale de l'Eau** de Boulmane (DPE), pour le soutien moral apporté par l’ensemble de leur responsable et pour la mise à notre disposition des informations relatives aux fiches techniques de forage dans la zone d'étude, indispensables à la réalisation de ce travail.

Je remercie aussi toutes les personnes qui, à travers les cours, congrès, séminaires, missions ou échanges électroniques, m’ont transmis leur savoir et leur expérience.

Enfin, j’exprime toute ma reconnaissance à celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l’élaboration de cette thèse.

Résume

Cette recherche examine les ressources en eau dans les régions arides de la Moyenne et de la Basse Moulouya, où la rareté de l'eau pose un défi majeur pour le développement durable. Elle utilise la télédétection et le système d'information géographique pour évaluer le potentiel des eaux souterraines, en se basant sur cinq facteurs principaux : fractures, lithologie, drainage, topographie et précipitations, et les données de 179 forages. Un algorithme dynamique a été utilisé pour créer un modèle d'indice de potentiel des eaux souterraines, montrant une relation significative avec les débits mesurés. L'étude évalue également la qualité des eaux souterraines de la région de Fritissa pour l'irrigation, en analysant les interactions eau-roche et les indices de qualité de l'eau, indiquant que les eaux sont généralement adaptées à l'irrigation avec quelques précautions. Le bassin de la Moulouya fait face à des défis importants : réduction de la recharge des aquifères, détérioration de la qualité de l'eau, pression économique, exploitation non durable et gaspillage de cette ressource naturelle. Enfin, la recherche décrit les caractéristiques hydrodynamiques et la transmissivité des aquifères profonds dans trois sites de la zone Fritissa, prouvant la viabilité d'un programme d'approvisionnement en eau durable.

Mots-clefs (5) : Indice de potentiel des eaux souterraines (IPES), Algorithme de pondération des paramètres dynamiques (APPD), Fritissa, Interaction eau-roche

Abstract

This research examines water resources in the arid regions of the Middle and Lower Moulouya, where water scarcity poses a major challenge to sustainable development. It uses remote sensing and geographic information systems to assess groundwater potential based on five main factors: fractures, lithology, drainage, topography, and precipitation, and data from 179 boreholes. A dynamic algorithm was used to create a groundwater potential index model, showing a significant relationship with measured flow rates. The study also assesses the quality of groundwater in the Fritissa region for irrigation, analyzing water-rock interactions and water quality indices, indicating that the waters are generally suitable for irrigation with some precautions. The Moulouya basin faces significant challenges: reduced aquifer recharge, deteriorating water quality, economic pressure, unsustainable exploitation, and waste of this natural resource. Finally, the research describes the hydrodynamic characteristics and transmissivity of deep aquifers at three sites in the Fritissa area, proving the viability of a sustainable water supply program.

Keywords (5): Groundwater Potential Index (GPI), Dynamic Parameter Weighting Algorithm (DPWA), Fritissa, Water-Rock Interaction.

Liste des figures

Figure 1 : Etapes de procédure de calcul du taux de consistance (Saaty,1977). 9
Figure 2 : Organigramme du processus d'analyse hiérarchique (AHP) (Saaty, 1977). 10
Figure 3 : Organigramme de l'approche multiméthodes (Hanich et al. 2008 ; Koffi et al 2016). 11
Figure 4 : Organigramme de l'approche du Taux de fréquence (FR) et Poids d'évidence (WoE) (Abd Manap et al. 2012, Trabelsi et al 2019, Abdekareem et al. 2023 ; Bhandari et al. 2024). 12
Figure 5 : Organigramme d'Indice de Potentiel des Eaux Souterraines (IPES) (Ettazarini, 2007 ; Ettazarini et El Jakani, 2020 ; Ben Driss et al. 2024). 13
Figure 6 : Procédure générale pour élaboration de la carte IPES (Ettazarini et El Jakani, 2020). 15
Figure 7 : Description de l'algorithme de pondération dynamique des paramètres (APDP) utilisé pour élaborer le modèle IPES (Ettazarini et El Jakani, 2020). 16
Figure 8 : Illustration de la foreuse sur le forage Dkikira (Moyenne Moulouya) (DRPE ; Ben Driss,2024). 18
Figure 9 : (A) Tiges de circulation normale, (B) tiges de circulation inverse. 18
Figure 10 : (A) Système de foration en circulation normale, (B) Foration en circulation inverse. 19
Figure 11 : Outils de foration (A) : Tricône, (B) : Taillant. 20
Figure 12 : Illustrations des méthodes de foration. (A) : Rotary à la boue en circulation normale ; (B) : Foration au marteau fond du trou en circulation normale ; (C) : Rotary à la boue en circulation inverse ; (D) : Foration au marteau fond du trou en circulation inverse. 21
Figure 13 : Récupérations des cuttings pour analyse lithologique (forage Sidi Ali Belkacem, ABHM 2023). 22
Figure 14 : Opération d'identification de la lithologie du forage par l'hydrogéologue. 23
Figure 15 : Exemples des logs lithologiques et techniques d'un forage (A) : forage de reconnaissance ; (B) forage d'exploitation. 24
Figure 16 : Opération de la diagraphie. (A) : illustration de l'atelier d'enregistrement des opérations de diagraphie. (B) : Sondes 9044 & 9074 d'enregistrement des opérations des diagraphies (Forage Dkikira, DRPE). 26
Figure 17 : Résultats d'enregistrement par techniques des diagraphies, au niveau du Forage (A) : Immouzer (Boulmane) et (B) : Mrija (Jerrada). 28
Figure 18 : Echantillonnage d'eau pour analyse. 32
Figure 19 : Fiche technique du forage Mangoub (ABHM, 2023). 34
Figure 20 : Situation de la zone d'étude au Maroc Oriental. 43
Figure 21 : Diagramme de débits au niveau de la station Tendit (ABHM,2023). 44
Figure 22 : Diagramme ombrothermique de la région de Fritissa, station d'Outat El Haj (A) et de Guercif (B). 45
Figure 23 : Découpage administratif de la zone d'étude. 46
Figure 24 : Carte géologique compilée de la zone d'étude d'après les cartes géologiques du Maroc disponibles au 1/100 000 et celle au 1/1 000 000. 49
Figure 25 : Affleurement paléozoïque entre Al Ateuf et Ouled M'hamed (Ben Driss, 2025). 50
Figure 26 : Affleurement triasique entre Sidi Ali Belkacem et Taourirt au Nord de la zone d'étude (Ben Driss, 2025). 51
Figure 27 : Affleurement jurassique au niveau de la dépression de Debdou (Ben Driss,2025). 52
Figure 28 : Illustration des formations quaternaire dans la zone Fritissa (Ben Driss, 2025). 53
Figure 29 : Coupe géologique de l'interprétation du profil sismique d'après Zizi, (1996) et Sani et al, (2000). Localisation du trait de coupe (voir Figure 24) 54
Figure 30 : Illustrations de la fracturation technique au niveau de la zone d'étude. (A) : Al Ateuf, (B) : Nord de la commune Al Ateuf, (C) : Fegousse au pied du moyen Atlas et (D) : Fegousse Ouest Tendit. 55

Figure 31 : Carte hypsométrique (A), courbe hypsométrique (B) de la zone d'étude..... 57
Figure 32 : Carte du modèle numérique de terrain dans la zone d'étude..... 58
Figure 33 : Log stratigraphique et les aquifères de la zone d'étude (Combe et Simonot,1971). 59
Figure 34 : Evolution du niveau piézométrique au niveau du piézomètre 219/23 (ABHM, 2025). 70
Figure 35 : Regroupement des cartes géologiques couvrant la zone d'étude. 74
Figure 36 : Cartes des affleurements géologiques avec situation des forages au niveau de la zone d'étude. 75
Figure 37 : Images satellite MNT de la zone d'étude. 76
Figure 38 : Images du relief ombré au niveau de la zone d'étude avec des directions d'éclairage différentes, (A) : direction 45°, (B) : direction 90°, (C) : direction 135° et (D) : direction 180°. 77
Figure 39 : (A) Carte de la fracturation de la zone d'étude, (B) Rosace de la fracturation. 78
Figure 40 : Illustrations de la fracturation au niveau de la zone d'étude, (A) : Nord de la zone à la commune Al Ateuf, (B) : Schistes de dépression de Debdou, (C) : Calcaires de dépression de Debdou, (D) : entre Tendit et la chaine du moyen atlas..... 79
Figure 41 : Illustration de la fracturation à l'Est du moyen Atlas au niveau de la zone d'étude (Ben Driss, 2025). 79
Figure 42 : Exemples de fracturation au niveau de la zone d'étude, (A) : rive gauche d'oued Moulouya, (B) : Sidi Aissa et (C) : Gallat jamal au niveau de la plaine de Fritissa..... 80
Figure 43 : Carte lithologique de l'aquifère semi-profond ? au niveau de la zone d'étude. 82
Figure 44 : Classification des sous bassins versants et leurs réseaux hydrographiques 85
Figure 45 : Illustration des cours d'eau dans la région d'étude, (A) Oued Moulouya à cours d'eau permanent et son affluent sec au niveau de Tissaf. 86
Figure 46 : Carte thématique de la topographie de la zone d'étude..... 87
Figure 47 : Illustration topographique à l'Ouest de la zone d'étude..... 88
Figure 48 : Carte des isohyètes de la pluviométrie. 89
Figure 49 : Cartes thématiques des paramètres de la zone d'étude, (A) : Fracturation, (B) : Rosace de fracturation, (C) : lithologie, (D) : drainage, (E) : topographie et (F) : pluviométrie..... 92
Figure 50 : Evolution des rendements des eaux souterraines par rapport aux valeurs calculées (IPES161), en utilisant le modèle présentant le coefficient de corrélation le plus élevé (r = 0,73). 94
Figure 51 : Carte des valeurs d'IPES161 calculées avec la surface occupée dans la zone d'étude..... 96
Figure 52 : Evolution des rendements des eaux souterraines par rapport aux valeurs calculées des forages de validation, en utilisant le modèle présentant le coefficient de corrélation. 96
Figure 53 : Zone de situation des ouvrages de diagraphie et de pompage..... 103
Figure 54 : Organigramme de traitement des données. 105
Figure 55 : Enregistrements de la diagraphie électrique, au niveau des Forages (1) : Bouyaakoubate (F1) et (2) : Dkikira (F2). 107
Figure 56 : Coupe lithologique synthétique du forage Bouyaakoubate (F1) d'après la diagraphie..... 109
Figure 57 : Coupe lithologique synthétique du forage Dkikira (F2) d'après la diagraphie. 111
Figure 58 : Coupe lithologique du forage F3 d'après la fiche de l'ABHM. 112
Figure 59 : Courbes caractéristiques des paliers dans les forages F1, F2 & F3 au niveau de la zone d'étude. 117
Figure 60 : Illustration des tests de débits des forages (A) F1, (B)F2 et (C)F3. 118
Figure 61 : Courbe caractéristique des essais de longue durée du forage (A) : Bouyaakoubate (F1), (B) : Dkikira (F2) et (C) : Fritissa (F3). 120
Figure 62 : Coupes lithologiques et techniques de forage (A) : Bouyaakoubate (F1) et (B) : Dkikira (F2). 126
Figure 63: Carte d'occupation du sol de la zone d'étude extraite de sentinel 2 land use _land cover 10m de résolution pour l'année 2023 (https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer). 131
Figure 64 : Carte des points d'analyses au niveau de la zone d'étude. 132

Figure 65 : Opérations de prélèvement d'échantillons d'eau aux forages, (A) : Ain Abainou et (B) : Dkikira dans la région Fritissa 132
Figure 66 : Résultats de l'analyse en composantes principales pour les eaux souterraines de la zone étudiée. 137
Figure 67 : Eaux souterraines de la région de Moulouya tracées dans le diagramme de Piper..... 138
Figure 68 : Carte des faciès hydrochimiques des eaux souterraines et localisation des points d'analyses dans la région Fritissa..... 139
Figure 69 : Eaux souterraines de Fritissa tracées dans les diagrammes de Gibbs. A : cations et B : anions. 140
Figure 70 : Diagrammes de distribution utilisés pour caractériser les eaux souterraines dans la région de Fritissa. 142
Figure 71 : Qualité des eaux souterraines d'irrigation basée sur la classification de Wilcox (1955)... 142
Figure 72 : Qualité des eaux souterraines d'irrigation basée sur le diagramme américain de Richards et al. (1954). 143
Figure 73 : Répartition spatiale des nitrates (A) et nitrites (B) dans les eaux souterraines de la région de Fritissa. 147

Liste des tableaux

Tableau 1 : Indices aléatoire selon le nombre des critères du Processus d'analyse hiérarchique (AHP) (Saaty, 1977). 8
Tableau 2 : Charte récapitulative utilisée pour décrire les classes des facteurs et leurs scores relatifs (Ettazarini et El jakani, 2020). 14
Tableau 3 : Besoins en eau (l/s) pour les communes de la région d'étude (ABHM, 2025). 47
Tableau 4 : Classement de la fracturation suivant la charte d'Ettazarini (2007). 81
Tableau 5 : Classement de la lithologie suivant la charte d'Ettazarini (2007). 82
Tableau 6 : Classement de la lithologie suivant la charte d'Ettazarini (2007). 84
Tableau 7 : Classement de la topographie suivant la charte d'Ettazarini (2007). 88
Tableau 8 : Classement de la pluviométrie suivant la charte d'Ettazarini (2007). 89
Tableau 9 : Exemples de modèles (IPES161) et leurs coefficients de corrélation respectifs. 90
Tableau 10 : Pourcentage des conditions des paramètres d'IPES161. 91
Tableau 11 : Données des paliers des forages selon le débit et le rabattement. 115
Tableau 12 : Débits critiques en m^3/h des forages. 117
Tableau 13 : Résultats de l'essai de pompage de longue durée sur le forage Bouyaakoubate (F1). ... 119
Tableau 14 : Résultats de l'essai de pompage longue durée sur le forage Dkikira (F2). 121
Tableau 15 : Résultats de l'essai de pompage longue durée sur forage Fritissa (F3). 122
Tableau 16 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifères au niveau des trois forages. 124
Tableau 17 : Analyse statistique des données chimiques dans la région étudiée. 136
Tableau 18 : Evolution de la variance totale exprimée obtenue à partir de l'analyse en composantes principales. 136

Liste des acronymes

ABHM	Agence du bassin hydraulique de la Moulouya
A C P	Analyse en Composantes Principales
AEP	Alimentation en Eau Potable
AHP	Processus d'analyse hiérarchique
APDP	Algorithme de pondération dynamique des paramètres
ArcGIS	Geographic Information System"
BI	Balance Ionique
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
Ca	Calcium
CCR	Commission Consultative de Régionalisation
CE	Conductivité Electrique
CI	Indice de cohérence
Cl	Chlore
CO_3	Trioxyde de carbone
CR	Taux de cohérence
DRPE	Direction de la recherche et de la planification des eaux
FAO	Organisation pour l'alimentation et l'agriculture
Fe	Fer
FR	Taux de fréquence
GPS	Global Positioning System
GSM	Service géologique du Maroc
HCO_3	Hydrogénocarbonate
HT	Titre hydrotimétrique (dureté totale de l'eau)
IER	Interaction Eau Roche
IP	Indice de perméabilité
IPES	Indice de Potentiel des Eaux Souterraines
IRE	Inventeur des Ressources en Eau
K	Potassium
Mg	Magnésium
MNT	Modèle Numérique de Terrain
Na	Sodium
Na%	Pourcentage de sodium
NO_2	Nitrites
NO_3	Nitrate
O2	Oxygène
PH	Potentiel hydrogène
PI	Indice de perméabilité
PS	Polarisation spontanée
PVC	PolyVinyl Chloride
RI	Indice aléatoire
RSC	Carbonate résiduel de sodium
SAD	Sodium Alkali Danger
SAR	Rapport d'adsorption du sodium
SO_4	Sulfate
SPSS	Statistical Package for Social Sciences
TH	Dureté totale
USEPA	Agence de protection de l'environnement des États-Unis
WGS84	World Geodetic System 1984

Table de matière

Dédicace ii
Remerciements iii
Résume v
Abstract vi
Liste des figures vii
Liste des tableaux x
Liste des acronymes xi
Table de matière xii
Introduction Générale 1
Chapitre 1 : Généralités 7
1 Introduction 7
2 Méthodes de cartographie des zones favorables à l'implantation des forages 7
2.1 L'analyse hiérarchique 7
2.2 L'approche multiméthodes 10
2.3 Méthodes des taux de fréquence et des poids d'évidence 11
2.4 Indice de Potentiel des Eaux Souterraines 12
3 Forages, diagraphies et tests de pompage 17
3.1 Principes de forages 17
3.1.1 Types de forages 20
3.1.2 Reconnaissance et exploitation 21
3.2 Méthodologie des diagraphies 25
3.2.1 Principes des diagraphies : Description des différentes techniques de diagraphie utilisées pour la caractérisation des aquifères profonds (diagraphie gamma, résistivité, SP, Calibre etc.) 25
3.2.2 Mise en œuvre des équipements de logging dans les puits 25
3.2.3 Interprétation des données de diagraphies 27
3.3 Principes des tests de pompage 29
3.3.1 Explication des objectifs des tests 29
3.4 Méthodologie des tests de pompage 30
3.4.1 Préparation et conduite des tests 30
3.4.2 Analyse des résultats des essais de pompage 30
4 Analyses chimiques des eaux souterraines 31
4.1 Principes, objectifs et importance de l'analyse chimique des eaux 31
4.2 Méthodologie d'analyse 31
5 Intégration des méthodes pour la gestion des aquifères 33
5.1 Avantages de l'approche intégrée 33
5.2 Mise en œuvre sur le terrain 33

5.3 Outils de gestion et de décision 34
6 Limites et défis de la mise en œuvre des méthodes 35
6.1 Limites des cartes probabilistes 35
6.2 Défis des diagraphies et tests de pompage 35
6.3 Problèmes liés à l'analyse des eaux 36
7 Conclusion 38
7.1 Récapitulatif des méthodes et de leur complémentarité 38
7.2 Importance pour la gestion durable des ressources en eau 39
Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude 42
1 Introduction 42
2 Cadre géographique, climatique et activités humaines 42
2.1 Cadre géographique 42
2.2 Cadre climatique 44
2.2.1 Les précipitations 44
2.2.2 Les températures 44
2.3 Activités humaines 46
2.3.1 Urbanisme 46
2.3.2 Industrie 47
2.3.3 Agriculture 47
3 Cadre géologique 48
3.1 Lithostratigraphie 48
3.1.1 Paléozoïque 50
3.1.2 Trias 51
3.1.2 Jurassique 51
3.1.3 Crétacé 52
3.1.4 Moi-Plio-Quaternaire 52
3.2 Tectonique 53
4 Hydrogéologie de surface et ressources en eau 56
4.1 Hydrographie 56
4.2 Hydrogéologie de la zone d'étude 58
4.2.1 Type d'aquifère 58
4.2.2 Système aquifère superficiel 59
4.2.3 Système aquifère semi-profond 61
4.2.4 Système aquifère profond 65
4.3 Ressources en eau 68
5 Conclusion 71
Chapitre 3 : Indice de potentiel des eaux souterraines du système aquifère semi-profond 73

1 Introduction 73
2 Collecte des données 73
2.1 Fracturation 74
2.2 Lithologie 81
2.3 Drainage 83
2.4 La pente 86
2.5 Pluviométrie 88
3 Traitement des données et résultats 89
3.1 Construction du modèle 89
3.2 Elaboration de la carte $IPES_{161}$ 91
3.2.1 Cartes thématiques des différents facteurs 91
3.2.2 Carte de l'indice du potentiel des eaux souterraines 93
3.2.3 Evaluation de la précision de la carte du modèle $IPES_{161}$ 95
4 Conclusion 97
Chapitre 4 : Caractérisation des propriétés lithologiques et hydrodynamiques du système aquifère profond 100
1 Introduction 100
2 Sources des données de diagraphie et de pompage 101
2.1 Tests de diagraphie 101
2.2 Tests d'essais de pompage 102
3 Traitement et analyse des données 105
3.1 Données diagraphiques 105
3.1.1 Forage Bouyakoubate (F1) 105
3.1.2 Forage Dkikira (F2) 108
3.1.3 Coupe lithologique du forage de Fritissa 112
3.2 Interprétation des résultats de la diagraphie électrique 112
3.2.1 Forage Bouyaakoubate (F1) 112
3.2.2 Forage Dkikira 113
3.3 Données des essais de pompage 114
3.3.1 Essais de pompage par paliers 115
3.3.2 Tests de longue durée 117
3.4 Interprétation des résultats des essais de pompage 123
4 Discussion 124
4.1 Caractérisation lithologique de l'aquifère profond 124
4.2 Caractérisation hydrodynamique de l'aquifère profond 125
5 Conclusion 127
Chapitre 5 : Évaluation de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation dans la région de Fritissa . 130
1 Introduction 130

2 Sources des données 131
3 Méthodologie des analyses chimiques des eaux souterraines 133
4 Résultats 135
4.1 Analyse statistique des données chimiques 135
4.2 Cartographie des faciès chimiques des eaux souterraines 137
5 Discussion 144
6 Conclusion 147
Recommandations 152
Références 152
ANNEXES 153

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Dans les régions arides, les dernières années ont été marquées par une diminution remarquable des précipitations, exacerbant ainsi les périodes de sécheresse (Rapport ABHM,2023). Cette tendance met une pression croissante sur les ressources en eau superficielles, déjà insuffisantes pour satisfaire les besoins en eau des populations et leurs activités agricoles. En parallèle, la démographie connaît une évolution contenue, avec une augmentation constante de la population et des besoins en eau qui suivent cette même dynamique. Face à cette situation, le recours à l'exploitation des eaux souterraines devient de plus en plus incontournable. Cependant, l'extraction d'eau provenant d'aquifères de plus en plus profonds présente de nombreux défis techniques et environnementaux. Cette étude nécessite le recours à des méthodes variées et adaptées, telles que :

- La cartographie probabiliste pour l'identification des zones favorables pour l'implantation des nouveaux forages en contexte fracturé ;
- Les diagraphies pour la caractérisation lithologique et la localisation des niveaux aquifères profonds ;
- Les tests de pompage pour évaluer la capacité de production des aquifères ;
- L'analyse chimique des eaux pour évaluer leur qualité répandant aux normes de potabilité pour des usages humains et d'irrigation. Cette approche intégrée et multidimensionnelle est essentielle pour répondre aux besoins multiples et croissants des populations locales et soutenir le développement des activités agricoles dans un contexte de raréfaction des ressources en eau.

Les aquifères carbonatés constituent des réservoirs d'eau souterraine précieux, généralement constitués de calcaires et de dolomies. Dans ces aquifères, la fracturation offre une porosité secondaire utile pour emmagasiner davantage de l'eau, surtout en présence des roches marneuses imperméables qui s'alternent avec des roches perméables et semi-perméables. Dans ce contexte carbonaté, les aquifères superficiels, étroitement liés aux conditions climatiques, restent insuffisants pour satisfaire les besoins en eau à cause de la succession des périodes de sécheresse et suite à la diminution des précipitations en zones arides et semi-arides. D'où le recours à la recherche des eaux souterraines des aquifères profonds

fracturés, poreux ou karstiques. Cela demande une gestion de ces ressources qui reste une tâche primordiale pour assurer la durabilité des ressources. La nécessité des tests, tant sur la qualité que sur la quantité, s'impose afin de déterminer le mode d'exploitation durable de ces ressources en eau. La gestion de ces ressources est contrastée avec une augmentation des besoins urgents de la population. Une autre contrainte est le rythme lent des travaux de prospection avec l'utilisation des différentes méthodes selon les caractéristiques des aquifères. En effet, la caractérisation des aquifères nécessite la reconnaissance de la géologie régionale et de la distribution des lithologies renseignant sur la porosité, la fracturation et éventuellement la karstification des roches favorables à la formation des aquifères. Dans les régions où l'agriculture est une activité importante pour l'économie de la population, les eaux d'irrigation et leur gestion posent un défi dans la mesure où la qualité des eaux et leur utilisation doivent être déterminées tout en tenant compte des types de produits d'agriculture cibles. L'approche est généralement basée sur l'analyse des ions majeurs dans l'eau des puits et des forages. Ces données d'analyse sont utiles pour comprendre les principales caractéristiques de la chimie de l'eau et pour évaluer son aptitude pour les différents usages.

Le Bassin de la Moyenne Moulouya, auquel appartient la zone d'étude est caractérisé par un climat aride à semi-aride et par les trois types d'aquifères différents :1) superficiels liés aux alluvions et remplissages de dépressions. Ce type d'aquifères souvent discontinus et alimentés à travers les pluies et les cours d'eau superficiels, reste insuffisant pour répondre aux besoins des populations en croissance continue. 2) aquifères semi-profonds, localisés dans les roches carbonatées perméables à semi-perméables, étendues dans le bassin de Moulouya et dont le potentiel peut être amélioré localement par la fracturation et/ou par la karstification. 3) le troisième type correspond aux aquifères profonds, aussi étendus dans le bassin. Ils se heurtent à la contrainte de la variabilité latérale des faciès rocheux, ce qui limite les chances de formation des aquifères productifs, surtout dans la région de Fritissa au centre de la Moyenne Moulouya où les activités agricoles exercent une pression sur les ressources en eau disponibles.

Une telle situation complexe fait émerger une problématique à divers aspects, notamment en ce qui concerne la recherche de nouvelles ressources en eau souterraines et leur gestion. La présente recherche vise trois aspects majeurs de cette problématique :

(1) L'aquifère semi-profond : la difficulté réside dans l'identification de sites favorables à de nouveaux forages, en raison l'hétérogénéité des terrains : perméables, semi-perméables et imperméables, d'une part, et la distribution non régulière de la fracturation d'autre part ;

(2) L'aquifère profond : le défi réside dans la caractérisation lithologique et la localisation des zones saturées en eau des aquifères en profondeur, ainsi que la

détermination des modalités d'exploitation durable de l'aquifère profond, d'autre part ;

(3) La gestion des eaux d'irrigation qui englobe la détermination de la qualité des eaux, l'évaluation de leur aptitude à l'irrigation, ainsi que la formulation de recommandations pour l'utilisation adaptée des différentes catégories de qualité.

Pour contribuer à l'étude de cette situation complexe, le présent travail permet d'apporter des informations utiles et présente des exemples, à travers une approche intégrée multiméthodes, pour optimiser les actions de recherche et de gestion des eaux souterraines des aquifères semi-profonds et profonds dans la région de Fritissa située dans la Moyenne Moulouya.

Ce document est organisé en cinq chapitres :

Premier chapitre.

Ce chapitre est consacré aux généralités et présente les principales notions relatives à l'approche multiméthodes, à travers une synthèse bibliographique. Il introduit également les différentes méthodes adoptées dans ce travail, à savoir : (1) la cartographie du potentiel en eaux souterraines du système aquifère semi-profond fracturé, à partir de l'exploitation des débits des forages existants ; (2) la caractérisation lithologique et hydrodynamique du système aquifère profond, à l'aide des techniques de diagraphie et des essais de pompage ; et (3) l'analyse des eaux ainsi que l'évaluation de leur aptitude à l'irrigation. Ces méthodes sont présentées avec leurs avantages respectifs, tout en soulignant leurs limites d'application.

Deuxième chapitre.

Ce chapitre présente la région d'étude, à travers la description de ses principaux aspects géographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques. Il vise à mettre en évidence les conditions naturelles et anthropiques caractérisant la région, ainsi que les enjeux et l'intérêt de l'approche intégrée multiméthodes.

Troisième chapitre.

Il constitue un exemple concret du traitement des données de forages en vue de l'élaboration d'une carte du potentiel en eaux souterrainex. Cette carte est construite à partir des débits d'eau mesurés dans les dans les forages, mis en relation avec les conditions réelles du terrain en termes de facteurs influençant l'occurrence des eaux souterraines tels que la fracturation, la lithologie, le drainage, la topographie et la pluviométrie.

Quatrième chapitre.

Ce chapitre est dédié à la caractérisation lithologique du système aquifère profond. Pour cela, des techniques de diagraphie ont été utilisées (gamma-ray, potentiel spontané, résistivités normale et latérale, et le caliper), ainsi que des essais de pompage, comprenant des tests par paliers et des essais à débits constants de longue durée, afin de déterminer les débits d'exploitation durable de l'aquifère profond.

.

Cinquième chapitre.

Ce chapitre a pour objectif l'évaluation de la qualité des eaux souterraines à travers l'analyse des éléments majeurs. Les résultats sont interprétés à l'aide des classifications mondialement recommandées pour juger de leur aptitude à l'irrigation.

Chapitre 1

Généralités

Chapitre 1 : Généralités

1 Introduction

La détermination et la caractérisation des divers types d'aquifères par l'approche multiméthode se fait par la combinaison de plusieurs méthodes de mesure et d'analyse, surtout dans un contexte carbonaté et complexe. Plusieurs objectifs peuvent être ciblés pour traiter une situation complexe, telle que celle de la région d'étude :

- ✓ La cartographie des zones favorables pour l'installation des futurs forages notamment pour l'aquifère semi-profond fracturé ;
- ✓ La caractérisation lithologique de l'aquifère profond et la détermination de la profondeur des zones aquifères saturées ;
- ✓ La détermination des débits d'exploitation conservatrice de la durabilité de la ressource en eau ;
- ✓ La détermination de la qualité des eaux souterraines et la vérification de leur aptitude pour l'irrigation.

Ainsi, le recours à une approche multiméthodes s'avère indispensable pour atteindre ces objectifs fixés. Ceci implique plusieurs techniques complémentaires telles que : (1) la construction des cartes probabilistes à travers les méthodes de prise de décision ; (2) l'application des techniques de diagraphie pour identifier la lithologie des aquifères et la profondeur des niveaux d'eau ; (3) la réalisation des tests de pompage afin de déterminer le débit de pompage assurant la satisfaction des besoins, tout en préservant la durabilité de l'aquifère ; et (4) l'analyse chimique des eaux souterraines, leur classification et l'évaluation de leur aptitude à l'irrigation.

2 Méthodes de cartographie des zones favorables à l'implantation des forages

2.1 L'analyse hiérarchique

L'analyse hiérarchique des processus (AHP) est une méthode simple à mettre en œuvre, permettant de traiter des situations complexes en structurant le problème de manière hiérarchique. Cette organisation facilite la prise de décision en offrant la possibilité de rectification des jugements émis en se basant sur la valeur du taux de cohérence (CR). Ce taux

permet de vérifier la fiabilité des comparaisons effectués entre les critères, et il est calculé à l'aide du rapport suivant :

Taux de cohérence (CR) = indice de cohérence (CI) / indice aléatoire (RI)

La procédure de calcul du taux de consistance du jugement, se fait par la multiplication des valeurs (colonnes) avec le poids du critère dans la matrice 1 non normalisée. On obtient la somme des valeurs pondérées (lignes). Puis divisons par le poids du critère (ligne).

Lambda max = moyenne des valeurs obtenues (colonne).

Finalement, on détermine l'indice de consistance

CI= (Lambda max – n) / n – 1.

On considère la valeur de RI (Randum index) en fonction du nombre de critères (n).

Qui est acceptable quand la valeur CR est inférieure à 0,1 (Figure 1).

Le taux de consistance de jugement CR (consistance ratio) = CI/RI.

Si la valeur de CR < 0,1, donc le jugement est raisonnable et acceptable.

Le choix de l'indice aléatoire dépend du nombre des critères du processus d'analyse hiérarchique (AHP) (Tableau1).

Tableau 1 : Indices aléatoire selon le nombre des critères du Processus d'analyse hiérarchique (AHP) (Saaty, 1977).

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

L'utilisation de l'approche AHP est restreinte en raison de la prise en compte de l'indépendance des critères, ce qui n'est pas toujours garanti. De plus, l'analyse de sensibilité en fonction du choix de l'avis de l'expert a un impact significatif sur les poids des facteurs de traitement du problème, employés au début du processus. Ce choix peut varier selon l'utilisateur dans un même contexte. La figure 2 présente un organigramme illustrant la structuration hiérarchique du processus décisionnel selon la méthode AHP.

Exemple AHP à 4 critères

Attribution d'une valeur de classement par comparaison des critères deux à deux suivant le choix de l'expert

a : Classement suivant l'importance du critère N°2 par rapport au critère 1
b : Classement suivant l'importance du critère N°3 par rapport au critère 1
c : Classement suivant l'importance du critère N°4 par rapport au critère 1
d : Classement suivant l'importance du critère N°3 par rapport au critère 2
e : Classement suivant l'importance du critère N°4 par rapport au critère 2
f : Classement suivant l'importance du critère N°4 par rapport au critère 3

Etape 1 : Somme des valeurs suivant les colonnes

Critères	critère N°1	critère N°2	critère N°3	critère N°4
critère N°1	1	a	b	c
critère N°2	1/a	1	d	e
critère N°3	1/b	1/d	1	f
critère N°4	1/c	1/e	1/f	1
somme	A= Σ (1+1/a+1/b+1/c)	B= Σ (a+1+1/d+1/e)	C=Σ (b+d+1+1/f)	D=Σ (c+e+f+1)

Etape 2 : Division de chaque valeur par la somme de la colonnes

Critères	critère N°1	critère N°2	critère N°3	critère N°4	
critère N°1	1/A	a/B	b/C	c/D	ligne 1
critère N°2	(1/a)/A	1/B	d/C	e/D	ligne 2
critère N°3	(1/b)/A	(1/d)/B	1/C	f/D	ligne 3
critère N°n	(1/c)/A	(1/e)/B	(1/f)/C	1/D	ligne 4

Etape 3 : Calcul du poids par somme des valeurs pondérées pour chaque les lignes divisé par nombre des critères n

Σ ligne 1 = (1/A + a/B + b/C + c/D)/4
Σ ligne 2 = ((1/a)/A + 1/B + d/C + e/D)/4
Σ ligne 3 = ((1/b)/A + (1/d)/B + 1/C + f/D)/4
Σ ligne 4 = ((1/c)/A + (1/e)/B + (1/f)/C + 1/D)/4

Etape 4 : Multiplication des valeurs (colonnes) avec le poids du critère dans la matrice 1 non normalisée.

Critères	critère N°1	critère N°2	critère N°3...	critère N°n
critère N°1	(1)*((1/A+a/B+b/C+c/D)/4)	a*(1/A+a/B+b/C+c/D)/4)	b*(1/A+a/B+b/C+c/D)/4)	c*(1/A + a/B + b/C + c/D)/4)
critère N°2	(1/a)*(((1/a)/A+1/B+d/C+e/D)/4)	1*(((1/a)/A+1/B+d/C+e/D)/4)	d*(((1/a)/A+1/B+d/C+e/D)/4)	e*(((1/a)/A + 1/B + d/C + e/D)/4)
critère N°3...	(1/b)*(((1/b)/A+(1/d)/B+1/C+(f/D)/4)	(1/d)*(((1/b)/A+(1/d)/B+1/C+(f/D)/4)	1*(((1/b)/A+(1/d)/B+1/C + f/D)/4)	f*(((1/b)/A + (1/d)/B + 1/C + f/D)/4)
critère N°n	(1/c)*(((1/c)/A+(1/e)/B+(1/f)/C+1/D)/4)	(1/e)*((1/c)*(((1/c)/A+(1/e)/B+(1/f)/C+(1/D)/4)	(1/f)*((1/c)*(((1/c)/A+(1/e)/B+(1/f)/C+(1/D)/4)	1*((1/c)*(((1/c)/A + (1/e)/B + (1/f)/C 1/D)/4)

Calcul de l'indice de consistance (CI):

Σ ligne 1
Σ ligne 2
Σ ligne 3
Σ ligne 4

λ max = Σ ligne d'étape 4 (1,2,3,4)/4

CI = (λ max -4)/(4-1)

Détermination de l'indice aléatoire (RI):

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

RI: indices aléatoire, selon le nombre des critères du processus d'analyse hiérarchique (AHP) (Saaty, 1977).

4 critères => RI = 0,9

Etape 5 :

Calcul du taux de consistance (CR):

CR= CI/RI

Validation du taux de consistance (CR):

Décision si CR est inférieur à 0,1 donc le jugement est acceptable

Figure 1 : Etapes de procédure de calcul du taux de consistance (Saaty,1977).

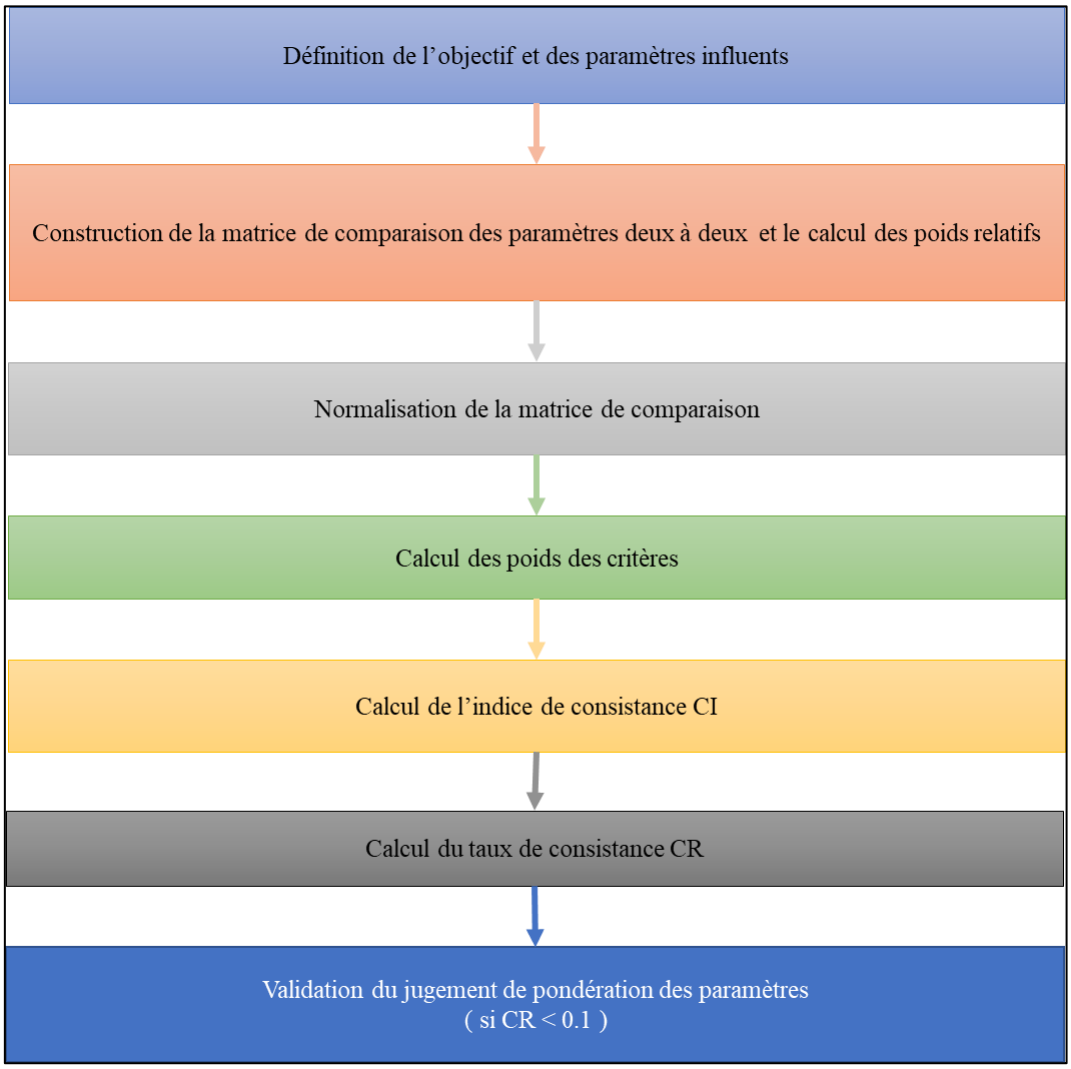


Figure 2 : Organigramme du processus d'analyse hiérarchique (AHP) (Saaty, 1977).

2.2 L'approche multiméthodes

L'approche repose sur l'utilisation de plusieurs méthodes, pour résoudre un problématique complexe et prendre des décisions éclairées sur la base de divers critères (Figure 3). Par exemple, la caractérisation de la fracturation peut être effectuée à partir de l'analyse des affleurements fracturés, de l'interprétation des profils sismiques pour identifier les zones fracturées des aquifères, ou encore par l'utilisation des piézomètres dans le cadre des tests de pompage. Cependant, cette approche reste fortement dépendante de la disponibilité et de la qualité des données de base. Par ailleurs, le coût élevé lié à la mise en œuvre simultanée de plusieurs techniques peut représenter un frein à son application à grande échelle.

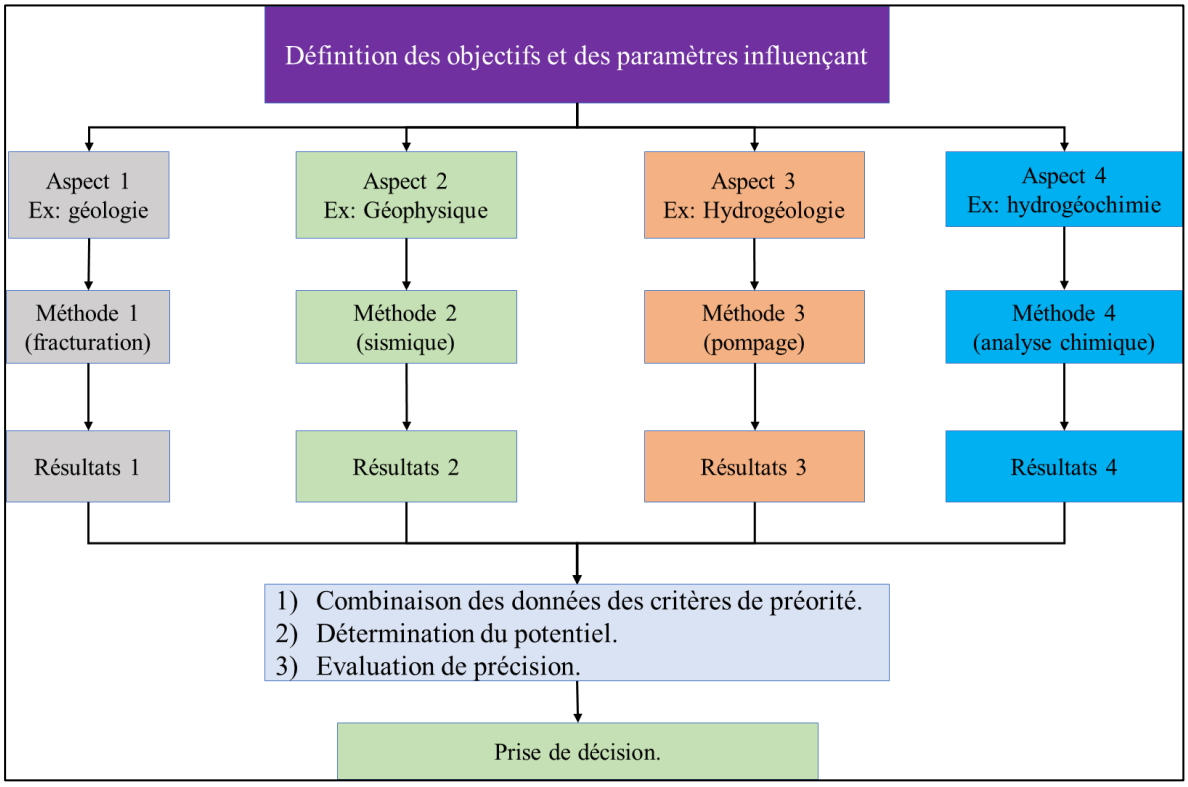


Figure 3 : Organigramme de l'approche multiméthodes (Hanich et al. 2008 ; Koffi et al 2016).

2.3 Méthodes des taux de fréquence et des poids d'évidence

Il s'agit d'une méthode d'analyse statistique fondée sur les effectifs des variables, avec une prise de décision basée sur l'occurrence d'un événement. Ce type d'approche a été utilisé dans plusieurs études, notamment celles de Abd Manap et al. (2012), Trabelsi et al. (2019), Abdekareem et al. (2023) et Bhandari et al. (2024).

La technique du rapport de fréquence est une méthode statistique permettant de simuler les conditions environnementales. Elle repose sur la comparaison des effectifs des différentes classes de chaque paramètre étudié avec une variable cible binaire, codée généralement 0 ou 1 selon la présence ou l'absence de l'événement étudié. La décision est alors prise en fonction des données observées, ce qui permet une évaluation de la précision du modèle.

Toutefois, cette méthode présente certaines limites. Elle est sensible à la taille de la population étudiée, à la distribution des observations entre les différentes classes et aux paramètres choisis. Ces éléments peuvent influencer l'efficacité et la fiabilité des résultats obtenus, notamment pour certaines classes sous-représentées ou mal réparties.

La Figure 4 illustre, à travers un organigramme, les différentes étapes de mise en œuvre

de cette méthode d'analyse statistique.

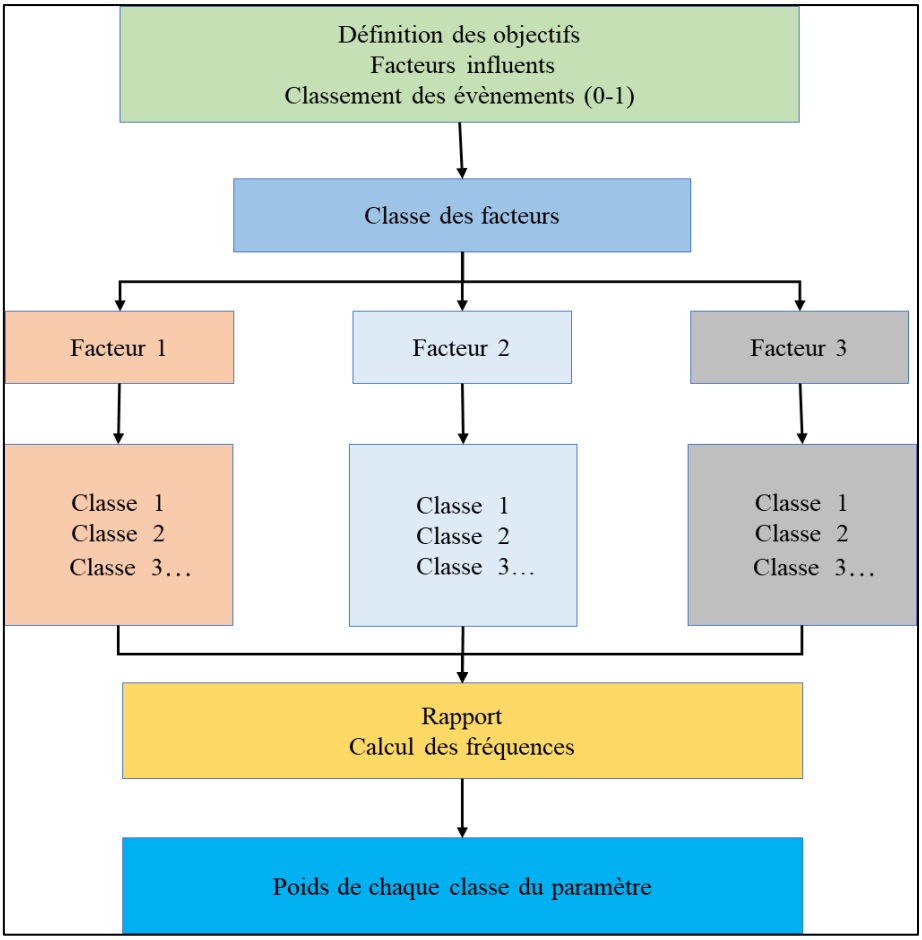


Figure 4 : Organigramme de l'approche du Taux de fréquence (FR) et Poids d'évidence (WoE) (Abd Manap et al. 2012, Trabelsi et al 2019, Abdekareem et al. 2023 ; Bhandari et al. 2024).

2.4 Indice de Potentiel des Eaux Souterraines

L'Indice de Potentiel des Eaux Souterraines (IPES) est l'une des principales méthodes utilisées pour évaluer la capacité d'un aquifère. Il sert d'indicateur permettant d'identifier les zones favorables à l'accumulation des eaux souterraines et d'estimer la quantité de ressources exploitables de manière durable. L'indice IPES repose sur l'intégration de plusieurs facteurs clés influençant la présence et la disponibilité des eaux souterraines. Parmi ces facteurs figurent la fracturation, la lithologie, le drainage, la topographie et les précipitations. La combinaison de ces paramètres permettent d'évaluer les zones potentiellement favorables à l'accumulation et à l'exploitation durable des ressources en eaux souterraines (Ettazarini, 2007 ; Ettazarini et El Jakani, 2020 ; Ben Driss et al., 2024). La figure 5 illustre l'organigramme général de cette approche.

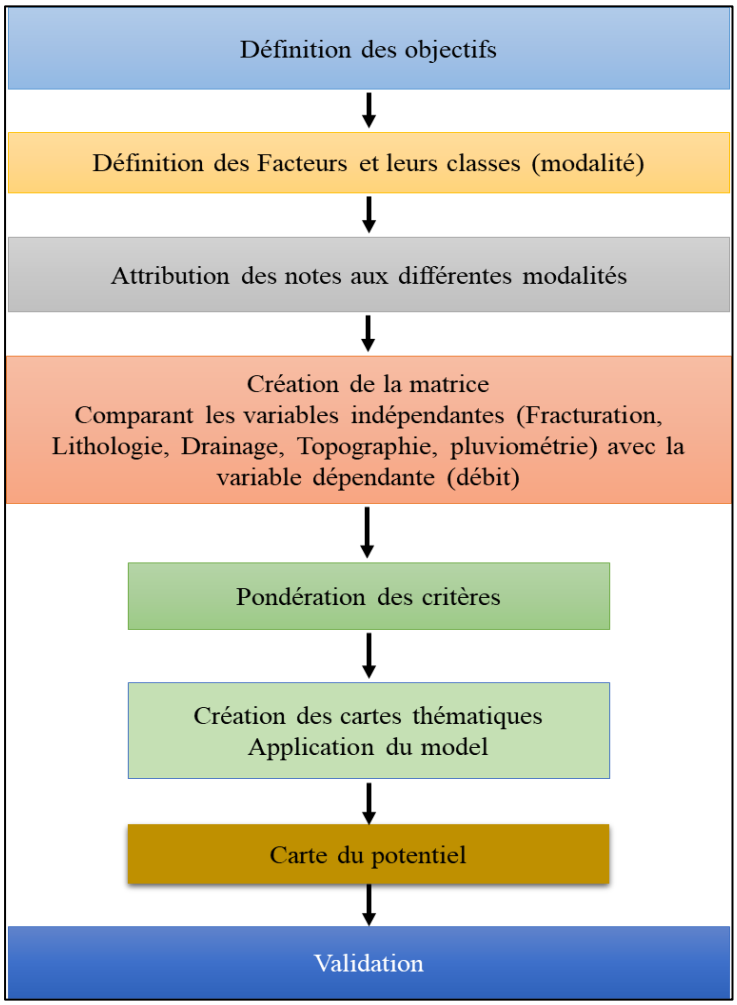


Figure 5 : Organigramme d'Indice de Potentiel des Eaux Souterraines (IPES) (Ettazarini, 2007 ; Ettazarini et El Jakani, 2020 ; Ben Driss et al. 2024).

La procédure d'élaboration d'IPES commence par la collecte des données de base relatives à cinq critères fondamentaux Ces données comprennent les fiches techniques, décrivant la nature des formations géologiques traversées, leurs épaisseurs, le toit et le mur de l'aquifère, le débit des forages, ainsi que leur localisation géographique. La fracturation est évaluée à travers l'intensité et l'orientation des failles La topographie est caractérisée par la pente et l'altitude, tandis que le drainage décrit le réseau hydrographique et la distance des sites par rapport aux cours d'eau principaux. Enfin, la pluviométrie est représentée par les précipitations moyennes annuelles, spécifiques à chaque zone de la région d'étudié. Chaque critère est ensuite noté sur une échelle de 1 à 10, en fonction de son influence sur le potentiel en eaux souterraines. Cette évaluation repose sur l'application d'un algorithme de pondération dynamique, qui permet d'ajuster les poids attribués aux paramètres en fonction de leur contribution aux rendements (Ettazarini, 2007 ; Ettazarini et El Jakani, 2020) (Tableau 2, Figure 6).

Tableau 2 : Charte récapitulative utilisée pour décrire les classes des facteurs et leurs scores relatifs (Ettazarini et El jakani, 2020).

Paramètres	Conditions peu favorables	Conditions moyennement favorables	Conditions très favorables
Fracturation	1. Roche non fracturée. 2. Diaclases fréquentes, plans de faille discontinus. 3. Plans de fissures et de schistosité.	4. Faille incertaine (linéament seulement). 5. Plans de fracture fréquents et locaux. 6. Failles locales et certaines (< 1 km de long). 7. Failles locales interconnectées avec des vues rapprochées.	8. Faille certaine, distincte et kilométrique (> 1 km). 9. Faille kilométrique interconnectée (1-3 km de long) avec plans rapprochés. 10. Zone de cisaillement, failles majeures longues (> 3 km).
Lithologie	1.Quartzite, gneiss, granite, migmatite, andésite, rhyolite, schiste faiblement fracturé. 2. Schiste altéré, schiste fissuré, alternance schiste-quartzite fracturée, alternance quartzite-grès. 3. Schiste très fracturé, schiste altéré et fracturé, alternance schiste-grès, gabbro, dolérite, etc. alternance conglomérat-quartzite, argile-marne.	4. Grès, micro-conglomérat, conglomérat, calcaire, dolomie, grès schisteux fracturé, alternance pélite-sable, alternance schiste-sable fracturé, dolérite fracturée, calcaire marneux - argile sableuse. 5. Grès fracturé, conglomérat fracturé, calcaire sableux, calcaire fracturé, schiste sableux fracturé, quartzite fracturé, calcaire-dolomie-grès. 6. Micro-conglomérat fracturé, basalte fracturé, calcaire sableux fracturé. 7. Micro-conglomérat sableux fracturé.	8-10. Grès poreux et fracturé, basalte vacuolaire et dolérite, basaltes.
Drainage (ordre des cours d'eau)	1. Escalade. 2. Ravin isolé, cours d'eau temporaire. 3. Ordre des cours d'eau (1).	4. Ordre des voies navigables (2). 5. Ordre des voies navigables (3). 6. Ordre des voies navigables (4). 7. Ordre des voies navigables (5).	8. Ordre des voies navigables (6). 9. Voie d'eau permanente (ordre 7). 10. Voie navigable permanente (ordre > 7).
Topographie (% de pente)	1. Pente > 65 %. 2. Pente 54-65. 3. Pente 45-54.	4. Pente 30-45. 5. Pente 24-30. 6. Pente 12-24. 7. Pente 9-12.	8. Pente 6-9. 9. Pente 3-6. 10. Pente < 3.
Précipitations (mm/an)	1.Précipitations < 100. 2. 100 < Précipitations < 200. 3. 200 < précipitations < 300.	4. 300 < précipitations < 400. 5. 400 < précipitations < 500. 6. 500 < précipitations < 600. 7. 600 < précipitations < 700.	8. 700 < précipitations < 800. 9. 800 < précipitations < 900. 10. Précipitations > 900.

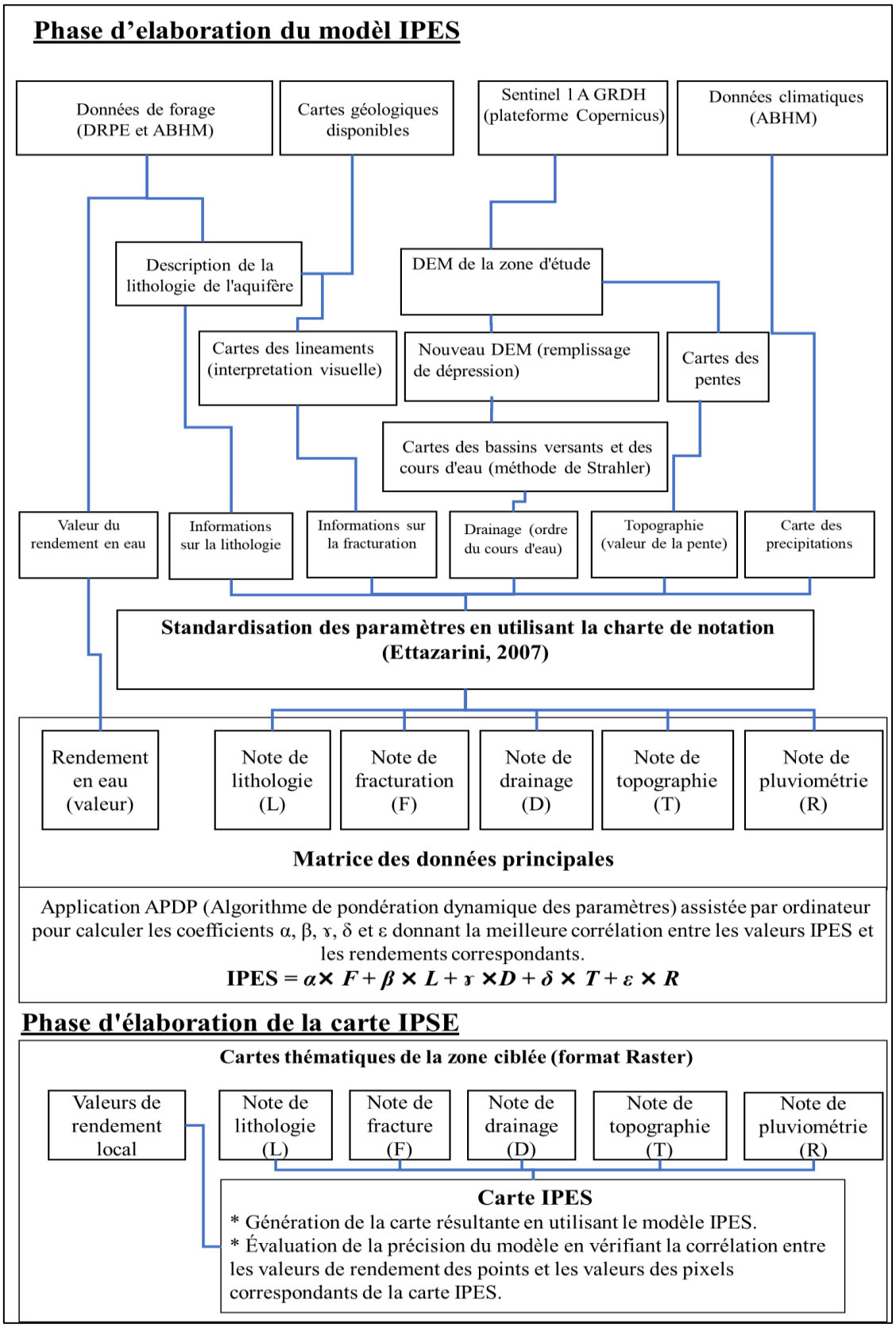


Figure 6 : Procédure générale pour élaboration de la carte IPES (Ettazarini et El Jakani, 2020).

Les données de classement sont ensuite traitées à l'aide d'un algorithme de pondération dynamique, qui attribue à chaque paramètre une importance relative. Cette dernière peut varier en fonction des spécificités de la région et du contexte hydrogéologique. Le calcul de

l'IPES se fait selon la formule suivante :

$$IPES = \sum(Pi \times Ci)$$ Avec P : paramètre et C : coefficient.

Une note finale est obtenue en pondérant les valeurs de ces paramètres à l'aide d'un ordinateur comme le montre la figure 7.

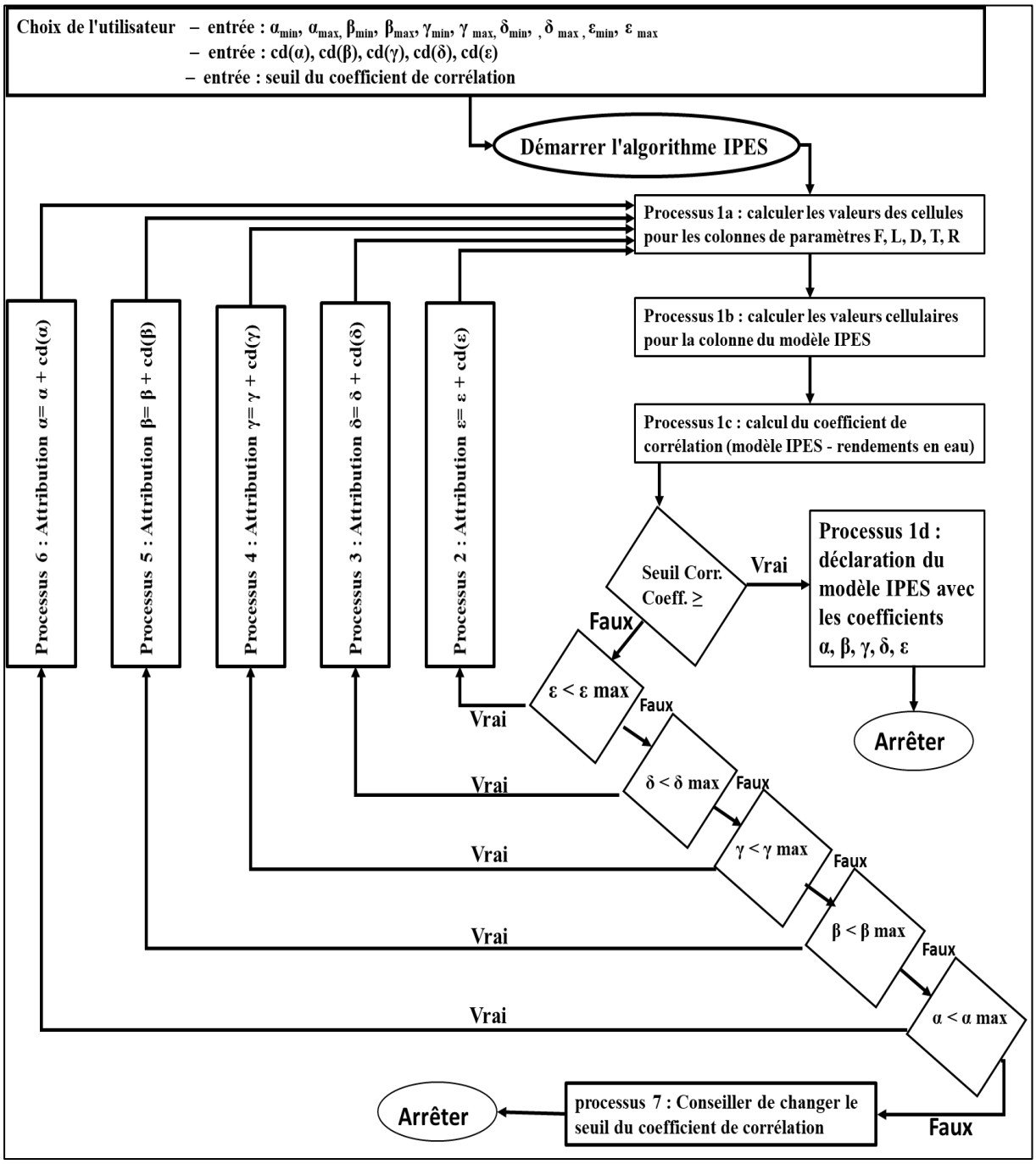


Figure 7 : Description de l'algorithme de pondération dynamique des paramètres (APDP) utilisé pour élaborer le modèle IPES (Ettazarini et El Jakani, 2020).

L'utilisation de l'outil Map Algèbra dans ArcGIS et des cartes au format raster, permet de générer une carte du potentiel en eaux souterraines de la zone d'étude. Les zones présentant un

indice IPES élevé révèlent un bon potentiel d'eau souterraine, alors qu'un indice IPES faible traduit une ressource limitée ou de qualité détériorée. L'IPES constitue donc un outil d'aide à la décision permettant d'identifier les zones favorables à l'implantation des forages, orienter les choix d'aménagement, et optimiser la gestion durable des ressources hydriques des aquifères. L'IPES est mis en œuvre pour identifier les ressources en eau souterraine destinées à l'agriculture, surtout dans les régions vulnérables où des procédures de protection sont indispensables. La précision de l'IPES dépend de la qualité des données disponibles et de la mise à jour des informations hydrogéologiques. L'IPES offre une évaluation globale, rapide et à grande échelle du potentiel en eaux souterraines, en s'appuyant sur des critères hydrogéologiques clés. Pour des analyses plus détaillées et spécifiques, l'IPES est une méthode efficace et simple à mettre en œuvre, comparée à d'autres méthodes telles que l'AHP, l'approche multiméthodes, le taux de fréquence (FR) et le poids d'évidence (WoE) dans des contextes où les données sont disponibles. La cartographie de la potabilité des eaux souterraines a fait l'objet de plusieurs recherches dans différentes régions du Maroc, notamment à Tafraout (Ettazarini, 2007) et à Kasbat Tadla (Ettazarini et El Jakani, 2020). Ces cartes sont généralement produites par intégration des couleurs qui symbolisent différents niveaux de probabilité, habituellement exprimés soit en pourcentage (0-100 %), soit sous forme d'indices de possibilité de présence d'eau (0 à 1).

L'atout de l'approche IPES réside dans sa flexibilité d'application, testée avec succès dans divers contextes géologiques au Maroc (Ettazarini, 2007 ; Ettazarini et El Jakani, 2020 ; Youan et al, 2011 ; David et al, 2012 ; Elmahdy et al, 2014 ; Al-Gburi, et al, 2022). Toutefois, ses performances restent liées à la disponibilité, à la qualité et à la répartition spatiale des données utilisées dans le modèle.

3 Forages, diagraphies et tests de pompage

3.1 Principes de forages

Après l'élaboration de la carte probabiliste du potentiel en eaux souterraines et l'implantation du site du forage, l'exploration des aquifères par forage commence avec l'utilisation des méthodes et techniques spécifiques, choisies en fonction des caractéristiques lithologiques des aquifères et de la profondeur ciblée. Cette phase de prospection commence par la mise en place d'une sondeuse adaptée à ce genre de travaux (Figure 8).

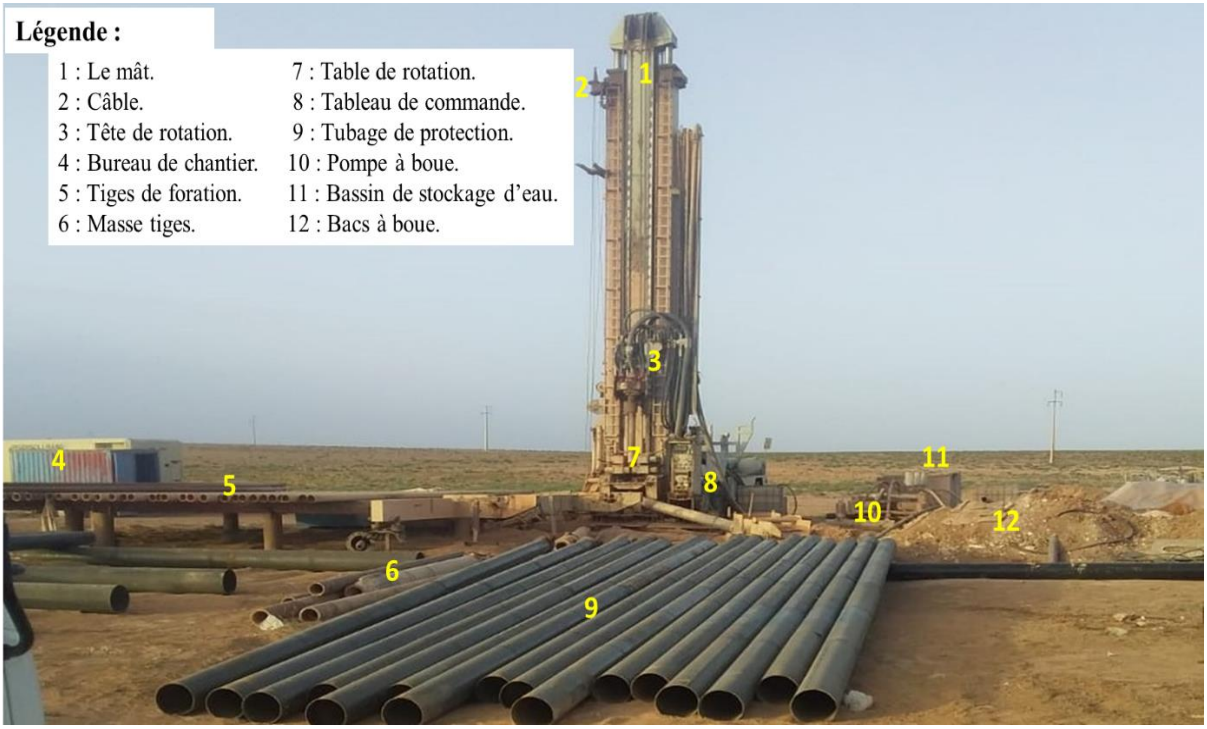


Figure 8 : Illustration de la foreuse sur le forage Dkikira (Moyenne Moulouya) (DRPE ; Ben Driss,2024).

L'atelier de foration est équipé de tous les accessoires pour le déroulement des travaux, l'accouplement du tricône ou du marteau avec les tiges pour foncer le forage. Au fur et à mesure que le forage progresse dans le sol, on ajoute les tiges tout en récupérant les échantillons dans des caisses pour l'analyse et la détermination de la lithologie de terrain traversé. Les tiges employées ont généralement une longueur de 6 m et un diamètre de 4″1/2 dans le cas des tiges de circulation normale. Dans le cas de la circulation inverse, le diamètre des tiges est de 5″1/2 avec double parois pour faciliter la circulation du fluide de la foration et la remontée des échantillons (Figure 9).

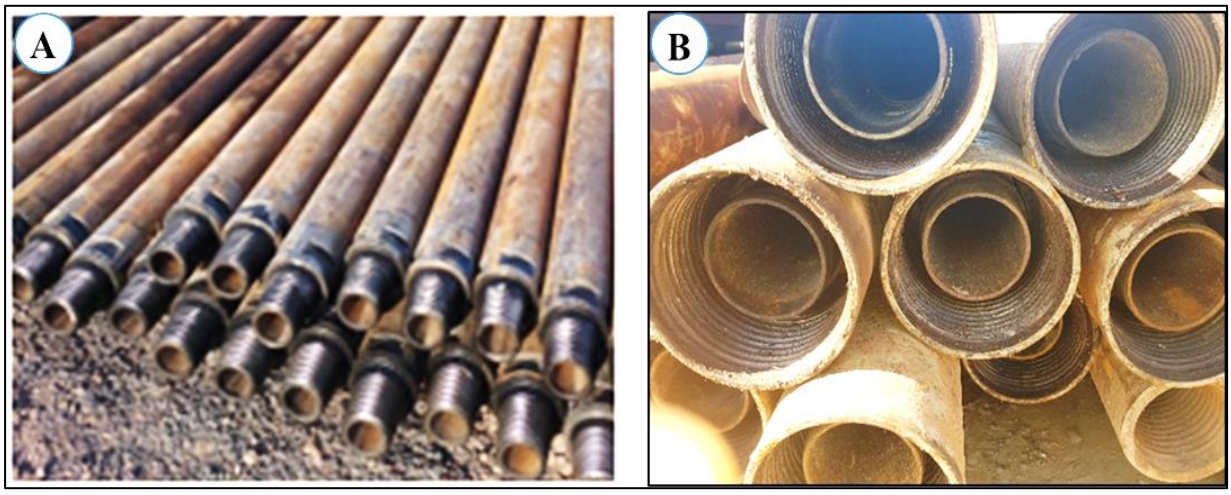


Figure 9 : (A) Tiges de circulation normale, (B) tiges de circulation inverse.

L'exploration des aquifères peut se faire selon deux méthodes : la 1) circulation normale, où le fluide est injecté à travers les tiges puis remonte par l'espace annulaire en entrainant des échantillons, formant ainsi un circuit fermé et, 2) la circulation inverse, où le fluide est envoyé depuis les parois des tiges avec retour à l'intérieur des tiges. Le choix de la méthode à utiliser dépend de la lithologie des formations géologiques à forer (Figure 10).

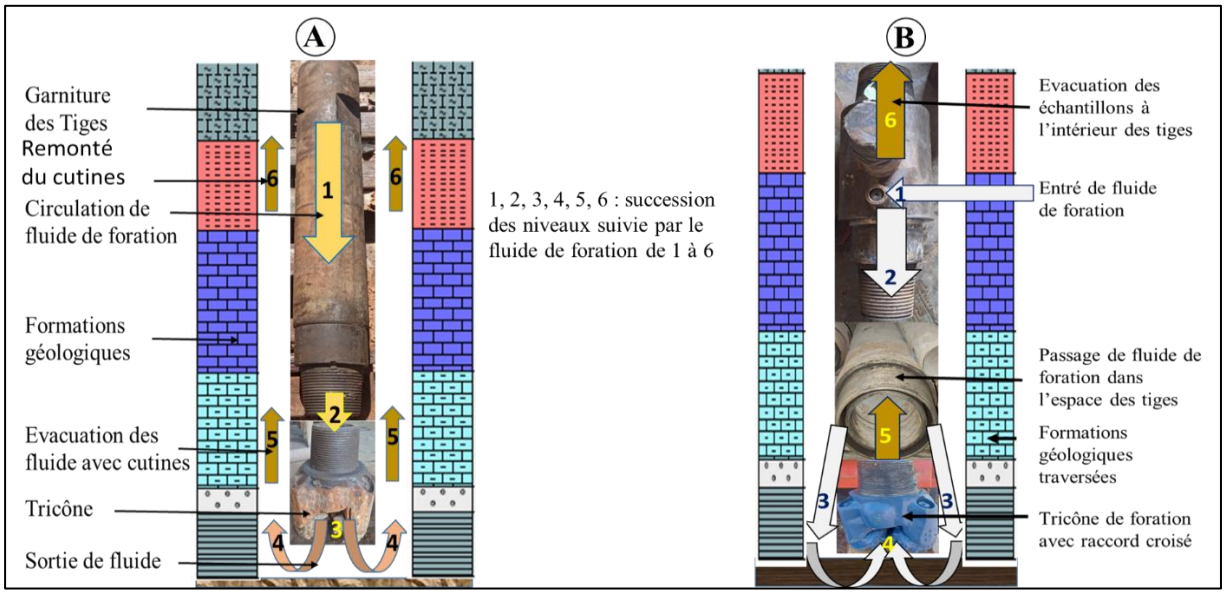


Figure 10 : (A) Système de foration en circulation normale, (B) Foration en circulation inverse.

Les opérations de prospection des nappes d'eau par forage de reconnaissance utilisent généralement un trépan de diamètre 8″ 1/2 (21 cm), tandis que les forages destinés à l'exploitation nécessitent des diamètres plus larges, pouvant aller jusqu'à 1 mètre, afin de faciliter l'installation du tubage de protection. La perforation est réalisée de façon rotative grâce à une force motrice fournie par un engin lourd nommé sondeuse. Le forage par percussion se fait grâce à l'abrasion et au broyage du sol, en utilisant un équipement nommé tricône lors d'un forage rotatif à la boue, ou en employant un instrument attaché au marteau, également connu sous le nom de taillant lors d'un forage à l'air (Figure 11). L'évacuation des déblais se fait par la circulation, directe ou inverse du fluide.

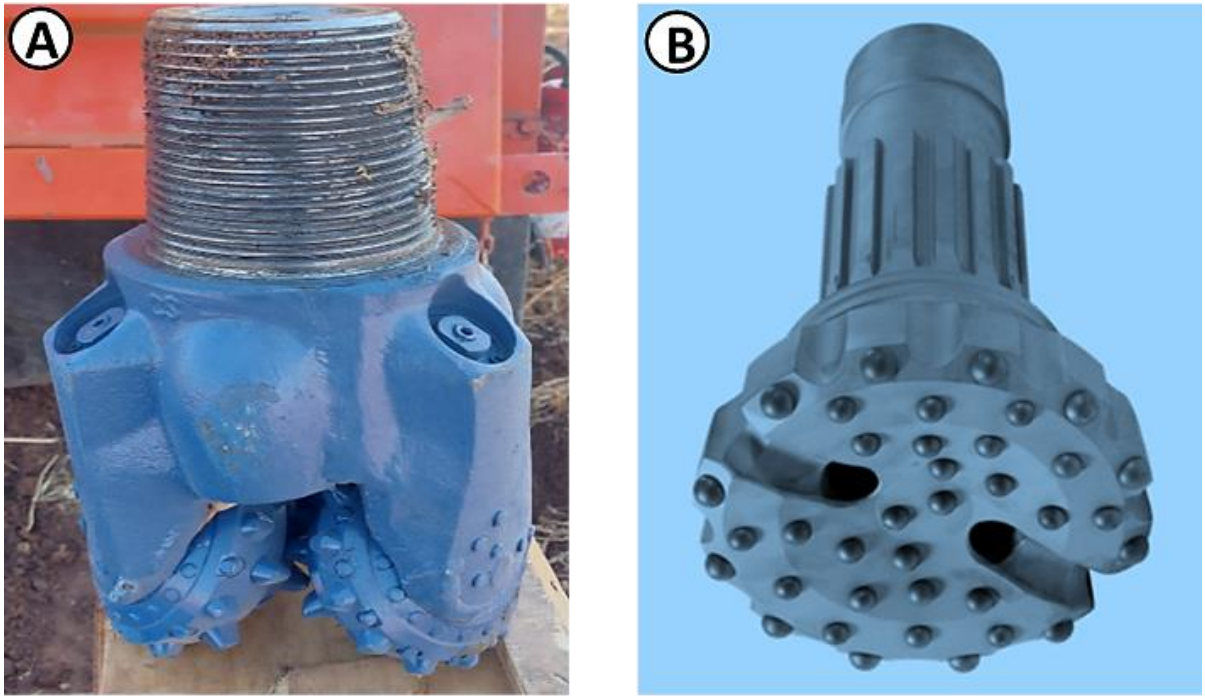


Figure 11 : Outils de foration (A) : Tricône, (B) : Taillant.

3.1.1 Types de forages

Pour les forages visant la prospection des aquifères semi-profonds et profonds, la perforation se fait généralement avec marteau fond du trou à l'air comprimé dans des formations dures (cas des calcaires, grès, et granite). Alors que pour les formations fracturées moins résistantes (cas des argiles, marnes, et sables), la prospection s'effectue par la méthode de rotary avec circulation de la boue provoquant le colmatage provisoire des parois contre tous les éboulements jusqu'à l'achèvement de l'opération de prospection. Généralement, pour les forages destinés aux aquifères profonds, le type de la prospection est rotary à la boue en circulation normale ou inverse. Selon les objectifs de la prospection, plusieurs méthodes peuvent être employées surtout la perforation au rotary à la boue en circulation normale ou inverse (Figure 12), la prospection au marteau fond du trou en circulation normale ou inverse, la perforation par battage, la prospection par tarière, avec marteau hors du trou, au carottage et par havage.

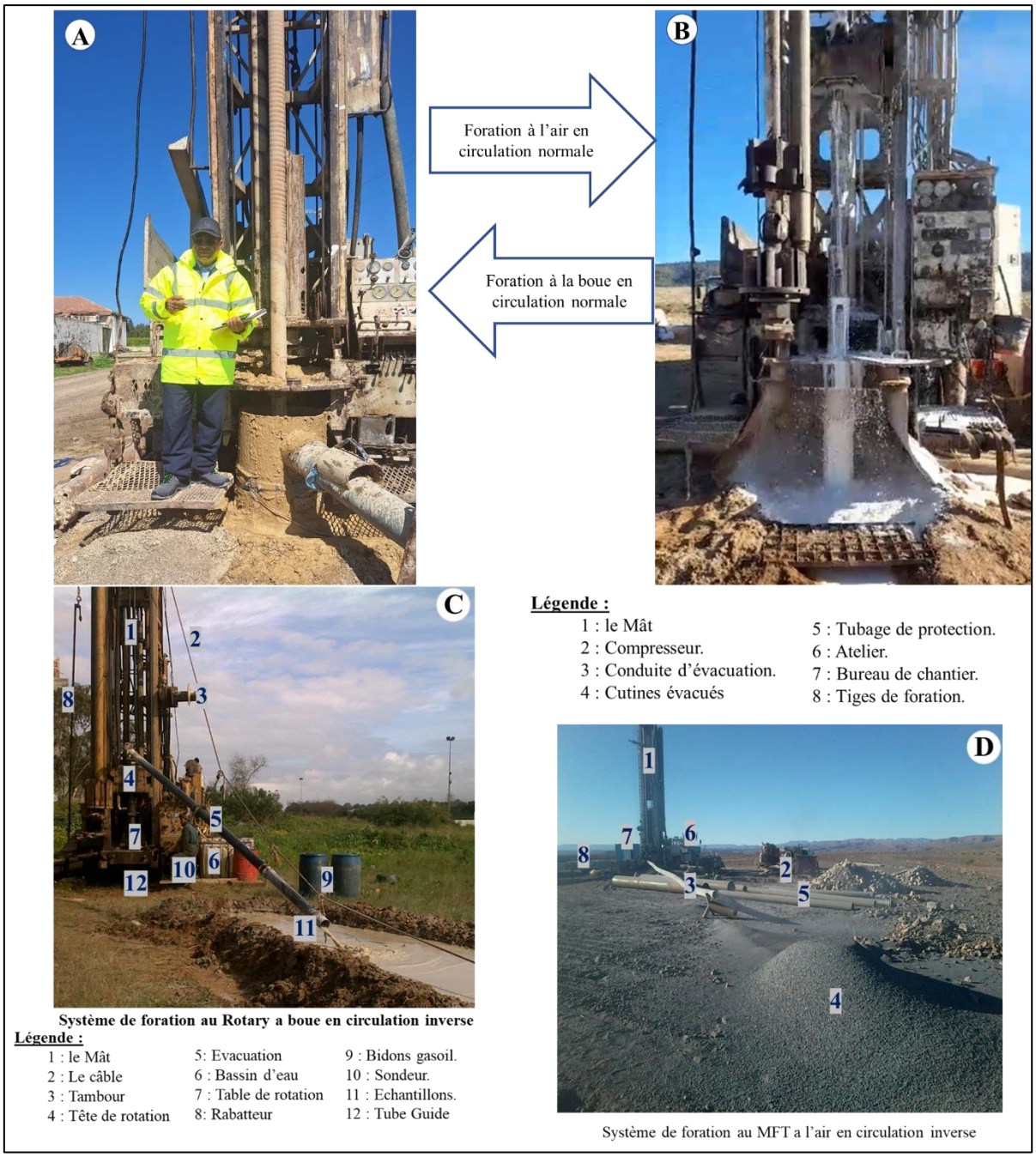


Figure 12 : Illustrations des méthodes de foration. (A) : Rotary à la boue en circulation normale ; (B) : Foration au marteau fond du trou en circulation normale ; (C) : Rotary à la boue en circulation inverse ; (D) : Foration au marteau fond du trou en circulation inverse.

3.1.2 Reconnaissance et exploitation

A la fin de la prospection de reconnaissance, le géologue chargé de suivi du projet de la prospection, procède à l'établissement du log lithologique (Figure 13), signale les venues d'eau, leurs côtes et les débits mesurés avec quelques analyses sur le terrain notamment la conductivité électrique, pH, la salinité, la teneur en Fer, en Oxygène et en Magnésium. Ces informations, mesurées directement sur le terrain, vont permettre de prendre la décision d'exploiter le forage

si la qualité des eaux répond aux besoins demandés ou de l'abandonner dans le cas de mauvaise qualité.

Figure 13 : Récupérations des cuttings pour analyse lithologique (forage Sidi Ali Belkacem, ABHM 2023).

A la suite de l'identification de la nature lithologique des formations géologiques récoltée dans le forage au moment de l'avancement des travaux du forage, logiciel du forage « version 2 » pour établir le log lithologique et la coupe technique (Figure 14). Le log montre, pour chaque couche de formation géologique, son épaisseur, les limites du toit et du mur suivant la profondeur, la situation géographique du forage avec ces coordonnées et la division administrative du site du forage. Dans la coupe technique il est noté le numéro d'inventer des ressources en eau (IRE) du forage attribué par la direction de la recherche et de la planification de l'eau, l'échelle d'établissement de cette coupe, la technique et la méthode de la foration

employée, le diamètre de foration, la profondeur totale du forage en mètre, le niveau statique de l'eau de la nape, le toit et le mur pour chaque couche avec sa nature lithologique. Pour le cas du forage d'exploitation qui contient le tubage d'équipement, en plus des informations qui sont incluses dans la coupe technique du forage de reconnaissance, l'intégration de la nature du tubage (PVC, acier…) avec son diamètre, ainsi les limites de tubage plein et crépiné avec l'indication des cotes de cimentation et du massif de filtration.

Figure 14 : Opération d'identification de la lithologie du forage par l'hydrogéologue.

L'identification de la nature géologique du forage permet d'obtenir une coupe technique, qui comprend les données géologiques, hydrogéologiques et techniques pour la reconnaissance en plus de l'architecture du tubage prévue pour l'équipement du trou du forage d'exploitation (Figure 15).

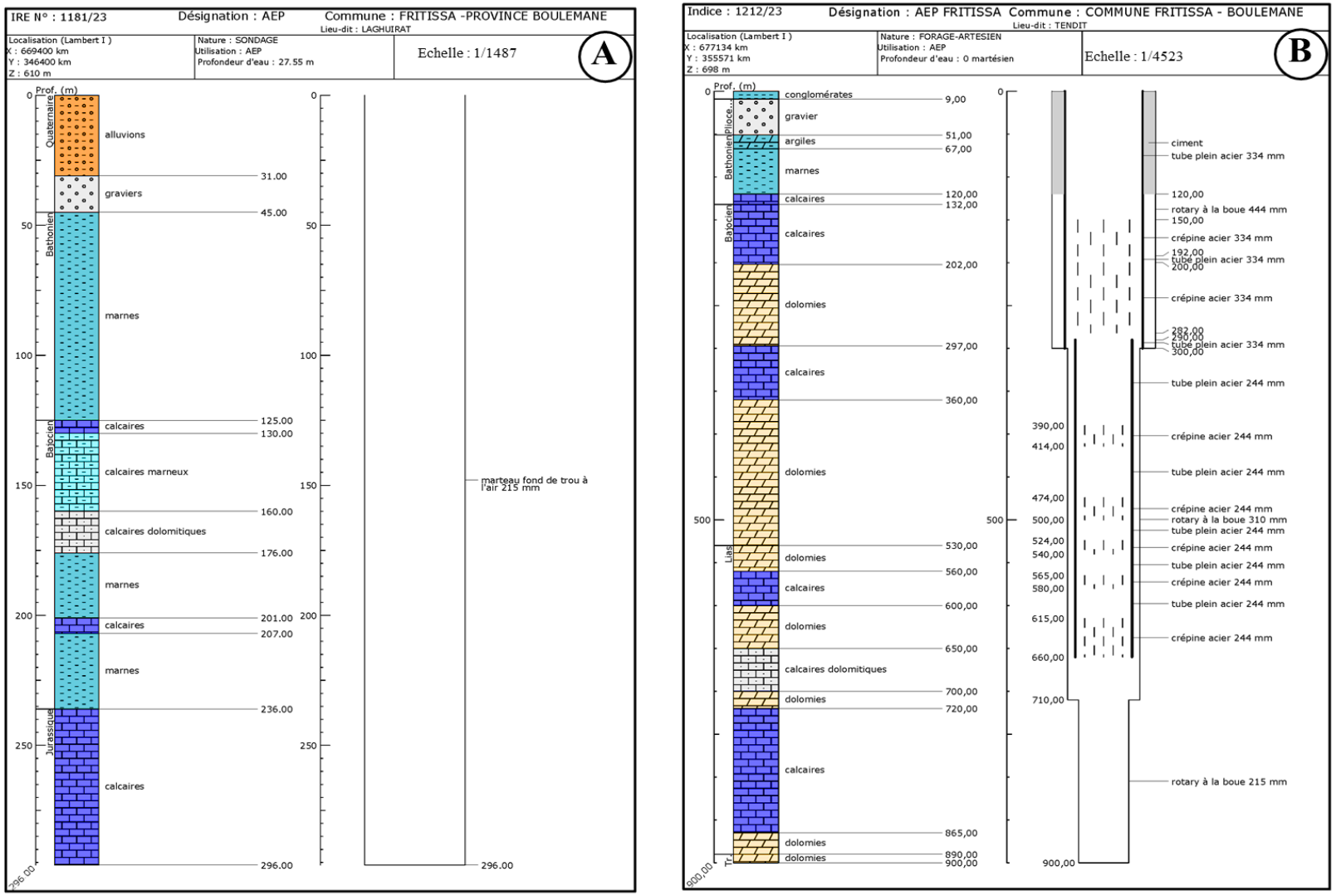


Figure 15 : Exemples des logs lithologiques et techniques d'un forage (A) : forage de reconnaissance ; (B) forage d'exploitation.

3.2 Méthodologie des diagraphies

3.2.1 Principes des diagraphies : Description des différentes techniques de diagraphie utilisées pour la caractérisation des aquifères profonds (diagraphie gamma, résistivité, SP, Calibre etc.)

Les techniques des diagraphies sont utilisées pour la caractérisation des aquifères profonds par identification de la lithologie géologique du forage, identification du diamètre du trou, contrôle des travaux du forage et déterminer les paramètres caractéristique de l'aquifère par la descente d'une sonde électrique qui permet l'enregistrement des paramètres diagraphiques le long du forage a savoir calibre du trou pour l'identification des niveau fracturés, gamma Ray pour signaler les niveau radioactive déterminant les niveau argileux, polarisation spontanée pour localisation des niveaux avec variation de concentration, les résistivités (petite normale 16", grande normale 64" et mono-électrode 48"), conductivité, température et l'inclinaison du forage pour mesurer la déviation de verticalité du forage.

3.2.2 Mise en œuvre des équipements de logging dans les puits

La réalisation des techniques de diagraphie se fait par la mise en place d'un véhicule équipé des sondes de détection avec des niveaux pour l'émission d'un courant et des niveaux pour la réception de dite courant en plus d'un ordinateur pour l'enregistrement des données pour chaque paramètre (Figure 16A). La descente de la sonde se fait à l'aide d''un câble en acier entouré dans un tambour avec à son intérieur plusieurs fils pour transfert des informations entre la sonde et l'ordinateur. L'enregistrement des données durant l'opération de la diagraphie se fait par la sonde 9074 (cas de calibre et Gamma Ray) ; alors que l'enregistrement des paramètres des résistivités, température, l'inclinomètre et le potentiel spontané se fait par la sonde 9044 (Figure 16B).

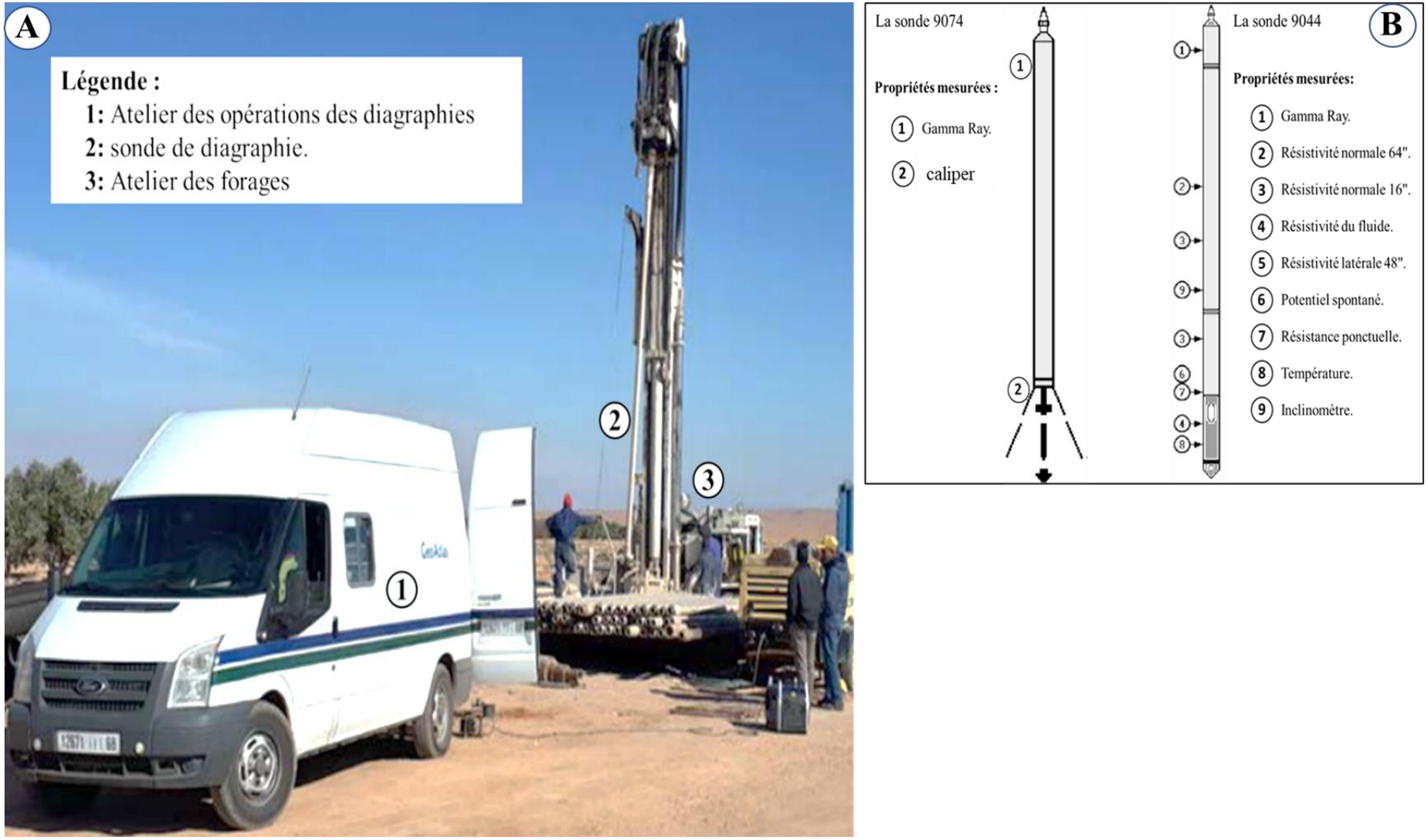


Figure 16 : Opération de la diagraphie. (A) : illustration de l'atelier d'enregistrement des opérations de diagraphie. (B) : Sondes 9044 & 9074 d'enregistrement des opérations des diagraphies (Forage Dkikira, DRPE).

3.2.3 Interprétation des données de diagraphies

Avec l'opération de la diagraphie le fonctionnement par la sonde de détection se produit par l'intermédiaire d´un compteur, qui permet d'enregistrer le numéro de particules gamma qui proviennent des matériaux géologiques. De cette façon les formations géologiques argileuses présentent des valeurs de gamma naturel élevé que d´autres composants. Les enregistrements électriques correspondant aux résistivités normale 16´´ et 64´´, se réalisent de la même façon et conjointement avec le gamma naturel. Pendant sa descente, la sonde émet du courant électrique avec deux appareils de 16´´ et 64´´. De cette façon les matériaux argileux présentent des valeurs basses de résistance, alors que les matériaux comme les carbonates, les graviers, les calcaires présentent des valeurs de résistance élevées. La différence de qualité d'eau dans l'aquifère et le fluide provoque l´apparition de polarisation spontanée. En plus la technique de diagraphie permet l'enregistrement de la température et du diamètre du forage avec des niveaux fracturés et karstifiés caractérisés par une augmentation de diamètre (Figure 17). La caractérisation géologique des aquifères profonds est devenue possible avec le développement des technologies de diagraphie disponible (Bourgeois, 1976 ; Hsieh et al, 2005 ; Hacini, 2006). En effet, les données de la diagraphie permettent la détermination de la nature lithologique des aquifères, leur étendue ainsi que d'autres caractères pouvant aider pour estimer les aquifères en eau. Pour une identification efficace, l'utilisation des tests de pompage demeure une méthode directe pour ces aquifères, permettant de préserver leur durabilité et d'établir efficacement leurs caractéristiques.

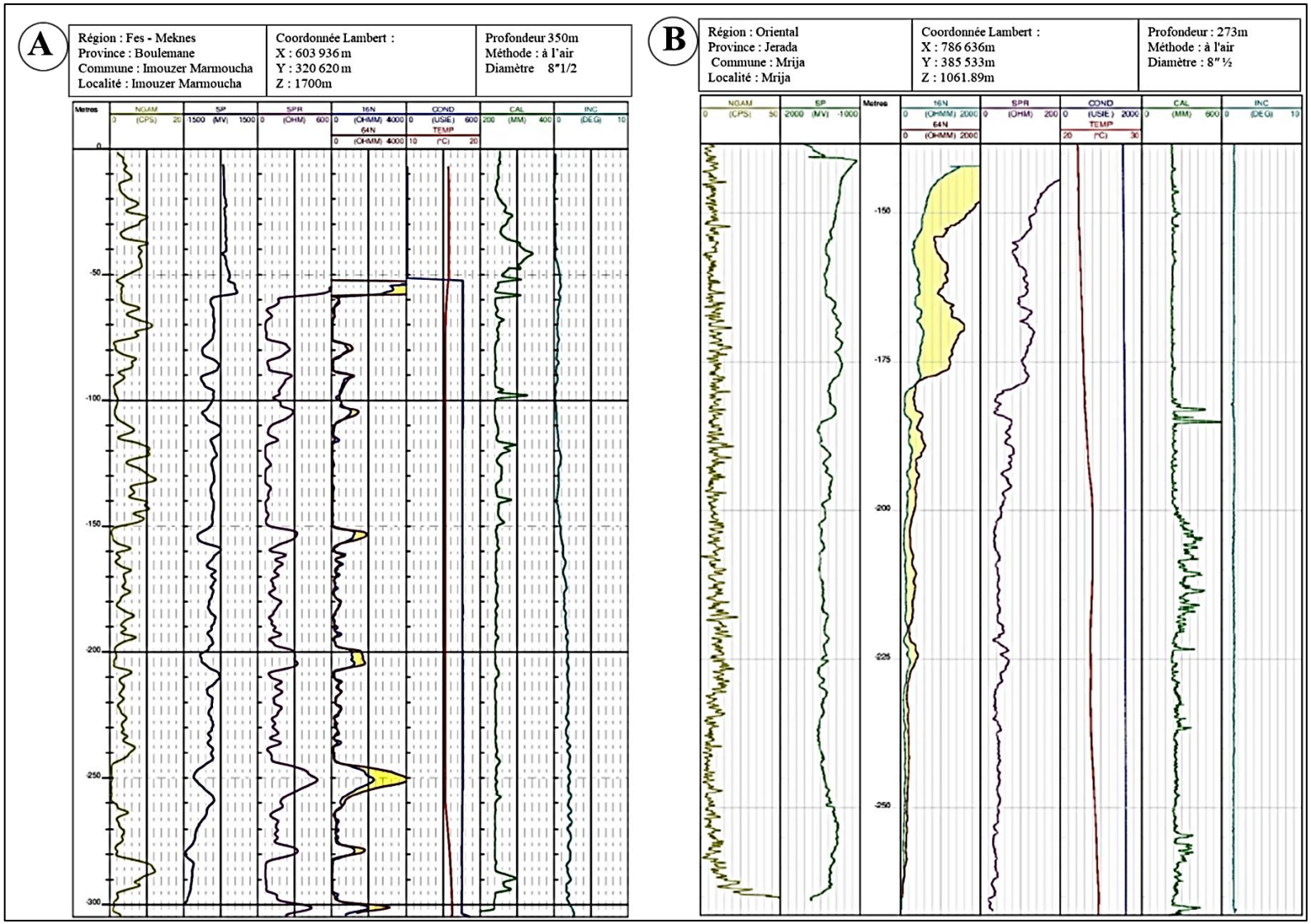


Figure 17 : Résultats d'enregistrement par techniques des diagraphies, au niveau du Forage (A) : Immouzer (Boulmane) et (B) : Mrija (Jerrada).

3.3 Principes des tests de pompage

3.3.1 Explication des objectifs des tests

La caractérisation des aquifères en fonction du rendement, qui peut être exploité sans influencer sur leur durabilité, se fait par les tests de pompage fixant le débit durable exploitable. La détermination de la perméabilité de l'aquifère ainsi la transmissivité dépend de la porosité des formations constituant le réservoir aquifère, ces tests de pompage se font soit avec des débits variables, cas des tests par paliers ou avec un débit constant, cas des tests à longue durée, qui peut dépasser 72 heures, généralement l'arrêt se fait après la stabilisation du niveau dynamique. Le traitement des résultats de ces tests par le logiciel Ouaip (BRGM), donne le débit spécifique, la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement et le débit d'exploitation. Il se base sur les informations relatives au débit, au rabattement ainsi qu'au temps de descente et de montée de l'eau. Le débit spécifique noté Qsp (m^2/h) qui traduit la productivité intrinsèque de l'aquifère est le quotient du débit pompé et du rabattement mesuré (équation 1) :

$$Qsp = \frac{Q}{s} \qquad \text{Eq. (1)}$$

- Q : débit de pompage (m^3/h).
- s : rabattement induit par le pompage (m).

La transmissivité de l'aquifère est obtenue à partir du graphe de rabattement versus débit, à travers l'approximation logarithmique proposée par (Cooper et Jacob, 1946).

$$T = 0.183 Q \Delta s \qquad \text{Eq. (2)}$$

Avec : T : transmissivité exprimée en m^2/s.

Q : débit de pompage du premier palier en m^3/s.

Δs : variation du rabattement (m) sur un cycle logarithmique du temps.

Le coefficient d'emmagasinement (Todd, 1980) est donnée comme suit :

$$S = \gamma_w \sum_{i=1}^{N} (m_{vi} \times h_i) \qquad \text{Eq. (3)}$$

Avec : N : nombre de couches argileuses intercalaires.

Ɣ : poids volumétrique de l'eau (N/m^3).

h : épaisseur de la couche intercalaire i (m).

m : coefficient de compressibilité volumétrique (m^2/N).

La perméabilité K (m/s) est la capacité d'un aquifère à laisser passer l'eau à travers une section donnée. Elle est calculée comme suit :

$$K = \kappa \frac{\rho g}{\mu} \qquad \text{Eq. (8)}$$

Avec

K : coefficient de perméabilité.
κ : perméabilité.
μ : la viscosité cinématique du fluide (eau douce, eau salée ou pétrole),
ρ : la masse volumique du fluide
g : l'accélération de la pesanteur.

Le débit d'exploitation est déterminé à partir du débit de pompage de longue durée avec 10% de moins pour la sécurité de l'aquifère.

3.4 Méthodologie des tests de pompage

3.4.1 Préparation et conduite des tests

La réalisation des opérations des tests de pompage dans les aquifères, demande l'installation d'un équipement composé d'une pompe immergée, calée dans le forage et qui est accouplée à la colonne montante permettant le refoulement de l'eau à l'extérieur du forage. Le déroulement de ces opérations débute par les essais par paliers avec une durée minimale de 2 heures chacun. La variation des débits se fait avec une vanne de réglage installée à la sortie de la conduite et après le compteur afin de déterminer le débit critique avec lequel l'essai de longue durée peut tenir sa résistivité sans influencer sur le réservoir de l'aquifère.

3.4.2 Analyse des résultats des essais de pompage

Le traitement de ces résultats par le logiciel Ouaip version 2, développé par BRGM, permet de définir le débit critique pour lequel l'essai de longue durée peut être réalisé. Avec le démarrage de l'essai de longue durée, le suivi de l'évolution du niveau de rabattement est effectué progressivement au cours du temps jusqu'à la stabilisation du niveau dynamique du forage. Ce traitement permet d'établir les courbes de pompage de longue durée en appliquant la méthode de Theis (1935). La détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère se fait à partir des mesures de rabattement et du temps écoulé depuis le démarrage jusqu'au retour du niveau à son état initial. Cette analyse permet notamment d'estimer des paramètres

tels que la transmissivité, qui dépend de la porosité des formations géologiques, ainsi que le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère. Ces évaluations sont effectuées en fixant un débit d'exploitation optimal, permettant au forage de fonctionner sans avoir des conséquences sur la durabilité des eaux souterraines au niveau de l'aquifère.

4 Analyses chimiques des eaux souterraines

4.1 Principes, objectifs et importance de l'analyse chimique des eaux

L'évaluation de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation repose sur l'analyse des principaux ions présents dans d'eau provenant des puits et forages de la région d'étude. Certaines de ces analyses, telles que la salinité, la turbidité, la température, le pH et la conductivité électrique, sont effectuées directement sur le site. En revanche, les autres paramètres, notamment les cations, anions, éléments dissous, métaux lourds et contaminants, sont analysés en laboratoire, soit par des laboratoires spécialisés, soit par le laboratoire de l'agence du bassin hydraulique.

4.2 Méthodologie d'analyse

Lors des essais de pompage, des échantillons d'eau sont prélevés dans des bouteilles stériles, puis conservés dans un réfrigérant afin de préserver leurs caractéristiques chimiques. Ces échantillons sont ensuite transportés au laboratoire pour analyse. (Figure 18).

Au laboratoire d'analyse, et conformément aux protocoles décrits par Rodier et al., (1975), les sulfates, nitrates et nitrites sont analysés par méthode colorimétrique à l'aide d'un spectrophotomètre. Le potassium et le sodium sont déterminés par absorption atomique à l'aide d'un même spectrophotomètre. Le calcium et le magnésium sont dosés par complexométrique, tandis que les carbonates sont évalués par titrage à l'acide sulfurique. Les chlorures sont évalués par la méthode de Mohr.

Figure 18 : Echantillonnage d'eau pour analyse.

L'évaluation de la faisabilité de l'utilisation des eaux souterraines à des fins d'irrigation dans une région donnée dépend de leur qualité chimique, du type de la culture et de ces besoins spécifiques en eau. L'approche est basée sur l'analyse des ions majeurs présents dans l'eau des forages et des puits. Elle comprend le calcul de plusieurs indices de qualité tels que la dureté totale (TH), le pourcentage de sodium (Na%), le carbonate résiduel de sodium (RSC), le rapport d'adsorption du sodium (SAR) et l'indice de perméabilité (PI). Ces données permettent de mieux comprendre les principales caractéristiques chimiques de l'eau et d'évaluer son adéquation à l'irrigation. L'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation est ensuite classée selon les diagrammes de Richards et al. (1954) et de Wilcox (1955). Cette approche vise à caractériser les différents types d'eau souterraine, par leur classement et leur évaluation afin de déterminer leur adéquation à l'irrigation à travers r le calcul des indices d'irrigation couramment utilisés.

5 Intégration des méthodes pour la gestion des aquifères

5.1 Avantages de l'approche intégrée

L'analyse des aquifères repose sur la combinaison de diverses méthodes telles que les cartes probabilistes, la diagraphie, des tests de pompage et les analyses chimiques. Les cartes probabilistes, basées notamment sur l'indice IPES, permettent d'identifier les zones favorables à l'implantation de nouveaux forages au niveau des aquifères semi-profonds, à condition de disposer de données de base.

Les techniques des diagraphies permettent d'identifier la lithologie des aquifères profonds, leur nature, leur contexte géologique, leur porosité et leur potentiel en eau souterraine. Les tests de pompage constituent une méthode directe et fiable pour estimer les débits qui peuvent être exploitables de façon durable, en fonction de la disponibilité des eaux souterrains dans les aquifères profonds. Quant aux analyses chimiques, elles permettent de prendre en considération l'influence chimique sur l'aptitude des eaux de ces aquifères pour l'irrigation en respectant les besoins demandés par le type de l'agriculture. L'intégration de l'ensemble de ces méthodes permet de prendre en considération les résultats de chaque méthode et d'obtenir une vision globale des ressources en eau souterraines avec une interprétation croisée des résultats des différente méthodes dans le but de répondre aux besoins de la zone en fonction de la disponibilité des ressources.

5.2 Mise en œuvre sur le terrain

La réalisation des forages de prospection dans la région d'étude permet d'établir une fiche technique pour chaque forage, dont laquelle sont signalés toutes les informations du forage telles que la technique, la méthode de foration, les coordonnées GPS, et la division administrative à laquelle appartient le site (commune territoriale, caïdat, province). En plus, la fiche de chaque forage comprend la date de réalisation, les venues d'eau avec leurs côtes, la coupe lithologique obtenue par l'analyse des échantillons pour chaque mètre de profondeur, les résultats de test avec mesure du débit à l'aide du système de pompage, quelques analyses réalisées directement sur le terrain telles que la conductivité, pH, la densité de la boue la viscosité, ainsi que les analyses effectuées au laboratoire. Tout cela permet d'établir une fiche des données et complète pour chaque forage (Figure 19).

L'interaction entre les différentes méthodes d'analyse, complétée par les données issues des fiches octroyées par l'agence du bassin hydraulique ou la direction générale de

l'hydraulique pour chaque forage, permet de constituer une base de données complète sur les aquifères superficiels et profonds de la région d'étude.

FICHE TECHNIQUE DU FORAGE DE RECONNAISSANCE : MANGOUB

Localisation:

- ✓ Province: FIGUIG
- ✓ Commune: BENI GUIL
- ✓ Localité : MANGOUB
- ✓ Coordonnées Lambert:

X=789.851Km Y=188.923Km Z=1006.00m

Marché:

- Numéro du marché: 21/ABHM/2022
- Entreprise : SJS Maroc

Caractéristiques du Forage:

- ✓ Profondeur totale : 47.00m
- ✓ Niveau statique : 16.08

Coupe Lithologique

De(m)	A(m)	Formation rencontrée
0.00	01.00	Terre végétale
01.00	2300	Calcaires
2300	32.00	argiles
32.00	34.00	galets
34.00	47.00	Grès fracturés et sables argileux

Venue d'eau

Venue d'eau	Côte (m)	Débit cumulé (l/s)	conductivité
1ere	22.00	1.00	1200us/cm
2eme	32.00	5.00	1700us/cm
3eme	41.00	8.00	1560us/cm

Espace Annulaire

De (m)	A (m)	Nature	volume
0.00	3.00	Cimentation	-
3.00	47.00	Gravier 2-4mm	3.00M³

Architecture de tubage

De (m)	A (m)	Ø	Type	Nature
0.00	21.00	7"	TP	TRS
21.00	24.00	7"	TC	TRS
24.00	30.00	7"	TP	TRS
30.00	36.00	7"	TC	TRS
36.00	39.00	7"	TP	TRS
39.00	42.00	7"	TC	TRS
42.00	45.00	7"	TP+SF	TRS

Résultats d'air lift:

Date : 19/07/2023
Niveau Statique : 16.80m
ND : 27.00m
Débit: 7.00l/s

Résultats de pompage :

Date : 28/07/2023
Niveau Statique : 16.08m
ND : 20.61m
Débit: 7.00l/s
NP: 16.10m
CCP: 38.00m
Conductivité : 1880us/cm Température : 22.5°C

Figure 19 : Fiche technique du forage Mangoub (ABHM, 2023).

5.3 Outils de gestion et de décision

L'interprétation obtenue par chaque méthode permet de réduire les incertitudes, en affinant les résultats à chaque étape. Les résultats sont à leur tour vérifiés, complétés ou recoupés par d'autres approches, jusqu'à aboutir à une synthèse cohérente et fiable. L'application de la méthode IPES permet de mettre en évidence les zones favorables à l'implantation et à la réalisation des forages. Les sites sélectionnés sont ensuite explorés par les techniques des diagraphies, afin de caractériser les aquifères en profondeur. Concernant les tests de pompage, ils permettent de confirmer les débits au niveau de ces aquifères, tandis que les analyses chimiques vérifient la qualité des eaux et leur aptitude à l'irrigation. Ainsi, les résultats obtenus par chaque méthode sont utilisés pour de manière complémentaire, dans une approche intégrée visant d'optimiser la gestion des ressources en eau au niveau de la région

6 Limites et défis de la mise en œuvre des méthodes

6.1 Limites des cartes probabilistes

Lorsqu'on considère ces points limites, il est essentiel de prendre en compte l'impact de l'expérience, la subjectivité du chercheur lors de la définition des paramètres et le poids accordé dans le processus AHP, tous éléments importants pour la précision des résultats. Les décisions méthodologiques, comme le choix des paramètres et leur appréciation par des spécialistes, peuvent avoir un impact sur la qualité de la carte probabiliste. Concernant les modèles IPES employés pour les cartes probabilistes, des aspects tels que la profondeur et l'étendue des fractures, la lithologie, le drainage, la topographie et les précipitations sont toujours des facteurs importants. Toutefois, ces fractures sont fréquemment visibles ou quantifiables uniquement de manière partielle sur le terrain, particulièrement en ce qui concerne le lien entre la fracturation et la profondeur, ce qui crée des incertitudes. En outre, les échantillons de forage peuvent être restreints par des pertes, entraînant une évaluation incomplète des paramètres géologiques et hydrologiques, ce qui introduit une incertitude supplémentaire dans les cartes. Une validation pratique est indispensable pour ajuster les modèles et valider ou modifier les prévisions établies sur les cartes de probabilité. Par exemple, les forages d'eau existants peuvent servir de repères pour modifier la carte probabiliste en se basant sur des observations concrètes. L'observation de données sur la région, et la détermination précise des fractures, contribue à la mise à jour des modèles et à la réduction de l'incertitude. Il est courant d'avoir besoin de réviser et de réajuster les cartes probabilistes. Cela contribue non seulement à réduire les erreurs potentielles, mais aussi à renforcer la précision des prévisions futures basées sur des données concrètes. Il convient de souligner que les cartes probabilistes fournissent des évaluations fondées sur des modèles et des suppositions qui peuvent être soumis à des incertitudes en raison du processus de modélisation, cas des variables compliquées à quantifier directement (telles que la fracturation en profondeur). Il est donc essentiel de valider ces cartes sur le terrain pour augmenter leur exactitude, en intégrant les observations réelles.

6.2 Défis des diagraphies et tests de pompage

La combinaison des techniques des diagraphies et les tests de pompage en particulier dans des formations fracturées ou carbonatées, présentent divers défis techniques et pratiques. Illustration des défis auxquels on fait face lors de l'exécution des essais de

pompage dans les zones fracturées ou carbonatées, qui se distinguent fréquemment par une hétérogénéité marquée des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques. L'interprétation des résultats des tests de pompage est complexe en raison de la variation significative de la perméabilité d'une formation à l'autre ou d'une cavité à l'autre. Cela complique l'évaluation exacte du débit et de la transmissivité. Par exemple, dans les formations carbonatées, les fissures peuvent engendrer des voies de perméabilité très forte, alors que le reste de la structure peut présenter une perméabilité faible ou absente ce qui peut rendre les tests de pompage peu fiables. Dans les formations fracturées ou carbonatées, les tests de pompage peuvent ne pas être efficaces si le réservoir est peu confiné, car l'eau peut se déplacer librement à travers des fractures ouvertes. Dans le domaine du forage et d'enregistrement en profondeur, on peut rencontrer certaines contraintes techniques. Les dispositifs requis pour forer et conduire les analyses à des profondeurs importantes peuvent présenter un coût élevé et être complexes à manipuler. Il existe également un risque que les formations géologiques complexes n'endommagent les instruments de forage ou de logging. Par ailleurs, ces circonstances peuvent engendrer des dangers tels que des effondrements dans les forages ou l'immobilisation des équipements, ce qui complique la réalisation des tests.

6.3 Problèmes liés à l'analyse des eaux

L'analyse des eaux dans divers contextes géologiques, y compris la présence de formations fracturées, carbonatées ou d'autres configurations géologiques complexes, présente plusieurs problématiques. Ces enjeux peuvent avoir un impact sur l'exactitude des résultats obtenus et la fiabilité des informations. Les eaux souterraines issues de ces formations peuvent présenter une hétérogénéité chimique importante, avec des variations remarquables de la composition minérale et des polluants (métaux lourds, éléments traces, sels, etc.) qui dépendent de la profondeur, des fractures et des interactions avec les diverses couches géologiques. Cette variété complique les examens chimiques, étant donné la nécessité de considérer la variation spatiale et temporelle des échantillons. Par ailleurs, l'eau peut être troublée par des contaminants naturels ou d'origine humaine (exemple produits chimiques agricoles, hydrocarbures ou substances provenant de l'extraction minière). Ces effets, nécessitant ainsi l'utilisation de méthodes d'analyse avancées et d'une expertise approfondie. Il nécessite une connaissance détaillée des processus géochimiques sur place. Par exemple, la détection de certaines substances en solution peut signaler une activité fracturée dans un réservoir carbonaté, ou l'interaction de l'eau avec des minéraux particuliers

dans une roche. Des éléments naturels tels que la dissolution de minéraux et l'échange d'ions entre l'eau et le sol peuvent également influencer ces eaux souterraines. Il ne faut donc pas sous-estimer les conséquences environnementales.

La composition chimique des eaux souterraines est influencée par les caractéristiques géologiques locales. Il est primordial de noter que les régions riches en formations carbonatées peuvent influencer le pH de l'eau ou accroître la présence de certains ions tels que le calcium et le magnésium, ce qui pourrait fausser les analyses si ces impacts ne sont pas dûment pris en considération. Ainsi, les sols argileux ou les formations de marnes peuvent influencer la circulation des polluants ou des minéraux dissous dans l'eau. Tout cela souligne que l'interaction de l'eau avec divers types de roches, minéraux et structures géologiques peut engendrer une grande variabilité chimique. C'est le cas par exemple des eaux provenant des régions fracturées ou karstiques et qui peuvent présenter des niveaux élevés de métaux lourds ou de matériaux radioactifs, nécessitant ainsi une surveillance étendue et des techniques d'analyse spécifiques. Si ces fluctuations géochimiques ne sont pas considérées, les résultats pourraient être faussés. L'échange d'ions ne doit pas se produire, particulièrement dans les milieux riches en argile ou en roches silicatées, car des processus d'échange ionique peuvent avoir lieu, altérant de manière temporaire la composition chimique de l'eau. Ces procédures peuvent provoquer des modifications dans les concentrations de certains ions, tels que le sodium, le potassium ou les chlorures, ce qui peut fausser les analyses, surtout si ces variations ne sont pas adéquatement considérées lors de l'interprétation des résultats.

Il est également nécessaire de souligner que les contraintes liées à l'accès aux sites de forage, notamment dans des régions éloignées ou difficiles d'accès, peuvent limiter le volume et la variété géographique des échantillons recueillis. Cela restreint les chances d'obtenir un échantillon représentatif de la composition de l'eau dans toute la zone d'étude. Pour conclure, on peut affirmer que l'étude des eaux souterraines dans des contextes géologiques complexes nécessite de considérer la variété des facteurs géochimiques, les fluctuations locales des structures géologiques et la complexité des réactions chimiques qui ont lieu dans le sous-sol. Ces éléments peuvent avoir un impact remarquable sur la qualité des données recueillies et rendre leur analyse plus complexe. Il est donc essentiel de disposer d'une compétence spécialisée pour comprendre et analyser correctement les résultats chimiques, tout en prenant en compte toutes les variables locales susceptibles d'influencer la composition chimique des eaux.

7 Conclusion

7.1 Récapitulatif des méthodes et de leur complémentarité

Afin d'assurer correctement une gestion durable des aquifères semi-profonds et profonds, plusieurs méthodes sont utilisées pour obtenir une vision complète et précise des ressources en eau souterraine. Ces méthodes sont complémentaires et permettent d'optimiser l'exploitation des aquifères tous en garantissant leur durabilité, surtout pour l'utilisation dans l'irrigation. Parmi ces méthodes, l'IPES est employé pour l'élaboration des cartes de probabiliste d'eau dans les aquifères superficiels et semi-profonds, avec planification de l'exploitation des eaux souterrains. Cette méthode permet au planificateur de mettre en place des stratégies pour préserver les ressources. Alors que les techniques des diagraphies permettent d'évaluer les caractéristiques des formations géologiques traversées par les forages. Elles permettent d'obtenir des informations détaillées sur la structure, la porosité, la perméabilité et l'hydraulicité des aquifères profonds. Ces techniques offrent une image précise de la géologie de ces aquifères. Elles permettent aussi de localiser les niveaux de haute perméabilité (fractures, cavités karstiques), permettant de mieux comprendre les écoulements souterrains et de garantir une meilleure gestion ciblée des ressources.

Les tests par essais de pompage mesurent la réponse d'un aquifère à l'extraction d'eau, en évaluant des paramètres comme la transmissivité, l'emmagasinage et la durabilité du réservoir. Ces tests permettent de déterminer la capacité de l'aquifère en fournissant de l'eau de manière continue (débit d'exploitation), ce qui pousse à éviter le pompage excessif et établir une stratégie d'utilisation durable.

Les analyses chimiques permettent de mesurer la composition de l'eau en termes de salinité, la concentration d'ions majeurs, le pH et d'autres contaminants. Ces analyses sont fondamentales pour évaluer la qualité de l'eau et déterminer si elle est adaptée à l'irrigation dans la région d'étude, et évaluer son effet sur les cultures. Les analyses chimiques permettent également de suivre l'évolution de la qualité de l'eau et de prendre des mesures correctives si nécessaire. Chacune de ces méthodes apporte des informations spécifiques, mais leur combinaison permet de créer une vision complète des ressources en eau souterraine dans ces aquifères.

L'approche intégrée permet d'optimiser l'exploitation pour l'irrigation et d'assurer la protection des aquifères contre la surexploitation et la dégradation de la qualité de l'eau. En

combinant les forces de chaque méthode, on obtient une stratégie de gestion qui prend en compte l'ensemble des paramètres géologiques, hydrologiques et chimiques garantissant une utilisation durable des ressources en eau souterraine.

7.2 Importance pour la gestion durable des ressources en eau

L'objectif d'une gestion durable des ressources en eau peut être réalisé par d'intégration de toutes les méthodes afin d'optimiser l'exploitation en pointant les zones les plus prometteuses, tout en prévenant les risques de surexploitation, de dégradation de la qualité de l'eau et de perte de la biodiversité. La clé du succès réside dans l'intégration de ces différentes données et dans l'adaptation des pratiques aux spécificités géologiques et environnementales locales. Cette approche garantit une gestion durable et efficace de l'eau, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire et à la résilience face aux changements climatiques.

- L'indice de potentialité des eaux souterraines (IPES) a pour objectif d'élaborer et de mettre en pratique des stratégies performantes d'utilisation des ressources souterraines, en prenant en compte la dynamique des aquifères, la gestion des flux d'eau et l'impact sur l'environnement. L'IPES offre la possibilité d'examiner minutieusement les besoins en eau et la capacité des réservoirs à satisfaire ces besoins, tout en minimisant le risque de surexploitation. Grâce à l'intégration des données provenant des tests de pompage et des diagraphies, l'IPES est en mesure d'assister dans l'identification des zones les plus favorables à l'extraction, d'optimiser les débits et de réduire les risques d'épuisement des aquifères.
- Les essais de pompage servent à mesurer la transmissivité, le stockage et la durabilité des nappes phréatiques. Ils offrent des données essentielles sur la capacité d'une source à délivrer de l'eau sur une longue période, un aspect primordial pour moduler l'intensité de l'exploitation selon les exigences de l'irrigation. Ces examens servent aussi à repérer les régions où des réservoirs de petite taille ou intensément fracturés pourraient courir le danger d'une chute rapide du niveau de la nappe. Ainsi, les essais de pompage ont pour but d'optimiser la performance des dispositifs de pompage tout en protégeant les réserves souterraines.
- La méthode de diagraphie offre une analyse approfondie des traits distinctifs des structures géologiques traversées par les forages. Ceci facilite la détermination du type d'aquifères (fracturés, karstiques, confinés), en plus de la répartition de l'eau à travers ces structures. Cette compréhension approfondie contribue à une meilleure appréhension de la dynamique du flux d'eau souterrain et à l'identification précise des régions où l'extraction peut être

idéale. Notamment en secteur d'irrigation, ces données facilitent l'identification des zones d'approvisionnement optimales, tout en réduisant les dangers liés à un pompage excessif.

- Analyses chimiques de l'eau : ces analyses révèlent des éléments essentiels concernant la qualité de l'eau souterraine. L'irrigation accorde une grande importance à cette information, étant donné que des eaux de faible qualité peuvent détériorer la santé végétale et à la fertilité du sol. Par exemple, des taux élevés de sel ou de métaux lourds peuvent nuire à la qualité des sols. En effectuant des mesures sur des paramètres chimiques importants tels que le pH, la salinité, la teneur en calcium et en magnésium, ainsi que d'autres composants dissous, ces études peuvent offrir une meilleure compréhension des propriétés de l'eau, ce qui facilite l'adaptation des techniques d'irrigation, comme l'utilisation de traitements de déminéralisation ou la modification des pratiques agricoles, pour prévenir les dégâts sur les cultures.

Chapitre 2

Présentation de la zone d'étude

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

1 Introduction

La zone de Fritissa, située dans le bassin de la Moyenne Moulouya, suscite un intérêt scientifique considérable en raison de ses caractéristiques géographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques distinctives. Les recherches menées dans cette région, dans le cadre de la présente étude, visent à mettre en lumière ses principaux attributs afin de mieux comprendre son environnement naturel et les interactions humaines influençant les ressources en eau souterraines. Des études antérieures ont démontré que les aquifères se forment par accumulation d'eau infiltrée à travers les fractures des formations géologiques superficielles, semi-profondes et profondes. Une connaissance approfondie des aspects géographiques, climatiques, anthropiques, géologiques et hydrogéologiques d'une région donnée est donc essentielle pour évaluer le potentiel, la qualité et les modes d'exploitation durable des ressources hydriques.

2 Cadre géographique, climatique et activités humaines

2.1 Cadre géographique

La région de Fritissa est située au centre du bassin versant de la Moyenne Moulouya, couvrant environ 15 775,2 km² à l'Est du Maroc, entre les longitudes 2° 25'14" W et 4°23'20" W, et les latitudes 32°43'49" N et 34°29'38" N (Figure 20). Elle couvre une large partie du bassin versant de la Moulouya, qui s'étend sur environ 59 987,8 km². La Moyenne Moulouya est délimitée au Sud et au SW par le bassin de la Haute Moulouya et le versant Nord du Haut Atlas, à l'Est par les hauts plateaux de Rekkame, au Nord par le bassin de Guercif et à l'Ouest par le Moyen Atlas. Le relief comprend des vallées traversées du Sud au Nord par l'oued Moulouya et de l'Est à l'Ouest par l'oued Za, ainsi que des plaines telles que celles de Tendit et Tissaf. La partie Ouest de la région s'incline vers l'oued Moulouya depuis le Moyen Atlas. La partie Est s'étend des hauts plateaux jusqu'à l'oued Moulouya, alimenté par des affluents tels que les oueds Chourf Cherg el Ard du côté du Moyen Atlas, ainsi que les oueds Meskala, l'oued Ouaàr et Sidi Aissa du côté des hauts plateaux (Figure 20).

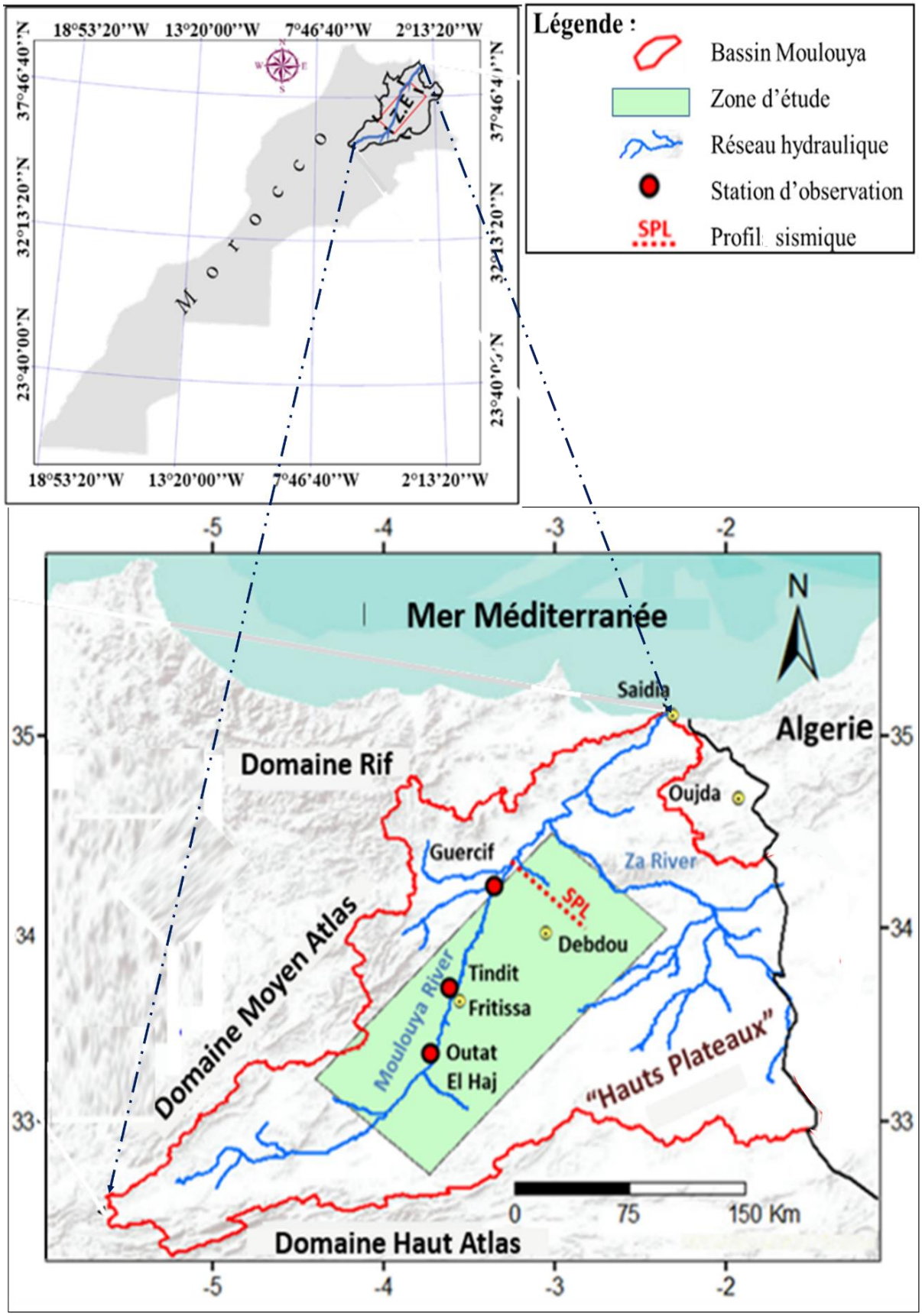


Figure 20 : Situation de la zone d'étude au Maroc Oriental.

2.2 Cadre climatique

La zone de Fritissa est caractérisée par un climat aride à semi-aride, avec des précipitations irrégulières et une évapotranspiration élevée. Les variations de température, souvent marquées, entre l'hiver et l'été influencent directement les ressources en eau et les activités humaines.

2.2.1 Les précipitations

Les précipitations sont rares et inégalement réparties tout au long de l'année. Elles varient entre 0 et 70 mm par an au niveau de la station de Tendit (Figure 21), ce qui classe la région dans les zones semi-aride à aride. Selon l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya (AHBM, 2023), les précipitations annuelles oscillent entre 100 et 200 mm au Sud-Est et entre 200 et 300 mm au Nord-Ouest.

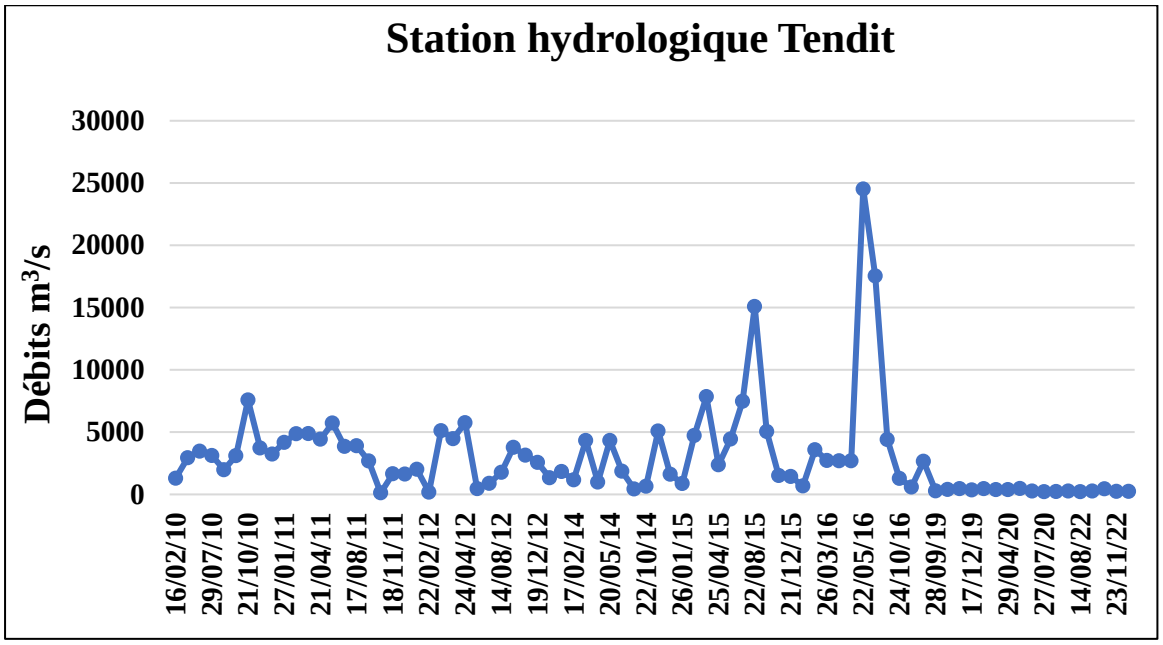


Figure 21 : Diagramme de débits au niveau de la station Tendit (ABHM,2023).

2.2.2 Les températures

La zone de Fritissa connaît des variations thermiques importantes entre le jour et la nuit et entre l'hiver et l'été. En été, les températures atteignent fréquemment 38 à 40°C en raison de l'influence continentale et de la couverture végétale limitée. En hiver, les températures minimales peuvent descendre sous 0°C, avec des gelées nocturnes fréquentes. L'exposition au soleil est particulièrement intense tout au long de l'année, ce qui accentue l'évaporation et la

dessiccation des sols (AHBM, 2023). À la station d'Outat El Haj et de Guercif, par exemple, les températures varient entre 0°C et 35°C (Figure 22).

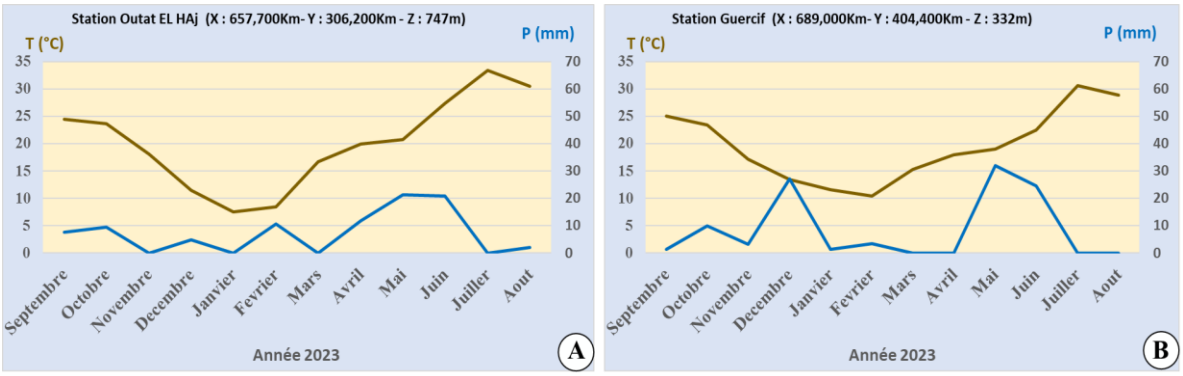


Figure 22 : Diagramme ombrothermique de la région de Fritissa, station d'Outat El Haj (A) et de Guercif (B).

La figure 22 A et B représentent respectivement les diagrammes ombrothermiques des stations d'Outat El Haj et de Guercif, caractérisant le climat aride de la région. La période humide, bien que brève, se situe entre septembre et octobre, tandis que le reste de l'année est une période sèche. Le phénomène de sécheresse est fréquent et peut perdurer pendant plusieurs mois, voire des années engendrant des phases de pénurie d'eau.

De telles conditions climatiques influencent de manière significative la dynamique des vents, les caractéristiques des sols et le couvert végétal de la région :

- **Vent et sécheresse** : La région est influencée par des vents chauds et secs, notamment le chergui, un vent d'origine saharienne qui intensifie la sécheresse et les conditions climatiques extrêmes. Ces vents favorisent l'érosion des sols et l'évaporation rapide de l'eau, réduisant ainsi les ressources en eau disponibles.
- **Sols et hydrologie** : Les sols de la région sont généralement peu profonds, riches en calcaire et parfois salins. Ils ont une capacité limitée à retenir l'eau. Le climat sec limite l'infiltration des eaux de pluie, affectant la recharge des nappes phréatiques. Les cours d'eau de la Moyenne Moulouya, notamment dans la zone d'étude, présentent un régime irrégulier, avec des crues soudaines lors de fortes précipitations et un assèchement rapide pendant la saison sèche.
- **Influence sur la flore et l'agriculture** : La flore est dominée par des espèces xérophiles adaptées aux conditions sèches, telles que le thuya, le chêne vert, le jujubier et l'armoise. L'agriculture dépend fortement de l'irrigation, mais les ressources en eau étant limitées, la production agricole est restreinte aux cultures tolérantes à la sécheresse, comme

les céréales, les oliviers et les amandiers. L'élevage de moutons et de chèvres est également pratiqué, mais il est affecté par les fluctuations climatiques, notamment lors des périodes de sécheresse où le manque de pâturages devient un problème réel.

Ces conditions climatiques limitent les activités agricoles et accentuent la vulnérabilité de la région en matière de ressources en eau.

2.3 Activités humaines

2.3.1 Urbanisme

La zone d'étude s'étend partiellement sur le territoire des provinces de Boulmane, Taourirt, Guercif, Jerrada et Figuig (Figure 23). Selon les rapports de la Commission Consultative de Régionalisation (CCR, 2011), l'expansion urbaine dans la région de Fritissa reste limitée. La répartition de la population et le caractère rural de la région favorisent une croissance maîtrisée et influencée par les activités économiques locales. Cela permet de planifier les exigences en eau de la zone (Tableau 3). A titre d'exemple, les besoins en eau pour l'année 2025 sont de l'ordre de 446,74 l/s tandis que les prévisions pour 2050 sont approximativement de 548,3 l/s (ABHM, 2024), ce qui place la zone sous la pression d'une demande en augmentation.

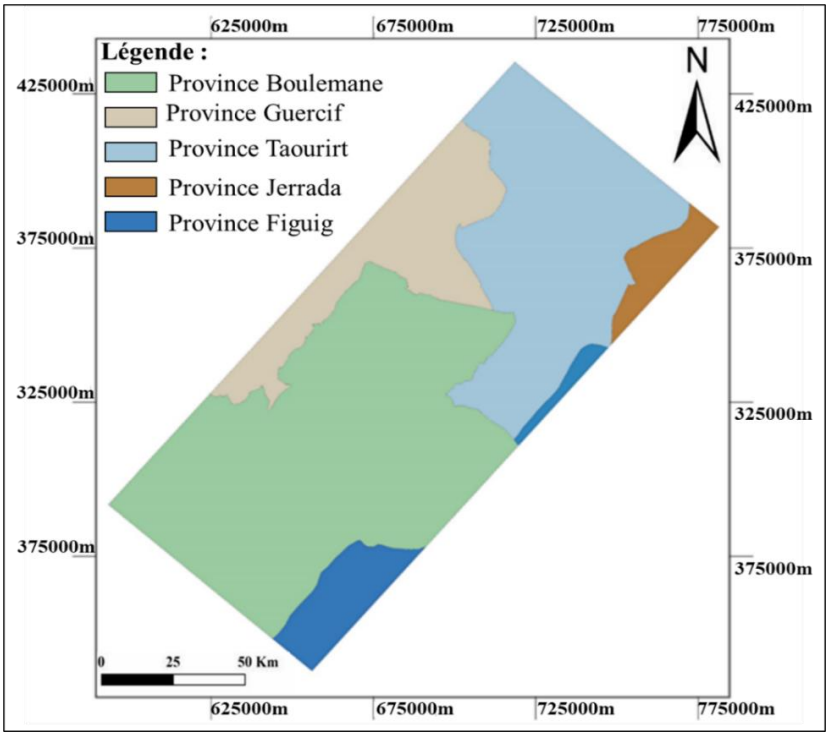


Figure 23 : Découpage administratif de la zone d'étude

Tableau 3 : Besoins en eau (l/s) pour les communes de la région d'étude (ABHM, 2025).

Province	Communes territoriales	2025	2030	2035
Boulemane	Missour Outat El Haj Ait Bazza Almis marmoucha Berkine EL Orjane Enjile Ermila Fritissa Ouizeght Ouled Ali youssef Serghina Sidi boutayb Tendit Tissef	143.4	154.4	168.5
Guercif	Assebab Houara Oulad Rahou Lamrija	14	15	16
Taourirt	Taourirt Debdou Ahl Oued Za El Ateuf Gueteter Melg el ouidane Ouled M'hamed Sidi ali belkassem Sidi lahcen Tancherfi	228 10 14 2 3 8 0.9 1 0.8 4	257 11 16 3 4 10 1.2 1.5 1.2 6	286 11 18 4 5 12 1.3 2 1.5 7
Jerrada	Mrija *Oulad* ghziyl	3 6	4 7	5 8
Figuig	Bouchaouene Boumeriame Maatarka	4 3 1.5	5 4 1.7	6 5 2
Totaux		446.74	492	548.3

2.3.2 Industrie

L'industrie dans la région est peu développée et repose principalement sur l'exploitation de quelques cultures locales. La production d'huile d'olive et l'exportation de pommes sont les principales activités, tandis que la culture des oranges est moins répandue.

2.3.3 Agriculture

L'agriculture irriguée constitue la principale ressource économique de la région. La zone agricole, occupée par diverses cultures, ne couvre que 1,47 % de la superficie étudiée.

L'agriculture est l'activité humaine la plus importante au niveau local, constituant un élément clé du développement durable, qui dépend fortement de la disponibilité et de la qualité des ressources en eau. L'irrigation est une technique indispensable et couramment utilisée dans la région, surtout dans les zones où les précipitations sont insuffisantes. Il est essentiel d'évaluer l'aptitude de l'eau à l'irrigation, ce qui nécessite des tests de vulnérabilité concernant la qualité des ressources hydriques. Ces tests permettent d'assurer une récolte de qualité, améliorant ainsi les conditions économiques de la population.

3 Cadre géologique

La géologie de la région de Fritissa est caractérisée par une diversité de formations d'âges et de nature lithologique différents (Figure 24).

3.1 Lithostratigraphie

La région de Fritissa fait partie de la Meseta Orientale une zone géologique notable et se caractérise par une diversité de formations complexes formées au cours de différentes phases tectoniques. Les affleurements sont principalement constitués de roches sédimentaires et de formations datant de diverses périodes géologiques de puis le Paléozoïque, incluant des formations métamorphiques et volcaniques, notamment dans des zones comme la Boutonnière de Debdou, où l'on trouve fréquemment des schistes en strates ; ces formations affleurent au Nord de la zone d'étude entre sidi Ali Belkacem et Taourirt et entre Al Ateuf et Ouled M'hamed.

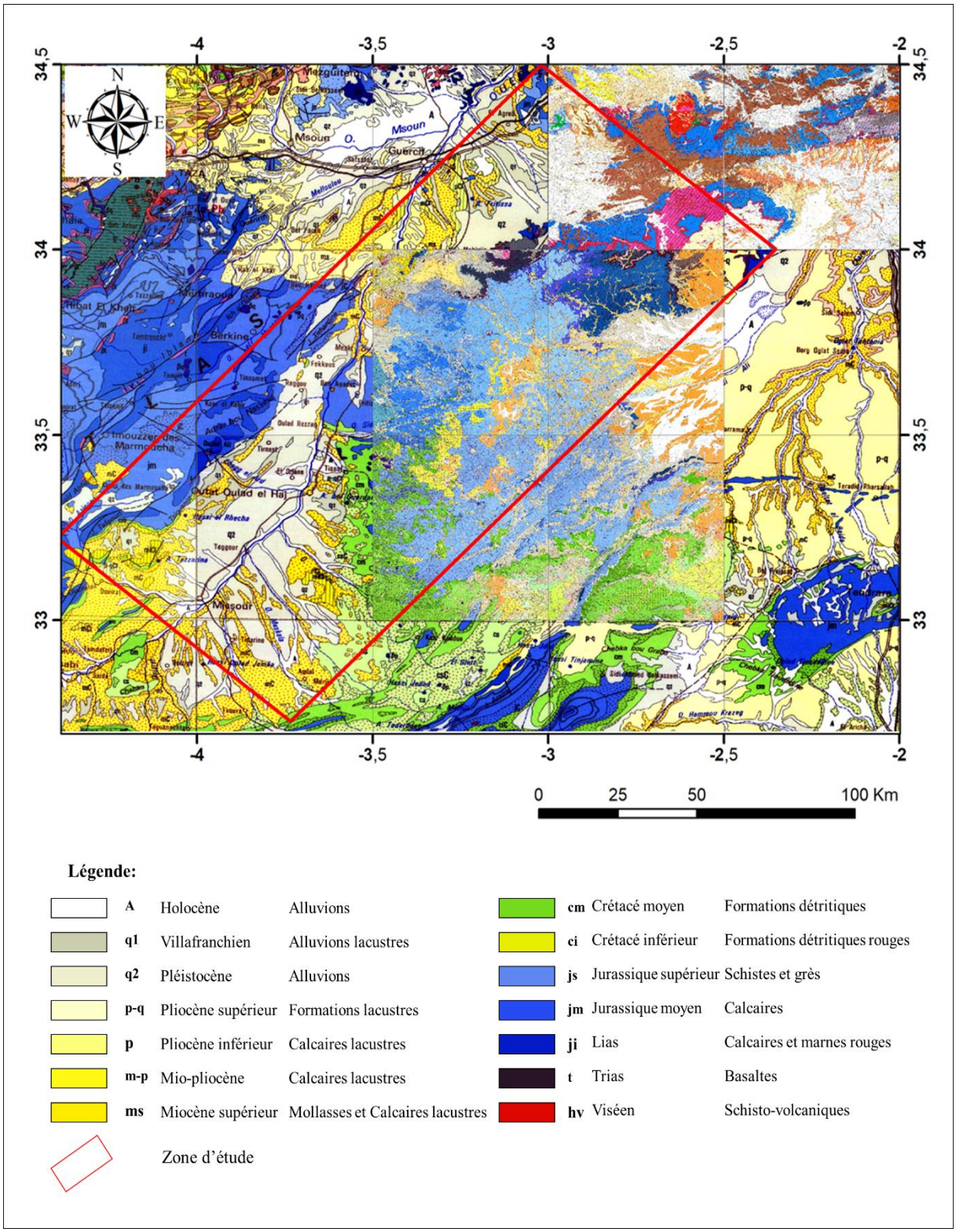


Figure 24 : Carte géologique compilée de la zone d'étude d'après les cartes géologiques du Maroc disponibles au 1/100 000 et celle au 1/1 000 000

Durant le Secondaire, la région a été le site de dépôts marins et lacustres, entraînant la formation de calcaires, de marnes et d'argiles, durant la période du trias au crétacé. Au Cénozoïque, la région a subi une tectonique dynamique, avec des mouvements qui ont conduit à la création de bassins de subsidence et de structures sédimentaires, influençant la

géomorphologie et générant une variété de paysages tels que des collines à l'ouest au niveau de la chaine moyen Atlas et à l'est au niveau des hauts plateaux et la plein de Rekkam. La région a été influencée par des mouvements tectoniques déterminants pour la structuration du relief, notamment la collision entre les plaques continentales africaines et européennes durant l'orogenèse hercynienne, conduisant à la formation de plis, de failles et d'autres structures géologiques.

La région présente des structures géologiques telles que des anticlinales et des synclinales, ainsi que des failles normales et inversées, résultant de phases d'affaissement et de soulèvement, créant ainsi diverses formations géologiques. La topographie de la zone est caractérisée par une alternance de plateaux, collines et montagnes, souvent associées à des bassins sédimentaires où les eaux de ruissellement ont sculpté des réseaux de vallées.

La Meseta orientale marocaine, en particulier la zone de Fritissa, se distingue par une grande variété de formations sédimentaires et une riche histoire tectonique. Cette diversité confère à la région une importance significative pour la compréhension géologique, l'aménagement du territoire et l'exploitation des ressources naturelles.

3.1.1 Paléozoïque

Figure 25 : Affleurement paléozoïque entre Al Ateuf et Ouled M'hamed (Ben Driss, 2025).

Le Paléozoïque est représenté par des affleurements très limités localisés au Nord et à l'Est de la région, formant le socle ancien de la région de Fritissa et constitués de schistes volcaniques avec des passage de grès arkosiques d'âge viséen, affleurant dans la région de Debdou (Figure 25). Le socle paléozoïque est représenté également par des schistes et

quartzites qui affleurent à l'Est de Debdou au niveau du plateau Al Ateuf jusqu'à la plaine d'Ouled M'hamed. Les mêmes formations sont visibles entre Taourirt et Debdou.

3.1.2 Trias

Les formations du Trias sont constituées de dépôts d'argile rouge et d'intrusions de basalte (Service géologique du Maroc, 1985, 1991, 1995). Le Trias est généralement limité à quelques affleurements au nord de la zone d'étude, notamment dans la région de Taourirt (Figure 26). Il est représenté par des basaltes altérés d'une centaine de mètres reposant sur une assise d'argiles rouges qui atteint 50 mètres d'épaisseur par endroits. Dans la partie nord de la zone d'étude, entre Taourirt et Sidi Ali Belkacem, des pipes volcaniques remontent à la surface attestant la présence du Trias évaporitique.

Figure 26 : Affleurement triasique entre Sidi Ali Belkacem et Taourirt au Nord de la zone d'étude (Ben Driss, 2025).

3.1.2 Jurassique

La région a été recouverte par une sédimentation marine, notamment des calcaires, dolomies et argiles d'âge Jurassique, d'après les cartes géologiques de la région (Service géologique du Maroc, 1964 a ; b, 1972 a ; b) (Figure 27) :

- Le Lias correspond aux calcaires et aux marnes rouges à vertes ;
- L'Aalénien-Bajocien est représenté par des dominantes calcaires, dolomies et calcaires sableux ;
- Le Bajocien supérieur est dominé par le calcaire ;

- Le Bathonien est constitué de grès rouge, marne et calcaire.
- Le Callovien à l'Oxfordien présente des dépôts sableux passant latéralement aux calcaires et marnes.

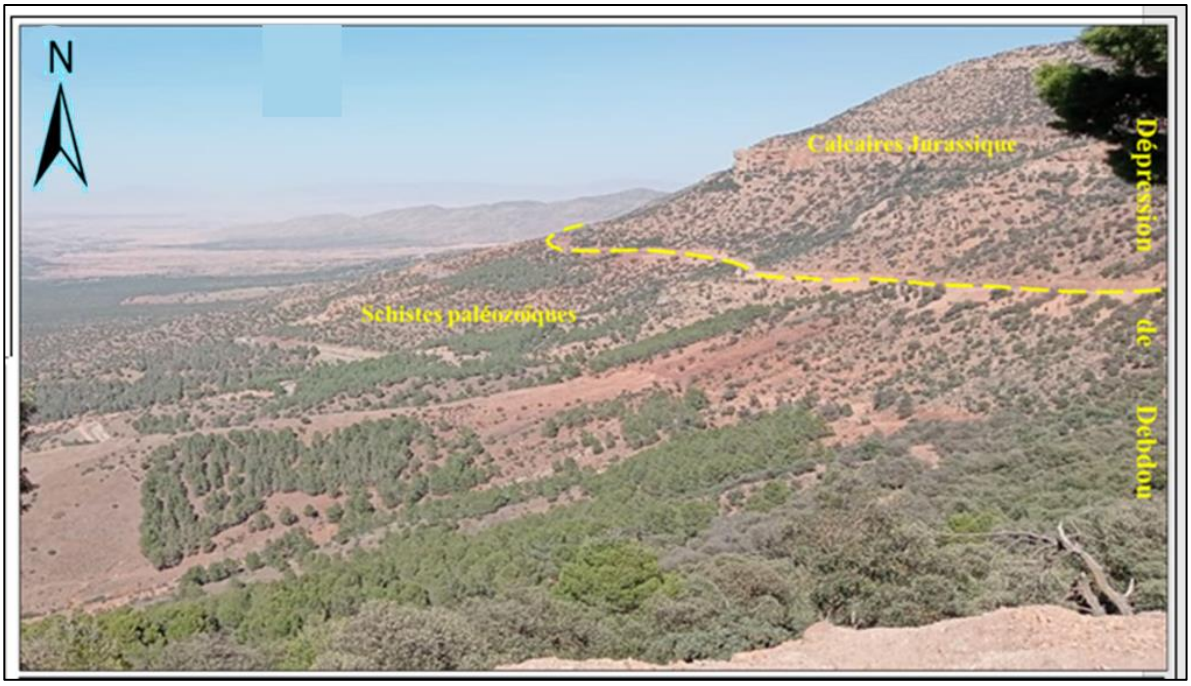


Figure 27 : Affleurement jurassique au niveau de la dépression de Debdou (Ben Driss,2025).

3.1.3 Crétacé

Le Crétacé inférieur et moyen est représenté par des formations carbonatées caractérisées par des dépôts de marnes argileuses et de calcaires, généralement formés par des formations détritiques rouges.

3.1.4 Moi-Plio-Quaternaire

Les formations miocènes correspondent à des marnes, calcaires et conglomérats. Les formations pliocènes présentent des dépôts de calcaire, de sable et de conglomérats.

Les affleurements du Quaternaire sont constitués de formations complexes comprenant de l'argile, du limon silteux, des alluvions, de la marne et du conglomérat (Service géologique du Maroc, 1964 a ; b, 1972 a ; b, 1985, 1991, 1995). Le Quaternaire est dominé par des dépôts alluvionnaires, (Figure 28). Les formations quaternaires affleurent au Sud et au Nord de la région d'étude et le long de l'oued Moulouya et ses affluents. . Dans les Hauts plateaux, le Quaternaire est représenté par des limons sableux avec des galets qui sont parfois encroutés (Noms des auteurs de ces cartes).

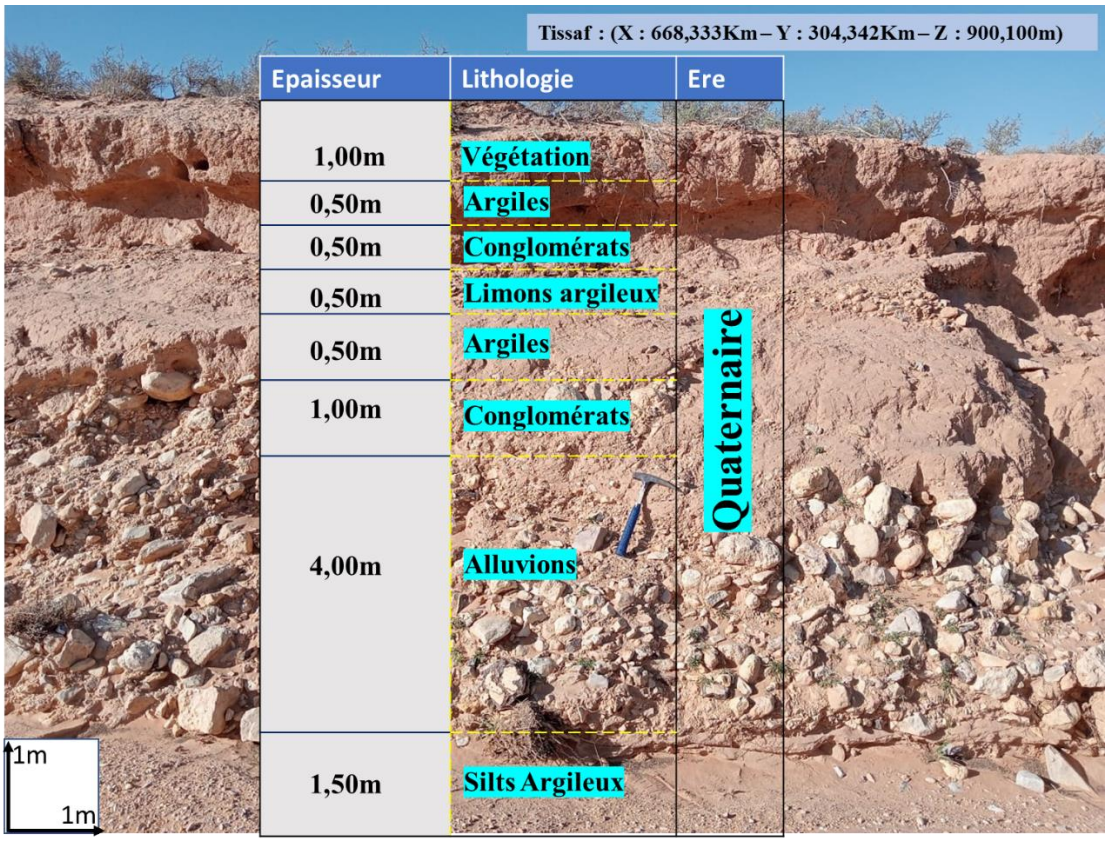


Figure 28 : Illustration des formations quaternaire dans la zone Fritissa (Ben Driss, 2025).

3.2 Tectonique

La région de Fritissa est marquée par des manifestations tectoniques dynamiques au cours des époques géologiques, avec des failles et des plis qui ont façonné son paysage et déterminé ses ressources hydriques au niveau des aquifères profonds et semi-profonds. Plusieurs recherches sur la tectonique de l'Est marocain ont montré que les formations géologiques des périodes méso-cénozoïques sont influencées par des structures tectoniques du socle, réactivées durant les phases hercynienne et tardi-hercynienne, ainsi que lors d'autres épisodes des âges Mésozoïque, Néogène et Plio-Quaternaire (Ait Brahim et Chotin, 1990 ; Bernini et al., 2000 ; Sani et al., 2000 ; Gharmane et al., 2019 ; El Kati et al., 2022 ; Yaagoub et al., 2023).

Ces recherches ont mis en évidence la présence d'un système de failles orientées NE-SW et NW-SE, influençant les divers terrains de la zone de Fritissa. Ces failles constituent des zones d'infiltration des eaux superficielles, permettant l'alimentation des aquifères profonds et semi-profonds (Figures 29 ; 30. A, B, C et D). Ces fracturations constituent des

parcours des eaux par les quelles les aquifères semi-profonds et profonds sont alimentés au-dessous des passages imperméables des argiles ou de leurs dérivés.

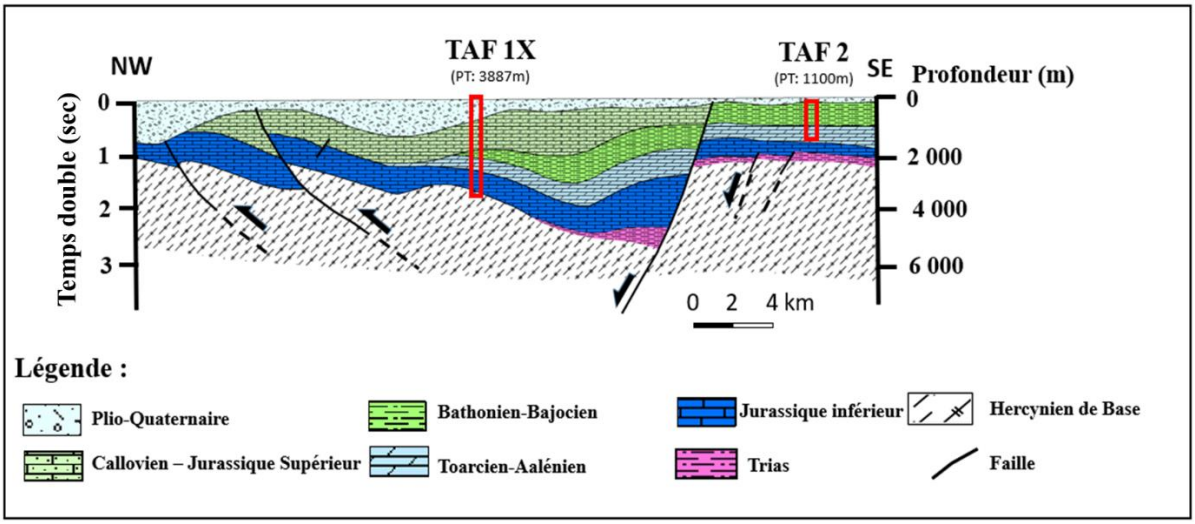


Figure 29 : Coupe géologique de l'interprétation du profil sismique d'après Zizi, (1996) et Sani et al, (2000). Localisation du trait de coupe (voir Figure 24)

La fracturation induite par la tectonique des formations géologiques a de nombreuses répercussions importantes sur l'approvisionnement en eau des aquifères profonds, car elle contribue à améliorer la perméabilité des roches. Cela facilite le déplacement et l'accumulation d'eau dans les aquifères en créant des chemins de recharge. Les fractures peuvent servir de canaux naturels pour l'infiltration de l'eau de surface vers les aquifères de profondeur moyenne et grande, tout en contribuant à améliorer la qualité de l'eau par un meilleur filtrage à travers les strates géologiques. Ces zones fracturées peuvent également offrir des espaces supplémentaires pour le stockage de l'eau, ce qui augmente donc la capacité des aquifères. Ces impacts démontrent que la tectonique des fractures est primordiale pour l'administration et le réapprovisionnement des aquifères de grande profondeur.

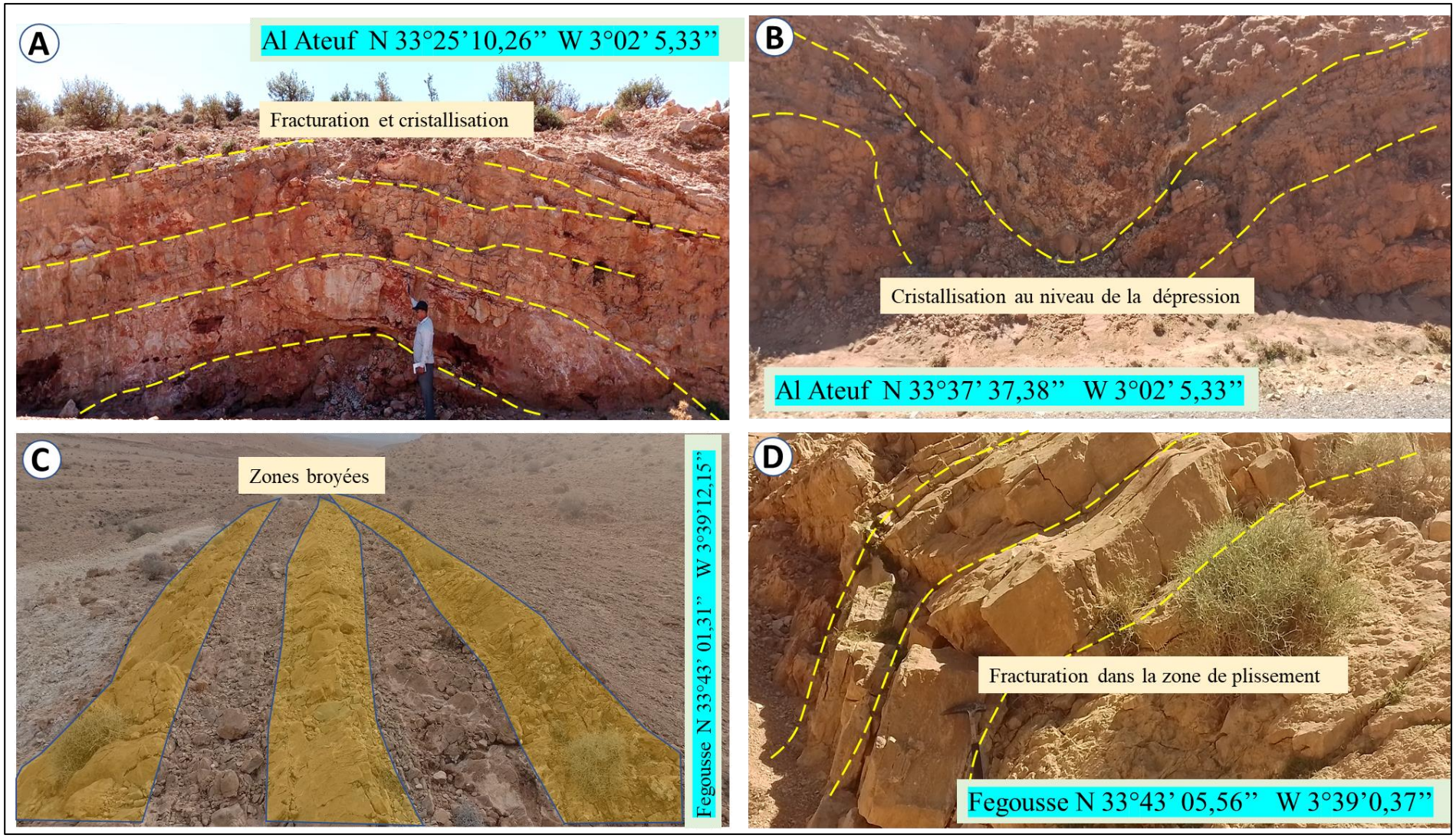


Figure 30 : Illustrations de la fracturation technique au niveau de la zone d'étude. (A) : Al Ateuf, (B) : Nord de la commune Al Ateuf, (C) : Fegousse au pied du moyen Atlas et (D) : Fegousse Ouest Tendit.

4 Hydrogéologie de surface et ressources en eau

4.1 Hydrographie

Les terrains de la région d'étude sont principalement drainés par l'oued Moulouya et ses affluents. Le bassin versant de la Moulouya joue un rôle crucial dans le fonctionnement des systèmes hydrographiques. La principale voie d'écoulement de la région d'étude est l'Oued Moulouya, tandis que l'Oued Za, situé au Nord-Est, joue un rôle secondaire. Cette région, caractérisée par son aridité, reçoit les eaux de plusieurs affluents tels que le Melloulou, Chourf, Rchida et Oued Za.

4.2. Hypsométrie

L'altitude de la région d'étude varie entre 336 et 3 380 m, avec 75 % de la surface totale située entre 770 et 1 640 m d'altitude et des pentes inférieures à 12 % (Figure 31). L'hypsométrie varie en fonction des zones montagneuses et des plaines, influençant la dynamique des écoulements d'eau.

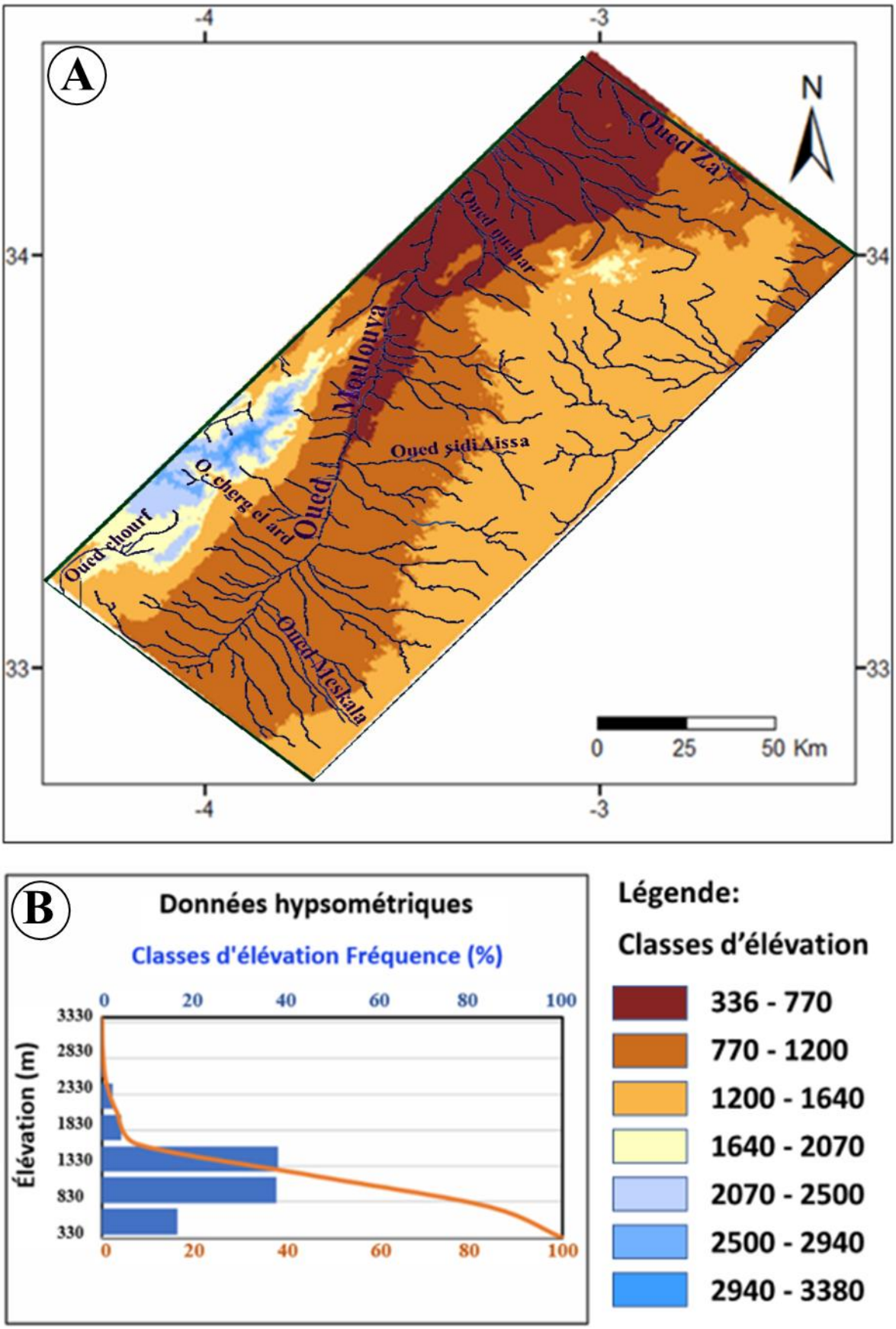


Figure 31 : Carte hypsométrique (A), courbe hypsométrique (B) de la zone d'étude.

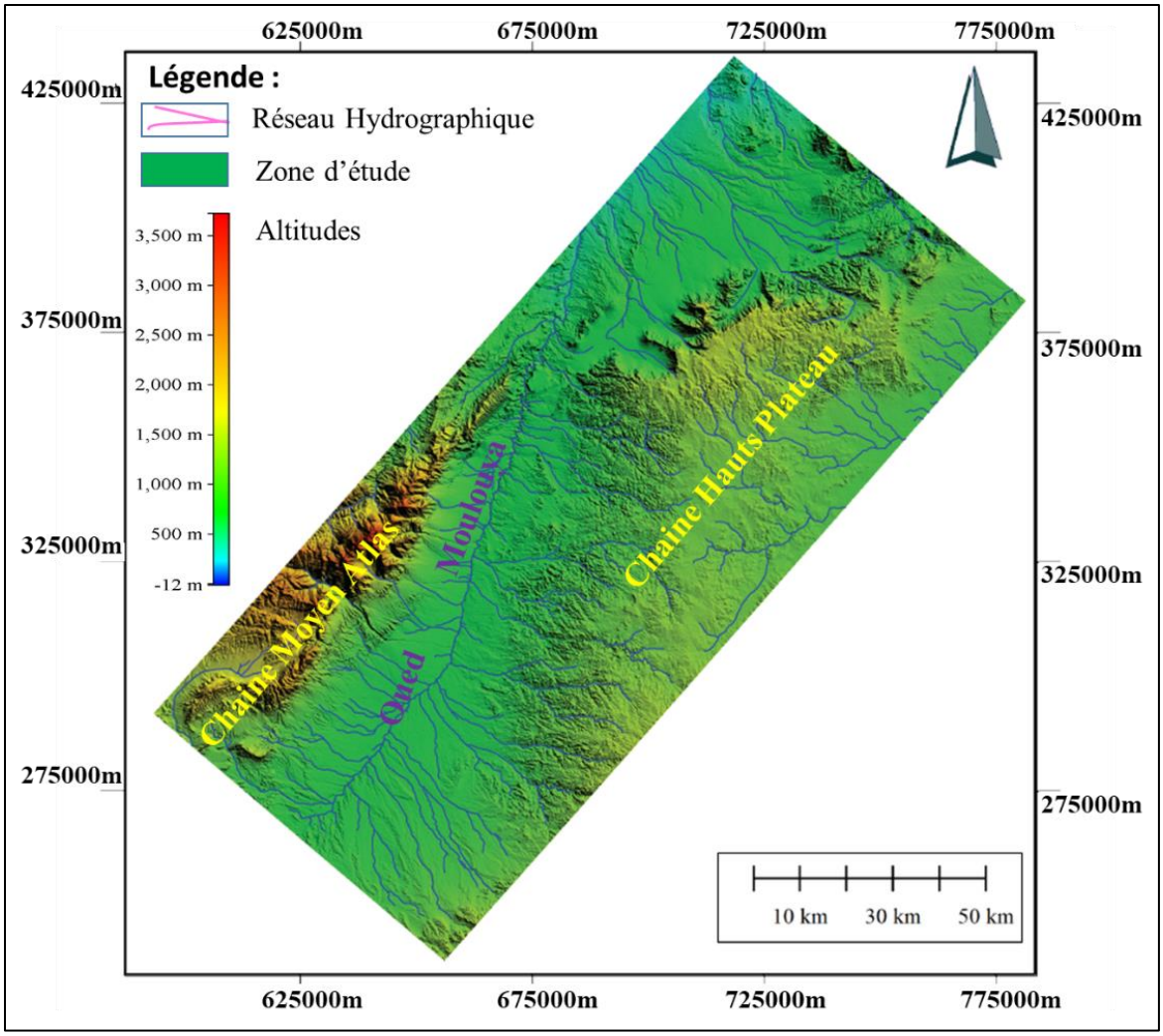


Figure 32 : Carte du modèle numérique de terrain dans la zone d'étude.

4.2 Hydrogéologie de la zone d'étude

4.2.1 Type d'aquifère

Le système aquifère de la Moulouya est constitué de niveaux géologiques comprenant des roches dont la perméabilité et la fracturation favorisent la formation des aquifères. Les principaux niveaux aquifères, décrits par Combe et Simonot (1971), s'étendent du Paléozoïque au Quaternaire, allant des niveaux les plus profonds aux plus superficiels (Figure 33).

Ere	Age MA	Epoque et Description Lithologique	Aquifères	type de nappe
Quaternaire	0,01 1,8 2,6	Holocène : limon, sable, conglomérat. Pléistocène : sable, calcaire, marne.. Villafranchiane : sable, conglomérat, marne et argile.	1ere aquifère	Nappes alluvionnaires quaternaire
Tertiaire	5,3 65	Pliocène : calcaire, sable, conglomérat. Miocène : marnes, calcaires et conglomérats.	2eme aquifère 3eme aquifère	Nappes supérieures en dessous de 200m
Crétacé	135	Crétacé : marnes argileuses et calcaires.		Nappes profondes au de la de 200m
Jurassique	164 167 171 175 203	Callovien : grès. Bathonien : grès rouge, marne et calcaire. Bajocien supérieur : calcaire. Bajocien aalénien : calcaire et calcaire sableux, dolomie. Lias : Calcaire, marnes rouges et vertes.	4eme aquifère 5eme aquifère 6eme aquifère	
Trias	250	Trias : calcaire, gypse, basalte.		Nappes à salinité élevée non exploitable
Paléozoïque	540	Paléozoïque : Dolomie, calcaire, gypse.		

Figure 33 : Log stratigraphique et les aquifères de la zone d'étude (Combe et Simonot,1971).

4.2.2 Système aquifère superficiel

4.2.2.1 Lithologie du réservoir aquifère

Le système aquifère superficiel d'âge Quaternaire, comprend les nappes alluviales, à des niveaux variables, en fonction des différentes lithologies présentes. Les lithologies principales incluent des sables, des grès, des siltstones et des conglomérats, qui sont souvent entrecoupés de couches argileuses et marneuses. Les sables et grès, étant des matériaux poreux et perméables, permettent une bonne circulation de l'eau, tandis que les couches argileuses et marneuses, moins perméables, peuvent se comporter comme des barrières à l'écoulement de l'eau.

Ce système aquifère comprend également des nappes alluviales, renfermée dans les dépôts alluviaux au niveau de l'oued Moulouya et ses affluents. Ces nappes alluviales sont vulnérables aux variations des apports pluviométriques. En période de fortes pluies, elles peuvent se recharger rapidement, augmentant ainsi le niveau de l'eau. À l'inverse, en période de sécheresse, le niveau de l'eau peut baisser de manière significative, affectant la disponibilité de l'eau pour les usages domestiques, agricoles et industriels. La gestion de ce système aquifère

superficiel nécessite une compréhension approfondie des interactions entre les différentes lithologies et des variations climatiques, afin d'assurer une utilisation durable des ressources en eau. Les autres systèmes aquifères de la région d'étude sont repartis entre les formations du Villafranchien composées des sables, des conglomérats et des marnes argileux et le Pléistocène constitué généralement des sables, des calcaires, des marnes et des formations de l'Holocène, représentés par des limons, sables et conglomérats (Figure 33).

4.2.2.2 Limites d'extension

Le système aquifère superficiel s'étend principalement dans les vallées, notamment celle de l'oued Moulouya et de ses affluents. Il est contenu dans les dépôts alluviaux récents, qui forment des bandes discontinues le long des lits majeurs. Les limites latérales de cet aquifère sont définies par :

- Les formations géologiques peu perméables (marnes, argiles) qui forment le substratum ou les bordures du bassin.
- Les zones de transition vers des formations plus anciennes (Villafranchien, Pléistocène), où la perméabilité diminue.
- Les reliefs environnants, qui délimitent le bassin versant et influencent la direction de l'écoulement souterrain.

4.2.2.3 Profondeur

La profondeur de la nappe varie selon la topographie et la nature des dépôts :

- Dans les zones de plaine alluviale, la nappe est peu profonde, souvent entre 1 et 10 m sous la surface.
- Dans les zones plus encaissées ou à substratum plus profond, la profondeur peut atteindre 20 à 30 m, notamment là où les dépôts sont plus épais ou les terrains plus anciens affleurent.

4.2.2.4 Epaisseur

L'épaisseur de l'aquifère dépend de la nature et de la puissance des dépôts quaternaires :

- Elle est généralement comprise entre 5 et 25 m, avec des variations locales importantes.
- Les plus grandes épaisseurs sont observées dans les zones de dépôts alluviaux récents, où les matériaux sont plus meubles et accumulés en grande quantité.

– Les formations du Villafranchien (sables, conglomérats, marnes), du Pléistocène (sables, calcaires, marnes) et de l'Holocène (limons, sables, conglomérats) contribuent à cette variabilité.

4.2.2.5 Paramètres hydrodynamiques

Les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère sont fortement influencées par la nature des matériaux :

– Perméabilité :

- Élevée dans les sables et grès.
- Faible dans les marnes et argiles.

– Porosité effective : dans les matériaux meubles.
– Transmissivité : élevée dans les zones sableuses épaisses, pouvant atteindre plusieurs centaines de m²/j.
– Coefficient d'emmagasinement : typique des nappes libres.

4.2.2.6 Fonctionnement

Le fonctionnement de l'aquifère repose sur un équilibre entre les apports et les pertes :

– Alimentation :

- Infiltration directe des précipitations, surtout en période humide.
- Recharge latérale depuis les affluents et les zones de piémont.
- Infiltration des eaux de crues dans les lits majeurs des oueds.

– Sorties :

- Captages pour l'irrigation, l'eau potable et les usages industriels.
- Écoulement naturel vers les oueds, notamment en période de hautes eaux.
- Évapotranspiration, surtout dans les zones peu profondes et végétalisées.

4.2.3 Système aquifère semi-profond

Le système aquifère semi-profond est constitué de diverses roches, dont certaines sont fracturées, perméables, semi-perméables et imperméables. Les roches fracturées permettent une circulation plus facile de l'eau, tandis que les roches perméables et semi-perméables facilitent l'infiltration et le stockage de l'eau. Les roches imperméables, en revanche, agissent comme des barrières, limitant le mouvement de l'eau. L'analyse des conditions du terrain est cruciale pour déterminer la présence et la distribution de l'eau souterraine. Cette analyse inclut l'étude de la fracturation des roches, qui peut créer des chemins pour l'eau, ainsi que la lithologie, qui décrit la composition et la structure des roches.

La topographie, ou la forme du terrain, influence également le drainage et la direction de l'écoulement de l'eau. Le drainage naturel et la pluviométrie, ou les précipitations, jouent un rôle essentiel dans la recharge des aquifères. Ces variables sont comparées avec le débit effectif observé dans les forages, qui est le résultat de l'interaction entre les différentes conditions du terrain. Le débit des forages peut varier en fonction de la perméabilité des roches et de la quantité d'eau disponible. Ce système aquifère semi-profond est principalement localisé dans les formations géologiques du Miocène et du Pliocène. Ces formations contiennent des roches qui ont été soumises à divers processus géologiques, influençant leur capacité à stocker et à transmettre l'eau. Au niveau de la région d'étude, ce système aquifère est caractérisé par une lithologie variée. Pour le Pliocène, les principales lithologies incluent les calcaires, les sables et les conglomérats. Les calcaires sont des roches carbonatées qui peuvent être très perméables, permettant une bonne circulation de l'eau. Les sables, étant des matériaux granulaires, offrent également une perméabilité élevée. Les conglomérats, composés de fragments de roches cimentés ensemble, peuvent varier en perméabilité en fonction de la nature des fragments et du ciment. Pour le Miocène, les lithologies principales incluent les marnes, les calcaires et les conglomérats. Les marnes, étant des roches argileuses, sont généralement moins perméables, ce qui peut limiter la circulation de l'eau. Les calcaires du Miocène, comme ceux du Pliocène, sont perméables et facilitent le mouvement de l'eau. Les conglomérats du Miocène, similaires à ceux du Pliocène, peuvent varier en perméabilité. Les nappes semi-profondes, situées à des profondeurs inférieures à 200 mètres, sont constituées de formations perméables. Ces nappes sont alimentées par l'infiltration de l'eau de pluie ainsi que celles des cours d'eau. Étant situées à des profondeurs relativement importantes, ces nappes sont à l'abri de l'influence directe des ruissellements des eaux superficielles. Cela signifie que leur recharge dépend principalement des processus d'infiltration lente plutôt que des apports rapides des eaux de surface. La gestion de ces nappes nécessite une compréhension approfondie des processus d'infiltration et des

interactions entre les différentes formations géologiques pour assurer une utilisation durable des ressources en eau.

4.2.3.1 Lithologie du réservoir aquifère

Le système aquifère semi-profond est principalement localisé dans les formations géologiques du Miocène et du Pliocène. Ces formations sont constituées de roches sédimentaires variées, dont certaines sont fracturées, ce qui favorise la circulation de l'eau. Les limites de cet aquifère sont définies par :

- La nature des formations géologiques : les roches imperméables (marnes, argiles) délimitent les zones de circulation de l'eau.
- La structure géologique : les failles et les zones de fracturation peuvent élargir ou restreindre l'extension de l'aquifère.
- La topographie : les zones en altitude peuvent jouer un rôle de zones de recharge, tandis que les zones basses peuvent constituer des zones de décharge.

4.2.3.2 Profondeur

Les nappes semi-profondes se situent à des profondeurs inférieures à 200 m.. La profondeur exacte varie selon :

- La morphologie du terrain.
- La structure géologique locale.
- La position des formations perméables dans la stratigraphie régionale.

4.2.3.3 Epaisseur

L'épaisseur de l'aquifère semi-profond dépend de la puissance des formations perméables (calcaires, sables, conglomérats) :

- Elle peut varier de quelques dizaines à plus de 100 mètres, selon la nature et la continuité des couches aquifères.
- Les formations du Pliocène (calcaires, sables, conglomérats) et du Miocène (marnes, calcaires, conglomérats) présentent une hétérogénéité verticale et latérale qui influence cette épaisseur.

4.2.3.4 Paramètres hydrodynamiques

Les propriétés hydrodynamiques de cet aquifère sont influencées par la nature des roches :

– Perméabilité :

- Élevée dans les calcaires fracturés et les sables.
- Moyenne à faible dans les conglomérats, selon la nature du ciment.
- Faible dans les marnes, qui agissent comme des couches semi-perméables ou imperméables.

– Porosité :

- Élevée dans les sables.
- Moyenne dans les calcaires, selon la fracturation.

– Transmissivité : variable, mais généralement modérée à élever dans les zones bien fracturées ou sableuses.
– Débit des forages : dépend fortement de la perméabilité locale et peut varier considérablement d'un point à un autre.

4.2.3.5 Fonctionnement

Le fonctionnement de l'aquifère semi-profond repose sur des processus d'infiltration lente :

– Alimentation :

- Par infiltration des eaux de pluie, principalement dans les zones de recharge en altitude.
- Par percolation lente à travers les couches perméables depuis les nappes superficielles.
- Par infiltration latérale depuis les cours d'eau, lorsque les conditions géologiques le permettent.

– Sorties :

- Par captages (forages) pour les besoins domestiques, agricoles et industriels.

- Par écoulement diffus vers les nappes plus profondes ou les zones de décharge naturelles.
- L'absence d'interaction directe avec les eaux de surface rend ces nappes moins sensibles aux variations climatiques immédiates, mais leur recharge est plus lente.

4.2.4 Système aquifère profond

Le système aquifère profond de la moyenne Moulouya est caractérisé par une lithologie variée qui permet la saturation et le stockage d'eau dans cette zone. Les grès et basaltes du Trias forment des aquifères discontinus, qui sont rencontrés dans certains forages. Cependant, leur importance est limitée en raison des faibles rendements en eau et de la qualité souvent dégradée de cette eau. Ces aquifères profonds, situés à des profondeurs supérieures à 200 mètres, représentent une ressource stratégique avec des débits qui peuvent dépasser 144 000 m^3/jour, mais le coût d'exploitation de ces ressources les classe en toute sécurité des effets anthropiques et d'épuisement. Leur exploitation doit être soigneusement contrôlée pour éviter l'épuisement des réserves. Cela nécessite la détermination des conditions d'exploitation durable, incluant des études sur le taux de recharge, la qualité de l'eau et les impacts environnementaux potentiels. Les formations du Jurassique, notamment les grès du Callovien, constituent le quatrième aquifère en profondeur dans cette région. Ces grès sont connus pour leur capacité à stocker et à transmettre l'eau, bien que leur efficacité puisse varier en fonction de la fracturation et de la porosité des roches. Les calcaires sableux et les dolomies des formations bajociennes et aaléniennes forment le cinquième aquifère en profondeur. Ces roches carbonatées sont généralement très perméables, permettant une bonne circulation de l'eau. Le système aquifère du Lias est formé de calcaires et de marnes rouges et vertes, qui constituent l'aquifère le plus profond et le plus exploitable de la région. Dans certains cas, ces aquifères peuvent donner lieu à des forages artésiens ou la pression de l'eau dans l'aquifère est suffisante pour faire jaillir l'eau à la surface sans pompage, c'est le cas par exemple du forage de Dkikira et Tissaf (ABHM, 2018). Cependant, l'extension de cet aquifère est limitée par l'existence de marnes, qui constituent un changement latéral dans la lithologie des formations géologiques. Les marnes, étant moins perméables, agissent comme des barrières à l'écoulement de l'eau, limitant ainsi la propagation de l'aquifère. Cela crée des zones où l'eau est moins accessible, nécessitant des forages plus profonds ou des techniques de gestion spécifiques pour accéder à ces ressources. La gestion des aquifères profonds dans la moyenne Moulouya nécessite une approche intégrée, prenant en compte les caractéristiques géologiques, hydrologiques et environnementales. Il est

essentiel de surveiller les niveaux d'eau, la qualité de l'eau et les taux de recharge pour assurer une exploitation durable. Des mesures de protection doivent être mises en place pour prévenir la contamination et l'épuisement des ressources en eau, garantissant ainsi leur disponibilité pour les générations futures.

4.2.4.1 Lithologie du réservoir aquifère

Le système aquifère profond de la moyenne Moulouya repose sur une lithologie complexe et variée, composée de plusieurs formations géologiques :

- Trias : grès et basaltes, formant des aquifères discontinus. Leur capacité de stockage est limitée par la faible perméabilité des basaltes et la qualité souvent médiocre de l'eau.
- Jurassique :
- Callovien : grès à bonne capacité de stockage, leur efficacité dépend de la porosité et de la fracturation.
- Bajocien et Aalénien : calcaires sableux et dolomies, très perméables, favorisant une bonne circulation de l'eau.
- Lias : calcaires, marnes rouges et vertes. Les calcaires liasiques constituent l'aquifère le plus profond et le plus exploitable de la région.

4.2.4.2 Limites d'extension

L'extension de ces aquifères est irrégulière et localement contrainte par :

- Les marnes intercalées dans les formations géologiques agissant comme des barrières latérales, limitant la propagation de l'eau.
- Les changements latéraux de lithologie réduisent la continuité des réservoirs.
- La fracturation locale peut créer des zones favorables à la circulation de l'eau, mais aussi des discontinuités.

4.2.4.3 Profondeur

Les aquifères profonds sont situés à des profondeurs supérieures à 200 mètres, et peuvent atteindre des niveaux bien plus profonds selon la nature des formations géologiques traversées. Ainsi, les forages réalisés dans les calcaires liasiques ou les grès du Callovien

peuvent dépasser plusieurs centaines de mètres. A de telles profondeurs, ces aquifères sont généralement à l'abri des pollutions de surface, mais leur exploitation demeure plus complexe et coûteuse.

4.2.4.4 Epaisseur

L'épaisseur des réservoirs aquifères varie selon la formation géologique :

- Les calcaires et dolomies peuvent présenter une épaisseur importante, favorable au stockage.
- Les grès du Callovien et les calcaires liasiques sont également épais, mais leur efficacité dépend de la fracturation.
- Les marnes, lorsqu'elles sont intercalées, réduisent l'épaisseur utile de l'aquifère.

4.2.4.5 Paramètres hydrodynamiques

Les propriétés hydrodynamiques sont influencées par la nature des roches et leur état de fracturation :

- Perméabilité :
  - Élevée dans les calcaires fracturés, dolomies et certains grès.
  - Faible dans les marnes et les basaltes massifs.
- Porosité :
  - Moyenne à faible, mais la fracturation améliore la transmissivité.
- Débits :
  - Certains forages profonds peuvent atteindre des débits supérieurs à 144 000 m³/jour.
- Artésianisme :
  - Observé dans certains cas (ex. Dkikira et Tissaf), où la pression naturelle permet à l'eau de jaillir sans pompage.

4.2.4.6 Fonctionnement

Le fonctionnement de ces aquifères profonds reposes sur des processus lents et profonds :

– Alimentation :

- Par infiltration lente à travers les formations sus-jacentes perméables.
- Par recharge latérale depuis des zones de haute altitude ou des zones de fracturation.
- Le taux de recharge est faible, ce qui rend ces nappes sensibles à la surexploitation.

– Sorties :

- Captages profonds pour l'eau potable, l'agriculture ou l'industrie.
- Forages artésiens, dans les zones à forte pression.
- Absence de décharges naturelles visibles, ce qui nécessite une surveillance rigoureuse des niveaux piézométriques.

4.3 Ressources en eau

Les recherches d'approvisionnement en eaux dans la région de Fritissa et le long des rives de la Moulouya, se concentrent sur l'établissement de points d'eau après l'analyse des pratiques locales, le niveau de la nappe, la profondeur, les débits, la qualité de l'eau et les coûts associés à l'extraction des ressources hydriques. La plus grande partie des habitants de la région dispose de puits ou forage exploitant les eaux souterraines. Cependant, la surexploitation et les fluctuations climatiques menacent ces ressources en eau. Cela nécessite une gestion durable et une planification pour l'avenir, en tenant compte de la situation socioéconomique de la région.

Dans la région de Fritissa, les eaux souterraines convergent entre les limites hydrogéologiques de Missour en amont et de Bouyakoubate en aval. C'est une région principalement rurale avec une capacité insuffisante des barrages pour répondre aux besoins, de la population. Selon le rapport de l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya (ABHM), cette situation est due à deux facteurs : le changement climatique et la diminution des précipitations, ainsi que le retard dans la mise en œuvre de la stratégie nationale de l'eau. Le conseil du bassin hydraulique chargé de la gestion des ressources en eau, a mis en place une politique de gestion durable et de conservation des ressources hydriques.

Les programmes stratégiques visent à atténuer les effets de la rareté de l'eau et à assurer une gestion durable des ressources hydriques. Ces programmes incluent la cartographie des

ressources en eau existantes (quantité et qualité) et de leur utilisation, ainsi que la valorisation des ressources en eau rares (eau salée, eaux usées, etc.). Ils doivent être cohérents avec les opportunités nationales de développement économique, social et environnemental, et les secteurs connexes de planification et de gestion de l'eau, tels que l'eau potable et industrielle, l'agriculture, l'énergie, la lutte contre les inondations, la protection et la conservation des eaux. L'exploration des scénarios de développement des ressources en eau et la fourniture d'éléments d'aide à la décision pour choisir le scénario optimal nécessitent une adaptation constante. La préparation d'un plan et d'un calendrier de réalisation de l'aménagement hydraulique du bassin de la zone au niveau de la Moyenne Moulouya, incluant les éventuels transferts d'eau, est essentielle.

La définition des objectifs de qualité des ressources en eau et la proposition de mesures nécessaires à la protection de l'environnement favorisent la mise en œuvre du plan conformément aux exigences du développement durable. Il est également important d'identifier les liens entre le plan local et les plans nationaux de développement en termes d'aménagement du territoire, d'approvisionnement en eau potable, d'irrigation, de production d'énergie, de protection et de restauration de la qualité de l'eau, et de réduction des risques d'inondation. Enfin, la proposition des ressources institutionnelles nécessaires à la mise en œuvre efficace du plan dans les domaines organisationnel, législatif, économique et financier est cruciale.

D'après les rapports des cinq unités hydrogéologiques situées dans la région de la Moyenne Moulouya montrant qu'entre septembre 2023 et août 2024, la moyenne des précipitations était de 122 mm, avec un déficit de 28 %. En revanche, entre septembre et décembre 2024, la moyenne des précipitations n'a atteint que 76,3 mm. Les estimations font état d'un déficit de 28 millions m^3/an, ce qui laisse présager un recours croissant aux nappes profondes et semi-profondes pour assurer l'approvisionnement en eau de la zone dans un avenir proche. De plus, la nappe superficielle au niveau de la zone d'étude, et plus particulièrement à la station de Tendit, montre une oscillation du niveau piézométrique variant entre 10 et 20 m de profondeur durant la période allant de 1983 à 2015 ; tandis qu'en période de 2023 à 2025, le niveau piézométrique chute à plus de 40 m de profondeur (Figure 33).

La qualité des ressources en eaux superficielles dans la Moyenne Moulouya est globalement dégradée, en raison des rejets directs dans l'oued Moulouya et ses affluents. Pour lutter contre cette pollution, des projets de recyclage et de réutilisation des eaux sont en cours de réalisation ou de planification, ainsi que la création de stations d'évaporation naturelle pour les usines d'huile d'olive.

Les ressources souterraines de la zone présentent une bonne qualité, représentant plus de 60% du volume total des eaux de la zone. Depuis 2018, un programme de recherche et d'exploitation de ces aquifères a été lancé au niveau de la Moyenne Moulouya, en même temps avec la création de barrages collinaires destinés à l'irrigation, à l'alimentation des nappes souterraines et à la réduction des inondations. A noter que les sources d'eau de la Moyenne Moulouya sont extrêmement restreintes, avec des précipitations très irrégulières d'une année à l'autre. En raison des grandes surfaces imperméables, les eaux souterraines sont peu développées. L'agriculture, reste le principal secteur utilisateur d'eau, et doit prioriser la recherche de nouvelles ressources en eau, telles que le recyclage des eaux usées, dans les plans de gestion de l'eau.

La zone d'étude connaît une croissance démographique rapide, avec une augmentation de 50 % de la demande en eau potable ces dernières années. Dans certaines parties de la région, les oueds inondés servent de débouchés pour les eaux usées, ce qui permettrait un équilibre entre les cycles des eaux souterraines et les cycles socio-économiques, indispensable au développement durable de la région.

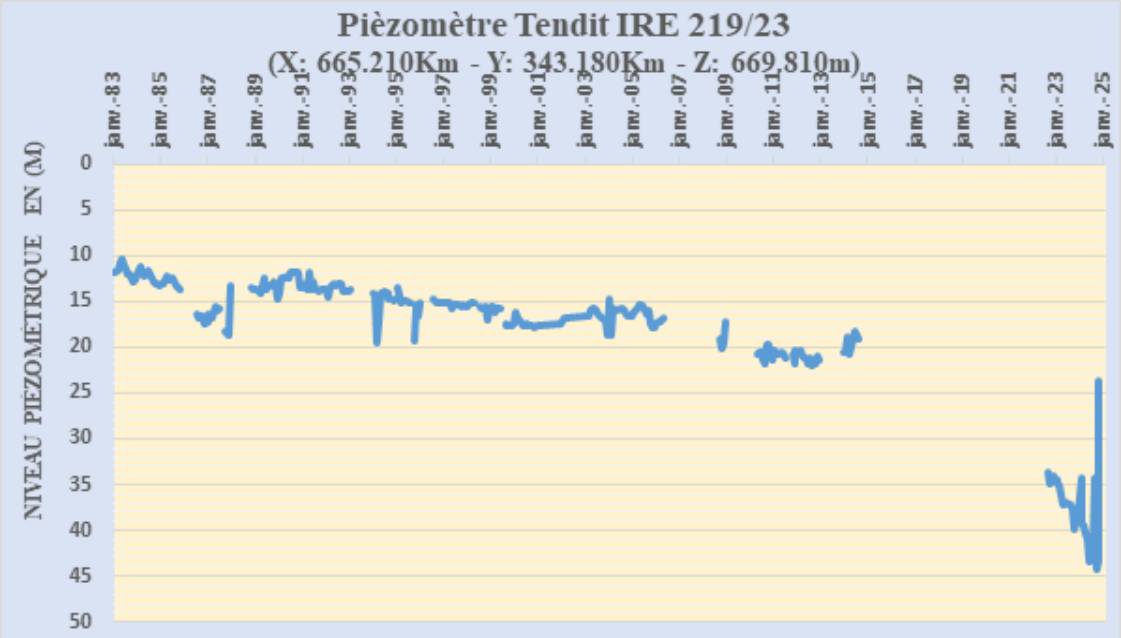


Figure 34 : Evolution du niveau piézométrique au niveau du piézomètre 219/23 (ABHM, 2025).

Le graphique illustre l'évolution du niveau piézométrique entre janvier 1983 et janvier 2025. On observe une baisse significative du niveau, passant de 10 mètres de profondeur en janvier 1983 à 22 mètres en 2013. Il convient de noter une absence de données entre janvier 2015 et janvier 2023. En janvier 2025, le niveau piézométrique atteint 24 mètres, indiquant une

légère récupération. Au niveau du piézomètre 219/23, la nappe captée reste libre, ce qui reflète les fluctuations marquées observées au cours de cette période.

5 Conclusion

La Moyenne Moulouya est une région marquée par une diversité géographique, climatique et géologique, influençant directement ses ressources en eau et ses activités humaines. La préservation de ces ressources est essentielle pour assurer le développement durable de la région. Située dans l'Oriental du Maroc et appartenant à la Meseta Orientale, la Moyenne Moulouya se caractérise par un climat aride à semi-aride, influençant directement les conditions de vie des habitants et le développement des provinces et communes environnantes. Sa population connaît un taux d'accroissement modéré et est principalement engagée dans l'agriculture et l'exploitation des ressources naturelles. D'un point de vue géologique, la région présente une succession de formations allant du Paléozoïque au Quaternaire, comprenant des lithologies variées telles que des roches détritiques (conglomérats, grès, argiles), des roches carbonatées (dolomies, calcaires, marnes) et des roches magmatiques basaltiques. Cette diversité des roches à perméabilité variable contrôle la répartition latérale et verticale des ressources en eau souterraines. La fracturation due aux activités tectoniques impacte considérablement la structuration du sous-sol et la dynamique des aquifères. Concernant les ressources en eau, la région dispose de ressources superficielles limitées et d'aquifères souterrains diversifiés (alluvionnaires, semi-profonds et profonds). Ces ressources sont cruciales pour répondre aux besoins domestiques, industriels et agricoles des habitants. Toutefois, l'insuffisance des eaux de surface et des aquifères alluvionnaires impose un recours croissant aux nappes semi-profondes et profondes, nécessitant une gestion rationnelle pour éviter leur épuisement à long terme.

Chapitre 3

Indice de potentiel des eaux souterraines du système aquifère semi-profond

Chapitre 3 : Indice de potentiel des eaux souterraines du système aquifère semi-profond

1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer le potentiel en eau souterraine du système aquifère semi-profond dans la région de la moyenne Moulouya et la partie amont de la basse Moulouya. Cette évaluation est cruciale pour la gestion durable des ressources en eau et pour l'optimisation de l'exploitation des eaux souterraines dans cette zone aride à semi-aride, particulièrement en milieu fracturé et semi-profond.

L'indice de potentiel en eau souterraine (IPES), développé par Ettazarini (2007) et amélioré par Ettazarini et El Jakani (2020), constitue une méthode multicritères basée sur l'analyse statistique des données, pour une prise de décision basée sur la réalité des conditions du terrain (Hasibuan et al., 2021 ; Addina et al., 2024 ; Adelin et al., 2024). Cet indice repose sur l'analyse des données de terrain relatives à plusieurs facteurs géologiques et climatiques tels que la fracturation, la lithologie, le drainage, la pente, la pluviométrie, ainsi que les débits mesurés dans les forages. L'objectif est de d'appliquer méthode IPES pour le cas du système d'aquifères semi-profonds de la moyenne Moulouya afin de comprendre comment ces facteurs influencent l'accumulation d'eau souterraine et de prévoir le potentiel d'exploitation en eau dans les niveaux aquifères semi-profonds.

Partant du principe que les débits d'eau dans les forages sont le résultat des interactions complexes entre les conditions du terrain, telles que la fracturation, la lithologie, la pente, les caractéristiques du drainage et la pluviométrie, l'analyse de ces facteurs permet de sélectionner les zones à fort potentiel en eau souterraine, en particulier pour guider le choix des futurs points d'exploitation dans les milieux fracturés avec le respect de la durabilité de cette ressource naturelle.

2 Collecte des données

La collecte des données repose sur diverses sources afin d'obtenir une image précise des conditions géologiques, hydrogéologiques et climatiques de la région d'étude. Les principales sources de données utilisées sont décrites ci-dessous.

2.1 Fracturation

Les cartes géologiques de Debdou, Hassian Ed Diab, Hassi El Ahmar, Maatarka, Ain Beni Mathar, et Taourirt, disponibles à l'échelle 1/100 000, sont utilisées pour la description géologique des affleurements et l'extraction des failles. Pour les zones non couvertes par ces cartes, la carte géologique du Maroc à l'échelle 1/1 000 000 a été utilisée pour combler le manque d'information (Figure 35).

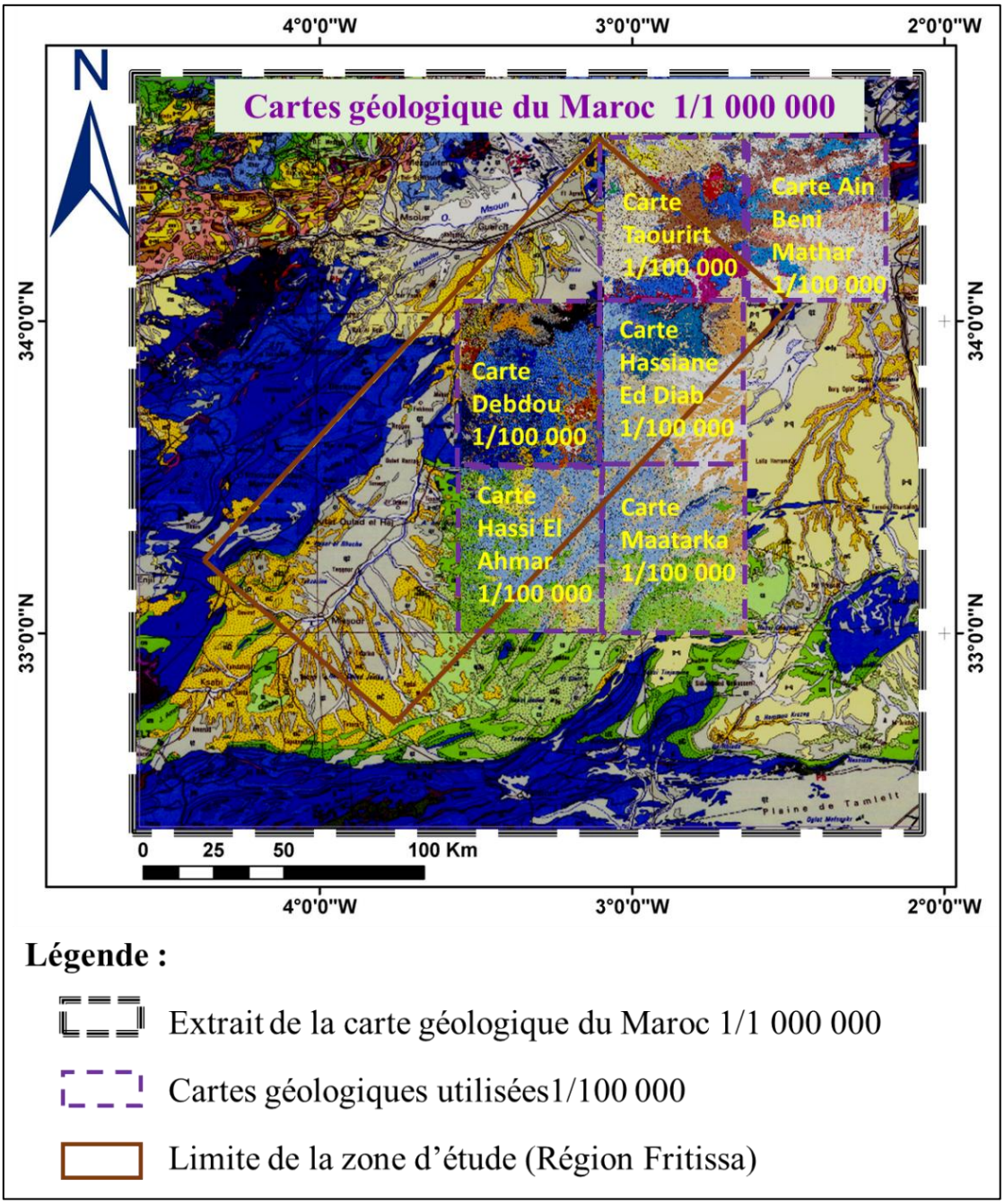


Figure 35 : Regroupement des cartes géologiques couvrant la zone d'étude.

La zone d'étude est caractérisée par une grande diversité d'affleurements géologiques, dominées par des roches carbonatées, ainsi que par des formations marneuses et argileuses, avec des grès, des basaltes et des conglomérats (Figure 36).

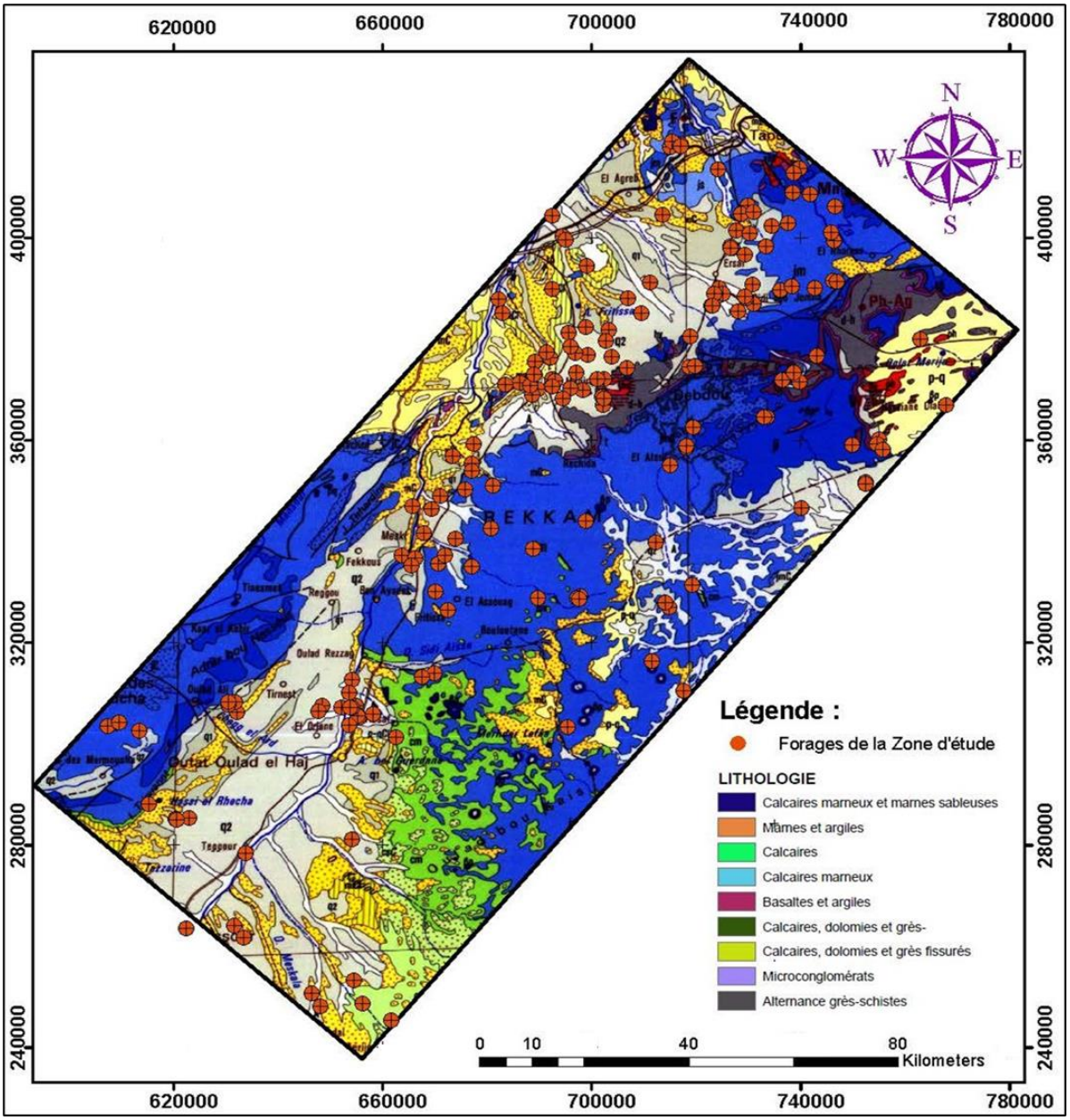


Figure 36 : Cartes des affleurements géologiques avec situation des forages au niveau de la zone d'étude.

En utilisant le logiciel Geomatica 2016, une carte des linéaments a été produite à partir des images satellites Sentinel (Figure 37). Cette carte permet de caractériser la fracturation de la zone d'étude, qui est essentielle à la prospection des eaux souterraines en milieu fracturé (Akame et al., 2013). Cette carte a été ensuite améliorée en utilisant les données des cartes géologiques existantes et des observations directes effectuées sur le terrain. Cette approche combinée a permis de valider et de renforcer les résultats obtenus par télédétection (Figure 37),

offrant ainsi une vision plus complète et précise des structures de fracturation présentes dans la région (Figure 39 à 42).

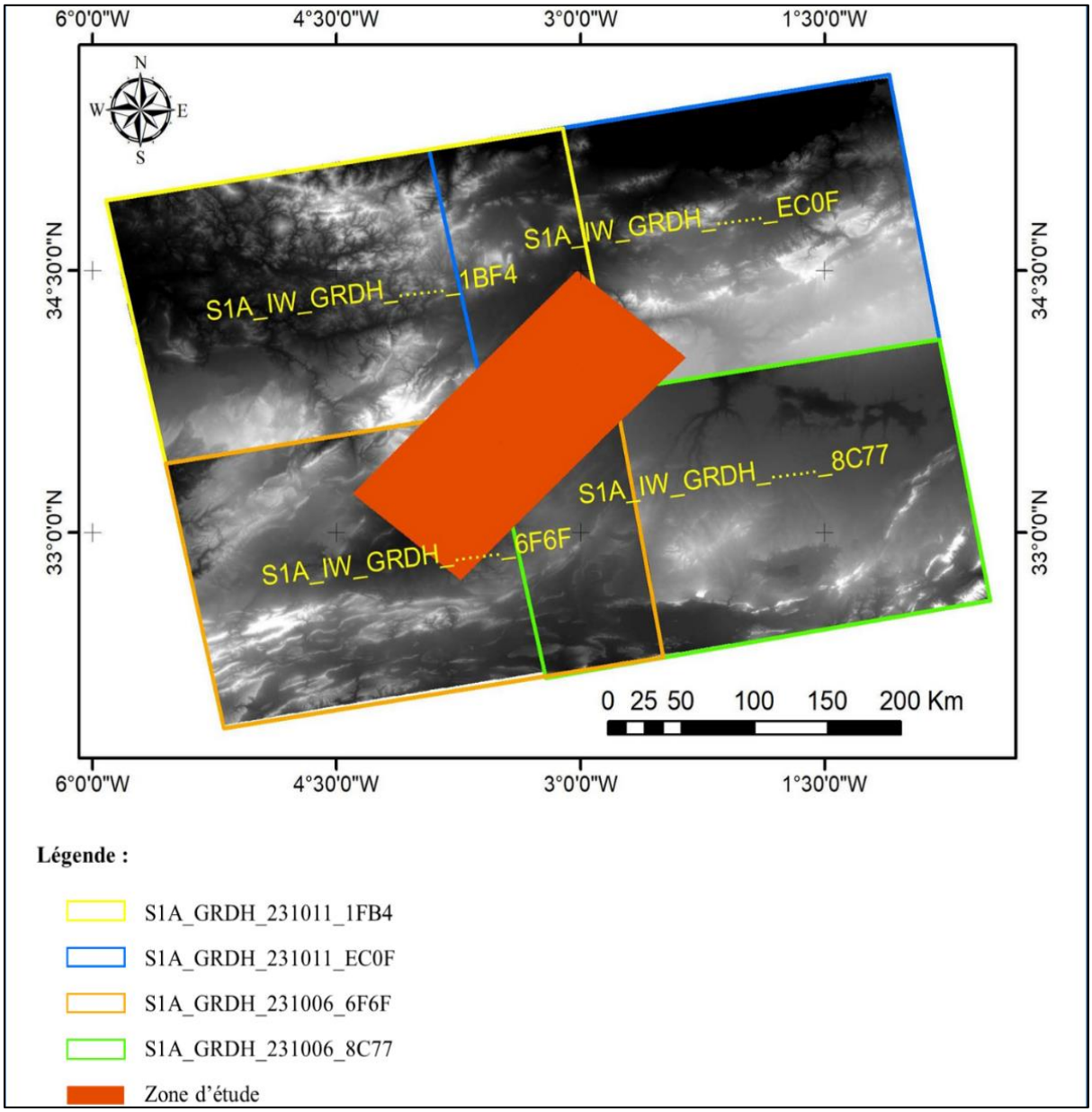


Figure 37 : Images satellite MNT de la zone d'étude.

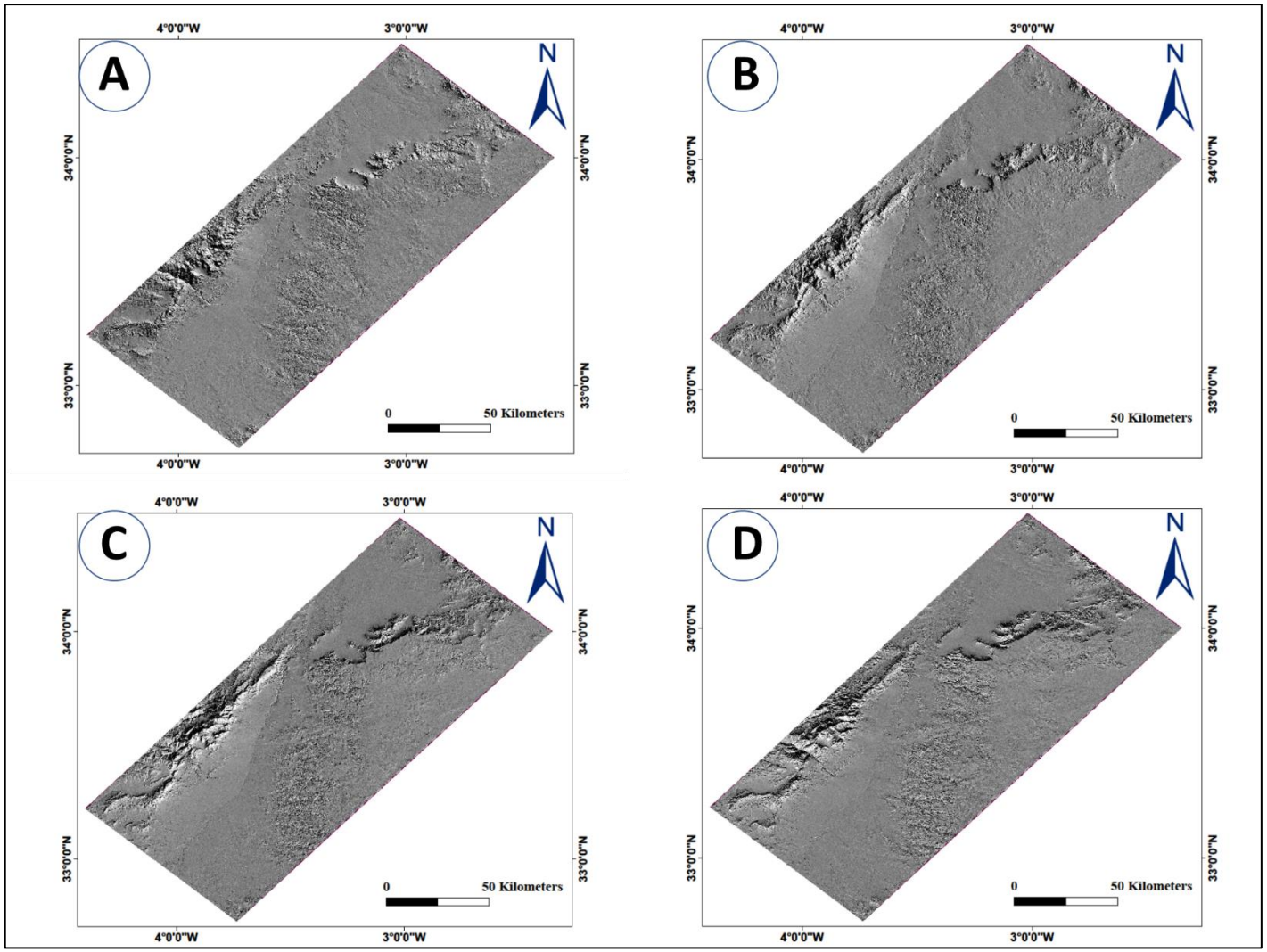


Figure 38 : Images du relief ombré au niveau de la zone d'étude avec des directions d'éclairage différentes, (A) : direction 45°, (B) : direction 90°, (C) : direction 135° et (D) : direction 180°.

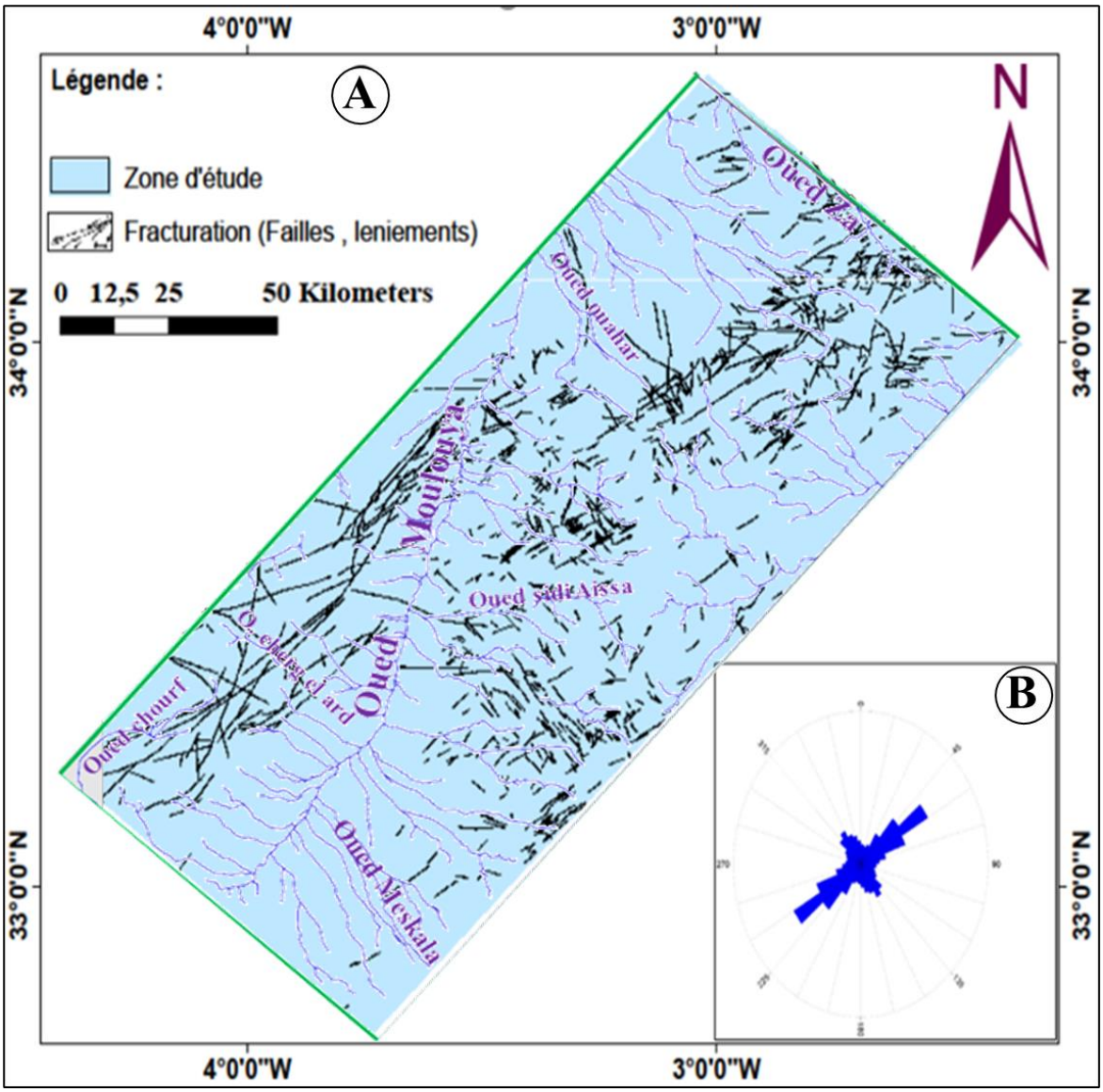


Figure 39 : (A) Carte de la fracturation de la zone d'étude, (B) Rosace de la fracturation.

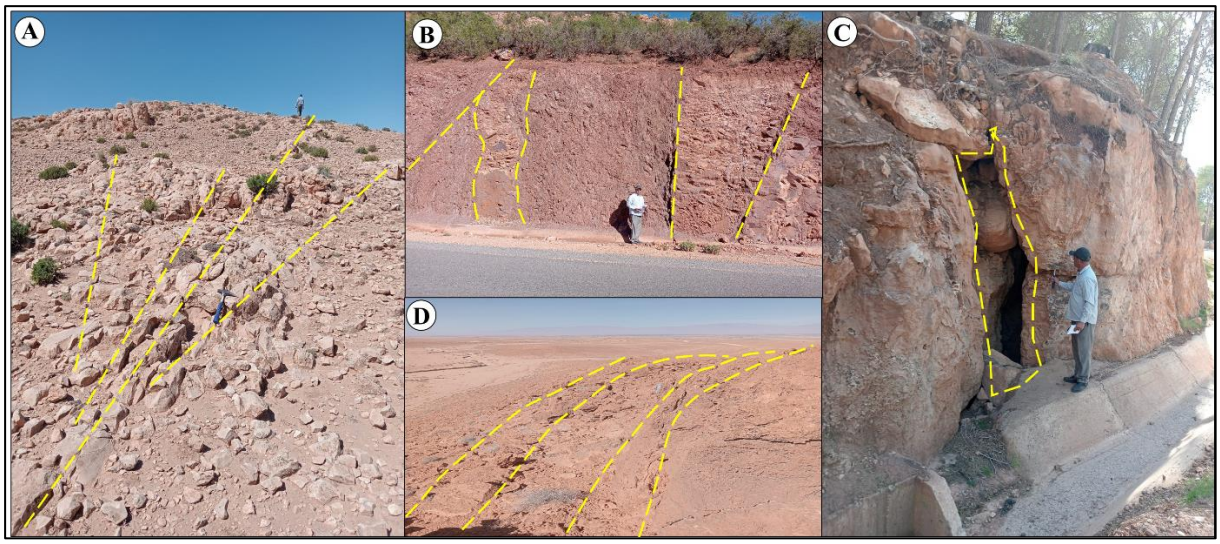


Figure 40 : Illustrations de la fracturation au niveau de la zone d'étude, (A) : Nord de la zone à la commune Al Ateuf, (B) : Schistes de dépression de Debdou, (C) : Calcaires de dépression de Debdou, (D) : entre Tendit et la chaine du moyen atlas.

Figure 41 : Illustration de la fracturation à l'Est du moyen Atlas au niveau de la zone d'étude (Ben Driss, 2025).

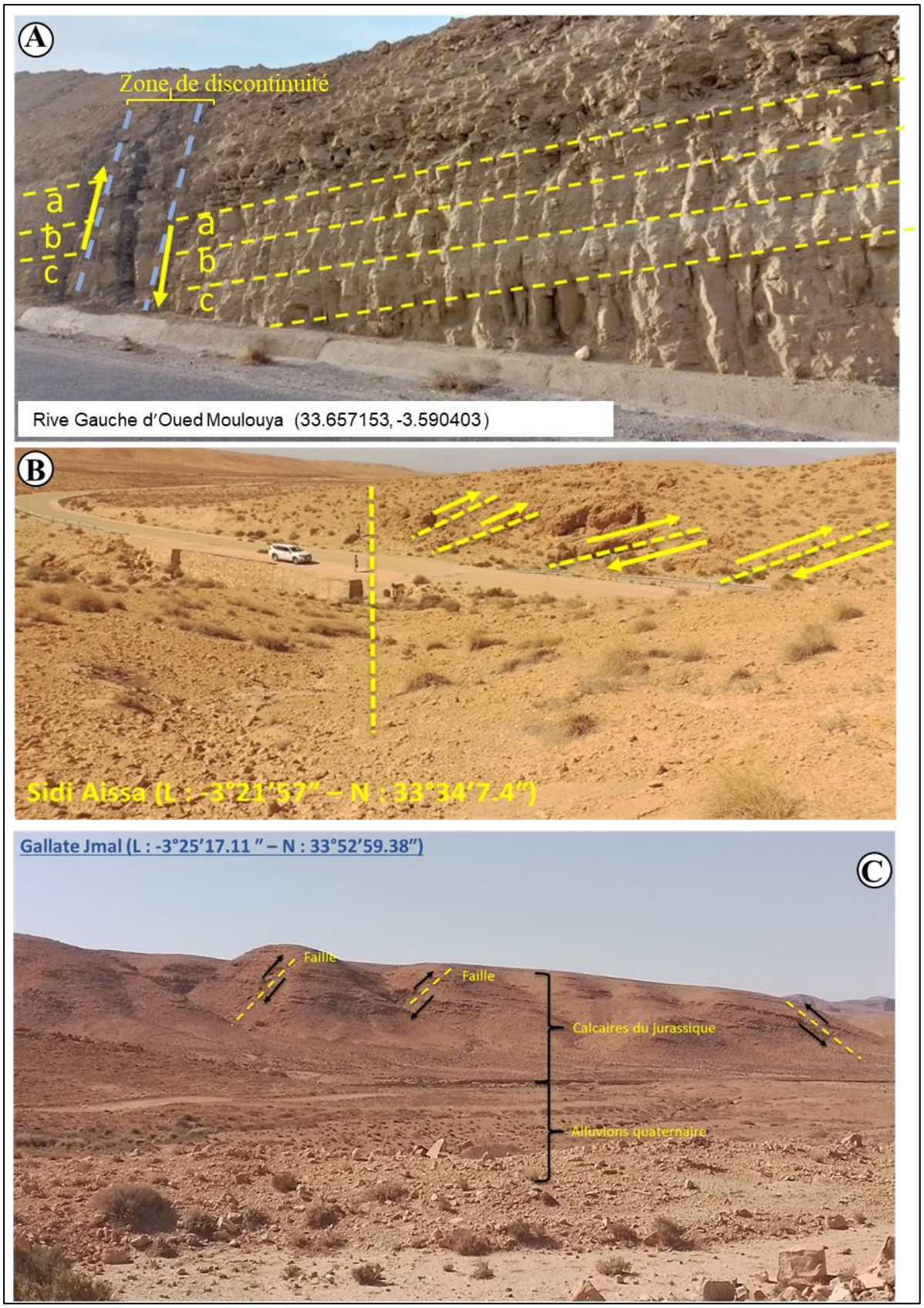


Figure 42 : Exemples de fracturation au niveau de la zone d'étude, (A) : rive gauche d'oued Moulouya, (B) : Sidi Aissa et (C) : Gallat jamal au niveau de la plaine de Fritissa.

Les plans de fracturation retenus et cartographiés sont classés et notés selon la charte d'Ettazarini (2007), comme illustré dans le tableau 4.

Tableau 4 : Classement de la fracturation suivant la charte d'Ettazarini (2007).

Paramètres	Conditions peu favorables.	Conditions moyennement favorable	Conditions très favorables
Fracturation	1.Roche non fracturée. 2. Diaclases fréquentes, plans de faille discontinus. 3. Plans de fissures et de schistosité	4.Faille incertaine (linéament seulement) 5.Plans de rupture fréquents et locaux 6.Failles locales et certaines (< 1 km de long) 7.Failles locales interconnectées avec plans rapprochés	8.Failles certaines, séparées et kilométriques (> 1 km) 9.Failles kilométriques interconnectées (1 à 3 km de long) avec plans rapprochés. 10.Zone de cisaillement, failles majeures longues (> 3 km)

2.2 Lithologie

D'après les différents forages réalisés au niveau de la zone Fritissa, les formations géologiques de l'aquifère semi-profond présentent une diversité lithologique (Annexe 1). Il s'agit principalement de roches sédimentaires marquées par une dominance des calcaires, des dolomites, des argiles, des marnes, des grès, des sables et conglomérats. Le socle rocheux de la région est constitué principalement de schistes et de quartzites. En plus des roches sédimentaires et métamorphiques, avec des roches ignées, principalement des basaltes triasiques (Combe et Simonot, 1971).

Cette diversité lithologique est le reflet des différents environnements de dépôt et des conditions tectoniques variées qui ont prévalu au cours des temps géologiques. Les caractéristiques physiques des roches, telles que la porosité et la résistance aux contraintes tectoniques, varient considérablement, ce qui favorise la formation des aquifères semi profonds. En revanche, les roches carbonatées peuvent présenter une porosité variable, souvent influencée par des processus de dissolution et de fracturation. L'alternance de roches perméables et imperméables, ainsi que la présence de roches sensibles à la fracturation et d'autres plus résistantes, créent un terrain hétérogène en termes de conductivité hydraulique et de capacité de stockage de l'eau. Cette hétérogénéité joue un essentiel dans la formation et la dynamique de ces aquifères, car elle détermine les modalités d'infiltration, de circulation et de stockage de l'eau dans le sous-sol. Les informations sur la lithologie extraites des forages sont traitées avec le logiciel Rock Works pour élaborer la carte des lithologies des niveaux aquifères. La carte résultante (Figure 43) a été utilisée comme carte thématique sur laquelle la charte de notation a été appliquée.

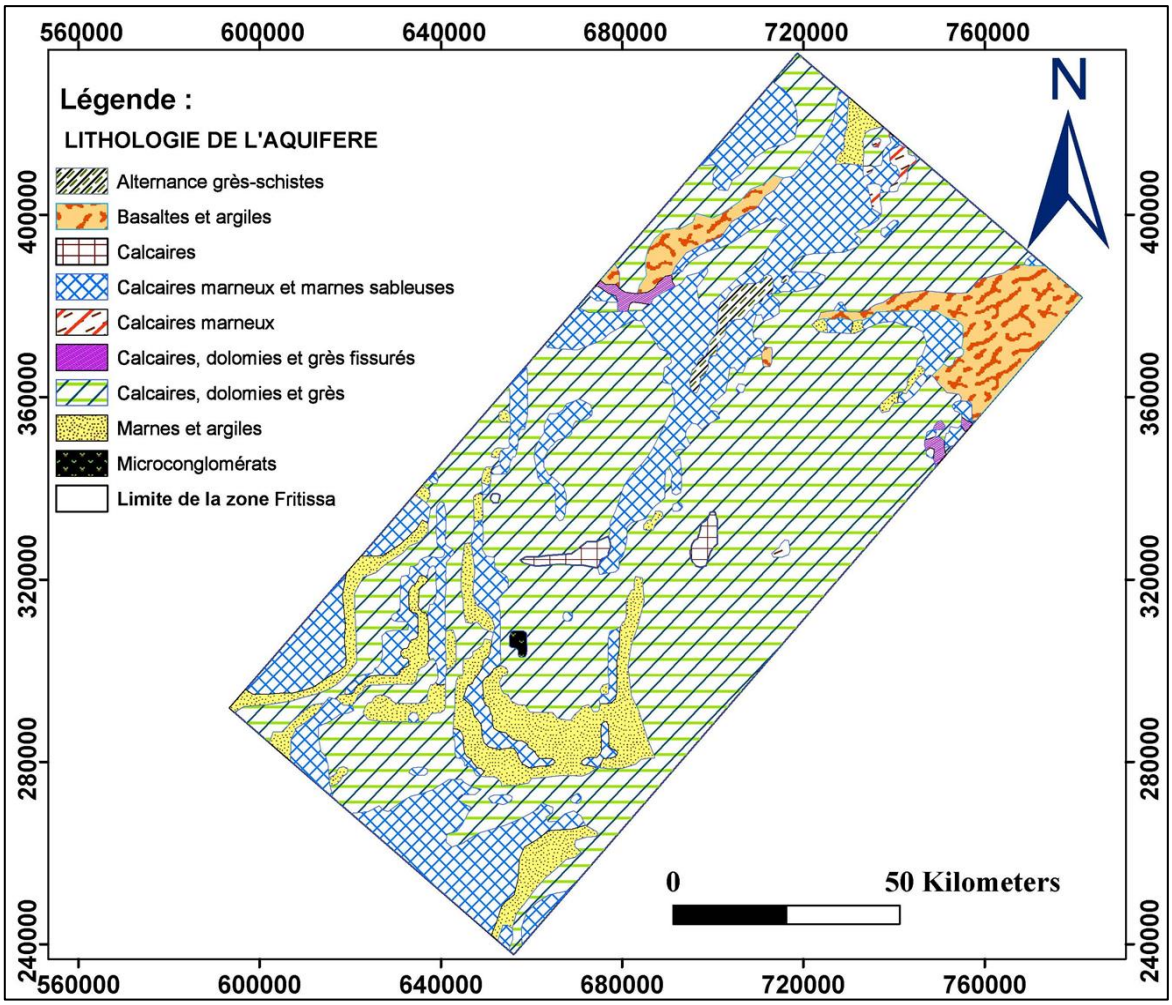


Figure 43 : Carte lithologique de l'aquifère semi-profond ? au niveau de la zone d'étude.

Cette carte thématique met en évidence les zones où les conditions sont défavorables en raison de la nature et de la lithologie des roches réservoirs. Les roches imperméables telles que les marnes, les calcaires marneux, les limons argileux et les schistes dominent dans ces zones, limitant fortement l'infiltration et la circulation de l'eau. Ces zones défavorables couvrent 33,51 % de la surface totale de la zone d'étude tandis que 66,49 % de la surface est caractérisée par des roches plus perméables comme les calcaires, les dolomies, les grès et, localement, les conglomérats. La cartographie et la classification de la lithologie sont illustrées dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : Classement de la lithologie suivant la charte d'Ettazarini (2007).

Paramètre	Conditions défavorables.	Conditions moyennement favorables	Conditions très favorables

Lithologie	1.Quartzite, gneiss, granite, migmatite, andésite, rhyolite, schiste faiblement fracturé. 2. Schiste altéré, schiste fissuré, alternance schiste-quartzite fracturée, alternance quartzite-grès. 3. Schiste très fracturé, schiste altéré et fracturé, alternance schiste-grès, gabbro, dolérite, etc. alternance conglomérat-quartzite, argile-marne.	4. Grès, microconglomérat, conglomérat, calcaires, dolomie, grès schisteux fracturé, alternance pélite-sable, alternance schiste-sable fracturé, dolérite fracturée, calcaires marneux - argile sableuse. 5.Grès fracturés, conglomérats fracturés, calcaires sableux, calcaires fracturés, schistes sableux fracturés, quartzites fracturés, calcaire-dolomie-grès. 6. Microconglomérats fracturés, basaltes fracturés, calcaires sableux fracturés. 7. Microconglomérat sableux fracturé.	8-10. Grès poreux et fracturé, basalte vacuole et dolérite, basaltes.

2.3 Drainage

Les données d'altitude des modèles numériques du terrain sont essentielles pour cartographier les cours d'eau et les sous bassins qu'ils drainent. De nombreux chercheurs, tels que Trépanier (2009) et Teixeira et al. (2013), ont proposés des corrections pour les modèles numériques d'élévation de la carte du Modèle Numérique de Terrain (MNT) afin d'obtenir un réseau de drainage proche de la réalité. Ces corrections sont cruciales pour représenter fidèlement les écoulements d'eau et les zones de recharge des nappes phréatiques. Dans cette étude, l'utilisation des quatre images Sentinel récentes (Figure 37), combinées et corrigées géométriquement, a permis de réduire le problème de distorsion du terrain. Le modèle numérique de terrain employé, de haute résolution 30 m, offre une précision accrue pour l'analyse hydrologique. L'outil « hydrologie » d'ArcGIS a été utilisé pour combler les vides présents dans le MNT afin d'assurer la continuité du réseau de drainage. Cette étape est cruciale pour obtenir un réseau de cours d'eau précis et fiable. Le réseau hydrographique est classé selon la méthode de Strahler pour obtenir la carte de l'ordre des cours d'eau et les sous bassins que drainent les différents segments du réseau hydrographique (Figure 44).

La classification de l'ordre des cours d'eau selon la méthode de Strahler permet d'identifier et de hiérarchiser les différents bassins versants relatifs aux différentes branches du cours d'eau. Des scores ont été attribués selon les critères définis par Ettazarini (2007) afin d'évaluer le potentiel hydrologique pour chaque sous bassins dans la zone d'étude (Tableau 6).

Tableau 6 : Classement de la lithologie suivant la charte d'Ettazarini (2007).

Paramètre	Conditions défavorables	Conditions moyennement favorables	Conditions très favorables
Drainage (Ordre du flux)	1. Escalade. 2. Ravin isolé, cours d'eau temporaire. 3. Ordre des cours d'eau (1).	4. Ordre de cours d'eau (2). 5. Ordre de cours d'eau (3). 6. Ordre de cours d'eau (4). 7. Ordre de cours d'eau (5).	8. Ordre de cours d'eau (6). 9. Voie d'eau permanente (ordre 7). 10. Voie permanente (ordre> 7).

Cette classification permet de cibler les zones les plus prometteuses pour les études et les aménagements futurs en matière de gestion des ressources en eau. L'importance du facteur de drainage réside dans le fait que, plus un point du cours d'eau est situé en aval, plus il est proche du cours d'eau principal de Moulouya et plus il est susceptible de recevoir un débit important. Dans le cas contraire le cours d'eau est généralement sec (Figure 44). Cela s'explique par le nombre croissant de cours d'eau qui convergent vers ce point, augmentant ainsi le volume d'eau transporté Ce principe est particulièrement pertinent pour la zone d'étude, où la dynamique des cours d'eau joue un rôle crucial dans la distribution des ressources en eau. Dans cette région, la plupart des cours d'eau sont directement connectés au cours principal de la Moulouya et à l'Oued Za. Ces deux cours d'eau majeurs agissent comme des collecteurs principaux, recevant l'eau de nombreux affluents. Cette configuration hydrologique explique pourquoi les bassins versants ayant des scores élevés en termes de potentiel hydrologique sont principalement concentrés en aval de la Moulouya. Ces zones bénéficient de l'apport combiné de plusieurs cours d'eau, ce qui augmente leur capacité à accumuler et à transporter de grandes quantités d'eau. En résumé, le facteur drainage est déterminant pour comprendre la distribution des ressources en eau dans la zone d'étude. La connexion directe des cours d'eau au réseau principal de la Moulouya et de l'oued Za, combinée aux caractéristiques géomorphologiques favorables en aval, explique la concentration des bassins versants à fort potentiel hydrologique dans ces zones.

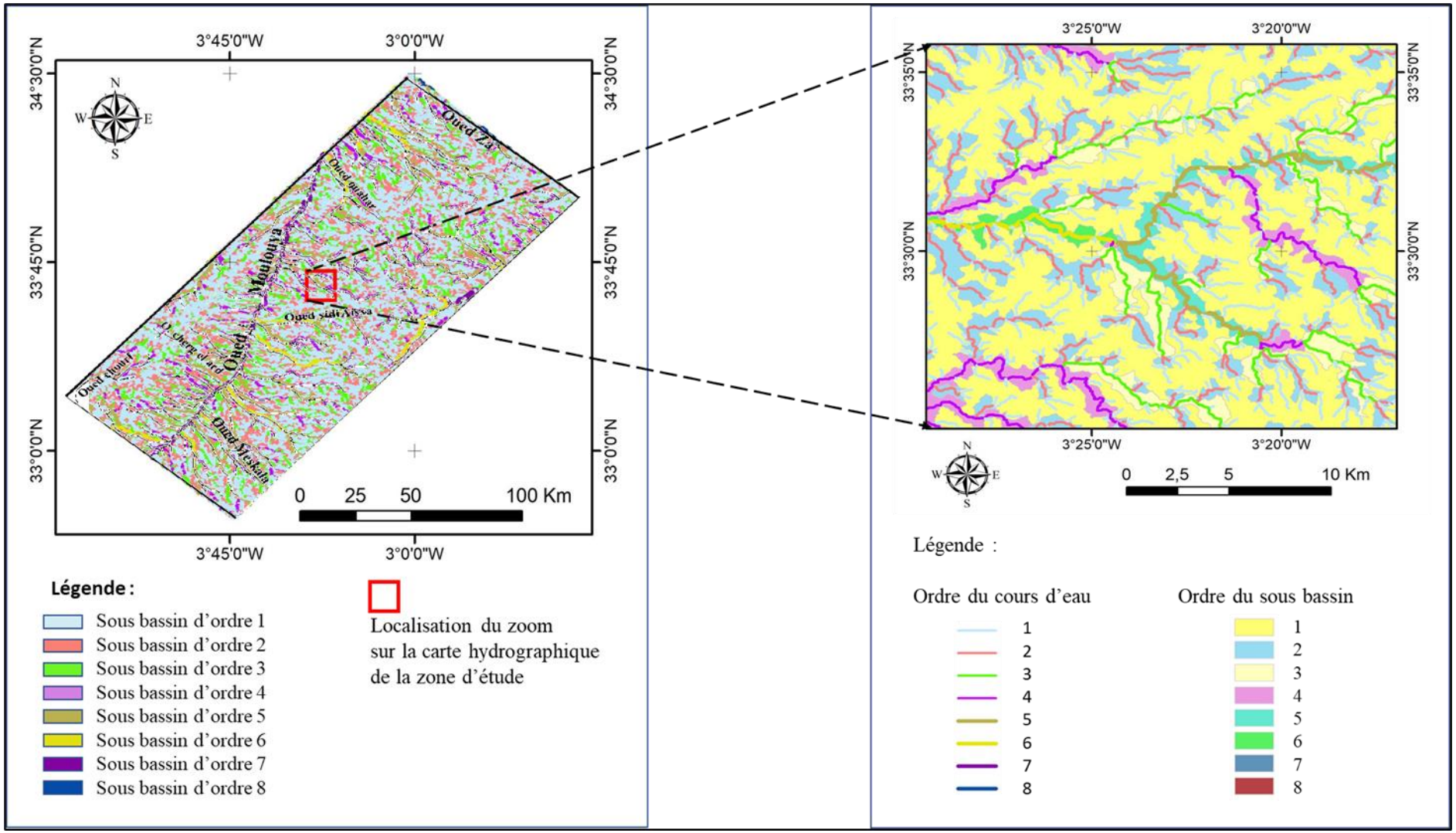


Figure 44 : Classification des sous bassins versants et leurs réseaux hydrographiques

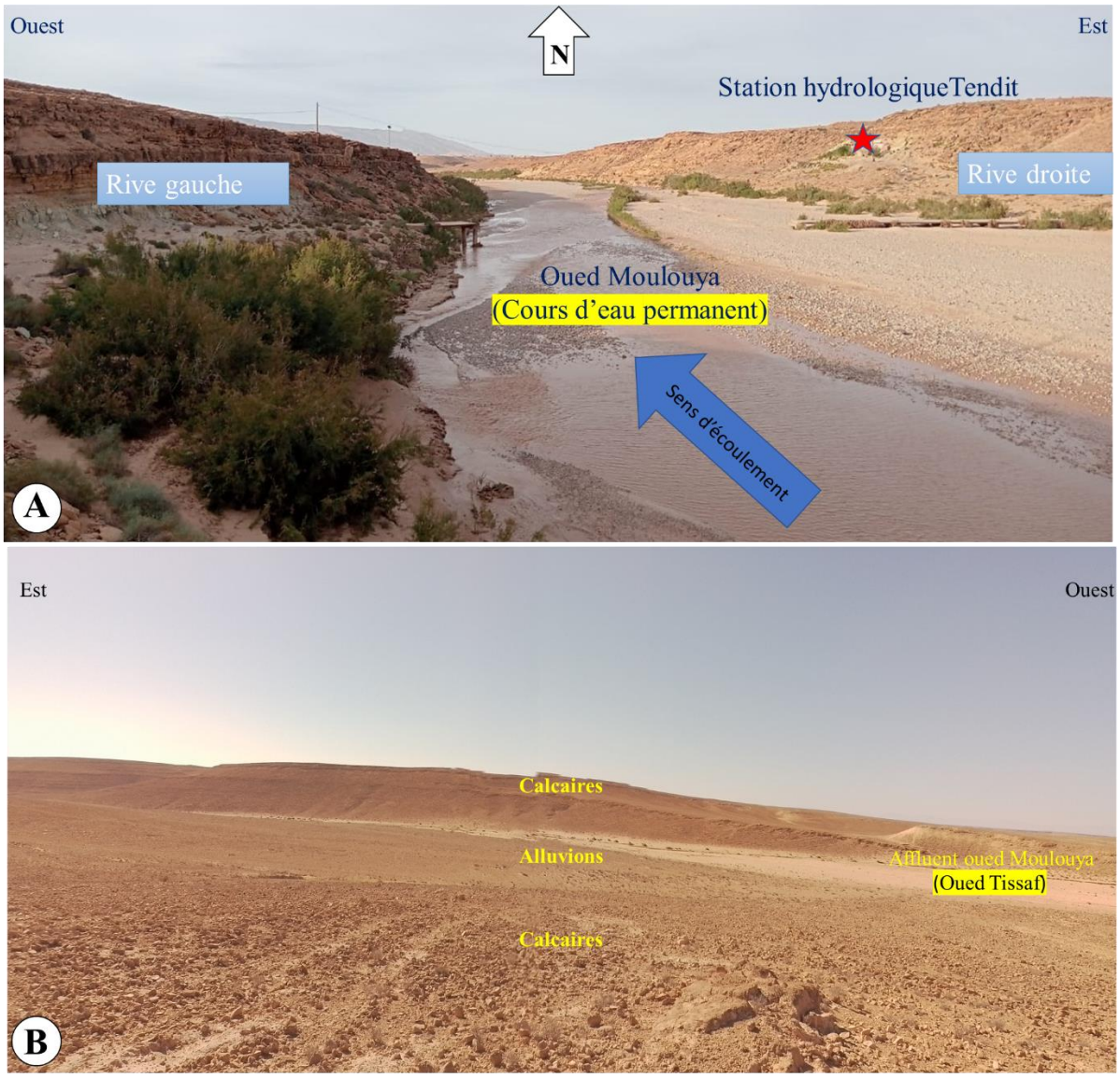


Figure 45 : Illustration des cours d'eau dans la région d'étude, (A) Oued Moulouya à cours d'eau permanent et son affluent sec au niveau de Tissaf.

2.4 La pente

La détermination de l'impact de la topographie sur l'infiltration et le ruissellement de l'eau est un aspect crucial dans l'étude et de la gestion des ressources hydriques. La topographie est souvent exprimée en termes de pourcentage de pente, une mesure dérivée du Modèle Numérique de Terrain (MNT) (Figure 37). Cette approche permet de cartographier avec précision les variations de la surface terrestre et d'évaluer leur influence sur les processus hydrologiques. Le principe fondamental qui soutient cette analyse est que la pente du terrain joue un rôle dans le ruissellement ou l'infiltration des eaux de surface selon la valeur de la pente. C'est un élément qui détermine le comportement de l'eau à la surface. La morphologie du terrain se caractérise par une vaste plaine

entourée par les reliefs du Moyen Atlas à l'ouest et les hauts plateaux à l'est. La plaine de la Moulouya, avec ses pentes douces, favorise l'infiltration de l'eau dans le sol (Figure 46).

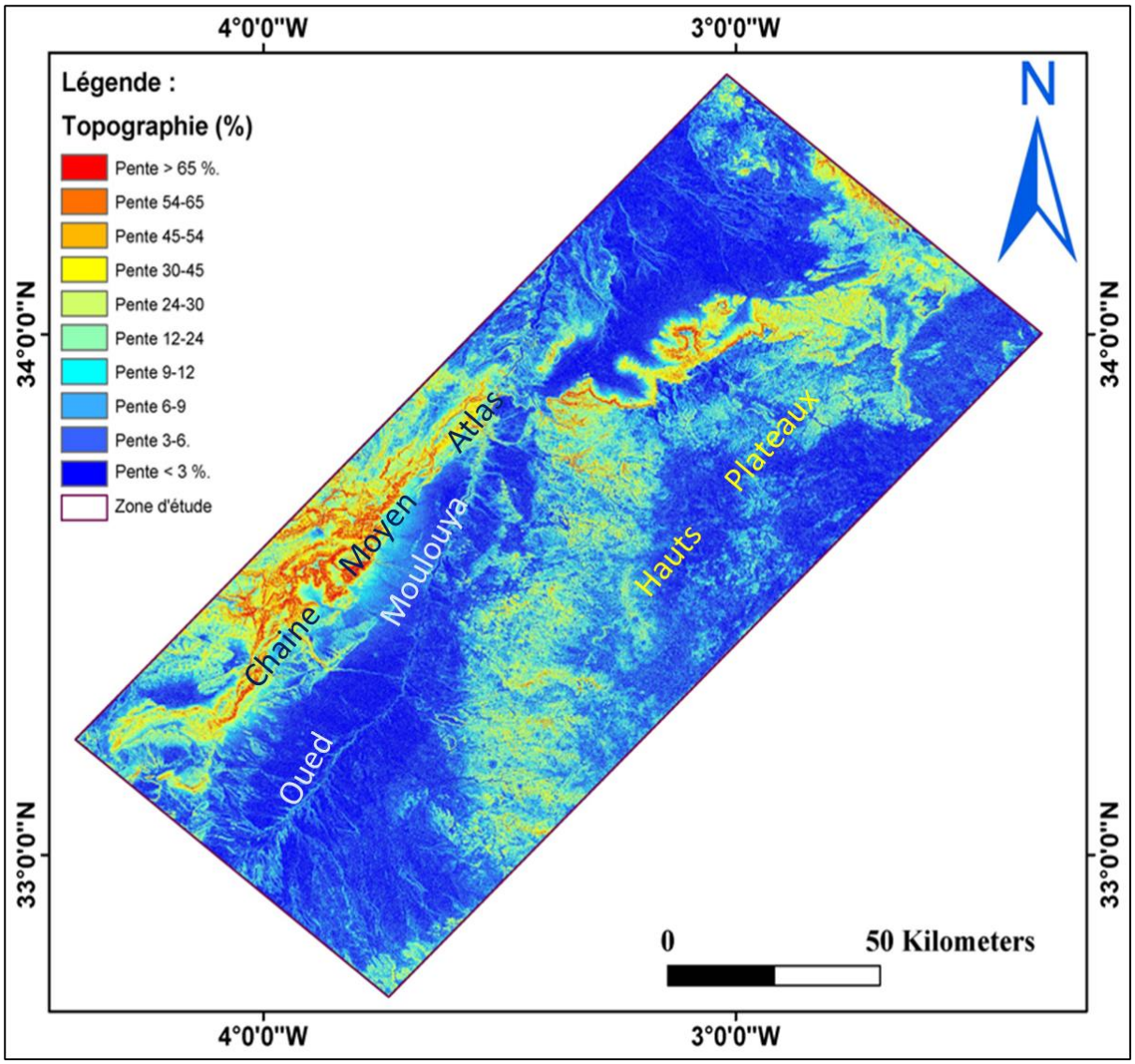


Figure 46 : Carte thématique de la topographie de la zone d'étude.

Sur le terrain, la zone d'étude est caractérisée par la présence des pentes fortes entre 45° et 90° et des pentes moyennes moins de 45° en plus de la grande partie de la plaine ou le degré ne dépasse pas 10° (Figure 47).

Figure 47 : Illustration topographique à l'Ouest de la zone d'étude.

Le tableau 7 une répartition détaillée de ces classifications, soulignant l'importance de la topographie dans la gestion durable des ressources hydriques et la planification environnementale.

Tableau 7 : Classement de la topographie suivant la charte d'Ettazarini (2007).

Paramètre	Conditions défavorables	Conditions moyennement favorables	Conditions très favorables
Topographie (%)	1.Pente > 65 %. 2. Pente 54-65. 3. Pente 45-54.	4. Pente 30-45. 5. Pente 24-30. 6. Pente 12-24. 7. Pente 9-12.	8. Pente 6-9. 9. Pente 3-6. 10. Pente < 3 %.

2.5 Pluviométrie

Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya (ABHM), ont permis de dresser une carte de répartition des pluies (Figure 48). Cette dernière Montre que les précipitations annuelles dans la zone d'étude sont souvent limitées, variant entre 200 et 400 mm/an, ce qui est bien en dessous des niveaux nécessaires pour maintenir des niveaux d'eau souterraine adéquats. Cette quantité d'eau est insuffisante pour une recharge significative des aquifères semi profonds. Les conditions arides et la faible pluviométrie contribuent à une disponibilité en eau très limitée, affectant négativement l'agriculture et les autres activités dépendantes de l'eau. En conclusion, la carte des précipitations met en évidence les défis significatifs auxquels la région est confrontée en termes de gestion des ressources en eau. Le tableau 8 montre la classification adoptée selon la charte (Ettazarini 2007).

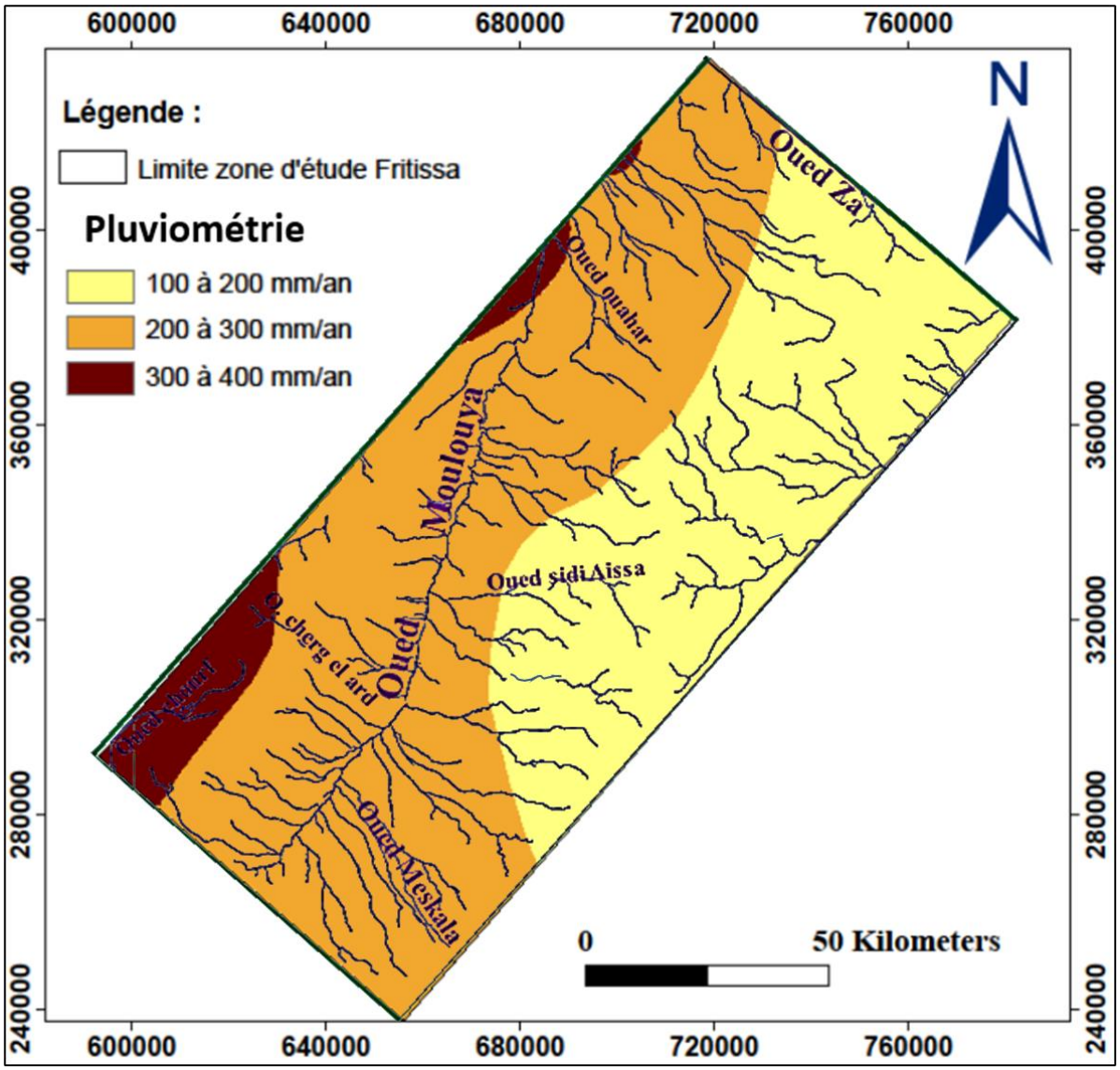


Figure 48 : Carte des isohyètes de la pluviométrie.

Tableau 8 : Classement de la pluviométrie suivant la charte d'Ettazarini (2007).

Paramètre	Conditions défavorables.	Conditions moyennement favorables	Conditions très favorables
Pluviométrie (mm/an)	1.Précipitations < 100. 2. 100 < Précipitations < 200. 3. 200 < précipitations < 300.	4. 300 < précipitations < 400. 5. 400 < précipitations < 500. 6. 500 < précipitations < 600. 7. 600 < précipitations < 700.	8. 700 < précipitations < 800. 9. 800 < précipitations < 900. 10. Précipitations > 900.

3 Traitement des données et résultats

3.1 Construction du modèle

Le traitement des données consiste en deux étapes principales. La première est la détermination du modèle IPES à partir des débits des forages, les conditions de fracturation (F), la

lithologie (L), de drainage (D), la topographie (T) et la pluviométrie (R) dans les 161 localités de forage employé dans cette recherche pour élaborer le modèle IPES. Les informations des fiches des forages utilisées proviennent des sources de données fournies par l'agence du bassin hydraulique de la Moulouya d'Oujda et par la direction générale de l'hydraulique de Rabat. Elles sont complétées par des données des cartes géologiques couvrant la zone, les images satellites, les cartes MNT et par des observations directes sur le terrain. Les données obtenues pour chaque facteur sont classées avec attribution des scores aux classes de facteurs selon la charte adoptée et présentée dans le tableau 2 (Ettazarini, 2007 ; Ettazarini et El Jakani, 2020 ; Hasibuan et al., 2021 ; Addina et al., 2024 ; Adelin et al., 2024 ; Ben Driss et al., 2024). L'attribution d'une note comprise entre 1 et 10 à chaque facteur suivant le classement de la charte, favorise une matrice des données principales (cf 6). L'application d'algorithme de pondération dynamique des paramètres (APDP) (Ettazarini et El Jakani, 2020) (cf.7) sur cette matrice a permis de calculer les coefficients α, β, γ, ε et δ des différents paramètres inclus dans le model comme le montre l'équation (1).

$$IPES = (\alpha \,.\, F) + (\beta \,.\, L) + (\gamma \,.\, D) + (\delta .\, T) + (\varepsilon .\, R) \qquad (1)$$

L'application de l'algorithme APDP permet d'obtenir plusieurs modèles IPES, parmi lesquels l'utilisateur peut choisir ceux présentant des coefficients de corrélation satisfaisants avec les débits (r> 0.7) (Ettazarini, 2007). Le tableau 9 montre des exemples de modèles obtenus par l'application de l'algorithme de pondération dynamique des paramètres avec des coefficients de corrélation r supérieur à 0,7. Le modèle choisi est celui donnant la valeur maximale possible du coefficient de corrélation.

Tableau 9 : Exemples de modèles (IPES161) et leurs coefficients de corrélation respectifs.

Expression du modèle $IPES_{161}$	Coefficient de corrélation correspondant
10.75 F + 5.10 L + 4.75 D + 0.35 T + 0.60 R	070
14.60 F + 4.60 L + 2.30 D + 1.20 T + 1.70 R	0.72
07.30 F + 3.70 L + 1.50 D + 0.75 T + 1.80 R	0.71
09.63 F + 2.30 L + 1.15 D + 0.63 T + 1.20 R	0.72
09.30 F + 2.00 L + 1.50 D + 0.50 T + 1.30 R	**0.73**

Le modèle adopté est ainsi exprimé par l'équation (2) :

$$IPES_{161} = 09.30\ F + 2.00\ L + 1.50\ D + 0.50\ T + 1.30\ R \quad (2)$$

Où F : fracturation, L : lithologie, D : drainage, T : topographie, R : pluviométrie

3.2 Elaboration de la carte $IPES_{161}$

La deuxième phase consiste à élaborer des cartes thématiques des facteurs, classés selon la charte adoptée, puis à appliquer le modèle IPES calculé et adopté pour générer la carte d'indice du potentiel en eau souterrains ($IPES_{161}$) pour la zone d'étude.

3.2.1 Cartes thématiques des différents facteurs

3.2.1.1 Fracturation

La fracturation met en évidence les zones où les roches sont fissurées, facilitant ainsi l'infiltration et le stockage de l'eau. Les zones présentant une forte fracturation sont considérées comme ayant un potentiel élevé pour les rendements en eau souterraine. Les zones ayant des conditions défavorables couvrent environ 71,06 % de la zone d'étude, tandis que les zones présentant des conditions moyennement favorables sont classées de 4 à 7, occupant 12,46 % de la superficie de la région (Tableau 10). Enfin, les zones avec des conditions de fracturations très favorables représentent 16,46 % du territoire avec une notation de 8 à 10.

Tableau 10 : Pourcentage des conditions des paramètres d'IPES161.

Paramètres	Conditions défavorables	Conditions moyennement favorables	Conditions très favorables
Fracturation	71,06 %	12,46%	16,46%
Lithologie	33,51%	66,49%	0%
Drainage	13,40%	82,66%	3,64%
Pente	3,36%	31,90%	64,76%
Pluie	89,26%	10,74%	0%

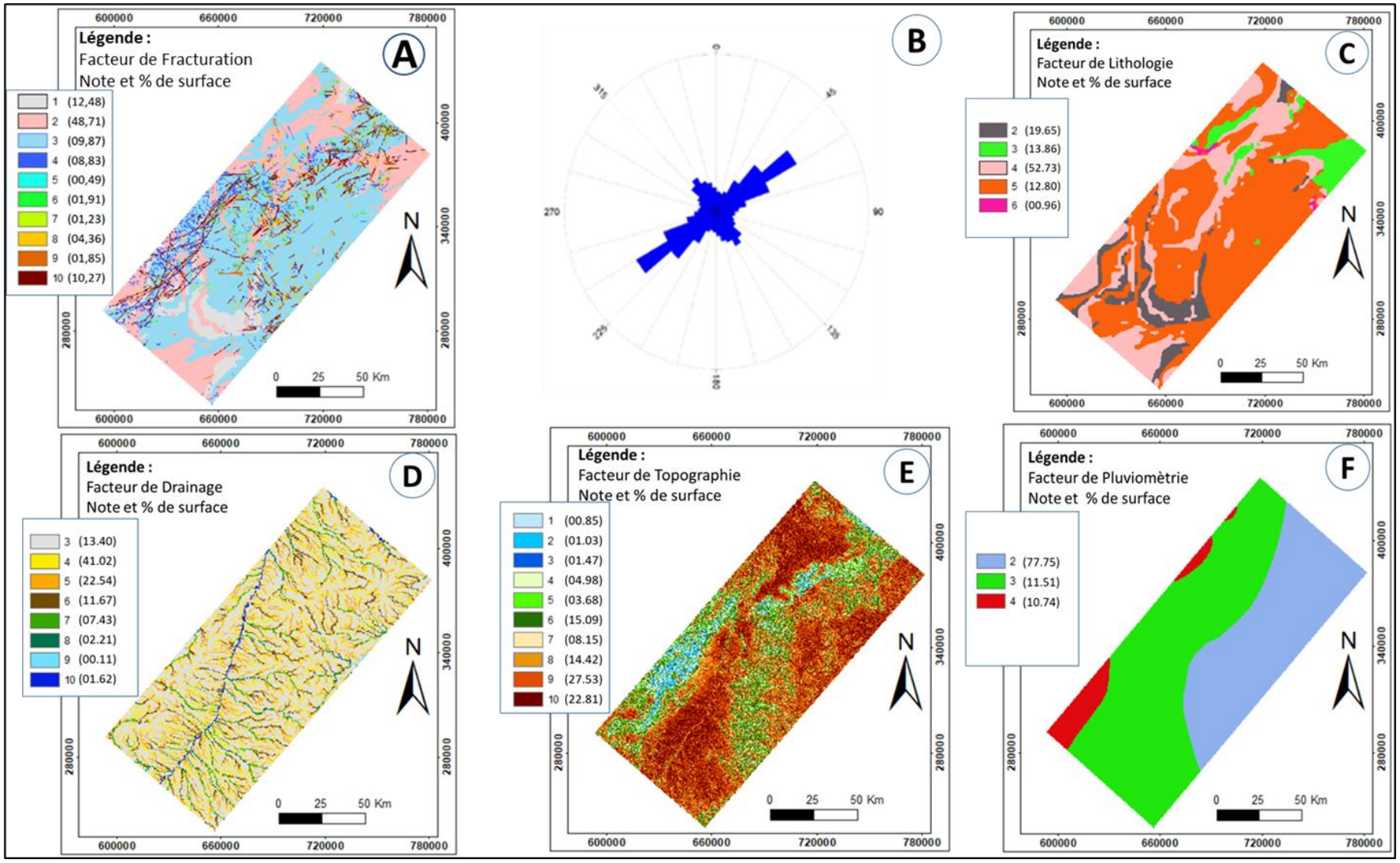


Figure 49 : Cartes thématiques des paramètres de la zone d'étude, (A) : Fracturation, (B) : Rosace de fracturation, (C) : lithologie, (D) : drainage, (E) : topographie et (F) : pluviométrie,

3.2.1.2 Lithologie

La lithologie illustre la répartition des divers types de formations géologiques de l'aquifère semi-profond dans la zone d'étude, Les roches ayant des conditions défavorables représentent 33,51 % de la superficie de la région, tandis que celles à conditions moyennement favorables en occupent 66,49 %, Aucune zone à conditions très favorables n'a été identifiée, ce qui semble lié à la faible porosité et perméabilité des roches, limitant ainsi la circulation et le stockage de l'eau, L'attribution de la notation lithologique est limitée aux notes 2 à 6, avec un manque de conditions très favorables selon le modèle IPES (Tableau 10),

3.2.1.3 Drainage

La carte de drainage montre les systèmes de rivières et de ruisseaux qui participent à la recharge des aquifères, Les zones ayant des conditions défavorables, notées de 1 à 3, représentent 13, 10 % de la surface totale, tandis que les zones à conditions moyennement favorables, avec un classement de 4 à 7, occupent 82, 66 %, En revanche, les zones très favorables ne représentent que 3, 64 % avec une note de 8 à 10 selon la charte (Tableau 10),

3.2.1.4 Pente

La carte topographique présente les variations du relief dans la région, Les pentes ont classées en 10 classes, avec une note allant de 1 à 3, Les zones, classées à conditions défavorables, n'occupent que 3,36 % de la surface de la zone, alors que celles ayant une note comprise entre 4 et 7, dans des conditions moyennement favorables, occupent 31,90 % de la superficie de la zone, Les zones à faibles pentes prédominent dans la région d'étude et couvrent 64,76 % de la région pour une note de 8 à 10 (Tableau 10), ce qui indique que les zones avec des pentes douces peuvent favoriser l'infiltration de l'eau,

3.2.1.5 Pluviométrie

Les conditions sèches montrent une pluviométrie à un niveau défavorable et concernent 89, 26% de la surface de la région pour un indice des précipitations se situant entre 100 et 300 mm/an, Les zones à conditions moyennement favorables couvrent 10,74% pour une note de 4 selon la charte tandis que les conditions très favorables ne sont pas présentes dans la région (Tableau 10),

3.2.2 Carte de l'indice du potentiel des eaux souterraines

La carte de l'indice du potentiel des eaux souterraines ($IPES_{161}$) est obtenue en intégrant les cartes thématiques des facteurs de fracturation, lithologie, drainage, topographie et pluviométrie selon le modèle de l'équation 2, La figure 50 montre la distribution des valeurs calculées de l'indice du potentiel des eaux souterraines ($IPES_{161}$) en fonction des débits pour les 161 points d'observation, Le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,73,

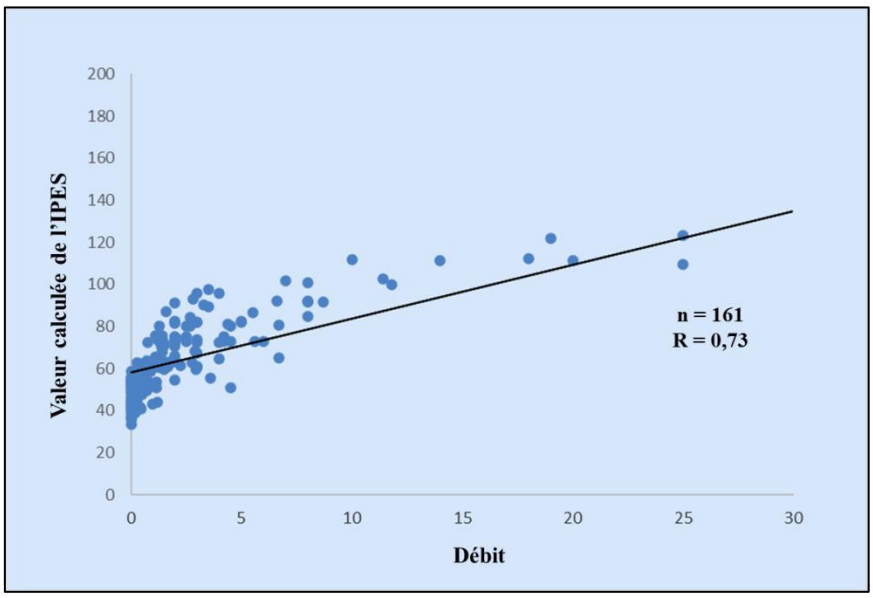


Figure 50 : Evolution des rendements des eaux souterraines par rapport aux valeurs calculées (IPES161), en utilisant le modèle présentant le coefficient de corrélation le plus élevé (r = 0,73),

Le modèle présentant le coefficient de corrélation le plus élevé entre les conditions de terrain et les rendements en eau dans les points de forage est retenu, L'élaboration de la carte (IPES 161) est réalisée à l'aide de l'outil d'algèbre matricielle du logiciel ArcGIS, Le résultat est présenté dans la figure 51 montrant la distribution géographique des valeurs calculées, qui sont comprises entre 21 et 127 et sont classées en cinq intervalles égaux, Les zones à potentiel « très élevé » et « élevé » représentent respectivement 0,16 % et 3,48 % de la surface étudiée, Ces zones se caractérisent par des roches perméables et semi-perméables fracturées et affectées par des plans de fractures longs et interconnectés, Les zones de potentialité moyenne se limitent à 5,78% de la surface étudiée, où les roches semi-perméables à perméables sont affectées par des fractures locales fréquentes, La zone la plus large, représentant 60,29% de la surface totale, est de faible potentialité, La zone restante couvre 30,28 % de la région d'intérêt, mais son potentiel est très faible, en raison de conditions défavorables par rapport à la plupart des facteurs, La carte IPES161 correspond à la probabilité de succès du forage, plus les valeurs IPES161 sont élevées, plus il est probable que le point de forage soit positif, Cette carte permet donc de localiser les futurs points de forage qui devraient être favorables à l'exploitation des eaux souterraines avec une forte probabilité de réussite,

3.2.3 Evaluation de la précision de la carte du modèle $IPES_{161}$

L'évaluation de la précision est une étape primordiale pour la validation de la carte $IPES_{161}$ réalisée, Les rendements en eau de dix-huit points de forage sont sélectionnés de manière aléatoire et ne sont pas pris en compte dans le modèle numérique élaboré dans la première partie du traitement des données, Ils sont utilisés pour la validation de la carte $IPES_{161}$, En utilisant l'outil « Extraire des valeurs vers des points » sous l'environnement ArcGIS, les valeurs $IPES_{161}$ de la carte sont comparées aux rendements des points de validation, Le graphique résultant présenté (Figure 52) montre un coefficient de corrélation significatif entre les deux variables (r = 0,71), Selon les études précédentes relatives à la cartographie IPES (Ettazarini, 2007 ; Ettazarini et El Jakani, 2020), la carte ($IPES_{161}$), un coefficient de corrélation supérieur à 0,7 est considéré acceptable,

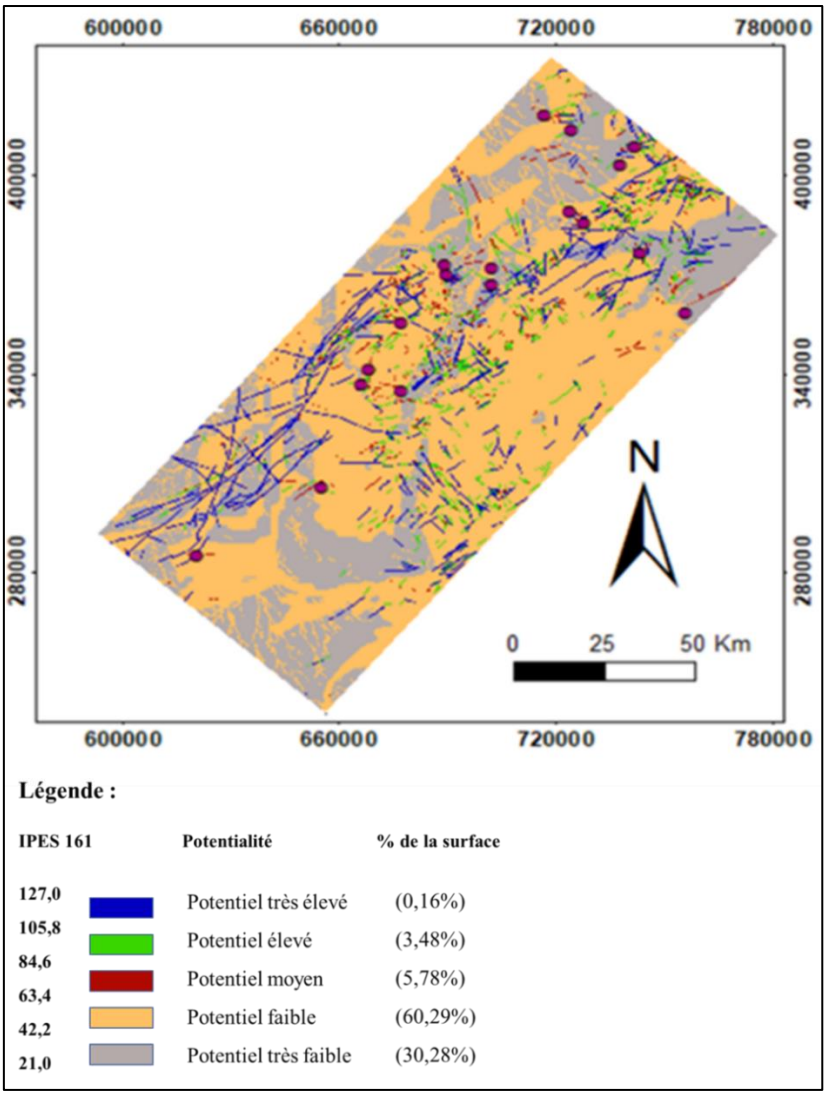


Figure 51 : Carte des valeurs d'IPES161 calculées avec la surface occupée dans la zone d'étude,

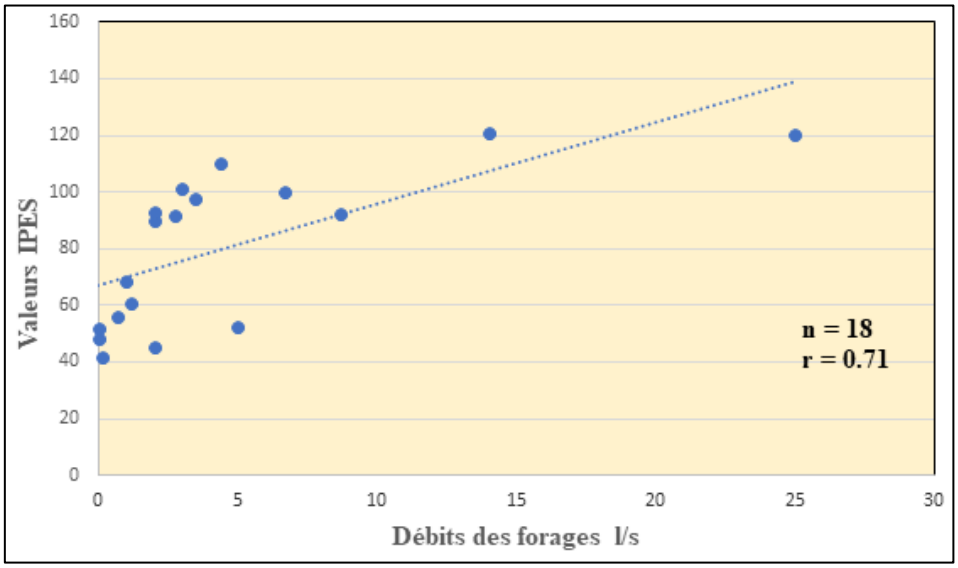


Figure 52 : Evolution des rendements des eaux souterraines par rapport aux valeurs calculées des forages de validation, en utilisant le modèle présentant le coefficient de corrélation,

4 Conclusion

L'application de la méthode de l'indice de potentiel IPES a permis d'évaluer le potentiel des eaux souterraines dans des aquifères hétérogènes, Cette technique est basée sur la cartographie de la variabilité de cinq facteurs, considérés comme des variables contrôlant la formation des aquifères, Les données sont, dans un premier temps, rassemblées et classées, puis traitées statistiquement par l'algorithme de pondération dynamique des paramètres (APDP) pour fournir un modèle numérique complet qui relie les facteurs prédictifs à une variable observée correspondant aux rendements en eau, une réalité de terrain de la disponibilité de l'eau, Dans un deuxième temps, le modèle numérique est appliqué sur des cartes thématiques relatives aux cinq facteurs, Le résultat est une carte ($IPES_{161}$) présentant un ensemble de données matricielles prédictives,

Les principaux résultats déduits de la carte ($IPES_{161}$) et du modèle à la base de sa construction sont le calcul des poids relatifs des facteurs agissant sur la disponibilité en eau et la cartographie de la répartition potentielle des eaux souterraines, En fait, les modèles obtenus avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,7 montrent l'importance de l'effet de fracturation par rapport à d'autres facteurs, La lithologie est le deuxième facteur déterminant la disponibilité de l'eau, En troisième ordre viennent les facteurs de drainage, de topographie et de pluviométrie, La carte ($IPES_{161}$) a révélé que les zones très favorables et favorables sont limitées à de petites zones représentant seulement 3,64% de la zone totale d'étude, alors que la majeure partie des terres (90,57%) présente des conditions de faible et très faible potentiel, Les conditions de potentialité moyenne caractérisent le reste de la zone d'intérêt, représentant 5,78%, La variabilité des facteurs de drainage, de topographie et de pluviométrie aux points d'observation est limitée, ce qui rend difficile une estimation précise de l'impact réel de ces facteurs, La répartition spatiale irrégulière des points de forage constitue une contrainte récurrente, tant dans la présente étude que dans les précédentes, Par ailleurs, il est important de noter que la carte ($IPES_{161}$) est un outil de prévision des zones favorables à l'implantation de futurs points de forage pour la recherche et l'exploitation des eaux souterraines, Il est donc recommandé de réaliser des études approfondies dans les localités proposées pour les futurs points de forage, afin de clarifier les conditions de fracturation et de lithologie, et éventuellement de drainage, comme principales variables agissant sur la probabilité de succès du forage,

Cependant, cette méthode présente certaines limites, notamment en ce qui concerne la variabilité naturelle des conditions de terrain difficile à suivre en profondeur dans le modèle et les variations saisonnières des débits dans les puits, Malgré cela, elle constitue un outil précieux

pour la gestion des ressources en eau, et son application peut être étendue à d'autres zones présentant des caractéristiques similaires, Les perspectives d'amélioration du modèle incluent l'intégration de nouveaux paramètres comme la qualité de l'eau, la dynamique de la nappe et les variations climatiques à long terme, En effet, l'utilisation des données de télédétection doivent être à jour et d'une résolution convenable pour pouvoir appliquer la méthode d'IPES, De plus, l'exploitation des résultats de la cartographie d'IPES nécessite une méthodologie pour déterminer les zones prioritaires à l'usage et faire le choix parmi les zones favorables, L'application combinée d'IPES et de l'AHP peut servir pour déterminer ces zones prioritaires,

Chapitre 4

Caractérisation des propriétés lithologiques et hydrodynamiques du système aquifère profond

Chapitre 4 : Caractérisation des propriétés lithologiques et hydrodynamiques du système aquifère profond

1 Introduction

Les ressources renouvelables sont limitées, en particulier dans les régions arides (FAO, 2013), Cette pénurie d'eau est devenue un problème critique qui pousse à chercher et exploiter des ressources en eau de plus en plus profondes, En effet, la disponibilité de l'eau potable destinée à couvrir les besoins alimentaires de la population a été critiquement réduite depuis 2015 suite à sécheresse qui a touché le Maroc (DRPE, 2023), C'est le cas ainsi de la zone de la Moulouya où plusieurs études antérieures prouvent une diminution progressive des ressources en eau, dans un contexte de changement climatique couplé avec une augmentation démographique (Combe,, Simonot,,1971 ; Snoussi et al,, 2002 ; Milano, 2009 ; Singla, 2009), La situation où les eaux de surface et des aquifères superficiels ne sont plus suffisantes pour répondre aux besoins de la population, demande de penser à des solutions structurelles et adaptées au contexte local, Le recours aux nappes profondes est demandé dans ces conditions afin de maintenir une disponibilité durable des eaux souterraines (Waspodo et al,, 2020 ; Agha, et al,, 2021), La problématique qui surgit est comment assurer des ressources en eau suffisantes pour les différentes activités humaines, et en même temps, assurer la durabilité de la ressource naturelle, La caractérisation géologique des aquifères profonds est devenue possible avec le développement des technologies de diagraphie disponible (Bourgeois, 1976 ; Hsieh et al, 2005 ; Hacini, 2006),

En effet les données de la diagraphie permettent la détermination de la nature lithologique des aquifères, leur étendue ainsi que d'autres caractères pouvant aider à estimer les réserves en eau, Cependant la détermination effective des caractères hydrodynamiques et l'appréciation de la perméabilité de l'aquifère et la quantité d'eau exploitable par ouvrage, sans menacer la durabilité de la ressource naturelle en eau, reste une tâche importante qui nécessite des tests et essais de pompage (De Lasme et al, 2012 ; Gutierrez et Dewandel, 2013 ; Al-Hayali et al 2021), L'objectif de cette étude est de déterminer les caractéristiques lithologiques et hydrodynamiques des aquifères profonds dans la zone de Fritissa, couvrant une grande surface de la moyenne Moulouya et la partie amont de la basse Moulouya, Les informations obtenues, basées sur les données de diagraphies et des essais de pompages, aideront à déterminer les conditions d'exploitation pouvant assurer la durabilité de la ressource en eau, La conduite des

opérations de diagraphie et des tests de pompage est essentielle pour établir les caractéristiques hydrodynamiques et la transmissivité du système aquifère profond dans la zone de Fritissa, Ces opérations ont constitué la méthode adoptée pour l'étude des aquifères profonds dans les trois localités : Bouyaakoubate (F1), Dkikira (F2) et Fritissa (F3), L'évaluation précise des paramètres hydrodynamiques de ces aquifères est d'une importance vitale pour la gestion et l'exploitation durables de ces ressources naturelles, Les tests de diagraphie ont été réalisés dans les forages des localités de Bouyaakoubate (F1) et Dkikira (F2), tandis que les essais de pompages ont été effectués dans les trois localités,

2 Sources des données de diagraphie et de pompage

Cette étude repose sur des données de terrain, complétées par celles fournies par l'agence du bassin hydraulique de la Moulouya (ABHMO) et à la direction de la recherche et de la planification de l'eau (DRPE), Elle est également basée sur l'exploitation des cartes géologiques du Maroc à l'échelle 1/1 000 000 et celle de Debdou 1/100 000, ainsi que l'utilisation de certains logiciels, notamment OUAIP v,2 et GES For, Le premier permet de déterminer automatiquement le débit critique exploitable des aquifères à partir des données disponibles, GES For quant à lui, permet d'établir la colonne lithologique du forage et la gestion des informations techniques associées, Le logiciel ArcGIS 10,8 est utilisé pour la cartographie des données

L'approche adoptée dans cette étude consiste en deux principales étapes La première consiste à l'application des techniques géophysiques de diagraphie au cours des processus de foration et la deuxième est réservée aux essais de pompage,

2.1 Tests de diagraphie

Les données diagraphiques du forage de Bouyaakoubate (F1) sont obtenues de l'agence du bassin hydraulique de la Moulouya (ABHM), Alors que les données diagraphiques du forage de Dkikira (F2) sont fournies par la direction générale de l'hydraulique de Rabat (DRPE),

Les opérations de diagraphies électriques ont effectuées à la fin de la phase de foration et avant la descente de tubage de protection dans les forages, Elles ont été réalisées à l'aide du dispositif « single-point SPR », équipé de sondes permettant la mesure de gamma-ray (GR),

la polarisation spontanée (PS), la résistivité (R) en termes de résistivité normale (N16″), résistivité normale (N64″) et résistance latérale (L48″) et le calibre (Ø),

Le rayonnement gamma-ray (GR) est une mesure de la radioactivité naturelle existant dans certaines roches, Il permet la distinction entre des catégories lithologiques radioactives comme les argiles et les marnes considérées imperméables, de point de vue hydrogéologique, et les formations non radioactives, cas des sables, dolomies et calcaires dotés d'une perméabilité significative,

La résistivité est utilisée pour analyser l'extension de l'aquifère le long du forage, La résistivité de la boue conductrice employée dans le forage (N16″) et la résistivité normale (N64″) au courant propagé dans les roches sont comparées à la résistivité intermédiaire latérale (L48″), Au niveau des aquifères, L48″ est influencée par N64″ et ont des valeurs proches, Dans le cas échéant L48″ s'approche de N16″ indiquant l'influence de la boue conductrice,

La polarisation spontanée (SP) causée par des forces électromotrices d'origine électrochimique est une variable dont le changement dépend de plusieurs facteurs tels que la lithologie, le taux d'humidité et la circulation des eaux souterraines, Le suivi du profil de la SP permet de localiser les changements brutaux indiquant le changement de la lithologie ou des conditions de l'aquifère,

Le calibre est la mesure du diamètre du forage lors de la foration, Et dépend des conditions de la roche traversée, Un changement brutal dans le diamètre du forage indique un niveau fracturé ou karstifié (Serra,, 1984 ; Serra,, 2008 ; Liu,, 2017),

2.2 Tests d'essais de pompage

La réalisation des essais de pompage a effectué avec une pompe capable de pomper un débit de 300 m^3/h avec une hauteur manométrique totale (HMT) de 100 m installée dans le forage et connectée à la conduite de refoulement, Les essais ont été réalisés dans trois forages : les deux forages, situés à Bouyaakoubate (F1) et Dkikira (F2), où des tests de diagraphie ont été réalisés, et un troisième forage à Fritissa (F3), captant le même aquifère au sud de la zone d'étude (Figure 53), réalisé avec tubage dans sa partie supérieure et sans tests diagraphiques,

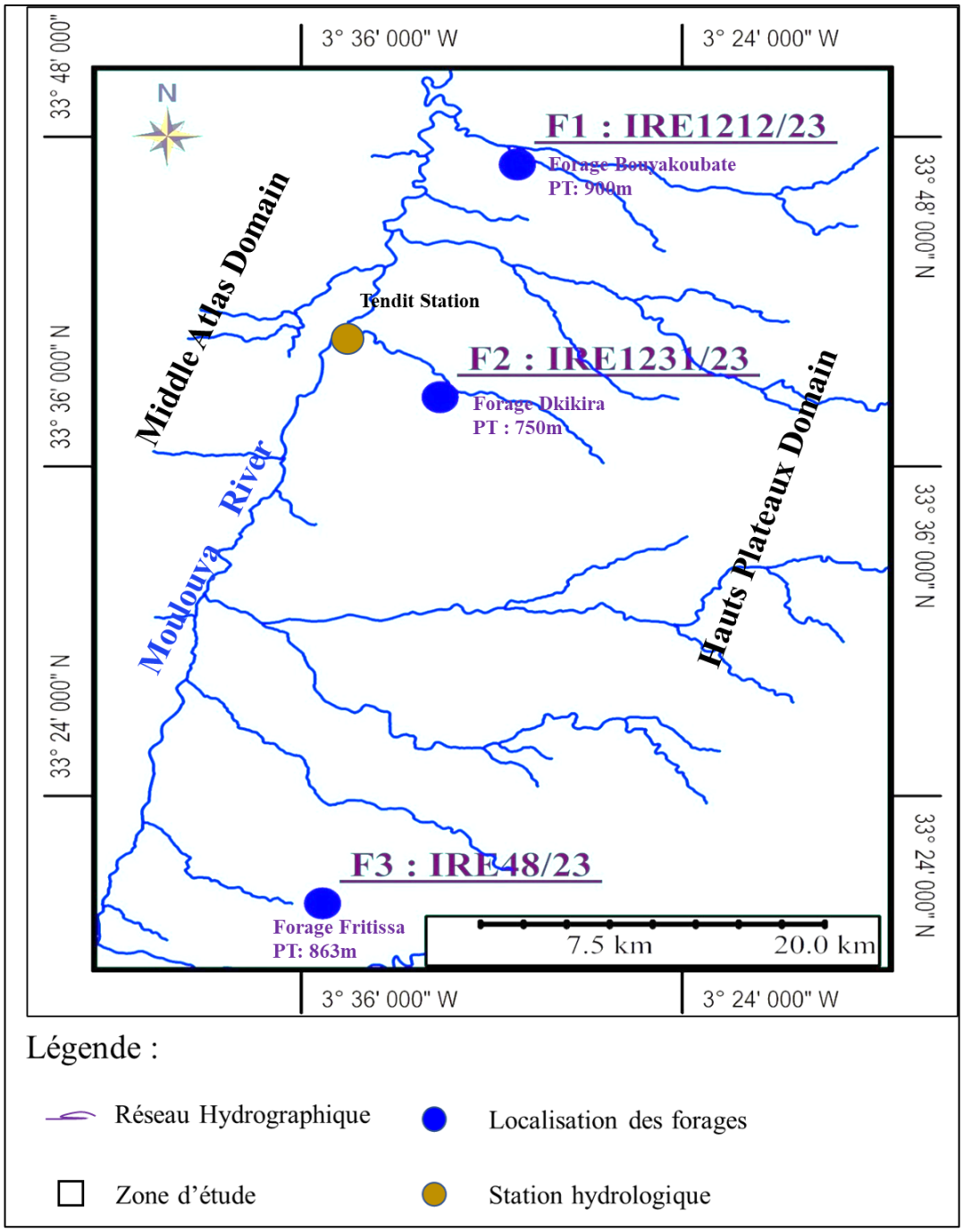


Figure 53 : Zone de situation des ouvrages de diagraphie et de pompage,

Le suivi du rabattement du niveau d'eau, à l'aide d'une sonde électrique, a été effectué en mesurant simultanément le débit et le temps de la descente (t) et de la remontée (t') d'eau, Pour les essais par paliers, le suivi de l'évolution des rabattements dans les forages en fonction des débits contrôlés a permis de déterminer graphiquement des débits critiques depuis les courbes d'évolution, Les débits critiques ainsi définis sont adoptés pour les essais de pompage de longue durée, Pour les essais de longue durée les données de débits, de rabattement et du

temps de descente et de montée d'eau sont utilisées pour le calcul du débit spécifique, la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement et le débit d'exploitation,

Le débit spécifique traduit la productivité intrinsèque de l'aquifère, Il est le quotient du débit pompé et du rabattement mesuré :

$$Qsp = \frac{Q}{s} \qquad \text{Eq, (5)}$$

- Q : débit de pompage (m^3/h),
- s : rabattement induit par le pompage (m),

La tansmissivité de l'aquifère est déterminable graphiquement, depuis le graphe de rabattement versus débit, à travers l'approximation logarithmique proposée par (Cooper et Jacob,,1946),

$$T = 0{,}183 Q \Delta s \qquad \text{Eq, (6)}$$

Avec : T : transmissivité exprimée en m2/s,
Q : débit de pompage du premier palier en m^3/s,
Δs : variation du rabattement (m) sur un cycle logarithmique du temps,

Le coefficient d'emmagasinement (Todd, 1980)

$$S = \gamma_w \sum_{i=1}^{N} (m_{vi} \times h_i) \qquad \text{Eq, (7)}$$

Avec N : nombre de couches argileuses intercalaires,
ɣ : poids volumétrique de l'eau (N/m^3),
h : épaisseur de la couche intercalaire i (m),
m : coefficient de compressibilité volumétrique (m^2/N),

La perméabilité K (m/s) est la capacité d'un aquifère à laisser passer l'eau à travers une section donnée, Elle est calculée comme suit :

$$K = \kappa \frac{\rho g}{\mu} \qquad \text{Eq, (8)}$$

Avec

K : coefficient de perméabilité (conductivité hydraulique),
ĸ : perméabilité intrinsèque (m^2),
μ : viscosité cinématique du fluide (eau douce, eau salée ou pétrole),
ρ : masse volumique du fluide
g : accélération de la pesanteur,

Notons que le débit d'exploitation est déterminé à partir du débit de pompage de longue durée avec 10% de moins pour la sécurité de l'aquifère,

3 Traitement et analyse des données

La méthode utilisée dans cette recherche pour l'exploitation des eaux souterraines profondes est divisée en deux étapes : la première est une phase de prospection qui vise à définir la lithologie sur la base des données de la diagraphie, comme c'est le cas pour cas du forage F1 et F2, La deuxième phase permet d'une part, de déterminer les débits critiques à travers les tests de pompage par paliers à débit variables ; et d'autre part déterminer les débits d'exploitation durable grâce aux tests de pompage de longue durée à débit constants (Figure 54),

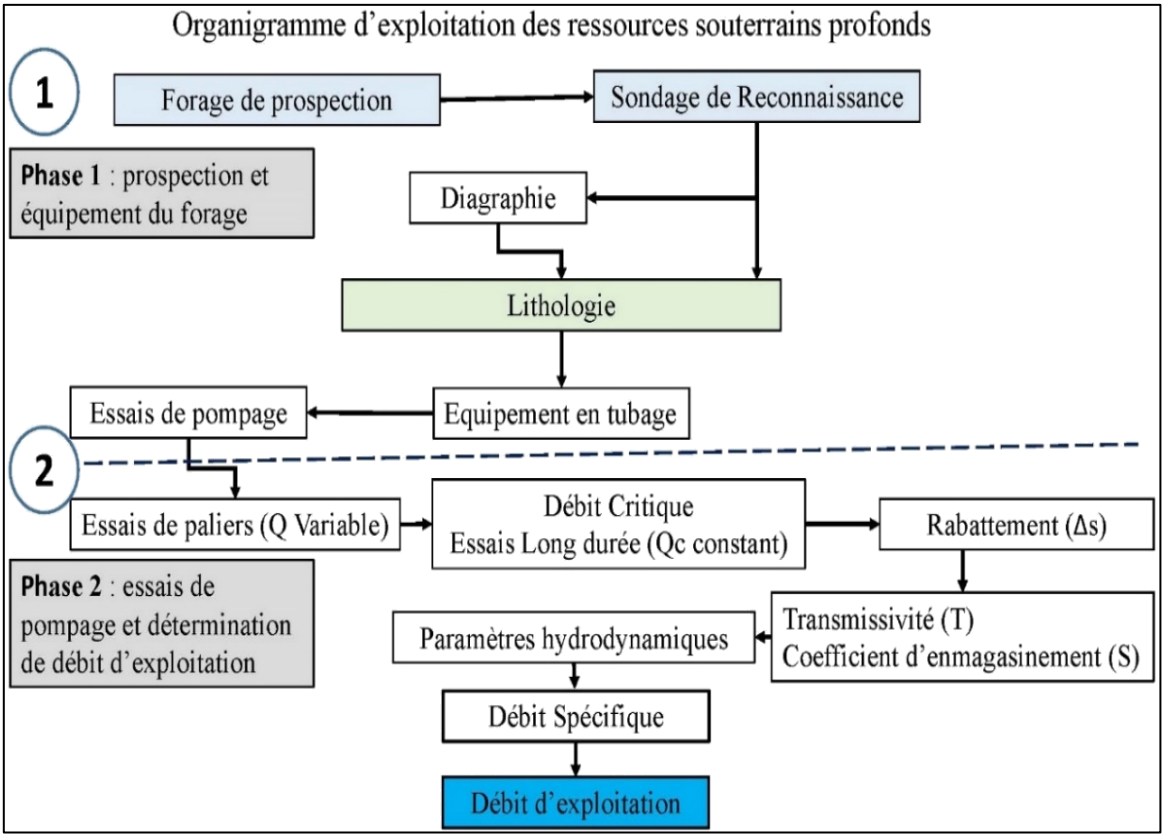


Figure 54 : Organigramme de traitement des données,

3.1 Données diagraphiques

La diagraphie électrique est réalisée dans l'aquifère profond entre 500 et 900 m pour le Forage Bouyaakoubate (F1) et entre 200 m et 550 m pour le forage Dkikira (F2) tous les deux dans un contexte carbonaté (Figure 55)

3.1.1 Forage Bouyakoubate (F1)

3.1.1.1 Gamma ray

Les valeurs de Gamma-Ray sont relativement basses et comportent deux niveaux, La tranche de Gamma-Ray allant de 10 à 18 CPS est observée entre les profondeurs 500 et 525m, tandis que la tranche de Gamma-Ray comprise entre 5 et 10CPS caractérise colonne entre les profondeurs 525 et 860 m,

3.1.1.2 Résistivité courte normale N16″ et N64″

L'enregistrement des valeurs des résistivité a signalé qu'entre les profondeurs 500 à 630m la N64″ est supérieure à la normale N16″, A partir de la profondeur 630 m jusqu'à 860 m, la courbe N16″ rejoint celle de N64″,

3.1.1.3 Résistivité latérale 48″

La résistivité latérale (Latérale 48″) fournit une image qualitative des variations de la résistance des roches le long du forage, Dans ce contexte carbonaté, la résistivité ne montre pas une grande différence dans les valeurs des formations,

3.1.1.4 Polarisation spontanée (PS)

La lecture des valeurs de ce paramètre montre une variation de -120 à -20 (mV), entre les profondeurs 500 et 585m et de valeurs sont comprises entre -50 et -40 mV avec deux chutes brusques pour -70 à 510 m et pour -60 mV à 515m, De 585 à 765 m, les valeurs de la polarisation spontanée sont marquées par une régression de -80 à -90 (mV) avec deux changements brutaux à 590 m pour une valeur de -60 mV et 600 m pour une valeur de -100 mV, De 765 à 825 m, les valeurs de la polarisation spontanée montrent une progression de -90 à -70 mV et une chute des valeurs de -90 à -120 mV entre les profondeurs 825 et 860 m,

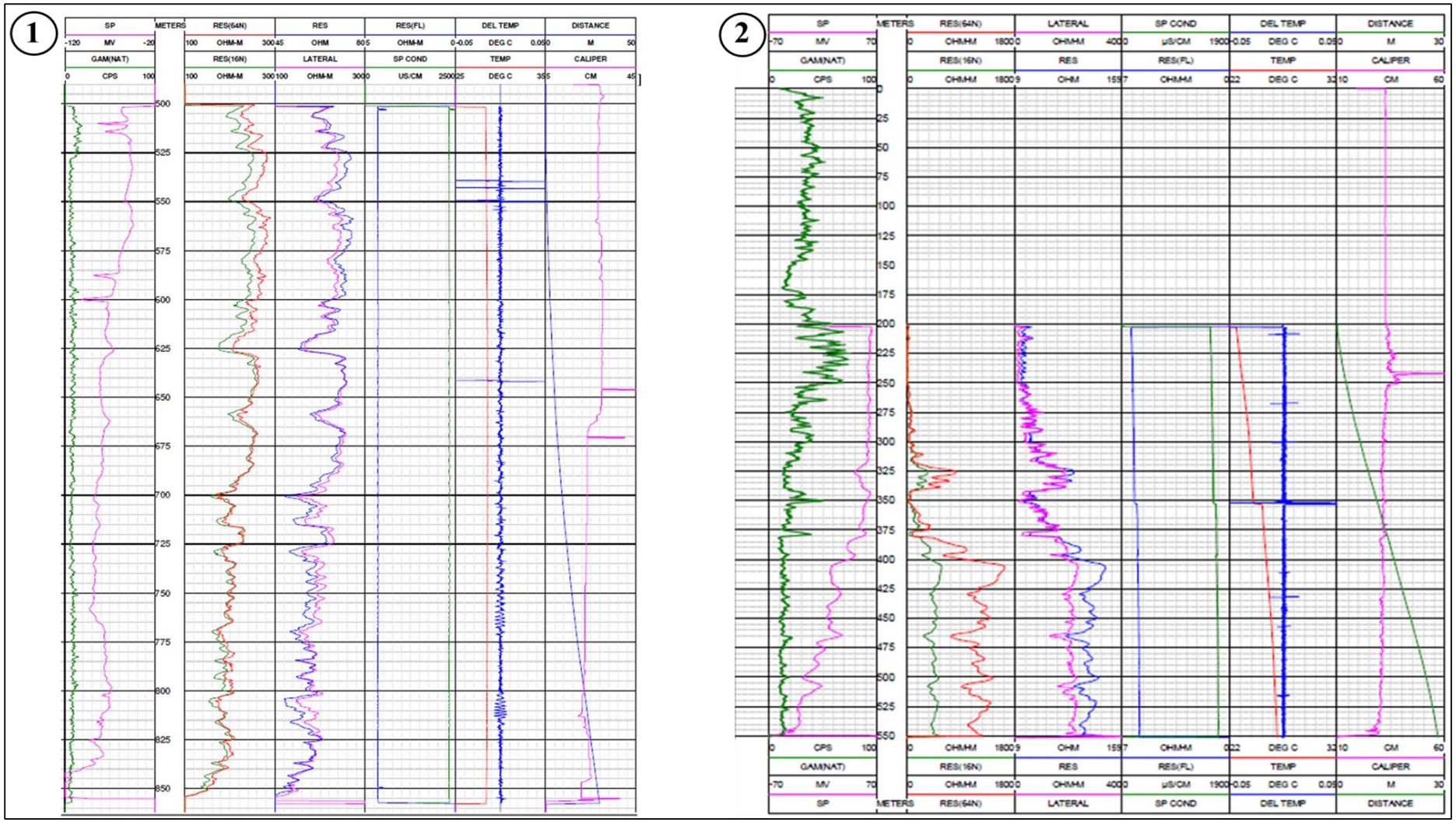


Figure 55 : Enregistrements de la diagraphie électrique, au niveau des Forages (1) : Bouyaakoubate (F1) et (2) : Dkikira (F2),

3.1.1.5 Diamètre

L'enregistrement du diamètre (caliper) a révélé une valeur de 31cm de la profondeur 500m à 670m et un diamètre de 21cm de 670m à 860 m, avec deux changements augmentations brusques des valeurs du diamètre à 645 et à 670 m de profondeur,

3.1.1.6 Coupe lithologique interprétée

La coupe lithologique du forage de Bouyaakoubate, obtenue à partir de l'interprétation des données diagraphiques, est présentée dans la figure 56, Elle montre des calcaires marneux entre 500 et 560 m, avec des passages des formations marneuses, Entre 560 à 850 m de profondeur, la lithologie et dominée par des calcaires marneux avec intercalions marneuses qui montrent deux niveaux de fracturation ou de karstification à 645 et 670 m de profondeur, c'est la tranche qui forme le réservoir de l'aquifère au niveau de ce forage, Au-delà de 850 m de profondeur, la lithologie est formée par des calcaires dolomitiques,

3.1.2 Forage Dkikira (F2)

3.1.2.1 Gamma ray

Au niveau du forage Dkikira, l'intensité du rayonnement gamma est comprise entre 10 et 90 CPS (compte par seconde), avec une valeur de 30 à 50 mV jusqu'à la profondeur de 145m, une diminution dans les valeurs de 20 à 10 mV de la profondeur 145 à 175 m pour augmenter à 40 mV entre 175 et 200 m, Entre les cotes 200 et 265 m, le rayonnement a connu des variations brutales entre 30 et 90 mV, une variation dans l'enregistrement des valeurs entre 10 et 30 mV de la profondeur 265 à 375m, alors que pour la profondeur entre 375 et 550 m, les valeurs du gamma ray montrent une régression entre 10 et 20 mV,

3.1.2.2 Résistivité courte normale N16″ et N64″

Les valeurs des résistivités électriques, la petite normale (N16″), et la grande normale (N 64″) sont comprises entre 09 et 1643 ohms-mètres (Ω m),

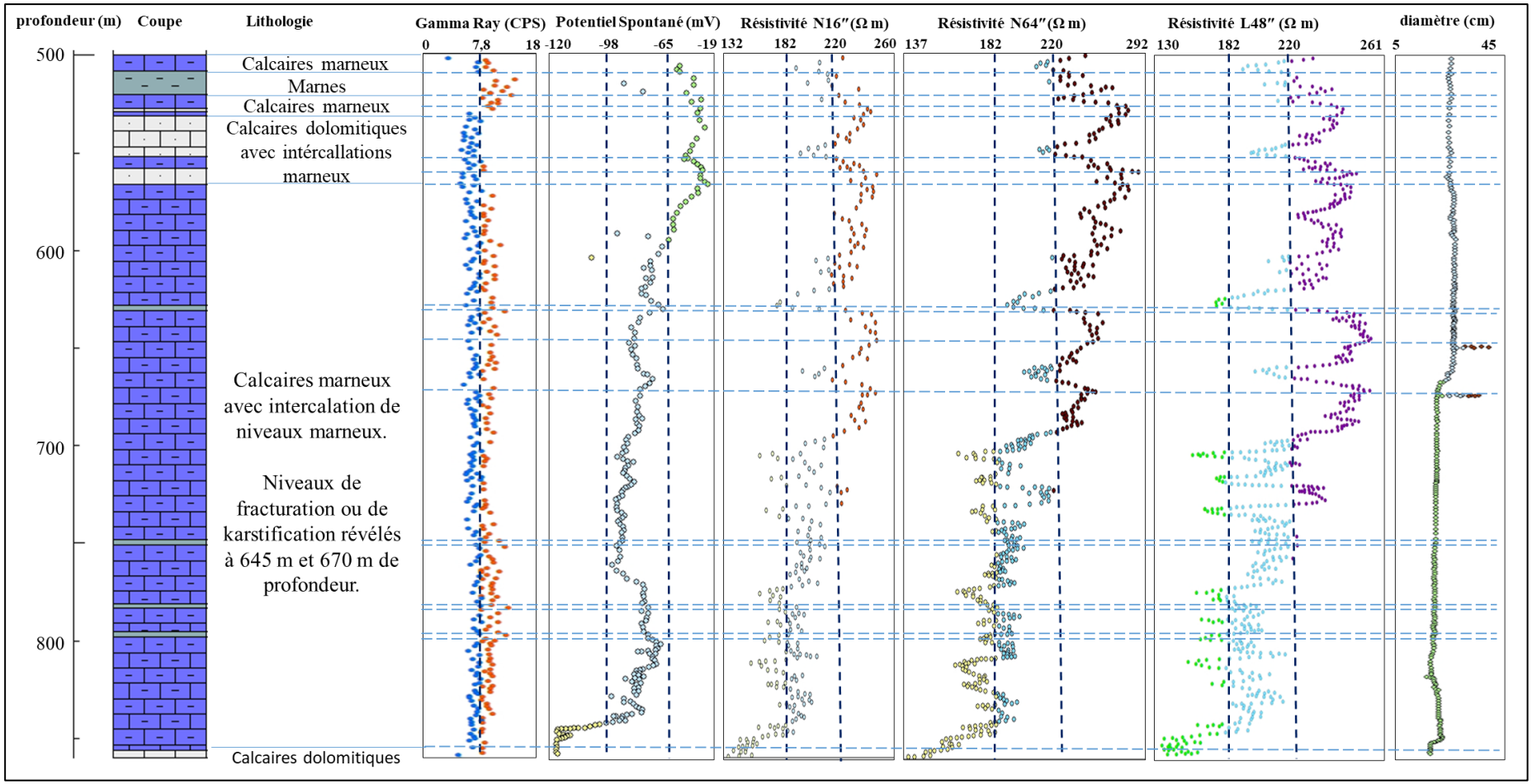


Figure 56 : Coupe lithologique synthétique du forage Bouyaakoubate (F1) d'après la diagraphie,

Le long de l'enregistrement des résistivités électriques, on distingue des formations avec des valeurs élevées entre les profondeurs 250 et 380m et entre 380 et 550 m, Des formations moins résistantes que les précédentes, ont été identifiées entre les profondeurs 0 et 145 m et entre 198 et 250m,

3.1.2.3 Résistivité latérale 48″

L'opération de la diagraphie a enregistré des valeurs de la résistivité latérale (48″), comprises aussi entre 9 et 1643 Ωm, varient parallèlement dans le même sens aux valeurs des résistivités N16″ et N64″ en fonction des formations traversées,

3.1.2.4 Polarisation spontanée

La polarisation spontanée indique une valeur de 60 mV à entre les profondeurs 200 et 315m, et des valeurs allant de 60 à 50Mv entre 315 et 400 m, avec de profondeur, Pour la profondeur entre 400 et 525m, la Polarisation spontanée est marquée par une diminution dans les valeurs enregistrées de 50 (mV) à -40 (mV), pour atteindre -20 (mV) à 550m,

3.1.2.5 Diamètre (caliper)

L'enregistrement du diamètreure a permis de suivre le développement du diamètre du trou nu de 200 à 550m et du tubage de 0 à 200m dans le forage, Cet enregistrement a révélé des variations abruptes dans le diamètre du trou entre 225 et 250m passant de 31 à plus de 60cm,

3.1.2.6 Coupe lithologique interprétée

lithologique du forage de Dkikira, présentée dans la figure 57, D'après les données de la diagraphie dans le forage Dkikira, la lithologie est dominée par des marnes de 200 à 315m avec présence d'une fracturation à la cote 240 m, On note les calcaires marneux jusqu'à 340m, un passage de marnes entre 340 et 355m, et ensuite les calcaires marneux avec intercalations marneux de 355 à 375m, pour devenir calcaires dolomitiques jusqu'à la cote de 550m qui représente la partie supérieure du réservoir profond constitue des calcaires dolomitiques depuis 360m,

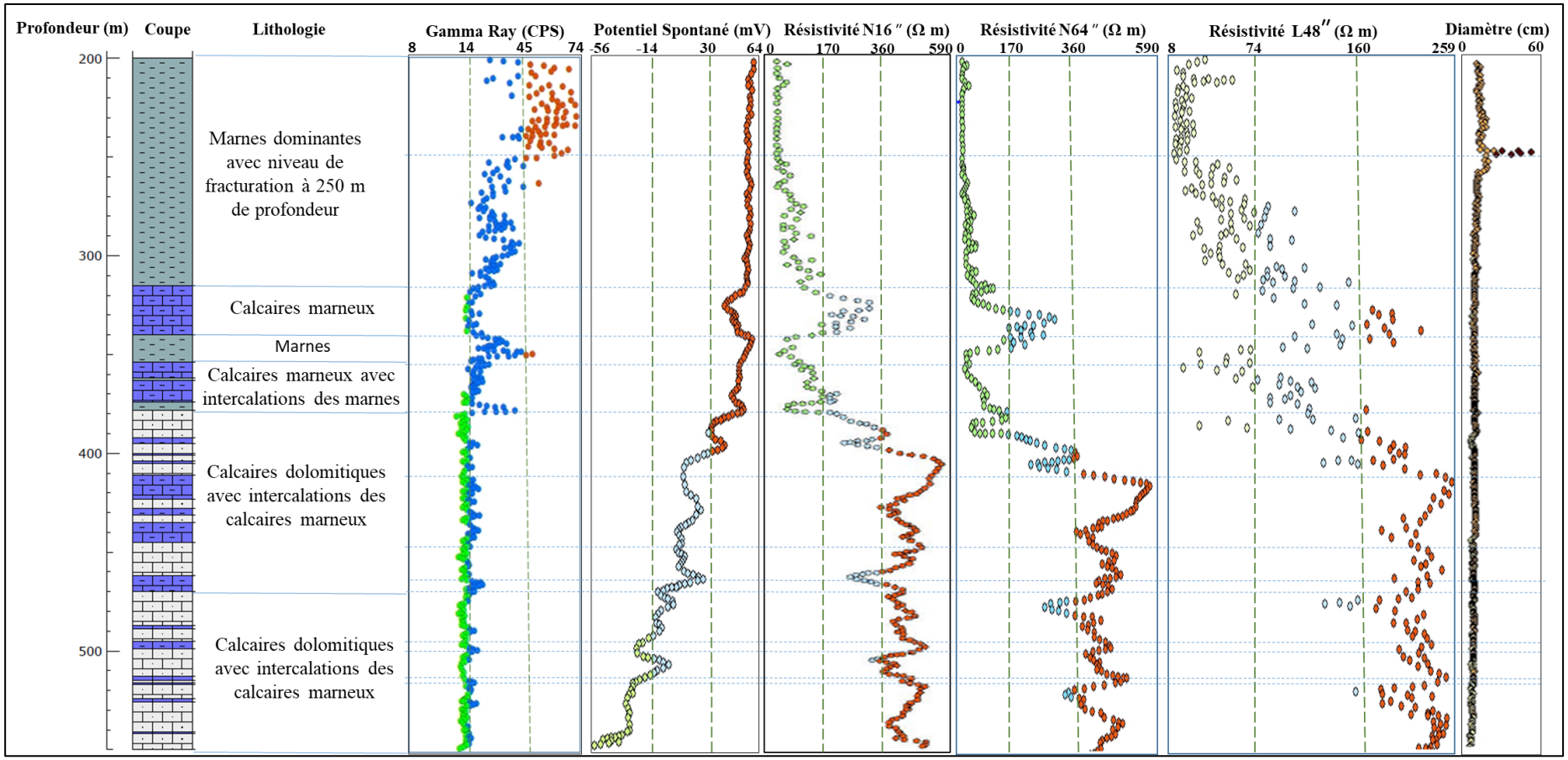


Figure 57 : Coupe lithologique synthétique du forage Dkikira (F2) d'après la diagraphie,

3.1.3 Coupe lithologique du forage de Fritissa

Etant donné l'absence de données diagraphiques pour le forage de Fritissa (F3), la coupe lithologique du forage a été établie à partir de la fiche technique fournie par l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya, La figure 58 montre les principaux caractères lithologiques de l'aquifère au niveau de ce forage,

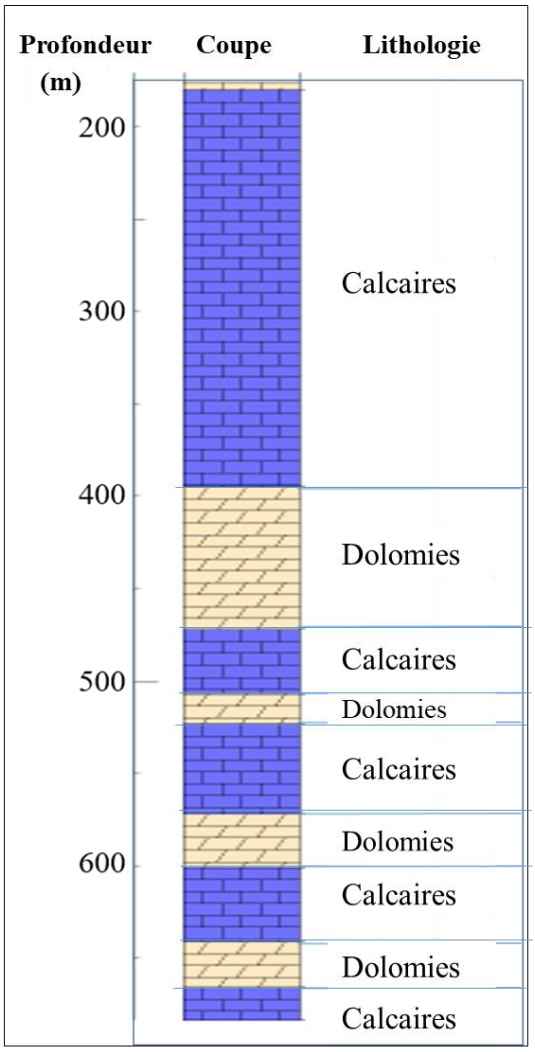


Figure 58 : Coupe lithologique du forage F3 d'après la fiche de l'ABHM,

Les formations traversées par le forage sont majoritairement composées de marnes dans la section supérieure, et par des calcaires et des dolomies au-delà de 176 m,

3.2 Interprétation des résultats de la diagraphie électrique

3.2.1 Forage Bouyaakoubate (F1)

Pour une tranche de 360m, la diagraphie électrique est réalisée dans l'aquifère profond entre 500m et 860m pour le forage Bouyaakoubate dans un contexte carbonaté,

Les valeurs de Gamma-Ray sont relativement basses et comportent deux tranches : La première caractérisée par tranche de Gamma-Ray ou les valeurs allant de 10 à 18 comptes par seconde (CPS) entre 500 et 525m de profondeur, Cette partie du log présente une légère radioactivité suggérant la présence des marneux calcaires, Tandis que la tranche ou les valeurs enregistrées entre 5 et 10 comptes par seconde (CPS) domine la colonne entre 525 et 860m de profondeur, Elle correspond aux calcaires dolomitiques très faiblement radioactifs, La lithologie de l'aquifère est donc de nature calcaire dolomitique avec des faibles intercalations marneuses,

Le détecteur de diamètre (caliper) (cm) à localisé les tranches de la colonne ou les roches sont friabilisées par la fracturation ou la karstification, La variation dans le diamètre montre des anomalies aux niveaux 645 et 670m où la porosité secondaire des formations est importante,

Etant donné que le contexte de la zone d'étude est carbonaté, le potentiel spontané (P,S) (mV) n'a pas été pris en considération contrairement aux terrains gréseux ou il faut les intégrer dans l'interprétation de la diagraphie, Dans ce cas, la polarité spontanée permet de localiser les changements lithologiques,

Pour les résistivités N16″ et N64″ (Ω m), l'enregistrement des valeurs de la résistivité N64″ est supérieur à la normale N16″ signalant qu'entre les profondeurs 500 et 630m, la qualité de l'aquifère en termes de conductivité est supérieure à celle du fluide dans le forage, A partir de la profondeur 630 jusqu'à 860 m la courbe N16″ rejoint celle de N64″ suggérant la dilution du fluide de forage au niveau de la zone saturée de l'aquifère

La résistivité latérale (L48″) (Ω m) fournit une image qualitative des variations de la résistance de la roche le long du forage, Dans ce contexte carbonaté, la résistivité ne montre pas une grande différence dans les valeurs des formations et c'est pour cette raison au ce paramètre n'a pas été pris en considération, et l'analyse s'est limité aux résistivités N16″ et N64″ (Figure 56),

3.2.2 Forage Dkikira

Dans ce cas, la diagraphie électrique a été utilisée dans l'aquifère profond entre 200 et 550m dans un contexte carbonaté, Les valeurs de Gamma-Ray montrent trois tranches :

- La tranche de Gamma-Ray dont les valeurs entre 45 et 74 CPS entre 200 à 260 m indiquant une lithologie marneuse,
- Une deuxième tranche avec des Gamma-Ray de 14 à 45 CPS entre 260 à 380m, Cette tranche du log présentant une radioactivité suggérant la dominance des marnes, notamment des calcaires marneux,
- La troisième tranche de Gamma-Ray caractérisée par des valeurs comprises entre 8 et 14 CPS entre 380 et 550 m, correspondant aux calcaires dolomitiques avec des faibles intercalations marneuses faiblement radioactives,

Le changement brutal du diamètre (cm) a été révélé à 250 m, A ces niveaux, la porosité secondaire des formations est significative, dont la cause peut être la fracturation, la karstification ou les deux,

Le potentiel spontané (P,S), exprimé en MV, résulte des forces électromotrices d'origine électrochimique entre la boue du forage et l'eau du réservoir gréseux, La zone d'étude est carbonatée, ce qui signifie que la polarité spontanée (SP) permet de localiser les changements lithologiques des formations traversées par l'ouvrage,

La résistivité normale N64″ (Ω m) est supérieure à la normale N16″ (Ω m) entre les profondeurs 320 et 340m et entre 360 et 550m signifiant une qualité de l'aquifère en termes de conductivité supérieure à celle du fluide dans le forage ce qui permet de dire que l'eau de formation est plus douce que le filtrat du forage,

La résistivité latérale (L48″) (Ω m) donne un aperçu qualitatif des changements de résistance de la roche tout au long du forage, Dans ce cadre carbonaté, la résistivité ne révèle pas une différence significative dans les valeurs des formations, Par conséquent, ce critère n'est pas pris en compte et se restreint aux résistivités N16″ et N64″ (Figure 57), De 470 à 550 m, les intercalations marneuses deviennent de plus en plus minces avec la profondeur, ce qui permet de conclure le commencement de l'aquifère vue que le forage est contenu jusqu'à 752m pour devenir artésien sous l'effet de la pression de la nappe,

3.3 Données des essais de pompage

Les opérations des essais de pompage passent par les essais par paliers, à débits variables, puis par des essais de longue durée avec débits constants, La détermination des caractères hydrodynamiques de l'aquifère profond au niveau de chaque forage a été effectuée l'aide du logiciel Ouaip conformément au Modèle de Theis (1935),

3.3.1 Essais de pompage par paliers

Les opérations des essais par paliers ont été réalisées par l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya, Le processus consiste à utiliser une pompe immergée électrique de 8", installée dans le forage, avec une hauteur manométrique totale 100 m et un débit de 350 m^3/h, Ce dispositif permet d'obtenir des débits maximaux de l'ordre de 300 m^3/h, Le réglage des débits se fait par vannage en surface ce qui permet de prendre le rabattement à l'aide d'une sonde de niveau, La détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère à l'aide des essais de pompage par paliers a été effectuée dans les forages de Bouyaakoubate, Dkikira et Fritissa, durant une courte durée de 2 heures par paliers et avec débit croissant, Le tableau 11 illustre les principaux résultats de cette étape,

Tableau 11 : Données des paliers des forages selon le débit et le rabattement,

	Forage F1		Forage F2		Forage F3	
	Débit (m^3/h)	Rabattement (m)	Débit (m^3/h)	Rabattement (m)	Débit (m^3/h)	Rabattement (m)
Palier 1	234	2,54	54	42,90	180	1,35
Palier 2	252	6,17	72	54,30	216	2,62
Palier 3	270	8, 34	90	60,32	252	3,90
Palier 4	288	10,48	108	65,22	288	6,40

Les résultats obtenus montrent qu'au quatrième palier, les débits maximaux sont atteints, avec des rabattements correspondants enregistrés dans les trois forages comme suit : un débit de 288 m^3/h pour un rabattement de 10,48 m dans le forage Bouyaakoubate, le même débit est enregistré pour un rabattement de 6,4m dans le forage de Fritissa, et un débit de 108m ^{3}/h pour un rabattement de 65,22m dans le forage de Dkikira,

L'application préalable de la méthode de diagnostic vise réduire les incertitudes des résultats issus des solutions analytiques (Gutierrez et Dewandel, 2013), En effet, le diagnostic consiste en l'analyse de la dérivée logarithmique des rabattements à la descente ou à la remontée, ce qui a l'avantage de représenter tous les régimes d'écoulement sur un seul graphique logarithmique (Bourdet et al,, 1983), Dans ce travail, la phase de diagnostic par l'analyse de la dérivée a été prise en compte car les résultats du calcul de la transmissivité ont

été obtenus sous OUAIP (Figure 59), L'usage de ce logiciel a l'avantage d'afficher les graphiques du diagnostic puis d'effectuer automatiquement le calcul avec la solution analytique la plus employer (Duffield, 2007),

Le débit critique du forage correspond au débit qui ne doit pas être dépassé pendant l'exploitation, afin de préserver le bon fonctionnement de l'ouvrage, d'éviter toute détérioration de sa structure et de maintenir la qualité de l'eau prélevée, La valeur du débit critique peut être déterminée graphiquement en identifiant le point d'équivalence entre la perte de charge linéaire et quadratique de la courbe caractéristique lors des essais de pompage à court terme (essais par paliers), Le logiciel OUAIP permet de calculer automatiquement la valeur de ce débit, et de traiter les données suivant plusieurs solutions analytiques dont celle de Cooper-Jacob qui a été retenue dans cette étude, Ce choix se justifie par la nature captive de la nappe et par l'adéquation de cette méthode avec les conditions similaires à celles d'autres travaux menés au Maroc ou ailleurs (Biémi, 1992 ; Soro et al,, 2010), captif de la nappe et par l'adéquation de cette méthode avec les conditions rencontrées, similaires à celles d'autres travaux menés aussi bien au Maroc qu'à l'étranger,

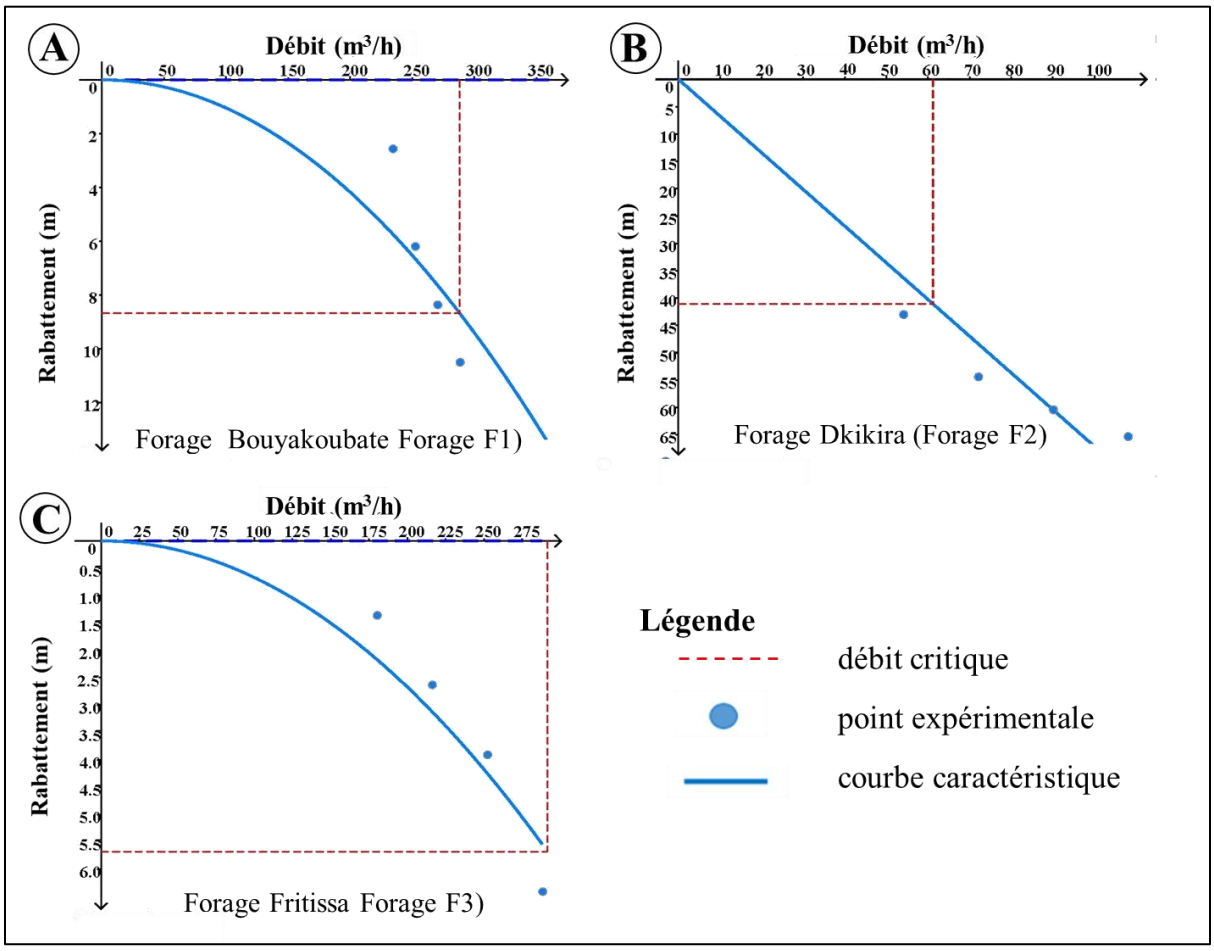


Figure 59 : Courbes caractéristiques des paliers dans les forages F1, F2 & F3 au niveau de la zone d'étude,

En résumé, cette phase d'essais de pompage par paliers a permis de déterminer les débits critiques des trois forages (Tableau 12), constituant des données nécessaires pour la phase suivante,

Tableau 12 : Débits critiques en m^3/h des forages,

Forage Bouyaakoubate (F1)	Forage Dkikira (F2)	Forage Fritissa (F3)
288	61,2	291,6

3.3.2 Tests de longue durée

Les données des essais de pompage de longue durée sont également fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya, À la suite des tests par paliers ayant permis de déterminer le débit critique de chaque forage, des essais de pompage de longue durée à débit constant ont été réalisés avec un suivi du rabattement au niveau de chaque ouvrage (Figure 60),

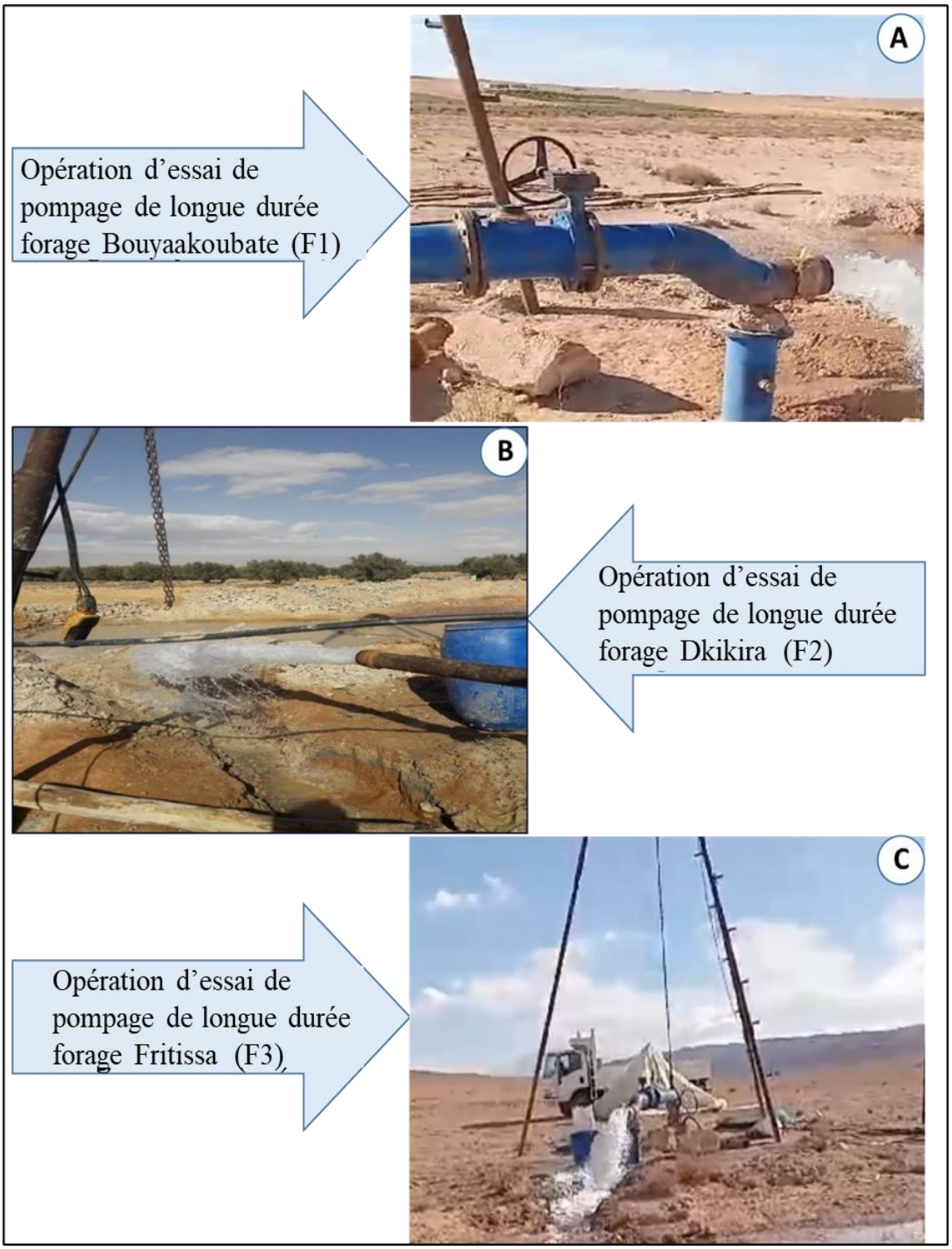


Figure 60 : Illustration des tests de débits des forages (A) F1, (B)F2 et (C)F3,

3.3.2.1 Forage Bouyaakoubate

Après la détermination du débit critique, un essai de longue durée a été effectué au niveau forage Bouyaakoubate (F1) durant 72 heures (Figure 59A), Le débit, réglé au début, a été

maintenu pendant la durée de l'essai à 288 m^3/h avec un suivi du niveau piézométrique, Les mesures obtenues ont permis de tracer le graphique (Figure 61A) le niveau est stabilisé à un rabattement de 11,80m, Les données du rabattement et de temps sont présentées dans le tableau 13,

Tableau 13 : Résultats de l'essai de pompage de longue durée sur le forage Bouyaakoubate (F1),

Temps(S)	Débit(m^3/h)	Rabattement(m)	Temps(S)	Débit(m^3/h)	Rabattement(m)	Temps(S)	Débit(m^3/h)	Rabattement(m)
0	0,00	0,00	8 100	288,00	10,95	172 800	288,00	11,80
60	288,00	3,72	9 000	288,00	11,19	187 200	288,00	11,80
120	288,00	4,77	9 900	288,00	11,27	201 600	288,00	11,80
180	288,00	5,45	10 800	288,00	11,35	216 000	288,00	11,80
240	288,00	6,32	12 600	288,00	11,42	230 400	288,00	11,80
300	288,00	6,68	14 400	288,00	11,48	244 800	288,00	11,80
600	288,00	7,19	18 000	288,00	11,53	259 200	288,00	11,80
900	288,00	7,68	21 600	288,00	11,57	259 260	0,00	5,95
1 200	288,00	8,17	25 200	288,00	11,61	259 320	0,00	5,45
1 500	288,00	8,55	28 800	288,00	11,65	259 380	0,00	4,07
1 800	288,00	8,92	32 400	288,00	11,65	259 440	0,00	3,58
2 100	288,00	9,09	36 000	288,00	11,66	259 500	0,00	2,97
2 400	288,00	9,39	43 200	288,00	11,69	259 800	0,00	2,47
2 700	288,00	9,68	40 400	288,00	11,73	260 100	0,00	1,65
3 000	288,00	9,87	57 600	288,00	11,74	260 400	0,00	0,92
3 300	288,00	10,03	64 800	288,00	11,74	260 700	0,00	0,71
3 600	288,00	10,22	72 000	288,00	11,78	261 000	0,00	0,26
4 200	288,00	10,38	86 400	288,00	11,80	261 300	0,00	0,13
4 800	288,00	10,44	100 800	288,00	11,80	261 600	0,00	0,09
5 400	288,00	10,50	115 200	288,00	11,80	262 200	0,00	0,08
6 000	288,00	10,55	129 600	288,00	11,80	262 500	0,00	0,03
6 600	288,00	10,66	144 000	288,00	11,80	262 800	0,00	0,00
7 200	288,00	10,78	158 400	288,00	11,80			

D'après ces résultats, le débit d'exploitation a été calculé comme suit :

$$Qexp = Q - (Qx10\%) \qquad \text{Eq (9)}$$

Q : débit critique de pompage (m^3/h),

Pour le forage F1 : Qexp = 288 - (288x10%) = 259,20 m^3/h,

D'après les résultats des essais de pompage au niveau du forage Bouyaakoubate, la transmissivité de la nappe est de 1,46 x $10^{-2} m^2/s$, sa perméabilité est de 2,43x10^{-5}m/s et le coefficient d'emmagasinement est de 6,89 x10^{-7} ce qui indique que l'aquifère profond est de

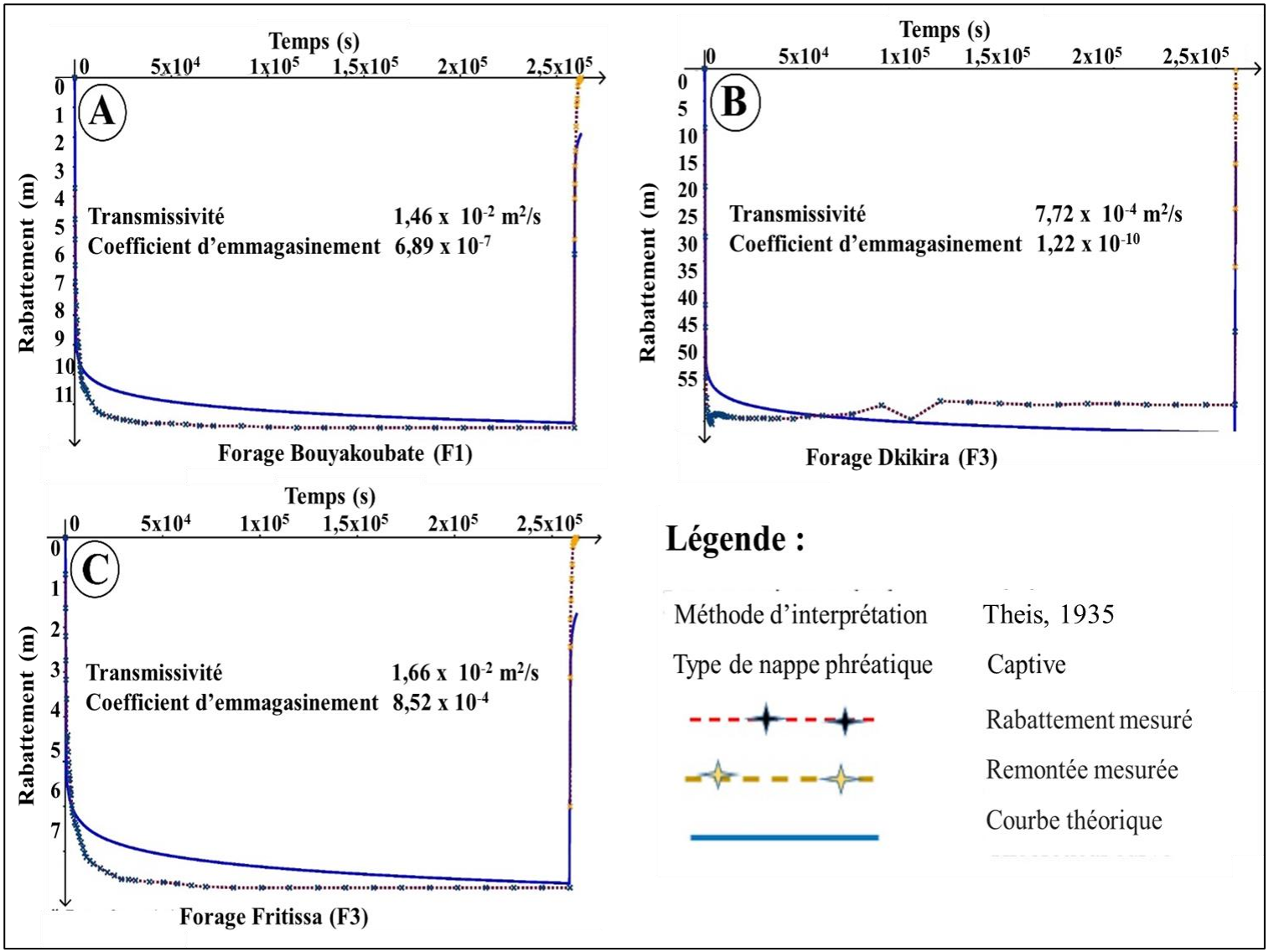


Figure 61 : Courbe caractéristique des essais de longue durée du forage (A) : Bouyaakoubate (F1), (B) : Dkikira (F2) et (C) : Fritissa (F3),

grande capacité avec un réservoir de secoure en cas de besoin ou surexploitation de l'aquifère superficiel

3.3.2.2 Forage Dkikira

Le test par essai de longue durée (72 heures) réalisé sur ce forage a montré que le débit critique ne doit pas dépasser 72 m^3/h, Il s'agit d'un forage artésien avec un débit de 61,2 m^3/h (Figure 59B), utilisé par l'association Dkikira à Fritissa pour l'irrigation, Lors du test de la capacité de l'ouvrage, le rabattement est de 54,30m, malgré que la durée de la remontée du niveau piézométrique est de 7 mn (Figure 61B), ce qui montre que l'aquifère profond dans cette région est le secours futur en cas d'un déficit ou d'un retard sur la recharge des nappes superficielles, Le suivi du rabattement et du débit a donné les résultats du tableau 14,

Tableau 14 : Résultats de l'essai de pompage longue durée sur le forage Dkikira (F2),

Temps(S)	Débit(m^3/h)	Rabattement(m)	Temps(S)	Débit(m^3/h)	Rabattement(m)	Temps(S)	Débit(m^3/h)	Rabattement(m)
0	0	0	6000	61,2	53,84	86400	61,2	54,71
60	61,2	9,2	6600	61,2	53,94	100800	61,2	51,84
120	61,2	18,35	7200	61,2	53,93	115200	61,2	52,00
180	61,2	26,20	8100	61,2	53,95	129600	61,2	52,20
240	61,2	36,82	9000	61,2	54,08	144000	61,2	52,40
300	61,2	40,30	9900	61,2	54,28	158400	61,2	52,40
600	61,2	48,10	10800	61,2	54,22	172800	61,2	52,25
900	61,2	51,38	12600	61,2	54,28	187200	61,2	52,25
1200	61,2	52,94	14400	61,2	54,40	201600	61,2	52,40
1500	61,2	53,74	18000	61,2	54,50	216000	61,2	52,40
1800	61,2	54,22	21600	61,2	54,52	230400	61,2	52,40
2100	61,2	54,41	25200	61,2	54,53	244800	61,2	52,40
2400	61,2	54,64	28800	61,2	54,48	259200	61,2	54,30
2700	61,2	54,88	32400	61,2	54,59	259260	0	41,00
3000	61,2	55,10	36000	61,2	54,52	259320	0	30,90
3300	61,2	55,31	43200	61,2	54,60	259380	0	21,80
3600	61,2	55,40	40400	61,2	54,22	259440	0	14,80
4200	61,2	54,10	57600	61,2	54,11	259500	0	7,60
4800	61,2	54,10	64800	61,2	53,87	259560	0	2,70
5400	61,2	53,87	72000	61,2	52,49			

On se basant sur les résultats de pompage du forage, le débit d'exploitation a été calculé comme suit :

$$Qexp = \mathrm{Q} - (\mathrm{Qx}10\%) \qquad \text{Eq (10)}$$

Q : débit critique de pompage (m^3/h),

Qexp = 61,2 - (61,2 x 10%) = 55,08 m^3/h,

L'exploitation de la nappe profonde commence de 200 à 752m, malgré que la diagraphie a été réalisée uniquement jusqu'à 550 m, Dans ce forage, d'après les résultats des essais de

pompage, la nappe est caractérisée par une transmissivité de 7,72 x $10^{-4}m^2/s$, une perméabilité de 1,39x10^{-6}m/s et un coefficient d'emmagasinement de 1,22x10^{-10} (Figure 61B),

3.3.2.3 Forage Fritissa (F3)

L'essai de pompage longue durée pendant 72 heures dans le forage F3 a été réalisé avec un débit constant de 291 m3/h (Figure 59C), Le rabattement enregistré est de l'ordre de 7,81m, Ce test de pompage s'est sensiblement amélioré au cours du pompage ce qui aboutit à des eaux claires, Les résultats du suivi du débit et de rabattement en fonction du temps sont illustrés par la figure 61C et le tableau 15,

Tableau 15 : Résultats de l'essai de pompage longue durée sur forage Fritissa (F3),

Temps(S)	Débit(m^3/h)	Rabattement(m)	Temps(S)	Débit(m^3/h)	Rabattement(m)	Temps(S)	Débit(m^3/h)	Rabattement(m)
0	0,00	0,00	8 100	291,60	6,80	172 800	291,60	7,81
60	291,60	0,82	9 000	291,60	6,92	187 200	291,60	7,81
120	291,60	1,57	9 900	291,60	7,04	201 600	291,60	7,81
180	291,60	2,20	10 800	291,60	7,13	216 000	291,60	7,81
240	291,60	2,74	12 600	291,60	7,21	230 400	291,60	7,81
300	291,60	3,17	14 400	291,60	7,28	244 800	291,60	7,81
600	291,60	3,60	18 000	291,60	7,38	259 200	291,60	7,81
900	291,60	4,54	21 600	291,60	7,47	259 260	0,00	6,00
1 200	291,60	4,41	25 200	291,60	7,54	259 320	0,00	3,12
1 500	291,60	4,78	28 800	291,60	7,62	259 380	0,00	2,44
1 800	291,60	5,02	32 400	291,60	7,63	259 440	0,00	1,82
2 100	291,60	5,24	36 000	291,60	7,65	259 500	0,00	1,39
2 400	291,60	5,39	43 200	291,60	7,68	259 800	0,00	0,92
2 700	291,60	5,61	40 400	291,60	7,69	260 100	0,00	0,60
3 000	291,60	5,74	57 600	291,60	7,72	260 400	0,00	0,19
3 300	291,60	5,97	64 800	291,60	7,76	260 700	0,00	0,12
3 600	291,60	6,13	72 000	291,60	7,79	261 000	0,00	0,09
4 200	291,60	6,21	86 400	291,60	7,81	261 300	0,00	0,06
4 800	291,60	6,36	100 800	291,60	7,81	261 600	0,00	0,04
5 400	291,60	6,41	115 200	291,60	7,81	262 200	0,00	0,01
6 000	291,60	6,48	129 600	291,60	7,81	262 500	0,00	0,00
6 600	291,60	6,58	144 000	291,60	7,81	262 800	0,00	0,00
7 200	291,60	6,68	158 400	291,60	7,81			

Les résultats de test de pompage au niveau du forage Fritissa (F3) ont déterminé le débit d'exploitation calculé comme suit :

$$Qexp = \mathrm{Q} - (\mathrm{Qx10\%}) \qquad \text{Eq (11)}$$

Qexp = 291,60 - (291,60 x 10%) = 262,44 m^3/h,

Au niveau de ce forage, la nappe profonde a une épaisseur de 483,67 m, entre les profondeurs 200 et 683,67m, Les données de la fiche technique, la lithologie dans le forage est dominée par des formations carbonatées, Avec la stabilisation du niveau dynamique, la

transmissivité est de 1,65 x $10^{-2}m^2/s$, un coefficient d'emmagasinement de $8,52x10^{-4}$ et une perméabilité de $2,42x10^{-5}m/s$,

3.4 Interprétation des résultats des essais de pompage

L'exploitation des aquifères profonds est importante pour la gestion des eaux souterraines, mais elle exige la connaissance et la détermination des conditions d'exploitation, Dans ce sens, les essais de pompage de longue durée, réalisées dans la région d'étude, ont permis de calculer le débit exploitable qui est de l'ordre de 13 841,28 m^3/jours, soit 166 095,36 m^3/an, Ce débit peut assurer les besoins de la population en eau potable ainsi que pour les différentes activités, estimés à 70 956 m^3/an pour 2035 (ABHMO, 2016), Ces besoins ont passé de 52 034 m^3/an en 2016 à 58 867 m^3/an en 2020, Ce débit assure une durabilité à l'aquifère avec une marge de 10% de moins par apport au débit d'essai de pompage de longue durée et permet une sécurité de la nappe à long terme, En plus de l'absence d'interaction durant les tests soit confirmée en régime d'exploitation simultanée, Les données de pompage, traités par OUAIP conformément au Modèle de (Theis, 1935), a permis d'avoir les valeurs des paramètres de l'aquifère tels que le débit d'exploitation, la tansmissivité et le coefficient d'emmagasinement (Tableau 16), Le traitement des données issues des tests de pompage de longue durée réalisés dans les aquifères profonds a permis de déterminer les débits d'exploitation optimaux des forages, Ces résultats constituent une base essentielle pour répondre aux besoins en eau de la population locale, tout en préservant la durabilité des ressources en eau souterraine, Toutefois, la détermination précise des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, l'évaluation de sa perméabilité, ainsi que l'estimation du débit exploitable par ouvrage sans compromettre la pérennité de la ressource naturelle, demeurent des enjeux majeurs, Ces éléments nécessitent la réalisation de tests spécifiques et d'essais de pompage rigoureux (De Lasme et al,, 2012 ; Gutierrez et Dewandel, 2013 ; Al-Hayali et al,, 2021),

La transmissivité des aquifères est déterminable graphiquement à travers l'approximation logarithmique proposée par (Cooper et Jacob,,1946), (Figure 61) basée sur l'équation de Theis (équation 2), Le logiciel OUAIP (BRGM) permis l'interprétation des résultats d'essais de pompages suivant plusieurs solutions analytiques dont celle de Cooper-Jacob qui a été choisie en raison de la nature de la nappe qui est captive et des conditions d'application de cette méthode qui est employée par plusieurs auteurs ayant travaillé dans des conditions identiques à celles des trois forages soit au Maroc ou ailleurs (Biémi, 1992 ; Soro et al,, 2010),

Tableau 16 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifères au niveau des trois forages,

Paramètres	Forage F1	Forage F2	Forage F3
Débit d'essai de pompage Q (m^3/h)	288,0	61,20	291,60
Durée de pompage t (s)	$2,5 \times 10^5$	$2,5 \times 10^5$	$2,5 \times 10^5$
Rabattement de niveau s (m)	11,80	54,30	7,81
Débit Critique Qc (m^3/h)	288,0	61,20	292,0
Débit d'exploitation Qexp	259,20	55,08	262,44
Transmissivité T (m^2/s)	$1,46 \times 10^{-2}$	$7,72 \times 10^{-4}$	$1,65 \times 10^{-2}$
Coefficient d'emmagasinement S (sans dimension)	$6,89 \times 10^{-7}$	$1,22 \times 10^{-10}$	$8,52 \times 10^{-4}$
Perméabilité K (m/s)	$2,43 \times 10^{-05}$	$1,39 \times 10^{-06}$	$2,42 \times 10^{-05}$

4 Discussion

4.1 Caractérisation lithologique de l'aquifère profond

L'application de la diagraphie électrique pour la caractérisation de la lithologie de l'aquifère profond est cruciale pour garantir la précision des données fournies par les fiches techniques, Pour le forage Bouyaakoubate (F1), la diagraphie a révélé une lithologie de calcaires marneux entre 500 et 560 m, alors qu'elle est décrite comme dolomie selon la fiche technique, De 560 à 850 m de profondeur, la diagraphie indique des calcaires marneux avec des intercalations marneuses, montrant deux niveaux de fracturation ou de karstification à 645 et 670 m de profondeur, et constituant le réservoir de l'aquifère profond au niveau du forage, Au-delà de 850 m, la lithologie est constituée de calcaires dolomitiques tandis que la fiche technique indique des calcaires entre 560 et 600 m et des dolomies entre 720 à 865 m et que la présence des dolomies est limitée entre 600 m et 650 m et de 700 m à 720 m, alors que les calcaires dolomitiques sont présents de 650 m à 700 m sur une épaisseur de 50 m seulement (Figure 62A), La comparaison de ces deux sources de données a permis de conclure que les résultats issus de la diagraphie sont plus précis offrant une coupe lithologique plus précise De plus, la diagraphie a mis en évidence des anomalies de fracturation et a permis de définir le volume ponctuel du réservoir et son épaisseur,

Dans le cas du forage Dkikira (F2), la fiche de la DRPE indique la présence des marnes calcaires entre 200 et 230 m, des marnes jusqu'à 250 m, et des calcaires marneux entre 250 et 360 m, tandis que la lithologie est principalement dominée par des calcaires jusqu'à 550 m, En revanche, la diagraphie électrique a offert une meilleure précision grâce à la détection des marnes entre 200 et 315 m, avec une fracturation relevée à la cote 240 m, Les calcaires marneux

s'étendent jusqu'à 340 m, suivis par un passage de marnes entre 340 et 355 m, ainsi que des calcaires marneux avec des intercalations marneuses de 355 à 375 m, Les calcaires dolomitiques se poursuivent jusqu'à la cote de 550 m, alors que le réservoir de l'aquifère profond est encore présent en profondeur, dont la nature lithologique est constituée de calcaires dolomitiques à partir de la cote de 360 m (Figure 62B),

Il est à noter enfin que, l'utilisation des opérations de diagraphie électriques lors des prospections constitue toujours un défi en ce qui concerne le coût qu'elles impliquent, De plus, le suivi latéral des caractéristiques lithologiques est complexe du fait que les résultats sont ponctuels,

4.2 Caractérisation hydrodynamique de l'aquifère profond

La caractérisation hydrodynamique de l'aquifère au niveau des trois forages de la zone Fritissa est basée sur les tests de pompage pour déterminer les débits critiques, les débits d'exploitation durable de l'aquifère, ainsi que le volume d'eau exploitable qui couvre les besoins de la population, estimées13 841,28 m^3/jour (ABHM), Les niveaux statiques varient entre 0 et 50,30 m, ce qui témoigne de la pression élevée de l'aquifère profond, à l'origine du jaillissement fréquent observé dans plusieurs forages, Ce phénomène peut s'expliquer par le contexte structural géologique similaire de la moyenne Moulouya où le réservoir profond se situe au-delà de 300 m, en plus des précipitations montagneuses de part et d'autre de la zone d'étude s'infiltrant à travers la fracturation (Ben Driss et al, 2024), Les débits d'exploitation des forages varient de 234 m^3/h à 54 m^3/h avec une moyenne de 156 m^3/h, Ces débits supérieurs à 24 m^3/Jour sont en accord avec ceux reportés par d'autres travaux portant sur les aquifères profonds dans la zone de la moyenne Moulouya (ABHMO et DRPE), qui indiquent qu'un débit de 24 m^3/Jour est suffisant dans l'approvisionnement en eau potable des zones rurales pour une population de 500 habitants,

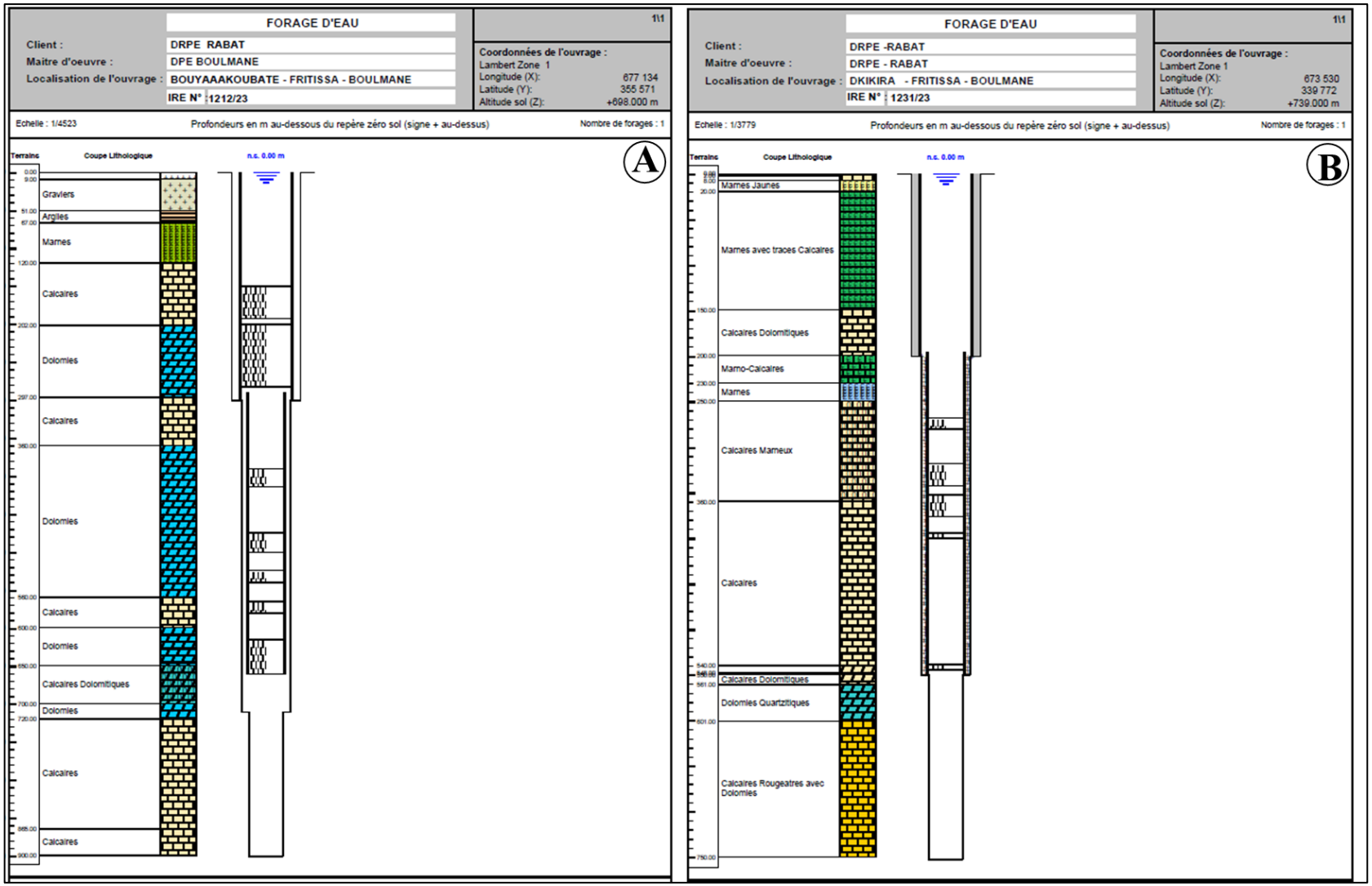


Figure 62 : Coupes lithologiques et techniques de forage (A) : Bouyaakoubate (F1) et (B) : Dkikira (F2),

Les débits critiques varient entre 61,2 et 288 m^3/h avec une moyenne de 212,40 m^3/h, Ces débits ne doivent pas être dépasser au cours d'une exploitation durable de ces forages pour éviter toute détérioration des ouvrages et tout épuisement de l'aquifère profond, Le débit critique conditionne très souvent l'exploitation d'un ouvrage hydraulique du fait qu'il permet une utilisation rationnelle de ce dernier, Malgré que les trois forages testés se trouvent dans un contexte carbonaté, les propriétés hydrodynamiques changent d'un point à l'autre suggérant une hétérogénéité dans la nature lithologique des formations constituant l'aquifère, prouvée par les résultats d'analyse des données diagraphiques pour les forages Bouyaakoubate (F1) et Dkikira (F2), et l'analyse des données de la fiche technique pour le troisième forage de Fritissa (F3), La réalisation de ce type de forages est très restreinte, en raison du coût très important de ces opérations, des risques potentiels associés à leur exécution, ainsi que du petit nombre d'organismes spécialisés dans ce domaine,

5 Conclusion

L'approche adoptée pour la caractérisation lithologique et hydrodynamique de l'aquifère profonde repose sur plusieurs objectifs : 1) la précision de la lithologie, 2) la détermination des profondeurs des niveaux aquifères à l'aide des techniques de diagraphique, et 3) l'estimation des débits d'exploitation durable à partir des essais de pompage, La lithologie a été déterminée à partir des Gamma-ray, la polarisation spontanée, les résistivités normales N16, N64 et latérale L48 et le caliper « diamètre »), L'interprétation de l'ensemble des variables a permis de reconstituer la lithologie, identifier les profondeurs des aquifères au niveau des trois forages étudiés, Cette analyse a permis également de caractériser l'hydrodynamisme des aquifères que qui passe par deux étapes principales : la précision de la lithologie, L'évaluation de l'hydrodynamisme des aquifères s'est effectuée en deux étapes complémentaires :

- Test de pompage par paliers à débits variables pour déterminer le débit critique,
- Test de pompage de longue durée à débit constant qui permet de déterminer la tansmissivité de l'aquifère, sa perméabilité, le coefficient d'emmagasinement et de les débits d'exploitation durable couvrant les besoins de la population et ces activités,

Les débits délivrés par les aquifères à partir des ouvrages hydrauliques réalisés sont très acceptables pour une alimentation en eau potable de la population dans la zone d'étude et permettent aux planificateurs de prendre des décisions en cas de besoins, Les résultats ont révélé des caractéristiques hydrogéologiques permettant une meilleure exploitation des

réservoirs souterrains et aussi, une bonne gestion de la ressource en eau souterraine vitale, Il est donc envisagé d'utiliser une modélisation de l'écoulement des eaux souterraines, comme un outil d'aide à la décision au service du développement durable dans la zone étudiée et les autres régions similaires,

L'analyse hydrogéologique globale a montré que les trois forages sont positifs, tant sur le plan quantitatif que qualitatif, Cette phase de prospection a prouvé la faisabilité d'un programme d'alimentation de la région du Fritissa à partir des ressources en eau de la moyenne Moulouya, En l'état actuel des trois ouvrages, l'estimation de l'ensemble des débits pouvant être pompés à long terme est de 13 841,28 m^3 par jour, soit un total de 5 052 067,20 m^3/an (≈5M m^3/an), pour autant que l'absence d'interaction hydraulique observée durant les tests soit confirmée en régime d'exploitation simultanée, ces données mettent l'alimentation en eau potable de la population au niveau de la zone d'étude dans une large sécurité d'après le rapport de l'agence du bassin hydraulique de la Moulouya qui estime les besoins de la zone en pointe pour 2035 à 70 956 m^3/an et que en 2020 ces besoins n'ont pas dépassé 58 867 m^3/ans alors qu'ils ont été à 52 034 m^3/an en 2016,

Dans la région d'étude l'agriculture est l'activité principale pour l'économie de la zone, la détermination de la quantité des eaux souterrains et la précision des modalités d'usage pour l'irrigation s'avère d'une importance capitale pour assurer un rendement agricole convenable et améliore les conditions des habitants dans la région Fritissa, Les trois ouvrages testés couvrent totalement les besoins en eau potable souhaités pour la zone d'étude par une gestion qui demande une bonne connaissance de l'aquifère, de bassin d'alimentation, de sa recharge et surtout de la préservation de sa protection, Ces données doivent encore faire l'objet d'investigations spécifiques, Des nouveaux forages profonds permettront de répondre pleinement aux besoins pendant les périodes de forte consommation et offriraient une marge de sécurité en cas de panne des installations actuelles, Cela favoriserait un développement durable dans la région en résolvant définitivement le problème de l'eau et en préservant les potentialités durables de la nappe profonde, Cependant, la planification et la programmation de tels forages restent coûteuses, les rendant inaccessibles à la majorité de la population et réservés à l'État pour la réalisation de ces projets, C'est le cas à l'est de la zone d'Ain Beni Mathar, et cela pourrait se reproduire dans d'autres régions où se trouve la nappe profonde, Le coût total de ces ouvrages varie entre 5 et 8 millions de dirhams, selon la profondeur et la nature du tubage d'équipement et de protection,

Chapitre 5

Évaluation de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation dans la région de Fritissa

Chapitre 5 : Évaluation de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation dans la région de Fritissa

1 Introduction

L'agriculture est l'activité humaine prédominante dans la région de la moyenne Moulouya et de la partie amont de la basse Moulouya, jouant un rôle crucial dans le développement local, La carte de l'occupation des sols révèle cinq zones distinctes (Figure 63):

(i) Les plans d'eau limités à seulement 0,02% de la surface globale et correspondant à la rivière Moulouya et ses affluents, en plus de quelques cours d'eau liés à la rivière Za,

(ii) Les zones de végétation dominées par les arbres représentant 0,53% de la surface,

(iii) Zone agricole occupée par des cultures variables et couvrant 1,47% de la superficie étudiée,

(iv) La superficie bâtie comprenant les agglomérations urbaines, périurbaines et rurales représentant 0,15% de la superficie,

(v) Les terres nues représentent 97,83 % de la superficie globale, Ces dernières sont disponibles pour l'extension des différentes zones d'activité, notamment agricole et urbaine,

Cependant, dans un contexte climatique aride à semi-aride, le développement durable exige une compréhension approfondie des modalités d'usage des eaux souterraines disponibles, en se basant sur la quantité et la qualité des eaux, Le chapitre précédant a traité la relation entre la quantité des eaux disponibles de l'aquifères profond et les besoins des populations, Ainsi, le volume disponible pour une exploitation durable a été déterminé au niveau des localités Bouyaakoubate, Dkikira et Fritissa, Il reste donc à déterminer la qualité de ces eaux sous terraines, provenant des aquifères semi-profonds et profonds,

La détermination de la qualité des eaux est basée sur l'analyse chimique des éléments majeurs : Calcium, magnésium, sodium, potassium, carbonates, chlore, sulfate, nitrate et nitrite, Les données issues de ces analyses aident à classifier les eaux selon les classifications de Richards et al, (1954) et de Wilcox (1955), Cette démarche permet de préciser la façon d'exploiter les eaux pour l'irrigation en définissant les modalités d'usage et les amendements recommandés pour bénéficier des eaux selon leur qualité,

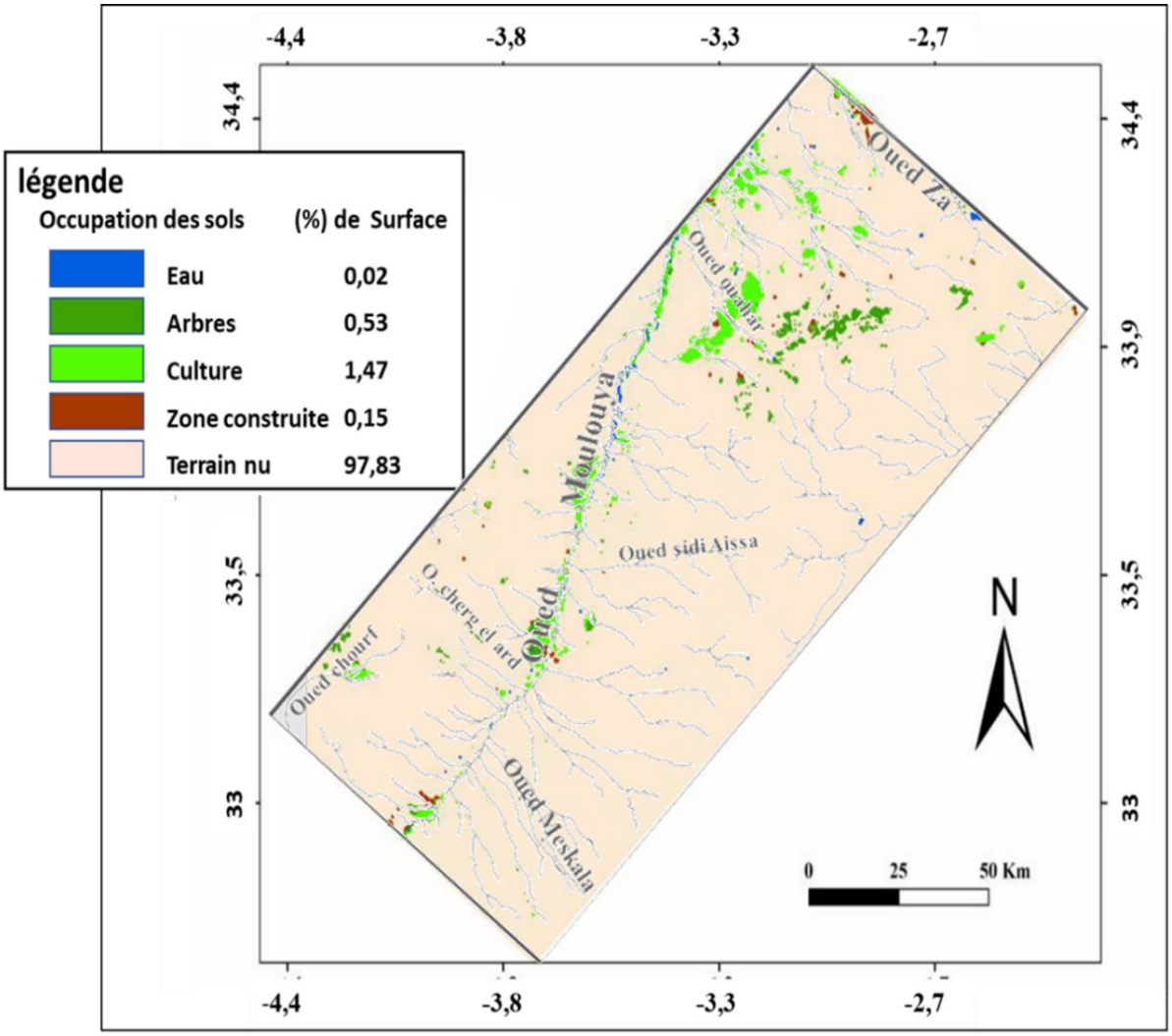


Figure 63: Carte d'occupation du sol de la zone d'étude extraite de sentinel 2 land use _land cover 10m de résolution pour l'année 2023 (https://livingatlas,arcgis,com/landcoverexplorer),

2 Sources des données

La collecte des données a été réalisée par échantillonnages des eaux dans divers points de la région d'étude (Figures 64 et 65), Au total, 94 points d'eau ont été sélectionnés pour constituer l'échantillon représentatif, Les échantillons sélectionnés ont été traités au laboratoire de l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya,

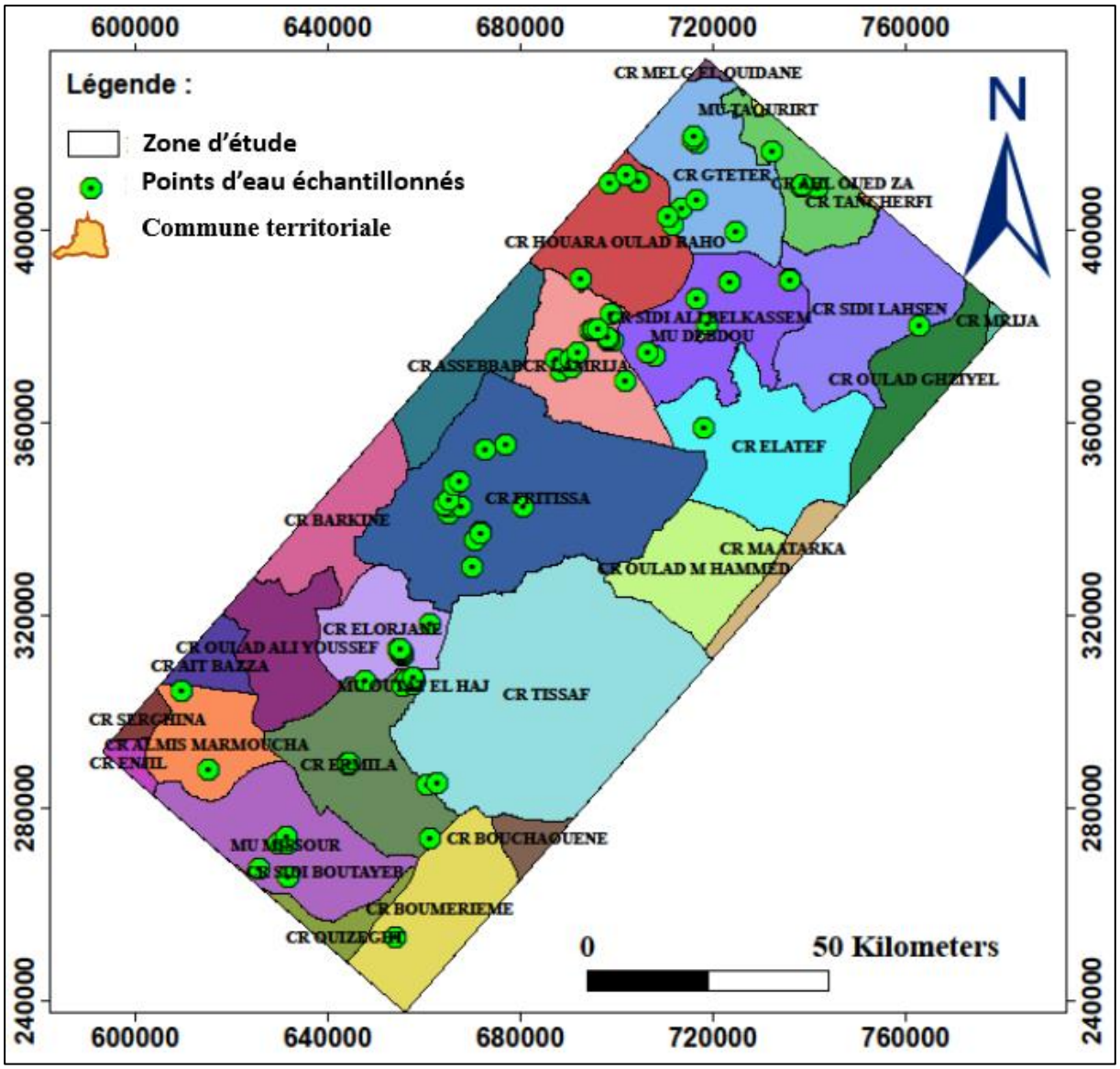


Figure 64 : Carte des points d'analyses au niveau de la zone d'étude,

Figure 65 : Opérations de prélèvement d'échantillons d'eau aux forages, (A) : Ain Abainou et (B) : Dkikira dans la région Fritissa

3 Méthodologie des analyses chimiques des eaux souterraines

Les méthodes standards d'analyse ont été appliquées aux 94 échantillons prélevés, conformément aux protocoles décrits par Rodier et al, (1975), Ces analyses ont permis de déterminer les teneurs d'ions majeurs notamment le calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^{+}), potassium (K^{+}), hydrogénocarbonate (HCO_3^-), trioxyde de carbone (CO_3^-), chlore (Cl^-), sulfate (SO_4^-), nitrate (NO_3^-) et nitrites (NO_2^-), toutes exprimées en mg/l, Les données comprennent également le pH et la conductivité électrique (EC), mesurés directement sur le terrain lors de l'échantillonnage,

Les sulfates, les nitrates et les nitrites sont analysés par méthode colorimétrique à l'aide d'un spectrophotomètre, Le potassium et le sodium sont déterminés par la méthode d'absorption atomique à l'aide d'un même spectrophotomètre, Le calcium et le magnésium ont été titrés par complexométrique, tandis que les carbonates ont été évalués par titrage à l'acide sulfurique, Les chlorures sont évalués par la méthode de Mohr par titrage, qui implique une analyse argentimétrique des ions chlorures via le nitrate d'argent en présence de chromate de sodium,

Le traitement des données consiste à déterminer les faciès des eaux conformément au diagramme de Piper, étudier les distributions des éléments majeurs en employant des diagrammes appropriés tels que le diagramme de Gibbs (1970) permettant la détermination de processus d'interaction eau-roche, Les graphes de distribution relative des éléments ont été exploités afin de déterminer la contribution des substances chimiques telles que l'échange d'ions avec les substances argileuses, la dissolution de la halite, de la calcite, la dolomite et du gypse,

La caractérisation des eaux souterraines et l'évaluation de leur aptitude à l'irrigation reposent sur le calcul des indices d'irrigation couramment utilisés et présentés ci-dessous :

Les solides dissous totaux (TDS) sont calculées à partir de la conductivité selon l'équation 12 :

$$\text{TDS (mg/l)} = \text{EC } (\mu\text{S /cm}) / 0{,}64 \qquad \text{(Eq, 12)}$$

Le TDS est utilisé avec une concentration en ions majeures pour révéler les processus possibles influençant la chimie de l'eau dans le diagramme de Gibbs,

Dureté totale (TH), exprimée en mg/l sous forme de $CaCO_3$ (mg/l) et calculée comme indiqué dans l'équation 13 :

$$TH(sous\ forme\ de\ CaCO3) = 2{,}5\ [\mathrm{Ca}]\ +\ 4{,}1[\mathrm{Mg}] \qquad \text{(Eq, 13)}$$

Lorsque les concentrations sont calculées en mg/l, Le pourcentage de sodium Na%, calculé comme suit dans l'équation 14 :

$$\mathrm{Na}\ \%\ =\ \frac{100(Na+K)}{(Ca+Mg+Na+K)} \qquad \text{(Eq, 14)}$$

Na% est utilisé dans la classification globale de la qualité de Wilcox (1955),

Lorsqu'il est comparé à la conductivité électrique (EC),

Le carbonate de sodium résiduel (RSC) est calculé à l'aide de l'équation 15

$$\mathrm{RSC\ (mg/l)}\ =\ [\mathrm{HCO3}\ +\ \mathrm{CO3}]\ -\ [\mathrm{Ca}\ +\ \mathrm{Mg}] \qquad \text{(Eq, 15)}$$

Les valeurs RSC allant jusqu'à 1,25 indiquent des eaux sûres, les valeurs comprises entre 1,25 et 2,5 indiquent une eau marginale, tandis que les eaux avec un RSC supérieur à 2,5 sont de mauvaise qualité,

Le taux d'adsorption du sodium (SAR) indique le degré auquel l'eau du sol subit une interaction cationique, Il est obtenu à l'aide de l'équation 16 :

$$\mathrm{SAR}\ =\ \mathrm{Na}/\frac{\sqrt{(Ca+Mg)}}{2} \qquad \text{(Eq, 16)}$$

Le SAR et l'EC sont les deux entrées pour la classification de la qualité des eaux souterraines selon l'approche américaine Salinity Hazard (Richards, 1954),

L'indice de perméabilité (PI) est également utilisé et calculé comme indiqué dans l'équation 17 :

$$\mathrm{IP} =\ 100 *\ \mathrm{Na}\ +\frac{\sqrt{(\mathrm{HCO3})}}{(\mathrm{Na+Ca+Mg})} \qquad \text{(Eq, 17)}$$

Selon Doneen (1964), trois catégories d'eau peuvent être distinguées selon la valeur De l'IP :

L'eau avec un indice de perméabilité (IP) supérieur à 75 est appropriée, elle est bonne si l'IP est compris entre 25 et 75, et elle est inappropriée lorsque l'IP est inférieur à 25

Le pourcentage de Na, le SAR et la conductivité électrique sont utilisés pour la classification des eaux selon les diagrammes de Richards, 1954 et de Wilcox 1955, Cette classification permet de déterminer si l'eau est adaptée ou non à l'irrigation, en fonction de

la classe identifiée,

La balance ionique, exprimée en pourcentage, est calculée selon l'équation suivante :

$$BI = 100 \times \frac{\Sigma cations - \Sigma anions}{\Sigma cations + \Sigma anions} \qquad \text{(Eq 18)}$$

Avec les valeurs d'anions et cations en meq/l

Enfin, les concentrations des ions, exprimées en mg/l, ont été converties en meq/l à l'aide de la formule suivante :

meq/l = concentration (mg/l) / poids moléculaire (g/mol),

Les valeurs obtenues sont présentées dans l'annexe 3, Cette conversion a permis de calculer plusieurs indices de qualité de l'eau, tels que : l'indice de Blaney (BI), les solides dissous totaux (TDS), la dureté totale (HT), le taux d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (%Na), le résidu sodique carbonaté (RSC) et l'indice de perméabilité (IP), Ces indices ont été déterminés pour les 94 échantillons analysés et sont présentés dans l'annexe 4, Ils permettent d'évaluer la qualité chimique des eaux souterraines et leur aptitude à l'irrigation ou à d'autres usages,

4 Résultats

Le tableau de l'annexe 2 résume les résultats des analyses des éléments majeurs effectués avec la profondeur et la nature de l'aquifère au niveau des points d'échantillonnage,

4.1 Analyse statistique des données chimiques

Les données statistiques descriptives sont illustrées dans le tableau 17, où 18 variables sont prises en considération, Pour les valeurs d'écart type, il est montré que de nombreuses variables ont des valeurs élevées indiquant une grande dispersion et une variabilité significative de la chimie de l'eau, Les valeurs maximales révèlent que les concentrations d'ions majeurs se situent principalement dans des plages acceptables, selon les directives de qualité de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) pour les eaux d'irrigation (Mauritius Government Gazette, 1999), Des exceptions ont été observées pour le sulfate (1455,2 mg/l) dépassant la limite admissible pour l'irrigation (250 mg/l), le chlorure (699 mg/l) au-dessus de la limite acceptable (350 mg/l) et le HCO3 (574,32 mg/l), dépassant légèrement la limite admissible (518 mg/l), Les eaux dont la concentration

des solides dissous totaux (TDS) est supérieur à 2 000 mg/l peuvent présenter de graves problèmes de salinité pour de nombreuses plantes sensibles (James et al,, 1982 ; Ayer et Westcot, 1985), La variable du taux d'adsorption du sodium (SAR) montre également des valeurs supérieures à la limite admissible de 6 (jusqu'à 10,11), suggérant donc les précautions nécessaires à prendre avant d'utiliser les eaux concernées (Ayer et Westcot, 1985),

Tableau 17 : Analyse statistique des données chimiques dans la région étudiée,

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart - Type
Ca (mg/l)	16,00	569,13	92,98	77,65
Mg (mg/l)	5,00	252,92	65,54	39,05
Na(mg/l)	6,00	636,11	77,82	82,07
K (mg/l)	0,00	23,46	4,43	4,22
HCO_3 (mg/l)	0,00	574,32	252,84	122,46
CO_3 (mg/l)	0,00	208,00	18,04	51,60
Cl (mg/l)	14,20	699,00	130,61	125,81
SO_4 (mg/l)	0,00	1455,20	236,35	306,79
NO_3 (mg/l)	0,00	22,57	1,81	4,67
NO_2 (mg/l)	0,00	8,01	0,09	0,83
TDS (mg/l)	358,50	3301,33	880,51	553,19
EC (µS/cm)	229,44	2112,85	563,53	354,04
TH (mg/l as $CaCO_3$))	15,05	186,12	50,11	31,54
SAR	0,17	10,11	1,49	1,26
%Na	4,65	65,32	24,68	11,71
RSC (mg/l)	-35,20	1,12	-5,29	6,65
PI	5,08	72,05	41,99	14,23
pH	5,79	8,80	7,56	0,42

Pour une analyse approfondie de l'ensemble de données collectées, l'analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée pour présenter les informations sur 18 variables (18 dimensions) dans un espace de dimensions réduites, En effet, le tableau 18 présente l'évolution de la variance totale exprimée qui fait référence à la quantité d'information employée par les facteurs dans l'espace de dimensions réduites, Il ressort que les quatre premiers facteurs expliquent une variance cumulée de 79,36%, tandis que les deux premiers facteurs conservent 61,57% de l'information globale,

Tableau 18 : Evolution de la variance totale exprimée obtenue à partir de l'analyse en composantes principales,

Facteurs	Total Exprimé Variance

	Total Exprimé Variance	% de la Variance	% Cumulé
Facteur 1	7,69	42,72	42,72
Facteur 2	3,39	18.86	61,57
Facteur 3	1,86	10.35	71,93
Facteur 4	1,34	7,44	79,36

La figure 66 montre les 18 variables considérées projetées sur un graphique à deux dimensions, construit avec les deux premiers facteurs, Elle met en évidence des corrélations positives significatives entre les variables TDS, EC, SO_4, TH, Ca et Mg et le premier facteur qui explique 42,72 % de la variance globale, RSC montre une corrélation négative avec ce facteur, Les variables Na%, PI et SAR présentent une corrélation positive avec le deuxième facteur qui explique 18,86% de l'information globale, Les autres variables (HCO_3, CO_2, K, NO_2, NO_3 et pH) sont modérément corrélées aux deux facteurs et sont situées au centre du graphique et distribuées indépendamment des autres variables,

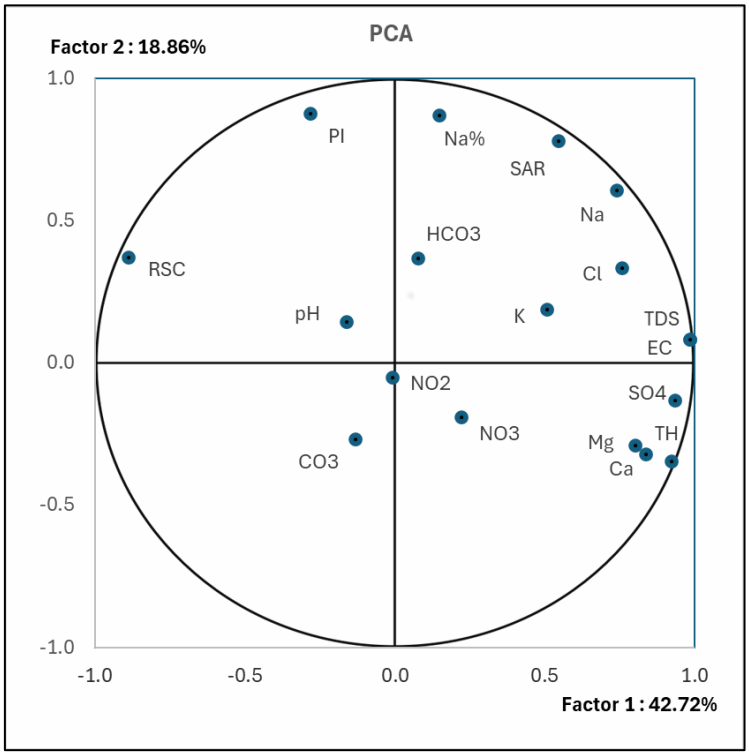


Figure 66 : Résultats de l'analyse en composantes principales pour les eaux souterraines de la zone étudiée,

Ces données statistiques permettent de comprendre la distribution des variables utilisées et les relations possibles entre elles, Cette tâche a été réalisée à l'aide du logiciel SPSS

4.2 Cartographie des faciès chimiques des eaux souterraines

La détermination du faciès chimique de l'eau est réalisée en utilisant la classification de Piper, comme le montre la figure 65, les résultats confirment la dominance des cations calcium et magnésium, Tandis que pour les anions les carbonates et les sulfates dominent dans les eaux analysées, Concernant la classification globale, quatre catégories d'eau dominent dans la région de Fritissa :

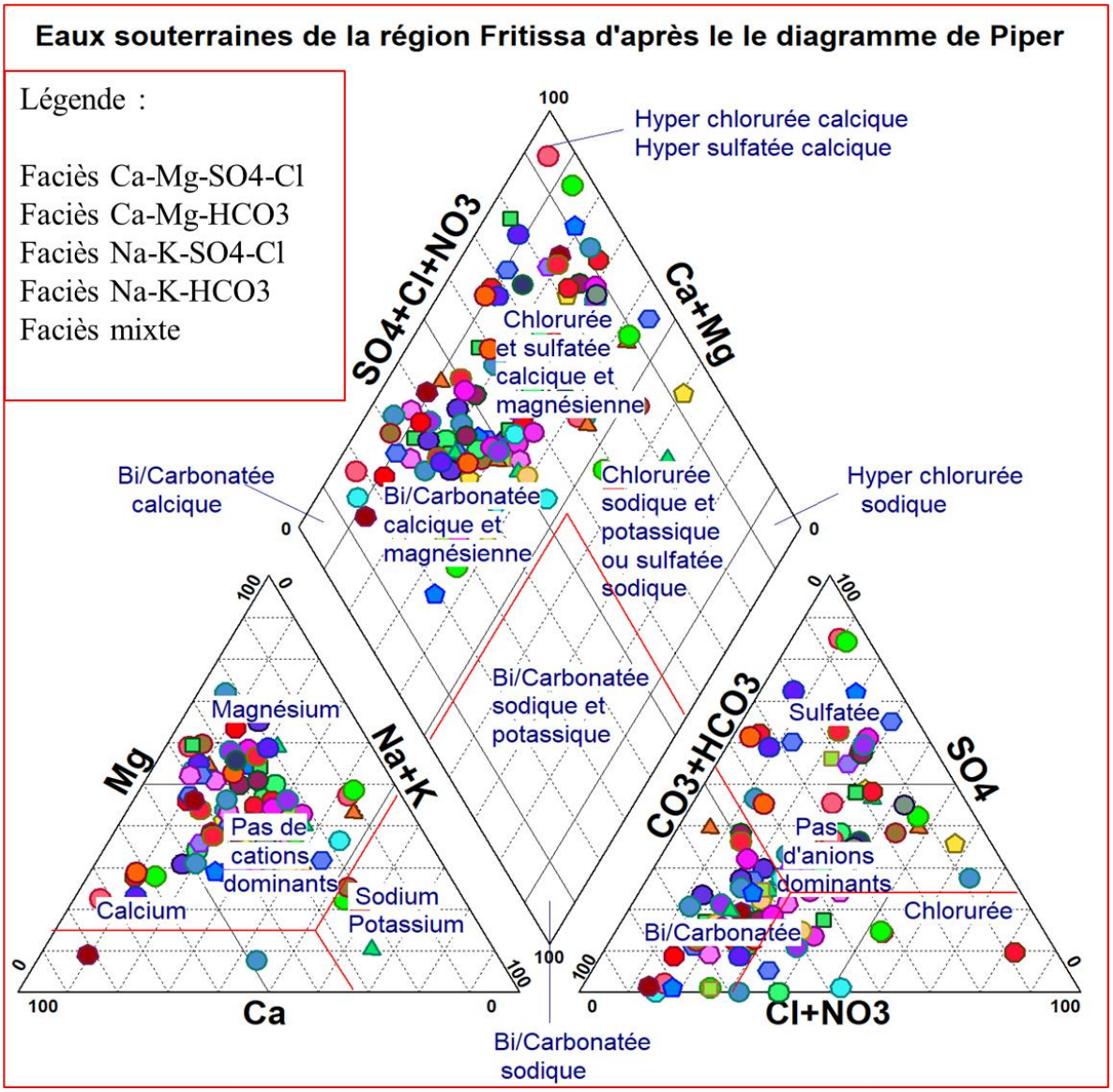


Figure 67 : Eaux souterraines de la région de Moulouya tracées dans le diagramme de Piper,

Le faciès carbonaté calcique et magnésien (Ca-Mg-HCO3) est observé dans 28 échantillons représentant 29,79% du total des points d'observation,

L e faciès sulfaté calcique et magnésien (Ca-Mg-SO4) est détecté dans 29 échantillons (30,85%),

Le faciès mixte est révélé dans 36 échantillons (38,30%),

Le faciès chloruré sulfaté sodique et potassique (Na-K-SO4-Cl) est représenté par un seul échantillon,

La carte de réparation spatiale des différents faciès hydrochimiques est présentée à la figure 68

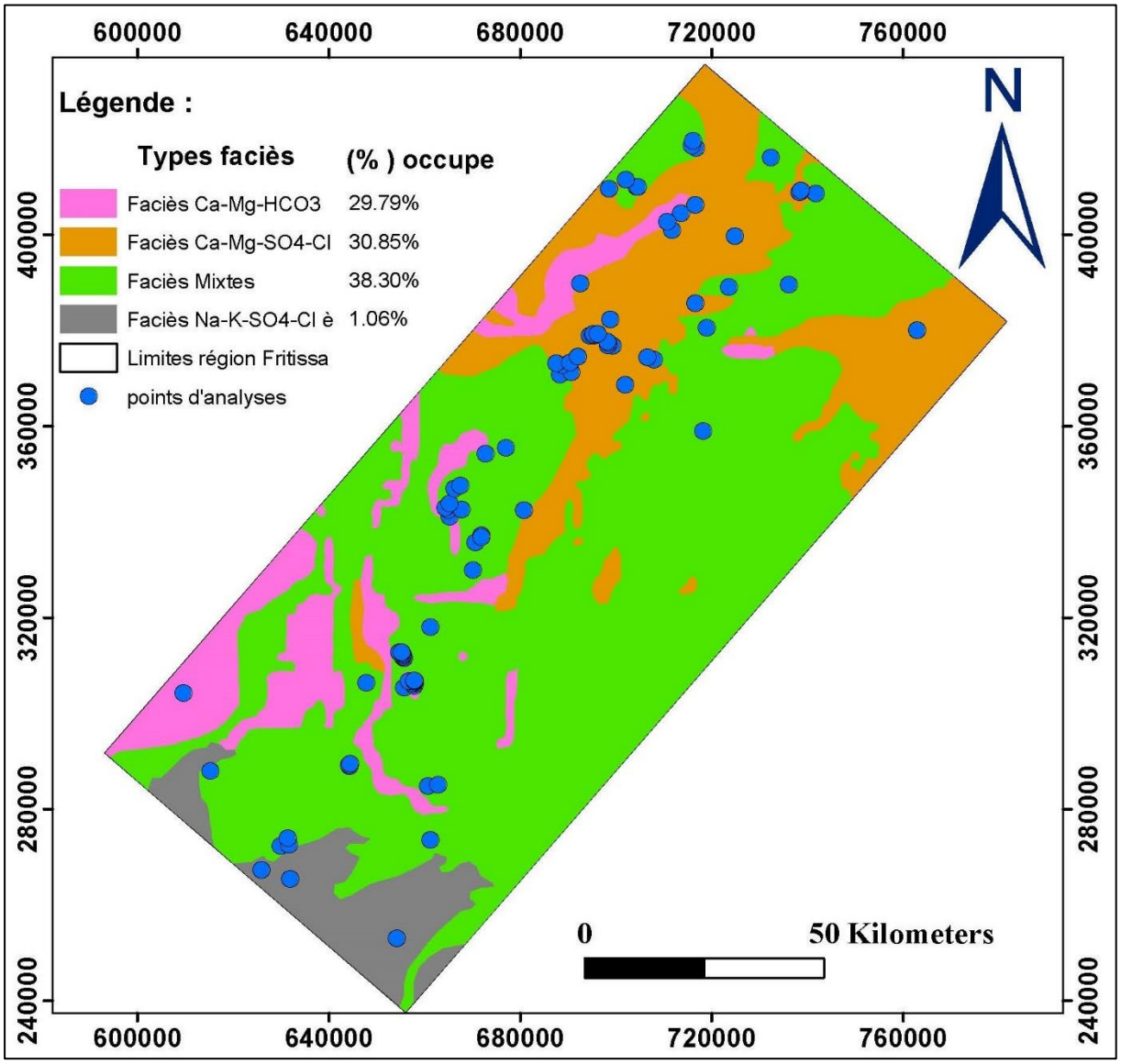


Figure 68 : Carte des faciès hydrochimiques des eaux souterraines et localisation des points d'analyses dans la région Fritissa

La figure 68 montre la prédominance du faciès chloruré sulfaté sodique potassique (1,06%) au sud de la zone d'étude, qui correspond à l'amont du bassin, Le faciès mixte est majoritaire dans la région de Fritissa, avec une représentation de 38,30%, En revanche, le faciès carbonaté calcium magnésien domine à l'ouest, le long de la chaîne atlasique avec

29,79%, Enfin, le faciès chloruré sulfuré calcium magnésien est prépondérant au nord et à l'est de la région, avec une répartition de 30,85%, Cela est dû à des processus géochimiques variables agissant sur différents caractères chimiques de l'eau de l'aquifère dans la zone,

Pour confirmer la possibilité d'une interaction eau-roche, les diagrammes de Gibbs ont été utilisés (Figure 69), La distribution des échantillons d'eau souterraine dans les diagrammes de Gibbs suggère que l'interaction eau-roche pourrait être le principal processus affectant la qualité des eaux souterraines dans la zone de recherche, Une partie importante des échantillons montre une tendance vers le processus d'évaporation avec des valeurs élevées de TDS,

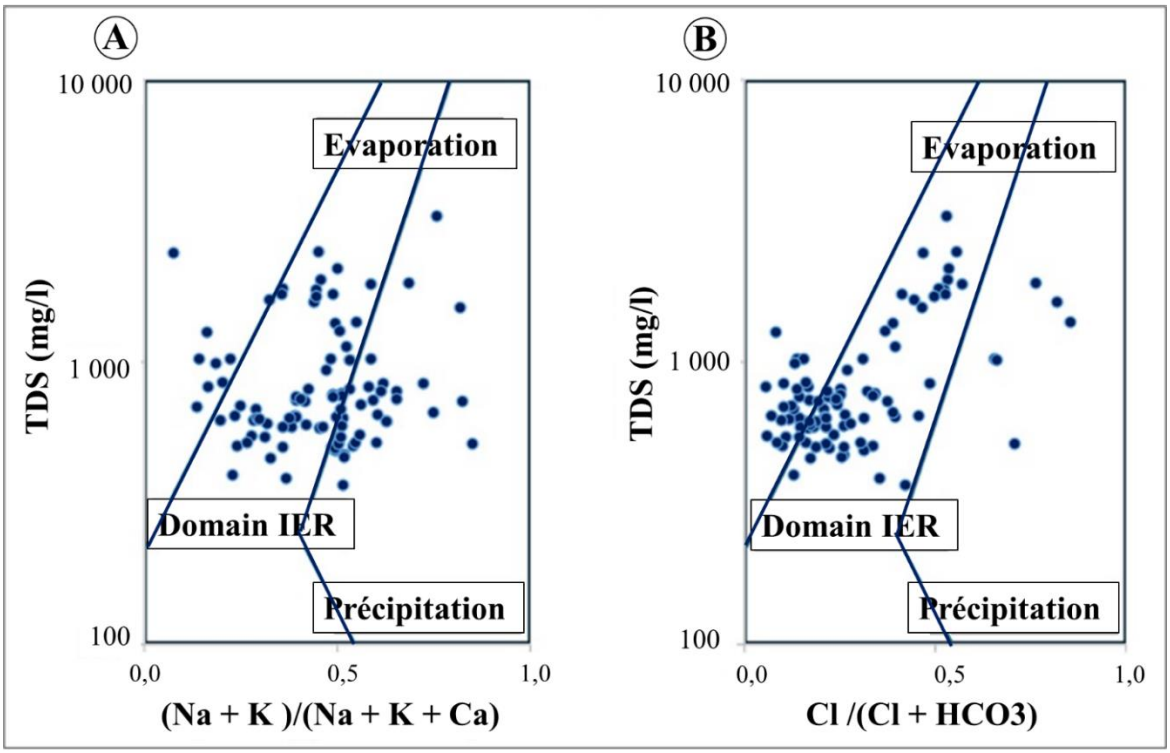


Figure 69 : Eaux souterraines de Fritissa tracées dans les diagrammes de Gibbs, A : cations et B : anions,

Les processus d'interaction eau-roche, les échantillons analysés ont été représentés dans des diagrammes de distribution (Figure 70), Le traitement des échantillons se fait après l'expression des résultats en meq/l, L'échange d'ions inverse implique la libération de calcium et de magnésium dans l'eau, et les rapports Ca+Mg/SO4+HCO_3 augmente suite à l'excès des ions Ca et Mg, Dans le sens opposé, le processus d'échange d'ions implique une capture du calcium et du magnésium par des minéraux argileux contenant du sodium, ce qui entraîne un difficile des ions Ca et Mg (Fisher et Mulican, 1997), En projetant les échantillons dans le diagramme Ca+Mg vs SO_4+HCO_3 (Figure, 7 0 A), il a été montré que ces processus potentiels sont confirmés,

Les échantillons situés au-dessus de la ligne d :1/1 sont dominants avec une proximité de la plupart des échantillons de la ligne d :1/1, ce qui suggère d'autres processus possibles impliqués dans le contrôle de la chimie de l'eau, La figure 7 0 B est une représentation des eaux étudiées dans le graphique HCO_3 vs Ca+Mg pour vérifier la contribution des carbonates à la chimie des eaux, La situation des points éloignés de la ligne révèle que les minéraux de calcite et dolomite ne sont pas la seule source de calcium et du magnésium dans les eaux, Ceci suggère que les eaux subissent des processus d'échange d'ions direct et indirect (Handa, 1969),

La dissolution des minéraux est un processus qui pourrait affecter la chimie de l'eau, et elle est évaluée en affichant les échantillons d'eau dans le diagramme SO_4 vs Ca (Figure 70C), qui prend en compte le fait que les minéraux évaporitiques se trouvent à de nombreux niveaux dans les aquifères de Fritissa, La possible dissolution du gypse et de l'anhydrite est confirmée pour dix-sept points qui s'inscrivent sur la droite d :1/1, Un excès de calcium par rapport au sulfate a été observé dans 59 échantillons, tandis qu'un excès de sulfate est détecté dans 35 points, D'autre part, le graphe Na vs Cl (Figure 70D) est utilisé pour examiner la possibilité de la dissolution de l'halite pouvant affecter l'hydrochimie de l'eau, Le graphique montre la distribution des échantillons proche de la ligne d :1/1, indiquant que l'halite constitue la principale source potentielle d'ions sodium et chlorure dissous, D'autres sources sont possibles pour les échantillons se trouvant loin de la ligne d'équilibre,

L'évaluation de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation a été réalisée à l'aide du diagramme de Wilcox (1955) qui compare la conductivité électrique de l'eau au pourcentage de sodium et délimite cinq zones de qualité de l'eau, Les résultats indiquent que la plupart des échantillons se situent dans la classe « excellent à bon » et dans la classe « acceptable à bon » (Figure 71), Un seul échantillon indique des conditions douteuses ou inappropriées, Étant donné que le diagramme de Wilcox ne prend pas en compte les autres éléments contribuant à la salinité totale, tels que le calcium et le magnésium, fréquents dans les roches carbonatées de la région, il est intéressant d'évaluer la qualité de l'eau en utilisant le risque de salinité américain, Il s'agit d'un diagramme qui utilise la conductivité électrique et les valeurs Sodium Adsorption Ratio (SAR) pour exprimer le risque de salinité causée par le sodium,

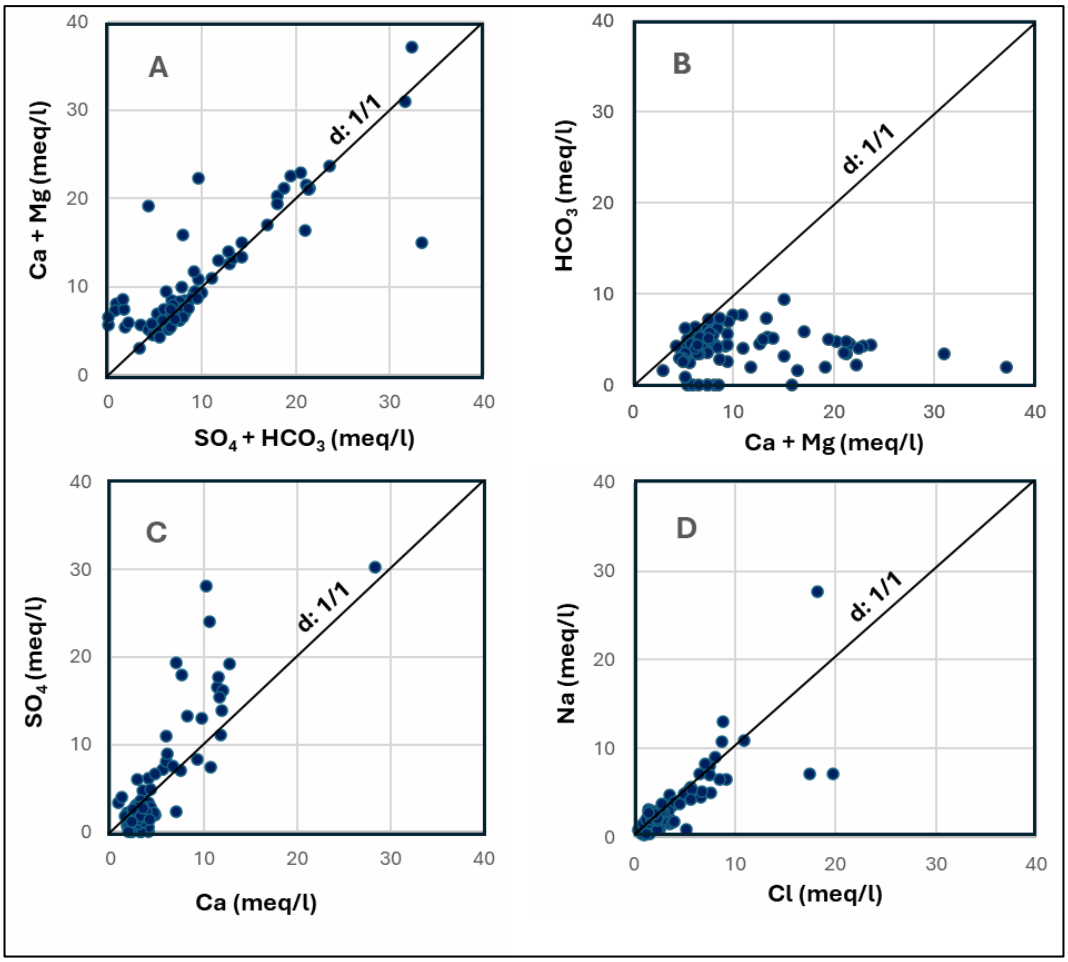


Figure 70 : Diagrammes de distribution utilisés pour caractériser les eaux souterraines dans la région de Fritissa,

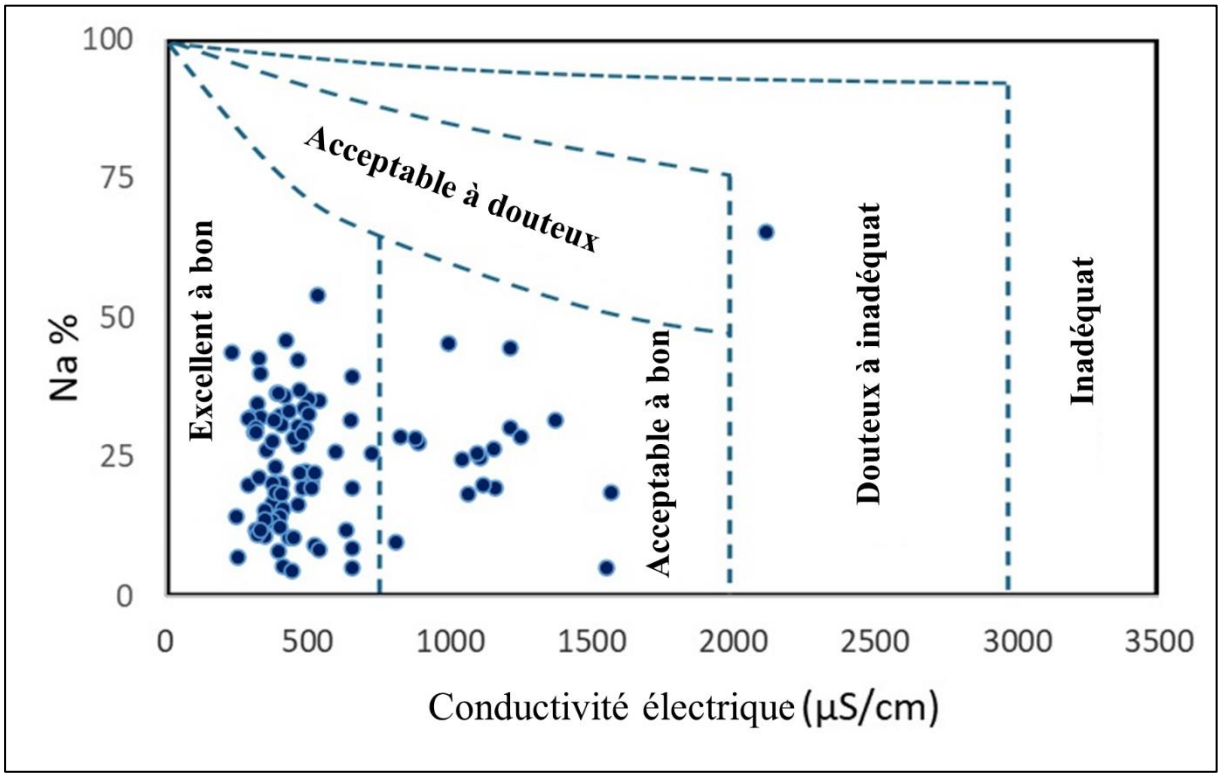


Figure 71 : Qualité des eaux souterraines d'irrigation basée sur la classification de Wilcox (1955),

Le diagramme détermine les classes d'eau en fonction des niveaux de SAR et de la conductivité électrique (Richards, 1954), L'analyse de la figure 72 révèle quatre catégories d'eaux souterraines :

(i) La classe S1C1 qui correspond à un faible niveau de danger pour le sodium et à une faible menace globale de salinité, et concerne uniquement quatre échantillons ;

(ii) La classe S1C2, avec un faible risque de sodium et une conductivité modérée , caractérisant la plupart des échantillons (75,53 %) ;

(iii) La classe S1C3 qui désigne des conditions de faible risque de sodium mais de forte menace de salinité globale, révélées pour dix-huit (18) échantillons (19,15 %) ;

(iv) Un seul échantillon présente des conditions exceptionnelles et appartient à la classe S3C3 avec un risque élevé de sodium et une menace élevée de salinité,

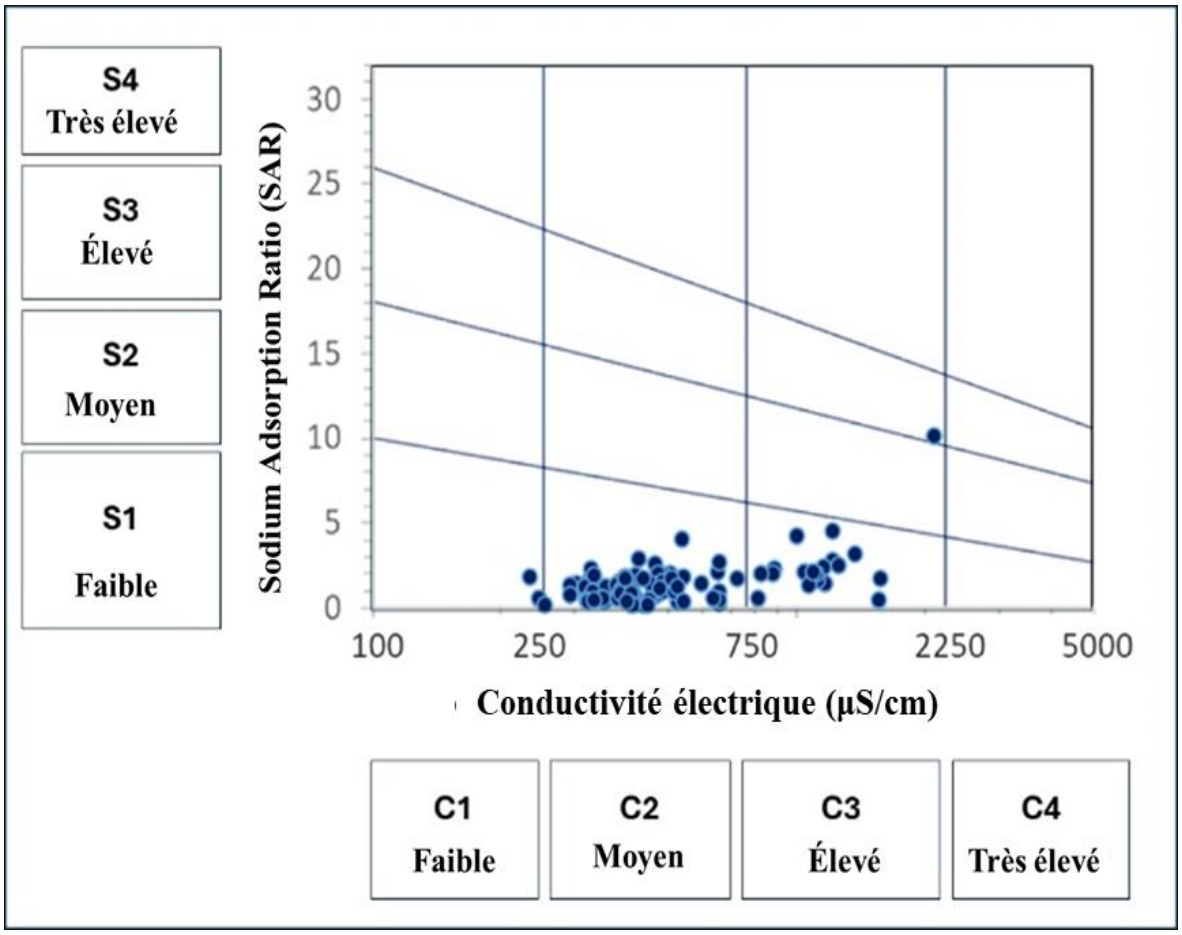


Figure 72 : Qualité des eaux souterraines d'irrigation basée sur le diagramme américain de Richards et al, (1954),

5 Discussion

L'analyse des faciès de piper a révélé des faciès de type carbonate, sulfate, chlorure, calcium et magnésien reflétant la nature lithologique carbonatée de l'aquifère de la région de Fritissa, L'impact de la nature des roches sur le chimisme des eaux est expliqué par un ensemble de processus d'interactions eau-roche, cas d'échange d'ions et la dissolution des minéraux, Ces échanges contrôlent la répartition des éléments dissous dans l'eau, notamment l'échange d'ions direct et indirect, l'échange d'ions inverse, l'évaporation et éventuellement les précipitations, comme le cas dans diverses régions arides et semi-arides du Maroc (Ettazarini, 2004 ; Ettazarini 2005, Ettazarini, 2006 ; Bahaj et al,, 2013 ; Ait Brahim et al, 2015 ; Kassou et al,, 2016 ; Al Yacoubi et al,, 2017 ; Ettazarini et El Jakani, 2017 ; Ait Lemkademe, 2023, Laghrib et al,, 2023 ; Ben Driss et al,, 2025), Le résultat de cet échange est défini par la salinité et la classe d'eau selon les classifications de de Richards et al, (1954) et de Wilcox (1955),

Les indices de qualité utilisés dans cette étude ciblent plusieurs aspects du comportement de l'eau lorsqu'elle est utilisée pour l'irrigation, Compte tenu des valeurs de pH (5,8 - 8,8) et de TDS (358,5 mg/l – 3301,33 mg/l) dans les eaux étudiées, il convient de considérer les niveaux de pH et de salinité globale et de les comparer au niveau de tolérance des plantes à ces niveaux, La productivité des cultures dépend en grande partie de la salinité des sols et de l'eau d'irrigation (Grattan, 2002 ; Ezlit et al,, 2010), Une salinité élevée peut également provoquer le colmatage des vides et une réduction de la porosité des sols, et ainsi réduire leurs conditions d'aération (Gonçalves et al, 2010 ; Ahamefule et al,, 2019), En effet, une salinité élevée peut affecter les plantes et provoquer des conditions de sol salines, tandis qu'un excès de sodium affectant le sol conduit à des conditions de sol sodiques (Fipps, 2021), Les valeurs de dureté en mg/l en CaCO3 (15,01 mg/l – 186,12 mg/l) incitent à réfléchir sur l'utilisation de cette eau, En effet, une eau douce avec une dureté inférieure à 50 mg/l n'est pas forcément bénéfique pour les plantes, mais la dureté souhaitée est comprise entre 50 et 150 mg/l, Lorsque la dureté dépasse 300 mg/l, il existe un risque de dépôts calcaires à long terme, dans les systèmes d'irrigation, sur les plantes et de colmatage des canalisations par déduction de l'efficacité de l'irrigation (Schiavon et Moore, 2021),

Les valeurs RSC, comprises entre-35,2 et 1,12, dépendent de la concentration de carbonates et de bicarbonates qui influencent l'adéquation de l'eau aux fins d'irrigation (Amadi et al,, 2019), Les eaux avec un RSC supérieur à 1,25 ne sont pas observées parmi les échantillons étudiés, Au-delà du seuil de 2,5, l'eau est de qualité passable présentant un risque d'apport de carbonates de sodium après précipitation de carbonates alcalino-terreux (Servant,

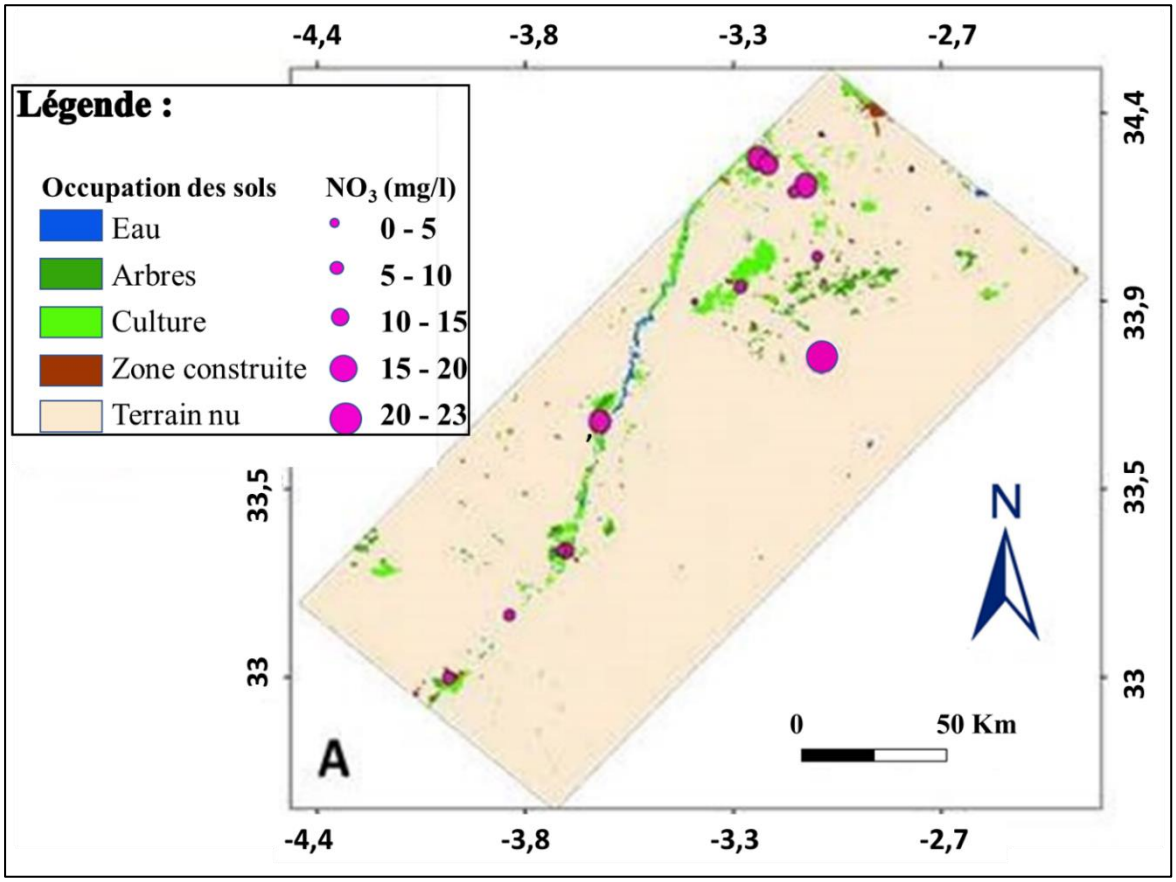
1978), En effet, le calcul de l'indice de perméabilité PI permet de prédire le comportement du sol après une utilisation prolongée de l'eau d'irrigation (Easton, 1950 ; Doneen, 1964, Singh et al,, 2018), Sur la base des résultats obtenus pour les valeurs PI (5,08 – 72,05), on remarque que les eaux de 87,23 % des échantillons sont bonnes pour une utilisation d'irrigation à long terme, Ceux-ci peuvent être utilisés sans aucune menace en cas de lessivage modéré (Doneen, 1964 ; Ragunath, 1987), tandis que les 12,77 % restants ne sont pas satisfaisantes et doivent être utilisées avec prudence, Ces eaux ne conviennent pas aux sols faiblement drainés (Doneen, 1964 ; Ragunath, 1987),

La combinaison des variables TDS, EC et SAR est un moyen courant d'évaluer l'adéquation des eaux souterraines à des fins d'irrigation, La classification des eaux souterraines selon le diagramme de Wilcox a révélé deux classes principales suggérant que les eaux sont de types « excellent » à « bon », à l'exception d'un échantillon classé dans la catégorie douteuse à inappropriée, La classification américaine de la salinité des eaux souterraines de Fritissa a montré un faible risque de sodium (S1) mais des niveaux de salinité en progression (C1, C2 et C3), Selon les directives du Laboratoire de Salinité (Fipps, 2021), une eau à faible teneur en sodium (S1) convient à presque tous les sols, mais la prudence est de mise pour les cultures sensibles au sodium, L'eau à faible salinité (C1) convient à la plupart des cultures sur la plupart des sols et nécessite peu de lessivage, La prudence est recommandée pour les sols peu perméables, L'eau à salinité moyenne (C2) est utilisable en cas de lessivage modéré et pour les cultures tolérantes à la salinité, Les eaux à forte salinité (C3) présentent un risque pour les sols dont le drainage est restreint, Une gestion pour le contrôle de la salinité peut être nécessaire dans ce cas et seules les cultures présentant une bonne tolérance à la salinité peuvent être envisagées, L'échantillon faisant exception avec le risque de sodium le plus élevé et la salinité la plus élevée est classé dans la catégorie S3C3, Le même échantillon est révélé comme douteux à inadapté par la classification de Wilcox, Il présente des quantités élevées de sodium, de chlorure et de sulfate, et son faciès aquatique est de type Na-K-SO4-Cl, L'échantillon est prélevé à partir d'un plan d'eau superficiel (12,6 m de profondeur) et sa localisation se situe sur la zone nue, mais à proximité d'un cours d'eau en aval de la zone bâtie,

La distribution spatiale des nitrates et nitrites a été comparée à la carte d'occupation des sols (Figures 73A et B) où l'on constate que les points d'échantillonnage indiquant des niveaux élevés de ces éléments sont localisés soit dans des zones agricoles, où les engrais sont employés pour augmenter fertilité du sol,, ou en aval des zones urbaines, où les déchets ménagers et les eaux usées sont fréquemment rejetés, Ces observations soutiennent l'hypothèse d'une possible source de contamination anthropique, Ainsi, l'influence

anthropique doit être prise en compte pour expliquer la chimie de l'eau dans les régions où les eaux usées sont directement rejetées dans le milieu naturel,

Les résultats obtenus dans cette étude permettent de mettre en évidence plusieurs caractéristiques de la région, et de recommander des mesures et précautions à prendre pour une utilisation sécuritaire des eaux souterraines, On s'attend à ce que la demande en eau potable et en eau d'irrigation soit de plus en plus élevée avec l'expansion des zones bâties et des terres cultivées, remplaçant progressivement les terres nues, grâce aux investissements dans l'agriculture régionale,



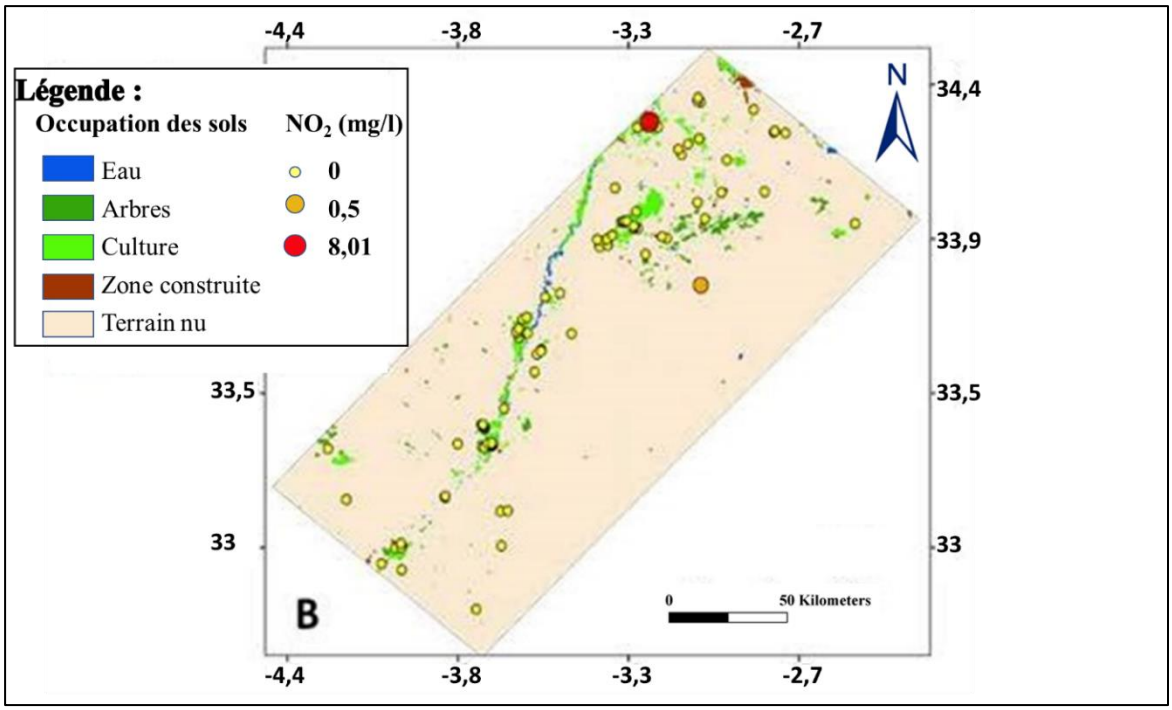


Figure 73 : Répartition spatiale des nitrates (A) et nitrites (B) dans les eaux souterraines de la région de Fritissa,

6 Conclusion

La qualité chimique des eaux souterrains de la région de Fritissa reflète la particularité de l'aquifère profond, Outre une composition chimique classique pour le secteur de type bicarbonaté calcique, elles portent en elles une signature sulfatée et magnésienne (Ben Driss et al, 2024), propre à une composante d'origine profonde, Ces caractéristiques n'ont aucune influence sur la potabilité de l'eau, Les normes en matière de qualité d'eau de boisson sont largement respectées, Les différentes analyses ne révèlent aucun signe typique de pollution industrielle, urbaine ou agricole,

L'analyse chimique des eaux souterraines de la région a permis de déterminer les principaux caractères de l'eau et à évaluer son aptitude à l'irrigation, L'approche est basée sur l'analyse des concentrations en ions majeurs (Ca, Mg, Na, K, HCO3, CO3, Cl, SO4, NO3, NO2), des valeurs de pH et le calcul de nombreux indices de qualité courants, notamment les solides dissous totaux (TDS, dureté totale (TH), pourcentage de sodium Na%, carbonate de sodium résiduel (RSC), taux d'adsorption du sodium (SAR) et indice de perméabilité (PI), Les résultats ont révélé que la région subit de plus en plus des contraintes pressantes causées par une demande croissante en eau potable et en eau d'irrigation, couplée à une pénurie importante de ressources en eau dans des conditions climatiques arides et semi-arides, L'étude a démontré

des caractères variables de la chimie de l'eau dans la région, En effet, les eaux sont de types faciès bicarbonate calcique et magnésienne (Ca-Mg-HCO_3), faciès sulfaté calcique et magnésienne (Ca-Mg-SO_4) et faciès mixtes, Les graphiques de distribution ont révélé de nombreux processus d'interaction eau-roche possibles contrôlant la chimie de l'eau, tels que l'échange d'ions, l'échange d'ions inverse, l'échange d'ions direct, l'échange d'ions indirect, en plus des processus d'évaporation et de précipitation possibles,

L'évaluation de l'adéquation de l'eau à des fins d'irrigation est réalisée à l'aide de deux classifications courantes : la classification de Wilcox (1955), qui a révélé des catégories « excellente », « bonne » et « bonne » à « admissible », comme dominantes, et la classification de Richards (1954) adoptée par le Salinity Laboratory des États-Unis, Cette dernière a apporté plus de précisions et a permis de distinguer trois classes : S1C1, S1C2 et S1C3 pour lesquelles des précautions et des mesures à prendre en compte sont déterminées,

Les deux classifications ont permis de détecter un échantillon dont la qualité est probablement détériorée par les déchets ménagers et les eaux usées, L'impact anthropique est alors démontré par l'identification des points d'eau contaminés par les nitrates et les nitrites dans les zones agricoles et à proximité des zones résidentielles, Ainsi, la bonne compréhension des caractères chimiques de l'eau et des facteurs contrôlant leur évolution, dans le temps et dans l'espace, nécessite la prise en compte de l'impact anthropique en plus des processus naturels communs,

CONCLUSION GENERALE

La région de la Moyenne Moulouya est une zone aride présentant plusieurs enjeux , tels que la disponibilité limitée des ressources en eaux, la demande croissante en eau en relation avec le développement démographique et l'évolution des activités humaines, ainsi que les contraintes liées aux changements climatiques, Dans ce contexte, les ressources en eau superficielles et celles des aquifères alluvionaux sont loin d'être suffisantes pour répondre aux besoins variés des populations, d'où le recours aux ressources en eau des aquifères semi-profonds et profonds, L'exploration et l'exploitation de ces derniers présentent plusieurs défis tels que leur caractérisation géologique, une bonne connaissance de leurs profondeurs, leur productivité ainsi que les modalités de leur exploitation durable,

L'application du modèle de l'indice de potentiel des eaux souterraines à l'aquifère fracturé semi-profond a permis d'identifier plusieurs zones en fonction de leur potentiel prédit, En effet, la zone à fort potentiel occupe 0,16%, tandis que les autres zones, moyennement favorables ont une couverture de 5,8% et que la grande partie de la région montre une très faible à faible potentialité avec une couverture de 90,5% dans l'ensemble de la zone étudiée, Les zones à fort potentiel se trouvent autour des zones fracturées, L'estimation de la précision de la carte de potentialité, est basée sur un sous-échantillon de 18 forages présentant 10 % du nombre total (179) des points employés pour la réalisation du modèle,

Pour le système aquifère profond, les informations sur les conditions de la lithologie et la fracturation obtenues depuis la surface et la subsurface changent avec la profondeur, D'où la sélection des techniques diagraphiques convenables à cette situation,

Grâce aux techniques de diagraphie, mises en œuvre au niveau des forages Bouyaakoubate et Dkikira, l'enregistrements de Gamma-ray, la polarité spontanée, les résistivités, et la caliper ont permis de préciser la nature lithologique des couches au niveau des forages et de localiser les profondeurs des niveaux fracturés ou kasrstifiés ainsi que les profondeurs des niveaux aquifères, Au niveau du forage de Bouyaakoubate, les données de gamma-ray ont révélé une nature lithologique dominée par les calcaires et calcaires dolomitiques de 500 à 630m, suivie par des calcaires marneux à intercalations calcaires pour le reste du forage, Les données de caliper ont montré des niveaux de fracturation et karstification aux profondeurs 645 et 670m, Tandis que les données des résistivités ont montré que la zone

aquifère se situe à 630m de profondeur, Dans le cas du forage Dkikira, la lithologie dominante est du calcaire marneux entre 200 et 380m, puis passe à des calcaires et calcaires dolomitiques jusqu'à 550m, La fracturation est localisée à 250m selon l'enregistrement du caliper, Les données des résistivités montrent que l'aquifère est situé encore plus en bas malgré la lithologie favorable,

Dans les forages de Bouyaakoubate, Dkikira et Fritissa, la demande à la détermination des conditions d'exploitation durables du système aquifère profond a nécessité la réalisation des tests de pompage, premièrement par paliers puis le pompage de longue durée, Cette approche a permis de déterminer les débits d'exploitation durables des trois forages : 259,2 m^3/h pour le forage de Bouyaakoubate, 55,08 m^3/h pour Dkikira et 262,4 m^3/h pour Fritissa, soit un total de 576,72 m^3/h, un débit assez suffisant pour satisfaire les besoins en eau de la population estimés à 70 956 m^3/an pour l'horizon 2035 selon les rapports de l'ABHM (2024),

En prenant en considération l'importance de l'activité agricole dans la région de Fritissa, la détermination des classes de qualité d'eau dédiée à l'irrigation s'avère cruciale pour la bonne gestion des ressources en eaux, L'approche utilisée, basée sur l'analyse chimique des éléments majeurs, a révélé une salinité (TDS) variant entre 358,5 et 3301,3 mg/l, Les processus contrôlant le chimisme des eaux sont nombreux, notamment l'interaction eau-roche en terme d'échange directe et inverse des ions (Ca et Mg) et de dissolution des minéraux des roches, cas de la calcite ($CaCO_3$), la dolomite ($CaMgCO_3$), le gypse $CaSO_4H_2O$), l'anhydrite ($CaSO_4$) et l'halite (NaCl), Les classifications de Richards (1954) et Wilcox (1955) ont été appliquées et ont montré que la majorité des échantillons sont classés dans les classes « excellent à bon » et « acceptable à bon » pour la classification de Wilcox et dans les classes de « S1C2 » et « S1C3 » pour la classification de Richards, Les eaux des classes « excellent à bon » et de « S1C2 » sont utilisables pour l'irrigation, tandis que les eaux des classes « acceptable à bon » et « S1C3 » doivent être utilisées avec prudence pour les plantes tolérant un certain niveau de salinité,

La situation de la région de la Moyenne Moulouya, notamment la région de Fritissa, présente un cas idéal où l'approche multiméthode est indispensable pour la bonne gestion des ressources en eau en ses différentes étapes : prospection, extraction et gestion durable, Le choix de la méthode est dépendant du contexte et des objectifs visés, Ainsi, la cartographie visant la réalisation des cartes de potentiel d'eau souterraine pour les aquifères semi-profonds, l'application des techniques de diagraphie et de tests de pompage pour les aquifères profonds et l'analyse chimique des eaux souterraines constituent les éléments d'une approche

multiméthode dont l'efficacité est confirmée dans un contexte complexe et sous climat aride à semi-aride tel que le Maroc oriental, Cette approche peut être applicable dans d'autres zones similaires pour répondre aux enjeux de durabilité, de sécurité et d'optimisation d'exploitation des aquifères, Toutefois, l'application de l'approche multiméthode doit bénéficier des nouvelles technologies pour l'acquisition des données fiables et du suivi à long terme pour assurer la durabilité des aquifères,

Recommandations

La gestion des ressources en eau dans la région de la Moyenne Moulouya est limitée par plusieurs contraintes, notamment la complexité géologique du terrain, la fracturation en profondeur, la variabilité saisonnière des paramètres hydrogéologiques, l'absence de données techniques actualisées et la surexploitation des aquifères semi-profonds, Face à ces défis, il est impératif d'approfondir l'analyse du terrain avant toute implantation de nouveaux points d'eau, L'approche de caractérisation lithologique et hydrodynamique permet non seulement d'identifier les formations géologiques favorables, mais aussi de déterminer les profondeurs optimales, les débits critiques et les capacités d'exploitation durable, L'utilisation du modèle IPES et de la carte IPES161 constitue un outil stratégique pour localiser les zones propices au forage, L'amélioration de ces outils par l'intégration de paramètres tels que la qualité de l'eau, la dynamique des nappes et les tendances climatiques à long terme renforcerait leur efficacité,

Dans un contexte de déficit hydrique croissant, il est crucial de considérer les aquifères profonds comme des réserves stratégiques à mobiliser uniquement en cas de besoin, La gestion durable passe également par un contrôle rigoureux de l'exploitation des eaux souterraines afin de maintenir un équilibre entre les besoins et la disponibilité, Il est recommandé de protéger les nappes superficielles par des techniques de tubage et de cimentation adaptées aux forages, Enfin, l'intégration des résultats de recherche dans les politiques de prospection et de gestion permettra d'orienter les décisions vers une exploitation plus rationnelle et résiliente des ressources hydriques,

Références

Abd Manap, M,A,, Sulaiman, W,N,A,, Ramli, M,, Pradhan, F,B,, Surip, N,, 2012, A knowledge- driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia, Arabian Journal of Géosciences, 6(5), 1621-1637,

ABHMO (Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya d'Oujda), 2011, Rapport d'étude géophysique par la méthode électrique au bassin de la Moulouya - Fritissa d'Oulad jerrar - région d'outat Oulad el Haj - province de Boulmane Moulouya– projet n° 02/2011/ABHM,

ABHMO (Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya d'Oujda), 2023, Données climatiques de la moyenne Moulouya,

ABHMO (Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya d'Oujda), 2024, Données climatiques des station hydrologiques au niveau de la moyenne Moulouya,

Addina, A,I,, , Hendrayana, H,, Yugamaris, G, (2024) The Priority Areas for Groundwater Utilization in Fractured Rock Formation, Pangandaran Regency, IOP Conf, Series: Earth and Environmental Science 1373 (2024) 012023, https://doi,org/10,1088/1755-1315/1373/1/012023

Adelin, A,N,, Hartono, H,I,R,, Putra, D,P,E,, Pranantya, P,A, (2024) Mapping groundwater potential zone using groundwater potentiality index in Sulamu, Central Fatuleu and West Fatuleu, Kupang, East Nusa Tenggara, IOP Conf, Series: Earth and Environmental Science, https://doi,org/10,1088/1755-1315/1311/1/012024

Agence du bassin hydraulique de la Moulouya d'Oujda (ABHM) : fiches des forages dans la zone d'études

Agence du bassin hydraulique de la Moulouya d'Oujda (ABHM) : fracturation de la zone à partir des études géophysiques

Agha, B,A,F, Al-Tamimi, O,S, (2021), Using pumping tests and two techniques of the water balance to assess the aquifer hydraulic characteristics and the groundwater recharge of Shewasoor Sub-Basin Kirkuk, NE Iraq, Iraqi Geological Journal, 55(1B), 82–93, https://doi,org/10,46717/ igj,55,1B,8Ms-2022-02-24

Ahamefule, H, E,, Olaniyan, J, O,, Eifediyi, E, K,, Izuogu, B, N,, Amana, M, S,, Nwokocha, C, C,, et al, (2019), Effluents in irrigation water: a case study of Asa River on farmlands in Ilorin, Nigeria, Bulg, J, Soil Sci, Agrochem, Ecol, 53, 2–2019,

Ait Brahim, L, and Chotin, P,, 1990, Oriental Moroccan Neogene volcanism and strike-slip faulting, Journal of African Earth Sciences (and Middle East), Vol, 11, Issues 3–4, p, 273-280, doi: 10,1016/0899-5362(90)90005-Y

Ait Brahim, Y,, Benkaddour, A,, Agoussine, M,, Ait Lemkademe, A,, Yacoubi, L, A,, and Bouchaou, L, (2015), Origin and salinity of groundwater from interpretation of analysis data in the mining area of Oumjrane, Southeastern Morocco, Environmental Earth Sciences 74, 4787–4802, doi:10,1007/s12665-015-4467-7

Ait Lemkademe, A,, El Ghorfi,M,, Zouhri, L,, Heddoun, O,, Khalil, A,, and Maacha, L, (2023), Origin and salinization processes of groundwater in the semi-arid area of zagora graben, southeast Morocco, Water 15, 2172, doi:10,3390/w15122172

Akame, J,M,, Mvondo, O,J,, Olinga, J,B,, Ossondo, J,, Mbih, P,K,, 2013, Application of (MNT) SRTM numeric field models for mapping structural lineaments: application to the Mezesse Archean, East of Sangmélima (South Cameroon), Geo-Eco-Trop, 37(1), 1–80,

Al-Gburi, M,R,G,, Al-Khatony, S,E,, Znad, R,Kh,, Al-Sumaidaie, M,A,H,, 2022, Mapping of Groundwater Potential Zone Using GIS and Remote Sensing of Shwan Sub-Basin, Kirkuk, NE Iraq, Iraqi Geological Journal 55 (2B), 62-72, 31, doi: 10,46717/igj,55,2B,6Ms-2022-08-22

Al-Hayali , H, D,, Al-Tamimi, O, S, I,, Hamamin, D, F,, 2021, Identification of vulnerable zones for groundwater using a GIS-based DRASTIC Technique in Shwan Sub-basin, North-Iraq,Iraqi Journal of Science, 1857-1597, https://doi,org/10,24996/ijs,2021,62,5,21

Amadi, A, N,, Tukur, A,, Dan-Hassan, M, A,, Okunlola, I, A,, Shauibu, I,, Egharevba, J, K,, et al, (2019), Groundwater quality assessment for irrigation purposes: a case study of minna, Niger state, north-central Nigeria, J, Chem Soc, Nigeria 44 (4), 633–640,

Ayer, R, S,, and Westcot, D, W, (1985), Water quality for agriculture, Irrigation and drainage paper 29, Rome: FAO, 97p,

Bahaj, T,, Kacimi, I,, Hilali, M,, Kassou, N,, and Mahboub, A, (2013), Preliminary study of the groundwater geochemistry in the sub-desert area in Morocco: case of the ziz-ghris basins, Procedia Earth and Planetary Science 7, 44–48, doi:10,1016/j,proeps, 2013,03,162

Ben Driss , M, A,, Hahou, Y,, Ettazarini, S,, Boudad, L,, El Amrani, M,, Ifliliss, A,, Courba, S,, 2024, Groundwater potential mapping in fractured aquifers using remote sensing and GIS technology in the Middle Moulouya basin, Morocco, *Iraqi Geological Journal*, Volume 57(2024) article number 1F, p172-190, https://doi,org/10,46717/igj,57,1F,14ms-2024-6-23

Ben Driss M,A,, Ifliliss, A,, Ettazarini, S,, Hahou, Y,, Boudad, L,, El Amrani, M,, Courba, S,, 2024, Assessment of groundwater suitability for irrigation purposes in the Fritissa region, Moulouya, Morocco, 2024 , Front, Geochem,, Sec, Environmental Geochemistry, Volume 2 – 2024, https://doi,org/10,3389/fgeoc,2024,1307252

Ben Driss, M, A,, Ifliliss, A,, Ettazarini, S,, Hahou, Y,, 2025, Lithological and Hydrodynamic Characterization of the Deep Aquifer Using Logging Techniques and Pumping Tests in the Fritissa Area, Middle Moulouya, Morocco, Journal of Ecological Engineering (JEE), Ecological Engineering & Environmental Technology, 2025, 26(4), 237–250, https://doi,org/10,12912/27197050/200838

Bernini, M,, Boccaletti, M,, Moratti, G,, Papani, G,, 2000, Structural development of the Taza- Guercif Basin as a constraint for the Middle Atlas Shear Zone tectonic evolution, https://doi,org/10,1016/S0264-8172(99)00042-2

Bhandari, J,,Russo, D,, 2024, Global Optimality Guarantees for Policy Gradient Methods, OPERATIONS RESEARCH Vol, 72, No, 5, pp, 1906–1927, https://doi,org/10,1287/opre,2021,0014

Biémi, J,, 1992, Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopique des aquifères discontinus de sillons et des aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat d'État, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 480 p,

Bourdet, D,, Whittle, T,M,, Dougals, A,A,, Pirard, Y,M,, 1983, a new set of type curves simplifies well test analysis,world oil, 196, 95-106, Available online: https://blasingame,engr,tamu,edu/z_zCourse_Archive/P648_19A/P648_19A_Reading_Portfolio/World_Oil_(Bourdet)_Pressure_Derivative_Type_Curves_(OCR)_(pdf),pdf

Bourgeois, M,, 1976, reconnaissance des aquifères par forages estimation des caractéristiques des terrains et des fluides en particulier à l'aide des diagraphies, Département hydrogéologie, CI-03599, B,P, 6009 - 45018 Orléans Cedex, 77 SGN 487 HYD,

BRGM-Aquater, 1991, Exploitation des eaux souterraines en socle cristallin et valorisation agricole : projet pilote expérimental en milieu rural pour des zones soudano- sahéliennes et sahéliennes, Rapport BRGM-AQUATER R 33576, BRGM, Orléans, Vol, 4,

Combe, M,, Simonot, M,, 1971, La Moyenne Moulouya, In : Ressources en eau du Maroc, Tome 1- Domaine du Rif et du Maroc Oriental, Edition service géologique Maroc, Rabat, https://fr,scribd,com/document/496857679/Ressources-en-Eau-du-MAROC-Tome-I

Commission Consultative de Régionalisation (CCR),, 2011, Rapport sur la régionalisation avancée, Livre1 : Conception générale, Rabat,

Cooper, H, H,, & Jacob, C, C,, 1946, A generalized graphiquical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, Am, Geophys, UnionTrans,, Vol, 27, No, 04, pp, 526-534, http://dx,doi,org/10,1029/TR027i004p00526

David, N, K,, 2012, Mapping groundwater potential in Kitui District, Kenya using geospatial technologies», Int,J, Water Resour, Environ, Eng,, vol, 4, no 1, doi: 10,5897/IJWREE11,119,

De Lasme, O, Z,, Lasm ,T,, Oga, M,S,, Youan, T, M,, Baka, D,, Ettien, F, B,, Kouakou, S,, Onetie, O, Z,, Yao, T, K,, 2012, Analyse des propriétés hydrodynamiques des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire), Estudios Geológicos, No 68, pp 217-232, https://doi,org/10,3989/egeol,40672,159

Doneen L,D, Notes on water quality in agriculture, In Water Science and Engineering Paper 4001, Dept of Water, Science and Engineering, Univ of California, Davis, USA; 1964,

DRPE (Direction de la recherche et de la planification des eaux de Rabat) : données des forages de la zone d'etude Direction provinciale de l'équipement de Boulmane : données des forages de la zone d'etude,

DRPE, (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau-Rabat),1998, Rapport Etude par sismique réflexion à haute résolution et synthèse sismique dans la Moyenne Moulouya et le couloir Taourirt – Oujda- marché nº 37/97/98 DRPE,

DRPE, (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau-Rabat),2017, Rapport Travaux de réalisation d'un forage de reconnaissance profond dans la commune de fritissa, province de boulmane - MARCHE N° 07/2017/DRPE

DRPE, (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau-Rabat), 2023, L'hydraulique en chiffres, Ministère de l'Equipement et de l'Eau,

Duffield, G,M,, 2007, AQTESOLV for Windows Version 4,5 User's Guide, HydroSOLVE, Inc,, Reston, VA, https://doi,org/10,1111/j,1468-2486,2007,00643,x,

Easton, E,M,, 1950, Significance of carbonate in irrigation water, Soil Science, 69(2):123-133,

El Kati, I,, Benammi, M,, Tabyaoui, H,, Ouabid, M, & Benammi, M, (2022), Structural style and deformation mechanism of Neogene series of the Guercif basin (NE-Morocco), Journal of Iberian Geology, 48, 281–296, https://doi:10,1007/ s41513-022-00196-1

Elmahdy, S, I, and Mohamed, M, M,, 2014, Groundwater potential modelling using remote sensing and GIS: a case study of the Al Dhaid area, United Arab Emirates, Geocarto Int,, vol, 29, no 4, p, 433-450, doi: 10,1080/10106049,2013,784366,

Ettazarini, S, and El Jakani, M,, 2020, Mapping of Groundwater Potentiality in fractured Aquifers Using Remote Sensing and GIS Techniques: The Case of Tafraoute Region, Morocco, Environ, Earth Sci,, vol, 79(5), Article n°105, doi: 10,1007/s12665-020-8848-1,

Ettazarini, S,, 2004, Incidences of water-rock interaction on natural resources characters, Oum Er-rabia basin, Morocco, Environmental Geology, 47(1):69-75, Available: http://dx,doi,org/10,1007/s00254-004-1129-6

Ettazarini, S,, 2005, Processes of water-rock interaction in the Turonian aquifer of Oum Er-rabia basin, Morocco,Environmental Geology, 49:293-299, Available: http://dx,doi,org/10,1007/s00254-005-0088-x

Ettazarini, S,, 2006, Mapping of groundwater quality in the Turonian aquifer of Oum Er-rabia basin, Morocco: a case study, Environmental Geology, 50:919-929, http://dx,doi,org/10,1007/s00254-006-0263-8

Ettazarini, S,, 2007, Groundwater potentiality index: a strategically conceived tool for water research in fractured aquifers, Environ Geol 52:477–487, doi:10,1007/s00254-006-0481-0

Ettazarini, S,, 2010, GIS-based multi-source database, A strategic tool for sustainable development planning: case of Qalaat Mgouna, Morocco, Environmental Earth Sciences, 62:1437–1445, http://dx,doi,org/10,1007/s12665-010-0629-9

Ettazarini, S,, and El Jakani, M, (2017), Assessment of water suitability for irrigation purposes in Qalaat Mgouna area, Morocco, Am, Journ, of Innov, Res, and Appl, Sc, 4 (5), 126–135, ISSN:2429-5396,

Ezlit, Y, D,, Smith, R, J,, and Raine, S, R, (2010), A review of salinity and sodicity in irrigation, Cooperative research Center for irrigation futures irrigation matters series No, 01/10,

FAO, 2013, Chapitres spéciaux de La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture, Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture Rome, E-ISBN 978-92-5-207672-8 (pdf),

Fipps, G, (2021), Irrigation water quality standards and salinity management strategies, Texas, United States: Texas A&M University, EB-1667, 18p,

Fisher, R, S,, and Mullican III,W, F, (1997), Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the northern chihuahuan desert, trans-pecos, Texas, USA, Hydrogeology Journal 5 (2), 4–16, Available:, doi:10,1007/s100400050102

Geological Service of Morocco GSM ,, 1964a, Geological map of Morocco, Sheet of Hassi El Ahmar 1/100 000 scale, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc N° 190,

Geological Service of Morocco GSM ,, 1964b, Geological map of Morocco, Sheet of Maatarka 1/100 000 scale, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc N° 191,

Geological Service of Morocco GSM ,, 1985, Geological map of Morocco 1/1 000 000 scale,Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc N° 260,

Geological Service of Morocco GSM,, 1972a, Geological map of Morocco, Sheet of Debdou 1/100 000 scale, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc N° 226,

Geological Service of Morocco GSM,, 1972b, Geological map of Morocco, Sheet of Hassian Ed Diab 1/100 000 scale, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc N° 227,

Geological Service of Morocco GSM,, 1991, Geological map of Morocco, Sheet of Ain Bni Mathar 1/100 000 scale, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc N° 361,

Geological Service of Morocco GSM,, 1995, Geological map of Morocco, Sheet of Taourirt 1/100 000 scale, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc N° 364

Gharmane, Y,, Hinaje, S,, Amrani, S,, El Fartati, M,, Yaagoub, D,, 2019, Role of the Chronology of the Tectonic Phases in the Distributionof Hydrothermal Mineralizations in the Mining District ofTazekka (Morocco), Journal of Engineering Research and Application, Vol, 9, Issue 6 (Series -II), p, 49-62, ISSN : 2248-9622

Gibbs, R,J,, 1970, Mechanisms of controlling world's water chemistry, Science, 170 :1088-1090,Available :http://dx,doi,org/10,1126/science,170,3962,1088

Gonçalves, R, A, B,, Gloaguen, T, V,, Folegatti, M, V,, Libardi, P, L,, Lucas, Y,, and Montes, C, R, (2010), Pore size distribution in soils irrigated with sodic water and wastewater, Revista Brasileira de Ciência do Solo 34, 701–707, doi:10,1590/s0100- 06832010000300011

Grattan, S, R, (2002), Irrigation, water salinity and crop production, California, United States: University of California, Publication n° 8066, 10p, Available at: http://anrcatalog, ucdavis,edu,

Gutierrez, A,, Dewandel, B,, 2013, L'interprétation des pompages d'essai : quelles nouveautés?, hydrogéologie et hydrologie, BRGM Géologues n°178, pp 49-53 https://www,researchgate,net/publication/260201267

Hacini, Y,, 2006, Application des méthodes géophysiques à l'étude de deux sites (Kappelen et Grenchen) de l'aquifère poreux complexe du Seeland, Thèse Faculté des géosciences et de l'environnement de l'Université de Lausanne,

Handa, B,K,, 1969, Description and classification of media for hydrogeochemical investigation, In Symposium on groundwater studies in arid and semi-arid regions, Roorkee, India,

Hanich, L,, Zouhri, L,, Vachard,D,, Colbeaux, J,P,, Gorini, C,, 2008, Une approche multicritères our l'implantation de forages dans les zones productives des systems fissurés / A multicriteria approach for well drilling in productive zones of fissured systems, Hydrological Sciences Journal, 53(1), 192-203, DOI: 10,1623/hysj,53,1,192

Hasibuan, H,, Rafsanjani, A,H,, Putra, D,P,E,, Surjono, S,S,(2021) Mapping of groundwater potentiality index parameters using remote sensing and GIS techniques in the southern mountain, Yogyakarta Special Region, IOP Conf, Series: Earth and Environmental Science 930 (2021) 012064, https://doi,org/10,1088/1755-1315/930/1/012064

Haut-Commissariat au Plan,, 2007, Governmental demographic data, Official website, http://www,hcp,ma

Hsieh, B,Z,, Lewis, C,, Lin, Z,S,, 2005, Lithology identification of aquifers from geophysical well logs and fuzzy logic analysis: Shui-Lin Area, Taiwan, Computers & Geosciences, Volume 31, Issue 3,Pages 263 – 275, https://doi,org/10,1016/j,cageo,2004,07,00

James, D,W,, Hanks, R, J,, and Jurinak, J, H, (1982), Modern irrigated soils, USA: John Wiley and Sons NY,

Kassou, N,, Bahaj, T,, Morarech, M,, Hejja, Y,, Hilali, M,, Baidder, L,, et al, (2016), Assessment of groundwater chemistry for the Reg basin (Oriental Anti-Atlas) southeastern Morocco, Environ, Sci, 7 (12), 4511–4524,

Koffi, B,, M, Schulz, F,-M, Bréon, F, Dentener, B,M, Steensen, J, Griesfeller, D, Winker, Y, Balkanski, S,E, Bauer, N, Bellouin, T, Berntsen, H, Bian, M, Chin, T, Diehl, R, Easter, S, Ghan, D,A, Hauglustaine, T, Iversen, A, Kirkevåg, X, Liu, U, Lohmann, G, Myhre, P, Rasch, Ø, Seland, R,B, Skeie, S,D, Steenrod, P, Stier, J, Tackett, T, Takemura, K, Tsigaridis, M,R, Vuolo, J, Yoon, and K, Zhang, 2016: Evaluation of the aerosol vertical distribution in global aerosol models through comparison against CALIOP measurements: AeroCom phase II results, *J, Geophys, Res, Atmos*,, 121, no, 12, 7254-7283, doi: 10,1002/2015JD024639,

Labassi, K,, 1991,Evolution tectonosédimentaire de la série Méso-Cénozoïque de la moyenne Moulouya, Lithostratigraphie, tectonique, décompaction et calcul de la subsidence, Thèse de 3e cycle, Univ, Pau,of African Earth Sciences (and Middle East), Vol, 11, Issues 3–4, p, 273-280, http://dx,doi: 10,1016/0899-5362(90)90005-Y

Laghrib, F,, Bahaj, T,, El Kasmi, S,, Hilali, M,, Kacimi, I,, Nouayti, N,, et al, (2024), Hydrogeochemical study of groundwater in arid and semi-arid regions of the Infracenomanian aquifers (Cretaceous Errachidia basin, Southeastern Morocco), Using hydrochemical modeling and multivariate statistical analysis, Journal of African Earth Sciences 209 (209), 105132, doi:10,1016/j,jafrearsci,2023,105132

Liu, H, (2017), Principles and Applications of Well Logging, Second edition Springer Geophysics, Berlin, Germany, https:// doi,10,1007/978-3-662-54977-3,

Machiwal, D, and Jha, M,K,, 2011, Assessment of groundwater potential in a semi-arid region of India using remote sensing, GIS and MCDM techniques, Water Resour Manag 25(5):1359–1386, doi:10,1007/s11269-010-9749-y,

Machiwal, D,, Rangi, N,, Sharma, A,, 2015, Integrated knowledge- and data-driven approaches for groundwater potential zoning using GIS and multi-criteria decision making techniques on hard-rock terrain of Ahar catchment, Rajasthan, India, Environ Earth Sci, Vol, 73(4):1871–1892,doi:10,1007/s12665-014-3544-7

Mauritius Government Gazette (1999), Guidelines for irrigation water quality,General Notice n° 617(1999), Available at: https://faolex,fao,org/docs/pdf/mat53079,pdf,

Milano, M,, 2009, Les Changements Climatiques en Méditerranée et les Impacts prévisibles sur les Ressources en Eau, Mémoire de Master Recherche Eau et Environnement, Université de Montpellier 2, juin 2009

Ouaip, version francaise : Klinka, T,,Gutierrez, A,, Elsass, j,, Letat, B,, 2020, manuel OUAIP v2 – Outil d'Aide à l'interpretation des pompages d'essai, Rapport Final, BRGM/RP-68509-FR,136P, http://infoterre,brgm,fr/rapports/RP-68509-FR,pdf

Piper, A, M, (1944), A graphic procedure in the geochemical interpretation of wateranalyses, Trans, AGU 25 (6), 914, doi:10,1029/TR025i006p00914

PNAEPI (Programme National pour l'Approvisionnement en Eau Potable et l'Irrigation), 2020-2027,https://www,equipement,gov,ma/eau/Strategies-plans-programmes/Pages/PNAEPI-2020-2027,aspx

Raghunath Formerly, H,M,, 1987, Hydrology (Principles Analysis Design), Revised Second Editionn, NEW AGE INTERNATIONAL PUBLISHERS, ttps://mlsu,ac,in/econtents/4167_Hydrology_Principles-H%20M%20RAGHUNATH%20,pdf

Richards, L,A,, 1954, Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils, US Department of Agriculture Hand Book,

Rodier J, Legube B, Merlet N, 2009, L'Analyse de l'Eau (9e edn), DUNOD: Paris,

Rodier, J,, Geoffray, Ch,, Kovacsik, G,, Laporte, J,, Verneau, J,, and Vial, J, (1975), L'analyse de l'eau, Eaux naturelle, eaux résiduelle, eaux de mer, Tome 1, Paris: DUNOD Edition, 629,

Saaty, T,L,, 1977, A scaling method for priorities in hierarchical structures, J Math Psychol 15:234–281, doi: 10,1016/0022-2496(77)90033-5

Sani, F,, Zizi, M,, and Bally, A,W,, 2000, The Neogene–Quaternary evolution of the Guercif Basin (Morocco) reconstructed from seismic line interpretation, Marine and Petroleum Geology, Vol,17,Issue3,1,p,343-357,doi:10,1016/S0264-8172(99)00058-6,

Schiavon, M,, and Moore, K, K, (2021), How to properly read your irrigation water analysis for turf and landscape: ENH1352/ep616, 12/2021, EDIS 2021 (6), doi:10,32473/edis-ep616-2021

Serra, O, (1984), Fundamentals of well log Interpretation, 1, The acquisition of logging data, Developments in Petroleum Science 15A, Elsevier Editions, New York, USA,

Serra, O, (2008), Well logging Handbook, Technip Editions, Paris, France,

Singh, L,K,, Jha, M,K, and Chowdary, V,M,, 2018, Assessing the Accuracy of GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis Approaches for Mapping Groundwater Potential, Ecol, Indic,, vol, 91, p, 24-37, doi: 10,1016/j,ecolind,2018,03,070,

Singla, S,, 2009, Impact du changement climatique global sur les régimes hydroclimatiques au Maroc : tendances, ruptures et effets anthropiques sur les écoulements, Mémoire de Master Recherche Eau et Environnement, Université de Montpellier 2, France,

Snoussi, M,, Haïda, S,, Imassi, S,, 2002, Effects of the construction of dams on the water and sediment fluxes of the Moulouya and the Sebou Rivers, Morocco, Reg Environ Change, 3, 5–12, https://doi : 10,1007/s10113-001-0035-7

Soro, G,, Soro, N,, Ahoussi, K, E,, Lasm, T,, Kouame, F, K,, Soro, T, D,, Biemi, J,, 2010, Évaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristalline et métamorphique dans la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire), Estudios Geológicos, Vol 66, No 2, pp 227-242, Http:/ doi : 10,3989/egeol,40123,093

Teixeira, J,, Chaminé, H,I,, Carvalho, J,M,, Pérez-Alberti, A, and Rocha, F,, 2013, Hydrogeomorphological mapping as a tool in groundwater exploration, J, Maps, vol, 9, no 2, p, 263-273, doi:10,1080/17445647,2013,776506,

Thiès, C,V,, 1935,The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Trans,Am, Geoph, Union, 16,519-524, https://doi,org/10,1029/TR016i002p00519

Todd, D, K,, 1980, Groundwater Hydrology 2nd Edition, Jhon Wiley and Sous, Inc, New York, 535, https://doi:10,1017/s0016756800032477

Trabelsi, L,, Gargouri, K,, Ben Hassena, A,, Mbadra, C,, Ghrab, M,, Ncube c, Johannes Van Staden, B,, Gargouri, R,, 2019, Impact of drought and salinity on olive water status and physiological performance in an arid climate, *Agricultural Water Management,* Volume 213, 1 March 2019, Pages 749-759, https://doi,org/10,1016/j,agwat,2018,11,025

Trépanier, S,, 2009, Optimisation des levés de sédiments de ruisseaux pour l'exploration, Partie A : Modélisation des réseaux hydrographiques à partir de modèles numériques de terrain, Rapport, Projet CONSOREM 2008–2009, 28p,

United State Environmental Protection Agencies (USEPA),, 1976, Quality criteria for water, RC Trtain Ed, Casste House, Publ Great Britan,

Waspodo, R, S, B,, Prakusya, A, A,, Dewi, V, A, K,, 2020, Hydrogeology study and determination of aquifer distribution using geoelectrical schlumberger method in subang regency, In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 542 (1), 012057, https://doi :10,1088/1755-1315/542/1/012057

Wilcox, L,V,, 1955, Classification and use of irrigation waters, US Department of Agriculture, Washington, Circular n° 969

Yaagoub, D,, Hinaje, S,, El Fartati, M,, 2023, Analyse structurale et reconstitution des paléochamps de contraintes tardi-hercyniens dans la boutonnière d'Aouli (massif de la Haute Moulouya, Maroc), Estudios Geológicos, Vol, 79 Nuù, 1, doi : 10,3989/egeol,44749,620

Yao, T,, Oga, M,, Fouche, O,, Baka, D,, Pernelle, C,, and Biemi, J, (2013), Évaluation de la potabilité chimique des eaux souterraines dans un bassin versant tropical : cas du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, Int, J, Bio, Chem, Sci 6(6),7069–7086, doi:10,4314/ijbcs,v6i6,42

Youan Ta, M,, 2011, Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère, Cas de Bondoukou (Côte d'Ivoire), Revue Internationale de Géomatique, Bondoukou (Côte d'Ivoire),, p, 47-71, doi: 10,3166/rig,21,43-71

Zizi, M,,1996, Triassic–Jurassic extensional systems and their Neogene reactivation in Northern Morocco (the Rides pre-Rifaines and Guercif basin), Ph,D, Thesis, Rice University, 230p,

ANNEXES

Annexe 1 : Tableau illustrant la nature lithologique, débit et la cote de l'aquifère des forages de la zone d'étude,

N° IRE	Profondeur totale en m	Lithologie aquifère	Cote piézométrique	Débit (l/s)
1130/17	200	Argiles et Grès	125	3
1132/17	190	Argiles gréseuses	49	4
1133/17	250	Calcaires et Grès	42	5
1136/17	175	Calcaires dolomitiques	96	7
1184/23	303	Grès	63	1
1202/17	140	Calcaires Grèseux	85	8
1203/17	150	Calcaires	49	6
1212/23	900	Calcaires	36	10
1222/23	50	Grès	17	8
1233/23	115	Grès	34	5
1239/23	120	Grès argileux	0	3
1252/23	120	Calcaires	2	5
1253/23	120	Grès	50	5
1265/23	226	Calcaires argileux	35	5
13/24	398,8	Calcaires dolomitiques	49	4
143/31	41,5	Argiles Gréseuses	15	1
148/31	32	Argiles	30	1
149/31	20	Argiles et Grès	5	1
160/24	345	Marnes et Grès	2	3
161/24	140	Calcaires	14	5
183/24	282	Calcaires marnes	85	1
190/17	1100,16	Marnes à traces calcaires	38	5
200/17	411,75	Argiles et Grès	20	3
203/17	254,45	Argiles Calcaires	0	2
221/17	61	Grès argileux	0	6
24/23	380,14	Calcaires Gréseux	45	6
241/17	70	Argiles Calcaires	30	2
244/17	61	Argiles Calcaires	20	2
253/17	600	Sel béchique argileux	95	1
27/24	163,5	Calcaires marneux	0	3
285/31	60,5	Argiles sableux	11	2
331/31	404	Calcaires	198	1
400/31	253	Calcaires	23	1
435/17	166	Argiles Calcaires	12	3
445/23	91	Argiles Calcaires	62	3
46/23	271,2	Calcaires	46	5
463/23	115	Calcaires	46	8
474/31	200	Argiles	5	1
514/17	200	Argiles sableux	12	1
536/17	100	Calcaires et argiles	36	1
548/17	301	Calcaires marneux	74	2
550/17	229	Dolomies	78	4
71/23	52,3	Marnes sableux	10	3
792/17	145	Schistes et grès	27	2

N° IRE	Profondeur totale en m	Lithologie aquifère	Cote aquifère	Débit (l/s)
466/23	50	Graviers marneux	40	4
51/23	652	Calcaires marneux	19,3	9
727/17	306	Calcaires marneux	115	3
766/17	380	Calcaires marneux	49	1
791/17	230	Marnocalcaires	72	6
797/17	200	Calcaires marneux	10	1
828/17	300	Calcaires	110	3
834/17	104	Marnes	7	1
846/17	218	Calcaires	142	9
874/17	187	Basaltes	173	5
875/17	260	Calcaires marneux	136	6
883/17	273	Graviers argileux microconglomérats	68	7
893/17	282	Calcaires dolomitiques	88	1
901/17	360	Calcaires gréseux	90	2
902/17	270	Calcaires	103	4
903/17	161	Calcaires marneux	97	2
1200/23	130	Graviers marneux microconglomérats	25	4
112/17	670,27	Calcaires marneux	139,55	5
1148/23	250	Calcaires	76,56	5
1153/23	141	Marnocalcaires	112	6
1174/23	163	Calcaires	13,6	7
1185/23	255	Calcaires	91	3
1188/23	227	Calcaires	50	5
1191/23	176	Grès	70	8
1200/17	180	Calcaires	95	4
1201/17	215	Grès	35	2
1202/23	81,3	Conglomérats	62,5	5
1234/23	178	Grès	61	3
124/24	151	Calcaires	6	1
1243/23	180	Calcaires marneux	70	4
1251/23	130	Calcaires	28	3
145/17	197	Calcaires dolomitiques	130	3
158/24	301	Marnes calcaires	7	1
163/24	350	Calcaires dolomitiques	100	6
164/24	350	Calcaires dolomitiques	0	1
165/24	350	Calcaires dolomitiques	0	1
179/24	197	Calcaires argileux	85,6	3
2//24	152,2	Calcaires	26	5
201/17	71	Calcaires	48,58	7
205/17	86,44	Calcaires à graviers sableux	21,27	7
220/17	56	Sables et Calcaires	38,7	10
228/24	196	Calcaires	124	6
23/23	40	Calcaires	8	6
243/17	55	Calcaires	30	5

793/17	103	Schistes et grès	25	3
803/17	150	Schistes marneux	25	3
814/17	160	Sables	49	7
832/17	367	Marno-Calcaires	100	5
858/17	103	Sables	2	2
869/17	171	Grès	73	7
876/17	96	Calcaires	18	6
877/17	185	Graviers marneux	84	3
885/17	378	Calcaires	150	8
886/17	330	Marno-Calcaires	13	4
889/17	142	Sables	88	6
890/17	120	Marnes Calcaires	25	5
891/17	94,3	Grès	50	7
892/17	296	Marnes	6	1
894/17	226	Calcaires	100	1
96/17	79,6	Calcaires	61	4
97/17	102	Graviers argileux	51	4
30/24	352	Marno-Calcaires	194	4
464/23	300	Calcaires dolomitiques	42	1
880/17	159	Grès marneux	0	6
3,/17	100,4	Calcaires	10	7
7,/24	276	Calcaires dolomitiques	100	4
1112/17	140	Calcaires	41	5
1129/17	164	Argiles sableux	15	1
1172/23	136	Sables argileux	29	5
1181/23	296	Graviers argileux	31	4
1183/23	190	Marno-Calcaires	46	5
1189/23	150	Calcaires gréseux	74	7
1197/23	185	Sables argileux	38	6
1204/17	150	Argiles sableux	45	4
1214/23	100	Grès	21	8
1223/23	70	Grès	32	7
1241/23	250	Marno-Calcaires	43	2
175/24	270	Calcaires	21	3
181/24	330	Calcaires fracturés	168	7
189/24	313	Calcaires	185	1
240/17	80	Calcaires argileux	43	6
242/17	72	Calcaires argileux	40	4
25/23	555	Calcaires gréseux	56,3	9
25/24	309	Calcaires	44	3
286/31	48,5	Argiles sableux	36	3
371/31	205,5	Grès	90	6
4//24	450	Calcaires dolomitiques	96	6
432/31	228	Calcaires argileux	85	3
447/17	79	Calcaires marneux	43	4
457/31	208	Calcaires	100	4

245/17	75	Galets et Calcaires microconglomérats	65	4
278/23	750	Calcaires dolomitiques	0	1
3//24	54,5	Calcaires	48	1
323/31	87	Grès	31,6	10
360/31	152,5	Argileset marnes	51	1
438/17	127	Calcaires dolomitiques	80	3
440/17	187	Calcaires dolomitiques	42	4
444/23	30	Calcaires silteux	18	1
452/31	152	Calcaires	85	5
465/23	61	Calcaires dolomitiques	1	1
49/23	78,46	Calcaires	75,95	8
515/17	196,36	Marno-Calcaires dolomitiques	97,5	3
528/17	200	Calcaires	1	1
53/23	52,3	Grès fracturés	21	7
534/17	72	Calcaires schisteux	26,05	4
543/17	207	Calcaires sableux	112,93	4
544/17	207	Dolomies	120	2
547/17	273	Calcaires dolomitiques marneux	181	2
551/17	256,5	Calcaires dolomitiques	104	10
66/24	266	Calcaires	156	6
669/17	308	Calcaires marneux	75	7
67/24	297,5	Calcaires	106	3
70/24	110	Calcaires dolomitiques	88,6	5
71/27	300,5	Calcaires marneux	83,5	2
723/17	350	Marno-Calcaires	241	2
726/17	116	Marno-Calcaires	62,55	6
729/17	276	Calcaires argileux	150	2
730/17	199	Calcaires dolomitiques	132	8
735/17	183	Calcaires	4	1
749/17	162	Calcaires marneux	87,5	7
758/17	250	Marno-Calcaires	100	7
775/17	160	Calcaires marneux	52	5
804/17	360	Calcaires marneux	87	5
812/17	220	Calcaires	148	7
833/17	116	Calcaires dolomitiques	26	4
853/17	160	Grès	70	7
871/17	250	Calcaires argileux	97	3
872/17	175	Calcaires	34,43	6
897/17	200	Calcaires	16	1
900/17	72	Calcaires	32	5
910/17	100	Calcaires	17	1
99/17	80	Calcaires argileux	28,62	4
31/17	124,72	Basaltes argileux	14,6	3
516/17	310	Basaltes argileux	34	3
516/17	310	Basaltes argileux	34	3
227/24	260	Calcaires argileux	44	1

Annexe 2 : Tableau des résultats des analyses des échantillons d'eau pour 94 points d'eau (forage et puits) au niveau de la zone d'étude,

N° d'ordre	N° IRE	Profondeur total en (m)	pH	Lithologie du réservoir aquifère	Ca^{2+} (mg/l)	Mg^{2+} (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	CO_3^- (mg/l)	Cl^- (mg/l)	SO_4^- (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	Cl/(Cl+HCO3) (mg/l)
1	1130/17	200	6,8	Argiles	214	141	165	3	138	0	617,5	355	0	0	0,82
2	1133/17	250	5,8	Argiles	230	122,81	120,75	6,63	274,5	0	191,7	797	0	0	0,41
3	1136/17	175	7,7	Argiles	42,5	73	48,5	0	299,56	196	100	42,5	0	0	0,25
4	828/17	300	7,5	Argiles	70	59,58	22	1,2	433,1	0	60,35	52,8	0	0	0,12
5	205/17	86,44	7,9	Sables avec Calcaires	164	146,41	149	8,36	292	0	323,05	633,6	17,98	0	0,53
6	534/17	72	8,1	Schistes verdâtres	256	132,64	248,5	8,58	268,4	0	308,7	922	0	0	0,53
7	549/17	288	7,7	Calcaires dolomitiques	44	43	71,5	0	439,1	190	50	4	0	0	0,10
8	669/17	308	7,6	Calcaires marneux	152	165,37	207	8,58	213,5	0	284	864	0	0	0,57
9	71/24	300,5	7,4	Calcaires dolomitiques	569,13	106,92	46	1	122	0	106,5	1455,2	22,57	0,5	0,47
10	1132/17	190	7,3	Argiles marneux	45,5	52	66,5	0	267,84	208	86	4	0	0	0,24
11	321/31	95,5	7,3	Marnes	56	127,05	249,98	3,87	445,3	0	386,95	288	0	0	0,46
12	243/17	55	7,7	Argiles et Calcaires	238	113,08	103,5	11,31	292,8	0	234,3	667,6	0	0	0,44
13	53/23	52,3	7,6	Grès sableux	48	34	55	3	183	0	80	115	0	0	0,30
14	551/17	256,5	7,4	Calcaires dolomitiques	240	132,6	115	19,5	262,3	0	269,8	778	0	0	0,51
15	516/17	310	7,8	Basaltes	234	131,42	185	4,04	244	0	266,3	739	0	0	0,52
16	1212/23	900	8,4	Dolomie	56	29	50	3	201,5	0	71	86,5	0	0	0,26
17	24/23	380,14	7	Calcaires gréseux	120	109,5	29,5	5	195	0	35,5	528	0	0	0,15
18	445/23	91	7,7	Marnes	204	252,92	161	6,24	213,5	0	266,3	1349	0	0	0,56
19	25/23	555	7,4	Calcaires	232	114,5	190	6,5	219,5	96	248,5	849,5	0	0	0,53
20	25/24	309	7,4	Calcaires gréseux	80	53,5	81,5	2,5	256	0	133	163	0	0	0,34
21	1243/23	180	8,4	Calcaires	140	113,74	299,92	5	97,6	0	312,4	931,06	0	0	0,76
22	529/17	171	7,6	Calcaires	72	70,5	50	3,5	341,5	0	53,5	211	0	0	0,14
23	543/17	207	7,6	Calcaires a sable	150	42,56	20,7	8,97	244	0	14,2	336	0	0	0,05
24	452/31	152	7,1	Calcaires	44	63	41	0	574,32	176	90	38,5	0	0	0,14
25	42/31	12	8,8	Argiles et conglomérats	52	31,5	47,5	3,5	219,5	0	62	77	0	0	0,22
26	63/31	11,3	7,6	Argiles a passage gypse	112	75	120	7,5	123	0	238	341	0	0	0,66
27	70/31	19,53	7,2	Sables argileux	52	41,5	75	5	274,5	0	97,5	96	9,92	0	0,26
28	62/31	10,6	8,4	Sables argileux	68	24,5	25	2	262,3	108	44,5	86,5	0	0	0,15
29	11,/31	18,7	7,9	Marnes sableux	52	29	44	7	177	0	80	96	0	0	0,31
30	71/31	11,8	7,8	Sables argileux	186	40,12	34,5	8,19	280,6	0	42,6	398,4	0	0	0,13
31	61/31	5,8	7,8	Argiles a graviers	36	38,91	6	4,7	244	0	35,5	33	0	0	0,13
32	8,/31	18,9	8,4	Argiles a graviers	80	51	30	3	268,5	0	44	153,5	0	0	0,14
33	57/31	9,4	8,2	Marnes argileux	94	75,39	21	3	469,7	0	88,75	91,2	0	0	0,16
34	60/31	13,4	7,6	Marnes argileux	48	27	49	2,5	177	0	62	96	8,49	0	0,26
35	58/31	9,1	6,8	Marnes argileux	64	24,5	29	2	213,5	0	44,5	77	0	0	0,17
36	352/23	29,6	8,2	Marnes argileux	48	58,5	24	3	317	0	53,5	86,5	0	0	0,14
37	349/23	17	7,3	Marnes argileux	236	63,23	35,42	10,53	359,9	0	31,95	533	0	0	0,08
38	356/23	32	7,7	Argiles a passages Calcaires	118,5	120,5	19,5	0	97,5	104	184	384	0	0	0,65
39	305/23	32	8	Marnes argileux	86	34,04	58	3,7	329,4	0	78,1	134,4	0	0	0,19
40	103/23	10,9	7	Argiles sableux a galets	68	70,6	39	5	262,5	0	53,5	230,5	0	0	0,17
41	104/23	13,3	7,2	Argiles sableux a galets	64	42,56	18	5,2	353	0	31,95	4,8	0	0	0,08
42	225/23	19,35	7,1	Marnes argileux	77	57	68,5	0	329,4	208	120	73	0	0	0,27
43	310/23	13,7	8,2	Conglomérats	51	59	49	0	274,5	160	92	80	0	0	0,25
44	275/23	17,5	7,6	Marnes argileux	196	117,37	149,98	7,78	305	0	301,75	624	11,96	0	0,50
45	276/23	86	7,3	Marnes argileux	54	47,19	23,98	0,7	323,3	0	53,25	33,6	7,99	0	0,14
46	348/23	12,4	7,3	Marnes argileux	64	50,82	37,99	0,78	378,2	0	102,95	0	0	0	0,21
47	307/23	13,7	7,5	Marnes argileux	36	51,07	25	5	213,5	104	42,6	105,6	0	0	0,17

48	306/23	16,75	7,3	Marnes argileux	62	35,09	52,99	0,78	305	0	81,65	48	0	0	0,21
49	303/23	33	7,2	Conglomérats	60	35,09	61,98	0,78	274,5	0	95,85	67,2	0	0	0,26
50	302/23	42	7,6	Sables avec graviers a Calcaires dolomitiques	92	49,61	129,99	0,78	445,3	0	198,8	105,6	0	0	0,31
51	269/23	40	7,6	Sables avec graviers a Calcaires dolomitiques	36	55,66	18,99	1,09	280,6	0	63,9	43,2	0	0	0,19
52	266/23	37	7	Sables avec graviers a Calcaires dolomitiques	64	75,5	39	2	158,5	0	133	173	0	0	0,46
53	299/23	48,2	8,2	Sables avec graviers a Calcaires dolomitiques	76	75,02	10	1,99	469,7	0	53,25	9,6	0	0	0,10
54	304/23	51	8,5	Sables avec graviers a Calcaires dolomitiques	58	37,51	15	3,4	323,3	0	35,5	28,8	0	0	0,10
55	265/23	43	7,8	Conglomérats	48	27	46,5	5	183	0	62	86,5	0	0	0,25
56	312/23	13,95	7,6	Conglomérats	52	5	52,5	2,5	97,5	0	71	86,5	0	0	0,42
57	230/23	10,7	7,7	Grès sableux	68	33,88	69,98	0,97	390,4	0	56,8	57,6	0	0	0,13
58	287/23	13,07	7,6	Grès	40	76,23	8,99	3,2	378,2	0	28,4	91,2	16,98	0	0,07
59	286/23	15,91	7,8	Grès	52	29	59	2,5	158,5	0	80	125	0	0	0,34
60	282/23	13,5	7,8	Marnes	24	65,5	110	2	207,5	0	124,5	192	0	0	0,38
61	271/23	22	8,2	Calcaires	68	36,5	67,5	5	213,5	0	97,5	144	0	0	0,31
62	285/23	19,73	7,9	Grès	38	45,66	21	1,1	150	0,01	81,65	48	0	0	0,35
63	272/23	20,05	8,2	Grès	42	37,51	63,98	7,07	384,3	0	78,1	4,8	0	0	0,17
64	283/23	30	8,3	Grès	16	53,5	86,5	5	55	0	133	163	0	0	0,71
65	423/23	16,8	7,1	Graviers	52	61	92,5	5,5	299	0	142	134,5	0	0	0,32
66	195/17	21,95	7,2	Argiles a passages Calcaires	68	48,6	42	2,3	218,5	0	142	115,2	0	0	0,39
67	193/17	24,15	7,4	Argiles a passages Calcaires	60	61	67,5	9	335,5	0	106,5	67	0	0	0,24
68	194/17	40,5	7,1	Argiles	44,08	38,88	68	6,2	305	0	69,98	78,4	4,72	0	0,19
69	192/17	23,1	8,2	Argiles a passages Calcaires	46	87,55	61	2,8	427	0	85,2	110,4	0	0	0,17
70	297/17	9	7,8	Alluvions Marnes	76	46	70	2,5	347,5	0	97,5	115	0	0	0,22
71	294/17	18	7,1	Marnes	38	50,82	36,98	1,48	274,5	0	74,55	38,4	0	0	0,21
72	291/17	24,6	7,8	Argiles	64	41,14	46	0,27	323,3	0	67,45	57,6	0	0	0,17
73	236/17	48,4	7,1	Argiles et graviers	56	58,5	79	10	354	0	97,5	134,5	0	0	0,22
74	238/17	48,4	7,2	Argiles et graviers	122	88,33	119,99	5,39	323,3	0	188,15	432	9,98	0	0,37
75	239/17	42,9	7,4	Argiles et graviers	48	51	86,5	4	323,5	0	97,5	125	0	0	0,23
76	314/17	28,2	7,9	Argiles graveleux	40	50,83	49,97	0,46	268,4	0	81,65	62,4	0	0	0,23
77	62/17	28,3	7,9	Argiles graveleux	38	47,19	112,47	0,46	280,6	0	177,5	4,8	0	0	0,39
78	61/17	31,65	8	Argiles graveleux	86,11	62,58	47,76	7,92	267,84	0	44,08	236,5	1,5	0	0,14
79	189/17	25,6	7,6	Argiles graveleux	134	88,75	125	5,8	317	134	202,35	364,8	0	0	0,39
80	60/17	31,3	7,6	Argiles graveleux	140	148	165	6	120	0	699	110,5	0	0	0,85
81	159/17	17,8	7,5	Conglomérats	96	99,22	99,98	5,78	305	0	198,8	321,6	7,99	0	0,39
82	177/17	38	7,6	Marnes a graviers	64,32	36,42	164,8	4,33	245,32	0	232,07	88,4	1,57	0	0,49
83	46/17	10,9	7,4	Conglomérats Marnes	80,96	35,48	35	2,8	323,3	0	124,25	0,01	0	0	0,28
84	45/17	11,85	7,7	Conglomérats	62,39	54,48	21,92	4,44	355,68	0	47,07	72,3	9,22	0	0,12
85	6//17	19,45	7,3	Limons graviers et Calcaires	30	60,5	22	9,2	298,5	0	35,5	86	0	0	0,11
86	175/17	65,5	7,45	Calcaires marneux	211,22	54,12	636,11	22,41	574,32	0,09	645,24	1154,32	3,5	0	0,53
87	88/17	21,7	7,9	Argiles a galets	68	36,3	62,1	5	268,4	0	71	129	0	0	0,21
88	43/17	14,85	7,45	Marno- Calcaires	64,41	41,7	37,71	2,28	299,56	0	65,7	64,1	15,19	0	0,18
89	44/17	6,3	7,5	Marno- Calcaires	82	55,66	9,98	23,46	170,8	0	44,37	292,8	0	0	0,21
90	42/17	23,2	7	Marno- Calcaires	81,76	52,48	53,5	2	379,2	0	119,96	25,7	17,5	8,01	0,24
91	156/17	3,7	7,6	Calcaires marneux	84	39,93	86	2,4	317,2	0	159,75	72	0	0	0,33
92	109/17	15,33	7,5	Alluvions galets	54,8	51,87	17,58	3,58	255,64	0	15,68	146,8	3,15	0	0,06
93	113/17	22	7,3	Marno- Calcaires	64	53,24	15	0,8	439,2	0,01	46,15	0	0	0	0,10
94	114/17	14,25	8	Marno- Calcaires	44	25,4	64	2,5	262,3	12	49,7	57,6	0	0	0,16

Annexe 3 : Tableau d'analyses des points d'eau de la zone d'étude exprimées en meq/l,

N°	IRE	PH	Q	Ca-meq/l	Mg-meq/l	Na-meq/l	K-meq/l	HCO3-meq/l	CO3-meq/l	Cl-meq/l	SO4-meq/l	NO3-meq/l	NO2-meq/l
1	1130/17	6,8	0,5	10,679	11,605	7,177	0,077	2,262	0	17,419	7,391	0	0
2	1133/17	5,8	2	11,477	10,108	5,252	0,17	4,499	0	5,408	16,594	0	0
3	1136/17	7,7	4	2,121	6,008	2,11	0	0	6,533	2,821	0,885	0	0
4	828/17	7,5	0,3	3,493	4,904	0,957	0,031	7,098	0	1,702	1,099	0	0
5	205/17	7,9	4	8,184	12,05	6,481	0,214	4,785	0	9,113	13,192	0,29	0
6	534/17	8,1	1,1	12,774	10,917	10,809	0,219	4,399	0	8,708	19,196	0	0
7	549/17	7,7	0,26	2,196	3,539	3,11	0	0	6,333	1,41	0,083	0	0
8	669/17	7,6	6,71	7,585	13,611	9,004	0,219	3,499	0	8,011	17,989	0	0
9	71/24	7,4	0,2	28,4	8,8	2,001	0,026	1,999	0	3,004	30,298	0,364	0,011
10	1132/17	7,3	1	2,27	4,28	2,893	0	0	6,933	2,426	0,083	0	0
11	321/31	7,3	1,98	2,794	10,457	10,873	0,099	7,298	0	10,915	5,996	0	0
12	243/17	7,7	2,24	11,876	9,307	4,502	0,289	4,798	0	6,609	13,9	0	0
13	53/23	7,6	5	2,395	2,798	2,392	0,077	2,999	0	2,257	2,394	0	0
14	551/17	7,4	40	11,976	10,914	5,002	0,499	4,299	0	7,611	16,198	0	0
15	516/17	7,8	0,47	11,677	10,816	8,047	0,103	3,999	0	7,512	15,386	0	0
16	1212/23	8,4	40	2,794	2,387	2,175	0,077	3,302	0	2,003	1,801	0	0
17	24/23	7	9	5,988	9,012	1,283	0,128	3,196	0	1,001	10,993	0	0
18	445/23	7,7	1,5	10,18	20,816	7,003	0,16	3,499	0	7,512	28,087	0	0
19	25/23	7,4	39	11,577	9,424	8,264	0,166	3,597	3,2	7,01	17,687	0	0
20	25/24	7,4	0,3	3,992	4,403	3,545	0,064	4,195	0	3,752	3,394	0	0
21	1243/23	8,4	0,5	6,986	9,361	13,046	0,128	1,599	0	8,812	19,385	0	0
22	529/17	7,6	1,4	3,593	5,802	2,175	0,09	5,597	0	1,509	4,393	0	0
23	543/17	7,6	1,4	7,485	3,503	0,9	0,229	3,999	0	0,401	6,996	0	0
24	452/31	7,1	6,5	2,196	5,185	1,783	0	0	5,867	2,539	0,802	0	0
25	42/31	8,8	9,54	2,595	2,593	2,066	0,09	3,597	0	1,749	1,603	0	0
26	63/31	7,6	1	5,589	6,173	5,22	0,192	2,016	0	6,714	7,1	0	0
27	70/31	7,2	1,5	2,595	3,416	3,262	0,128	4,499	0	2,75	1,999	0,16	0
28	62/31	8,4	2	3,393	2,016	1,087	0,051	0	3,6	1,255	1,801	0	0
29	11,/31	7,9	0,01	2,595	2,387	1,914	0,179	2,901	0	2,257	1,999	0	0
30	71/31	7,8	1	9,281	3,302	1,501	0,209	4,598	0	1,202	8,295	0	0
31	61/31	7,8	1,5	1,796	3,202	0,261	0,12	3,999	0	1,001	0,687	0	0
32	8,/31	8,4	1,09	3,992	4,198	1,305	0,077	4,4	0	1,241	3,196	0	0
33	57/31	8,2	1	4,691	6,205	0,913	0,077	7,697	0	2,504	1,899	0	0
34	60/31	7,6	2	2,395	2,222	2,131	0,064	2,901	0	1,749	1,999	0,137	0
35	58/31	6,8	3	3,194	2,016	1,261	0,051	3,499	0	1,255	1,603	0	0
36	352/23	8,2	2,4	2,395	4,815	1,044	0,077	5,195	0	1,509	1,801	0	0
37	349/23	7,3	1,05	11,776	5,204	1,541	0,269	5,898	0	0,901	11,097	0	0
38	356/23	7,7	2,4	5,913	9,918	0,848	0	0	3,467	5,19	7,995	0	0
39	305/23	8	3,1	4,291	2,802	2,523	0,095	5,398	0	2,203	2,798	0	0
40	103/23	7	4,7	3,393	5,811	1,696	0,128	4,302	0	1,509	4,799	0	0
41	104/23	7,2	2,4	3,194	3,503	0,783	0,133	5,785	0	0,901	0,1	0	0
42	225/23	7,1	12,55,1	3,842	4,691	2,98	0	0	6,933	3,385	1,52	0	0
43	310/23	8,2	2	2,545	4,856	2,131	0	0	5,333	2,595	1,666	0	0
44	275/23	7,6	3	9,78	9,66	6,524	0,199	4,998	0	8,512	12,992	0,193	0
45	276/23	7,3	1	2,695	3,884	1,043	0,018	5,298	0	1,502	0,7	0,129	0
46	348/23	7,3	1,08	3,194	4,183	1,652	0,02	6,198	0	2,904	0	0	0
47	307/23	7,5	1,03	1,796	4,203	1,087	0,128	0	3,467	1,202	2,199	0	0
48	306/23	7,3	1,5	3,094	2,888	2,305	0,02	4,998	0	2,303	0,999	0	0
49	303/23	7,2	2	2,994	2,888	2,696	0,02	4,499	0	2,704	1,399	0	0
50	302/23	7,6	2,4	4,591	4,083	5,654	0,02	7,298	0	5,608	2,199	0	0
51	269/23	7,6	1,5	1,796	4,581	0,826	0,028	4,598	0	1,803	0,899	0	0
52	266/23	7	3,4	3,194	6,214	1,696	0,051	2,598	0	3,752	3,602	0	0
53	299/23	8,2	1,004	3,792	6,174	0,435	0,051	7,697	0	1,502	0,2	0	0
54	304/23	8,5	0,02	2,894	3,087	0,652	0,087	5,298	0	1,001	0,6	0	0

55	265/23	7,8	0,45	2,395	2,222	2,023	0,128	2,999	0	1,749	1,801	0	0
56	312/23	7,6	1,4	2,595	0,412	2,284	0,064	1,598	0	2,003	1,801	0	0
57	230/23	7,7	1,05	3,393	2,788	3,044	0,025	6,398	0	1,602	1,199	0	0
58	287/23	7,6	1,2	1,996	6,274	0,391	0,082	6,198	0	0,801	1,899	0,274	0
59	286/23	7,8	4,1	2,595	2,387	2,566	0,064	2,598	0	2,257	2,603	0	0
60	282/23	7,8	2,	1,198	5,391	4,785	0,051	3,401	0	3,512	3,998	0	0
61	271/23	8,2	1	3,393	3,004	2,936	0,128	3,499	0	2,75	2,998	0	0
62	285/23	7,9	,2	1,896	3,758	0,913	0,028	2,458	0	2,303	0,999	0	0
63	272/23	8,2	1,4	2,096	3,087	2,783	0,181	6,298	0	2,203	0,1	0	0
64	283/23	8,3	1,3	0,798	4,403	3,763	0,128	0,901	0	3,752	3,394	0	0
65	423/23	7,1	2	2,595	5,021	4,023	0,141	4,9	0	4,006	2,8	0	0
66	195/17	7,2	2,4	3,393	4	1,827	0,059	3,581	0	4,006	2,399	0	0
67	193/17	7,4	3	2,994	5,021	2,936	0,23	5,498	0	3,004	1,395	0	0
68	194/17	7,1	2,6	2,2	3,2	2,958	0,159	4,998	0	1,974	1,632	0,076	0
69	192/17	8,2	1,4	2,295	7,206	2,653	0,072	6,998	0	2,403	2,299	0	0
70	297/17	7,8	1	3,792	3,786	3,045	0,064	5,695	0	2,75	2,394	0	0
71	294/17	7,1	1	1,896	4,183	1,609	0,038	4,499	0	2,103	0,8	0	0
72	291/17	7,8	2	3,194	3,386	2,001	0,007	5,298	0	1,903	1,199	0	0
73	236/17	7,1	1,5	2,794	4,815	3,436	0,256	5,801	0	2,75	2,8	0	0
74	238/17	7,2	1,7	6,088	7,27	5,219	0,138	5,298	0	5,307	8,994	0,161	0
75	239/17	7,4	1,6	2,395	4,198	3,763	0,102	5,302	0	2,75	2,603	0	0
76	314/17	7,9	1,22	1,996	4,184	2,174	0,012	4,399	0	2,303	1,299	0	0
77	62/17	7,9	1,88	1,896	3,884	4,892	0,012	4,598	0	5,007	0,1	0	0
78	61/17	8	2,03	4,297	5,151	2,077	0,203	4,389	0	1,243	4,924	0,024	0
79	189/17	7,6	2,1	6,687	7,305	5,437	0,148	5,195	4,467	5,708	7,595	0	0
80	60/17	7,6	0,83	6,986	12,181	7,177	0,153	1,967	0	19,718	2,301	0	0
81	159/17	7,5	0,45	4,79	8,166	4,349	0,148	4,998	0	5,608	6,696	0,129	0
82	177/17	7,6	0,61	3,21	2,998	7,168	0,111	4,02	0	6,546	1,841	0,025	0
83	46/17	7,4	0,07	4,04	2,92	1,522	0,072	5,298	0	3,505	0	0	0
84	45/17	7,7	0,08	3,113	4,484	0,953	0,114	5,829	0	1,328	1,505	0,149	0
85	6//17	7,3	0,02	1,497	4,979	0,957	0,235	4,892	0	1,001	1,791	0	0
86	175/17	7,45	0,31	10,54	4,454	27,669	0,573	9,412	0,003	18,201	24,033	0,056	0
87	88/17	7,9	1,04	3,393	2,988	2,701	0,128	4,399	0	2,003	2,686	0	0
88	43/17	7,45	0,21	3,214	3,432	1,64	0,058	4,909	0	1,853	1,335	0,245	0
89	44/17	7,5	0,11	4,092	4,581	0,434	0,6	2,799	0	1,252	6,096	0	0
90	42/17	7	0,07	4,08	4,319	2,327	0,051	6,214	0	3,384	0,535	0,282	0,174
91	156/17	7,6	3,22	4,192	3,286	3,741	0,061	5,198	0	4,506	1,499	0	0
92	109/17	7,5	4,28	2,735	4,269	0,765	0,092	4,189	0	0,442	3,056	0,051	0
93	113/17	7,3	1,66	3,194	4,382	0,652	0,02	7,198	0	1,302	0	0	0
94	114/17	8	1,41	2,196	2,091	2,784	0,064	4,299	0,4	1,402	1,199	0	0

Annexe 4 : Tableau de calcul des indices d'irrigation pour la zone d'étude,

ID	N° IRE	BI	TDS	HT	SAR	%Na	RSC	IP
1	1130/17	4,36	1 633,50	111,31	2,15	24,56	-20,02	29,47
2	1133/17	0,9	1743,39	107,852	1,599	20,076	-17,09	27,47
3	1136/17	0	502,5	40,56	1,05	20,61	-1,6	20,61
4	828/17	-2,7	699,03	41,928	0,467	10,527	-1,3	38,71
5	205/17	-0,8	1734,4	101,028	2,038	24,862	-15,45	32,45
6	534/17	3,6	2144,82	118,382	3,141	31,764	-19,29	37,41
7	549/17	6,11	402,5	28,63	1,84	35,16	0,6	35,16
8	669/17	1,5	1894,45	105,802	2,766	30,32	-17,7	36,01
9	71/24	4,8	2429,82	186,12	0,464	5,167	-35,2	8,71
10	1132/17	0,01	462	32,7	1,6	30,64	0,38	30,64
11	321/31	0,03	1 557,15	66,09	4,22	45,3	-5,95	56,27
12	243/17	1,3	1660,59	105,863	1,383	18,445	-16,39	26,06
13	53/23	0,1	518	25,94	1,484	32,224	-2,19	54,37
14	551/17	0,5	1817,2	114,366	1,479	19,376	-18,59	25,37
15	516/17	6,5	1803,76	112,382	2,4	26,597	-18,49	32,9
16	1212/23	2,2	497	25,89	1,351	30,297	-1,88	54,27
17	24/23	3,9	1022,5	74,895	0,468	8,598	-11,8	18,86
18	445/23	-1,2	2452,96	154,697	1,779	18,771	-27,5	23,35
19	25/23	-3,4	1956,5	104,945	2,55	28,643	-14,2	34,72
20	25/24	2,8	769,5	41,935	1,73	30,065	-4,2	46,84
21	1243/23	-0,46	1 899,72	81,63	4,56	44,63	-14,75	48,69
22	529/17	0,7	802	46,905	1,004	19,425	-3,8	39,25
23	543/17	3,1	816,43	54,95	0,384	9,317	-6,99	24,39
24	452/31	-0,24	452,5	36,83	0,93	19,46	-1,51	19,46
25	42/31	2,8	493	25,915	1,283	29,357	-1,59	54,63
26	63/31	4,1	1016,5	58,75	2,153	31,513	-9,75	39,1
27	70/31	0	651,42	30,015	1,882	36,06	-1,51	58,05
28	62/31	-0,8	358,5	27,045	0,661	17,382	-1,81	16,73
29	11,/31	-0,6	485	24,89	1,213	29,583	-2,08	52,45
30	71/31	0,7	990,41	62,949	0,598	11,964	-7,99	25,88
31	61/31	-2,8	398,11	24,953	0,165	7,083	-1	42,99
32	8,/31	4	630	40,91	0,645	14,438	-3,79	35,84
33	57/31	-0,9	843,04	54,41	0,391	8,329	-3,2	31,22
34	60/31	0,2	469,99	23,07	1,403	32,223	-1,72	56,82
35	58/31	1,3	454,5	26,045	0,781	20,117	-1,71	48,39
36	352/23	-1	590,5	35,985	0,55	13,456	-2,02	40,26
37	349/23	2,4	1270,03	84,924	0,529	9,633	-11,08	21,43
38	356/23	0,08	930,5	79,03	0,3	5,08	-12,36	5,08
39	305/23	-3,4	723,64	35,456	1,34	26,959	-1,7	50,4
40	103/23	1,9	729,1	45,946	0,791	16,54	-4,9	34,59
41	104/23	5,74	519,51	33,45	0,43	12,03	-0,91	42,62
42	225/23	-1,39	603,5	42,62	1,44	25,88	-1,6	25,88
43	310/23	-0,32	491	36,94	1,11	22,36	-2,07	22,36
44	275/23	-1	1713,84	97,122	2,093	25,697	-14,44	33,74
45	276/23	0,1	544,01	32,848	0,575	13,887	-1,28	43,88
46	348/23	-0,3	634,74	36,836	0,86	18,477	-1,18	45,87
47	307/23	2,5	369,27	29,939	0,628	16,842	-2,53	15,34
48	306/23	0	585,51	29,887	1,333	27,988	-0,98	54,79
49	303/23	0	595,4	29,387	1,572	31,589	-1,38	56,16
50	302/23	-2,6	1022,08	43,34	2,715	39,546	-1,38	58,32
51	269/23	-0,5	499,44	31,821	0,463	11,81	-1,78	41,24
52	266/23	5,7	645	46,955	0,782	15,661	-6,81	29,79
53	299/23	5,3	695,56	49,758	0,195	4,65	-2,27	30,86
54	304/23	-1,3	501,51	29,879	0,377	10,997	-0,68	44,53

55	265/23	1,6	458	23,07	1,331	31,782	-1,62	56,55
56	312/23	-0,4	367	15,05	1,863	43,847	-1,41	67,06
57	230/23	0,3	677,63	30,891	1,732	33,178	0,22	60,42
58	287/23	-2,4	643,2	41,254	0,192	5,41	-2,07	33,26
59	286/23	1	506	24,89	1,626	34,551	-2,38	55,35
60	282/23	2,3	725,5	32,855	2,636	42,328	-3,19	58,28
61	271/23	1,1	632	31,965	1,642	32,386	-2,9	51,5
62	285/23	6,8	385,42	28,221	0,543	14,268	-3,2	37,78
63	272/23	-2,7	617,76	25,879	1,729	36,381	1,12	66,44
64	283/23	6,1	512	25,935	2,333	42,796	-4,3	52,57
65	423/23	0,3	786,5	38,01	2,062	35,348	-2,72	53,58
66	195/17	-3,7	636,6	36,926	0,95	20,325	-3,81	40,34
67	193/17	6,1	706,5	40,01	1,467	28,316	-2,52	48,22
68	194/17	-0,9	615,26	26,961	1,8	36,597	-0,4	62,14
69	192/17	2,2	819,95	47,4	1,22	22,29	-2,5	43,59
70	297/17	-0,7	754,5	37,86	1,564	29,091	-1,88	51,13
71	294/17	2,1	514,73	30,336	0,923	21,318	-1,58	48,52
72	291/17	1,1	599,76	32,867	1,103	23,381	-1,28	50,14
73	236/17	-0,2	789,5	37,985	1,762	32,67	-1,81	52,92
74	238/17	-2,7	1289,14	66,715	2,019	28,624	-8,06	40,48
75	239/17	-0,9	735,5	32,91	2,073	36,957	-1,29	58,57
76	314/17	2,2	553,71	30,84	1,237	26,13	-1,78	51,13
77	62/17	4,8	661,02	28,848	2,878	45,9	-1,18	65,93
78	61/17	5,1	754,29	47,185	0,956	19,441	-5,06	36,2
79	189/17	-8	1371,7	69,888	2,056	28,528	-4,33	39,72
80	60/17	4,97	1 388,50	95,68	2,32	27,66	-17,2	32,57
81	159/17	0,1	1134,37	64,68	1,709	25,766	-7,96	38,05
82	177/17	4,1	837,23	31,012	4,069	53,97	-2,19	68,58
83	46/17	-1,4	601,8	34,787	0,816	18,635	-1,66	45,08
84	45/17	-0,8	627,5	37,934	0,489	12,315	-1,77	39,38
85	6//17	-0,1	541,7	32,305	0,532	15,545	-1,58	42,63
86	175/17	-8,9	3301,33	74,994	10,105	65,321	-5,58	72,05
87	88/17	0,7	639,8	31,883	1,512	30,717	-1,98	52,83
88	43/17	0	590,65	33,2	0,9	20,35	-1,74	46,53
89	44/17	-2,2	679,07	43,321	0,208	10,652	-5,87	23,14
90	42/17	1,7	740,11	41,957	1,136	22,066	-2,19	44,94
91	156/17	0,3	761,28	37,371	1,935	33,706	-2,28	53,67
92	109/17	0,8	549,1	34,967	0,409	10,902	-2,82	36,19
93	113/17	-1,5	618,4	37,828	0,335	8,147	-0,38	40,53
94	114/17	-1,1	517,5	21,414	1,902	39,916	0,41	68,69