



**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**

Université Kasdi Merbah – Ouargla



**Faculté des hydrocarbures, énergies renouvelable et science de la
Terre et l'univers**

Département des sciences de la terre et de l'univers

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de master en Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

THEME:

**Étude hydrogéologique de la région de
Rhourde Nouss**

Soutenu publiquement par : Bezziane Mohammed Ouassim

Devant le jury :

Bouselsal Boualem	Pr	Univ Ouargla	Président
Zeddouri Aziez	Pr	Univ Ouargla	Encadreur
Fenazi Bilal	Pr	Univ Ouargla	Examineur
Mehali Mustapha	Cadre	CDARS Ouargla	Invité

Année Universitaire: 2025/2026

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, en témoignage de mon profond amour, de mon respect et de ma gratitude pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis afin de m'assurer une éducation et un avenir meilleurs. Que Dieu les protège et les bénisse.

À mes frères et sœurs, pour leur soutien, leurs encouragements et leur affection.

À toute ma famille, qui a toujours cru en moi et m'a accompagné tout au long de mon parcours.

À mes amis et collègues, avec qui j'ai partagé de précieux moments d'apprentissage et de réussite.

À tous mes enseignants, qui ont contribué à ma formation et à l'acquisition de mes connaissances.

Enfin, à toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Je dédie ce travail avec respect, reconnaissance et gratitude.

Bezziane Mohammed Ouassim

2026

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur **Pr.Zeddouri Aziez**, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail.

Mes sincères remerciements vont à l'ensemble des enseignants du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université Kasdi Merbah d'Ouargla, qui ont contribué à ma formation tout au long de mon cursus universitaire.

Je remercie chaleureusement Mr. Mehali Mustapha cadre de la CDARS Ouargla et de l'entreprise **Satrech Benbrahim** pour m'avoir accueilli sur le terrain et de mettre à ma disposition les données et les moyens nécessaires à la réalisation de cette étude.

Enfin, je ne saurais oublier ma famille, mes amis et tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Bezziane Mohammed Ouassim

2026

الملخص:

تتناول هذه الدراسة الهيدروجيولوجية منطقة رود نوس الواقعة في الجنوب الشرقي الجزائري بولاية إيزي، والتي تشهد تطوراً زراعياً متنامياً يعتمد على استغلال المياه الجوفية من طبقة المركب النهائي. اعتمدت الدراسة على تحليل عينات الحفر لثلاثة عشر بئراً وإنشاء مقاطع ليثولوجية مترابطة، كشفت عن تنظيم عمودي ثلاثي الأجزاء مع تباين جانبي قوي في السحنة الجيولوجية. وعلى الصعيد الهيدروديناميكي، أظهرت اختبارات التسرب بجهاز نفاذية 'غيلف' تبايناً مكانياً واسعاً في الناقلية الهيدروليكية تتراوح بين 21.5 و 1136 مل/ساعة، فيما أسفر تفسير اختبار الضخ على البئر F11 عن ناقلية هيدروليكية بحدود $2.1 \times 10^{-3} \text{ م}^2/\text{ث}$. تؤكد هذه النتائج وجود إمكانات هيدروجيولوجية حقيقية في المنطقة، غير أن استدامتها تستوجب إدارة رشيدة وتقنيات ري موفرة للمياه.

الكلمات المفتاحية : هيدروجيولوجيا، رود نوس، المركب النهائي، الناقلية الهيدروليكية، اختبار الضخ، الصحراء الجزائرية.

Résumé:

La présente étude hydrogéologique porte sur la zone de Rhoud Nouss dans le Sud-Est algérien, qui connaît un développement agricole croissant basé sur l'exploitation des eaux souterraines du Complexe Terminal. L'analyse des cuttings de treize forages et les coupes lithologiques ont révélé une organisation tripartite avec une forte hétérogénéité latérale des faciès. Les essais d'infiltration au perméamètre de Guelph ont montré une forte variabilité des conductivités hydrauliques, de 21,5 à 1136 mm/h, tandis que l'essai de pompage sur le forage F11 a fourni une transmissivité de $2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Ces résultats confirment un potentiel hydrogéologique réel dont la durabilité exige une gestion rationnelle et des techniques d'irrigation économes en eau.

Mots clés : Hydrogéologie, Rhoud Nouss, Complexe Terminal, conductivité hydraulique, essai de pompage, Sahara algérien.

Abstract:

This hydrogeological study focuses on the Rhoud Nouss area in southeastern Algeria, which is experiencing growing agricultural development based on groundwater exploitation from the Terminal Complex aquifer. Based on cuttings analysis of thirteen boreholes and correlated lithological cross-sections, the study revealed a tripartite vertical organization with strong lateral facies heterogeneity. Infiltration tests using the Guelph permeameter showed wide spatial variability in hydraulic conductivity ranging from 21.5 to 1136 mm/h, while pumping test interpretation on borehole F11 yielded a transmissivity of approximately $2.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. These results confirm a real hydrogeological potential, whose sustainability requires rational management and water-efficient irrigation techniques.

Keywords: Hydrogeology, Rhoud Nouss, Terminal Complex, hydraulic conductivity, pumping test, Algerian Sahara.

Liste des figures

Chapitre 1

Figure	Titre	Page
Figure 1	Google-Earth de situation de la zone d'étude	4
Figure 2	Diagramme ombrothermique typique de la région d'étude	5
Figure 3	Coupe litho-stratigraphique de la zone de Rhoud Nouss	6
Figure 4	Carte du système aquifère du Sahara septentrional (SASS)	7

Chapitre 2

Figure	Titre	Page
Figure 1	TD-Diver	11
Figure 2	Baro-Diver	11
Figure 3	Perméamètre de Guelph (modèle 2800K1)	15
Figure 4	Interface graphique d'OUAIP	24

Chapitre 3

Figure	Titre	Page
Figure 1	Carte représentant la situation des forages	27
Figure 2	Carte de la coupe 1	35
Figure 3	Carte de la coupe 2	38
Figure 4	Carte de la coupe 3	41
Figure 5	Carte piézométrique de la zone de Rhoud Nouss (Périmètre Fedj Ben Merah)	45

Chapitre 4

Figure	Titre	Page
Figure 1	Colonne lithologique et coupe technique du forage F11	62
Figure 2	Évolution du niveau piézométrique du forage F11	62
Figure 3	Solution de Theis	63
Figure 4	Solution de Hantush	64

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau	Titre	Page
Tableau 1	Spécifications techniques du TD-Diver et du Baro-Diver	12
Tableau 2	Composition du kit du perméamètre de Guelph	16
Tableau 3	Spécifications techniques du perméamètre de Guelph	17
Tableau 4	Choix du réservoir selon le type de sol	17

Chapitre 3

Tableau	Titre	Page
Tableau 1	Coordonnées des forages réalisés	27

Chapitre 4

Tableau	Titre	Page
Tableau 1	Classification de la conductivité hydraulique selon USDA	49
Tableau 2	Coordonnées géographiques des sites d'essai d'infiltration	50
Tableau 3a	Site 1 – Évolution du niveau d'eau (H1 = 5 cm)	50
Tableau 3b	Site 1 – Évolution du niveau d'eau (H2 = 10 cm)	52
Tableau 4a	Site 2 – Évolution du niveau d'eau (H1 = 5 cm)	53
Tableau 4b	Site 2 – Évolution du niveau d'eau (H2 = 20 cm)	54
Tableau 5a	Site 3 – Évolution du niveau d'eau (H1 = 5 cm)	54
Tableau 5b	Site 3 – Évolution du niveau d'eau (H2 = 10 cm)	55
Tableau 6	Site 4 – Évolution du niveau d'eau (H = 3 cm)	56
Tableau 7	Paramètres hydrodynamiques déterminés par essais à l'infiltromètre de Guelph	57
Tableau 8	Résultats des paramètres hydrodynamiques de l'essai longue durée	64

Sommaire

Titre	Page
Dédicace	/
Remerciements	/
Résumé / Abstract / الملخص	/
Liste des figures	/
Liste des tableaux	/
Sommaire	/
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude	
1. Introduction	4
2. Présentation géographique de la zone d'étude	4
3. Climatologie de la région	5
4. Géologie	5
5. Hydrogéologie	7
6. Conclusion	8
Chapitre 2 : Matériels et Méthodes	
1. Introduction	10
2. Matériels	10
2.1 TD-Diver et Baro-Diver	10
2.2 Perméamètre de Guelph	14
3. Logiciels utilisés	19
3.1 RockWorks 16	19

Titre	Page
3.2 Logiciel OUAIP	21
4. Conclusion	25
Chapitre 3 : Géologie et Hydrogéologie locale	
1. Introduction	27
2. Description des cuttings	28
3. Logs de forage	28
4. Coupes lithologiques	33
5. Carte piézométrique	43
6. Conclusion	46
Chapitre 4 : Hydrodynamique	
1. Introduction	48
2. Infiltration	48
3. Les essais de pompage	61
Conclusion générale	67
Références bibliographiques	71

Introduction générale

L'eau souterraine constitue, dans les régions arides et hyperarides, la ressource naturelle la plus stratégique et la plus précieuse. En Algérie saharienne, où les précipitations sont quasi inexistantes et où l'évapotranspiration dépasse très largement les apports atmosphériques, les aquifères profonds représentent la seule source d'approvisionnement viable pour les besoins domestiques, industriels et agricoles. Dans ce contexte, la connaissance précise des systèmes hydrogéologiques souterrains devient une nécessité absolue pour toute planification rationnelle du développement. La région de Rhoud Nouss, située dans le Sud-Est algérien à environ 350 km au sud de Ouargla, dans la wilaya d'Illizi, s'inscrit dans ce cadre particulièrement contraignant. Connue principalement pour sa richesse en hydrocarbures et son importance dans l'économie énergétique nationale, cette région connaît aujourd'hui un essor agricole notable, porté par des entreprises privées telles que Satrech Benbrahim, qui développent des périmètres irrigués dans un environnement désertique extrême. Cette dynamique agricole émergente repose entièrement sur l'exploitation des eaux souterraines du Complexe Terminal, aquifère majeur du Sahara septentrional algérien, dont les réserves sont importantes mais fragiles et non renouvelables à l'échelle humaine. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, dont l'objectif principal est de réaliser une étude hydrogéologique de la région de Rhoud Nouss, en vue de caractériser les ressources en eaux souterraines disponibles, d'évaluer leurs propriétés hydrodynamiques et de formuler des recommandations adaptées pour une gestion durable de ces ressources au service du développement agricole local. Pour atteindre cet objectif, la démarche adoptée s'articule autour de quatre axes complémentaires. Le premier axe consiste en une présentation générale de la zone d'étude à travers ses caractéristiques géographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques régionales, permettant de poser le cadre de référence indispensable à l'analyse. Le deuxième axe présente les matériels et méthodes utilisés, notamment le système TD-Diver pour le suivi piézométrique automatique, le perméamètre de Guelph pour la mesure de la conductivité hydraulique in situ, et les logiciels RockWorks 16 et OUAIP pour la modélisation géologique et l'interprétation des essais de pompage. Le troisième axe est consacré à l'analyse de la géologie et de l'hydrogéologie locale à travers la description des cuttings de treize forages et la construction de coupes lithologiques corrélées, permettant d'identifier l'architecture du système aquifère et la répartition spatiale des horizons productifs. Enfin, le quatrième axe porte sur la caractérisation hydrodynamique complète de la zone, depuis les propriétés d'infiltration des formations superficielles jusqu'aux paramètres de transmissivité et d'emmagasinement de l'aquifère profond, à travers des essais d'infiltration et un essai de

Introduction générale

pompage de longue durée. Ce travail s'appuie sur des données de terrain collectées entre janvier et mai 2026, dans le cadre de l'exploitation agricole du périmètre Fedj Ben Merah au nord de Rhoud Nouss, et constitue une contribution originale à la connaissance hydrogéologique d'une région encore peu étudiée sous cet angle.

Chapitre1 : présentation de la zone d'étude

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude

1. Introduction :

Ce chapitre présente le cadre général de la zone de Rhoude Nouss à travers ses aspects géographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques, afin de poser les bases nécessaires à la compréhension de l'étude hydrogéologique développée dans les chapitres suivants.

2. Présentation géographique de la zone d'étude :

Rhoude Nouss est une zone saharienne située dans le Sud-Est de l'Algérie, relevant administrativement de la commune de Bordj Omar Driss, wilaya d'Ilizi. Elle occupe une position géographique intermédiaire entre la wilaya de Ouargla au nord et la wilaya d'Ilizi au sud, ce qui lui confère un caractère de carrefour stratégique au cœur du désert algérien. La zone est desservie par la Route Nationale N°3, axe routier majeur qui relie les grandes agglomérations du Sud algérien entre elles. En termes de distances, Rhoude Nouss se trouve à approximativement **350 km** au sud de la ville de Ouargla, et à environ **280 km** au sud de Hassi Messaoud, l'un des pôles pétroliers les plus importants d'Algérie. Sur le plan physique, la région présente un paysage typiquement saharien, caractérisé par de vastes étendues de sable, des formations rocheuses et des plateaux désertiques. Cette situation géographique isolée, combinée à la richesse du sous-sol en hydrocarbures, fait de Rhoude Nouss une zone d'une importance économique et énergétique considérable à l'échelle nationale.

29°16'Nord et 30° Nord parallèles

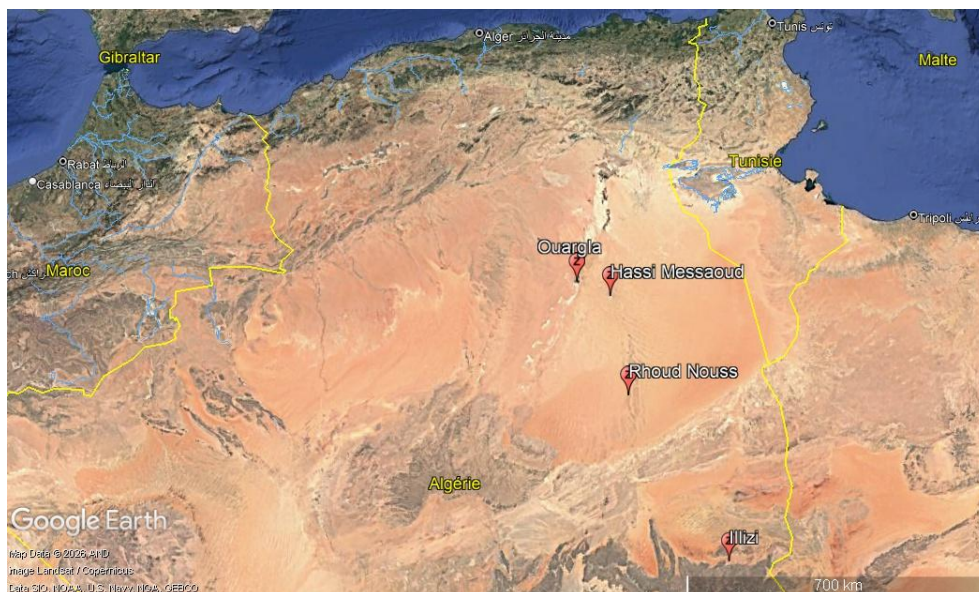


Figure 1: Image Google-Earth présentant la situation de la zone d'étude

3. Climatologie de la région :

La zone de Rhoudé Nouss est soumise à un climat saharien hyperaride, typique des régions du Grand Sud algérien. Les données climatologiques enregistrées sur la période 1991–2020 à la station de référence d'Illizi, la plus proche de la zone d'étude, révèlent des conditions thermiques et pluviométriques extrêmes.

Les températures moyennes annuelles s'établissent à **24,7 °C**, avec des variations saisonnières très marquées : le mois de janvier, le plus froid, affiche une moyenne de **12,8 °C**, tandis que juillet, le mois le plus chaud, atteint une moyenne de **34 °C** avec des maxima pouvant largement dépasser **42 °C**. Les précipitations sont quasi inexistantes, ne dépassant guère **25 mm par an**, réparties sur seulement huit jours, avec un mois d'août totalement sec. Les vents sont relativement actifs tout au long de l'année, avec des vitesses moyennes oscillant entre **10 et 16 km/h**, atteignant leur intensité maximale durant la saison printanière. L'ensemble de ces paramètres climatiques traduit un déficit hydrique permanent et sévère, dans lequel l'évapotranspiration potentielle (**ETP**) dépasse très largement les apports pluviométriques, confirmant ainsi le caractère désertique prononcé de cette région.

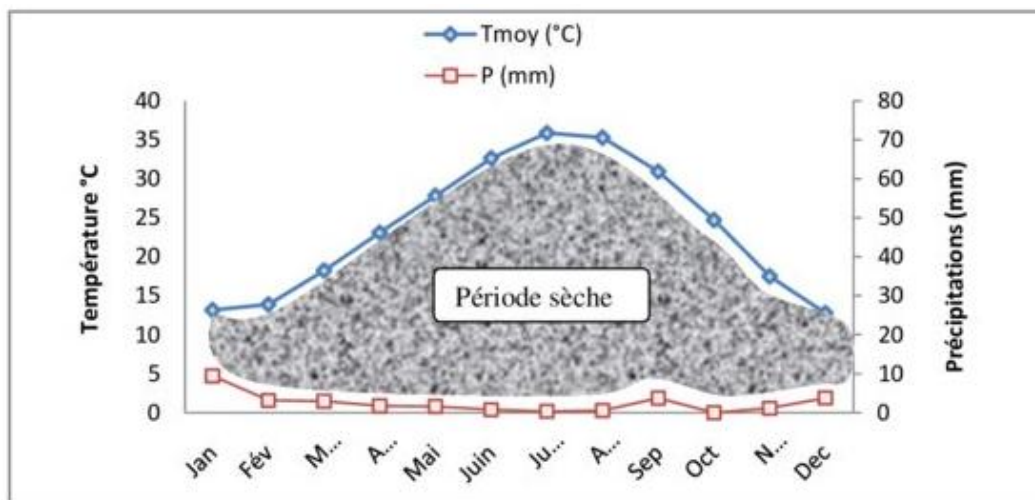


Figure 2: Diagramme Ombrothermique Typique de la région d'étude

4. La géologie :

La zone de Rhoudé Nouss s'inscrit dans le cadre structural de la plateforme saharienne orientale, à la limite entre le bassin de Berkine à l'est et le môle d'Amguid-Messaoud à l'ouest. Du point de vue stratigraphique, la série sédimentaire repose en discordance majeure sur un socle précambrien panafricain et comprend une succession complète allant du Paléozoïque au

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude

Mésozoïque. Les formations paléozoïques incluent des dépôts cambriens représentés par des grès et quartzites à passées conglomératiques, surmontés par le Silurien argileux qui constitue la principale roche mère de la région, puis le Dévonien et le Carbonifère composés d'alternances de grès, d'argiles et de silts. Le Trias représente l'étage stratigraphique le plus important du point de vue pétrolier, subdivisé en deux unités réservoirs majeures : le TAGI (Trias Argileux Gréseux Inférieur), série basale du Mésozoïque à dépôts fluviaux d'une épaisseur variant de 65 à 80 m, et le TAGS (Trias Argileux Gréseux Supérieur), constitué de séquences de chenaux fluviaux et deltaïques à granulométrie moyenne à grossière, d'une épaisseur moyenne de 100 à 150 m, qui constitue le principal réservoir de la région. Du point de vue structural, la zone de Rhoud Nouss se présente sous forme d'anticlinaux complexes ; la structure centrale est un vaste anticlinal d'orientation subméridienne, tandis que les structures périphériques sont des plis orientés NE-SO affectés par des failles de décrochement à composante importante. Ces structures résultent de plusieurs phases tectoniques successives, depuis les événements compressifs panafricains au Précambrien jusqu'aux phases alpines au Tertiaire, en passant par la réactivation des failles normales lors de l'ouverture de la Téthys au Trias-Lias

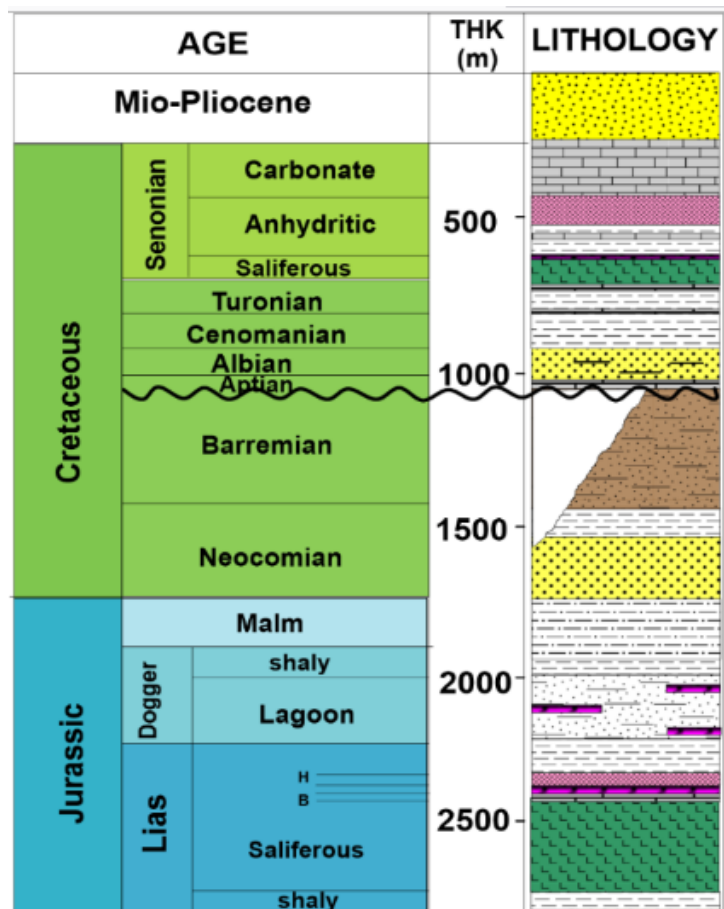


Figure 3: Coupe litho-stratigraphique de la zone de Rhoud Nouss

5. Hydrogéologie :

La zone de Rhoude Nouss s'inscrit dans le vaste système hydrogéologique du Sahara septentrional algérien, dont les ressources en eaux souterraines reposent sur deux grands complexes aquifères superposés. Le système aquifère du Sahara septentrional comprend principalement deux aquifères : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT). Le CI couvre une superficie de plus d'un million de km² avec une épaisseur moyenne de 350 m, et renferme un volume d'eau évalué à $20\,000 \times 10^9$ m³. Ces énormes réserves sont cependant quasi-fossiles.

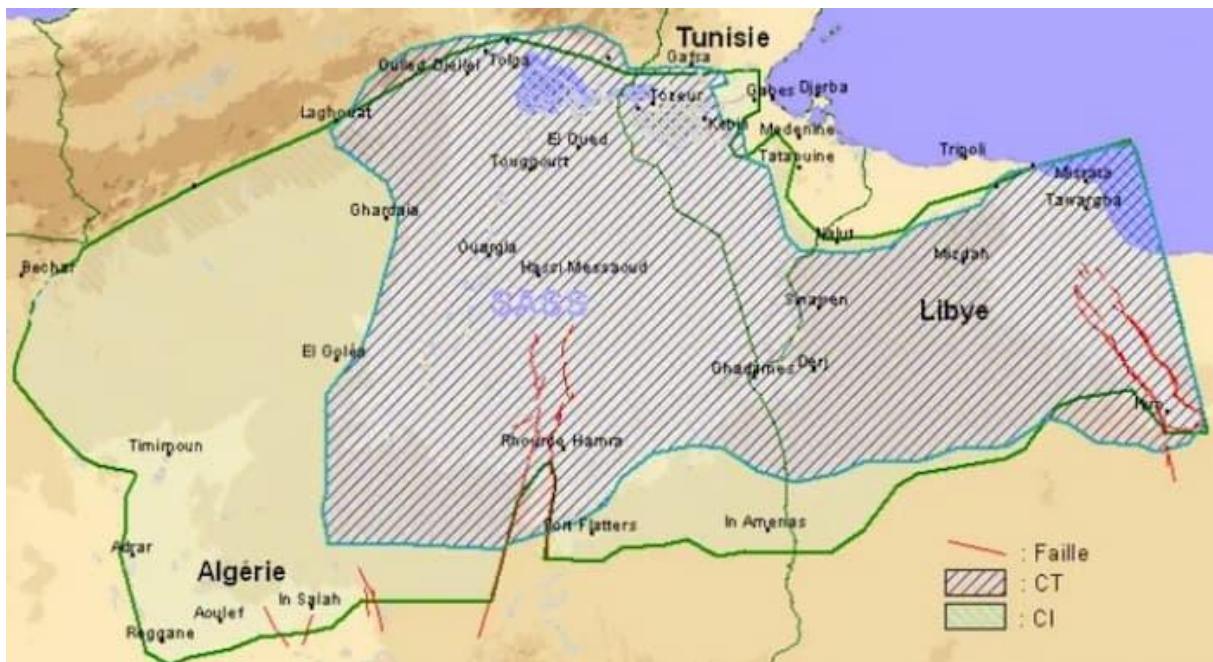


Figure 4: Carte du système aquifère du Sahara septentrional SASS (OSS. 2003)

Le premier et le plus important est le Continental Intercalaire (CI). L'aquifère du Continental Intercalaire est constitué de sables et de grès à quelques passées calcaires et d'argiles, avec une profondeur d'environ 1150 m. La pression de l'eau à la tête de forage est d'environ 15 bars, et le débit varie d'un forage à l'autre, oscillant entre 30 et 60 l/s pour les forages pétroliers reconvertis en forages d'eau, et atteignant l'ordre de 100 l/s pour les forages d'eau ordinaires.

Le second complexe est le Complexe Terminal (CT). L'aquifère du Complexe Terminal, dans la région de Hassi Messaoud proche de Rhoude Nouss, regroupe trois formations : la nappe du Mio-Pliocène, la nappe du Sénono-Éocène et la nappe du Turonien. L'étude de la qualité chimique des eaux de ces aquifères montre qu'elles sont dominées par les faciès évaporitiques

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude

et sont non potables en référence aux normes de l'OMS et aux normes algériennes, car elles sont très dures et présentent une minéralisation élevée, nécessitant un traitement avant utilisation.

En raison du contexte climatique hyperaride de la zone, caractérisé par des précipitations quasi nulles, la recharge de ces nappes est pratiquement inexistante à l'échelle humaine. Au cours des trente dernières années, l'exploitation par forages est passée de 0,6 à 2,5 milliards de m³/an, exposant ces réserves à de nombreux risques dont la salinisation des eaux et la disparition progressive de l'artésianisme.

6. Conclusion:

En définitive, la zone de Rhoude Nouss se caractérise par un climat hyperaride, une géologie complexe et des aquifères à réserves importantes. Ces éléments constituent le cadre de référence indispensable à l'analyse hydrogéologique locale qui sera approfondie dans les chapitres suivants.

Chapitre 2 : Matériels et Méthodes

1. Introduction :

Ce chapitre présente les différents matériels et logiciels utilisés dans le cadre de cette étude hydrogéologique. La fiabilité et la précision des résultats obtenus dépendent directement de la qualité des outils de mesure et d'interprétation employés. Ainsi, deux instruments de terrain ont été utilisés : le système TD-Diver pour la surveillance continue des niveaux d'eau souterraine, et le perméamètre de Guelph pour la mesure de la conductivité hydraulique in situ. Ces mesures ont ensuite été traitées à l'aide de deux logiciels spécialisés : RockWorks 16 pour la modélisation géologique et lithostratigraphique, et OUAIP pour l'interprétation des essais de pompage.

2. Matériels :

2.1. Diver :

Cette section décrit le matériel de mesure utilisé pour la surveillance des niveaux d'eau souterraine, notamment le système d'enregistrement automatique TD-Diver™ et Baro-Diver® (série DI8xx) de Van Essen Instruments.

2.1.1. Description du matériel : TD-Diver™ (Série DI8xx)

Le TD-Diver™ est un enregistreur de données autonome conçu pour la surveillance continue des niveaux d'eau et de la température dans les eaux souterraines, les eaux de surface et les eaux industrielles (Van Essen Instruments, 2018). Il est logé dans un corps cylindrique en acier inoxydable 316L de 22 mm de diamètre et d'environ 110 mm de longueur (capuchon compris), pour un poids d'environ 104 grammes.



Figure 1: TD-Diver

Le Baro-Diver® est le modèle complémentaire dédié à la mesure de la pression atmosphérique ambiante. Il est utilisé conjointement au TD-Diver pour effectuer la compensation barométrique des données de pression enregistrées. En pratique, un seul Baro-Diver suffit pour couvrir un réseau de surveillance dans un rayon de 15 kilomètres.



Figure 2: Baro-Diver

2.1.2. Principe de mesure

Le Diver enregistre la pression absolue, c'est-à-dire la pression totale exercée sur son capteur, incluant à la fois la colonne d'eau au-dessus du capteur et la pression atmosphérique. La hauteur de la colonne d'eau (WC, en cm H₂O) est calculée à partir de la différence entre la pression mesurée par le TD-Diver (p_{Diver}) et la pression atmosphérique mesurée par le Baro-Diver (p_{baro}), selon la formule :

$$WC = 9806,65 \times (p^{\text{diver}} - p^{\text{baro}}) / (\rho \times g)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau (1 000 kg/m³) et g l'accélération gravitationnelle (9,81 m/s²). Le niveau d'eau (WL) par rapport à un point de référence vertical est ensuite calculé en tenant compte de la hauteur du sommet du piézomètre (TOC) et de la longueur effective du câble de suspension (CL) :

$$WL = TOC - CL + WC$$

La communication entre le Diver et l'ordinateur est assurée par une interface optique (protocole série RS232). Le logiciel Diver-Office (Van Essen Instruments, téléchargeable gratuitement sur www.vanessen.com) est utilisé pour la programmation, le démarrage, l'arrêt et le téléchargement des données.

2.1.3. Spécifications techniques principales

Le tableau suivant résume les caractéristiques techniques du TD-Diver et du Baro-Diver utilisés dans cette étude :

Tableau 1 : Spécifications techniques du TD-Diver et du Baro-Diver (série DI8xx) — Van Essen Instruments (2018).

Paramètre	TD-Diver	Baro-Diver
Diamètre	Ø 22 mm	Ø 22 mm
Longueur (capuchon compris)	~ 110 mm	~ 110 mm
Poids	~ 104 g	~ 104 g
Matériau du corps	Acier inoxydable 316L	Acier inoxydable 316L
Plage de mesure (pression)	10 / 20 / 50 / 100 m H ₂ O	1,5 m H ₂ O

Paramètre	TD-Diver	Baro-Diver
Précision maximale (pression)	$\pm 0,5$ cm H ₂ O (typique)	$\pm 0,5$ cm H ₂ O (typique)
Plage de température	-20 °C à +80 °C	-10 °C à +50 °C (ambient)
Précision (température)	$\pm 0,1$ °C (typique)	$\pm 0,1$ °C (typique)
Résolution (température)	0,01 °C	0,01 °C
Capacité mémoire	144 000 mesures	144 000 mesures
Durée de vie batterie	Jusqu'à 10 ans	Jusqu'à 10 ans
Intervalle d'échantillonnage	0,5 s à 99 heures	0,5 s à 99 heures
Protection	IP68 (100 m, 10 ans)	IP68
Communication	Optique / RS232	Optique / RS232

2.1.4. Installation et procédure de mesure :

2.1.4.1. Installation dans le piézomètre :

Le TD-Diver a été suspendu à un câble en acier inoxydable (article MO500) dans le piézomètre, à une profondeur déterminée en fonction du niveau d'eau souterraine attendu. Le câble a été fixé au capuchon du Diver et au couvercle du piézomètre à l'aide de mousquetons de suspension (article MO310). La profondeur effective du capteur de pression a été déterminée à partir de la longueur exacte du câble.

2.1.4.2. Programmation et acquisition des données :

Avant déploiement sur le terrain, chaque Diver a été programmé via le logiciel Diver-Office, avec les paramètres suivants :

- Nom du point de mesure (identifiant unique du piézomètre) ;
- Méthode d'échantillonnage : mémoire à longueur fixe (arrêt automatique à 72 000 mesures) ;
- Intervalle d'enregistrement défini selon les besoins de l'étude.

Chapitre 2: Matériels et Méthode

Le téléchargement des données a été effectué à intervalles réguliers à l'aide d'un lecteur USB (article AS330) connecté au logiciel Diver-Office. La compensation barométrique a été appliquée automatiquement par le logiciel, qui soustrait la pression atmosphérique enregistrée par le Baro-Diver de la pression totale mesurée par le TD-Diver.

2.1.5. Calibrage et contrôle qualité :

Chaque Diver est calibré individuellement en usine à différentes températures et valeurs de pression, pour la durée de vie de l'instrument. Un certificat de calibrage est disponible sur demande auprès du fabricant. La précision de l'horloge interne est garantie à mieux que ± 1 minute par jour à 25 °C, et mieux que ± 5 minutes par an dans les limites de la plage de température opérationnelle.

Des mesures manuelles du niveau d'eau ont été réalisées périodiquement afin de vérifier la cohérence des données enregistrées et de corriger la longueur effective du câble si nécessaire, selon la méthode décrite par Van Essen Instruments (2018) :

$$CL = MM + WC$$

où MM est la mesure manuelle depuis le sommet du tubage jusqu'au niveau de l'eau, et WC la colonne d'eau calculée par le Diver.

2.2. Le Perméamètre de Guelph

2.2.1. Description générale

Le perméamètre de Guelph (modèle 2800K1) est un instrument de mesure de la conductivité hydraulique saturée in situ, conçu par Soilmoisture Equipment Corp. Il s'agit d'un perméamètre à charge constante fonctionnant selon le principe de Mariotte, qui permet de maintenir une hauteur d'eau constante dans un forage cylindrique creusé dans le sol non saturé. Il permet de mesurer rapidement et avec précision :

- La conductivité hydraulique saturée in situ (Kfs)
- La sorptivité du sol (S)
- Le potentiel de flux matriciel (Φ_m)
- Le paramètre α^* (rapport gravité / capillarité)

Chapitre 2: Matériels et Méthode

L'équipement peut être transporté, assemblé et opéré par une seule personne. Les mesures peuvent être réalisées en 30 minutes à 2 heures selon le type de sol, et ne nécessitent qu'environ 2,5 litres d'eau. L'instrument est livré complet dans une mallette rigide de transport.

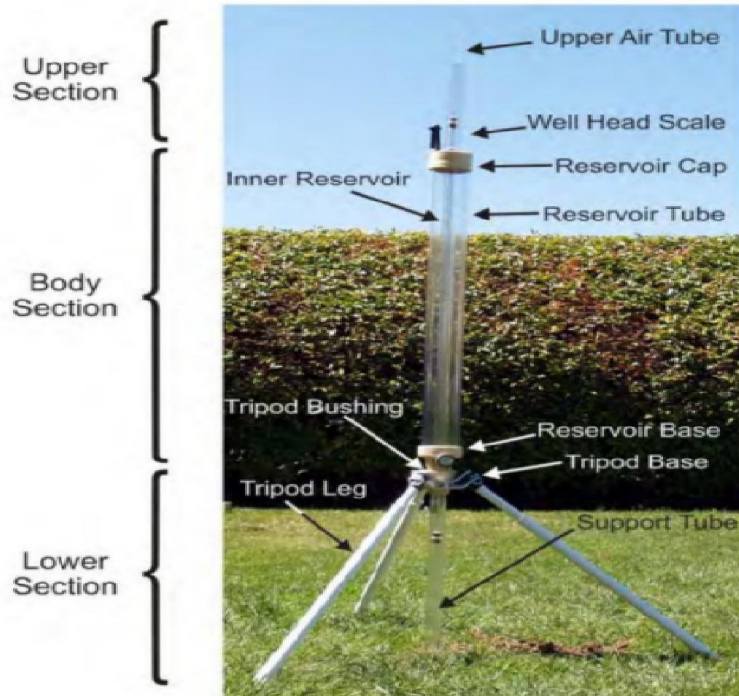


Figure 3 : Le perméamétrie de Guelph (modèle 2800K1)

2.2.2. Principe de fonctionnement

Le perméamètre est inséré dans un forage cylindrique de 6 cm de diamètre, creusé à une profondeur comprise entre 15 et 75 cm sous la surface du sol. Le principe de Mariotte est utilisé pour maintenir une charge hydraulique constante H dans le forage : lorsque le niveau d'eau descend en dessous de la pointe d'entrée d'air, des bulles d'air pénètrent dans le réservoir et compensent la dépression, provoquant ainsi un écoulement d'eau vers le forage pour rétablir le niveau.

Avec le temps, une zone de saturation de forme caractéristique — appelée « bulbe de saturation » — se développe autour du forage. Ce bulbe est très stable et sa forme dépend du type de sol, du rayon du forage et de la hauteur d'eau maintenue. Une fois l'écoulement en régime permanent atteint, le débit mesuré à partir du réservoir est utilisé pour calculer les propriétés hydrauliques du sol.

Chapitre 2: Matériels et Méthode

2.2.3. Composition du kit (Modèle 2800K1)

Le perméamètre de Guelph se présente sous forme d'un kit complet contenu dans une mallette rigide de transport (132 cm × 44 cm × 15 cm, 11 kg). Il comprend les éléments suivants :

Tableau 2: Composition du kit

N°	Composant	Composant (suite)	Rôle
1	Réservoir d'eau collapsible	(11,36 L / 3 gallons)	Transport de l'eau sur le terrain
2	Tarière de calibrage	(Sizing Auger)	Calibration du forage à 6 cm de diamètre
3	Tarière à sol	(Soil Auger)	Creusement préliminaire du forage
4	Manchon du trépied	(Tripod Base Bushing)	Fixation du trépied
5	Brosse de préparation	(Well Prep Brush)	Élimination de la couche colmatée
6	Assemblage du réservoir	(Reservoir Assembly)	Stockage eau / mesure du débit
7	Échelle & tube d'air supérieur	(Well Head Scale & Upper Air Tube)	Lecture de la hauteur d'eau
8	Pompe à vide manuelle	(Vacuum Hand Pump)	Création d'un vide initial
9	Tube de support & tube d'air inférieur	(Support Tube & Lower Air Tube)	Conduite de l'eau vers le forage
10	Poignée de la tarière	(Auger Handle Assembly)	Manipulation des tarières
11	Pieds du trépied	(Tripod Legs)	Support et stabilisation
12	Mallette de transport	(Carrying Case)	Protection et portabilité

2.2.4. Caractéristiques techniques

Tableau 3: Spécifications techniques du Le perméamètre de Guelph

Paramètre	Valeur
Diamètre de coupe de la tarière	6,0 cm (2-3/8 pouces)
Plage de hauteur d'eau dans le forage	2,5 cm à 25 cm
Profondeur de mesure (unité standard)	15 à 75 cm
Profondeur maximale (avec extensions)	~315 cm
Gamme de conductivité hydraulique mesurable	10^{-4} à 10^{-7} m/s (10^{-2} à 10^{-5} cm/s)
Capacité maximale du perméamètre	3,18 litres (0,84 gallons)
Capacité du réservoir d'eau collapsible	11,36 litres (3,0 gallons)
Section transversale réservoir combiné (valeur X)	35,22 cm ² ($\pm 0,18$ cm ²)
Section transversale réservoir interne (valeur Y)	2,16 cm ² ($\pm 0,04$ cm ²)
Dimensions de la mallette	132 cm × 44 cm × 15 cm
Poids total (mallette complète)	11 kg (25 lbs)
Volume d'eau nécessaire par mesure	~2,5 litres
Durée d'une mesure	0,5 à 2 heures

2.2.5. Choix du réservoir selon le type de sol

Le perméamètre dispose de deux configurations de réservoir, sélectionnées en fonction de la perméabilité du sol afin d'obtenir une résolution de mesure optimale :

Tableau 4 : Choix du réservoir selon le type de sol

Configuration	Type de sol	Position de la vanne
Réservoir combiné (Inner + Outer)	Sols de perméabilité modérée à élevée : sables, limons structurés	Vanne vers le haut — position 12 h

Configuration	Type de sol	Position de la vanne
Réservoir interne seul	Sols de faible perméabilité : argiles, sols compactés, limons fins	Vanne vers le bas — position 6 h

Si la vitesse de chute du niveau d'eau dans le réservoir combiné est trop lente pour être mesurée avec précision (intervalles de 2 minutes insuffisants), il convient de basculer vers le réservoir interne seul (vanne en position 6 h). Une fois la configuration choisie, la vanne ne doit plus être modifiée en cours de mesure.

2.2.6. Procédure de mesure

La mesure se déroule en plusieurs étapes successives :

Étape 1 — Préparation du forage

Creusement à la tarière à sol puis calibration à la tarière de calibrage pour obtenir un forage de 6 cm de diamètre et de profondeur uniforme. La brosse de préparation est ensuite utilisée pour éliminer la couche colmatée générée par l'augmentation, qui pourrait constituer un obstacle à l'écoulement naturel de l'eau.

Étape 2 — Assemblage et remplissage

Assemblage du trépied, connexion des tubes d'air et du tube de support, puis remplissage du réservoir jusqu'à ce qu'aucune bulle d'air ne s'échappe de l'orifice de remplissage. Le bouchon de remplissage est ensuite mis en place et le tube à vide fermé par la bague de serrage.

Étape 3 — Mise en place dans le forage

Le perméamètre est centré au-dessus du forage à l'aide du trépied. Le tube de support est inséré dans le forage en évitant de faire tomber des débris au fond. Le manchon du trépied est poussé vers le bas pour stabiliser l'instrument.

Étape 4 — Établissement de la hauteur d'eau H_1

Le tube d'air supérieur est remonté lentement jusqu'à la hauteur souhaitée H_1 (entre 5 et 10 cm pour les sols perméables ; entre 10 et 25 cm pour les sols peu perméables), lue sur l'échelle Well Head Scale à l'aide de l'indicateur de hauteur.

Étape 5 — Suivi et détermination du régime permanent

Le niveau d'eau dans le réservoir est relevé à intervalles réguliers (généralement toutes les 2 minutes). Pour chaque intervalle, le taux de chute R est calculé comme la variation du niveau divisée par l'intervalle de temps (exprimé en cm/s). Le régime permanent $\bar{R}_1$ est atteint lorsque trois valeurs consécutives de R sont identiques.

Étape 6 — Méthode à deux charges (optionnelle)

Pour la méthode à deux charges, plus précise, une seconde hauteur $H_2 > 2H_1$ est établie sans perturber l'instrument, et le régime permanent $\bar{R}_2$ est déterminé de la même façon.

Étape 7 — Calculs

À partir des valeurs $\bar{R}_1$ (et $\bar{R}_2$), des constantes du réservoir (X ou Y), du rayon du forage ($a = 3$ cm) et du facteur de forme C (déterminé selon la catégorie texturale du sol), les paramètres Kfs , Φ_m et α^* sont calculés manuellement (Tables 2 et 3 du manuel) ou à l'aide du tableur Excel « Guelph Permeameter Calculator ».

2.2.7. Avantages principaux

- Mesure in situ sans prélèvement d'échantillon, représentative des conditions naturelles du sol
- Opération par une seule personne, équipement léger et portable
- Applicable dans la quasi-totalité des types de sols et à différentes profondeurs
- Fournit simultanément Kfs , Φ_m , α^* et S à partir d'une même mesure
- Applicable à de nombreux domaines : irrigation, drainage, fosses septiques, études hydrologiques, sites de stockage de déchets, etc.

3. Logiciels utilisés :

3.1. Rockworks :

3.1.1. Introduction :

RockWorks est un programme pour créer des cartes 2D et 3D, des journaux et des coupes transversales, des modèles géologiques, des rapports de volume et des diagrammes de géologie générale pour les industries de l'environnement, de la géotechnique, des mines et du pétrole. Il

Chapitre 2: Matériels et Méthode

est principalement utilisé dans le pétrole, l'hydrogéologie, l'environnement, géotechnique et l'industrie minière.

3.1.2. Logiciel RockWorks 16

RockWorks 16 est un logiciel de modélisation géologique développé par la société RockWare Inc. (Golden, Colorado, États-Unis). Selon le site officiel de l'éditeur, RockWorks est un logiciel polyvalent conçu pour la création de cartes 2D et 3D, de journaux de forages (logs), de coupes géologiques, de modèles souterrains et de rapports volumétriques, destinés aux secteurs de l'environnement, de la géotechnique, des mines et du pétrole (RockWare Inc., 2024a).

Développé pour la première fois en 1985, RockWorks est utilisé dans les industries minières, pétrolières et environnementales pour la visualisation souterraine, la gestion de bases de données de forages, la création de grilles, de modèles solides et le calcul d'analyses volumétriques (RockWare Inc., 2024a).

Dans le cadre de la présente étude, le logiciel RockWorks 16 a été utilisé pour la saisie, la gestion et la modélisation des données de sondages afin de visualiser la structure lithostratigraphique de la zone d'étude et d'identifier les horizons aquifères.

3.1.3. Module Borehole Manager

Le module Borehole Manager constitue le cœur du logiciel. Il offre une base de données permettant la saisie des données de forages (emplacements des têtes de puits, enquêtes en profondeur, lithologie, niveaux d'eau, couleurs, etc.). Il permet notamment de (RockWare Inc., 2024b) :

- Créer des logs individuels ou des coupes multi-logs en 2D et 3D, avec une fenêtre de conception interactive pour organiser les colonnes de représentation ;
- Afficher aussi bien des puits verticaux que des puits déviés ou inclinés ;
- Générer des cartes de localisation des forages avec diverses options d'étiquetage, en incluant les courbes de la surface topographique ;
- Exporter les résultats vers Google Earth ou des logiciels SIG.

3.1.4. Coupes géologiques et diagrammes en clôture

RockWorks 16 permet de créer des coupes transversales 2D mono- ou multi-panneaux à travers les données géologiques (lithologie interpolée, stratigraphie, données quantitatives, fractures et aquifères), en incluant les logs sources, les bordures, les titres et les légendes (RockWare Inc., 2024b). Par ailleurs, des tranches tridimensionnelles à travers les modèles de surface et les

modèles en blocs peuvent être générées sous forme de fence diagrams (diagrammes en clôture), offrant une représentation spatiale complète de la géologie souterraine.

3.1.5. Types de données souterraines intégrées

Selon RockWare Inc. (2024c), le logiciel permet d’afficher et de modéliser différents types de données de forages :

- Lithologie : matériaux lithologiques avec couleurs et motifs en 2D et en 3D ;
- Stratigraphie : modélisation des surfaces stratigraphiques par interpolation et création de modèles solides 3D ;
- Données quantitatives (I-Data) : mesures géophysiques, géochimiques ou géotechniques saisies par intervalles de profondeur ;
- Fractures : modélisation de la proximité des fractures en 3D ;
- Aquifères : identification et modélisation des horizons aquifères.

Les types de diagrammes disponibles incluent des voxels 3D, des isosurfaces, des diagrammes en clôture, des profils, des coupes transversales 2D, des sections projetées ainsi que des cartes géologiques interpolées (RockWare Inc., 2024c).

3.1.6. Modélisation 3D — Modèles solides

RockWorks permet d’interpoler des « modèles solides » ou « modèles en blocs » 3D continus à partir de points XYZG simples ou de données de forages souterrains. La flexibilité du logiciel en fait un outil populaire pour la génération de cartes, modèles, coupes transversales et diagrammes dans de nombreuses industries des sciences de la Terre (RockWare Inc., 2024a). Le logiciel offre la modélisation des mesures géophysiques, géochimiques et géotechniques, des matériaux lithologiques observés, des fractures et des vecteurs (RockWare Inc., 2024c).

3.1.7. Validation des modèles

La stratégie de base adoptée dans RockWorks consiste à créer une base de données de forages incluant les résultats analytiques de diverses propriétés physiques et chimiques en fonction de la profondeur. Une fois la base de données créée, des visualisations telles que des coupes transversales, des diagrammes en clôture et des diagrammes en blocs sont générées pour vérifier la validité et la cohérence géologique de la modélisation (RockWare Inc., 2024a).

3.2. Présentation du logiciel OUAIP

Le logiciel OUAIP (Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essais) est un outil informatique gratuit développé par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) en France. Il est spécifiquement conçu pour l'interprétation des tests hydrauliques en

hydrogéologie, notamment les essais de puits (pompages par paliers) et les essais de nappe (pompages de longue durée). Il permet également de simuler l'impact prédictif d'un pompage sur la nappe.

L'acronyme OUAIP se prononce « wep » en français. Le logiciel est mis à disposition gratuitement sur le site officiel du BRGM (<http://ouaip.brgm.fr/>) et fonctionne sous environnement Windows. Il est traduit en français, anglais et espagnol.

L'objectif principal d'OUAIP est d'améliorer l'interprétation des pompages d'essai et, en particulier, la fiabilité de l'estimation des paramètres caractéristiques des aquifères, tels que la transmissivité (T) et le coefficient d'emmagasinement (S).

3.2.1. Modes de fonctionnement

Le logiciel OUAIP propose trois modes de fonctionnement principaux :

- Interpréter un pompage par paliers : ce mode permet de caractériser les performances de l'ouvrage (forage) en déterminant les pertes de charges quadratiques et le débit critique de l'ouvrage testé. Il s'appuie sur la méthode de Jacob pour l'interprétation des essais par paliers de débit.
- Interpréter un pompage d'essai : ce mode permet d'évaluer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère testé, notamment la transmissivité (T) et le coefficient d'emmagasinement (S), à partir des mesures de niveau et de débit réalisées pendant un pompage et la remontée du niveau.
- Simuler un pompage d'essai : ce mode permet de réaliser une simulation prévisionnelle des rabattements induits dans un ouvrage par une chronique de pompage déterminée, plus ou moins complexe.

3.2.2 Solutions analytiques intégrées

Le logiciel OUAIP intègre plusieurs solutions analytiques classiques de l'hydrogéologie pour l'interprétation des pompages d'essai, correspondant à différentes typologies de nappe et de milieux souterrains :

- Solution de Theis (1935) : Solution de référence pour les nappes captives homogènes, isotropes et d'extension infinie. Elle exprime le rabattement (s) en fonction du débit (Q), de la transmissivité (T), du coefficient d'emmagasinement (S), du temps (t) et de la distance au forage (r).

Chapitre 2: Matériels et Méthode

- Solution de Papadopoulos-Cooper (1967) : Prend en compte l'effet de capacité du puits (wellbore storage effect), particulièrement important pour les ouvrages de grand diamètre.
- Solution de Hantush (1964) : S'applique aux nappes semi-captives (leaky aquifers) avec prise en compte de l'effet de drainance d'un aquitard sus-jacent et de la pénétration partielle du puits.
- Solution de Gringarten-Witherspoon (1972) : Adaptée aux milieux fissurés (fractured media) et permet de modéliser les écoulements dans les aquifères fissurés.
- Solution de Neuman : Disponible à partir de la version 3.1, représente le comportement des nappes libres (unconfined aquifers) avec prise en compte du drainage différé.

3.2.4. Effets perturbateurs pris en compte

OUAIP permet de prendre en compte plusieurs effets perturbateurs qui peuvent affecter les mesures lors d'un pompage d'essai :

- Effet de capacité (wellbore storage) : phénomène lié au stockage d'eau dans le puits de pompage, significatif pour les grands diamètres.
- Effet de vidange (backflow) : phénomène de reflux d'eau dans le puits lors de l'arrêt du pompage.
- Effet de skin : effet pariétal lié à l'altération de la zone immédiate autour du puits (colmatage ou développement).
- Pertes de charges quadratiques : pertes de charge non linéaires liées à la turbulence de l'écoulement près du puits.
- Effets de limites : prise en compte des conditions aux limites de l'aquifère (limite alimentée ou limite étanche).

3.2.5. Méthodologie d'interprétation

L'interprétation d'un pompage d'essai avec OUAIP repose sur le calage d'une courbe théorique sur les données expérimentales de rabattement mesurées in situ. La méthodologie suit les étapes suivantes :

1. Importation des données : Les données de temps, rabattement et débit sont importées dans le logiciel. OUAIP accepte les formats texte (.txt, .csv) et permet le copier-coller direct depuis Excel.

Chapitre 2: Matériels et Méthode

2. Choix de la solution analytique : En fonction du contexte hydrogéologique (type de nappe, géométrie, milieu poreux ou fissuré), l'utilisateur sélectionne la solution analytique la plus adaptée.

3. Ajustement des paramètres : Les paramètres hydrodynamiques (T, S, et autres paramètres spécifiques) sont ajustés manuellement ou par optimisation algorithmique pour obtenir le meilleur calage entre la courbe théorique et les points expérimentaux.

4. Validation du modèle : La qualité de l'ajustement est évaluée visuellement et par le coefficient de corrélation. Les résidus entre la courbe théorique et les données observées sont analysés.

5. Estimation des paramètres : Les valeurs finales de transmissivité (T) et de coefficient d'emménagement (S) sont déterminées à partir du meilleur calage obtenu.

3.2.6. Interface et fonctionnalités

L'interface graphique d'OUAIP est organisée en deux parties distinctes. La partie gauche est dédiée à la saisie des données d'entrée, structurée sous forme d'onglets à utiliser progressivement de la gauche vers la droite : « Données », « Formule », « Paramètres » et « Rapport ». La partie droite affiche en temps réel les courbes de rabattement (données expérimentales et courbe théorique calée) avec possibilité d'afficher deux graphiques simultanément avec des échelles différentes.

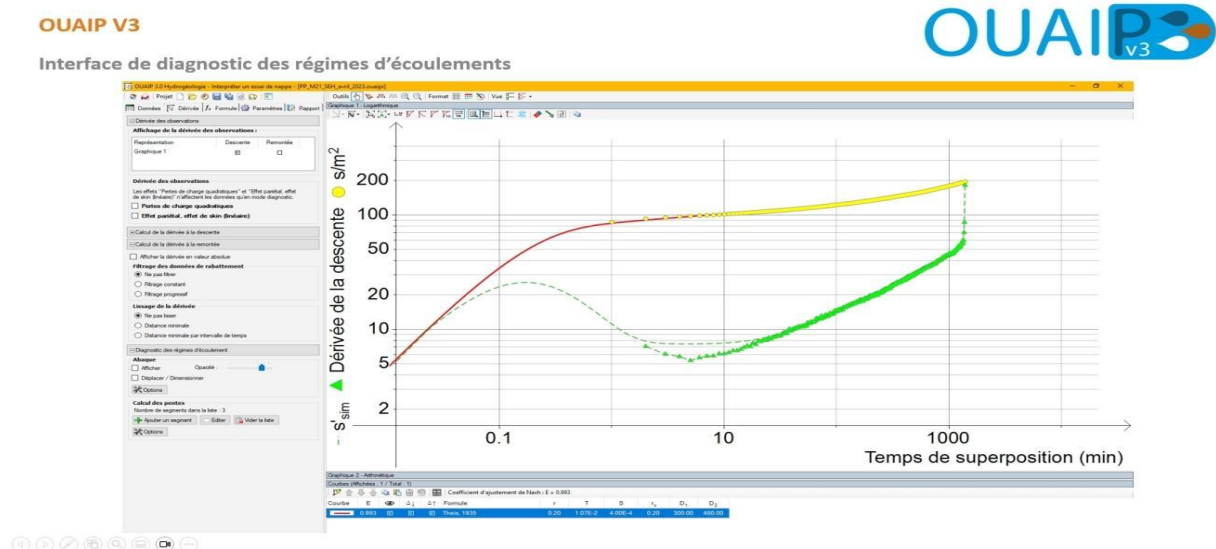


Figure 4 : L'interface graphique d'OUAIP

4. Conclusion :

L'ensemble des matériels et logiciels présentés dans ce chapitre constitue un arsenal technique complet et adapté aux objectifs de l'étude. Le couplage des mesures de terrain assurées par le Diver et le perméamètre de Guelph avec les outils d'interprétation que sont RockWorks 16 et OUAIP permet d'aborder l'analyse hydrogéologique de la zone de Rhoude Nouss de manière rigoureuse et fiable. Les résultats obtenus grâce à ces outils seront présentés et discutés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 3 :

Géologie et

hydrogéologie locale

1. Introduction :

Dans cette partie, une description détaillée de la géologie locale sera précisée par l'analyse des cuttings des 13 forages réalisés dans le cadre de l'exploitation agricole de l'entreprise Satrech Benbrahim dans la région Nord de Rhoud Nouss. Une synthèse hydrogéologique précisera les composants essentiels du système aquifère traversé par les forages en l'occurrence le complexe terminal (CT).

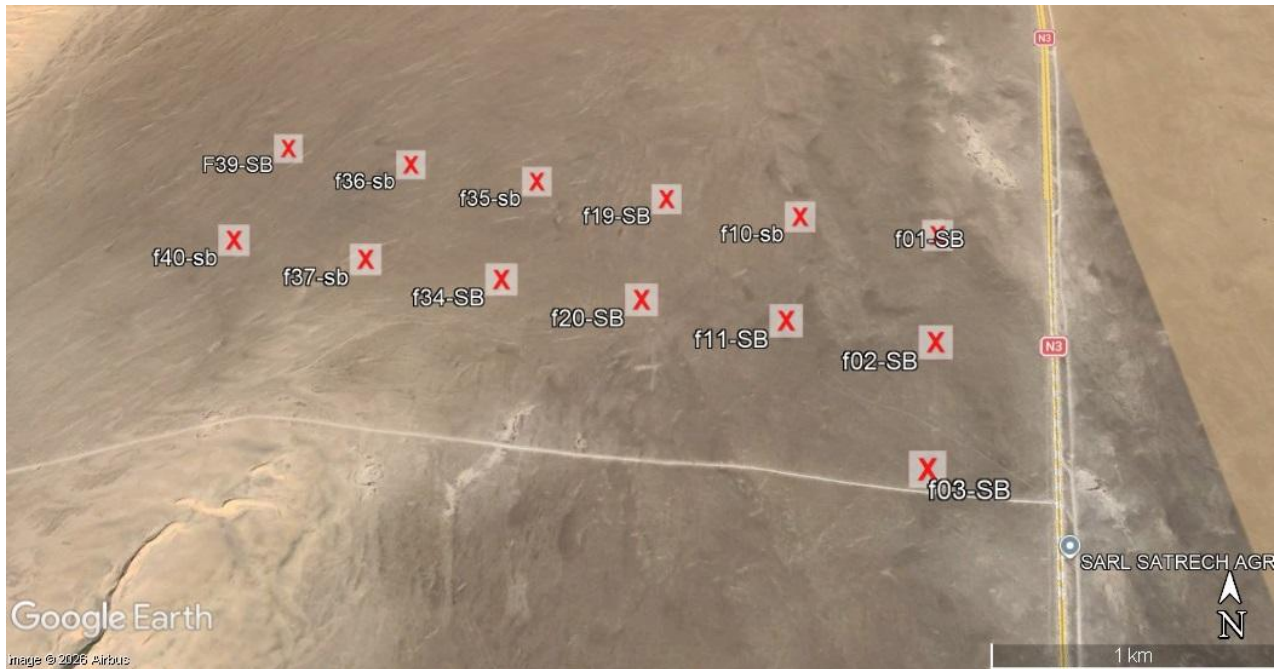


Figure 1: Carte représente la situation de forage

Tableau 1: Coordonnées des forages realises

Forage	Coordonnées UTM WGS 84 – 32R		Coordonnées Géographiques	
	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
F01-SB	3312080.29 m N	249993.51 m E	29°54'50.58"N	6°24'37.89"E
F02-SB	3311444.46 m N	249857.80 m E	29°54'29.84"N	6°24'33.35"E
F03-SB	3310813.29 m N	249700.91 m E	29°54'09.24"N	6°24'28.04"E
F10-SB	3312216.00 m N	249357.68 m E	29°54'54.52"N	6°24'14.08"E
F11-SB	3311580.17 m N	249221.97 m E	29°54'33.78"N	6°24'09.55"E
F19-SB	3312351.71 m N	248721.85 m E	29°54'58.44"N	6°23'50.27"E
F20-SB	3311715.88 m N	248586.14 m E	29°54'37.70"N	6°23'45.78"E
F34-SB	3311851.00 m N	247950.00 m E	29°54'41.64"N	6°23'21.97"E
F35-SB	3312487.00 m N	248086.00 m E	29°55'02.39"N	6°23'26.50"E
F36-SB	3312623.00 m N	247450.00 m E	29°55'06.33"N	6°23'02.69"E
F37-SB	3311987.00 m N	247314.00 m E	29°54'45.59"N	6°22'58.16"E
F39-SB	3312758.00 m N	246814.00 m E	29°55'10.24"N	6°22'38.88"E
F40-SB	3312123.00 m N	246678.00 m E	29°54'49.53"N	6°22'34.35"E

2. Discription du cuttings :

2.1. Analyse Lithostratigraphique Générale :

L'analyse comparative des logs lithologiques des treize forages permet de dégager une organisation verticale tripartite caractéristique du Continental Intercalaire dans la région de Rhoud nouss. Cette succession se décompose en trois membres lithostratigraphiques distincts, décrits de haut en bas :

2.1.1. Membre Supérieur (0 – 100 m environ) :

Dominé par des sables grossiers à moyens, riches en graviers siliceux et caillouteux, correspondant aux dépôts d'épandage alluvial et aux systèmes de cônes de déjection. La présence de graviers hétérogènes siliceux et calcaires, sub-anguleux à sub-arrondis, reflète le transport par des courants fluviaux puissants. Les teintes claires (blanc, rosâtre, jaunâtre) indiquent des conditions d'oxydation en milieu continental aride à semi-aride.

2.1.2. Membre Intermédiaire (100 – 200 m environ) :

Alternance de sables fins à moyens de couleurs variables (blanchâtres, jaunâtres, rougeâtres) avec des passées argileuses et gréseuses. Les teintes rougeâtres traduisent une oxydation en contexte continental, tandis que les niveaux gypseux intercalés reflètent des épisodes d'évaporation dans des environnements semi-arides. Les intercalations calcaires et dolomitiques, parfois dures à passages de silex, témoignent de phases de diagenèse carbonatée.

2.1.3. Membre Inférieur (200 – 275 m environ)

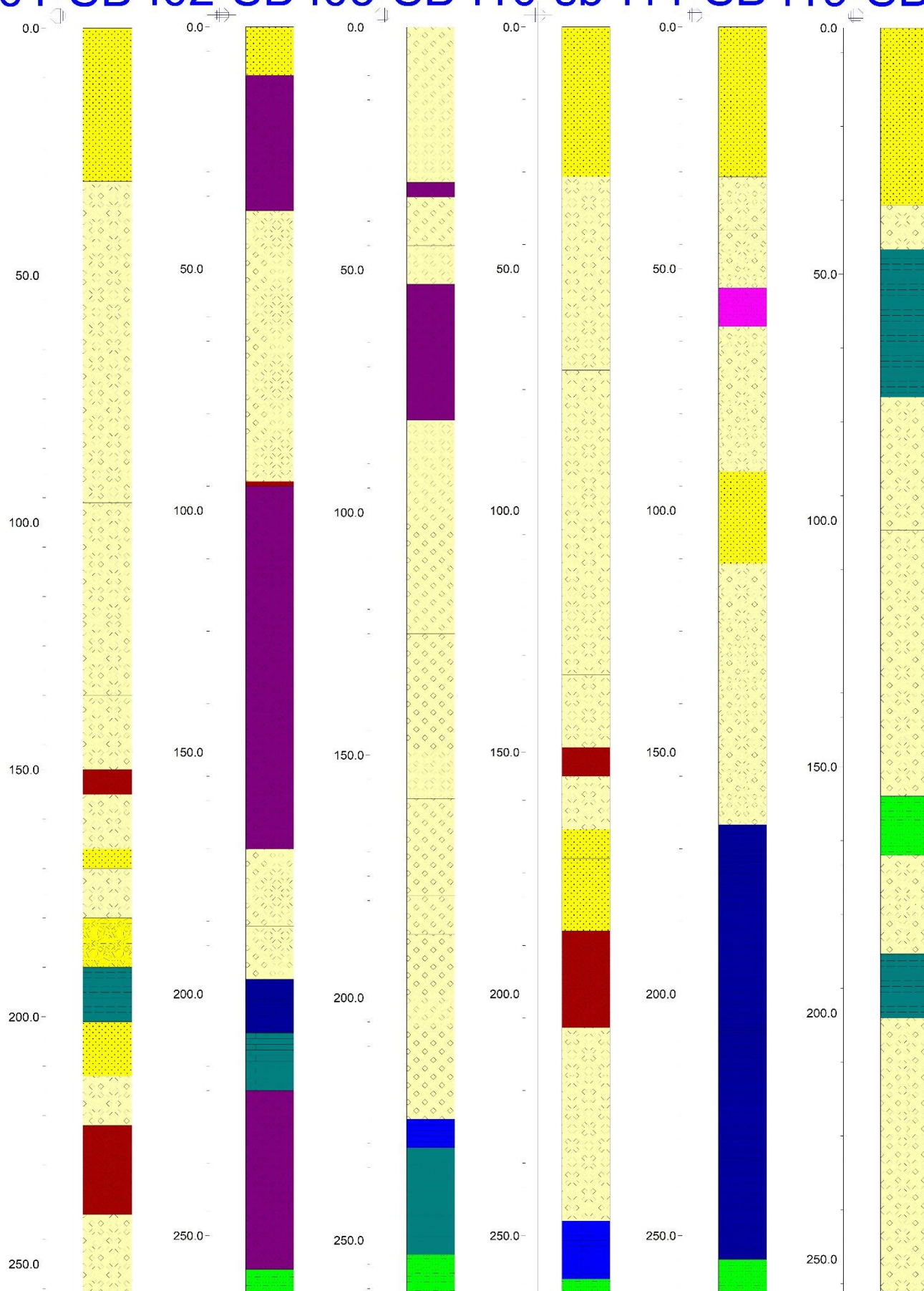
Caractérisé par des sables fins blanchâtres à gréseux, des niveaux calcaires parfois dolomitiques, et des argiles plastiques jaunes à brun-noirâtres à la base. Ces horizons argileux terminaux représentent les niveaux imperméables qui confinent l'aquifère et constituent la limite inférieure des ouvrages de captage. La transition progressive des faciès sableux vers les argiles plastiques marque le passage vers l'aquiclude de base du Continental Intercalaire.

3. Les logs de forage :

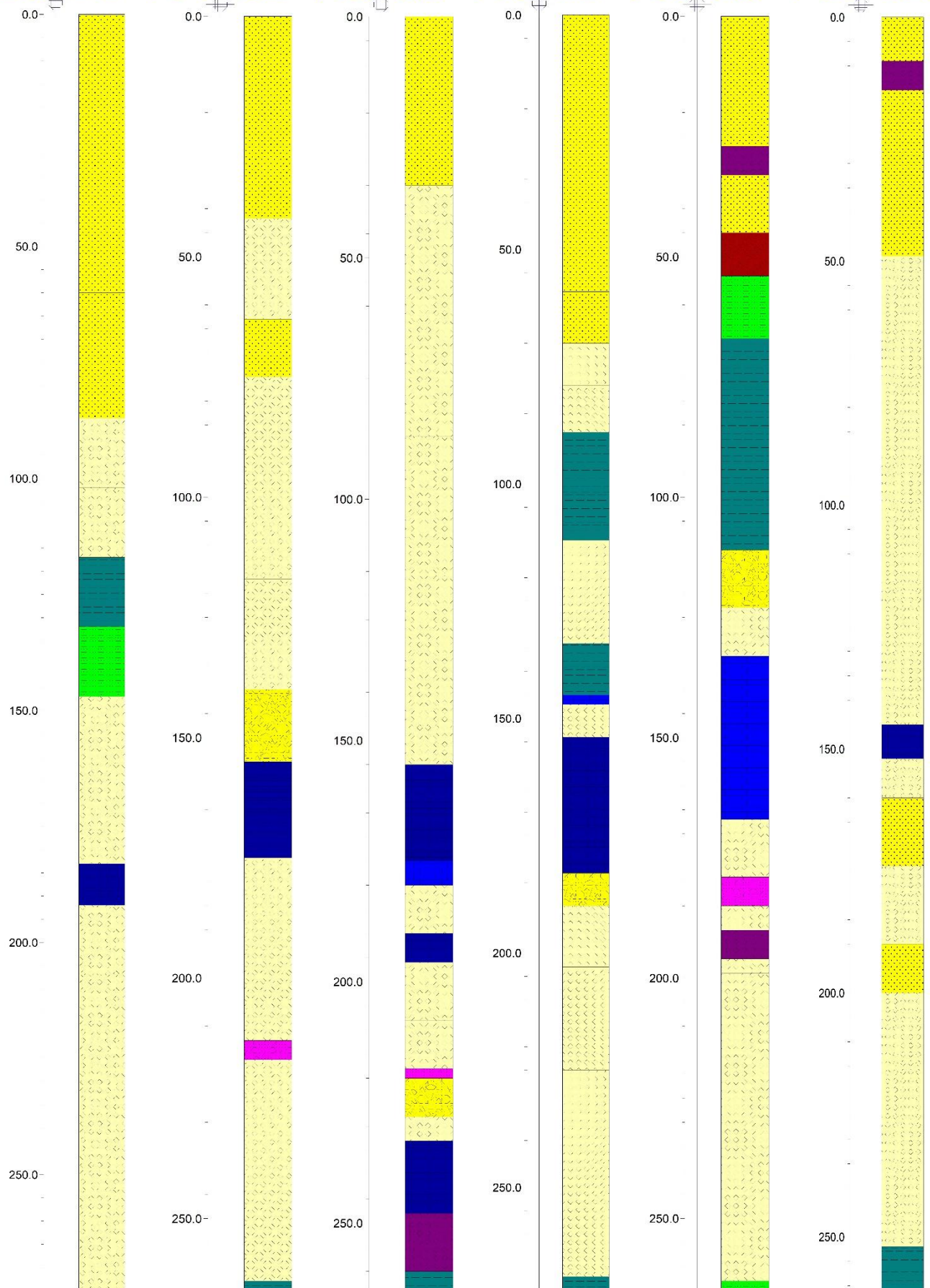
Sur la base des résultats de la description des cuttings (déblais de forage), et en exploitant le logiciel RockWorks 16, les logs de forage suivant a été obtenu.

Les résultats d'exploitation :

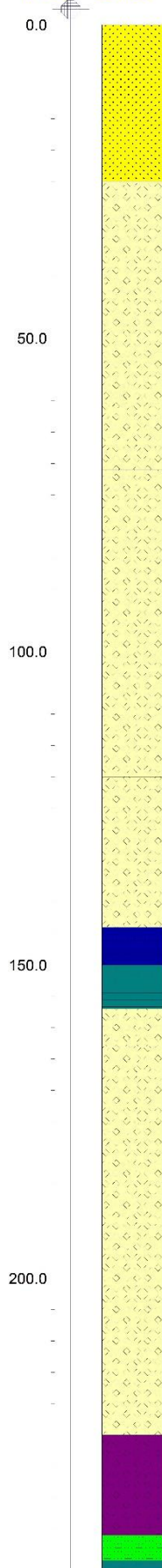
f01-SB f02-SB f03-SB f10-sb f11-SB f19-SB



f20-SB f34-SB f35-sb f36-sb f37-sb F39-SB



f40-sb



Lithology	
	sable grossiers
	sable moyens
	sable fin
	argile
	grès
	gypse
	sable argileux
	calcaires gréseux
	gravier
	argile sableuse
	calcaires friables
	calcaires dure
	sable gréseux

3.1. Analyse générale des logs

L'examen des treize logs (f01 à f40-SB, profondeurs 247-275 m) montre une organisation verticale tripartite récurrente, typique du Continental Intercalaire/Complexe Terminal de la région :

La partie supérieure (0-100 m) : sables grossiers à moyens dominants, riches en graviers siliceux et calcaires sub-anguleux à sub-arrondis, témoins de dépôts d'épandage alluvial et de cônes de déjection en milieu continental aride.

Partie intermédiaire (100-200 m) : alternance de sables fins à moyens (teintes blanchâtres, jaunâtres, rougeâtres) avec passées argileuses, gréseuses et niveaux gypseux, traduisant des oxydations continentales et des épisodes d'évaporation.

Partie inférieure (200-275 m) : sables fins blanchâtres à gréseux, niveaux calcaires/dolomitiques, et argiles plastiques jaunes à brun-noirâtres formant l'aquiclude de base.

3.2. Interprétation des logs

Les colonnes lithologiques confirment une séquence détritique dominante (environnement continental à paraliq), avec des réservoirs sableux et graveleux constituant les unités les plus productives (forte perméabilité), des corps de gypse et de gravier discontinus, de répartition latérale très irrégulière (présents dans certains forages comme f02-SB, f37-SB, absents ailleurs), révélant des bassins évaporitiques et des paléochenaux localisés, une transgression carbonatée suggérée par les calcaires plus fréquents vers l'Est et le Sud-Est (f02, f03, f40), indiquant une influence marine depuis ces directions, une forte variabilité latérale des faciès (grès ↔ calcaire ↔ gypse) traduisant un système fluvial en tresses avec coexistence de chenaux sableux actifs et zones de décantation argileuse.

3.3. Synthèse sur l'examen des logs

L'interprétation des logs lithologiques des treize forages met en évidence une séquence détritique nettement dominante, indicatrice d'un environnement de dépôt continental à paraliq (deltaïque, estuarien ou littoral), où les sables (grossiers, moyens et fins) et les grès constituent l'essentiel des faciès rencontrés.

La présence de corps de gypse et d'anhydrite, de répartition discontinue et lenticulaire, traduit des épisodes répétés de restriction du milieu de dépôt, caractéristiques de contextes lagunaires ou de sabkhas, sans continuité latérale notable d'un forage à l'autre.

Par ailleurs, l'apparition de niveaux calcaires plus marqués vers l'Est et le Sud-Est de la zone (forages f02, f03 et f40-SB) suggère une influence ou une ingression marine ponctuelle depuis ces directions, contrastant avec le caractère essentiellement continental observé sur le reste des forages.

Enfin, l'alternance fréquente entre faciès gréseux, calcaires et gypseux, observée d'un log à l'autre, révèle une hétérogénéité réservoir importante. Cette variabilité lithologique, déjà perceptible à l'échelle individuelle des forages, constitue un facteur déterminant pour toute exploitation future de l'aquifère et justifie l'approfondissement de cette analyse à travers la construction de coupes géologiques corrélées.

4. Les coupes lithologiques :

En utilisant les coordonnées géographiques de chaque puits, la profondeur de chaque puits, la description des cuttings et les logs, nous avons exploité le logiciel RockWorks qui a permis d'obtenir les trois coupes géologiques suivantes.

Coupe 1 :

1. Interprétation de la Coupe 1 — Direction NW–SE

Cette coupe recoupe six forages selon un axe NW–SE, de F39-SB (nord-ouest) à F01-SB (sud-est). Elle est la plus représentative des variations latérales de faciès dans la partie septentrionale de la concession.

2.1 Structure générale de la coupe :

La coupe révèle une épaisseur totale explorée d'environ 250 à 260 m. La surface topographique est quasi-horizontale, confirmée par l'alignement des têtes de forages à la cote de référence 250 m. Le substratum imperméable n'est pas atteint dans tous les forages, ce qui témoigne de la grande épaisseur du Complexe Terminal dans ce secteur.

2.2 Analyse lithologique de la coupe et variabilité latérale :

L'examen d'ensemble de la coupe 1 révèle une organisation en trois grands ensembles superposés, chacun affecté par une variabilité latérale propre.

L'ensemble supérieur (environ 180–260 m) est dominé sur toute la longueur de la coupe par les sables grossiers à moyens, qui constituent la couverture quasi continue du profil, depuis F39-SB jusqu'à F01-SB. Cet horizon représente le réservoir le plus régulier et le plus continu

latéralement de toute la coupe, avec toutefois un léger amincissement et une granulométrie plus fine au droit de F35-SB et F19-SB, où les sables fins prennent le relais des sables grossiers.

L'ensemble intermédiaire (environ 60–180 m) est, à l'inverse, le siège d'une forte hétérogénéité latérale. Au NW (F39-SB), il reste dominé par les sables grossiers sans interruption notable. Vers le centre de la coupe (F36-SB et F19-SB), il est compartimenté par plusieurs niveaux d'argile de forte épaisseur (cumulant 40 à 60 m), qui n'apparaissent ni dans F39-SB ni dans F35-SB. F35-SB conserve un faciès sableux fin homogène sans barrière argileuse. Vers F10-SB et F01-SB, cet ensemble passe à une alternance de sables moyens, de sables argileux et de niveaux calcaires gréseux/durs.

L'ensemble inférieur (0–60 à 90 m) montre la plus grande diversité de faciès d'un forage à l'autre : sables fins simples sous F39-SB et F35-SB, alternance sables fins/argile sableuse/gypse sous F19-SB, sables moyens à grossiers avec gravier basal sous F36-SB, sables argileux gypseux et calcaires friables sous F10-SB, et enfin sables argileux rouges associés à des calcaires gréseux/durs sous F01-SB. Cette variabilité de la base de coupe traduit la juxtaposition de plusieurs micro-environnements de dépôt (chenaux résiduels, zones de décantation argileuse, bassins évaporitiques locaux).

Globalement, la coupe 1 illustre donc un système à deux vitesses : un réservoir supérieur sableux régional, peu sensible aux variations latérales, surmontant un ensemble inférieur très hétérogène où la productivité et le régime hydraulique (libre, semi-captif ou compartimenté) dépendent fortement de la position du forage.

2.3 Géométrie et continuité de l'aquifère :

La coupe 1 met en évidence une continuité générale de l'aquifère sableux sur l'ensemble du profil, mais avec des variations latérales importantes de faciès. Le niveau sableux grossier à moyen de la partie supérieure (200–260 m) est le seul horizon continu sur toute la longueur de la coupe. En revanche, les niveaux profonds (0–150 m) montrent une forte hétérogénéité latérale avec des lentilles argileuses discontinues, des corps calcaires et des niveaux gypseux qui varient d'un forage à l'autre sur des distances de quelques centaines de mètres.

Les niveaux argileux observés dans F36-SB et F19-SB, absents ou peu développés dans F39-SB et F35-SB, témoignent d'une paléogéographie complexe avec coexistence de chenaux sableux actifs et de zones de décantation argileuse, typique des systèmes fluviatiles en tresses en milieu aride.

2.4 Conditions d'écoulement :

L'aquifère principal capté le long de la coupe 1 est le Complexe Terminal, en conditions semi-libres à semi-captives selon les secteurs. Les niveaux argileux de F36-SB et F19-SB créent localement des conditions de semi-captivité favorable à une bonne pression piézométrique. La direction d'écoulement présumée, cohérente avec le contexte régional du bassin du Sahara Septentrional, est orientée du NO vers le SE (vers le Chott Melrhir et les zones d'exutoire naturel). Aucune discontinuité hydraulique majeure n'est identifiée sur cette coupe.

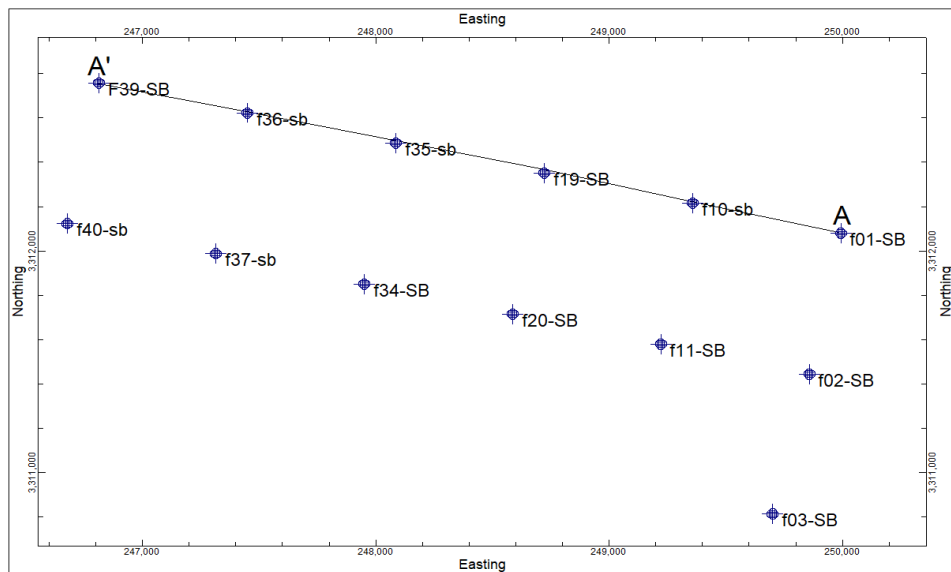
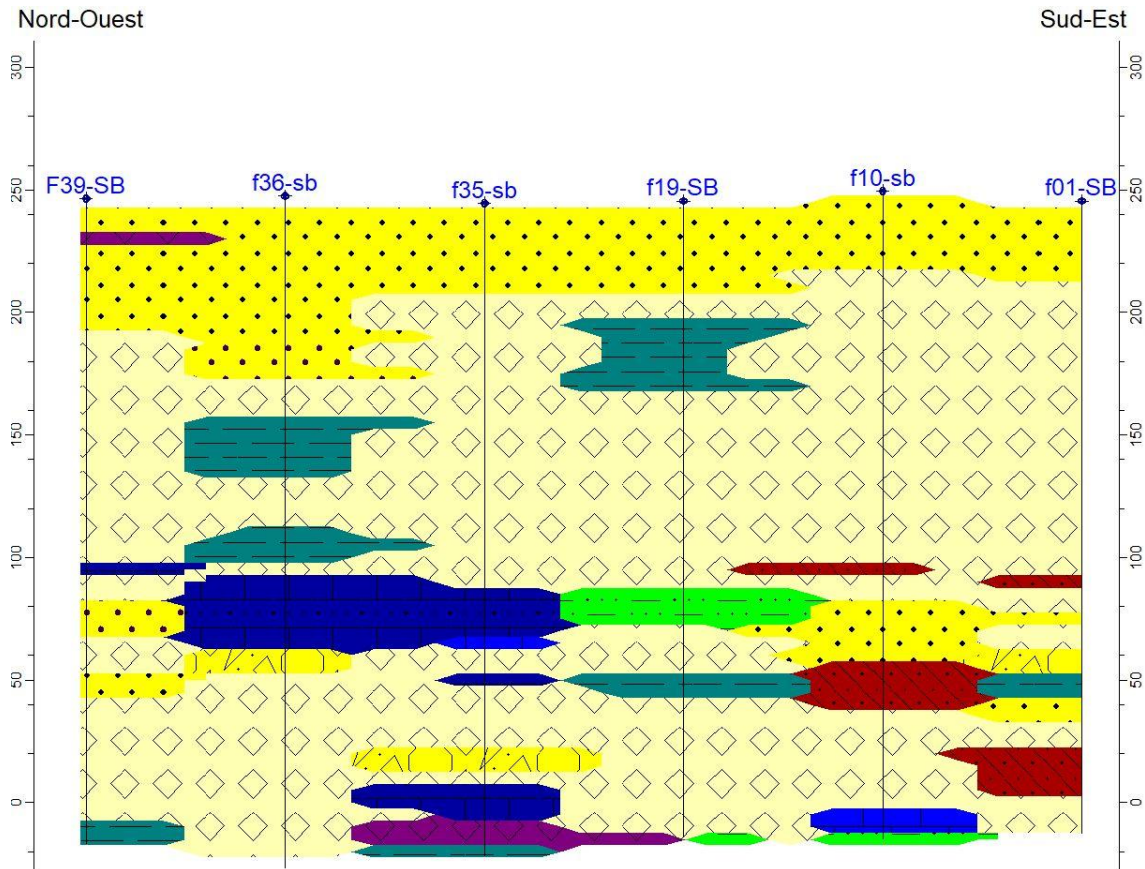


Figure 2: Carte de coupe 1

La coupe 1 :



Coupe 2 :

1. Interprétation de la Coupe 2 — Direction NW–SE

La coupe 2 intercepte six forages selon un axe NW–SE parallèle à la coupe 1, de F40-SB (nord-ouest) à F02-SB (sud-est). Elle constitue le profil le plus riche lithologiquement de la concession, avec une grande diversité de faciès.

3.1 Structure générale de la coupe :

Cette coupe présente l'hétérogénéité latérale la plus prononcée des trois profils. Les variations de faciès sont très rapides, tant verticalement que latéralement, confirmant un système sédimentaire à haute énergie de dépôt avec de nombreux épisodes de chenalisation. Le gravier (violet) constitue un faciès dominant dans plusieurs forages, ce qui distingue fondamentalement cette coupe de la coupe 1.

3.2 Analyse lithologique de la coupe et variabilité latérale :

La coupe 2 montre une organisation verticale globalement comparable à la coupe 1 (couverture sableuse supérieure, ensemble intermédiaire compartimenté, base hétérogène), mais avec une variabilité latérale beaucoup plus marquée, dominée par l'apparition récurrente du gravier, faciès quasi absent de la coupe 1.

L'ensemble supérieur (environ 150–250 m) est constitué de sables moyens à grossiers le long de la majeure partie de la coupe (F40-SB, F37-SB, F34-SB, F20-SB, F11-SB), formant une couverture sableuse globalement continue. Cependant, à l'extrémité SE (F02-SB), cet ensemble est remplacé sur plus de 100 m d'épaisseur par un corps de gravier massif, rupture latérale brutale qui marque la présence d'un paléochenal majeur dans ce secteur.

L'ensemble intermédiaire (environ 50–150 m) présente la plus grande variabilité de la coupe : calcaires gréseux sous F40-SB, succession argile/argile sableuse/calcaires gréseux/gravier sous F37-SB, gypse et gravier sous F34-SB, alternance complexe sables fins/argile/gypse/calcaires friables sous F20-SB, sables moyens à grossiers continus sous F11-SB, et calcaires durs/gréseux sous F02-SB. Le corps de gravier de F37-SB (environ 50 m d'épaisseur, surmonté d'un écran argileux continu) constitue l'élément le plus singulier de cet ensemble et représente un réservoir captif à très haute perméabilité, sans équivalent ailleurs sur la coupe.

L'ensemble inférieur (0–50 m) est dominé par les calcaires (durs, gréseux, friables) sur la majeure partie de la coupe, avec des intercalations de gravier (F40-SB), de sables gréseux rosâtres (F34-SB, F11-SB) et de sables argileux rouges (F02-SB). Sous F02-SB, cet ensemble calcaire constitue un réservoir secondaire sous le corps de gravier sus-jacent.

Globalement, la coupe 2 met en évidence une transition latérale rapide entre un domaine à dominante sableuse (NW) et un domaine à dominante graveleuse (SE), avec une zone de transition marquée par les gypses et argiles de F34-SB et F20-SB. Cette organisation traduit la présence d'un système de chenaux fluviaux migrants, avec un axe principal de transit graveleux centré sur F02-SB et F37-SB.

3.3 Géométrie et continuité de l'aquifère :

La coupe 2 révèle une forte discontinuité latérale des corps réservoirs. Le gravier, absent dans la coupe 1, est ici omniprésent et constitue le faciès réservoir dominant dans F37-SB et F02-SB. La transition rapide entre des profils sableux homogènes (F11-SB) et des profils à graviers

Chapitre 3: Géologie et Hydrogéologie Locale

massifs (F02-SB) sur quelques centaines de mètres témoigne de la présence d'un paléochenal majeur dans le secteur sud-est de la concession.

Les intercalations gypseuses de F34-SB et F20-SB, absentes dans F11-SB et F37-SB, dessinent la géographie d'un ancien bassin évaporitique intercalaire dans la partie centrale de la coupe. Cette configuration crée des conditions hydrodynamiques très hétérogènes à l'échelle de la coupe.

3.4 Conditions d'écoulement :

L'aquifère présente des conditions très variables le long de cette coupe : semi-libre dans F40-SB et F11-SB, semi-captif à captif dans F37-SB (en raison de la couverture argileuse sus-jacente aux graviers), et fortement compartimenté dans F34-SB et F20-SB. Le corps de graviers massif de F02-SB constitue un réservoir à haute transmissivité mais son extension latérale est limitée. Le gradient hydraulique de la nappe est orienté NW–SE conformément au contexte régional.

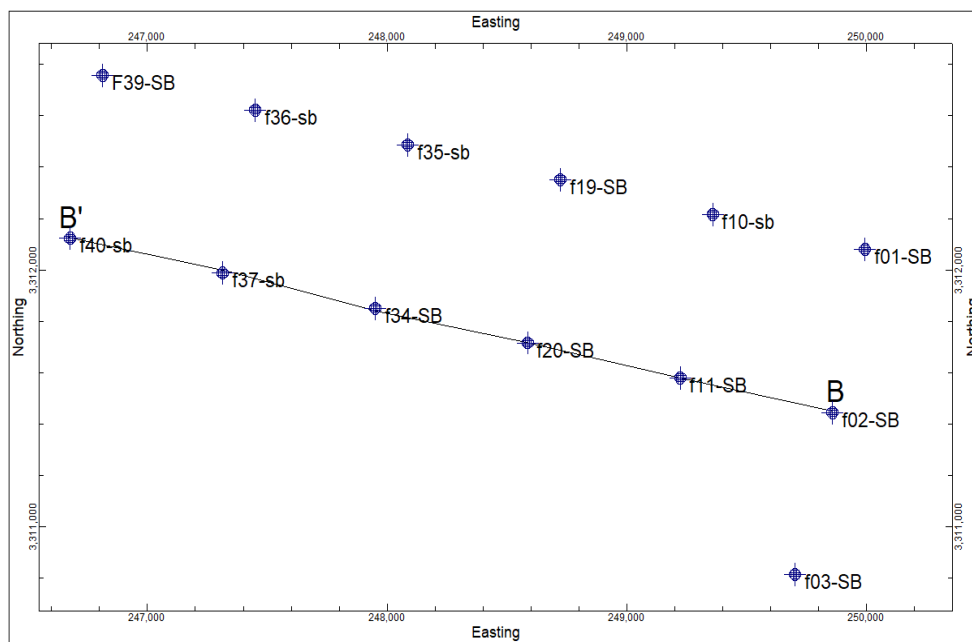
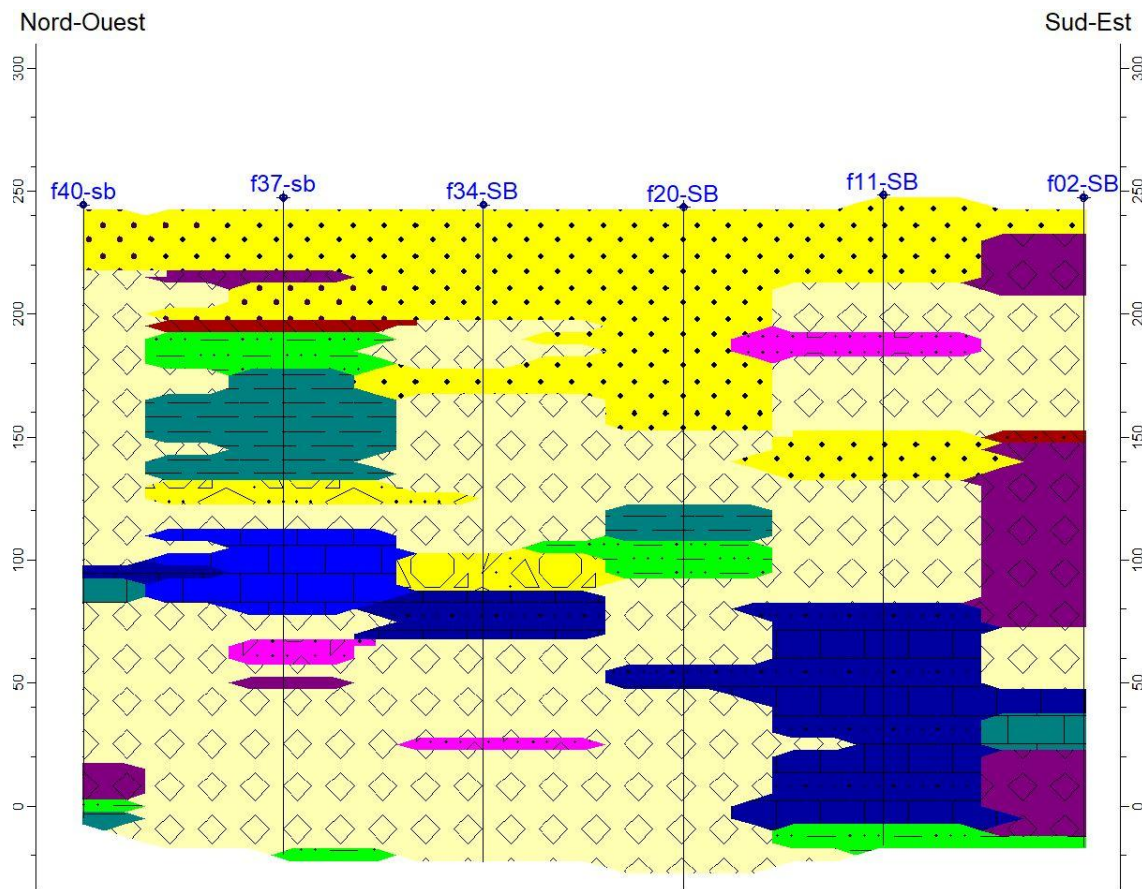


Figure 3: Carte de coupe 2

Coupe 2 :



Coupe 3 :

3 Interprétation de la Coupe 3 — Direction N–S

La coupe 3 est orientée N–S et intercepte trois forages : F01-SB (nord), F02-SB (centre) et F03-SB (sud). Elle constitue le profil transversal par rapport aux deux coupes précédentes et permet d'évaluer la variabilité des faciès selon l'axe méridien.

4.1 Structure générale de la coupe

Cette coupe, bien que plus courte que les deux précédentes (seulement 3 forages), est particulièrement instructive car elle met en regard les deux forages les plus contrastés de la concession (F01-SB de type sableux et F02-SB de type graveleux) avec un troisième forage (F03-SB) qui offre un profil de transition.

4.2 Analyse lithologique de la coupe et variabilité latérale

La coupe 3, orientée N–S, met en évidence un gradient latéral de faciès très marqué sur une distance courte (moins de 2 km), illustrant la transition entre un domaine sableux fin (au nord) et un domaine graveleux massif (au centre).

Chapitre 3: Géologie et Hydrogéologie Locale

L'ensemble supérieur (environ 180–250 m) est constitué de sables fins à moyens sous F01-SB et F03-SB, alors que sous F02-SB ce niveau est entièrement remplacé par du gravier. Cette opposition directe entre deux forages proches traduit le passage brutal, sur quelques centaines de mètres, d'une zone interfluve calme (F01-SB) à l'axe d'un paléochenal à très haute énergie (F02-SB).

L'ensemble intermédiaire (environ 80–180 m) confirme cette transition : sous F01-SB, il reste sableux fin avec un encadrement de sables argileux rouges et de sables moyens vers 85–100 m ; sous F02-SB, le gravier se poursuit de manière quasi continue ; sous F03-SB, des corps de gravier s'intercalent avec des sables fins, traduisant l'atténuation latérale du paléochenal vers le sud.

L'ensemble inférieur (0–80 m) est le plus diversifié latéralement : sables argileux rouges et calcaires (durs/friables) sous F01-SB ; calcaires gréseux, calcaires friables, sables argileux rouges, argile sableuse et argile sous F02-SB ; et succession très hétérogène de calcaires durs, calcaires gréseux, calcaires friables, gypse, sables grossiers et argile sous F03-SB. Cette base hétérogène traduit une zone de confluence de plusieurs micro-environnements de dépôt.

Globalement, la coupe 3 confirme que le paléochenal graveleux centré sur F02-SB constitue une anomalie hydrogéologique très localisée, encadrée par des faciès sableux fins ou de transition dès que l'on s'éloigne de quelques centaines de mètres vers le nord (F01-SB) ou vers le sud (F03-SB).

4.3 Géométrie et continuité de l'aquifère

La coupe 3 met en évidence une discontinuité majeure entre F01-SB et F02-SB, deux forages distants de moins d'un kilomètre. Le passage brutal d'un profil sableux fin à un profil graveleux massif sur une distance aussi courte confirme la présence d'un paléochenal à haute énergie à l'emplacement de F02-SB. Ce chenal n'affecte pas F01-SB, situé dans une zone interfluviale à dépôts fins.

F03-SB, positionné au sud, présente une transition progressive qui suggère l'atténuation latérale du paléochenal vers le sud. Le corps de gravier observé dans F03-SB est moins épais et moins continu que dans F02-SB, confirmant cette interprétation.

4.4 Conditions d'écoulement

Sur l'axe N–S, les conditions d'aquifère varient significativement. F01-SB présente un aquifère semi-libre à faible transmissivité relative. F02-SB, avec son corps graveleux massif, dispose

Chapitre 3: Géologie et Hydrogéologie Locale

d'une transmissivité très élevée et d'un aquifère semi-captif à captif dans sa partie inférieure. F03-SB est intermédiaire avec une transmissivité modérée à bonne. Ces différences de transmissivité créent des gradients hydrauliques locaux qui peuvent s'écarter de la tendance régionale NW–SE.

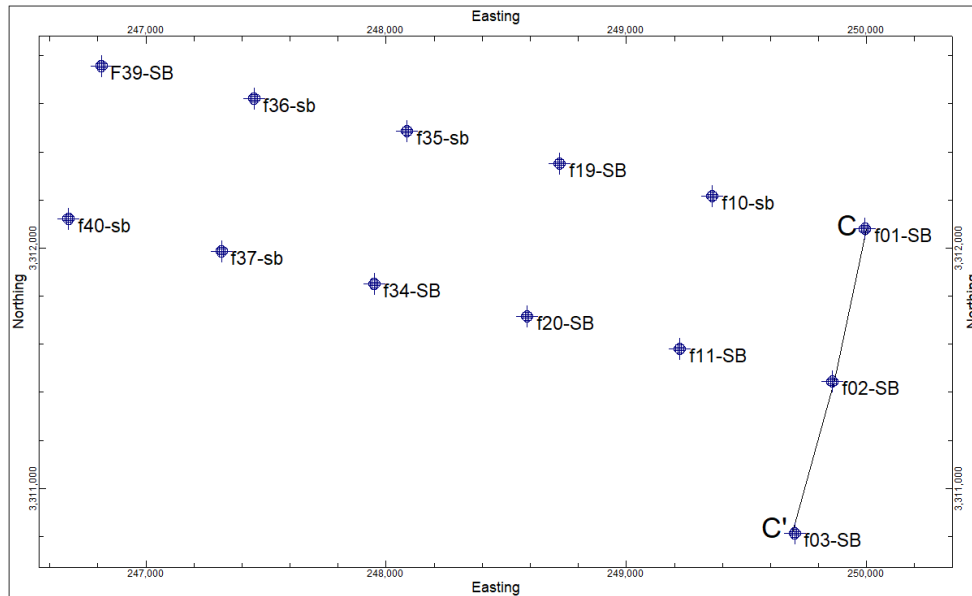
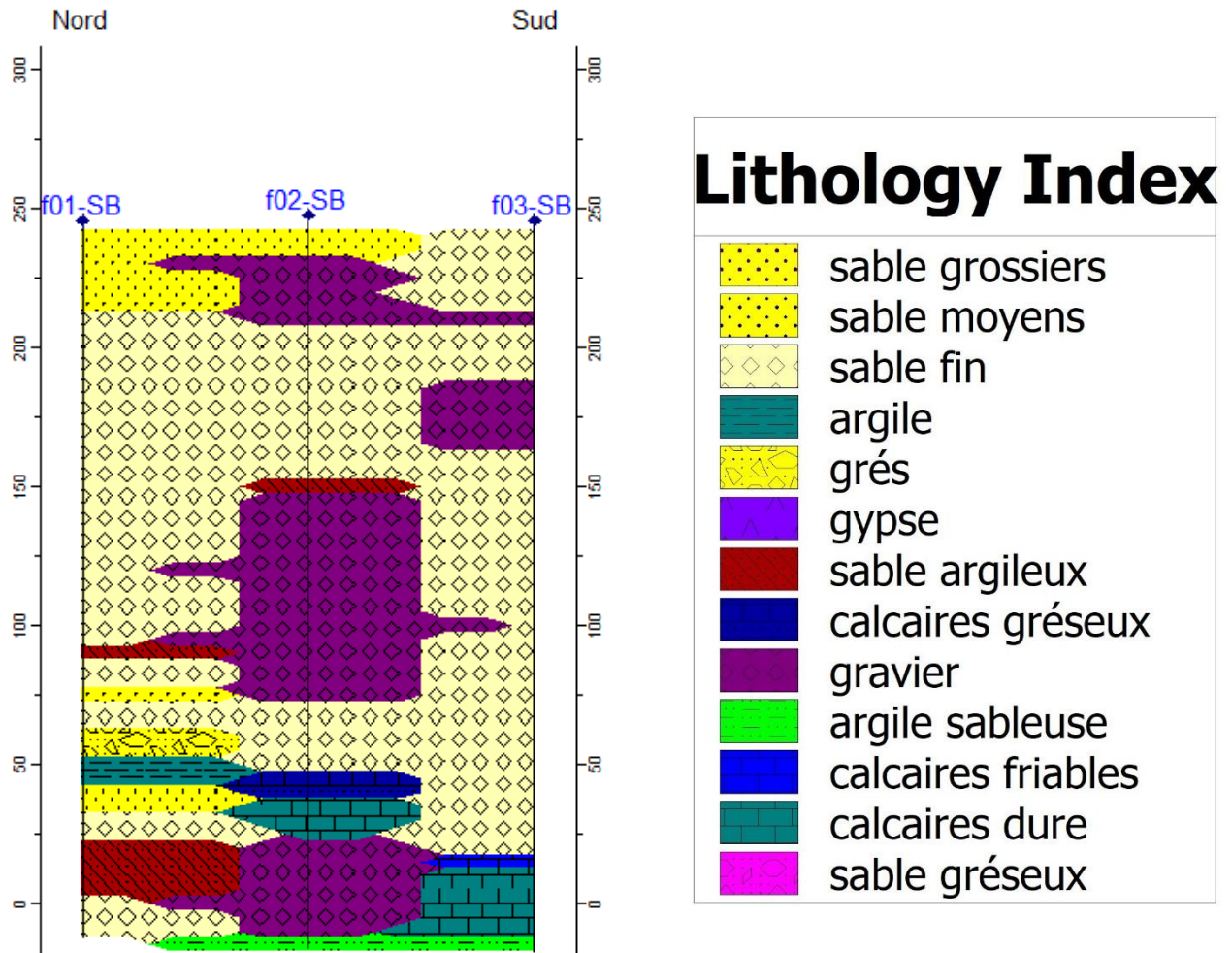


Figure 4: Carte de coupe 3

Coupe 3 :



5. Conclusions lithologiques :

Séquence détritique dominante : La colonne est majoritairement gréseuse, indiquant un environnement continental à paralique (deltaïque, estuarien, ou littoral).

Évaporites lenticulaires : La présence de gypse/anhydrite en corps discontinus révèle des épisodes de restriction (milieux lagunaires, sabkhas) sans continuité latérale.

Transgression carbonatée : Les calcaires observés vers l'Est et au Sud-Est (f02, f03, f40) suggèrent une ingression marine depuis ces directions.

Hétérogénéité réservoir : La forte variabilité latérale des faciès (grès ↔ calcaire ↔ gypse) indique une complexité réservoir importante pour toute exploitation future.

6. interprétation hydrogéologique des coupes :

L'interprétation des trois coupes lithologiques réalisées dans la région de Rhoud Nouss a permis de mettre en évidence l'architecture hydrogéologique du Complexe Terminal et la répartition spatiale des principaux horizons aquifères. Les formations sableuses et graveleuses constituent les réservoirs les plus productifs grâce à leur forte perméabilité, tandis que les niveaux argileux et gypseux assurent localement le rôle d'écrans semi-perméables favorisant des conditions de semi-captivité.

Les coupes révèlent une importante variabilité latérale des faciès, traduisant un environnement de dépôt fluviatile complexe marqué par l'existence de paléochenaux, de zones de décantation argileuse et d'épisodes évaporitiques. Cette hétérogénéité influence directement les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère en créant des secteurs à forte transmissivité, notamment au niveau des corps graveleux identifiés dans les forages F02-SB et F37-SB.

Malgré cette variabilité locale, les différents profils montrent une continuité régionale des horizons aquifères sableux, ce qui confirme l'existence d'un système aquifère étendu à l'échelle de la zone étudiée. Les conditions d'écoulement sont généralement orientées du nord-ouest vers le sud-est, conformément au fonctionnement hydrogéologique régional du bassin du Sahara septentrional.

7. Carte piézométrique

7.1. Analyse

La carte piézométrique de la zone de Rhoud Nouss a été établie à partir des mesures des niveaux statiques relevés dans les forages du périmètre agricole Fedj Ben Merah. Les courbes isopièzes, tracées à partir des cotes piézométriques exprimées en mètres NGM (Nivellement Général du Maroc), présentent des valeurs allant de 158 m au sud-est à 167 m au nord-centre de la zone.

L'examen de la carte révèle deux zones distinctes de hautes pressions piézométriques. La première, localisée autour du forage F19, affiche les cotes les plus élevées de la zone d'étude avec une valeur maximale de 167 m. La seconde zone de hautes pressions se situe au niveau du forage F1, avec des cotes avoisinant 164 m. En revanche, les zones de basses pressions piézométriques se concentrent au niveau des forages F2, F3 et F39, où les cotes descendent jusqu'à 158 m, formant une dépression piézométrique notable dans la partie sud-est de la concession.

Chapitre 3: Géologie et Hydrogéologie Locale

Les courbes isopièzes présentent une géométrie fortement irrégulière, avec un resserrement significatif dans les secteurs des forages F19 et F2/F3/F39, traduisant des gradients hydrauliques localement élevés. En revanche, les courbes s'espacent davantage dans la partie centrale et nord-ouest de la zone (forages F37, F36, F43), indiquant un gradient hydraulique plus faible dans ce secteur.

7.2. Interprétation

La configuration générale des courbes isopièzes indique un écoulement souterrain orienté globalement du nord-ouest vers le sud-est, conformément au fonctionnement hydrogéologique régional du Complexe Terminal dans le bassin du Sahara septentrional. Cette direction d'écoulement est cohérente avec la morphologie structurale régionale et confirme les conclusions issues de l'analyse des coupes lithologiques présentées précédemment.

Les dépressions piézométriques observées autour des forages F2, F3 et F39 s'interprètent comme des cônes de dépression liés à l'exploitation active de ces ouvrages. Le resserrement prononcé des courbes isopièzes en ces points traduit une transmissivité localement élevée, en accord avec la présence des corps graveleux à forte perméabilité identifiés dans ces forages lors de l'analyse lithologique du Chapitre 3. Ce phénomène confirme que les zones de paléochenaux graveleux constituent des drains préférentiels pour l'écoulement souterrain.

À l'inverse, le dôme piézométrique centré sur F19 (167 m) peut s'expliquer par la présence de niveaux argileux semi-perméables agissant comme écrans locaux, limitant la transmission des pressions vers les secteurs adjacents et favorisant le maintien de hautes pressions dans ce compartiment. Cette configuration semi-captive est cohérente avec les lentilles argileuses épaisses identifiées dans les coupes 1 et 2 au niveau des forages F19 et F36.

La variabilité spatiale des cotes piézométriques, avec un écart de près de 9 m entre les zones les plus hautes (167 m autour de F19) et les plus basses (158 m autour de F2 et F39), reflète directement l'hétérogénéité lithologique du Complexe Terminal mise en évidence au Chapitre 3. Cette hétérogénéité génère des comportements hydrodynamiques très différenciés à l'échelle locale, avec des secteurs à gradient hydraulique fort (forages F2/F3/F39) et des secteurs à gradient faible (partie nord-ouest, forages F37/F43).

7.3. Conclusion

La carte piézométrique de la zone de Rhoud Nouss confirme l'existence d'un système aquifère actif au sein du Complexe Terminal, avec un écoulement général orienté du nord-ouest vers le

Chapitre 3: Géologie et Hydrogéologie Locale

sud-est. Les variations de cotes observées entre 158 m et 167 m mettent en évidence l'influence directe de l'hétérogénéité lithologique sur la dynamique de la nappe, avec des zones de forte transmissivité associées aux corps graveleux et des compartiments semi-captifs liés aux écrans argileux.

Les dépressions piézométriques relevées autour des forages à forte exploitation témoignent d'une réponse rapide de l'aquifère aux prélèvements, ce qui souligne la nécessité d'un suivi piézométrique continu afin de prévenir tout rabattement excessif susceptible de compromettre la durabilité de l'exploitation agricole dans la zone. Une gestion rationnelle et concertée des débits de pompage s'impose pour préserver l'équilibre hydraulique du système et garantir la pérennité des ressources en eaux souterraines du périmètre Fedj Ben Merah.

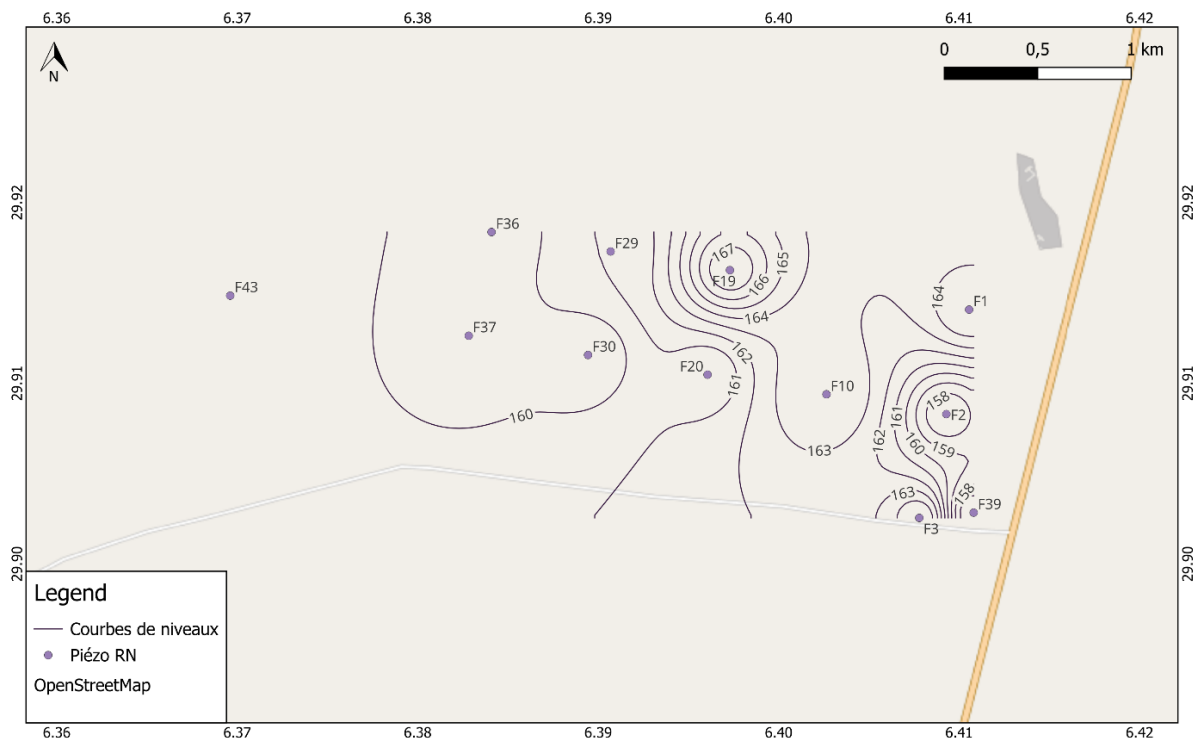


Figure 5 : Carte piézométrique de la zone de Rhoud Nouss (Périmètre Fedj Ben Merah)

8. Conclusion:

Le Complexe Terminal de Rhoude Nouss possède un potentiel hydrogéologique important pour l'alimentation en eau des projets agricoles. Néanmoins, la forte hétérogénéité lithologique observée nécessite une implantation raisonnée des ouvrages de captage afin d'optimiser les débits d'exploitation et d'assurer une gestion durable de la ressource en eau souterraine.

Chapitre 4 :

Hydrodynamique

1. Introduction

La zone de Rhoud Nouss, soumise à un climat hyperaride, nécessite une connaissance précise des propriétés hydrodynamiques des sols et des aquifères pour assurer une gestion rationnelle de l'eau destinée à l'irrigation agricole. Ce chapitre présente deux approches complémentaires : d'une part, une campagne d'essais d'infiltration in situ réalisée en mai 2026 sur quatre sites à l'aide du perméamètre de Guelph, permettant de déterminer la conductivité hydraulique à saturation (K_{fs}) et la sorptivité matricielle (ϕ_m) des formations superficielles ; d'autre part, l'interprétation d'un essai de pompage de longue durée sur le forage F11, instrumenté par un TD-Diver, afin d'estimer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Complexe Terminal. La combinaison de ces deux approches offre une vision intégrée du fonctionnement hydraulique de la zone, de la surface jusqu'aux horizons aquifères profonds.

2. Infiltration

2.1. Principe et fondements théoriques

L'infiltromètre de Guelph (Elrick et al., 1989 ; Reynolds & Elrick, 1990) est un perméamètre de terrain à charge constante qui permet de mesurer in situ la conductivité hydraulique du sol non saturé dans la zone vadose. Son principe repose sur l'infiltration d'eau depuis un puits cylindrique de faible diamètre (rayon $r = 3$ cm) foré à une profondeur donnée dans le sol.

L'eau s'infiltré depuis le puits sous l'effet combiné de la gravité et de la succion matricielle. En régime permanent, le débit d'infiltration Q (cm^3/s) est relié à la conductivité hydraulique à saturation K_{fs} et à la sorptivité capillaire matricielle ϕ_m par la relation de Reynolds & Elrick (1992) :

$$Q = (C + \pi r^2 / \alpha^*) \times K_{fs} + (C / \alpha^*) \times \phi_m$$

où C est le facteur de forme géométrique (cm^2) dépendant de la hauteur d'eau H dans le puits et du rayon r du puits, et α^* est le paramètre de capillarité du sol (cm^{-1}) relié à la texture et à la structure. Pour un sol de type 3 (sol sableux à sablo-limoneux à structure modérée), la valeur $\alpha^* = 0,12 \text{ cm}^{-1}$ est recommandée par Elrick & Reynolds (1992).

Le facteur de forme C est calculé selon l'expression :

$$C = 2\pi H^2 / [\ln(2H/r) - 1 + \pi r / (2H) + 1 / (4H/r)]$$

Chapitre 4: Hydrodynamique

Pour les quatre valeurs de charge hydraulique utilisées dans cette étude ($H = 3, 5, 10$ et 20 cm), les facteurs de forme calculés sont respectivement : $C = 37,4 \text{ cm}^2$, $121,2 \text{ cm}^2$, $435,3 \text{ cm}^2$ et $1481,0 \text{ cm}^2$.

2.2. Méthode des deux charges (Two-Head)

La méthode des deux charges hydrauliques (Two-Head) consiste à réaliser deux séries de mesures en maintenant successivement deux niveaux d'eau différents (H_1 et H_2) dans le puits, ce qui génère un système de deux équations à deux inconnues (K_{fs} et ϕ_m) :

$$Q_1 = A_1 \times K_{fs} + B_1 \times \phi_m$$

$$Q_2 = A_2 \times K_{fs} + B_2 \times \phi_m$$

$$\text{avec } A_i = C_i + \pi r^2 / \alpha^* \text{ et } B_i = C_i / \alpha^* \text{ (} i = 1, 2 \text{)}.$$

Le taux de variation du niveau d'eau en régime permanent R (cm/s) est déterminé graphiquement par régression linéaire sur la partie stabilisée de la courbe $h = f(t)$. Le débit $Q = R \times a$, où $a = \pi r^2 = 28,27 \text{ cm}^2$ est la section du réservoir de l'infiltromètre.

2.3. Classification des sols selon la conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique à saturation K_{fs} obtenue est classée selon la nomenclature du USDA (Tableau 1) afin d'attribuer une qualification qualitative au pouvoir infiltrant du sol étudié.

Tableau 1 : Classification de la conductivité hydraulique selon le USDA

Classe	K_{fs} (mm/h)	Aptitude à l'infiltration
Très lente	< 1	Très faible
Lente	$1 - 5$	Faible
Modérément lente	$5 - 20$	Assez faible
Modérée	$20 - 65$	Moyenne
Modérément rapide	$65 - 125$	Assez bonne
Rapide	$125 - 500$	Bonne
Très rapide	> 500	Très bonne

2.3. Travaux de Terrain

2.3.1. Protocole expérimental

La campagne de mesures a été réalisée le 09 mai 2026 sur quatre sites répartis dans la zone d'étude. L'infiltromètre de Guelph utilisé est un appareil de type Combined Reservoir, permettant des mesures à deux charges hydrauliques distinctes. La procédure opératoire a été conduite selon les recommandations du manuel constructeur (Soilmoisture Equipment Corp.) et du protocole d'Elrick & Reynolds (1992) :

Forage d'un puits cylindrique de rayon $r = 3$ cm à la tarière manuelle jusqu'à la profondeur souhaitée (35 cm pour le site 1).

Nettoyage de la paroi du forage à la brosse pour éliminer les particules fines susceptibles de colmater les pores.

Mise en place de l'infiltromètre et remplissage initial du réservoir avec de l'eau distillée.

Première série de mesures à charge basse (H1) : relevé du niveau d'eau toutes les 30 secondes ou toutes les minutes selon la vitesse d'infiltration, jusqu'à l'obtention d'un régime permanent.

Deuxième série de mesures à charge haute (H2) : idem, après ajustement du niveau d'eau dans le puits.

La catégorie texturale du sol a été préalablement identifiée comme Type 3 (sable limoneux à structure modérée) à partir de l'observation macroscopique des horizons excavés lors du forage et de la configuration de la courbe d'infiltration. Cette classification conditionne le choix de $\alpha^* = 0,12 \text{ cm}^{-1}$.

2.3.3. Localisation des sites de mesure

Quatre sites de mesure ont été sélectionnés de manière à couvrir la variabilité spatiale des formations superficielles de la zone d'étude. Les coordonnées géographiques, relevées au GPS différentiel (précision ± 6 m), sont récapitulées dans le tableau 2.

La date de réalisation des essais (09/05/2026) correspond à une période printanière à faible évapotranspiration, favorable à l'obtention de mesures représentatives de l'état hydrique habituel du sol en dehors des périodes d'irrigation. Les sites ont été choisis à distance suffisante des zones cultivées irriguées afin d'éviter l'influence de l'humidification préalable des sols.

Tableau 2 : Coordonnées géographiques des sites d'essai d'infiltration

Site	Latitude	Longitude	Altitude	Date de mesure
1	29°55'17.70" N	06°21'50.44" E	248 m	09/05/2026
2	29°54'41.03" N	06°23'21.96" E	260 m	09/05/2026
3	29°54'36.96" N	06°23'45.97" E	265 m	09/05/2026
4	29°54'09.26" N	06°24'27.80" E	243 m	09/05/2026

2.3.4. Mesures brutes : évolution du niveau d'eau en fonction du temps

Les relevés du niveau d'eau dans le réservoir de l'infiltromètre en fonction du temps sont présentés ci-après pour chacun des quatre sites. Les données brutes constituent la base du calcul des taux de variation en régime permanent (R1 et R2).

Site 1 (29°55'17" N — 06°21'50" E — Altitude : 248 m)

Profondeur de forage : 35 cm. Intervalle de mesure : $\Delta t = 1$ minute.

Tableau 3a : Site 1 — Évolution du niveau d'eau avec H1 = 5 cm

Temps (min)	d(h) (cm)
1	3
2	3.75
3	4.3
4	5
5	5.7
6	6.3
7	6.9
8	7.3
9	8
10	8.5

Temps (min)	d(h) (cm)
11	9.15
12	9.6
13	10.35
14	10.8
15	11.6
16	12.1

Tableau 3b : Site 1 — Évolution du niveau d'eau avec H2 = 10 cm

Temps (min)	d(h) (cm)
1	17.5
2	18.35
3	19
4	19.7
5	20.6
6	21.5
7	22.35
8	23.2
9	24
10	24
11	25.5
12	26.5
14	28.15
15	28.9
16	29.7

Chapitre 4: Hydrodynamique

Temps (min)	d(h) (cm)
17	30.6

Site 2 (29°54'41" N — 06°23'21" E — Altitude : 260 m)

Intervalle de mesure : $\Delta t = 1$ minute. Deux charges utilisées : $H1 = 5$ cm et $H2 = 20$ cm.

Tableau 4a : Site 2 — Évolution du niveau d'eau avec $H1 = 5$ cm

Temps (min)	d(h) (cm)
1	2.4
2	2.75
3	3
4	3.25
5	3.55
6	3.85
7	4.2
8	4.5
9	4.75
10	5.05
11	5.3
12	5.75
13	6.05
14	6.35
15	6.65
17	7.2

Tableau 4b : Site 2 — Évolution du niveau d'eau avec $H2 = 20$ cm

Temps (min)	d(h) (cm)
1	18
2	18.25
3	18.6
4	19.35
5	19.75
6	20.1
7	20.55
8	21
9	21.6
10	22.05
11	22.45
12	23
13	23.35
14	23.9
15	24.35
16	24.8

Site 3 (29°54'36" N — 06°23'45" E — Altitude : 265 m)

Intervalle de mesure : $\Delta t = 30$ secondes. Deux charges utilisées : H1 = 5 cm et H2 = 10 cm.

Tableau 5a : Site 3 — Évolution du niveau d'eau avec H1 = 5 cm (dt = 30 s)

Temps (s)	d(h) (cm)
30	4.8
60	8.6
90	13

Temps (s)	d(h) (cm)
120	17
150	21
180	25
210	29
240	33.2
270	37.2
300	41.2
330	45.15
360	49.1
390	53.2
420	57.2
450	61.2

Tableau 5b : Site 3 — Évolution du niveau d'eau avec $H_2 = 10$ cm ($dt = 30$ s)

Temps (s)	d(h) (cm)
30	24.6
60	33.1
90	41.4
120	49
150	56.6
180	64.3
210	71.5

Site 4 (29°54'09" N — 06°24'27" E — Altitude : 243 m)

Chapitre 4: Hydrodynamique

Intervalle de mesure : $\Delta t = 30$ secondes. Une seule charge $H = 3$ cm. La vitesse d'infiltration très élevée n'a pas permis d'effectuer la deuxième charge ; la méthode Single-Head a été appliquée.

Tableau 6 : Site 4 — Évolution du niveau d'eau avec $H = 3$ cm ($dt = 30$ s)

Temps (s)	d(h) (cm)
30	9
60	19
90	27.5
120	36
150	44.8
180	53.6
210	63.2
240	72.5

2.3.5. Résultats et Interprétation Hydrodynamique

2.3.5.1. Détermination des taux de variation en régime permanent

Le régime permanent est atteint lorsque la pente de la courbe $h = f(t)$ devient constante, c'est-à-dire lorsque les forces capillaires s'équilibrent et que seule la gravité gouverne l'écoulement. Pour chaque site et chaque charge hydraulique, le taux de variation en régime permanent R (cm/s ou cm/min) est déterminé par régression linéaire sur les huit à dix dernières valeurs de la série temporelle.

Les résultats obtenus montrent une grande variabilité des taux de variation entre les sites. Les sites 1 et 2 présentent des régimes permanents atteints relativement lentement (après 8 à 12 minutes), suggérant des sols à capillarité modérée. En revanche, les sites 3 et 4 affichent des vitesses d'infiltration nettement supérieures, avec des régimes permanents apparaissant en moins de 4 minutes, caractéristiques de sols à granulométrie grossière dominante.

2.3.5.2. Paramètres hydrodynamiques calculés

Chapitre 4: Hydrodynamique

La résolution du système d'équations de Reynolds & Elrick (1992) par la méthode des deux charges a permis de déduire les paramètres hydrodynamiques K_{fs} et ϕ_m pour l'ensemble des sites. Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Paramètres hydrodynamiques déterminés par essais à l'infiltromètre de Guelph

Site	K_{fs} (cm/s)	K_{fs} (m/s)	K_{fs} (mm/h)	ϕ_m (cm ² /s)	Classe USDA
Site 1	9.78×10^{-4}	9.78×10^{-6}	35.2	-6.85×10^{-5}	Modérée
Site 2	5.97×10^{-4}	5.97×10^{-6}	21.5	-6.49×10^{-5}	Modérée
Site 3	1.057×10^{-2}	1.06×10^{-4}	380.4	-5.42×10^{-7}	Rapide
Site 4	3.156×10^{-2}	3.16×10^{-4}	1136.1	2.630×10^{-1}	Très rapide

L'examen du tableau 7 révèle une hétérogénéité spatiale marquée des propriétés hydrodynamiques au sein de la zone d'étude, avec des valeurs de K_{fs} s'étendant sur plus de deux ordres de grandeur (de $5,97 \times 10^{-6}$ m/s à $3,16 \times 10^{-4}$ m/s).

2.4. Analyse et interprétation des conductivités hydrauliques

2.4.1. Sites 1 et 2 — Conductivité modérée

Les sites 1 et 2 présentent des conductivités hydrauliques de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} m/s (35,2 mm/h et 21,5 mm/h respectivement), correspondant à la classe « Modérée » selon la classification USDA. Ces valeurs sont typiques de sables fins à sables limoneux légèrement compactés, voire de formations dunaires stabilisées par des croûtes superficielles partielles.

Cette conductivité modérée est cohérente avec la présence probable d'horizons de transition entre les sables éoliens superficiels et des niveaux plus argileux sous-jacents. La fraction argileuse, même faible (5 à 10 %), suffit à réduire sensiblement la macroporosité et à retarder la progression du front d'humectation. Ces sites correspondent probablement à des zones interdunaires où l'accumulation de sédiments fins par déflation est favorisée.

2.4.2. Site 3 — Conductivité rapide

Le site 3 affiche une conductivité hydraulique de $1,06 \times 10^{-4}$ m/s (380 mm/h), classée comme « Rapide ». Cette valeur, d'un ordre de grandeur supérieur aux sites précédents, traduit la présence d'un sol à granulométrie grossière, vraisemblablement des sables éoliens vifs ou des alluvions grossières à bonne porosité intergranulaire.

La vitesse d'infiltration élevée observée sur ce site est cohérente avec sa position topographique légèrement surélevée (265 m) par rapport aux sites environnants, suggérant un emplacement sur un cordon dunaire récent à sable propre peu consolidé. La quasi-absence de fraction fine dans ce type de formation explique la faible capillarité et la conductivité très élevée.

2.4.3. Site 4 — Conductivité très rapide

Le site 4, avec une Kfs de $3,16 \times 10^{-4}$ m/s (1136 mm/h), atteint la classe « Très rapide » et représente la conductivité la plus élevée relevée dans la zone. La vitesse d'infiltration exceptionnelle a conduit à l'impossibilité d'effectuer un essai à deux charges, limitant l'analyse à la méthode Single-Head.

Ces caractéristiques suggèrent un matériau très perméable, probablement des graviers ou des sables grossiers alluviaux ou des formations éoliennes très meubles et sans cohésion. Ce type de sol offre une connectivité directe entre la surface et les horizons profonds, ce qui en fait une zone de recharge potentielle privilégiée pour les nappes profondes, mais aussi une zone vulnérable à la contamination.

2.5. Hétérogénéité spatiale et facteurs explicatifs

La variabilité observée des conductivités hydrauliques entre les quatre sites (coefficient de variation > 100 %) reflète la diversité lithologique des formations superficielles de la zone de Rhoud Nouss. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette hétérogénéité :

Variabilité granulométrique : la juxtaposition de faciès dunaires (sables grossiers bien triés) et interdunaires (sables fins à silts) génère des contrastes importants de perméabilité sur de courtes distances.

Compaction de surface : les zones fréquentées par la machinerie agricole ou les troupeaux présentent une structure de surface plus compacte, réduisant la macroporosité et la conductivité hydraulique.

Croûtes de battance : les précipitations épisodiques intenses peuvent générer des croûtes superficielles à très faible perméabilité (croûtes structurales) qui réduisent localement l'infiltrabilité.

Teneur en matière organique : bien que généralement faible dans les sols sahariens, les dépressions végétalisées peuvent présenter une meilleure structure grumeleuse favorisant l'infiltration.

2.6. Sorptivité matricielle ϕ_m

Les valeurs de la sorptivité matricielle ϕ_m obtenues pour les sites 1, 2 et 3 sont légèrement négatives, ce qui constitue un artéfact numérique connu de la méthode Two-Head lorsque les deux charges hydrauliques sont proches et que le sol est sec (suction matricielle élevée). Dans ce cas, les valeurs de ϕ_m négatives suggèrent que la contribution capillaire au flux est faible devant la composante gravitaire, ce qui est physiquement cohérent pour des sols sableux peu humides en milieu aride. Le site 4, avec $\phi_m = 0,263 \text{ cm}^2/\text{s}$, présente une valeur positive cohérente avec un sol grossier à capillarité quasi nulle.

Ces résultats confirment que dans le contexte aride de Rhoud Nouss, l'infiltration est principalement gouvernée par la gravité (phénomène de drainage gravitaire) plutôt que par la suction capillaire, ce qui est caractéristique des sols sableux peu structurés.

2.7. Implications pour l'Irrigation Agricole

2.7.1. Pouvoir infiltrant du sol et gestion des apports en eau

Les résultats obtenus ont des implications directes pour la gestion de l'irrigation dans la région de Rhoud Nouss. Le pouvoir infiltrant des sols, qui quantifie leur capacité à absorber l'eau apportée en surface avant ruissellement ou stagnation, varie considérablement entre les sites étudiés.

Pour les sites 1 et 2 ($K_{fs} = 21 \text{ à } 35 \text{ mm/h}$), les débits d'irrigation doivent être maintenus inférieurs à ces valeurs pour éviter le ruissellement de surface, qui est particulièrement préjudiciable dans un contexte d'eau rare et précieuse. Ces sols correspondent bien à l'utilisation de systèmes d'irrigation par goutte-à-goutte ou par aspersion à faible intensité (débit inférieur à 20 mm/h).

Pour les sites 3 et 4 ($K_{fs} = 380 \text{ à } 1136 \text{ mm/h}$), la capacité d'absorption est exceptionnellement élevée. Ces sols pourront recevoir de forts débits d'irrigation sans risque de ruissellement, mais

présentent en contrepartie un risque important de pertes par percolation profonde. L'eau appliquée en excès percolera rapidement au-delà de la zone racinaire, entraînant une mauvaise efficacité de l'irrigation et un risque de minéralisation accrue des nappes profondes.

2.7.2. Risques de percolation et vulnérabilité des nappes

La conductivité hydraulique très élevée des sites 3 et 4 implique une vulnérabilité intrinsèque importante des aquifères sous-jacents vis-à-vis de la contamination par les eaux d'irrigation chargées en fertilisants (nitrates, phosphates) ou en pesticides. Dans ces conditions :

Le temps de transit vertical des polluants depuis la surface jusqu'à la nappe est très court (de l'ordre de quelques heures à quelques jours), laissant peu de temps aux processus naturels d'atténuation (adsorption, biodégradation) d'agir.

Les quantités d'eau d'irrigation apportées doivent être calculées avec précision pour couvrir exactement les besoins en eau des cultures (ETc) sans engendrer de pertes par drainage profond.

Une surveillance piézométrique et physicochimique régulière des nappes superficielles est recommandée dans les zones à forte perméabilité.

2.7.3. Recommandations pour les pratiques d'irrigation

Sur la base des résultats obtenus, les recommandations suivantes peuvent être formulées pour optimiser la gestion de l'eau d'irrigation dans la zone de Rhoud Nouss :

Zones à conductivité modérée (sites 1 et 2) : Ces zones présentent les conditions les plus favorables à une irrigation efficace. L'utilisation du goutte-à-goutte souterrain est particulièrement recommandée, car elle permet de maintenir l'humidité dans la zone racinaire sans dépasser la capacité d'absorption du sol. Des apports fractionnés et fréquents (irrigation quotidienne ou bi-quotidienne) sont préférables aux apports massifs hebdomadaires.

Zones à conductivité rapide à très rapide (sites 3 et 4) : La forte perméabilité de ces sols impose une adaptation des techniques d'irrigation. L'irrigation par submersion (gravitaire) est fortement déconseillée en raison des pertes excessives par percolation. L'utilisation de mulchs organiques ou synthétiques pour réduire l'évaporation directe, combinée à un système de fertirrigation bien dosé, permettrait d'améliorer l'efficacité de l'eau. L'amendement organique du sol (compost, fumier) pourrait également améliorer sa capacité de rétention hydrique à long terme.

Chapitre 4: Hydrodynamique

Dimensionnement des canaux et bassins d'irrigation : La forte variabilité spatiale de la perméabilité impose de réaliser une cartographie hydropédologique détaillée avant tout aménagement hydro-agricole d'envergure. Les infiltrations depuis les canaux non revêtus représentent des pertes importantes (pouvant dépasser 30 à 50 % du débit apporté) dans les zones à forte perméabilité.

3. Les essais de pompage

Trois forages ont été équipés d'enregistreurs automatiques de niveau d'eau de type 'Diver' pour suivre le niveau d'eau de la nappe durant la période du 31 janvier à 22 Mars 2026.

Les 'Diver' enregistre la pression de l'eau au-dessus du capteur et permis donc d'avoir le niveau piézométrique de la nappe en introduisant l'altitude du sol et la profondeur du capteur.

Forage F11 : On va prendre ce forage comme exemple pour caractériser la nappe des calcaires du complexe terminal. L'aquifère calcaire du CT constitue la cible prioritaire pour l'approvisionnement agricole. La précision des paramètres hydrodynamiques dépend ici de la qualité du monitoring haute résolution, permettant de capter les phases transitoires rapides inhérentes aux réservoirs carbonatés.

Tout d'abord, la figure suivante (figure 1) représente une fiche technique qui précise la lithologie et la coupe technique du forage. On observe sur la colonne lithologique que les calcaires commencent à la profondeur 165m jusqu'à la profondeur 255m. ceci correspond à un tube crépiné qui commence à la profondeur 155m et fini par un sabot jusqu'à la profondeur totale du forage à savoir 262 m.

Le suivi piézométrique par l'enregistreur automatique (figure 2) montre une oscillation de la pression d'eau entre 40.6 m et 10 m. Le cercle rouge est un cycle de descente et remontée du niveau correspondant à un pompage suivi d'un arrêt de la pompe. Les données de ce cycle ont été choisies pour servir d'un essai de pompage de long durée (50 heures).

Le dispositif de mesure au forage **F11** a consisté en l'immersion d'un capteur de pression automatique de type **TD-Diver (Van Essen)**, numéro de série **00-AB877**. L'unité a été configurée avec une période d'échantillonnage de **1 minute** (Sample Period M01), enregistrant les variations de pression hydraulique (cmH₂O) et de température (°C).

Chapitre 4: Hydrodynamique

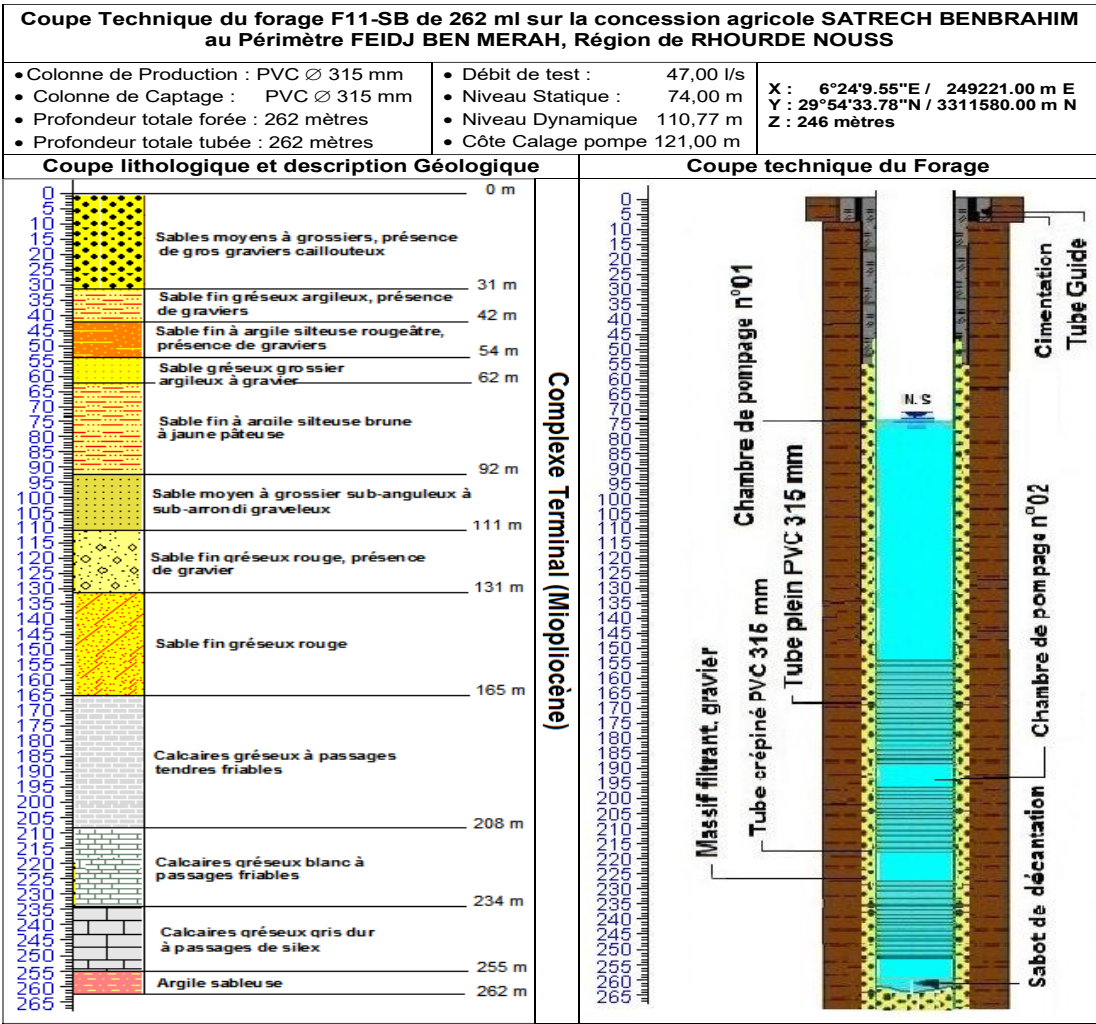


Figure 1 : Colonne lithologique et coupe technique du forage F11

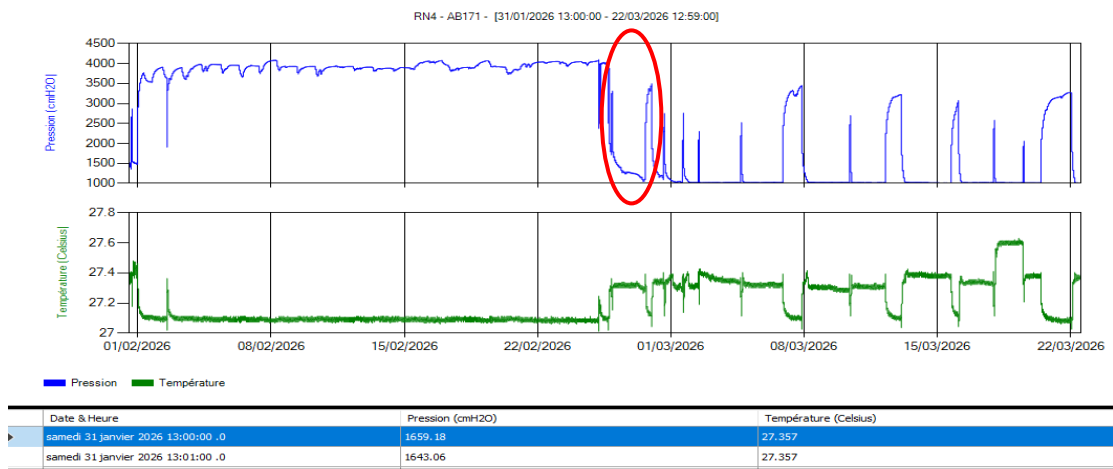


Figure 2 : Évolution niveau piézométrique du forage F11 et cycle choisi pour l’essai de pompage

Chapitre 4: Hydrodynamique

L'analyse de la séquence du **25 Février 2026** permet d'isoler trois phases distinctes :

1. **Niveau Statique Initial** : Jusqu'à 22 : 30 : 00, la nappe présente une pression stabilisée de **3303,58 cmH₂O**.
2. **Phase de Descente (Pompage)** : Le démarrage de la pompe est identifié à **22:30:00** avec un débit de 44 l/s et se traduit par une chute brutale à 2261.90 cmH₂O. La pression atteint son point critique le 27 Février à **16:37:00** avec une valeur de **1116,67 cmH₂O**. Cela représente un **rabattement total (s) de 21,90 mètres** durant la période de pompage qui a duré 42 heures 07 minutes.
3. **Phase de Remontée (Récupération)** : L'arrêt de l'exhaure le 27 Février à **16:37:00** provoque une remontée instantanée (pression de 2171,60 cmH₂O), démontrant une forte réactivité hydraulique du réservoir. L'examen de la remontée se poursuit jusqu'au 28 Février à 00 :27 :00 ou on enregistre une pression de 3494.57 **cmH₂O** durant une période de pompage de 7 heures 50 minutes.

Le traitement des données brutes a été effectué via le logiciel OUAIP du BRGM. Pour l'aquifère captive des calcaires de Rhoud Nouss, deux solutions analytiques ont été testées : la solution analytique de Theis et celle de Hantush. Ce choix est justifié par la lithologie calcaire qui, bien que présentant un comportement captif, bénéficie souvent de phénomènes de drainance (vertical leakage) à travers les épontes semi-perméables ou le réseau de fracturation.

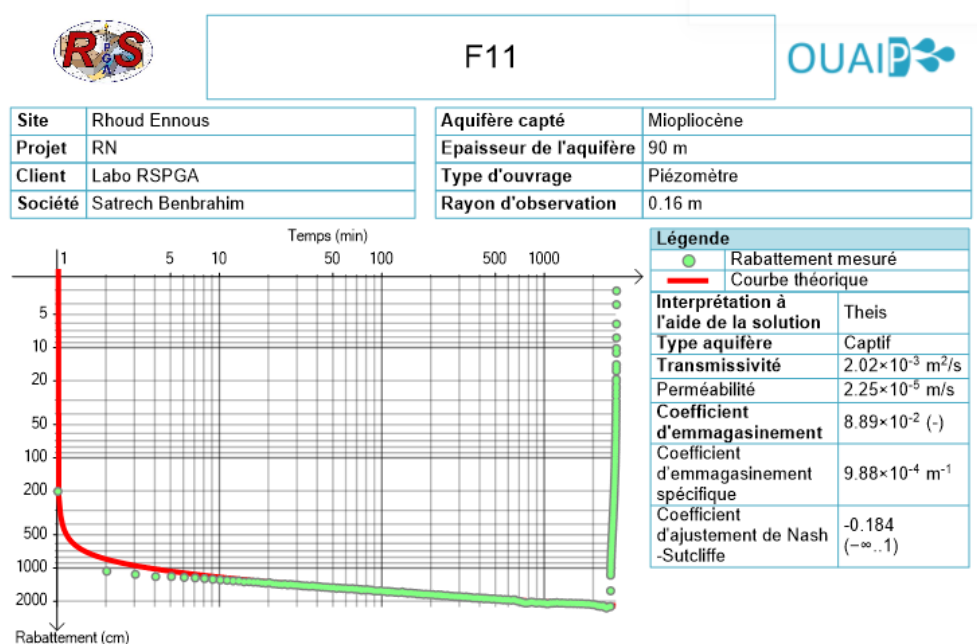


Figure 3 : Solution de Theis

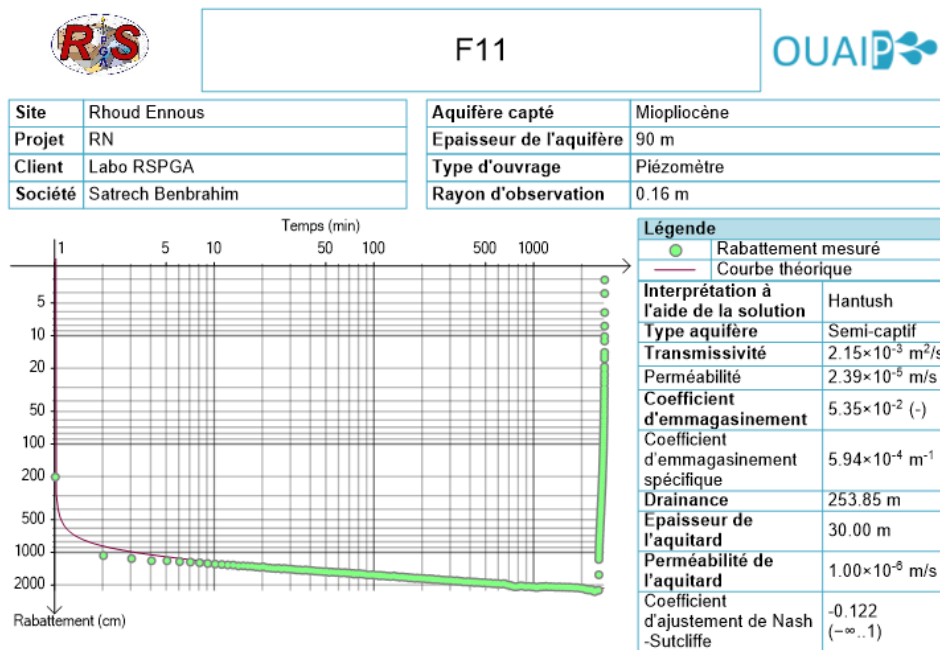


Figure 4 : solution de Hantush

3.1. Interprétation des Résultats et Paramètres Hydrodynamiques de la Nappe

La conversion des courbes de rabattement en paramètres physiques est l'étape cruciale pour la modélisation de la productivité à long terme de l'ouvrage F11.

Le tableau suivant récapitule les résultats de l'interprétation hydrodynamique par le logiciel OUAIP.

Tableau 8 : résultats des paramètres hydrodynamique de l'essai longue durée

Forage	Solution Utilisée	Transmissivité (T) [m ² /s]	Coeff. Emmagasinement (S)	Perméabilité (k) [m/s]
F11	Theis	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$8,89 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$
	Hantush (Drainance)	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$5,35 \cdot 10^{-2}$	$2,39 \cdot 10^{-5}$

L'intensité du rabattement (22,31 m) durant la phase de pompage indique une sollicitation forte autour du forage, mais la récupération rapide confirme une bonne extension latérale de la

Chapitre 4: Hydrodynamique

transmissivité. Le coefficient d'emmagasinement $5,35 \cdot 10^{-2}$ est caractéristique d'une nappe semi-captive à captive.

L'analyse thermique enregistrée par le Diver montre une élévation de la température de **27,25°C** (statique) à **29,16°C** (en pompage). Cette signature thermique confirme l'origine profonde de la ressource. Pour l'irrigation, cette température relativement élevée nécessite une attention particulière : un choc thermique sur les cultures est possible si l'eau est appliquée directement sans transit par un bassin de décantation/refroidissement, sans oublier le risque de précipitation chimique (calcification) lié à la décompression du fluide thermalisé.

3.2. Conclusion :

Les résultats obtenus révèlent une forte hétérogénéité spatiale des conductivités hydrauliques superficielles, variant de 21,5 mm/h (classe modérée, site 2) à 1136 mm/h (classe très rapide, site 4), reflétant la diversité lithologique des formations quaternaires. À l'échelle de l'aquifère, l'essai de pompage du forage F11 a fourni une transmissivité de l'ordre de $2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et un comportement semi-captif confirmé. Ces résultats imposent une adaptation des pratiques d'irrigation selon la perméabilité locale, en privilégiant les techniques localisées pour limiter les pertes par percolation et protéger la ressource souterraine.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le présent mémoire a été consacré à l'étude hydrogéologique de la zone de Rhoud Nouss, région saharienne du Sud-Est algérien, dans le but de caractériser les ressources en eaux souterraines disponibles et d'évaluer leur potentiel d'exploitation dans le cadre du développement agricole local. Les résultats obtenus à travers les quatre chapitres de cette étude permettent de dresser un bilan synthétique et cohérent du fonctionnement hydrogéologique de cette zone.

Sur le plan du cadre général, la zone de Rhoud Nouss est soumise à un climat hyperaride extrême, avec des précipitations annuelles inférieures à 25 mm et des températures estivales dépassant régulièrement 42 °C. Ces conditions climatiques excluent toute recharge significative des aquifères à l'échelle humaine, conférant aux réserves souterraines un caractère essentiellement fossile. La géologie de la région, dominée par les formations triasiques du TAGI et du TAGS ainsi que par les dépôts détritiques du Complexe Terminal, offre néanmoins un cadre structural favorable au piégeage et à la conservation d'importantes ressources en eau souterraine.

Sur le plan de la géologie et de l'hydrogéologie locale, l'analyse des cuttings des treize forages de la concession agricole 'Satrech Benbrahim' et la construction de trois coupes lithologiques corrélées ont mis en évidence une organisation verticale tripartite caractéristique du Complexe Terminal, avec une forte hétérogénéité latérale des faciès traduisant un environnement de dépôt fluvatile complexe. Les formations sableuses et graveleuses constituent les réservoirs les plus productifs, tandis que les niveaux argileux et gypseux assurent localement le rôle d'écrans semi-perméables. La continuité régionale des horizons aquifères sableux confirme l'existence d'un système aquifère étendu, avec une direction d'écoulement générale orientée du nord-ouest vers le sud-est.

Sur le plan hydrodynamique, les essais d'infiltration réalisés à l'infiltromètre de Guelph ont révélé une forte variabilité spatiale des conductivités hydrauliques superficielles, s'échelonnant de 21,5 mm/h à 1136 mm/h selon les sites, reflétant la diversité lithologique des formations quaternaires. L'interprétation de l'essai de pompage de longue durée sur le forage F11, par les solutions analytiques de Theis et de Hantush, a fourni une transmissivité de l'ordre de $2,1 \times 10^{-3}$ m²/s et un coefficient d'emmagasinement caractéristique d'un aquifère semi-captif, confirmant le bon potentiel hydraulique de l'aquifère calcaire du Miopliocène.

En définitive, cette étude démontre que la zone de Rhoud Nouss dispose d'un potentiel hydrogéologique réel et exploitable pour le développement agricole. Cependant, la nature

Conclusion Générale

fossile des réserves, la forte hétérogénéité lithologique et la vulnérabilité des aquifères à la contamination imposent une gestion rigoureuse et durable de cette ressource précieuse. Une exploitation rationnelle, fondée sur le respect des capacités hydrodynamiques des aquifères, l'adoption de techniques d'irrigation économes en eau et la mise en place d'un suivi piézométrique et physicochimique régulier, constitue la seule voie viable pour assurer la pérennité de l'activité agricole dans cette région saharienne et préserver, pour les générations futures, un patrimoine hydrogéologique irremplaçable.

Recommandations Générales

Sur la base des résultats obtenus dans les quatre chapitres de cette étude hydrogéologique de la zone de Rhoud Nouss, les recommandations suivantes sont formulées :

1. Gestion des ressources en eau souterraine

Adopter une exploitation raisonnée des aquifères du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire, dont les réserves sont quasi-fossiles et non renouvelables dans le contexte hyperaride actuel.

Mettre en place un réseau de surveillance piézométrique permanent afin de suivre l'évolution des niveaux et de détecter tout signe de surexploitation ou de salinisation progressive des nappes.

Limiter les débits de pompage aux valeurs compatibles avec les paramètres hydrodynamiques mesurés, notamment la transmissivité de l'ordre de $2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ déterminée sur le forage F11.

2. Implantation et conception des ouvrages de captage

Privilégier l'implantation des forages dans les zones à forte perméabilité identifiées par les coupes lithologiques, notamment au niveau des corps graveleux et sableux grossiers des forages F02-SB et F37-SB.

Tenir compte de la forte hétérogénéité latérale des faciès révélée par les trois coupes géologiques avant toute décision d'implantation d'un nouvel ouvrage, afin d'éviter les zones argileuses et gypseuses peu productives.

Conclusion Générale

Équiper systématiquement les nouveaux forages d'enregistreurs automatiques de type TD-Diver pour assurer un suivi continu et fiable des niveaux piézométriques.

3. Pratiques d'irrigation agricole

Adapter les techniques d'irrigation à la perméabilité locale des sols : privilégier le goutte-à-goutte ou la micro-aspiration dans les zones à conductivité modérée (sites 1 et 2, $K_{fs} = 21$ à 35 mm/h), et imposer obligatoirement l'irrigation localisée dans les zones à très forte perméabilité (sites 3 et 4, $K_{fs} > 380$ mm/h) pour limiter les pertes par percolation profonde.

Maintenir le taux d'application hydraulique des systèmes d'irrigation en dessous de la conductivité hydraulique mesurée afin d'éviter tout ruissellement de surface et toute perte inutile d'eau.

Prévoir un bassin de décantation et de refroidissement pour ramener la température de l'eau pompée (environ 29°C) à une valeur acceptable avant distribution aux cultures, afin d'éviter tout choc thermique et tout risque de calcification des émetteurs.

4. Protection de la qualité des eaux souterraines

Surveiller régulièrement la qualité physicochimique des eaux des aquifères exploités, dont la minéralisation naturellement élevée les rend non conformes aux normes OMS sans traitement préalable.

Contrôler l'utilisation des intrants agricoles (engrais, pesticides) dans les zones à forte perméabilité (sites 3 et 4), où le temps de transit vertical des polluants depuis la surface jusqu'à la nappe est très court, rendant les aquifères particulièrement vulnérables à la contamination.

Éviter l'installation de fosses septiques ou de décharges à proximité des zones de forte perméabilité identifiées.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques :

- (<https://www.infoclimat.fr/>) 23.04.2026
- Boumaza Mohamed & Semai Farouq. (s.d.). *Étude géologique et pétrolière du champ de Sif Fatima, Bassin de Berkine, Algérie Orientale*. Mémoire de fin d'études, Université Kasdi Merbah Ouargla. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/5323/3/BOUMAZA%20MOHAMED+SEMAI%20FAROUQ.pdf>
- Besbes, B. et al. (2003) Système Aquifère du Sahara septentrional Gestion commune d'un bassin transfrontière, La Houille Blanche, 89:5, 128-133, DOI: 10.1051/lhb/2003102
- <https://www.rockware.com/product/rockworks/>
- Van Essen Instruments (2018). Guide d'utilisation du produit — TD-Diver™ & Baro-Diver®, Série DI8xx. Van Essen Instruments B.V., Delft, Pays-Bas. Disponible sur : www.vanessen.com
- Soilmoisture Equipment Corp. (SEC) — Operating Instructions, Model 2800K1 Guelph Permeameter, December 2012. Eijkelkamp Soil & Water, Giesbeek, The Netherlands.
- Elrick, D.E., Reynolds, W.D. & Tan, K.A. (1989). Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Groundwater Monitoring Review*, 9(3), 184–193.
- Reynolds, W.D. & Elrick, D.E. (1990). Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1233–1241.
- Reynolds, W.D. & Elrick, D.E. (1992). Measurement of saturated hydraulic conductivity using the Guelph permeameter. In: Topp, G.C. et al. (Eds.), *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 61–92.
- Soilmoisture Equipment Corp. (2008). *Guelph Permeameter 2800K1 Operating Instructions*. Santa Barbara, CA, USA, 68 p.

Références Bibliographiques

- USDA (1999). Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2nd Edition. Agricultural Handbook No. 436. Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- OSS (2003). Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) : Hydrogéologie. Observatoire du Sahara et du Sahel, Tunis, Volume II, 380 p.