

ANNEXE 6A

Étude baseline des eaux souterraines

RAPPORT DE RÉFÉRENCE SUR LES EAUX SOUTERRAINES DU SIMANDOU

Prepared For
Rio Tinto Iron Ore Atlantic Ltd

Date Issued: Juin 2023

Report Prepared by



SRK Consulting (UK) Limited
UK31243

DROITS D'AUTEUR ET CLAUSE DE NON-RESPONSABILITÉ

Les droits d'auteur (et tout autre droit de propriété intellectuelle applicable) de ce document et de toutes les données ou modèles qui l'accompagnent, créés par SRK Consulting (UK) Limited (« SRK »), sont réservés par SRK et sont protégés par les lois internationales sur les droits d'auteur et autres lois. Les droits d'auteur de tous les éléments constitutifs de ce document, tels que les images, sont détenus et réservés par le propriétaire des droits d'auteur, comme indiqué dans le présent document.

L'utilisation de ce document est strictement soumise aux conditions concédées par SRK au(x) destinataire(s) nommé(s) de ce document ou aux personnes auxquelles SRK a accepté qu'il soit transféré (les « destinataires »). Sauf accord contraire de SRK, cela ne confère aucun droit à un tiers. Ce document ne peut être utilisé ou invoqué à d'autres fins que celles pour lesquelles il est mentionné et SRK ne peut être tenue responsable d'aucune perte ou dommage causé par une telle utilisation ou crédit. Si le destinataire du présent document souhaite en utiliser le contenu à des fins autres que celles qui sont expressément mentionnées ou pour lever des fonds auprès d'un tiers et que le document n'est pas utilisé dans son intégralité à cette fin, il doit, avant toute utilisation, présenter à SRK, pour examen, un projet de rapport ou de document qu'il a produit et qui peut intégrer une partie du contenu du présent document, afin que SRK puisse s'assurer que ce document est présenté d'une manière qui reflète de manière précise et raisonnable les résultats ou les conclusions produits par SRK.

Le présent document ne peut être distribué à un tiers que dans son intégralité, tel que fourni par SRK, et ne peut être reproduit ou diffusé dans le domaine public (en tout ou en partie) ou sous une forme éditée, abrégée ou modifiée de quelque manière que ce soit, sauf accord exprès de SRK. Tout autre travail du propriétaire du droit d'auteur ne peut être séparé de ce document, utilisé ou reproduit à d'autres fins autres que celles de ce document, dans leur intégralité tel que sous licence par SRK. Dans le cas où ce document serait divulgué ou distribué à un tiers, ce dernier ne serait pas autorisé à se fier aux informations, garanties ou déclarations contenues dans ce document et les destinataires de ce document indemniseront SRK de toutes les réclamations, pertes et coûts que SRK pourrait encourir en relation avec ces tiers.

Entité légale de SRK :	SRK Consulting (UK) Limited
Adresse de SRK :	5ème étage Churchill House 17 Churchill Way Cardiff, CF10 2HH Pays de Galles, Royaume-Uni.
Date :	Juin, 2023
Numéro de projet :	UK31243
Directeur de projet de SRK :	Tony Rex Consultant en entreprise (hydrogéologie)
Chef de projet de SRK :	Dylan John Consultant senior (gestion de projet)
Entité légale du client :	Rio Tinto Iron Ore Atlantic Ltd
Adresse du client :	6 St. Place James Londres, SW1Y 4AD Angleterre, Royaume-Uni

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
2	HISTORIQUE DES RAPPORTS DE REFERENCE	2
3	APPROCHE ET METHODOLOGIE.....	2
3.1	Introduction	2
3.2	Contexte géologique.....	3
3.3	Installations de surveillance des eaux souterraines	3
3.3.1	Piézomètres à colonne de Ouéléba	3
3.3.2	Piézomètres à colonne du Pic de Fon.....	4
3.3.3	Piézomètres à fil vibrant de Ouéléba et du Pic de Fon	4
3.3.4	Conception des piézomètres à colonne dans les zones minières	5
3.3.5	Forages d'exploration à sec	8
3.3.6	Installations de surveillance dans les zones d'infrastructure	8
3.3.7	Installations de surveillance au-delà de la zone minière.....	8
3.3.8	Piézomètres à fil vibrant	12
3.3.9	Informations enregistrées pendant le forage.....	13
3.3.10	Géophysique de fond	13
3.4	Surveillance du niveau des eaux souterraines.....	13
3.4.1	Méthodes de surveillance des eaux souterraines	13
3.4.2	Période de surveillance des eaux souterraines	14
3.4.3	Gestion des données sur le niveau des eaux souterraines	19
3.4.4	Qualité du jeu de données sur le niveau des eaux souterraines	19
3.5	Essais hydrogéologiques.....	20
3.5.1	Porosité	20
3.5.2	Perméabilité de la carotte.....	20
3.5.3	Relation entre la profondeur de la carotte et la perméabilité	21
3.5.4	Essais à charge variable	21
3.5.5	Essais au packer	22
3.5.6	Répartition granulométrique	22
3.6	Échantillonnage des eaux souterraines.....	23
3.7	Échantillonnage et analyse des isotopes stables	23
3.8	Enquêtes sur le débit des sources, l'accrétion du débit et la qualité de l'eau le long des cours d'eau	24
4	GEOLOGIE REGIONALE	25
4.1	Stratigraphie	25
4.2	Classification géologique	29
4.3	Modèle de bloc géologique.....	29
4.4	Géologie structurale.....	29
4.4.1	Géologie structurale ; Ouéléba.....	29

4.4.1	Géologie structurale ; Pic de Fon	31
5	HYDROGEOLOGIE.....	35
5.1	Unités hydrostratigraphiques	35
5.1.1	Gisements de canga.....	35
5.1.2	Roche couverture et zone de transition.....	35
5.1.3	Hématite	35
5.1.4	Itabirite.....	36
5.1.5	Phyllite.....	37
5.1.6	Quartzite	37
5.1.7	Sous-sol.....	38
5.2	L'influence de la géologie structurale sur l'hydrogéologie	39
5.3	Niveaux des eaux souterraines	40
5.3.1	Analyse des hydrogrammes.....	40
5.3.2	Ouéléba	41
5.3.5	Piézomètres installés en dehors des zones de ressources et d'infrastructures	54
5.4	Propriétés hydrauliques	54
5.4.1	Porosité	54
5.4.2	Perméabilité.....	55
6	CHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES.....	62
7	RECHARGE DES EAUX SOUTERRAINES.....	65
7.1	Aperçu des processus de recharge des eaux souterraines	65
7.2	Estimation des taux de recharge des eaux souterraines	66
7.3	Évaluation des temps de réponse de la recharge	68
8	DEBIT D'EAU SOUTERRAINE	68
8.1	Aperçu des mécanismes d'écoulement des eaux souterraines	68
8.2	Analyse du débit de référence du site minier	70
8.3	Délimitation des rejets de corps minéralisés à l'aide d'isotopes stables	77
8.3.1	Résumé des résultats concernant les isotopes stables	77
8.3.2	Variabilité saisonnière des caractéristiques des isotopes stables	78
8.3.3	Altitude et caractéristiques des isotopes stables	79
8.4	Analyse du débit régional de référence	81
8.4.1	Introduction.....	81
8.4.2	Résumé	81
8.4.3	Délimitation des rejets de corps minéralisés à l'aide d'ensembles de données intégrés	
	82	
9	MODELE HYDROGEOLOGIQUE CONCEPTUEL.....	86
9.1	Introduction	86
9.2	Mécanismes d'écoulement des eaux souterraines.....	86
9.3	Compilation des modèles hydrogéologiques conceptuels	89

9.3.1	Ouéléba	89
9.3.2	Ligne de crête centrale	90
9.3.3	Pic de Fon	91
9.3.4	Plaines de sous-sol	92
10	RÉFÉRENCES	I

Liste des tableaux

Tableau 3-1:	Détails des piézomètres en dehors des zones de ressources et d'infrastructures	9
Tableau 5-1:	Niveaux de la nappe phréatique du sous-sol à partir des installations de 2021/22	48
Tableau 5-2:	Détails des piézomètres en dehors des zones de ressources et d'infrastructures	54
Tableau 5-3:	Relation entre la lithologie et la porosité	55
Tableau 5-4:	Résumé de l'analyse de la perméabilité des carottes en laboratoire en fonction du géodomaine et de l'orientation de la foliation	56
Tableau 5-5:	Comparaison des valeurs moyennes de conductivité hydraulique entre différentes méthodes d'essai et d'analyse	62
Tableau 8-1:	Débit de source (L/s) sur l'Ouéléba et le Pic de Fon	70
Tableau 8-2:	Synthèse des résultats de l'étude d'accrétion de flux pour 2022 et 2009 sur Ouéléba	72

Liste des figures

Figure 3-1:	Réseau de surveillance des eaux souterraines – Ouéléba	6
Figure 3-2:	Réseau de surveillance des eaux souterraines – Pic de Fon	7
Figure 3-3:	Emplacements de surveillance du niveau des eaux souterraines du sous-sol (carte orientée à 90 degrés dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord)	10
Figure 3-4:	WRSF de Ouéléba et réseau de surveillance des infrastructures et des niveaux de la nappe phréatique	11
Figure 3-5:	Étendue potentielle du WRSF du Pic de Fon, réseau de surveillance associé et niveaux d'eau (d'après SWS, 2012)	12
Figure 3-6:	Chronologie de la surveillance active du niveau de la nappe phréatique à Ouéléba – Piézomètres à colonne (Tracé 1 sur 2)	15
Figure 3-7:	Chronologie de la surveillance active du niveau de la nappe phréatique à Ouéléba – Piézomètres à colonne (Tracé 2 sur 2)	16
Figure 3-8:	Calendrier de la surveillance active du niveau des eaux souterraines à Ouéléba – PFV	17
Figure 3-9:	Chronologie de la surveillance active du niveau des eaux souterraines au Pic de Fon (d'après SWS, 2012)	18
Figure 4-1:	Géologie de surface de Ouéléba	27
Figure 4-2:	Géologie de surface du Pic de Fon (d'après SWS, 2012)	28
Figure 4-3:	Modèle géologique de Ouéléba en regardant vers le NNW (en haut) et modèle géologique avec l'itabirite enlevée en regardant vers le NNE (en bas) ; tous deux tirés de Bonson (2021)	32
Figure 4-4:	Structure de déformation en forme de fleur de l'épine centrale à Ouéléba (en haut) et vue en perspective mettant en évidence l'étendue des domaines de quartzite (en bas) ; tous deux tirés de Bonson (2021)	33
Figure 4-5:	Coupe transversale du Pic de Fon (d'après SWS, 2012)	34
Figure 5-1:	Vue de Ouéléba montrant la nature intercalée des géodomaines PHY-QTZ (vert foncé et jaune vif respectivement)	38
Figure 5-2:	Piézomètres à colonne de la zone nord – hydrogrammes (en haut) et (en bas) de niveau moyen de la nappe phréatique par rapport à l'est (axe des abscisses) et au nord (couleur du symbole)	43
Figure 5-3:	Hydrogrammes pour les piézomètres de Ouéléba Centre	44
Figure 5-4:	Hydrogrammes pour Ouéléba Sud piézomètres	45
Figure 5-5:	Série chronologique du niveau des eaux souterraines pour TRN	49
Figure 5-6:	Séries chronologiques du niveau des eaux souterraines pour HGF, IRF, IPC	50

Figure 5-7:	Série chronologique du niveau des eaux souterraines pour PHY, PHS, PHV, PHW, PHC	51
Figure 5-8:	Série chronologique du niveau des eaux souterraines pour QTZ.....	52
Figure 5-9:	Séries chronologiques du niveau des eaux souterraines pour BAS	53
Figure 5-10:	Résultats de la perméabilité des carottes en fonction du géodomaine (en haut) et de la foliation (en bas) (tous deux tirés de : SWS, 2012).....	57
Figure 5-11:	Conductivité hydraulique déterminée par les essais au packer en fonction de la profondeur de l'intervalle d'essai (d'après SWS, 2012)	59
Figure 5-12:	Diagramme en boîte et en moustache de la moyenne géométrique de la conductivité hydraulique des échantillons de RGMP par rapport aux valeurs préexistantes provenant des essais de perméabilité au packer, de carotte et d'injection.....	61
Figure 6-1:	Répartition spatiale du pH, de la conductivité électrique et du débit : Ouéléba.....	64
Figure 7-1:	Profil d'altération simplifié montrant la recharge préférentielle des eaux souterraines à Simandou (d'après : Jeffcoate, 2013)	66
Figure 7-2:	Estimation de la recharge de la nappe phréatique à travers Ouéléba et les bassins versants environnants (SRK, 2023b)	67
Figure 8-1:	Résultats de l'enquête sur l'accrétion de débit en saison sèche 2009 : Ouéléba (d'après SWS, 2012)	73
Figure 8-2:	Résultats de l'enquête sur l'accrétion de débit en saison sèche 2009 : ligne de crête centrale (d'après SWS, 2012)	74
Figure 8-3:	Résultats de l'enquête sur l'accrétion de débit en saison sèche 2009 : Pic de Fon (d'après SWS, 2012)	75
Figure 8-4:	Résultats de l'étude sur l'accrétion de débit en la saison sèche 2022 (d'après SRK, 2022c).....	76
Figure 8-5:	Résultats combinés (2012 & 2022) Simandou $\delta^{18}\text{O} / \delta^{2}\text{H}$	78
Figure 8-6:	Relation entre l'altitude et l'appauvrissement en $\delta^{18}\text{O}$ pour les échantillons d'eau de source et d'eau de surface de la saison sèche 2022	80
Figure 8-7:	$\delta^{18}\text{O}$, lithologie de surface, géologie structurale et niveaux des eaux souterraines du corps minéralisé	84
Figure 8-8:	Interprétation des voies d'écoulement des eaux souterraines vers les principales zones de décharge dans le nord de l'Ouéléba	85
Figure 9-1:	Modèle hydrogéologique conceptuel pour Ouéléba – Vue en plan	93
Figure 9-2:	Modèle hydrogéologique conceptuel pour le Pic de Fon – Vue en plan (d'après SWS, 2012)	94
Figure 9-3:	Coupe transversale dans le nord de l'Ouéléba ; modèle de bloc de Golder (2021) avec interprétation du QTZ (2021) superposé.....	95
Figure 9-4:	Modèle hydrogéologique conceptuel pour le nord de l'Ouéléba – Schéma en 3D	96

Liste des annexes techniques

A	GROUNDWATER MONITORING INSTALLATIONS	A-1
B	OUÉLÉBA STRUCTURAL GEOLOGY MAP	B-1
C	SUMMARY OF GROUNDWATER LEVELS AND VERTICAL HYDRAULIC GRADIENTS AT ALL VWPS.....	C-1
D	RECHARGE RESPONSE TIMES.....	D-1
E	PIC DE FON HYDROGRAPH ANALYSIS	E-1
F	PERMEABILITY TEST RESULTS	F-1
G	REGIONAL BASEFLOW ANALYSIS	G-1
H	STABLE ISOTOPE STUDY.....	H-1
I	PIC DE FON GROUNDWATER SURFACE	I-1
	GLOSSAIRE, ABREVIATIONS, UNITES	I

RAPPORT DE RÉFÉRENCE SUR LES EAUX SOUTERRAINES DU SIMANDOU

1 INTRODUCTION

Ce rapport présente une mise à jour de la caractérisation de référence des eaux souterraines pour le projet Simandou, en Guinée. Ce document a été compilé et rédigé par SRK Consulting UK Limited (« SRK ») pour le compte de Rio Tinto Iron Ore Atlantic Ltd (« Rio Tinto »).

Les sections suivantes sont incluses dans ce rapport :

- Section 2 – Historique du rapport de base : indique la provenance de diverses données et sections précédemment rapportées, en raison de la nature compilée de ce document à partir d'études antérieures.
- Section 3 – Approche et méthodologie : décrit toutes les données qui ont été incorporées et précise la méthode de contrôle ou d'essai employée.
- Section 4 – Géologie : décrit le contexte géologique de la zone du projet Simandou, afin d'étayer la caractérisation hydrogéologique et la conceptualisation.
- Section 5 – Hydrogéologie : présente une compilation des données hydrogéologiques disponibles, y compris les niveaux des eaux souterraines et les propriétés hydrauliques, ainsi qu'un résumé conceptuel des principaux processus hydrogéologiques qui se produisent à Simandou.
- Section 6 – résume les points clés de l'état de référence de la chimie des eaux souterraines (décrits en détail dans le rapport sur l'état de référence de la chimie de l'eau).
- Section 7 – Recharge des eaux souterraines : fournit une vue d'ensemble des processus de recharge des eaux souterraines.
- Section 8 – Rejets d'eaux souterraines : fournit une vue d'ensemble des processus de rejets d'eaux souterraines.
- Section 9 – Modèle hydrogéologique conceptuel : présente un résumé conceptuel des principaux composants et processus des eaux souterraines, tels qu'ils ont été présentés dans les sections précédentes.
- Section 10 – Références.

Les éléments suivants de l'étude de base sur les eaux souterraines font l'objet d'un rapport distinct :

- Chimie des eaux souterraines et des eaux de surface. Un rapport distinct sur l'étude de base de la chimie de l'eau a été réalisé par SRK en 2023 (SRK, 2023a), à l'exception de l'interprétation des résultats isotopiques qui sont discutés dans le présent document.

2 HISTORIQUE DES RAPPORTS DE REFERENCE

Ce document intègre des données et des analyses provenant d'études antérieures réalisées entre 2009 et 2012, ainsi que de l'étude la plus récente réalisée en 2021/2022 par SRK pour le compte de Simfer. Lorsqu'aucune information supplémentaire n'a été recueillie ou que le rapport précédent correspond toujours à la compréhension ou aux hypothèses actuelles, les sections pertinentes ont été reprises des rapports précédents sans remaniement significatif.

La date limite de dépôt des données pour le présent rapport a été fixée à août 2022. Cela s'applique aux données de référence recueillies et incorporées dans la zone du projet Simandou (uniquement dans la zone nord de Ouéléba, l'évaluation de la zone du Pic de Fon étant inchangée depuis 2012).

Les rapports et sections antérieurs qui ont été pris en compte et incorporés dans le présent document sont décrits ci-dessous :

- Rapport de référence 2009 sur les eaux souterraines : « CIO.16-0400-NX-REP-00027 – WMC BASELINE HYDROGEOLOGY REPORT » (WMC, 2009) ;
- SEIA 2011 (section sur les eaux souterraines) : « Mine_Annex_06B_Groundwater [1] » (Rio Tinto, 2011) ;
- Étude d'ingénierie détaillée de 2012 (comprenant une mise à jour du rapport hydrogéologique de base de 2009) : « CIO.16-0400-NX-REP-00004 – SWS HYDROLOGIC STUDIES BANKABLE FEASIBILITY STUDY » (SWS, 2012) ; et

Les données de référence sur la qualité des eaux souterraines (SRK, 2022c) et la modélisation numérique des eaux souterraines (SRK, 2022d) sont présentées séparément.

La caractérisation du système des eaux souterraines a continué à progresser depuis les études de base et de faisabilité du PFS 2008 (SWS, 2008) et du DE 2012 (SWS, 2012), et comprend des études hydrogéologiques plus récentes achevées en 2021/2022 et axées sur le nord de l'Ouéléba.

3 APPROCHE ET METHODOLOGIE

3.1 Introduction

Les approches et les méthodologies adoptées pour obtenir les données et les informations utilisées pour les études de base sur les eaux souterraines sont résumées dans les sections ci-dessous. Il comprend une description des travaux entrepris au cours de plusieurs campagnes de travail sur le terrain, notamment le forage, l'installation et la construction de puits, les essais hydrauliques, l'échantillonnage, la surveillance et l'instrumentation des trous de forage. La section couvre les approches et les méthodologies adoptées dans les grands domaines suivants :

- 3.2: Cadre géologique
- 3.3: installations de surveillance des eaux souterraines
- 3.4: Surveillance du niveau des eaux souterraines
- 3.5: Essais hydrogéologiques
- 3.6: Échantillonnage des eaux souterraines

- 3.7: Échantillonnage et analyse des isotopes stables
- 3.8: Études du débit des sources, de l'accrétion du débit et de la qualité de l'eau le long des cours d'eau et analyses de la qualité de l'eau des cours d'eau

3.2 Contexte géologique

Le cadre structural du gisement de Simandou a été initialement évalué par Brian Marten (Marten, 2004) et Rio Tinto (2010). D'autres études ont été réalisées par Pope (2012), Vannay et Kalivogui (2012) et Bonson (2021).

Bonson (2021) a réinterprété la séquence géologique à Ouéléba. L'examen de Bonson a été principalement axé sur la prise en compte des préoccupations qui auraient un impact sur les évaluations géotechniques et hydrogéologiques (pour une prise en compte dans l'évaluation de la conception des pentes de la mine à ciel ouvert de Ouéléba, voir SRK, 2022a). Plus précisément, ce travail visait à combler le manque de données géologiques structurales dans les modèles géologiques 3D historiques et existants. Le travail visait à fournir une interprétation géologique plus rationnelle et logique des données disponibles.

La modélisation géologique entreprise par Bonson était une approche manuelle et interprétative explicite permettant de rationaliser les complexités géologiques par rapport aux données disponibles. L'interprétation actualisée a modélisé les principaux contacts géologiques et les principales caractéristiques structurales et s'est concentrée sur les domaines du socle, de l'itabirite, de la phyllite et du quartzite. L'objectif du modèle étant de saisir les principales relations structurelles et lithologiques, les différents types de minerais et les classifications lithologiques dues à l'altération et à la météorisation n'ont pas été modélisés.

Le contexte géologique, y compris la géologie structurale, est présenté au chapitre 0.

3.3 Installations de surveillance des eaux souterraines

L'étude actuelle se concentre sur l'amélioration de la caractérisation de base de la zone de Ouéléba ; aucune donnée supplémentaire n'a été obtenue au Pic de Fon depuis 2012. Figure 3-1 et 3-2 Figure 3-2 Des tableaux résumant tous les détails des sites de surveillance figurent à l'annexe A.

3.3.1 Piézomètres à colonne de Ouéléba

A ce jour, 165 forages sur Ouéléba ont été installés comme piézomètres à colonne :

- Avant 2012¹ :
 - 145 étaient de simples piézomètres à colonne, dont :
 - 49 ont été considérés comme définitivement secs ;
 - 33 n'étaient pas opérationnels en raison des dommages subis ;
 - 2 n'ont pas été contrôlés ;
 - 38 ont été contrôlés à l'aide d'appareils de mesure manuels ; et
 - 23 ont été installés avec des transducteurs de pression et des enregistreurs de données de niveau d'eau (en plus de la surveillance manuelle).

¹Ce document fait référence à tous les travaux réalisés jusqu'en 2012 inclus (comme indiqué dans l'étude de 2012, SWS 2012).

- Depuis 2021 :
 - Dix-neuf autres piézomètres à colonne ont été forés et installés :
 - 17 ont été contrôlés à l'aide d'appareils de mesure manuels ; et
 - 9 ont été installés avec des capteurs de pression et des enregistreurs de données (en plus de la surveillance manuelle).
 - 67 piézomètres existants (antérieurs à 2012) ont été visités en 2021, dont 33 étaient soit endommagés, soit introuvables. Parmi ces dispositifs opérationnels (34 au total) :
 - 7 étaient secs ;
 - 27 ont fait l'objet de mesures du niveau de l'eau ; et
 - 5 ont été équipés de capteurs de pression (en plus de la surveillance manuelle).

3.3.2 Piézomètres à colonne du Pic de Fon

Au total, 52 forages sur le Pic de Fon ont été installés avec un tubage en PVC ou un tubage flexible de conduite d'eau (avant 2012) :

- 13 ont été considérés comme définitivement secs ;
- 18 n'étaient pas opérationnels en raison des dommages subis ;
- 9 ont été contrôlés à l'aide d'appareils de mesure manuels ; et
- 12 ont été installés avec des transducteurs de pression et des enregistreurs de données de niveau d'eau (en plus de la surveillance manuelle).

3.3.3 Piézomètres à fil vibrant de Ouéléba et du Pic de Fon

Les piézomètres à fil vibrant à plusieurs niveaux suivants ont été installés :

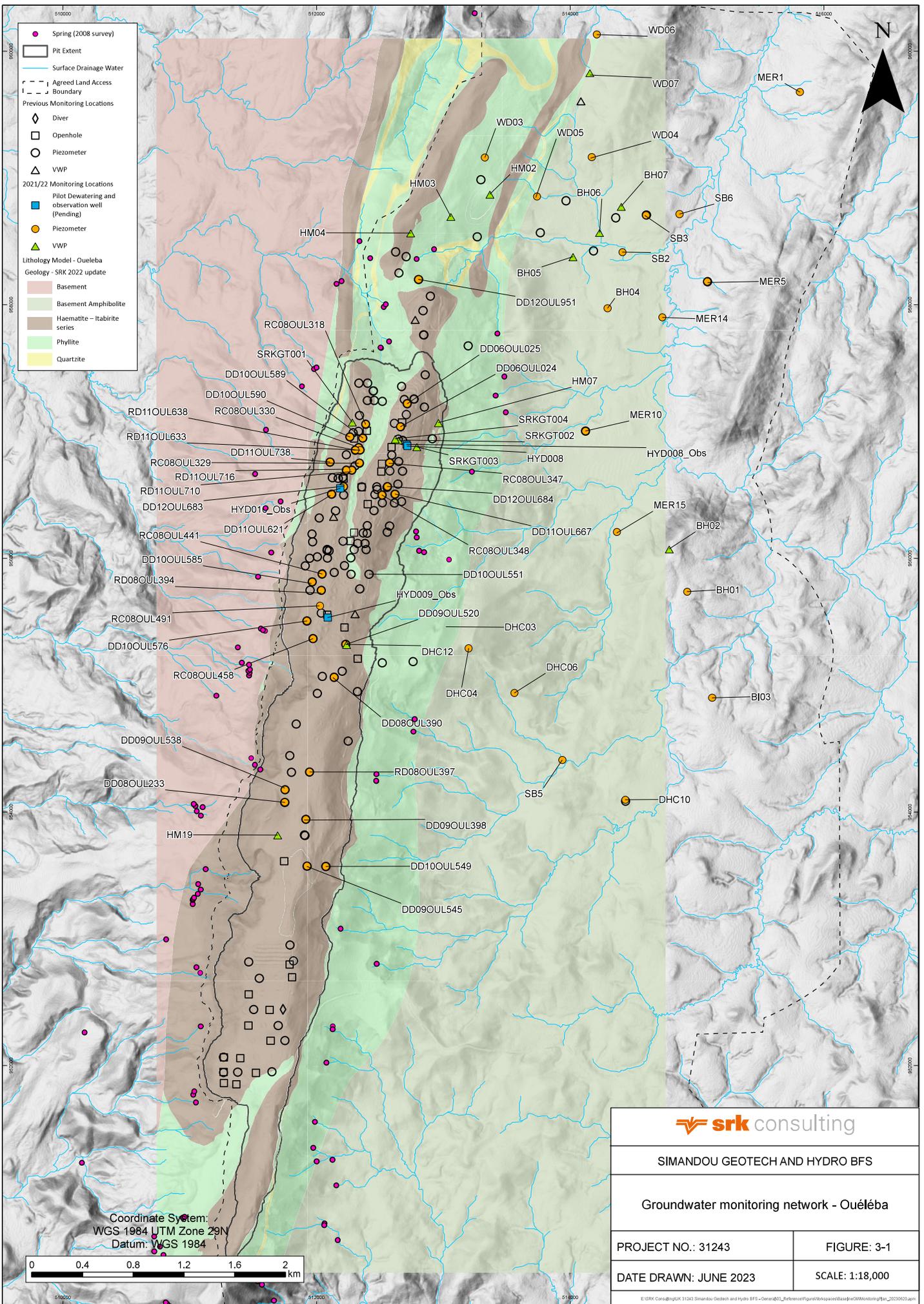
- Avant 2012 :
 - 32 capteurs PFV opérationnels sur 13 forages à Ouéléba.
 - 6 capteurs PFV opérationnels sur 4 forages au Pic de Fon.
- Depuis 2021 :
 - 59 capteurs PFV opérationnels dans 16 forages sur et à côté de Ouéléba.
 - 13 des installations de PFV d'avant 2012 ont été réhabilitées (suite à des dommages), et des enregistreurs de données automatisés ont été réinstallés dans 4 d'entre elles.

D'autres informations sur le niveau des eaux souterraines ont été obtenues grâce à la géophysique de fond, à la teneur en eau des échantillons, aux trous ouverts et à la répartition spatiale des sources. Des trous secs ont également été utilisés pour évaluer les profondeurs minimales de l'eau. Les emplacements et les détails de toutes les sources de données sur le niveau des eaux souterraines à Ouéléba et au Pic de Fon sont indiqués sur la Figure 3-1 et la Figure 3-2, respectivement.

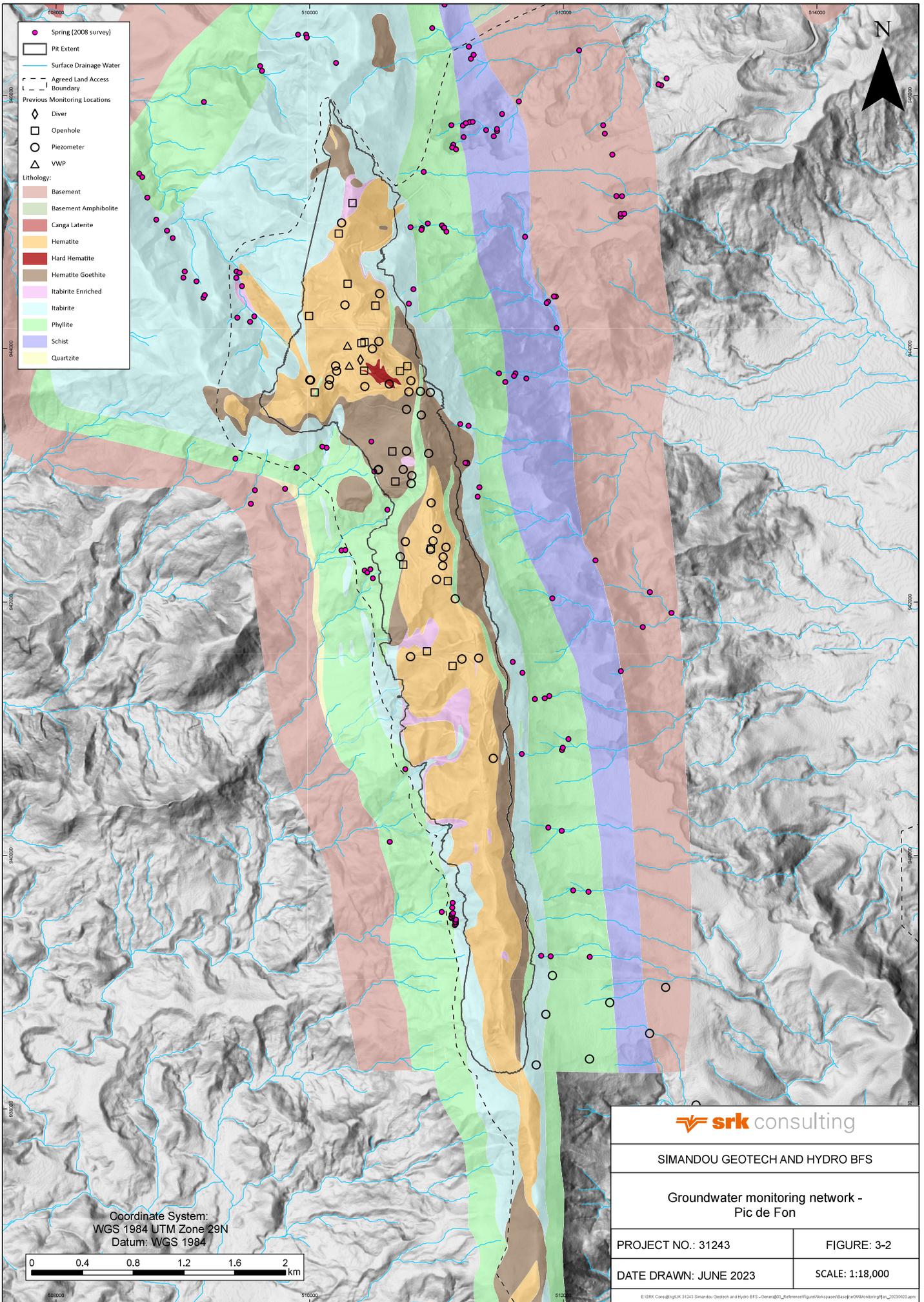
3.3.4 Conception des piézomètres à colonne dans les zones minières

Des piézomètres à colonne ont été installés dans les trous de forage réalisés dans le cadre des programmes de forage des ressources et de l'infrastructure géotechnique. Quatre modèles ont été utilisés pour l'installation de piézomètres à Simandou :

- Avant 2012 :
 - Les piézomètres ont été construits à l'aide d'une longueur de tuyau en PVC ordinaire de 50 mm de diamètre intérieur avec un intervalle de PVC fendu à la base. Le tube vertical a été descendu dans les trous de forage immédiatement après la fin du forage ; le tube a été descendu jusqu'à la profondeur totale du trou de forage ou jusqu'au niveau de l'effondrement du trou de forage ;
 - Lorsqu'il n'a pas été possible d'utiliser les appareils de forage pour l'installation des piézomètres, ou lorsque des eaux souterraines ont été identifiées dans des trous ouverts à une date ultérieure, des « piézomètres à conduite d'eau » flexibles ont été descendus dans les trous de forage et fixés au collier.
- Depuis 2021 :
 - Les piézomètres à puits intelligents ont été construits avec une combinaison de tuyaux PEHD ordinaires de 51 mm de diamètre intérieur avec un intervalle de PEHD fendu et un filtre à gravier préfabriqué à la base, et avec un collier de bentonite gonflant préfabriqué au-dessus de la section fendue afin d'isoler l'intervalle de surveillance.
 - Les piézomètres ont été construits à l'aide d'une longueur de tuyau en PVC ordinaire de 42 mm de diamètre intérieur avec un intervalle de PVC fendu à la base. Ces installations comprenaient un matériau filtrant pour l'ensemble de l'intervalle crépiné et un joint de bentonite dans l'espace annulaire au-dessus.



SIMANDOU GEOTECH AND HYDRO BFS	
Groundwater monitoring network - Ouéléba	
PROJECT NO.: 31243	FIGURE: 3-1
DATE DRAWN: JUNE 2023	SCALE: 1:18,000
©SRK Consulting 31243 Simandou Geotech and Hydro BFS - General Reference Figure/Map/Report/Drawings/Plan_20230602.dwg	



srk consulting

SIMANDOU GEOTECH AND HYDRO BFS

Groundwater monitoring network -
Pic de Fon

PROJECT NO.: 31243

FIGURE: 3-2

DATE DRAWN: JUNE 2023

SCALE: 1:18,000

3.3.5 Forages d'exploration à sec

La grande profondeur de la nappe phréatique sur les crêtes a souvent entraîné des trous secs. Ces forages ont néanmoins été utiles pour confirmer i. l'absence d'une véritable nappe phréatique et ii. la présence de nappes phréatiques perchées.² 449 forages secs ont été identifiés à ce jour à partir de trois sources : les piézomètres secs, les forages secs et les forages secs lors d'investigations géophysiques. Ouéléba compte 285 forages secs et le Pic de Fon 164.

3.3.6 Installations de surveillance dans les zones d'infrastructure

Au cours de la campagne de forage 2021/2022, un total de 28 trous d'infrastructure ont été forés, recoupant le matériau du sous-sol, dont 18 ont été équipés de piézomètres de surveillance des eaux souterraines, comme le montre la Figure 3-3. Cinq d'entre elles sont équipées de PFV et 13 de colonnes.

3.3.7 Installations de surveillance au-delà de la zone minière

Des études sur les eaux souterraines ont également été réalisées dans les zones de stockage de déchets rocheux (WRSF) et d'infrastructure de Ouéléba et du Pic de Fon. Avant 2012, un total de sept piézomètres à colonne a été installé à Ouéléba et six au Pic de Fon. Trois des colonnes de Ouéléba ont été converties en installations PFV, avec un total de neuf capteurs PFV installés.

Depuis 2021, un total de 16 piézomètres à colonne et sept PFV ont été installés en dehors de la zone de ressources de la fosse, associés aux installations de stockage des stériles et aux zones d'infrastructure proposées au nord-est de Ouéléba. Les plans de localisation et les niveaux d'eau de ces forages sont présentés dans les figures Figure 3-4 et Figure 3-5 pour Ouéléba et le Pic de Fon, respectivement.

Un certain nombre de piézomètres ont été installés par le passé pour surveiller le niveau des eaux souterraines en dehors des zones de ressources et d'infrastructures de Ouéléba et du Pic de Fon. Huit trous exploratoires ont été forés en juillet/août 2007 sur le site de Canga Est afin d'étudier le potentiel d'approvisionnement en eau de forage du camp de Canga Est. Quatre d'entre elles ont été utilisées pour la surveillance des eaux souterraines. Trois piézomètres supplémentaires ont également été installés le long de la route Canga Est – Moribadou – Ouéléba pour surveiller les niveaux des eaux souterraines dans le sous-sol. Les détails des piézomètres installés en dehors des zones de ressources et d'infrastructures sont résumés dans le Tableau 3-1.

²lorsque des eaux souterraines moins profondes sont trouvées à côté de trous secs plus profonds, le niveau d'eau observé moins profond est supposé représenter une nappe phréatique perchée. Les niveaux d'eau temporaires perchés peuvent être dus au fait que l'eau est « assise » au-dessus d'un pont ou d'un effondrement de trou de forage.

Tableau 3-1: Détails des piézomètres en dehors des zones de ressources et d'infrastructures

ID du trou de forage	Localisation	Élévation (mRL)	Profondeur du piézomètre (m)
RC07CEC001	Canga Est	956	40
RC07CEC004	Canga Est	1,056	89
RC07CEC006	Canga Est	1,107	34,7
RC07CEC007	Canga Est	1,047	45
RC07CEC008	Canga Est	1,058	60
RC07OMR001	Route du Moribadou au croisement de la rivière Loffa	760	20,2
RC07OMR002	Carrefour routier Ouéléba-Moribadou	793	21,5
RC07OMR003	Route de Ouéléba	837	11,4

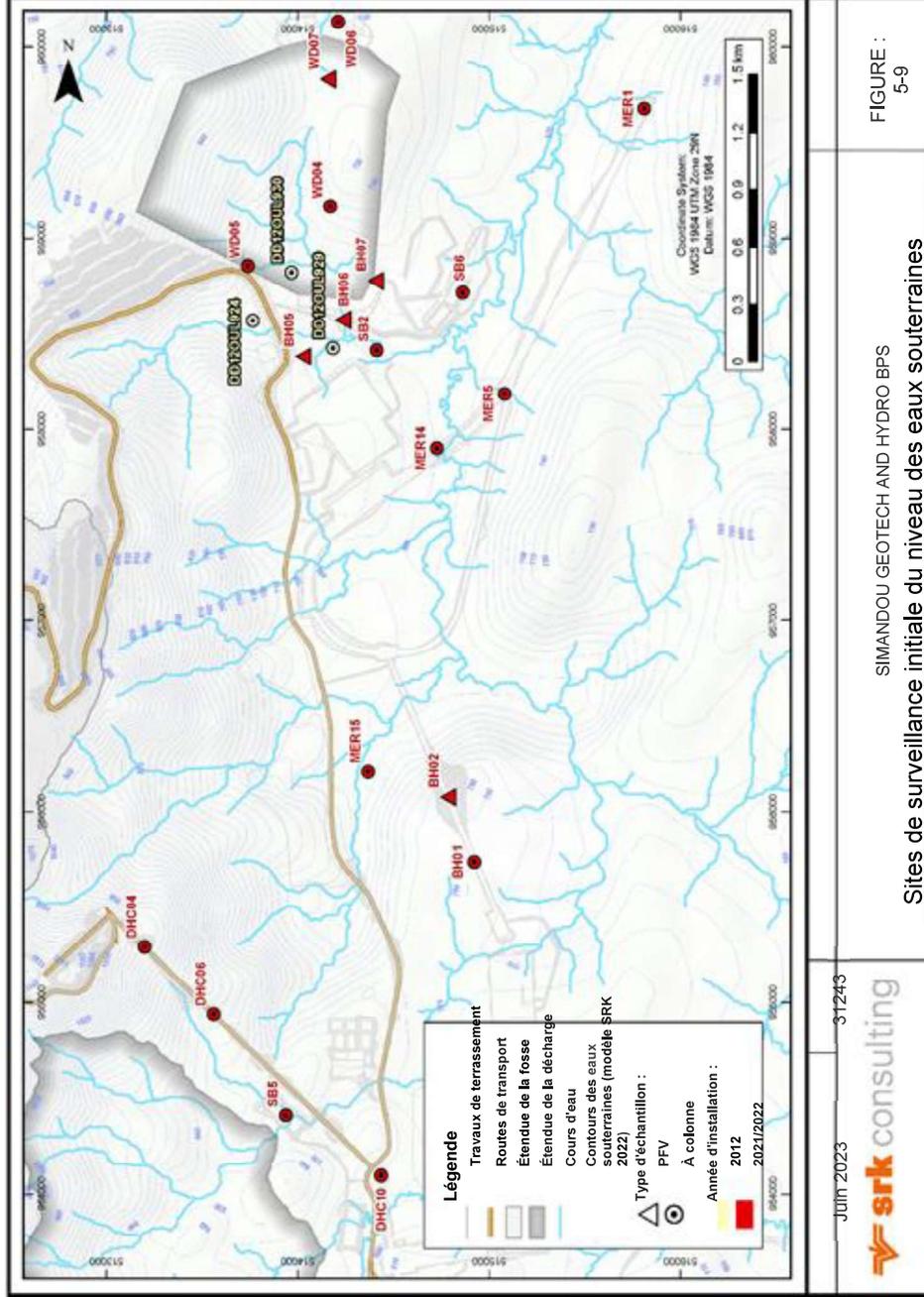


Figure 3-3: Emplacements de surveillance du niveau des eaux souterraines du sous-sol (carte orientée à 90 degrés dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord)

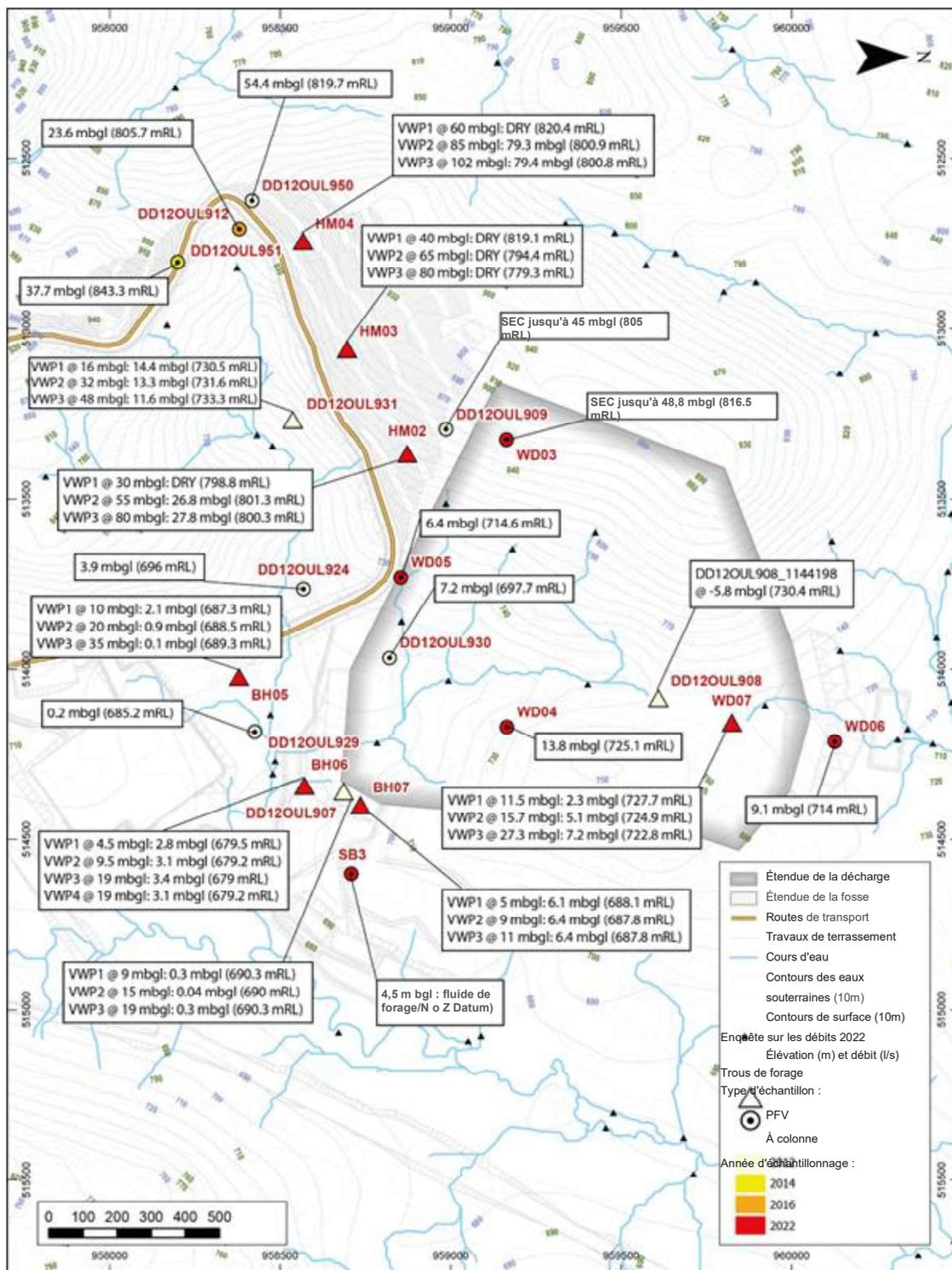


Figure 3-4: WRSF de Ouéléba et réseau de surveillance des infrastructures et des niveaux de la nappe phréatique

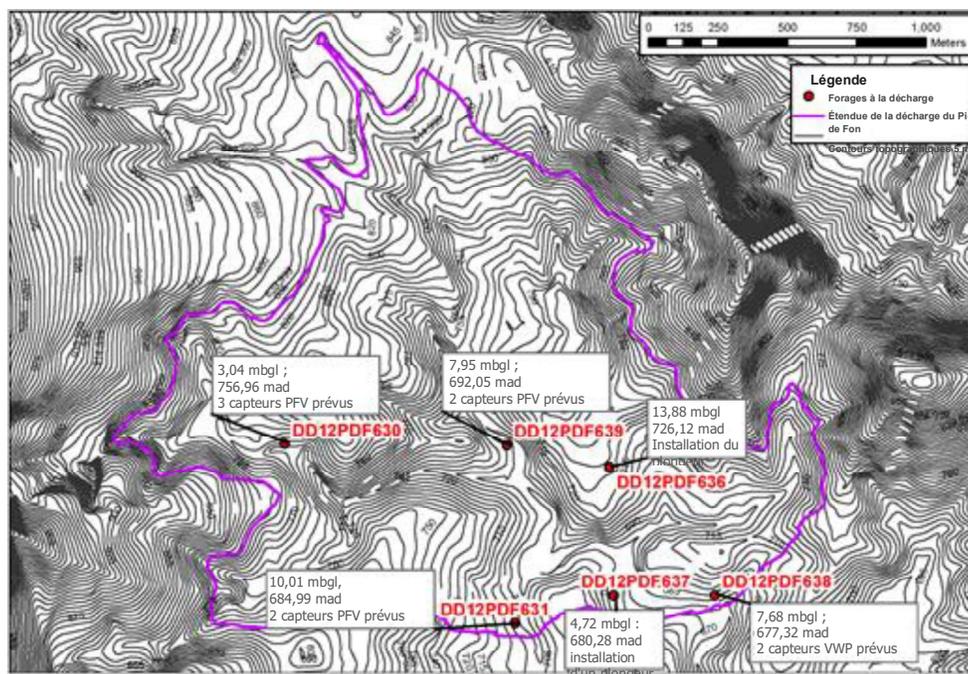


Figure 3-5: Étendue potentielle du WRSF du Pic de Fon, réseau de surveillance associé et niveaux d'eau (d'après SWS, 2012)

3.3.8 Piézomètres à fil vibrant

Plusieurs PFV encastrés ont été installés pour mesurer les pressions interstitielles à proximité des pentes et des infrastructures prévues pour la fosse. Dans la zone de ressources, les chaînes de PFV sont installées de telle sorte qu'au moins un PFV se trouve dans l'aquifère du corps minéralisé, les autres capteurs se trouvant à différents niveaux dans les horizons d'itabirite et de phyllite³. En dehors de la zone de ressources, les capteurs PFV ciblent les matériaux saturés et non saturés des morts-terrains et du socle rocheux. La méthodologie d'installation des PFV a évolué depuis la première installation en juillet 2008⁴. La Figure 3-1 et la Figure 3-2 indiquent l'emplacement des installations de PFV et fournissent des informations sommaires à leur sujet.

³Au total, 17 capteurs PFV secs ont été installés dans 9 forages au cours de la campagne de terrain 2021/2022, dans le but de surveiller la réponse transitoire de la pression interstitielle dans la zone non saturée.

⁴La méthode employée depuis 2021 implique l'installation d'un tube de trémie en PVC, soit blindé au-dessus des profondeurs d'installation souhaitées du PVC, soit à la base du tube de trémie (en fonction de la profondeur de l'installation et du risque considéré d'effondrement du trou de forage). Les capteurs PFV sont ensuite abaissés à la bonne profondeur et l'ensemble du tube vertical et du système d'alimentation en eau de la station d'épuration des eaux usées est mis en place et l'anneau est jointoyé à la surface, en suivant l'approche ascendante. Le coulis est composé d'un mélange de bentonite et de ciment, dont les proportions garantissent une perméabilité inférieure à celle de la formation adjacente.

Les installations historiques de PFV (c'est-à-dire avant 2012) ont été achevées après que l'appareil de forage ait quitté l'emplacement du trou. En conséquence, l'injection était souvent incomplète et le trou de forage susceptible de s'effondrer avant d'être achevé.

3.3.9 Informations enregistrées pendant le forage

Les difficultés rencontrées lors du forage (avant 2012, elles étaient principalement liées à l'instabilité du trou) signifiaient qu'il était souvent impossible d'installer avec succès les piézomètres aux endroits souhaités. Dans ces situations, les observations faites pendant le forage ont été la seule source d'information sur les eaux souterraines. Les informations sur les forages utilisées pour la caractérisation du niveau des eaux souterraines se présentent sous deux formes :

- Observations sur la profondeur des nappes phréatiques ;
- Teneur en eau des échantillons enregistrée par le géologue du site⁵.

3.3.10 Géophysique de fond

Les forages ont été enregistrés à l'aide de techniques géophysiques filaires immédiatement après le forage, à la fois à travers la tige de forage et à travers le trou ouvert après que les tiges de forage aient été retirées⁶.

3.4 Surveillance du niveau des eaux souterraines

3.4.1 Méthodes de surveillance des eaux souterraines

Le niveau des eaux souterraines dans les piézomètres à colonne est mesuré manuellement à l'aide d'un compteur électrique à contact (dip meter). Des capteurs de pression ont également été installés dans certains piézomètres et fournissent des données continues sur le niveau de l'eau.⁷

⁵Les échantillons ont été classés dans l'une des trois catégories d'humidité suivantes : « sec », « humide » ou « mouillé ». La profondeur en dessous de laquelle les échantillons sont systématiquement déclarés « humides » peut être une indication de la nappe phréatique.

⁶Les techniques géophysiques utilisées avant 2012 étaient les suivantes : gyroscope, susceptibilité magnétique, gamma, densité et résistivité. Les études géophysiques réalisées après 2012 ont été entreprises par un autre contractant et comprenaient : un gyroscope, un gamma, un pied à coulisse, un téléviseur acoustique (« TVA »), un téléviseur optique (« TVO »), une résonance magnétique de forage (« RMF »), la température du fluide, la conductivité du fluide, l'impulseur d'écoulement du fluide, la saturation en oxygène et le pH. L'ensemble des outils de prospection n'a pas été utilisé dans tous les trous, mais en fonction des objectifs et des conditions spécifiques du trou.

Les diagraphies de résistivité ont été utilisées avant 2012 pour donner une indication du niveau des eaux souterraines dans les forages qui se sont effondrés avant qu'un piézomètre ne puisse être installé. Il y a une réduction marquée de la résistivité lorsque l'outil de diagraphie passe sous la nappe phréatique et les diagraphies ont été vérifiées comme une méthode précise pour déterminer le niveau d'eau dans le trou au moment de l'étude.

⁷La compensation barométrique de la hauteur de pression de l'eau observée a été entreprise pour tous les transducteurs de pression de diagraphie afin de corriger les fluctuations de la pression atmosphérique qui se superposent aux données de pression de l'eau dans les colonnes ouvertes. Les données barométriques ont été enregistrées dans des baro-transducteurs situés dans des forages sélectionnés ainsi que dans des stations météorologiques automatisées à Ouéléba et au Pic de Fon. Des baro-transducteurs ont été installés dans les forages DHC12 et GT02 sur Ouéléba, DHC10 le long de la route de Siatouro et dans le bureau du site depuis 2021, en plus des relevés barométriques de la station météorologique AWS-Ouéléba.

Dans les installations PFV, les signaux sont lus manuellement à l'aide d'une unité de lecture numérique et les valeurs sont converties en niveau d'eau. Des enregistreurs de données PFV ont été installés au cours du second semestre 2011, mais un grand nombre de défaillances ont été observées en raison d'une protection inadéquate contre les surtensions. De nouveaux enregistreurs de données multicanaux ont été installés pendant et depuis le programme 2021/2022 et les sites les plus exposés au risque de foudre sont équipés d'une protection contre les surtensions et de paratonnerres. Ces enregistreurs de données sont téléchargés manuellement à une fréquence approximativement mensuelle. L'annexe A contient les détails de toutes les installations de surveillance des eaux souterraines :

- Tableau A1: PFV installés et déclarés par SWS (2012)
- Tableau A2: Piézomètres à colonne installés à Ouéléba et déclarés par SWS (2012)
- Tableau A3: Piézomètres à colonne installés au Pic de Fon et déclarés par SWS (2012)
- Tableau A4: PFV installés en 2021/2022 par SRK
- Tableau A4: Piézomètres à colonne installés en 2021/2022 par SRK

3.4.2 Période de surveillance des eaux souterraines

La grande majorité des données de surveillance des eaux souterraines ont été collectées de fin 2007 à 2012, puis de 2021 à 2022 (Ouéléba uniquement). Certains des piézomètres d'origine ont des enregistrements de surveillance remontant à fin 2003/début 2004⁸.

Figure 3-6, Figure 3-7 et Figure 3-8 montrent la longueur des enregistrements disponibles pour chacun des piézomètres à colonne et PFV du réseau de surveillance des eaux souterraines de l'Ouéléba. Les données ont été rééchantillonnées à une fréquence mensuelle, et les lieux comportant moins de 10 enregistrements ont été omis. Figure 3-9 montre la période de surveillance active du niveau d'eau au Pic de Fon.

⁸Les PDF163 et PDF081 ont été contrôlés toutes les deux semaines jusqu'à la fin de l'année 2005, date à laquelle la fréquence de contrôle a été ramenée à une fois par mois. Le PDF036, qui était également contrôlé tous les quinze jours, a cessé d'être inclus dans le programme de contrôle à partir de la mi-2005 en raison de l'assèchement fréquent du trou de forage.



Figure 3-6: Chronologie de la surveillance active du niveau de la nappe phréatique à Ouéléba – Piézomètres à colonne (Tracé 1 sur 2)



Figure 3-7: Chronologie de la surveillance active du niveau de la nappe phréatique à Ouéléba – Piézomètres à colonne (Tracé 2 sur 2)

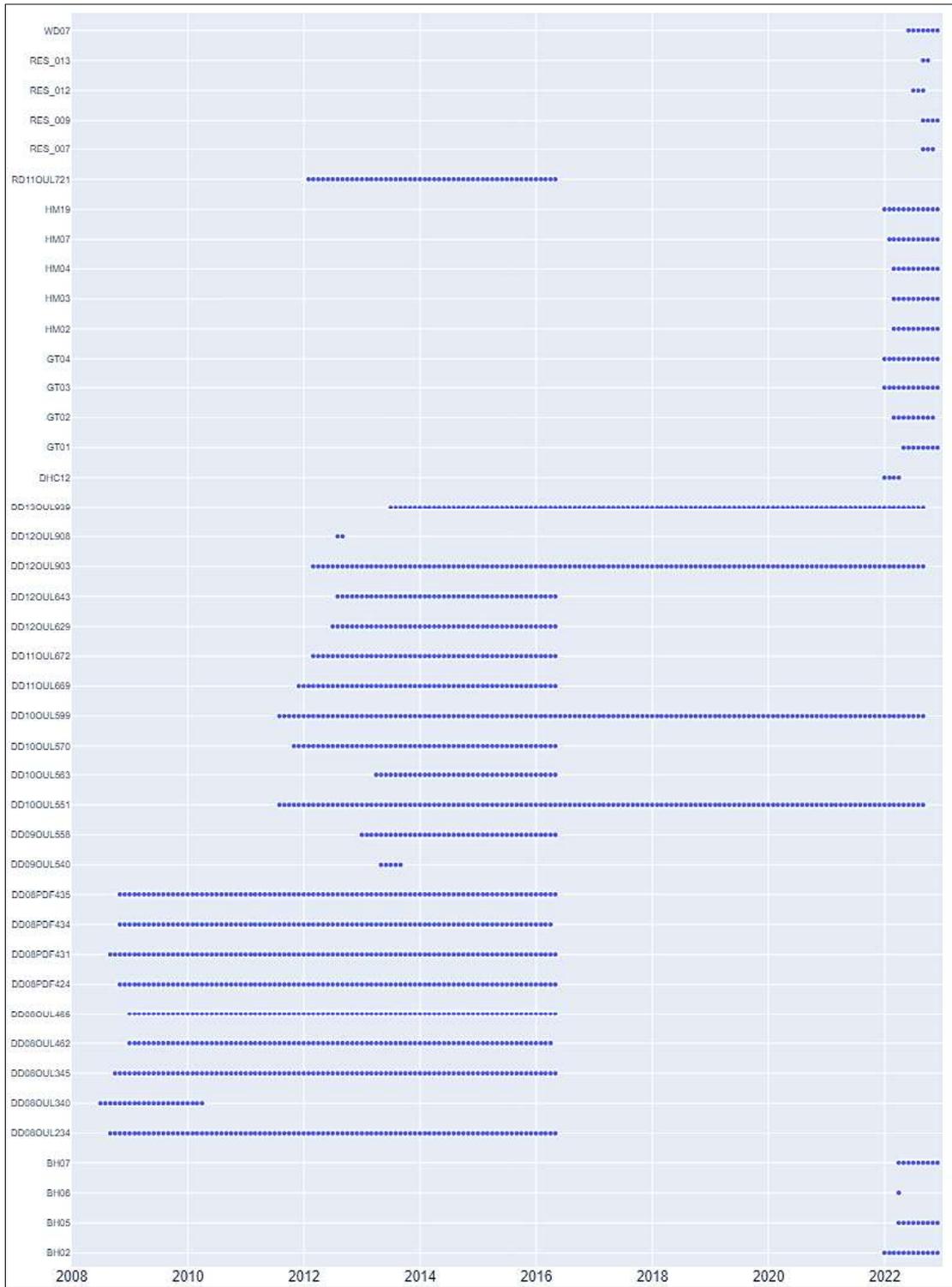


Figure 3-8: Calendrier de la surveillance active du niveau des eaux souterraines à Ouéléba – PFV



Figure 3-9: Chronologie de la surveillance active du niveau des eaux souterraines au Pic de Fon (d'après SWS, 2012)

3.4.3 Gestion des données sur le niveau des eaux souterraines

Au cours de l'EEP, toutes les données recueillies jusqu'en mai 2011 ont été rassemblées et évaluées afin d'identifier les résultats anormaux et de produire des ensembles de données vérifiés. Les données manuelles et PFV ont été exportées directement à partir de la base de données MS Access qui fournit la référence du forage, la date, l'heure et le niveau d'eau en mètres au-dessus du niveau de la mer (masl). De mi-2011 à fin 2012, toutes les nouvelles données ont été intégrées directement dans la base de données Access de Simfer Hydrogeology.

En 2021 et 2022, toutes les nouvelles données ont été importées dans une version modifiée de la base de données Simfer Access et tenues à jour par SRK. Toutes les données relatives au contrôle manuel, au contrôle automatisé et au contrôle par PFV font l'objet d'un contrôle de qualité au cours du processus de saisie des données.

3.4.4 Qualité du jeu de données sur le niveau des eaux souterraines

Figure 3-6 à Figure 3-9 montrent que la surveillance bimensuelle programmée a généralement été effectuée conformément au plan de surveillance, à quelques exceptions près⁹. La collecte des données des PFV n'a pas été cohérente et aucune donnée PFV n'a été collectée entre octobre 2010 et juin 2011 en raison de problèmes avec le boîtier de lecture manuelle.¹⁰

Les sources potentielles d'erreur de données provenant des enregistrements historiques des transducteurs de pression sont les suivantes :

1. les procédures ne sont pas toujours respectées : les mesures d'immersion du niveau d'eau n'ont pas toujours été effectuées lors de l'installation ou du téléchargement du transducteur. Cela signifie que les données du transducteur ne peuvent pas être compensées avec précision par rapport au niveau de l'eau. Il arrive que le niveau d'eau le plus proche (dans le temps) pour la compensation se situe à plus de deux mois du début de l'exploitation forestière.
2. Les barotransducteurs n'ont pas toujours été téléchargés, ou remplacés en cas de vol, ce qui empêche une compensation précise des données. L'absence de données barométriques n'invalide pas complètement les enregistrements des transducteurs, mais réduit la possibilité d'évaluer les plus petites fluctuations du niveau de l'eau.
3. Des erreurs d'installation se sont également produites : les PDF397 et PDF482 ont été installés au-dessus de la nappe phréatique et n'ont donc pas enregistré de niveau d'eau.

Afin d'évaluer la qualité des données, toutes les données de surveillance ont été représentées sous la forme d'une série chronologique continue. Lorsque les données du transducteur ou du PFV étaient disponibles, elles ont été tracées avec toutes les mesures manuelles antérieures ou postérieures. Avant 2012, chaque jeu de données de forage a été examiné, les données erronées ont été identifiées, un rang de qualité a été attribué (mauvais, moyen ou bon) et toutes les caractéristiques notables ont été enregistrées.

⁹Certains forages présentent également de longues lacunes dans leurs enregistrements de données. Les raisons de ces lacunes ne sont pas toujours claires, mais elles sont probablement liées à des problèmes d'accès ou à des dommages causés à l'équipement de surveillance.

¹⁰Il y a également une série de sauts dans les enregistrements du VWP qui peuvent être associés à des erreurs de mesure.

Les données erronées ont été enregistrées et supprimées de manière à obtenir un ensemble de données « propre » ainsi qu'un niveau d'eau minimum, maximum et moyen (mRL). Après 2021, un processus CQA similaire a été mis en œuvre pour identifier les données erronées provenant des PFV et piézomètres à colonne, des drapeaux CQA ayant été attribués aux enregistrements en question dans la base de données Access. L'examen a montré qu'environ 30 % des dossiers de contrôle manuel contenaient des données erronées.¹¹

3.5 Essais hydrogéologiques

Des données sur les propriétés hydrauliques sont actuellement disponibles grâce à des essais en laboratoire sur les carottes (porosité et perméabilité), des essais au packer, des analyses de la distribution de la taille des particules (RGMP), des essais de pompage de courte durée (dans les trous de forage de la zone de stockage des stériles), des études géophysiques RMF et des essais à charge variable, dont les résultats sont détaillés ci-dessous.

3.5.1 Porosité

Rio Tinto a effectué des tests sur un grand nombre d'échantillons afin de déterminer la densité sèche en vrac et la porosité du minerai et des stériles. Plus de 650 échantillons ont été testés à l'appui de l'étude préliminaire de faisabilité de 2008. Les résultats ont été jugés cohérents pour les matériaux de base, les variations de la densité apparente mesurée reflétant généralement les variations de la porosité¹².

3.5.2 Perméabilité de la carotte

Des carottes ont été prélevées au cours de l'étude préliminaire de faisabilité de 2008 et envoyées pour analyse en laboratoire. Des analyses en laboratoire ont également été effectuées pour déterminer la porosité et la perméabilité des carottes friables. Les résultats de perméabilité de la carotte pour le minerai friable sont actuellement disponibles pour deux forages (DD07PDF262 et DD07PDF264), tous deux situés au Pic de Fon.

D'autres échantillons ont été prélevés pour être analysés en laboratoire en 2011. Cette campagne d'échantillonnage s'est concentrée sur les phyllites et comprenait un grand nombre d'échantillons PHS, PHV et PHW. La perméabilité de 22 échantillons des géodomains PHC, PHW, PHV, PHS, QTW et IRC a été testée perpendiculairement et parallèlement à la foliation primaire ou à la schistosité ; cinq échantillons ont été testés à la fois perpendiculairement et parallèlement à la foliation primaire.

¹¹Ce phénomène a été identifié par des pics de niveau d'eau entre deux ou plusieurs niveaux cohérents ou par des variations très importantes du niveau d'eau (généralement plus de 20 m). Presque tous les enregistrements manuels contenaient des « escaliers » dans les données (c'est-à-dire lorsque des données cohérentes sont suivies d'une étape vers le haut ou vers le bas pour continuer avec d'autres données cohérentes à un niveau différent). Ces « escaliers » ne pouvaient pas être facilement expliqués et ne pouvaient donc pas être considérés comme fallacieuses.

¹²les procédures ont posé des problèmes lors de la mesure de matériaux friables ou pulvérulents, et des problèmes ont été rencontrés pour maintenir la saturation pendant les mesures

3.5.3 Relation entre la profondeur de la carotte et la perméabilité

La perméabilité centrale des différents matériaux géologiques peut être affectée par le degré d'altération (qui peut être considéré comme une fonction de la profondeur sous le niveau du sol). La profondeur réelle des carottes a été calculée en fonction de l'azimut et de l'inclinaison du trou de forage dans lequel l'échantillon a été prélevé, de la distance de l'échantillon par rapport au collet du trou de forage et de la topographie avant l'exploitation. La perméabilité de la carotte a ensuite été tracée en fonction de la profondeur de l'échantillon.¹³

3.5.4 Essais à charge variable

Essais fin 2008

Des essais hydrauliques ont été réalisés dans plusieurs forages de Ouéléba à la fin de l'année 2008 afin de fournir des estimations de la perméabilité. Les essais à charge variable ont permis d'obtenir des estimations préliminaires de la perméabilité¹⁴.

Pour chaque piézomètre testé, 500 à 600 litres d'eau ont été pompés à l'intérieur du piézomètre à partir d'un réservoir et la réponse du niveau d'eau a été enregistrée par un transducteur de pression. Seuls les piézomètres de Ouéléba ont été testés en raison des restrictions d'accès au Pic de Fon au moment des tests.

Travaux d'essai 2011/2012

D'autres essais à charge variable ont été effectués sur un certain nombre de piézomètres sur Ouéléba en 2011 et 2012. Les estimations de la conductivité hydraulique ont été réalisées à l'aide de la méthode Hvorslev (1951).¹⁵

¹³La densité *in situ* des échantillons sera influencée par la pression lithostatique et hydrostatique à cet endroit. Le processus de prélèvement de l'échantillon entraîne une réduction de la pression lithostatique et hydrostatique qui peut se traduire par une dilatation de l'échantillon et une augmentation subséquente de sa perméabilité. Pour ce faire, une série d'échantillons a été soumise à une pression de confinement variable dans des cellules triaxiales afin de déterminer la réduction de la perméabilité qui en résulte.

¹⁴La forme la plus élémentaire d'essai hydraulique *in situ* est un « essai de limaçon », dans lequel un objet de volume connu (c'est-à-dire le « limaçon ») est rapidement abaissé sous le niveau de la nappe phréatique dans un piézomètre (ou alternativement rapidement retiré de sous le niveau de la nappe phréatique). La réponse du niveau d'eau qui en résulte est une « chute » ou une « montée » respectivement, et le taux de récupération est utilisé pour calculer la perméabilité moyenne de la formation saturée.

Des tests de chute et de montée ont également été testés dans des forages qui interceptaient des dépôts de canga (au cours d'études antérieures à 2012) ; cependant, le déplacement de l'eau souterraine en réponse au bouchon était faible et la récupération trop rapide. Il a été constaté que le diamètre du limaçon était trop petit pour induire une réponse suffisante du niveau d'eau ; la taille de la limace était limitée par le diamètre du tube en PVC (2,5 pouces), alors que la réponse du niveau d'eau se produit sur tout le diamètre du trou de forage (4 à 6 pouces). La solution a consisté à effectuer des essais à charge variable par l'ajout direct d'un volume d'eau plus important dans les piézomètres.

¹⁵Il est à noter que l'analyse de Hvorslev s'applique à des conditions saturées. Compte tenu de la nature de l'essai et de l'installation des piézomètres, les essais sur le terrain sont considérés comme ayant une composante non saturée et une composante saturée. Par conséquent, l'analyse des essais à charge variable est prise en compte pour dériver une perméabilité apparente.

Essais hydrauliques de la zone du centre de stockage des stériles de Ouéléba

Des essais hydrauliques ont été réalisés sur toutes les colonnes des installations de stockage de stériles dès l'achèvement du trou (avant 2012) afin d'évaluer les propriétés hydrauliques des roches dans l'aquifère de socle. Ces essais étaient soit des essais standard de pompage et de récupération à débit constant (à l'aide d'une pompe Grundfos MP1) soit des essais de pompage de boues à charge variable croissante à l'aide d'une écope, ou les deux. La méthode Cooper et Jacob (1946) d'interprétation des essais de pompage a été utilisée pour analyser les données des essais.¹⁶

3.5.5 Essais au packer

Au total, 22 essais au packer ont été réalisés début 2012 sur 10 forages à des intervalles variables. Les essais au packer ont été réalisés en même temps que la progression du forage¹⁷.

L'analyse des données de l'essai au packer comprenait la représentation graphique de l'excès de hauteur (en mètres) en fonction du débit (en litres par minute). Ce tracé a ensuite été utilisé pour définir le type de réponse de l'essai au packer afin de mieux informer l'interprétation des résultats de l'essai.

3.5.6 Répartition granulométrique

Des données sur la répartition granulométrique (RGMP) sont disponibles à partir de forages pilotes réalisés entre 2012 et 2014. Les analyses originales (rapportées dans l'étude DE ; SWS, 2012) ont été réanalysées pour fournir des estimations supplémentaires de la conductivité hydraulique (K).

Les données sont disponibles pour 432 échantillons prélevés dans 72 trous de la zone d'étude et comprennent une combinaison d'échantillons désagrégés et de carottes concassées. Les données de RGMP ont été fusionnées avec la base de données Access existante de Simandou afin d'attribuer un géodomaine et des coordonnées de collier à chaque échantillon. Une entrée dans la base de données était disponible pour 193 des 432 échantillons, aucune autre information n'étant disponible pour les 239 échantillons restants¹⁸.

¹⁶Des réactions complexes des puits ont été observées, avec plusieurs cas de rebondissement du niveau d'eau au fur et à mesure du développement du puits. Dans d'autres cas, la présence d'un gâteau de filtration considérable, ainsi que le faible rendement du puits et le stockage ont constitué un environnement difficile pour la réalisation d'essais de pompage à débit constant fiables. Dans ces cas, les données de récupération des puits ont été analysées à la place.

¹⁷Cependant, cette méthode s'est avérée peu pratique en raison de l'effondrement partiel du trou de forage lors de la récupération des tiges de forage et pendant le rinçage du trou de forage en préparation de l'essai de l'obturateur. Cette situation a eu des répercussions négatives sur la progression de la campagne de forage géotechnique.

¹⁸Les données RGMP ont été utilisées pour calculer la conductivité hydraulique (K) à l'aide de quatorze méthodes différentes, les formules étant extraites de l'outil open-source HydroGeoSieve (Devlin, 2016). Les méthodes de calcul de K sont toutes basées sur une version modifiée de l'équation de Vukovic et Soro (1992). Les valeurs introduites pour N, ϕ et de varient ensuite en fonction de la méthode utilisée, comme indiqué dans Devlin (2016). Chaque méthode possède des critères de validité spécifiques basés sur des tailles de grains appropriées.

3.6 Échantillonnage des eaux souterraines

Les campagnes de caractérisation de référence de la chimie des eaux souterraines et l'analyse des données sont décrites en détail dans le rapport Baseline Water Chemistry (SRK, 2023a). Des échantillons d'eau souterraine ont été prélevés dans 27 piézomètres à travers les corps minéralisés d'Ouéléba et du Pic de Fon et les zones basses du côté est de la ligne de crête entre mars 2007 et décembre 2009. Un total de 36 puits d'approvisionnement en eau dans 26 villages environnants entre novembre 2006 et septembre 2009, puis de nouveau en janvier-mars 2022.

L'échantillonnage historique de référence des eaux de surface (novembre 2006 à janvier 2012) a inclus plus de 80 sites de cours d'eau et 15 sources à travers Ouéléba et le Pic de Fon. Une campagne d'échantillonnage en saison sèche, axée sur Ouéléba et les villages voisins, a permis de collecter des échantillons de la qualité des eaux de surface sur 37 sites de cours d'eau et sept sources entre janvier et mars 2022. Aucune donnée n'a été recueillie dans les piézomètres du corps minéralisé au cours de la campagne d'échantillonnage de la saison sèche 2022.

L'un des objectifs de la campagne d'échantillonnage des eaux de surface de la saison sèche 2022 était d'étayer la compréhension conceptuelle de l'hydrogéologie du gisement en comparant la qualité de l'eau des sources et des cours d'eau avec celle mesurée dans les piézomètres et les puits de pompage du gisement. Les données relatives à la qualité de l'eau des puits de pompage du gisement n'étaient pas disponibles au moment de la rédaction du présent document, c'est pourquoi nous nous sommes appuyés sur des échantillons historiques prélevés au moyen de piézomètres pour cette étude.

3.7 Échantillonnage et analyse des isotopes stables

Un sous-ensemble d'échantillons provenant du programme de surveillance de la qualité de l'eau pendant la saison sèche 2022 a été analysé pour les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène. L'objectif de la surveillance des isotopes stables était de déterminer si les signatures des isotopes stables pouvaient différencier le débit de base de l'aquifère du corps minéralisé des eaux souterraines provenant d'autres sources. Les cours d'eau alimentés par l'aquifère du gisement sont les plus sensibles aux impacts de l'assèchement et nécessiteront une augmentation du débit pendant les opérations.

La méthodologie de collecte des échantillons et l'analyse des résultats figurent à l'H.

3.8 Enquêtes sur le débit des sources, l'accrétion du débit et la qualité de l'eau le long des cours d'eau

Enquêtes sur le débit de référence du site minier

L'écoulement des eaux souterraines peut être classé dans deux grandes catégories : l'écoulement des sources (lorsque la surface des eaux souterraines intercepte la topographie et donne lieu à des écoulements de surface soutenus) ou l'écoulement de base vers les cours d'eau (lorsque les gradients ascendants des eaux souterraines interceptent les cours d'eau et les masses d'eau de surface). Un certain nombre d'études sur le débit des sources, l'accrétion du débit et la variation de la qualité de l'eau le long des cours d'eau ont été entreprises pour :

- Identifier les principales zones d'écoulement des eaux souterraines à Ouéléba et au Pic de Fon aux fins de la planification minière et de l'évaluation et de l'atténuation des impacts ;
- Comprendre la contribution relative du débit de référence provenant de Ouéléba et du Pic de Fon au soutien des débits des cours d'eau de saison sèche dans le réseau régional des eaux de surface ;
- Aider au développement de modèles conceptuels d'écoulement des eaux souterraines et fournir des données pour le modèle numérique d'écoulement des eaux souterraines de Ouéléba.

Les enquêtes suivantes ont été réalisées à ce jour :

- Étude des sources de la saison humide en août-octobre 2006 (Ouéléba et Pic de Fon), le débit des sources, la température, la conductivité électrique et le pH ont été mesurés ;
- Enquête sur l'accroissement du débit en saison humide en mai-juillet 2007 (Ouéléba et Pic de Fon) ;
- Enquêtes sur les sources et d'accrétion de débit en saison sèche en janvier-février 2008 (Ouéléba et Pic de Fon) ;
- Enquête sur l'accrétion du débit en saison sèche en janvier-février 2009 (Ouéléba et Pic de Fon) ;
- Enquête sur l'accrétion du débit en saison sèche en janvier-février 2012 (bassins versants non étudiés auparavant à l'extrémité nord de l'Ouéleba et à l'extrémité sud du Pic de Fon) ; et
- Enquête sur l'accrétion du débit en saison sèche en janvier-février 2022 (Ouéléba).

Toutes les études ont consisté à mesurer les débits, la température de l'eau, la conductivité électrique (EC) et le pH. Les études de 2009 et 2022 comprenaient un échantillonnage pour l'analyse des métaux et des isotopes afin de faciliter l'interprétation de la source d'écoulement. La qualité de l'eau est abordée dans le rapport d'enquête de référence sur la qualité de l'eau (SRK, 2022c).

Le nombre de sources identifiées au cours de la saison sèche 2008 est nettement supérieur à celui de la saison humide 2006 et il n'a pas été possible de confirmer que les mesures de débit de 2008 ont été effectuées au même endroit que les mesures de 2006. Cela a empêché une comparaison significative des débits entre les deux enquêtes.

Analyse du débit régional de référence

Lors de l'étude de 2009 sur l'accrétion du débit, une série de mesures du débit a été effectuée aux principaux confluent du réseau de cours d'eau, à une certaine distance de Ouéléba et du Pic de Fon. Cela a été fait pour déduire la contribution au débit de référence des principales rivières provenant de la ligne de crête et la distance en aval sur laquelle des impacts mesurables peuvent s'étendre. Contexte géologique

4 GEOLOGIE REGIONALE

La chaîne du Simandou comprend une série semi-continue de collines orientées nord-sud de formation de fer rubanée (FFR), longue de 110 km, à l'extrémité sud de laquelle se trouvent les gisements d'oxyde de fer de Ouéléba et du Pic de Fon (Cope et al, 2008). Les gisements font partie d'une ceinture de « roches vertes » supracrustales dans la partie méridionale du craton ouest-africain.

La chaîne du Simandou se compose d'unités d'itabirite supérieure et inférieure recouvrant de manière conforme des phyllites et des quartzites interlités basaux, eux-mêmes recouvrant en discordance un socle de granite-gneiss. Les roches ont subi une déformation intense, une forte altération et un enrichissement sélectif du FFR.

Le protore du FFR a probablement été déposé dans un environnement marin peu profond au sein d'un bassin de rift. La déformation ultérieure (plissement isoclinal serré, chevauchement et cisaillement), le métamorphisme et les processus post-métamorphiques ont enrichi le FFR en itabirite et, localement, en hématite massive de qualité minérale, et ont partiellement obscurci les relations stratigraphiques d'origine.

Situé à l'extrémité sud de la chaîne du Simandou, le gisement Dabatini – Pic de Fon s'étend sur 7,5 km, mesure environ 0,5 km de large et comprend de l'itabirite fortement enrichie en hématite de qualité minérale. La chaîne se dresse comme une ligne de crête proéminente de 600 m à 800 m au-dessus de la plaine du socle et atteint une altitude de 1650 mRL. Situé au nord du gisement de Dabatini – Pic de Fon, Ouéléba forme une crête légèrement plus basse (altitude maximale de 1 330 mRL) dans laquelle la minéralisation est de nature plus goethitique.

4.1 Stratigraphie

Trois séries stratigraphiques principales ont été identifiées à l'intérieur et autour de la zone d'intérêt de Simandou :

- Série hématite (unité supérieure) : cette série représente peut-être un environnement de dépôt de FFR plus « propre » que les itabirites sous-jacentes. Les produits d'enrichissement courants de cette unité sont l'hématite de haute qualité et l'hématite siliceuse.
- Série Itabirite (unité inférieure) : représente peut-être une transition entre des environnements de dépôt riches en schiste à haute énergie et des environnements de dépôt FFR à basse énergie. Un produit d'enrichissement courant de cette unité est l'hématite goethitique (minerai brun).
- Série phylliteuse (unité basale) : phyllite ferrugineuse souvent intercalée avec de l'itabirite et des quartzites.

Les phyllites de Ouéléba et du Pic de Fon recouvrent en discordance les roches cristallines du socle.

Les gisements de Ouéléba et du Pic de Fon sont flanqués, à l'est et à l'ouest, d'importants dépôts de matériaux détritiques riches en fer (canga) transportés depuis la crête principale. Ces « cangas » forment des plateaux d'une épaisseur pouvant atteindre 40 m et se composent généralement de fragments de FFR durs et enrichis, cimentés par une matrice constituée de matériaux goethitiques ou argileux à grain fin.

Les cartes géologiques de base des gisements de Ouéléba et du Pic de Fon sont présentées respectivement sur les Figure 4-1 et Figure 4-2.

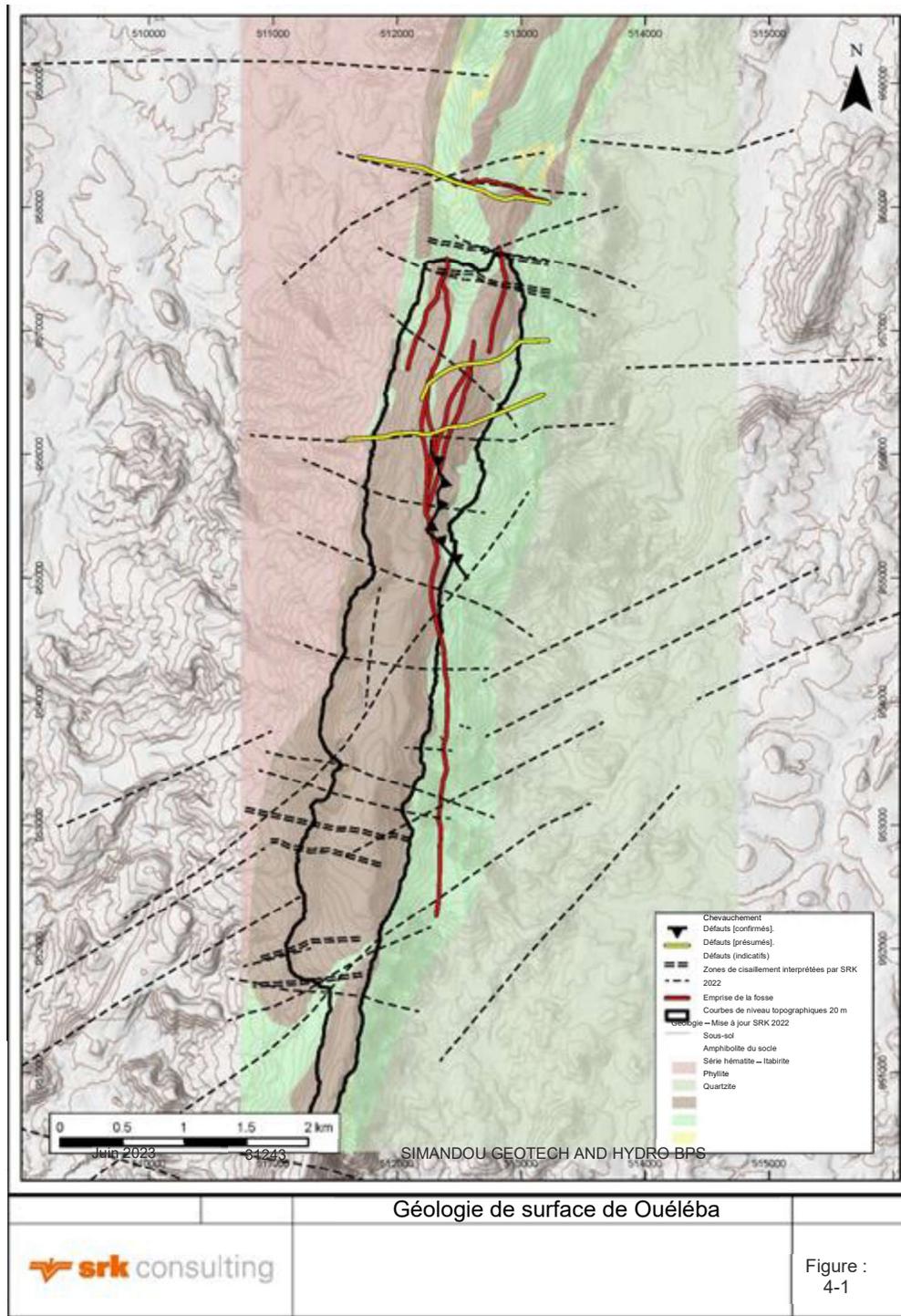


Figure 4-1: Géologie de surface de Ouéléba

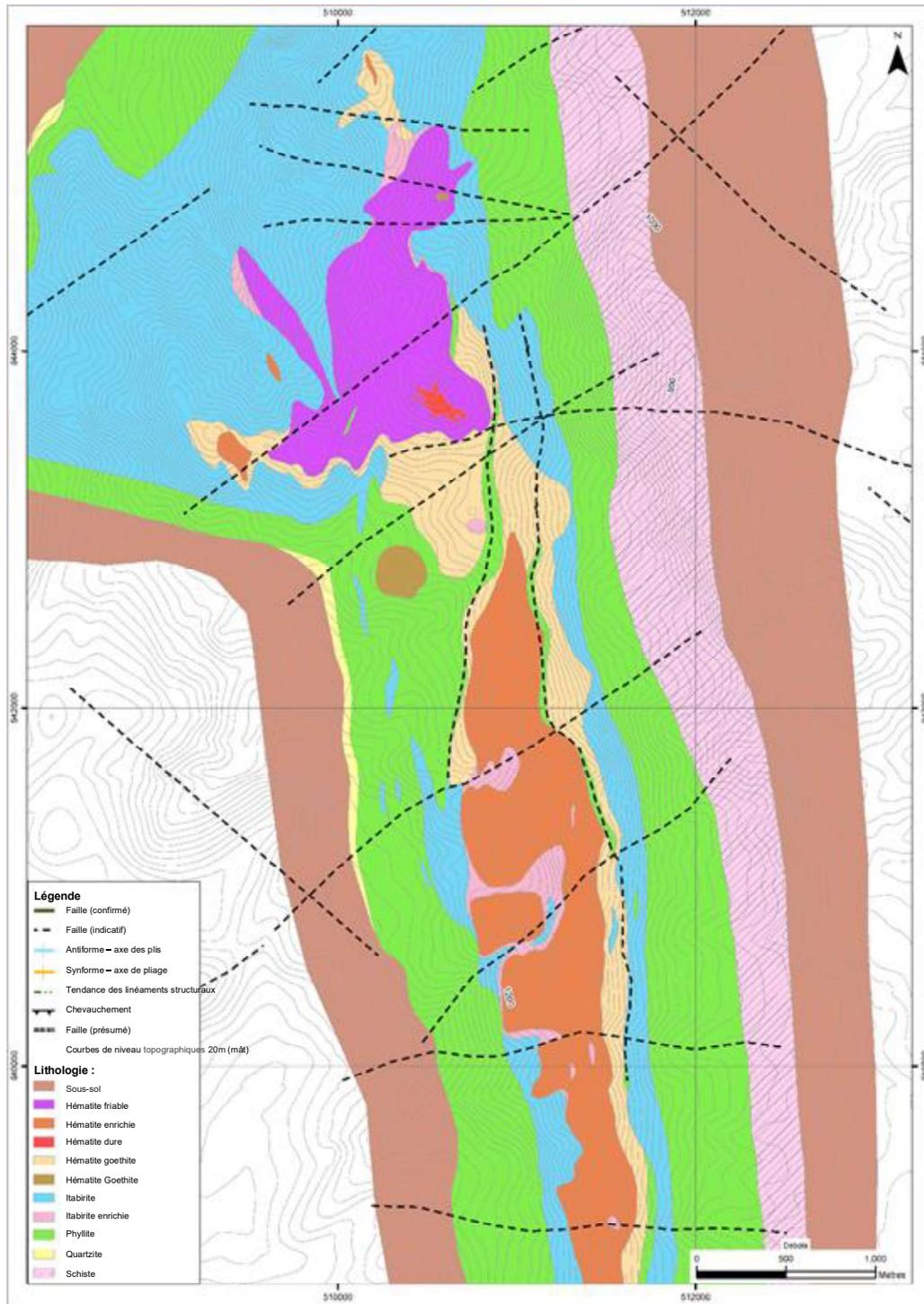


Figure 4-2: Géologie de surface du Pic de Fon (d'après SWS, 2012)

4.2 Classification géologique

La classification géologique diffère entre le modèle de bloc géologique et la cartographie géologique de surface du Projet Simandou. Le modèle des blocs géologiques utilise un système de classification qui regroupe les lithologies en « géodomains ». Les géodomains sont des classifications lithologiques, chacune identifiant la composition d'un type de matériau distinct. Les géodomains sont ensuite classés en fonction de leurs propriétés physiques/structurelles (par exemple friable, compact, etc.)

Le rapport 2022 BFS Addendum « Ouéléba Open Pit Slope Design Assessment » (SRK, 2022a) présente les définitions des différents géodomains utilisés dans les modèles de blocs géologiques pour les zones de ressources de Ouéléba et du Pic de Fon. La section 0 : Acronymes et Abréviations *comprend une description des géodomains pertinents auxquels il est fait référence dans le présent rapport.*

4.3 Modèle de bloc géologique

Le modèle de bloc géologique de Rio Tinto de 2012 pour Ouéléba a été révisé et mis à jour par Golder Associates en 2021 (Golder, 2021). Le modèle de bloc Pic de Fon reste inchangé depuis 2012. Un examen complet des modèles géologiques antérieurs et actuels est présenté dans SRK, 2022a.

Les travaux de modélisation géologique (Golder, 2021) ont principalement porté sur la définition des corps minéralisés et des différents types de minerais du gisement de Ouéléba. Il s'agissait notamment de remodeler les dépôts de flancs en actualisant l'interprétation des quartzites. Le modèle Golder présente l'interprétation la plus récente de la répartition des unités ferrifères dans la géométrie du gisement.

4.4 Géologie structurale

Il existe plusieurs caractéristiques géologiques structurales dans et autour de Ouéléba et du Pic de Fon qui sont considérées comme ayant une influence significative sur les propriétés hydrauliques des unités hydrogéologiques. Trois phases de déformation ont été reconnues dans l'ensemble de la chaîne.

4.4.1 Géologie structurale ; Ouéléba

La carte de surface détaillée de la géologie structurale de Ouéléba (SWS, 2012, Annexe B) montre de nombreuses caractéristiques structurales qui ont été incorporées dans le modèle conceptuel hydrogéologique. La dernière interprétation structurale (Bonson, 2021 ; voir la 3.2 pour le contexte) s'est concentrée sur la cartographie structurale des géodomains du socle, de l'itabirite, de la phyllite et du quartzite. L'interprétation a abouti à un modèle complexe avec des profils fortement contrastés du nord au sud à travers Ouéléba.

La caractéristique la plus évidente de la cartographie structurale récente est l'orientation régionale vers le nord (généralement entre 0° et 20°) de la majorité des structures géologiques, résultat de la phase primaire et dominante du plissement. La carte structurale de Ouéléba présente :

- Linéaments avec une tendance dominante vers le nord.
- Une tendance dominante vers le nord de la schistosité avec un pendage de 60° à 90°.
- Axes des plis orientés vers le nord.
- Une trace de chevauchement orientée vers le nord.

D'autres caractéristiques structurales résultant des phases secondaires et tertiaires de déformation ont été identifiées ; elles sont généralement perpendiculaires à la tendance nord dominante (c'est-à-dire qu'elles sont orientées entre 70° et 120°). Ces structures comprennent des failles et des zones de cisaillement orientées est-ouest.

Figure 4-3 (en haut) montre une vue du modèle géologique de Ouéléba et la Figure 4-3 (en bas) présente le modèle géologique avec l'itabirite enlevée afin de faciliter la visualisation des principales caractéristiques structurales. Au nord de Ouéléba, deux synformes majeurs d'hématite/itabirite sont séparés par une épine centrale de phyllite, également connue sous le nom de « cisaillement de phyllite ». L'épine dorsale centrale est interprétée comme représentant une antiforme fortement cisailée qui a évolué en une structure de déformation de type « fleur », contenant des membres pliés de l'antiforme avec des contre-courants subsidiaires (Figure 4-4, haut).

Ces contre-poussées divergent d'une faille centrale à pendage est qui court le long de l'épine dorsale de l'antiforme phylliteuse. Au sud, le minerai d'hématite / itabirite occupe un synforme unique et large qui émane du côté nord-ouest de l'épine dorsale et est étroitement imbriqué avec la phyllite dans une série de plis interprétés orientés nord-est-sud-ouest.

Le long de la marge occidentale de Ouéléba, les roches du socle sont juxtaposées aux phyllites et recoupent localement la stratigraphie. Il pourrait s'agir d'une structure de faille importante, bien que la largeur et la nature de ce contact ne soient pas connues.

Une unité de quartzite est interprétée par Bonson le long de la marge orientale de Ouéléba (voir la Figure 4-3, en haut et la Figure 4-4, en bas). Cette unité comprend toutes les sous-classifications de matériaux et les variantes de quartzite compact (QTC) et de quartzite faible (QTW). Le domaine du quartzite comprend donc une simple couche riche en quartzite qui reproduit la géométrie de la foliation et l'orientation plus large des limbes du pli phylliteux. L'unité est modélisée comme une couche continue, plongeant parallèlement à la phyllite sur l'ensemble du flanc oriental du gisement de Ouéléba et dont l'épaisseur varie typiquement entre 40 et 100 mètres.

Sur le flanc ouest, le domaine quartzitique est interprété comme un élément discontinu dans la section nord-ouest de Ouéléba où la continuité de l'orientation est restreinte. Cette caractéristique est provisoirement interprétée comme représentant une antiforme isoclinale plongeant vers le sud-ouest.

Étant donnée la nature étroitement plissée de la succession de Ouéléba, une partie de l'interdigitation lithologique apparente dans le domaine du quartzite peut être le résultat d'un pliage à forte contrainte des contacts. La présence de plis isoclinaux serrés observés dans les carottes de forage en est la preuve. Dans l'ensemble, les observations confirment l'interprétation du quartzite du flanc ouest comme une antiforme isoclinale discontinue, certaines zones de quartzite représentant des noyaux de plis.

La modélisation de failles de type cassant est supposée recouper le gisement. Toutefois, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour fournir une interprétation plus définitive.

4.4.1 Géologie structurale ; Pic de Fon

Des structures de cisaillement de deuxième ordre, en échelon, orientées NE-SW, découpent la cible en zones minéralisées septentrionales, centrales et méridionales sur le Pic de Fon. Le pliage est serré-isoclinal, asymétrique et modérément à fortement incliné vers l'ouest avec une vergence vers l'est. En général, des déformations progressivement plus élevées et des styles de plis plus serrés sont observés depuis Dabatini dans la zone nord jusqu'au pic 1307 dans le sud, en passant par les zones centrale et méridionale.

On a identifié des plissements en coude tardifs (principalement dans les séries d'hématite et d'itabirite) et des failles cassantes est-ouest.

Les coupes transversales du modèle actuel du bloc du Pic de Fon sont présentées dans la Figure 4-5.

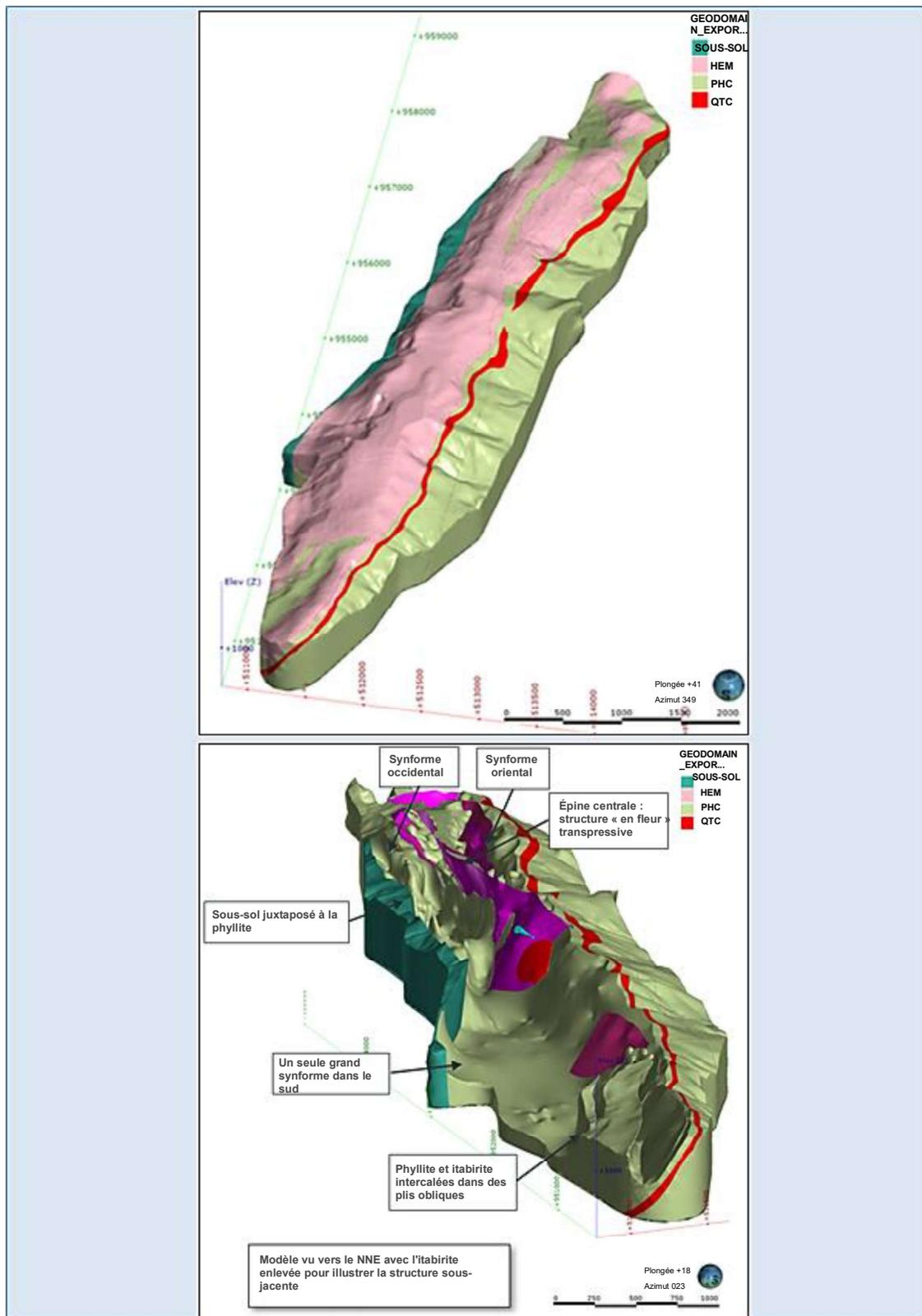


Figure 4-3: Modèle géologique de Ouéléba en regardant vers le NNW (en haut) et modèle géologique avec l'itabirite enlevée en regardant vers le NNE (en bas) ; tous deux tirés de Bonson (2021)

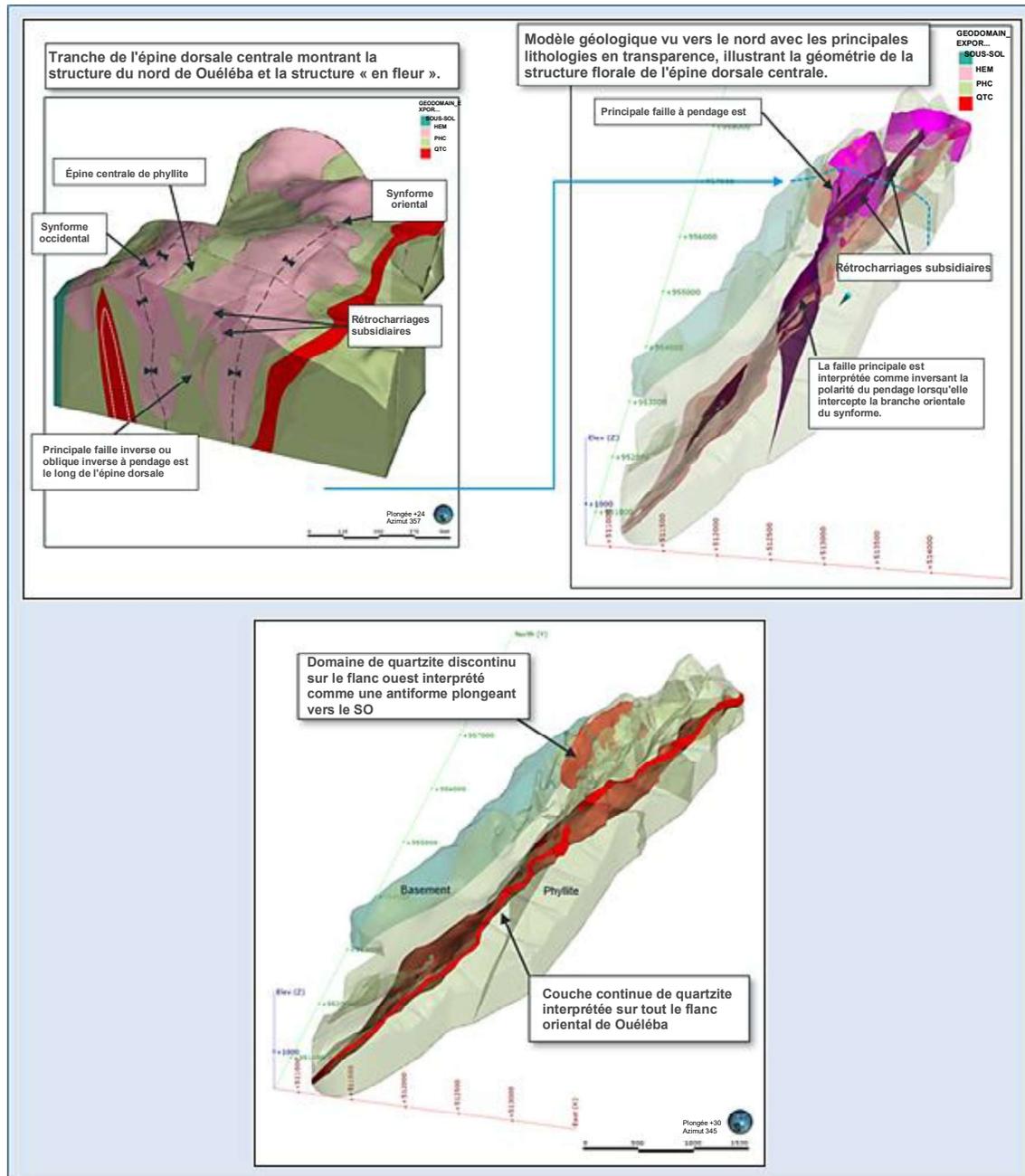


Figure 4-4: Structure de déformation en forme de fleur de l'épine centrale à Ouéléba (en haut) et vue en perspective mettant en évidence l'étendue des domaines de quartzite (en bas) ; tous deux tirés de Bonson (2021)

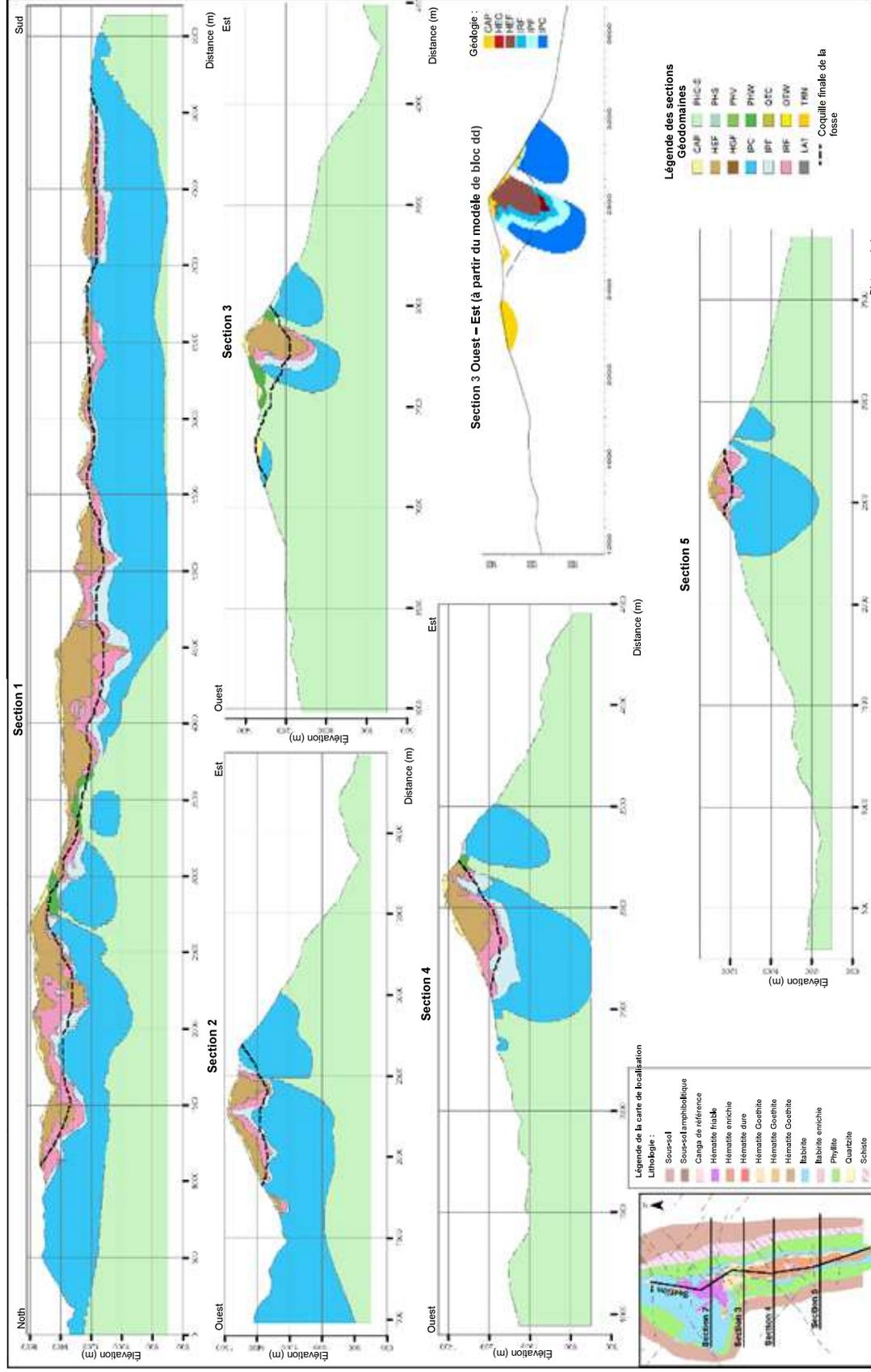


Figure 4-5: Coupe transversale du Pic de Fon (d'après SWS, 2012)

5 HYDROGEOLOGIE

5.1 Unités hydrostratigraphiques

5.1.1 Gisements de canga

Les dépôts de canga (CAN) (brèche ferrugineuse) comprennent des cônes colluviaux cimentés (COL) et d'anciennes ruptures de pente rocheuses. Ces gisements ont une épaisseur allant jusqu'à 40 m et se trouvent sur les flancs ouest et est de l'Ouéléba et du Pic de Fon. Des cônes de colluvions se sont formés sur les pentes à faible angle où s'ouvrent des ravins. A certains endroits, les colluvions se sont transformées en ferricrete. En général, les colluvions les plus jeunes tendent à recouvrir le canga ferrugineux le plus ancien. La cimentation du matériau du canga est analogue à la formation de la roche couverture, décrite ci-dessous (voir également SRK, 2022e).

La profondeur des eaux souterraines dans le canga est faible par rapport aux grandes zones non saturées observées dans le corps minéralisé, la profondeur à laquelle les eaux souterraines peuvent s'infiltrer et s'écouler étant limitée par l'épaisseur du canga. Des fissures de tension dans le canga rigide peuvent se produire aux changements d'inclinaison topographique et ces fissures peuvent former des voies d'alimentation préférentielles pour les eaux de ruissellement collectées. Ces processus de recharge sont un élément clé de l'évolution du relief, les précipitations déclenchant des glissements de terrain naturels en raison de la saturation du sol sous-jacent et des roches fragiles.

5.1.2 Roche couverture et zone de transition

La carapace altérée, appelée Roche couverture (CAP), et les matériaux de transition (TRN) constituent deux zones de minéralisation de surface qui recouvrent les formations riches en fer le long de la chaîne du Simandou. La minéralisation de la carapace est une caractéristique superficielle *in situ* qui s'étend sous forme de fractures et de vides remplis d'argile, de goéthite et de limonite dans la formation mère riche en fer située en dessous. La carapace s'étend généralement jusqu'à des profondeurs de 5 à 20 m sous la surface au Pic de Fon. Elle est beaucoup plus étendue à Ouéléba, avec des épaisseurs avoisinant les 150 m dans la zone centrale de Ouéléba.

La présence d'importantes épaisseurs de minéralisation de la carapace est à l'origine de la présence généralisée d'eaux perchées à Ouéléba, en particulier dans la zone centrale autour de la zone humide de Ouéléba et dans certaines parties de la zone méridionale.

5.1.3 Hématite

Le gisement d'hématite se présente sous différentes formes, chacune d'entre elles étant caractérisée par des propriétés hydrauliques différentes qui affecteront sa capacité à stocker et à transmettre les eaux souterraines :

- Minerai friable : porosité et perméabilité intergranulaire élevées à très élevées.
- Minerai « en biscuit » : semblable au minerai friable, avec une porosité modérée à élevée.
- Minerai dur : roche compétente présentant une porosité modérée et une faible perméabilité intergranulaire. Le mécanisme d'écoulement prédominant sera l'écoulement par fracture.

Dans la zone non saturée, l'infiltration dans le minerai friable « en biscuit » se produit par des voies d'écoulement discrètes suivant les plans de litage et les fractures perpendiculaires.

L'hématite friable « en biscuit » constitue l'essentiel du corps minéralisé. Bien que ces unités supportent des mécanismes d'écoulement intergranulaire, l'écoulement dans l'aquifère du corps minéralisé est susceptible d'être plus important dans les axes de plis des synformes (voir la 4.4.1).

La présence de zones de minerai dur à faible perméabilité peut entraîner une compartimentation du système d'écoulement des eaux souterraines, avec pour conséquence la présence de nappes phréatiques perchées locales. L'examen des diagraphies géologiques des trous de forage sur l'Ouéléba et le Pic de Fon montre un degré élevé de variation de la lithologie en fonction de la profondeur ; par exemple d'hématite friable intercalée avec des hématites dures et compétentes, des itabirites, des phyllites et des quartzites. La variabilité du degré d'altération est également observée pour chaque lithologie.

Les joints, fractures et failles transversales à petite échelle dans l'ensemble de la formation ferrifère sont susceptibles d'assurer une continuité hydraulique dans une certaine mesure (la perméabilité étant généralement plus élevée parallèlement au plan de foliation). Cependant, la présence d'eau perchée au cours du forage et de trous de forage secs adjacents à ceux où l'on a trouvé des eaux souterraines indique un certain degré de compartimentation.

5.1.4 Itabirite

Le contact entre l'itabirite fraîche et l'hématite est typiquement graduel. Dans certains cas, les itabirites sont extrêmement friables et présentent des propriétés hydrauliques similaires à celles des hématites. Contrairement aux itabirites friables, la perméabilité de l'itabirite compacte, plus fraîche, est soit extrêmement faible, soit contrôlée par l'écoulement des fractures. L'itabirite fournit des voies d'écoulement fracturées là où elle est fortement altérée, pliée ou faillée, et l'itabirite compacte fracturée dans les axes de plis des différents synformes peut représenter une proportion significative de l'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères des gisements de minerai. L'une des sources primaires (MIYA1-8) du bassin versant Boyboyba / MIYA1B dans le nord de Ouéléba émane par exemple d'itabirites compactes fracturées. La perméabilité de l'itabirite permet le drainage vers des masses peu profondes d'hématite sus-jacente et une voie de décharge vers l'hématite perméable plus profonde ou, comme c'est le cas dans l'éperon occidental, une voie de décharge directe.

L'itabirite semble former une barrière à l'écoulement des eaux souterraines dans la direction est-ouest à travers le nord du Pic de Fon. Des niveaux d'eau souterraine relativement élevés sont observés sous le Pic de Fon, ce qui contraste avec les niveaux d'eau souterraine beaucoup plus bas sous l'éperon occidental. Cela pourrait être dû à une barrière de faible perméabilité dans l'itabirite, ou à de très faibles perméabilités perpendiculaires à l'orientation de la structure.

Comme pour l'hématite frais, la foliation de ces matériaux a une influence sur la perméabilité, celle-ci étant généralement plus élevée parallèlement au plan de foliation.

5.1.5 Phyllite

La phyllite présente un très large éventail de caractéristiques. Quatre types de matériaux phyllites sont définis, principalement en fonction des variations de résistance géotechnique : phyllite fraîche et compacte (PHC), phyllite faible (PHW), phyllite très faible (PHV) et phyllite résistante au sol (PHS). La porosité augmente dans la phyllite avec le degré d'altération.

Les données limitées obtenues à ce jour par les essais au packer suggèrent que la PHC pourrait présenter une perméabilité de fracture significative à l'échelle locale. Les essais au packer indiquent que la PHC a une perméabilité plus élevée que les géodomains PHW et PHV, ce qui est contraire aux essais de laboratoire qui suggèrent que la PHC est d'une perméabilité beaucoup plus faible. Il faut s'y attendre car la PHC a une perméabilité matricielle extrêmement faible (propriété mesurée par des essais en laboratoire) et sa perméabilité in situ sera contrôlée par des zones de fracture (qui ont tendance à être ciblées lors des essais au packer).

Alors que les données des essais au packer indiquent une perméabilité de fracture significative à l'échelle locale, l'absence d'essais au packer à long terme ou d'essais de pompage signifie que la perméabilité à grande échelle de la PHC est moins claire. On s'attend à ce que la perméabilité à grande échelle de la PHC soit sensiblement inférieure à celle indiquée dans les essais au packer en raison de la nature discontinue des systèmes de fractures. Il peut cependant y avoir des exceptions où des défauts plus étendus et omniprésents créent une voie de décharge à travers la PHC, ce qui fera l'objet d'une discussion plus loin.

Les résultats des tests de perméabilité des carottes indiquent que la perméabilité de tous les types de phyllite est supérieure d'au moins un ordre de grandeur parallèlement au plan de foliation. On considère que la schistosité joue un rôle important dans la perméabilité et l'écoulement des eaux souterraines dans les phyllites à l'échelle régionale, le fort pendage et l'orientation nord servant à réduire la quantité d'écoulement latéral du gisement.

5.1.6 Quartzite

D'importantes unités de quartzite sont intercalées avec des phyllites. La Figure 5-1 illustre la nature intercalaire des dépôts de quartzite-phyllite. Les phyllites et les quartzites ne sont pas considérés comme des unités hydrostratigraphiques distinctes à l'échelle du gisement et pourraient tout aussi bien être décrits comme une seule unité phyllite-quartzite dont le comportement à l'échelle locale est variable et régi par la lithologie dominante, l'altération et le contrôle structurel.

Les résultats des essais de perméabilité des carottes, des essais d'obturateurs, des enregistrements des pertes de circulation lors des forages géotechniques et des gradients hydrauliques verticaux dérivés des installations PFV à plusieurs niveaux suggèrent que les quartzites peuvent être plus perméables que les phyllites et que les quartzites peuvent améliorer le drainage de l'ensemble phyllite-quartzite. Il est probable que les quartzites compacts présentent une perméabilité primaire similaire à celle des phyllites compétentes adjacents, et que les quartzites plus faibles et plus altérés présentent une perméabilité plus élevée en raison de leur nature friable, et donc poreuse, et/ou de la densité des fractures. Le domaine QTW fortement altéré peut perdre sa cohésion et se transformer en un sable meuble avec peu ou pas de cimentation, offrant ainsi une voie plus perméable pour l'écoulement des eaux souterraines.

Il est probable que le jointoiment et la fracturation associés aux plis et aux failles, plutôt que le développement de la foliation, sont les principales caractéristiques qui contrôlent la perméabilité secondaire dans les quartzites. Les quartzites compétents sont également plus sensibles à la fracturation fragile que les phyllites plus ductiles et peuvent donc présenter une plus grande tendance à l'écoulement des fractures.

Des forages supplémentaires réalisés en 2021/2022 à Ouéléba indiquent que les unités de quartzite sont plus épaisses et plus continues latéralement le long de la direction (N-S) que ce que l'on pensait auparavant. Les unités de quartzites du flanc oriental de l'Ouéléba correspondent davantage au modèle de Bonson (2021) et sont souvent associées à une qualité de roche médiocre et à une perméabilité inférée plus élevée.

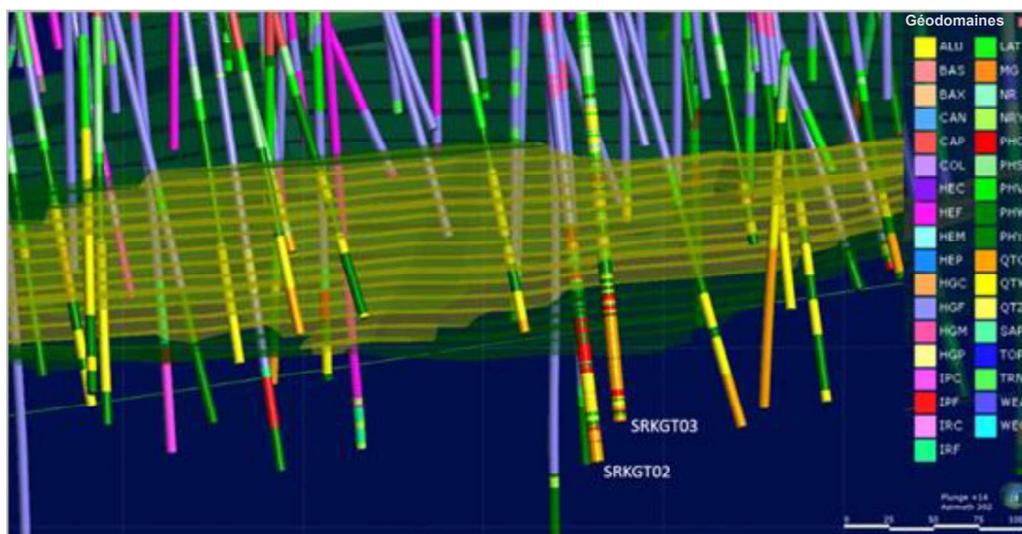


Figure 5-1: Vue de Ouéléba montrant la nature intercalée des géodomains PHY-QTZ (vert foncé et jaune vif respectivement)

5.1.7 Sous-sol

Les phyllites de Ouéléba et du Pic de Fon sont délimitées par des roches cristallines qui dominent la géologie régionale. Les aquifères de socle sont généralement caractérisés par des systèmes d'écoulement des eaux souterraines localisés et des écoulements régionaux limités. Les zones localisées de plus grande perméabilité sont généralement contrôlées par des structures qui entraînent le développement de zones de fractures plus profondes et un profil d'altération plus profond. Il est rare que ces structures forment d'importants systèmes régionaux d'écoulement des eaux souterraines (bien qu'il y ait des preuves d'un écoulement à plus grande échelle sur le côté est du bassin versant de Miya, près de Wateferedou, où les débits mesurés indiquent un bassin versant d'eaux souterraines considérablement plus grand que le bassin versant d'eaux de surface).

Les programmes de forage d'étude du site dans les zones prévues pour les installations de stockage des stériles ont fourni des données sur les propriétés hydrauliques des unités de sous-sol. La dispersion des valeurs de perméabilité pour les trous caractérisés par une lithologie de roche de socle cristalline est faible, avec des valeurs allant de $4,8 \times 10^{-8}$ à 5×10^{-9} m/s. Les rendements du pompage par émulsion pendant le développement du trou ont été très faibles, allant de 0,1 à 11,1 L/minute (SRK, 2022f), ce qui indique des conditions de perméabilité constamment faibles. Les faibles perméabilités rencontrées dans la formation suggèrent que tout écoulement significatif sera principalement contrôlé par des zones de fracture localisées et des horizons altérés supérieurs. Des eaux perchées éphémères peuvent être présentes dans ces zones.

Les données de PFV montrent un fort gradient ascendant à travers la PHS et le QTW. Cela suggère que la connectivité hydraulique entre ces unités et les roches du socle situées en aval est limitée. Ceci fournit à son tour une preuve supplémentaire que l'écoulement dans l'aquifère du socle est typiquement localisé et principalement contrôlé par l'étendue de l'horizon altéré et des réseaux fracturés localisés.

5.2 L'influence de la géologie structurale sur l'hydrogéologie

La géologie structurale des régions de Ouéléba et du Pic de Fon est résumée dans la 4.4 ci-dessus. Cette section présente l'influence des caractéristiques structurales sur l'hydrogéologie locale.

La perméabilité est probablement supérieure le long de la trajectoire de ces zones de faille, car la cartographie structurale montre que la schistosité est souvent parallèle au tracé de la faille. En outre, la bréchification du substratum rocheux le long de l'orientation N-S dans les zones de faille est susceptible d'entraîner une perméabilité élevée.

Les données des études sur les sources (présentées dans la 3.8) indiquent que les sources associées aux failles orientées est-ouest sont généralement caractérisées par un débit relativement faible, ce qui indique une perméabilité limitée le long des failles. Les failles et les débits des sources doivent être interprétés en parallèle avec les débits de référence observés en aval des sources et les données sur la qualité de l'eau (y compris les isotopes) afin de déterminer si les failles exercent une influence significative sur le régime général d'écoulement des eaux souterraines. Très peu de failles exercent une influence significative sur le régime d'écoulement global et celles qui le font sont généralement associées au régime d'écoulement N-S dominant (par exemple le débit de source MIYA1-8 dans le bassin versant de Boyboyba). Les failles orientées est-ouest peuvent cependant fournir des voies d'écoulement préférentielles à travers les phyllites et les quartzites pour des volumes d'écoulement relativement faibles.

La schistosité et les failles ont été jugées plus importantes en termes d'écoulement des eaux souterraines dans les unités hydrogéologiques à plus faible perméabilité (par exemple les phyllites) que dans les unités plus perméables telles que les géodomains minéralisés (hématites et itabirites enrichies). Cependant, les données recueillies au cours de la campagne 2021-2022 ont apporté de nouvelles preuves de l'amélioration des voies d'écoulement des eaux souterraines dans les axes de plis des synformes du corps minéralisé, comme l'ont montré les pertes de fluides dans les cavités au cours du forage et la corrélation des zones primaires d'écoulement des eaux souterraines (MIYA1-8 dans le Boyboyba) avec les contrôles structuraux. La présence de voies préférentielles contrôlées par la structure est également confirmée par la qualité de l'eau de décharge observée au niveau des sources, dont la teneur en matières dissoutes est extrêmement faible par rapport aux données de qualité de l'eau et de conductivité électrique dans les piézomètres du corps minéralisé (6).

5.3 Niveaux des eaux souterraines

Un résumé des niveaux des eaux souterraines et des gradients hydrauliques verticaux au niveau de tous les PFV à Ouéléba et dans les environs est présenté dans l'annexe C. L'analyse de la réponse à la recharge est présentée à l'annexe D. Les cartes des courbes de niveau des eaux souterraines et une discussion sur les directions d'écoulement des eaux souterraines sont incluses dans la 9.3 (Compilation des modèles hydrogéologiques conceptuels).

5.3.1 Analyse des hydrogrammes

Un examen détaillé des données de surveillance des eaux souterraines a été effectué. Les facteurs suivants ont été pris en compte lors de l'interprétation des données de surveillance des eaux souterraines :

- Il n'a pas toujours été possible de « développer » les piézomètres à colonne pour éliminer le gâteau de boue bentonitique et rincer les fluides de forage restants. La réduction de la perméabilité des parois du trou de forage qui en résulte peut atténuer la réponse du piézomètre aux fluctuations du niveau de la nappe phréatique dans la formation environnante, mais ce n'est normalement pas un problème pour la surveillance à long terme du niveau de la nappe phréatique ;
- Le niveau des eaux souterraines mesuré dans les piézomètres à colonne réalisés avant 2021 représente un niveau piézométrique moyen sur l'épaisseur de l'aquifère recoupé par le piézomètre en raison de la construction de ces installations. Dans certains cas, les niveaux des eaux souterraines peuvent être influencés par des entrées dans les piézomètres provenant d'unités d'eaux souterraines éphémères et perchées dans les sections supérieures du trou de forage ;
- Plusieurs piézomètres ne pénètrent que sur une courte distance sous la nappe phréatique en raison de l'effondrement du trou de forage à proximité de la nappe phréatique au cours du processus de forage ;
- Des conditions phréatiques et piézométriques sont susceptibles d'être présentes. Cela est dû à la complexité de la géologie structurale de Simandou, avec des plissements et des failles entre des formations à faible perméabilité (phyllite) et des formations à perméabilité plus élevée (comme le gisement de minerai).

L'analyse des hydrogrammes est présentée ci-dessous pour Ouéléba. L'analyse de l'hydrogramme pour le Pic de Fon, qui n'a pas été mis à jour dans le cadre de l'étude de référence 2021/2022, est tirée de SWS (2012) et présentée à l'annexe E.

5.3.2 Ouéléba

Les hydrogrammes sont présentés ci-dessous pour les zones nord, centrale et sud de Ouéléba.

Zone nord de Ouéléba

Les hydrogrammes des piézomètres à colonne dans la zone nord de Ouéléba sont présentés dans la Figure 5-2 (en haut). Les hydrogrammes indiquent une plage de niveaux d'eau souterraine entre environ 850 et 1 150 mRL.

Figure 5-2 (en bas) montre l'orientation Est du site de surveillance par rapport au niveau moyen des eaux souterraines, l'échelle de couleur indiquant la position Nord. Ce graphique montre une nette diminution du niveau des eaux souterraines d'ouest en est, principalement due au cisaillement de la phyllite qui sépare les niveaux supérieurs des eaux souterraines dans le synforme occidental des niveaux inférieurs dans le synforme oriental. Un gradient hydraulique sud-nord est également identifié, avec des niveaux d'eau souterraine maximaux dans le sud-ouest et des niveaux d'eau souterraine minimaux dans le nord-est. L'influence du cisaillement de la phyllite centrale est également évidente dans le groupe de niveaux d'eau plus élevés annotés dans la figure, qui indiquent des conditions perchées dans les phyllites à plus faible perméabilité.

Les données sur le niveau des eaux souterraines de 2022 semblent représenter un régime d'eaux souterraines à plus basse altitude que les enregistrements précédents de 2008 à 2016. Cependant, ces données sont biaisées par la campagne de surveillance de 2022 ciblant l'extrémité nord de Ouéléba où les élévations des eaux de surface et des eaux souterraines sont plus basses.

Zone centrale de Ouéléba

Les hydrogrammes des piézomètres suivis dans la zone centrale de Ouéléba sont présentés dans la figure Figure 5-3. Là encore, les hydrogrammes peuvent être séparés en groupes distincts en fonction du niveau des eaux souterraines, avec des niveaux d'eaux souterraines perchées ou élevées dans le géodomaine de la zone de transition profonde (TRN) autour de la zone de marais saisonniers dans le centre de Ouéléba¹⁹, et des niveaux d'eaux souterraines plus profondes d'environ 1 030 mRL à l'intérieur de la minéralisation (comme le montre la Figure 5-3). Les séries temporelles TRN montrent d'importantes fluctuations saisonnières du niveau de la nappe phréatique, avec plus de 30 m observés à certains emplacements de piézomètres.

¹⁹L'étendue approximative du marais saisonnier dans le centre de Ouéléba s'étend du trou RD08OUL397 au nord à HM19 au sud (comme indiqué sur la figure 3.1).

Comme dans le nord de l'Ouéléba, il existe des exemples de piézomètres réalisés dans l'hématite sous le matériau TRN qui montrent des réponses plus caractéristiques de TRN. La série temporelle met en évidence les DHC12 et HM19 dans cette zone, qui ont été installés dans des formations non saturées afin d'observer toute réponse transitoire de la pression interstitielle dans la zone non saturée. Jusqu'à présent, seules des réactions mineures ont été observées (<20 cm de magnitude).

Zone sud de Ouéléba

Figure 5-4 présente les hydrogrammes des piézomètres situés dans la zone sud de Ouéléba. La majorité des piézomètres surveillent les niveaux d'eau dans les lithologies de transition ou les phyllites. Les niveaux d'eau élevés et les fluctuations importantes sont évidents pour les mêmes raisons que celles décrites ci-dessus. Un certain nombre de ces piézomètres se sont asséchés au cours de la période de surveillance, ce qui indique qu'il peut y avoir un certain drainage des nappes phréatiques perchées (peut-être causé par le programme de forage des ressources qui crée des voies hydrauliques à travers des unités à faible K).

Le seul piézomètre présentant la réponse caractéristique du système d'eaux souterraines plus profondes est RC07OUL093 qui est installé dans la minéralisation sur le flanc sud-ouest de Ouéléba (mis en évidence dans la Figure 5-4). Lorsqu'on la compare aux enregistrements des capteurs de pression dans le synforme nord-est de Ouéléba, elle présente une branche ascendante plus abrupte pendant la saison des pluies et recule plus rapidement pendant la saison sèche. Cela suggère des délais de recharge plus courts et une masse d'eau souterraine plus petite dans la zone méridionale, car la baisse du niveau des eaux souterraines indique que cette zone est facilement drainée pendant la saison sèche. DD07OUL125 (également mis en évidence dans la Figure 5-4) est également installé dans l'aquifère du corps minéralisé, mais son hydrogramme est plus caractéristique des dépôts sus-jacents.

5.3.3 Gradients hydrauliques verticaux observés dans les PFV

Les installations de PFV encastrées à plusieurs niveaux permettent d'évaluer les gradients hydrauliques verticaux et la continuité hydraulique entre les capteurs (Annexe C).

Dans l'ensemble, les données de PFV montrent que :

- Environ 10 % des PFV sont secs sur l'ensemble de la série temporelle.
- La majorité (70 %) des données provenant de PFV à plusieurs niveaux montrent des gradients verticaux descendants. Les 30 % restants présentent un gradient à la hausse.
- Les plus grands gradients de hauteur de chute sont associés aux géodomains de phyllite situés à l'extrême ouest du nord de l'Ouéléba, où les géodomains de phyllite recouvrent les géodomains de minerais.

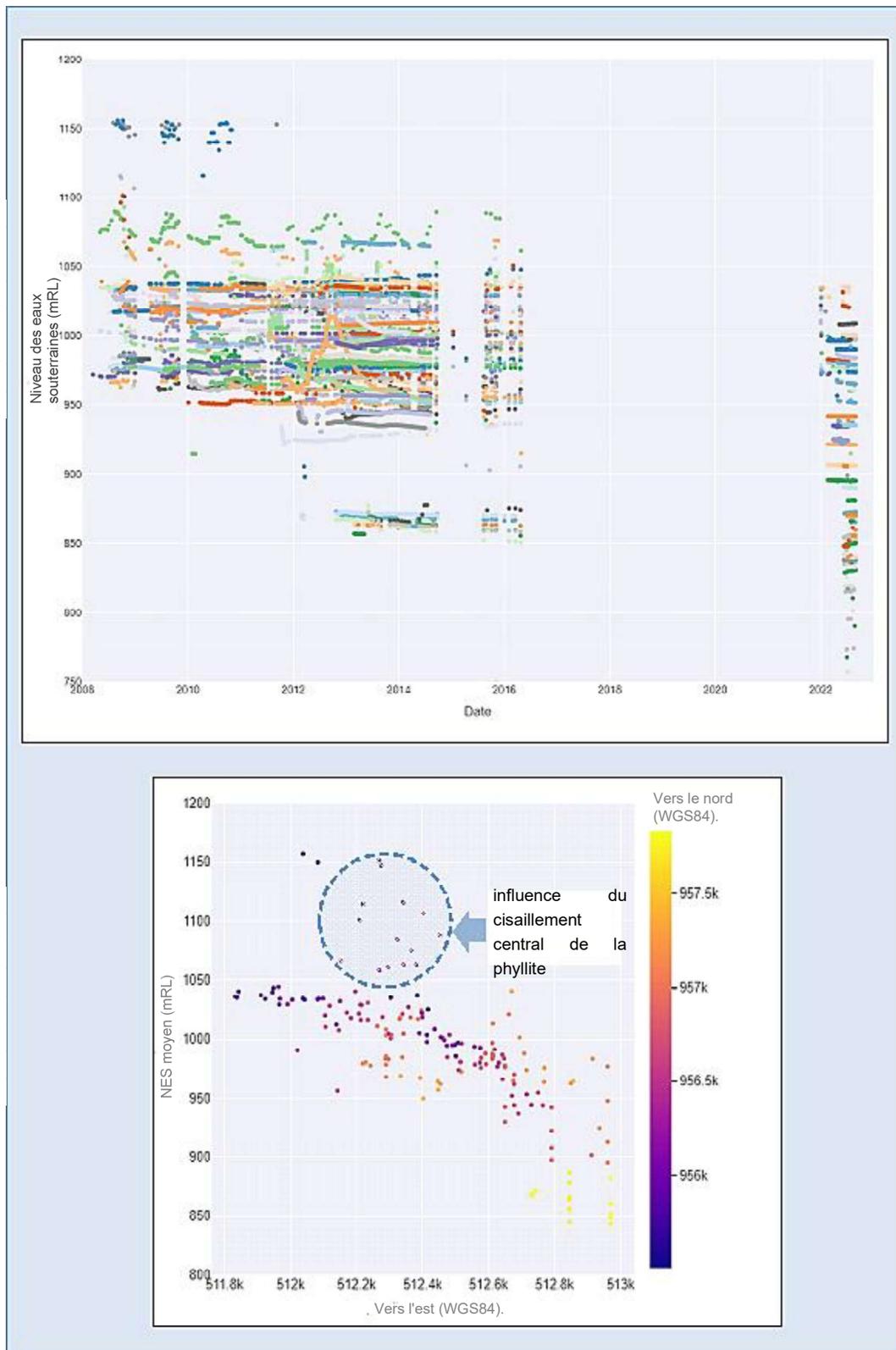


Figure 5-2: Piézomètres à colonne de la zone nord – hydrogrammes (en haut) et (en bas) de niveau moyen de la nappe phréatique par rapport à l'est (axe des abscisses) et au nord (couleur du symbole)

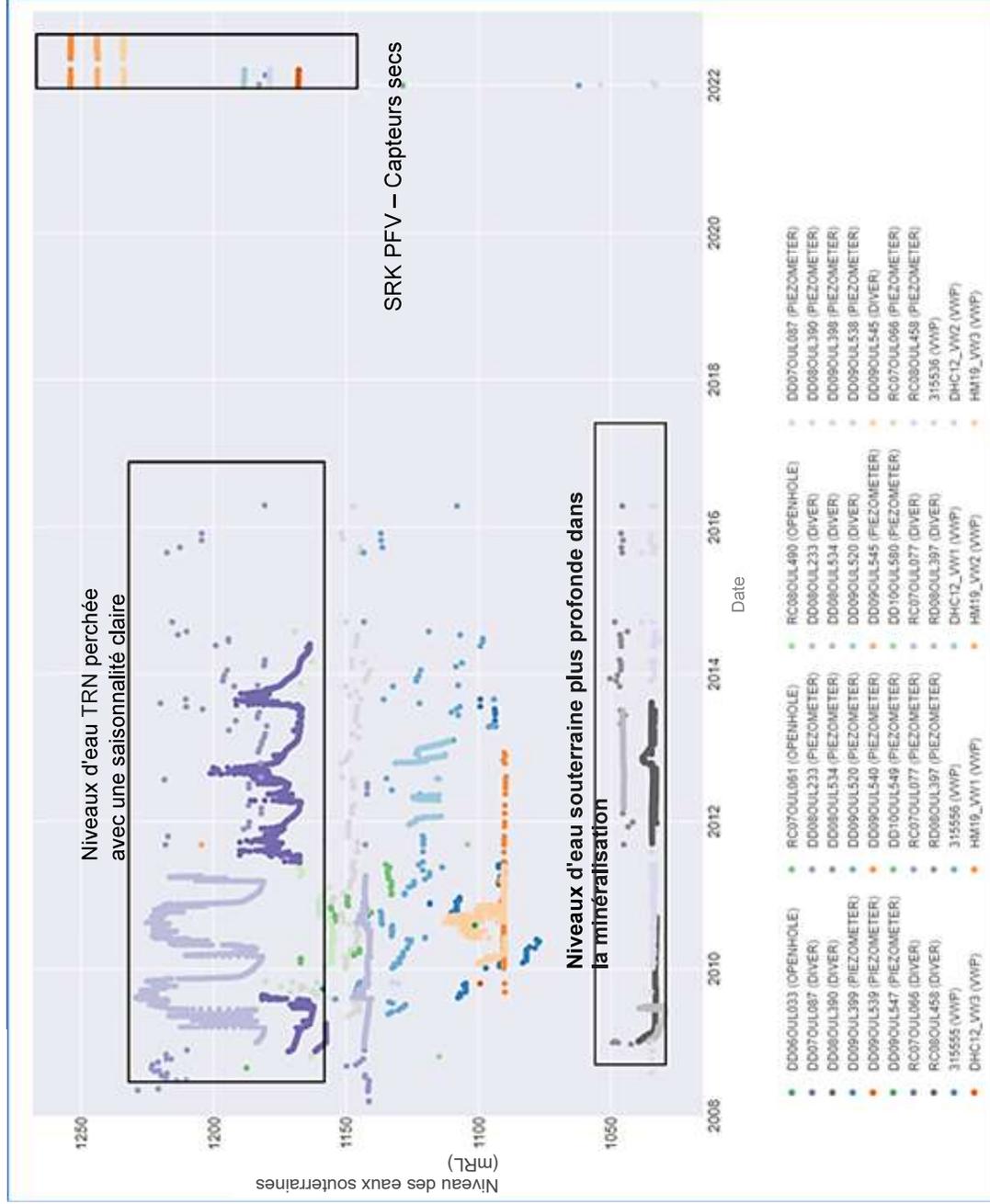


Figure 5-3: Hydrogrammes pour les piézomètres de Ouéléba Centre

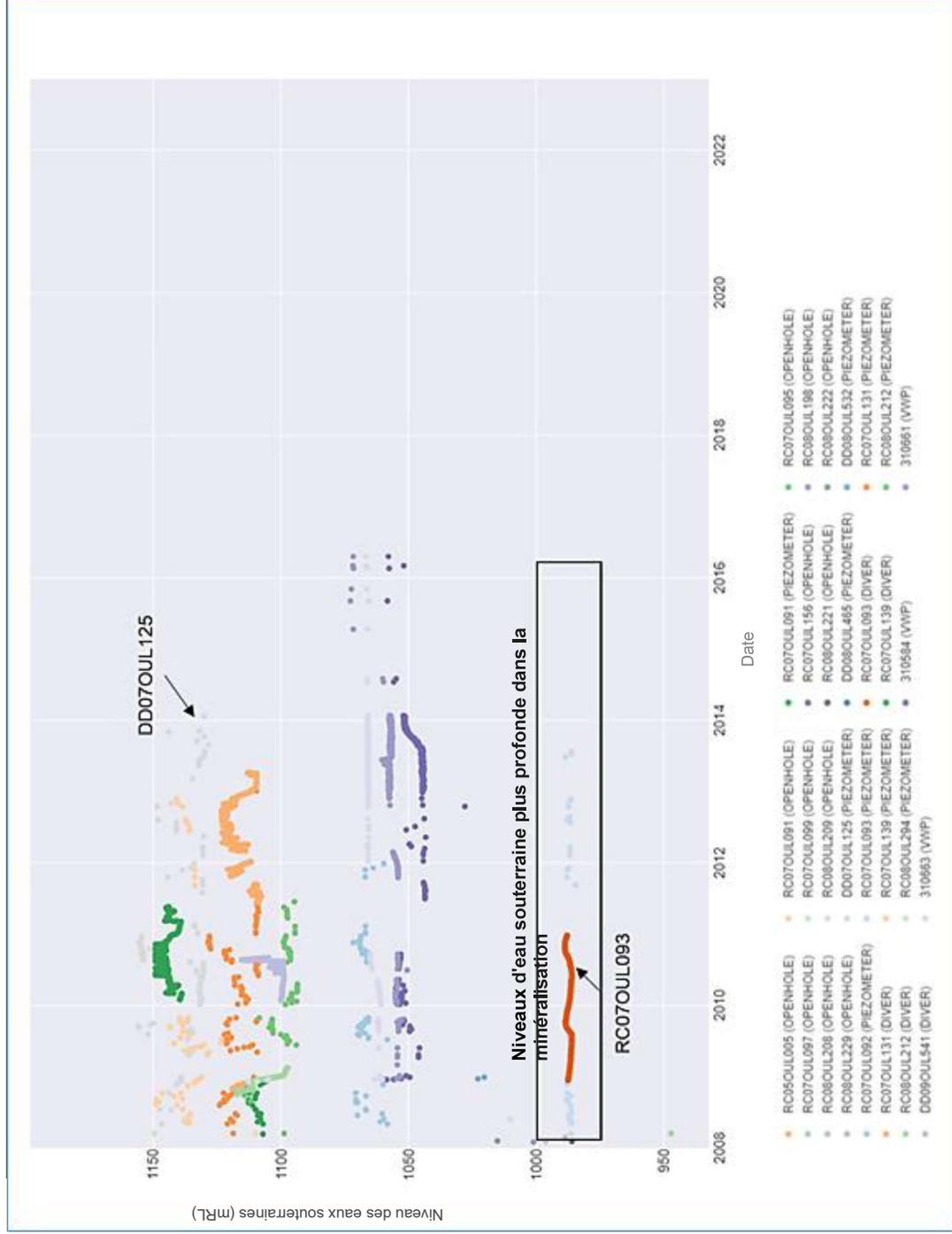


Figure 5-4: Hydrogrammes pour Ouéléba Sud piézomètres

5.3.4 Réponse au niveau des eaux souterraines par géodomaine

Résumé

L'interprétation des données sur le niveau des eaux souterraines dans le contexte des géodomains actuels indique ce qui suit :

- Le corps minéralisé friable (HGF, IRF, IPF) réagit de manière relativement uniforme au niveau des eaux souterraines ;
- Les phyllites et les quartzites présentent des réponses significativement plus importantes au niveau des eaux souterraines, avec des fluctuations plus importantes (>30 m) observées dans les deux unités géologiques. On suppose que cette variabilité est liée à l'hétérogénéité observée dans le degré d'altération de ces unités, les voies d'écoulement préférentielles étant supposées être associées aux intervalles altérés ;
- Les phyllites donnent naissance à des nappes d'eau souterraines perchées dans les régions du nord de l'Ouéléba, avec un fort gradient descendant vers les géodomains de minerais adjacents et sous-jacents ;
- Les données des PFV indiquent des gradients de hauteur de chute verticale depuis les géodomains de minerais, tels que la HGF, jusqu'aux géodomains adjacents de phyllite et de quartzite sur le flanc oriental de Ouéléba ; et
- Les données des PFV indiquent des exemples de différences de hauteur de chute importantes (>30 m) entre les géodomains de phyllite et les géodomains de quartzite à l'intérieur d'un même trou. Cela suggère que les quartzites peuvent servir de mécanisme de drainage pour les eaux souterraines dans les phyllites et sont donc susceptibles d'avoir une plus grande perméabilité que les phyllites.

D'autres observations sur les niveaux des eaux souterraines sont faites ci-dessous en relation avec les principaux géodomains lithologiques :

Gisements de Canga

Il existe relativement peu de données sur les eaux souterraines pour les aquifères canga par rapport aux autres géodomains. Les données disponibles montrent que la profondeur des eaux souterraines dans cet horizon est faible par rapport aux grandes zones non saturées observées dans le corps minéralisé.

Historiquement (avant 2012), les niveaux de la nappe phréatique de canga ont été mesurés dans les piézomètres de Canga Est. Les niveaux des eaux souterraines dans les piézomètres de Canga Est montrent que les eaux souterraines se trouvent à moins de 35 m du niveau du sol au sommet du canga (RC07CEC008) et à moins de 12 m du niveau du sol plus près du camp (RC07CEC004 et RC07CEC006).

Cap et zone de transition

Les séries temporelles du niveau des eaux souterraines pour l'horizon de transition (TRN) sont illustrées à la Figure 5-5. Cette figure montre les réponses pour les cinq sites dans le graphique de gauche. Les trois graphiques de droite présentent ensuite des hydrogrammes spécifiques plus détaillés.

La plupart des sites présentent une fluctuation saisonnière de <10 m (voir l'agrandissement 2 de la Figure 5-5). Cependant, d'importantes fluctuations de >40 m sont observées dans DD08OUL233 (agrandissement 1). Cette installation se trouve dans le centre de Ouéléba et est considérée comme représentative de l'aquifère perché de transition qui répond rapidement à la recharge suite à l'inondation saisonnière du marais adjacent. Les nouveaux PFV installés dans le trou HM19 (élargissement 3), situé à ~250 m au sud de DD08OUL233, montrent des conditions non saturées avec des fluctuations mineures en réponse aux précipitations.

Corps minéralisé.

Les séries chronologiques des niveaux d'eau souterraine pour les géodomains du gisement (HGF, IRF, IPF) sont présentées dans la Figure 5-6. Ces derniers présentent généralement des caractéristiques similaires, avec des fluctuations saisonnières pouvant atteindre 10 m et des fluctuations saisonnières <5 m pour la plupart des trous. Il existe plusieurs exceptions où les fluctuations dépassent 50 m dans des trous qui sont criblés à travers plusieurs géodomains. Les PFV installés en 2021 et 2022 montrent quelques réponses pluviométriques brutales dans GT04 VW1 (graphique 3 ; en bas), tandis que GT02 VW1 et VW2 montrent une récession continue (graphique 3 ; au milieu et en haut). Alors que les piézomètres du corps minéralisé présentent des réponses brutales à la recharge, on observe également une atténuation de la recharge et une réponse atténuée des niveaux d'eau. Ce point est abordé plus en détail à la 7.3 et à l'annexe D.

Les données relatives au niveau des eaux souterraines indiquent généralement des gradients hydrauliques relativement faibles dans l'aquifère du gisement. Certaines parties du minerai sont interprétées comme des zones de nappes phréatiques perchées. Les masses d'eau souterraines perchées apparaissent là où il y a des phyllites sous-jacentes, et on considère que les masses d'eau souterraines perchées s'écoulent dans les parties non perchées du minerai.

Phyllite

Les niveaux des eaux souterraines dans les géodomains de phyllite (PHY, PHS, PHV, PHW, PHC) présentent généralement des fluctuations inter/intra-annuelles limitées de <5 m (voir la Figure 5-7 ; graphique 2). Le trou DD10OUL570 (Figure 5-7 ; graphique 1) présente une fluctuation saisonnière atypique de plus de 40 m. À ce jour, les PFV récemment installés (2021/2022) dans la phyllite ne réagissent guère au début de la saison humide (Figure 5-7 ; graphique 3).

Le gradient hydraulique dans les phyllites est généralement plus élevé que dans le corps minéralisé, ce qui est cohérent avec la perméabilité généralement faible des phyllites et leur position sur les flancs abrupts de la ligne de crête.

Quartzite

Les niveaux des eaux souterraines dans les trous recoupant les horizons de quartzite (QTZ) montrent une fluctuation limitée de <10 m dans la majorité des cas (Figure 5-8). Les séries temporelles pour les points de surveillance dans le quartzite uniquement montrent des fluctuations intra-annuelles de 2 à 6 m. Les PFV nouvellement installés réagissent peu à l'arrivée de la saison des pluies.

Sous-sol

La surveillance du niveau des eaux souterraines dans les sous-sols est illustrée à la Figure 5-9. Les profondeurs observées dans les eaux souterraines lors de la campagne de forage 2021/2022 sont présentées dans le tableau 5-1. Relativement peu de données de surveillance des eaux souterraines à long terme ont été recueillies pour le sous-sol. Les données disponibles indiquent un régime d'eaux souterraines peu profondes à faible stockage, avec des augmentations rapides des niveaux d'eau pendant les épisodes de recharge, suivies d'une baisse tout aussi rapide (Figure 5-9).

Les niveaux des eaux souterraines dans les piézomètres historiques de la route Canga Est – Moribadou – Ouéléba se situent entre 5,5 m et 6 m sous le niveau du sol.

Les niveaux des eaux souterraines dans les trous du sous-sol forés en 2021/2022 varient d'environ 1 mbgl à 33 mbgl, les niveaux des eaux souterraines étant plus proches de la surface du sol dans les vallées, comme le montrent les trous du BS (« Bassin sédimentaire ») et MFM (« Boucle ferroviaire côté Mine ») dans le Tableau 5-1.

Les niveaux des eaux souterraines mesurés lors de l'enquête sur l'utilisation de l'eau dans les puits des villages se situaient entre 1,5 et 15,6 m sous le niveau du sol.

Tableau 5-1: Niveaux de la nappe phréatique du sous-sol à partir des installations de 2021/22

ID du lieu	Type d'installation	Date	Niveau des eaux souterraines (m bgl)*
BH01	Piézo­mètre à colonne	26/05/2022	11,91
BH02	PFV	30/08/2022	19,56
BH05	PFV	03/08/2022	2,65
BH06	PFV	18/03/2022	1,90
BH07	PFV	30/08/2022	3,2
DHC04	Piézo­mètre à colonne	26/05/2022	Sec
DHC06	Piézo­mètre à colonne	26/05/2022	33,40
DHC10	Piézo­mètre à colonne	26/05/2022	8,97
MER1	Piézo­mètre à colonne	26/05/2022	6,10
MER14	Piézo­mètre à colonne	26/05/2022	8,53
MER15	Piézo­mètre à colonne	26/05/2022	3,50
MER5	Piézo­mètre à colonne	26/05/2022	4,87
SB2	Piézo­mètre à colonne	26/05/2022	1,38
SB5	Piézo­mètre à colonne	27/05/2022	2,54
SB6	Piézo­mètre à colonne	26/05/2022	8,55
WD04	Piézo­mètre à colonne	27/05/2022	14
WD05	Piézo­mètre à colonne	23/10/2022	5,2
WD07	PFV	03/08/2022	4,27

*Déterminé à partir du capteur saturé supérieur pour les installations PFV

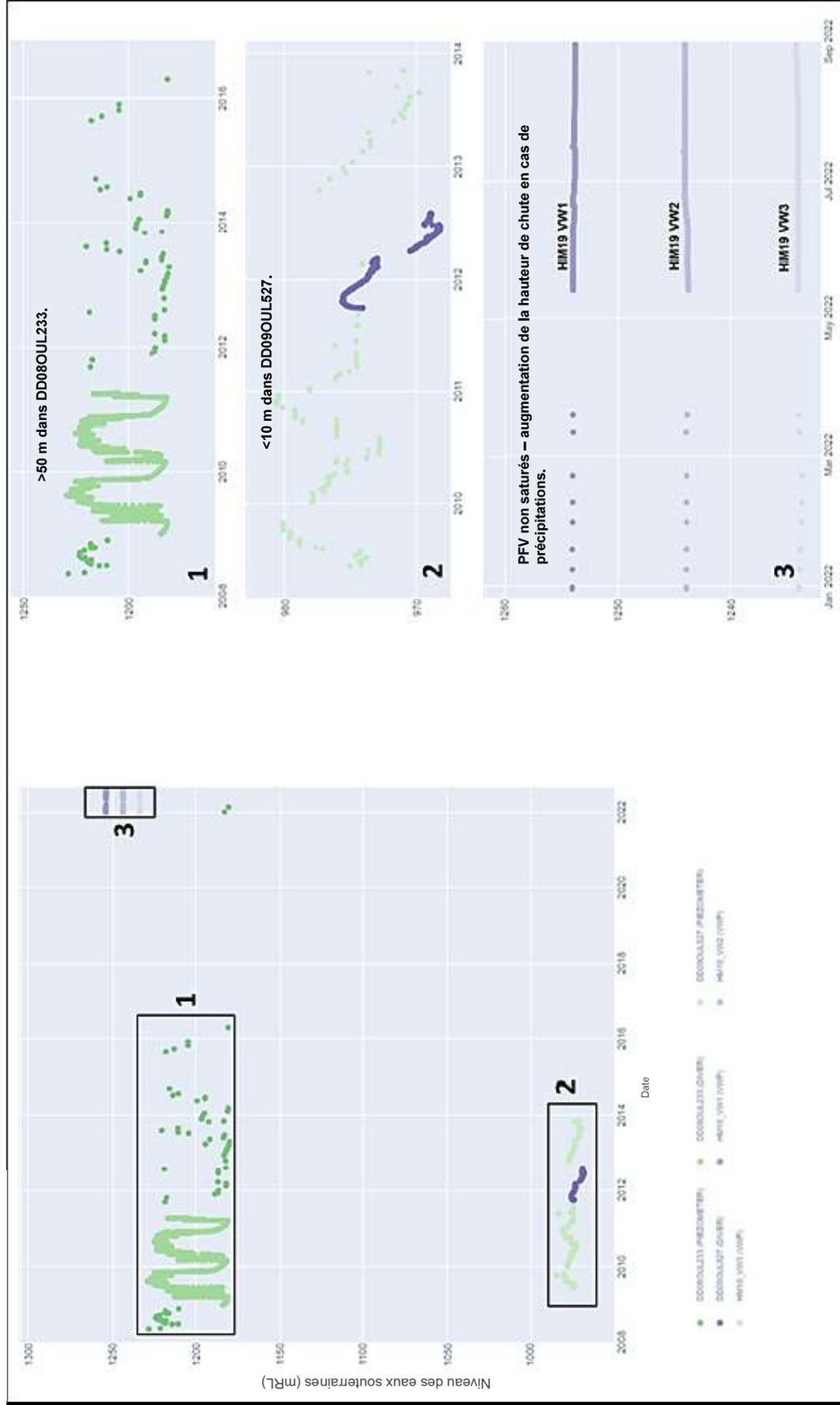


Figure 5-5: Série chronologique du niveau des eaux souterraines pour TRN

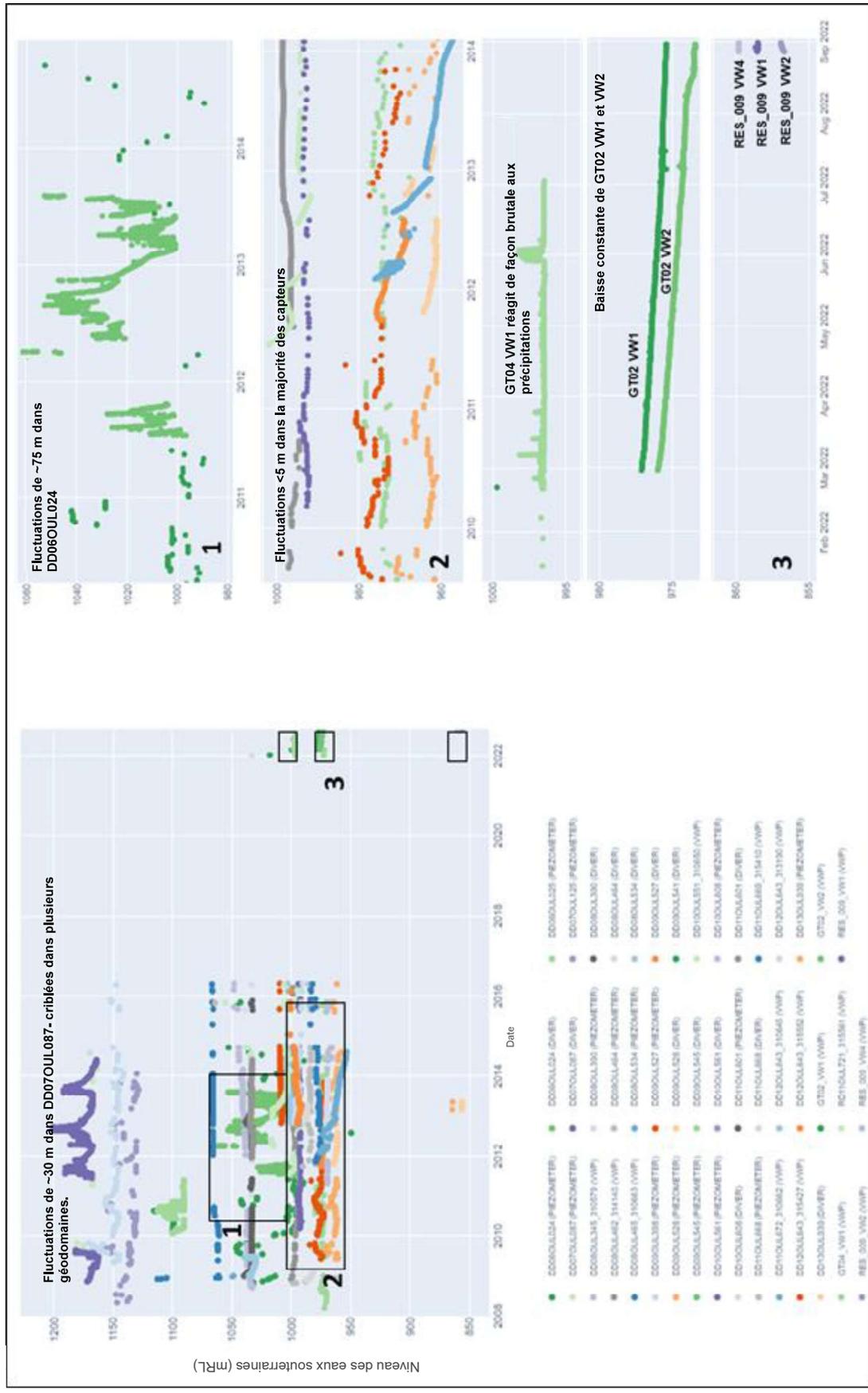


Figure 5-6: Séries chronologiques du niveau des eaux souterraines pour HGF, IRF, IPC

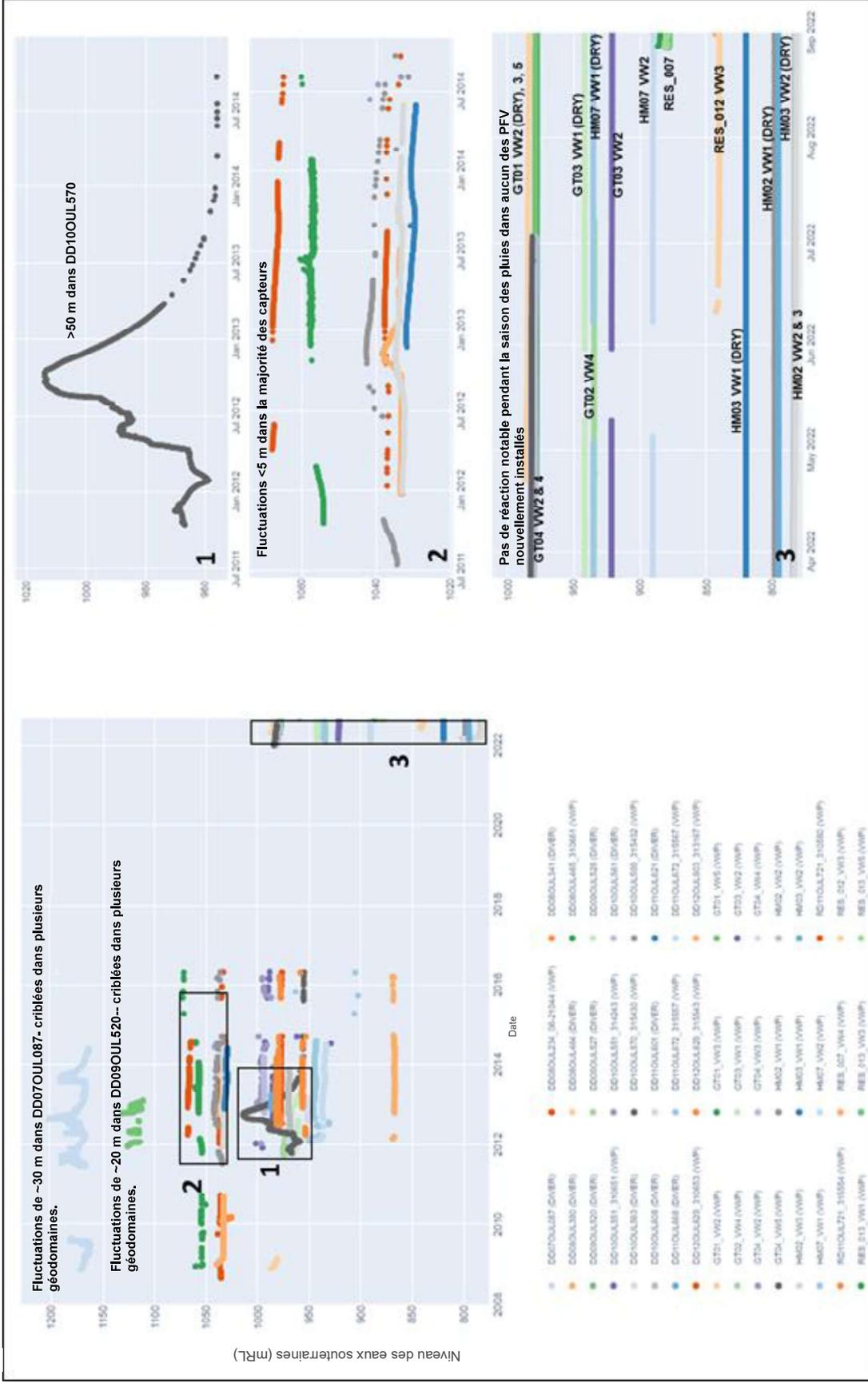


Figure 5-7: Série chronologique du niveau des eaux souterraines pour PHY, PHS, PHV, PHW, PHX, PHZ

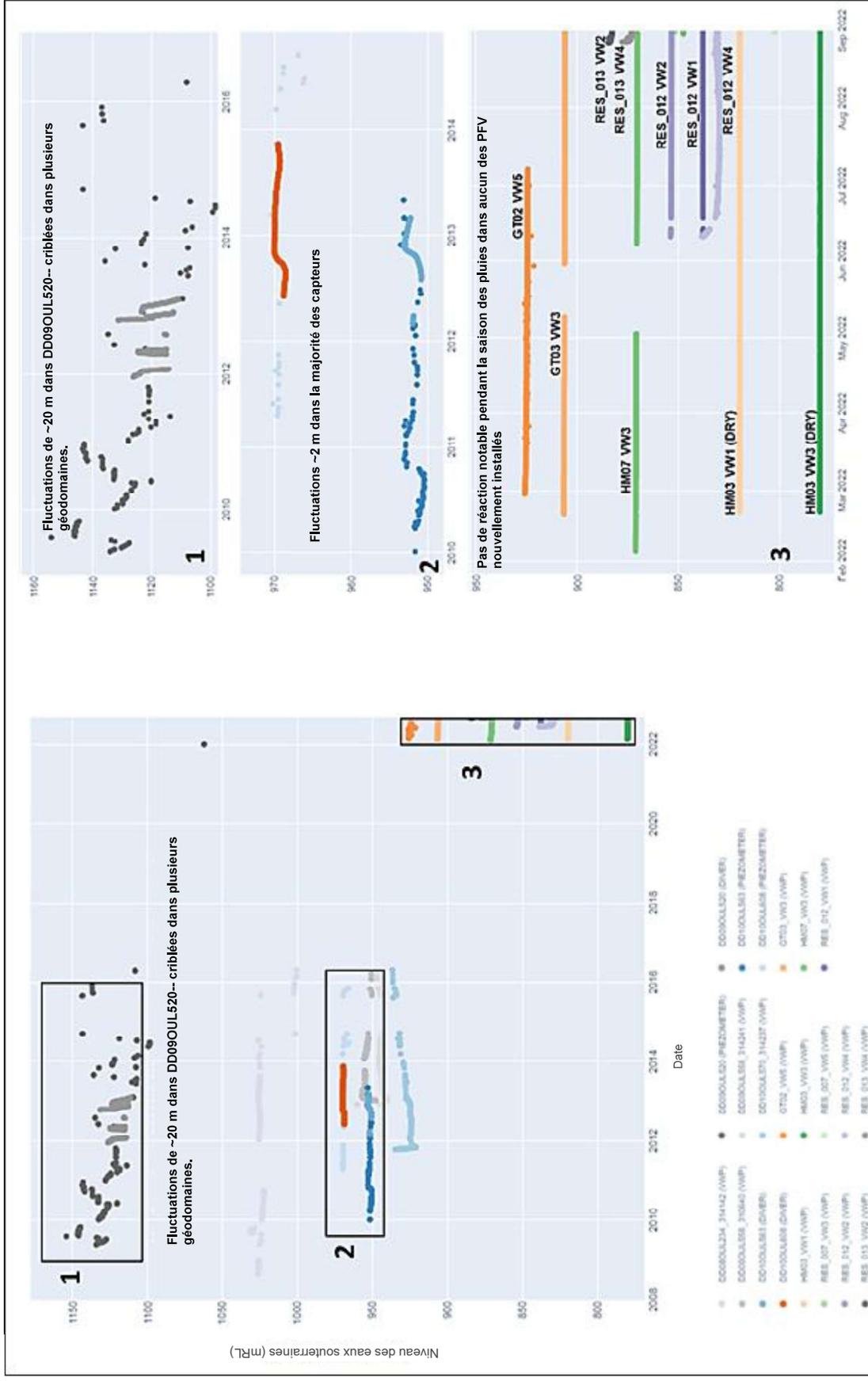


Figure 5-8: Série chronologique du niveau des eaux souterraines pour QTZ

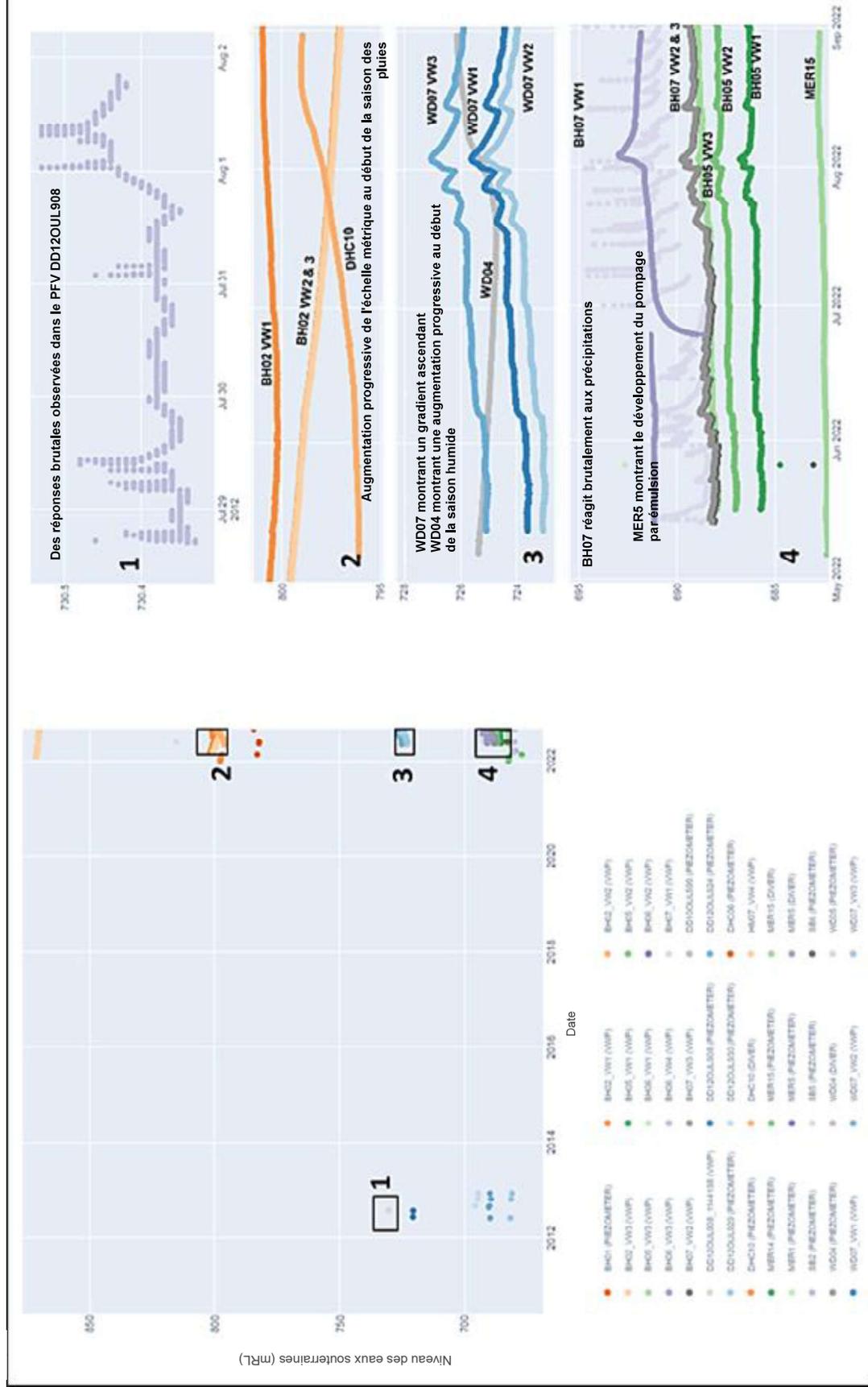


Figure 5-9: Séries chronologiques du niveau des eaux souterraines pour BAS

5.3.5 Piézomètres installés en dehors des zones de ressources et d'infrastructures

Les niveaux d'eau des piézomètres installés en dehors des zones de ressources et d'infrastructures sont résumés dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2: Détails des piézomètres en dehors des zones de ressources et d'infrastructures

ID du trou de forage	Localisation	Élévation (mRL)	Profondeur du piézomètre (m)	Plage de niveau d'eau	
				Profondeur des eaux souterraines (mbgl)	Niveau des eaux souterraines (mRL)
RC07CEC001	Canga Est	956	40	10,0	946
RC07CEC004	Canga Est	1,056	89	9,6 à 11,9	1 044 à 1 046
RC07CEC006	Canga Est	1,107	34,7	30,9	1,176
RC07CEC007	Canga Est	1,047	45	8,0	1039
RC07CEC008	Canga Est	1,058	60	10,6 à 13,9	1 044 à 1 047
RC07OMR001	Route du Moribadou au croisement de la rivière Loffa	760	20,2	21,0	739
RC07OMR002	Carrefour routier Ouéléba-Moribadou	793	21,5	11,6 à 12,7	780
RC07OMR003	Route de Ouéléba	837	11,4	5,6 à 5,9	825 à 825

5.4 Propriétés hydrauliques

5.4.1 Porosité

Des relations ont été démontrées entre la densité des minerais à haute teneur et la porosité. L'altération, la friabilité et la réduction de la dureté des minerais se sont avérées associées à une augmentation de la porosité. Les procédures de mesure ont eu du mal à maintenir la structure et l'intégrité des matériaux friables, ce qui a entraîné des problèmes de résultats pour les matériaux les plus altérés. Des relations générales ont été déduites entre la lithologie, l'altération et la porosité, comme le montre le Tableau 5-3.

Tableau 5-3: Relation entre la lithologie et la porosité

Lithologie (descriptions de l' EFP de 2008)	Géodomaine (classification de 2012) ²⁰	Porosité
Phyllite basale fraîche (PH2-3) Itabirites compacts (IHC)	PHC IPC / IRL	Très faible à faible (~0 à 10 %)
Martite-hématite dure, dense et à grain fin (H2H) Matrice de martite dure, moyennement dure avec porosité (M2H) Matrice de martite dure, moyennement dure avec remplissage de goéthite (MGH)	HGC HEC	Modéré (~10 à 20 %)
Martite-goéthite moyennement dure (M2M) Matrice de martite moyennement dure avec porosité (MGM) Itabirites friables (IHF)	HGM HEM IPF	Élevé (~20 à 30 %)
Martite molle (M2F) Minerai fortement altéré Phyllite fortement altérée (PHY)	WEA PHS	Très élevé (~30 à 50 %)

5.4.2 Perméabilité

Les résultats des tests de perméabilité sont détaillés à l'F. Les figures C-1 à C3 présentent les emplacements et un résumé de tous les essais hydrauliques réalisés à ce jour.

- Figure C-1 : Résultats des tests de perméabilité – Nord de l'Ouéléba (d'après SWS, 2012)
- Figure C-2 : Résultats des tests de perméabilité – Sud de l'Ouéléba et Pic de Fon (d'après SWS, 2012)
- Figure C-3 : Les résultats des tests de perméabilité sont Ouéléba (PSD et BMR seulement)

Il n'y a pas de distribution spatiale évidente des propriétés hydrauliques dans ces figures. Les facteurs qui contrôlent les propriétés hydrauliques (c'est-à-dire la lithologie, la structure et l'étendue de l'altération) sont localement variables et dépendent de la profondeur, de sorte que l'on peut s'attendre à l'absence de tendances spatiales claires.

Analyse en laboratoire de la perméabilité des carottes

Les résultats des analyses de laboratoire sont résumés dans les tableaux C-1 et C2 de l'F.

Figure 5-10 (en haut) présente un diagramme en boîte de la perméabilité des carottes pour des géodomains sélectionnés (c'est-à-dire les géodomains pour lesquels il y a plus de 4 résultats analytiques) pour Ouéléba et le Pic de Fon. Les résultats indiquent ce qui suit :

- Les géodomains friables (HEF et IRF) ont une perméabilité relativement élevée ;
- Les géodomains de minerais compacts (HEC, HGC, IRC) sont relativement peu perméables, et environ quatre ordres de grandeur moins perméables que les unités friables ;

²⁰La transposition de la classification lithologique de l'EFP 2008 aux géodomains adoptés en 2012 (et conservés par la suite) n'est pas directe et ne peut être considérée que comme une approximation, étant donné que des codes de géodomains et des différenciations d'altération supplémentaires ont été inclus.

- La perméabilité la plus faible est généralement associée à la PHC ;
- PHV et PHW ont toutes deux des gammes de perméabilité similaires ; et
- Les QTW présentent des perméabilités de 1 à 3 ordres de grandeur plus élevées que celles des PHC et qui sont généralement plus élevées que celles des PHW, PHV et PHS (notez toutefois qu'il n'y a que 2 résultats d'analyse pour les QTW ; notez également que les QTW ont pu être coupés pour l'échantillonnage des carottes, et ne représentent donc pas les QTW extrêmement altérés qui sont récupérés sous forme de sable).

Les résultats des tests de perméabilité de ces carottes en fonction de l'orientation de la foliation sont présentés dans la Figure 5-10 (en bas) et dans le Tableau 5-4. Les résultats des tests de perméabilité des carottes orientées indiquent que :

- La perméabilité perpendiculaire à la foliation est plus faible que la perméabilité parallèle à la foliation ;
- La perméabilité perpendiculaire à la foliation peut être inférieure de plus d'un ordre de grandeur à la perméabilité parallèle à la foliation dans les paires d'échantillons testés ; et
- Même les géodomains altérés, tels que la PHS, présentent une perméabilité plus importante parallèlement à la foliation, ce qui indique que la foliation relique a également une influence significative sur la perméabilité.

Les essais en laboratoire ont mis en évidence la possibilité que la foliation ait une influence significative sur le régime d'écoulement des eaux souterraines à l'échelle du site du Projet (en notant une orientation prédominante de la foliation vers le nord).

Tableau 5-4: Résumé de l'analyse de la perméabilité des carottes en laboratoire en fonction du géodomaine et de l'orientation de la foliation

Géodomaine	Orientation de la foliation	Nbre de tests	Conductivité hydraulique (m/sec)		
			Min.	Moyenne	Max.
PHC	Parallèle	4	$2,31 \times 10^{-10}$	$6,68 \times 10^{-09}$	$1,96 \times 10^{-08}$
	Perpendiculaire	2	$8,19 \times 10^{-11}$	$2,61 \times 10^{-10}$	439×10^{-10}
PHW	Parallèle	18	$1,47 \times 10^{-09}$	$5,78 \times 10^{-08}$	$2,91 \times 10^{-07}$
	Perpendiculaire	5	$1,64 \times 10^{-10}$	$1,66 \times 10^{-09}$	4×10^{-09}
PHV	Parallèle	1	$1,26 \times 10^{-07}$	-	$1,26 \times 10^{-07}$
	Perpendiculaire	1	$1,04 \times 10^{-10}$	-	$1,04 \times 10^{-10}$
PHS	Parallèle	3	$3,69 \times 10^{-09}$	$3,73 \times 10^{-08}$	$1,02 \times 10^{-07}$
	Perpendiculaire	1	$1,02 \times 10^{-09}$	-	$1,02 \times 10^{-09}$
IRC	Parallèle	2	176×10^{-07}	194×10^{-07}	212×10^{-07}
	Perpendiculaire	0	-	-	-
QTW	Parallèle	0	-	-	-
	Perpendiculaire	1	$3,48 \times 10^{-08}$	-	$3,48 \times 10^{-08}$

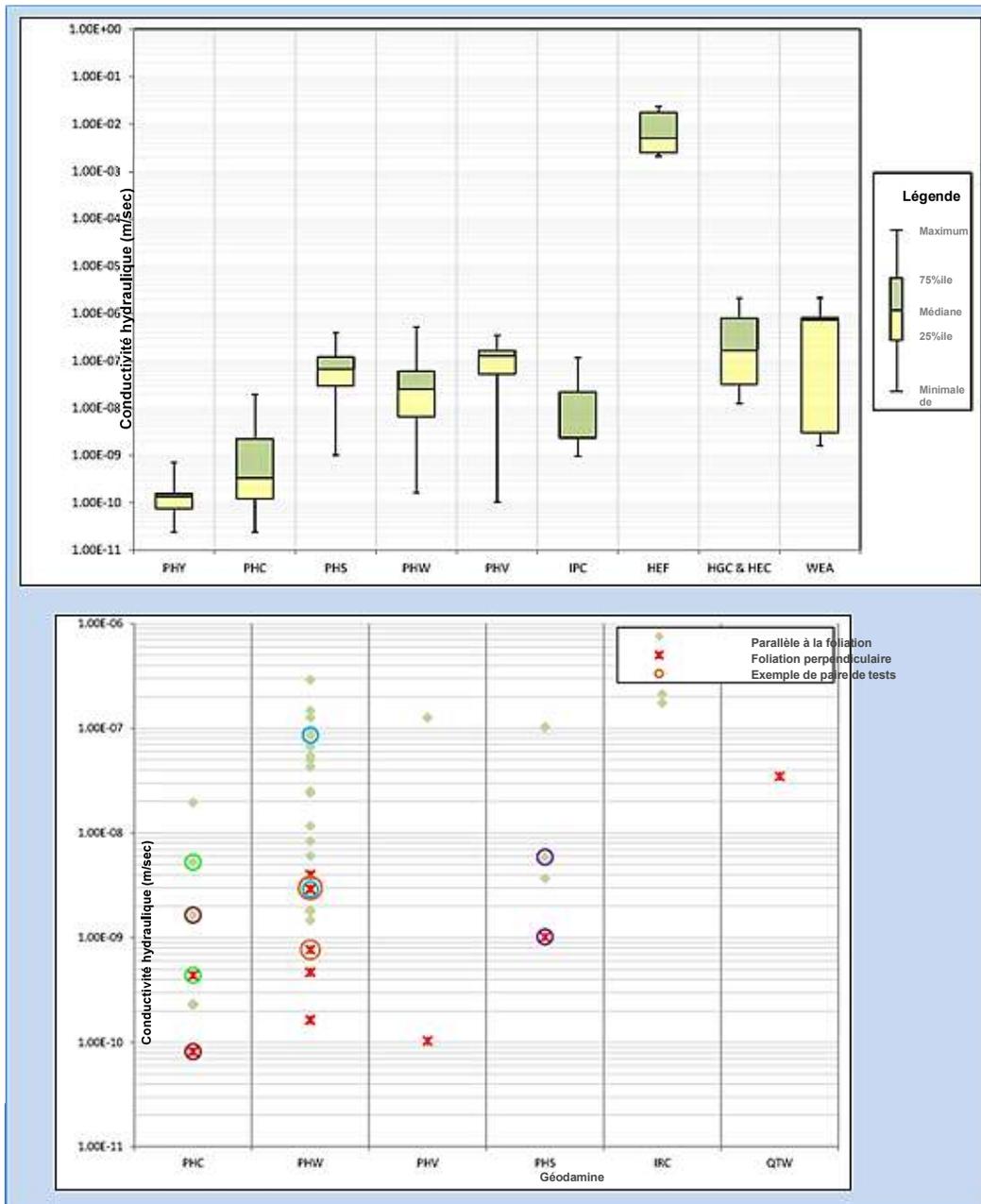


Figure 5-10: Résultats de la perméabilité des carottes en fonction du géodomaine (en haut) et de la foliation (en bas) (tous deux tirés de : SWS, 2012)

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de relation perceptible entre la profondeur et la perméabilité de la carotte dans aucun des géodomains échantillonnés, à l'exception des géodomains HEF et HGF qui montrent une diminution progressive de la perméabilité avec l'augmentation de la profondeur.

Estimation de la conductivité hydraulique par l'essai à charge variable

Les estimations préliminaires de la conductivité hydraulique par essai à charge variable sont présentées comme suit dans les tableaux C-3, C-4 et C-5 de l'F :

- Tableau C-3 : Essais à charge variable effectués à OUL – 2008 (d'après SWS, 2012)
- Tableau C-4 : Essais à charge variable effectués à OUL – 2011 à 2012 (d'après SWS, 2012)
- Tableau C-5 : Résumé des essais de puits réalisés dans la zone de stockage des stériles de Ouéléba – 2011 à 2012 (d'après SWS, 2012)

Les estimations de la conductivité hydraulique sont similaires aux estimations de perméabilité faites en laboratoire pour les carottes compactes et siliceuses. Le matériau *in situ* devrait toutefois présenter une perméabilité plus élevée que les échantillons de carottes en raison de la prédominance de la minéralisation friable (qui, lors des essais en laboratoire, présentait des perméabilités beaucoup plus élevées de 10^{-2} à 10^{-3} m/s) et de la présence d'une perméabilité secondaire dans le réseau de fractures. La sous-estimation de la conductivité hydraulique peut être attribuée à un certain nombre de facteurs, notamment le gâteau de boue résiduel dans le trou et les incertitudes sur le diamètre réel du trou.

Estimations de la conductivité hydraulique par essai au packer

Les estimations de la conductivité hydraulique par essai au packer sont présentées dans le tableau C-6 de l'F.

La conductivité hydraulique estimée en fonction de la profondeur de l'essai au packer est présentée graphiquement à la Figure 5-11. Les résultats montrent que :

- La PHW présente la gamme de perméabilité la plus large, allant de 5×10^{-9} m/s à $3,9 \times 10^{-6}$ m/s.
- La perméabilité du QTC est comprise entre $3,5 \times 10^{-8}$ m/s et $3,2 \times 10^{-6}$ m/s.
- La perméabilité de l'IPC est similaire à celle du QTC, allant de $2,1 \times 10^{-8}$ m/s à 1×10^{-6} m/s.

Il n'y a généralement pas d'échantillons à perméabilité extrêmement faible, tous les tests sauf un étant supérieurs à 10^{-9} m/s. Les géodomains compacts présentent une perméabilité plus élevée dans les essais au packer que dans l'analyse des carottes, ce qui indique que la perméabilité des fractures est importante dans les zones testées. Ceci est typique d'un programme d'essai au packer où il y a un biais vers l'extrémité de perméabilité plus élevée du spectre car les zones de fracture sont ciblées dans le cadre du processus de sélection de l'intervalle d'essai.

L'absence d'essais au packer à long terme a également réduit la confiance dans les données d'essais d'obturation, car les essais ne sont représentatifs que de la perméabilité localisée dans les environs immédiats du forage.

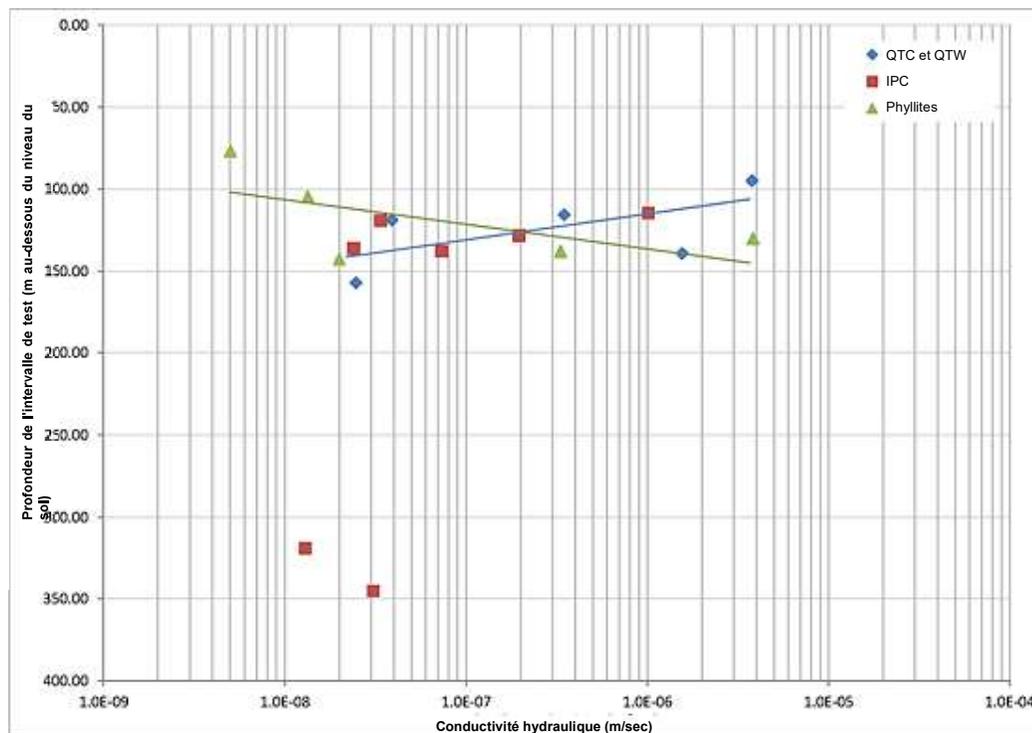


Figure 5-11: Conductivité hydraulique déterminée par les essais au packer en fonction de la profondeur de l'intervalle d'essai (d'après SWS, 2012)

Estimations de la conductivité hydraulique par la répartition granulométrique (RGMP)

Les estimations de la conductivité hydraulique par RGMP sont présentées dans le tableau C-7 de l'F. Ce tableau présente les valeurs Log_{10} minimale, maximale et moyenne de la conductivité hydraulique (K) pour chaque géodomaine. Le tableau contient le géomécan des estimations précédentes de K à partir des essais au packer, de l'analyse de la perméabilité des carottes et des essais d'injection.

Résumé de la conductivité hydraulique à partir de l'analyse PSD, des essais au packer, de la perméabilité de la carotte et des essais à charge variable (injection)

Figure 5-12 montre la valeur de la conductivité hydraulique Log_{10} (K) des estimations du DSP comparée à celles des essais d'obturation, de la perméabilité des carottes et des essais à charge variable (injection) dans un diagramme en boîte et en moustache.

Les fourchettes de K calculées à partir de l'analyse RGMP se situent dans une fourchette similaire à celle des autres résultats d'essais et sont utiles pour accroître la confiance dans les fourchettes de K pour les différents géodomains testés.

Les valeurs RGMP ne sont pas cohérentes avec les données de perméabilité de la carotte pour la lithologie HGF (Haematite-Goethite friable), où les valeurs RGMP sont supérieures de plusieurs ordres de grandeur à la perméabilité de la carotte et aux données d'injection. Les valeurs élevées de K devraient être dues à une désagrégation incomplète de l'échantillon, les résultats suggérant un pourcentage beaucoup plus élevé de matériaux de grande taille que ce qui se produirait pour des échantillons entièrement désagrégés (par exemple, des « argiles graveleuses » sont notées).

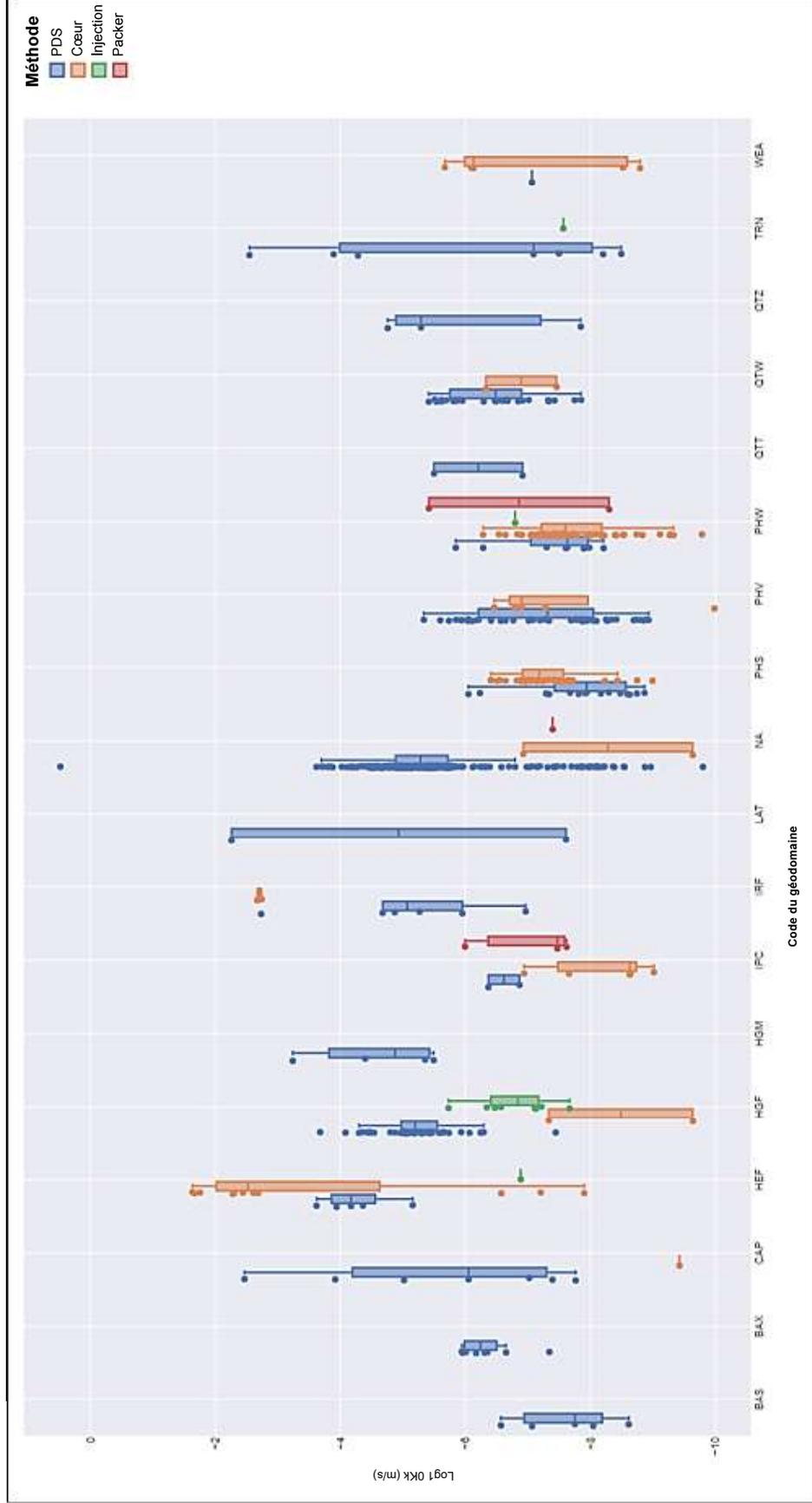


Figure 5-12: Diagramme en boîte et en moustache de la moyenne géométrique de la conductivité hydraulique des échantillons de RGMP par rapport aux valeurs préexistantes provenant des essais de perméabilité au packer, de carotte et d'injection

Bien que la variabilité soit présente entre chaque méthode d'essai, les valeurs de conductivité hydraulique calculées à partir de l'analyse RGMP sont alignées sur celles déterminées par l'essai au packer, l'essai au bouchon et l'essai à charge variable. Une comparaison des valeurs moyennes de conductivité hydraulique des géodomains sélectionnés est détaillée dans le Tableau 5-5 ci-dessous.

Tableau 5-5: Comparaison des valeurs moyennes de conductivité hydraulique entre différentes méthodes d'essai et d'analyse

Géodomaine	Analyse RGMP (m/s)	Essai au packer (m/s)	Essai à charge variable (m/s)	Essai de pompage (m/s)**	Perméabilité de la carotte (m/s)
Hématite-Goethite Friable (HGF)	$5,88 \times 10^{-6}$	Non mesuré	$1,03 \times 10^{-6}$	Non mesuré	Non mesuré
Phyllite très faible (PHV)	$5,20 \times 10^{-8}$	$*3,3 \times 10^{-7}$	Non mesuré	Non mesuré	$1,37 \times 10^{-7}$
Phyllite faible (PHW)	$3,80 \times 10^{-8}$	$3,80 \times 10^{-6}$	$1,61 \times 10^{-7}$	Non mesuré	$5,05 \times 10^{-8}$
Quartzite faible (QTW)	$3,89 \times 10^{-7}$	$*1,85 \times 10^{-8}$	Non mesuré	$3,97 \times 10^{-9}$	$2,52 \times 10^{-7}$

* Autres géodomains inclus dans l'intervalle de test

** Essais de pompage d'un seul trou (voir la section 3.5.4)

6 CHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES

Les campagnes de caractérisation de référence de la chimie des eaux souterraines et l'analyse des données sont décrites en détail dans le rapport Baseline Water Chemistry (SRK, 2023a).

Les principales conclusions relatives à la chimie des eaux souterraines et des eaux de surface et au développement du modèle conceptuel des eaux souterraines sont les suivantes :

- Le pH des eaux de surface tend à se situer autour de 6 à 7, plusieurs sources ou rejets de gisements signalant des valeurs de pH inférieures, de l'ordre de 4 à 5. Des valeurs de pH inférieures ont été enregistrées dans les données historiques, mais elles sont considérées comme étant largement associées à des erreurs d'instrumentation (SRK, 2023a).
- Les données de l'enquête sur l'accrétion du débit en saison sèche 2022 (voir la 8) montrent que le pH a tendance à augmenter à mesure que l'on s'éloigne de la ligne de crête (Figure 6-1 ; image de gauche). L'évolution du pH en aval des sources dans le bassin versant de Boyboyba a indiqué une augmentation du pH d'environ 1 unité dans un rayon de quelques centaines de mètres de la décharge de la source, et aucun changement correspondant de la conductivité électrique (CE) ; voir la Figure 6-1 ; image de droite.
- Les changements rapides du pH au point de décharge empêchent de s'y fier en tant qu'indicateur de la source d'eau souterraine, bien que l'on observe une corrélation entre les eaux de surface à pH relativement bas et les décharges de sources provenant du gisement de minéral.

- Une augmentation de l'alcalinité, de la CE et une augmentation progressive du pH sont également observées en s'éloignant de la ligne de crête. La modification de la CE et de l'alcalinité est attribuée au débit de base des eaux souterraines plus minéralisées associées aux quartzites et aux aquifères du socle, et peut-être aussi à l'interaction géochimique avec les dépôts alluviaux. La source de l'alcalinité reste incertaine, mais les processus d'altération dans la zone du sol sont considérés comme la source la plus plausible étant donné la présence limitée de carbonates dans la géologie locale.
- La CE des sources et des eaux de surface près des lignes de crête de Ouéléba et du Pic de Fon est extrêmement faible et reflète la nature fortement lessivée des lithologies du corps minéralisé. Les valeurs de CE les plus faibles sont inférieures à 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et sont associées aux rejets du gisement dans les bassins versants supérieurs de la Miya, de la Mala et de la Woron (Figure 6-1 ; image de droite). Les CE rapportées dans les piézomètres du corps minier sont également généralement inférieures à 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- En plus de l'échantillonnage de la qualité de l'eau, une étude de la CE en fond de trou a été réalisée dans des piézomètres à colonne sur Ouéléba (SRK 2023b). Les valeurs de la CE varient entre 10 et 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ. Des fluctuations entre les géodomains à l'intérieur des trous individuels ont été observées.
- L'ensemble limité des données de CE de fond de trou a mis en évidence la possibilité d'une variation locale de la qualité de l'eau du corps minéralisé, avec des valeurs de CE plus faibles associées au minerai fortement lixivié et des valeurs de CE plus élevées observées là où les eaux souterraines ont interagi avec des unités de minerai à plus faible teneur et des lithologies de déchets.
- Des valeurs élevées de CE sont enregistrées dans les puits des villages. Cette situation est attribuée à des charges de solutés plus élevées dans les aquifères de socle, mais peut également être due à des influences anthropogéniques dans certains cas.
- Plusieurs observations notables ont été faites en ce qui concerne les schémas spatiaux des métaux traces dans les sources et les eaux de surface :
 - Les concentrations de cuivre, de fer et de manganèse dissous sont généralement plus faibles dans les bassins versants de montagne que dans les bassins versants de plaine correspondants, bien qu'il y ait une variabilité entre les différents bassins versants.
 - Les concentrations de zinc dissous sont généralement plus élevées dans les bassins versants des hautes terres que dans les bassins versants des basses terres correspondants et semblent être associées aux rejets primaires de l'aquifère du gisement.
- Les eaux souterraines prélevées dans les piézomètres présentent des concentrations en métaux dissous plus élevées que les sources. L'écart entre les concentrations de métaux dans les eaux souterraines et les sources pourrait être dû aux voies d'écoulement préférentielles dans l'aquifère du corps minéralisé ou en raison de la fiabilité limitée des échantillons d'eau souterraine prélevés à ce jour.