

JUNE 2023

31243

SIMANDOU GEOTECH AND HYDRO BFS



Spatial distribution of pH, Electrical Conductivity and flow rate: Ouéléba

Figure 6-1

## 7 RECHARGE DES EAUX SOUTERRAINES

### 7.1 Aperçu des processus de recharge des eaux souterraines

Les gisements d'hématite-itabirite formant le cœur de Ouéléba et du Pic de Fon sont les principaux aquifères. La recharge de l'hématite se fait principalement par l'infiltration directe des précipitations sur les zones d'affleurement. L'hématite étant située au cœur de la ligne de crête, il n'y a pas d'apport régional d'eau souterraine dans les aquifères de l'Ouéléba et du Pic de Fon.

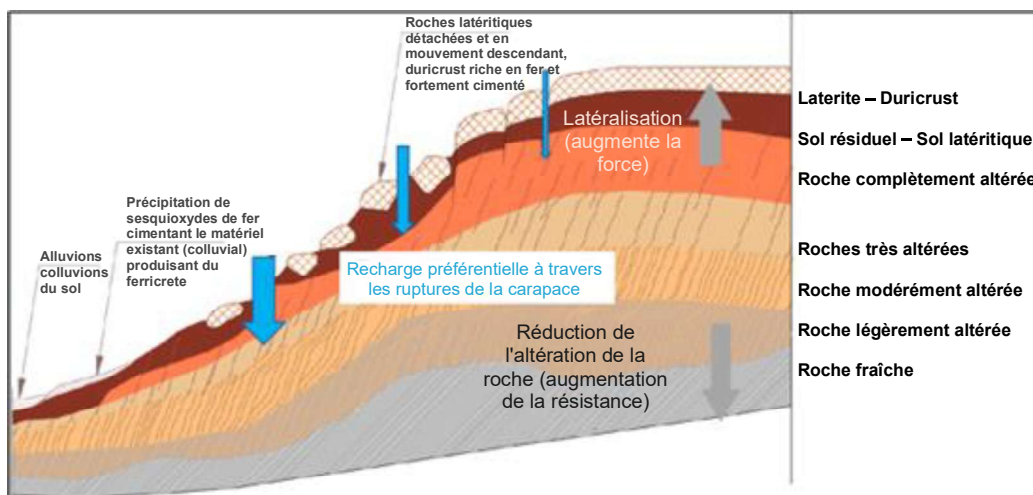
La proportion des précipitations totales qui s'infiltré dans l'aquifère de l'hématite et les formations adjacentes sera affectée par un certain nombre de facteurs :

1. L'intensité des précipitations : plus l'intensité est élevée, plus l'infiltration est faible.
2. La topographie : on peut s'attendre à une réduction de l'infiltration sur les pentes abruptes et à une infiltration plus importante dans les dépressions localisées où les eaux de ruissellement s'accumulent et forme des mares.
3. Les couches superficielles : les couches dures, compactes et cimentées à la surface ou près de la surface (par exemple, les latérites) peuvent réduire l'infiltration.
4. Le type de végétation : le projet Simandou comprend principalement des prairies de montagne avec des zones de forêts galeries dans les ravins. Les possibilités d'infiltration sont renforcées dans les zones d'herbe.
5. La géologie sous-jacente : la géologie à l'affleurement est très variable, avec des degrés d'altération divers dans les différents types de roches.
6. Les sites de glissements de terrain : là où des glissements de terrain se sont produits, la carapace latéritique dure typique des pentes montagneuses est absente. Dans ces zones, les sols sont tendres, sablonneux et perméables et supportent une végétation forestière ou des arbustes denses. L'infiltration est probablement plus importante que là où la carapace latéritique est encore en place. Un ruissellement rapide peut entraîner une recharge préférentielle dans ces ruptures de la carapace (Figure 7-1).

La quantité de recharge variera donc considérablement entre les différentes parties des zones de ressources. D'une manière générale, la recharge est élevée dans tous les bassins versants des montagnes en raison des fortes précipitations annuelles. Les taux de recharge à l'écart de la montagne sont nettement inférieurs en raison de précipitations annuelles moyennes plus faibles. La majeure partie de la recharge des eaux souterraines a lieu entre le milieu et la fin de la saison des pluies, après la résorption des déficits d'humidité du sol accumulés tout au long de la saison sèche.

Dans les plaines du socle, où les zones non saturées sont plus minces, la recharge des eaux souterraines atteint la nappe phréatique relativement rapidement.





**Figure 7-1: Profil d'altération simplifié montrant la recharge préférentielle des eaux souterraines à Simandou (d'après : Jeffcoate, 2013)**

## 7.2 Estimation des taux de recharge des eaux souterraines

Les taux de recharge des eaux souterraines pour le Pic de Fon ont été estimés par SWS (2012) au moyen de :

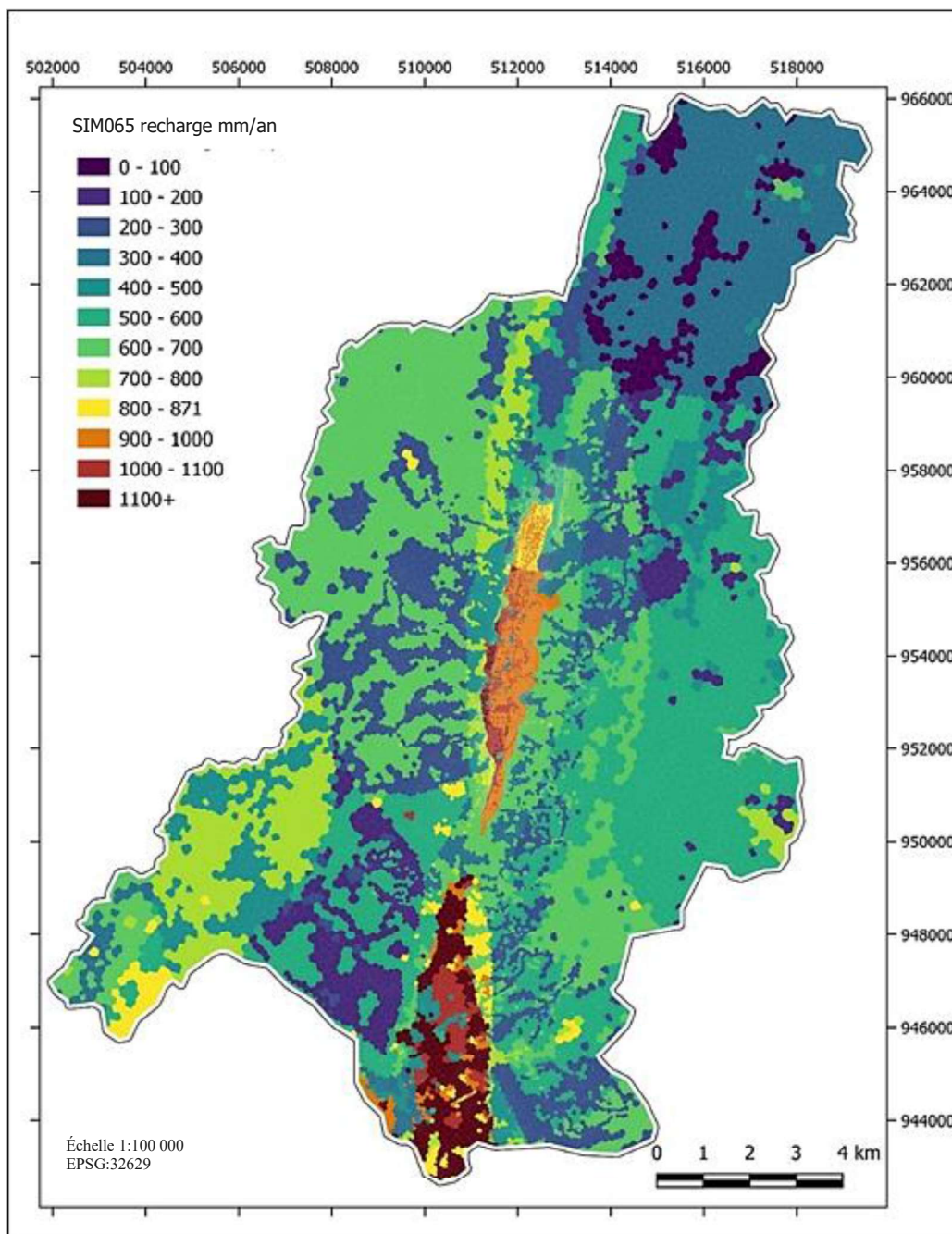
- La modélisation du bilan hydrique de deux bassins versants étudiés (Whisky 1 et Whisky 2),
- L'évaluation du débit de base mesuré lors des études d'accrétion du débit, et
- L'évaluation des fluctuations du niveau des eaux souterraines.

Les taux de recharge des eaux souterraines calculés à partir du débit de base total enregistré au cours de l'étude d'accrétion de 2009 s'élèvent à 631 mm/an sur le Pic de Fon.<sup>21</sup> Les calculs de recharge mis à jour par SRK (2023b) pour le nord du Pic de Fon suggèrent que les taux pourraient atteindre 1 100 mm/an. Les taux de recharge des eaux souterraines ont également été estimés par SRK pour Ouéléba. Figure 7-2 montre la répartition spatiale des estimations moyennes à long terme de la recharge des eaux souterraines pour Ouéléba et le Pic de Fon, y compris les bassins versants environnants. Les observations suivantes sont faites :

- La recharge des nappes phréatiques est élevée dans les montagnes d'Ouéleba et du Pic de Fon par rapport aux zones de plaine environnantes, allant de 900 à 1 100 mm/an.
- Dans la partie la plus septentrionale de Ouéléba, la recharge de la nappe phréatique est légèrement plus faible, entre 800 et 1 000 mm/an.

<sup>21</sup>Cette analyse a supposé que le débit de base était constant tout au long de l'année aux taux observés lors de l'étude sur l'accroissement du débit. Cette hypothèse a été jugée raisonnable pour les principaux points de décharge qui sont censés présenter une faible variation saisonnière du débit de base tout au long de l'année. En outre, les petits bassins versants alimentés par des sources d'eau souterraine localisées ont tendance à présenter une augmentation significative du débit de base pendant la saison des pluies. Il est donc possible que les estimations de la recharge utilisant les données d'accumulation de flux de la saison sèche sous-estiment légèrement la recharge totale car elles ne tiennent pas compte de la recharge de la saison humide dans les aquifères localisés peu profonds qui se déversent rapidement dans les eaux de surface.

- La recharge des basses terres varie de moins de 100 à 800 mm/an. La recharge dans les zones de plaine est principalement affectée par la couverture arborée (avec une recharge réduite résultant des taux élevés d'évapotranspiration pérenne), la répartition des précipitations et la pente des collines.



**Figure 7-2: Estimation de la recharge de la nappe phréatique à travers Ouéléba et les bassins versants environnants (SRK, 2023b)**



### 7.3 Évaluation des temps de réponse de la recharge

Les fluctuations du niveau des eaux souterraines ont été analysées afin d'identifier la relation entre les précipitations et la recharge et les temps de latence dans la zone non saturée (annexe D).

Des temps de latence plus longs reflètent généralement des zones non saturées plus épaisses (à des centaines de mètres de profondeur par endroits), ou des zones situées sous une nappe phréatique perchée. Des temps de latence plus courts reflètent des zones non saturées plus fines ou la présence de voies de recharge préférentielles, par exemple des structures.

Les temps de latence les plus longs sont observés dans RC08OUL329, installé sous le gisement au nord-ouest de Ouéléba où les niveaux d'eau ont montré une réponse initiale de recharge vers la fin de la saison des pluies (octobre 2010), puis ont continué à augmenter tout au long de la saison sèche, et ont finalement atteint un pic au début de la saison des pluies suivante en mars/avril 2011. Les réponses à la recharge des corps minéralisés dans l'extrême nord de Ouéléba montrent des temps de latence plus courts que ceux du centre et du nord de Ouéléba, ce qui est interprété comme étant lié à l'étendue réduite de la zone de transition et à une zone non saturée plus mince dans l'extrême nord.

Les phyllites et les quartzites des flancs à l'ouest et à l'est de Ouéléba Nord présentent des réactions de recharge rapide à certains endroits. Les temps de latence plus longs dans les flancs de la phyllite et dans la phyllite centrale sont interprétés comme reflétant la recharge par le minerai friable, étant donné que ces installations se trouvent généralement en profondeur et sous ou à côté du corps minéralisé saturé.

Les réponses de Canga et Basement montrent des réponses rapides et subquotidiennes aux précipitations dans les installations peu profondes de BH07 (<12 m). Le capteur supérieur montre des niveaux d'eau atteignant la surface du sol avant de reculer rapidement. WD07 montre également des réponses à la saison des pluies, avec des données d'août 2022 suggérant des fluctuations à l'échelle du mètre et des temps de latence inférieurs à la semaine en réponse aux événements pluvieux.

## 8 DEBIT D'EAU SOUTERRAINE

Il n'y a actuellement aucun prélèvement d'eau souterraine à Ouéléba ou au Pic de Fon, de sorte que tous les rejets d'eau souterraine sont naturels. Cette section présente une vue d'ensemble des mécanismes d'écoulement des eaux souterraines identifiés sur le site, suivie des détails de l'analyse du débit de base des eaux souterraines, des études de la qualité de l'eau et de l'interprétation hydrogéologique utilisée pour étayer l'évaluation de l'écoulement des eaux souterraines.

### 8.1 Aperçu des mécanismes d'écoulement des eaux souterraines

Les eaux souterraines s'écoulent du corps minéralisé par écoulement latéral vers les sources et les cours d'eau, ou par drainage vertical à travers les phyllites basales. Ce dernier est probablement négligeable en termes de volume d'écoulement de la montagne en raison des très grandes épaisseurs de phyllite et de roche de base sous-jacentes et de la perméabilité réduite en profondeur. Les sources et les cours d'eau situés sur les flancs de la montagne sont donc les principaux points d'écoulement.

La majorité des sources trouvées sur les flancs de l'Ouéléba et du Pic de Fon se trouvent à des altitudes qui correspondent à la nappe phréatique prouvée (au niveau ou en dessous). Il y a des exceptions à cette règle sur les deux montagnes où l'on trouve des sources à des altitudes plus élevées que la nappe phréatique prouvée, bien qu'il faille noter qu'un grand nombre des sources les plus élevées cartographiées lors de l'étude des sources de la saison sèche 2008 sur Ouéléba ont été trouvées sèches lors de l'étude de l'accumulation des flux de la saison sèche 2022, ce qui suggère que l'altitude des lignes de sources peut connaître des variations saisonnières et interannuelles. Les sources observées au-dessus de la nappe phréatique prouvée sont attribuées à des nappes phréatiques localisées peu profondes (et potentiellement perchées) dans les phyllites à faible perméabilité. Ceci est particulièrement évident le long du côté ouest de la zone centrale du Pic de Fon.

À Ouéléba, les sources sont plus nombreuses dans les zones d'affleurement des phyllites, dont beaucoup sont situées plus bas que le contact avec les phyllites. La plupart de ces sources ont un faible rendement et sont probablement attribuables aux systèmes locaux d'eaux souterraines sur les flancs.

L'écoulement des eaux souterraines de l'aquifère du gisement est principalement contrôlé par des points de déversement sur les phyllites peu perméables qui l'entourent. Ces points de déversement sont évidents dans le bassin versant de Fokou Ouest (Pic de Fon) où l'élévation du contact avec la surface de la phyllite diminue jusqu'à la même élévation que la nappe phréatique du gisement, formant ainsi une source de contact à environ 1 100 mRL. Le même mécanisme de décharge est observé dans la forêt de Boyboyba au nord de Ouéléba.

Un mécanisme similaire est présent dans les bassins versants de Woron, sur le versant sud-ouest de Ouéléba, où l'aquifère du corps minéralisé, plus perméable, s'allume au contact des itabirites compactes, moins perméables.

La vallée de l'éperon occidental au Pic de Fon est le seul endroit où les eaux souterraines s'écoulent à travers les hématites et/ou les itabirites perméables (sous forme de sources et de débit de base) en l'absence d'une barrière peu perméable à l'écoulement.

Les traces de failles cartographiées à la surface coïncident avec des sources sur des affleurements de phyllite. Ces sources ont généralement un débit relativement faible et ne sont pas considérées comme des zones importantes d'écoulement des eaux souterraines ou des conduits pour l'écoulement des corps minéralisés. Une exception possible à cette règle est l'écoulement primaire dans le bassin versant de Kinyeko, qui peut être attribué à des contrôles structuraux au sein de la phyllite, la source se trouvant en aval du contact entre le corps minéralisé et la phyllite.<sup>22</sup>

Les quartzites peuvent également constituer un mécanisme d'évacuation du gisement, car il semble qu'elles s'étendent plus au nord que ne le suggèrent les modèles géologiques antérieurs. Le flux d'eau souterraine à travers les quartzites est considéré comme faible par rapport à l'aquifère du corps minéralisé.

---

<sup>22</sup>La nature de la connexion hydraulique entre l'aquifère du gisement dans le nord-ouest de l'Oueleba et le bassin versant de Kinyeko est incertaine ; l'écoulement des eaux souterraines peu profondes dans les unités superficielles est également possible.



L'écoulement le long du côté est du Pic de Fon est fréquemment associé à des sources contrôlées par la topographie dans l'itabirite fracturée. Les sources sont également évidentes aux contacts lithologiques, à la fois au contact minéral friable – itabirite compacte, et au contact itabirite compacte – phyllite. La source Whisky 1 en est un exemple (située au nord-est du Pic de Fon). Le niveau de la nappe phréatique est ici à la même hauteur que le contact phyllite-itabirite et l'écoulement le long de la limite est marqué par un ensemble de sources. Plusieurs sources contrôlées par la topographie sont également cartographiées dans les phyllites en aval du contact avec l'itabirite sur le flanc est du Pic de Fon. Nombre d'entre elles sont attribuées aux eaux souterraines qui se déchargent des itabirites dans des strates perméables peu profondes avant de se transformer en sources ou en débit de base plus en aval.

## 8.2 Analyse du débit de référence du site minier

Les aquifères des gisements de Ouéléba et du Pic de Fon jouent un rôle important dans le maintien des débits de base dans les bassins versants qui drainent la chaîne du Simandou.

Les enquêtes sur les sources réalisées au cours de la saison humide de 2006 et de la saison sèche de 2008 sont résumées dans le Tableau 8-1.

**Tableau 8-1: Débit de source (L/s) sur l'Ouéléba et le Pic de Fon**

SAISON SÈCHE (JANVIER – FÉVRIER 2008)						
	Pic de Fon			Ouéléba		
	<u>Est</u>	<u>Ouest</u>	<u>Tous</u>	<u>Est</u>	<u>Ouest</u>	<u>Tous</u>
<b>Nombre de sources</b>	105	71	176	35	67	102
<b>Débit total (L/s)</b>	16,5	54,3	70,6	4,4	16,5	20,9
<b>Débit par source (L/s)</b>	0,16	0,77	0,40	0,13	0,25	0,21
SAISON DES PLUIES (AOÛT – OCTOBRE 2006)						
	Pic de Fon			Ouéléba		
	<u>Est</u>	<u>Ouest</u>	<u>Tous</u>	<u>Est</u>	<u>Ouest</u>	<u>Tous</u>
<b>Nombre de sources</b>	60	31	91	29	29	58
<b>Débit total (L/s)</b>	26,0	6,57	33,0	10,9	16,3	27,2
<b>Débit par source (L/s)</b>	0,51	0,26	0,42	0,52	0,56	0,54

\*Remarque : Le nombre total de sources étudiées = 278 pour l'étude de la saison sèche et 149 pour l'étude de la saison des pluies.

L'étude de la saison sèche 2008 sur l'augmentation du débit a identifié des zones spécifiques d'augmentation de l'écoulement des eaux souterraines dans le bassin versant de l'éperon occidental (nord-ouest du Pic de Fon) et dans le bassin versant de Fokou Ouest (sud-ouest du Pic de Fon). Ces résultats ont été corroborés par les études de saison sèche de 2009, 2012 et 2022 qui, en outre, ont identifié le bassin versant de Worongbe au sud-ouest de Ouéléba, le bassin versant de Kinyeko au nord-ouest de Ouéléba et le bassin versant de Boyboyba au nord-est de Ouéléba comme étant des zones où le débit des eaux souterraines est significativement élevé.

Figure 8-1 à Figure 8-3 montrent les débits des cours d'eau drainant respectivement Ouéléba, la ligne de crête centrale et le Pic de Fon à partir de l'étude de la saison sèche 2009. Une carte comparable de Ouéléba provenant de l'étude d'accrétion de la coulée de 2022 est présentée à la Figure 8-4.

Figure 8-1 à Figure 8-4 montrent que les débits de la rivière Kinyeko qui draine le nord-ouest de Ouéléba, de la rivière Boyboyba qui draine le nord-est de Ouéléba, de la rivière Woron qui draine le sud-ouest de Ouéléba, de la rivière de l'éperon occidental qui draine le nord-ouest du Pic de Fon et de la rivière Fokou Ouest qui draine le sud-ouest du Pic de Fon, sont significativement plus importants que ceux de la plupart des autres cours d'eau. Ces cours d'eau sont considérés comme les principales voies d'écoulement des eaux souterraines des deux montagnes.

En 2009, le débit total de Ouéléba, de la ligne de crête centrale (la zone entre Ouéléba et le Pic de Fon) et du Pic de Fon a été calculé comme 392 L/s, 304 L/s et 746 L/s, respectivement, ce qui donne un taux total d'écoulement des eaux souterraines de 1 442 L/s pour l'ensemble de la zone d'étude (SWS, 2012). La division de ces totaux par les bassins versants respectifs a donné des débits moyens normalisés de 14,0 L/s/km<sup>2</sup> pour Ouéléba, 20,5 L/s/km<sup>2</sup> pour la ligne de crête centrale et 20,0 L/s/km<sup>2</sup> pour le Pic de Fon. Cette analyse montre que Ouéléba rejette moins d'eau par rapport à son bassin versant que le reste de la zone d'étude.

Les débits moyens pour chaque montagne ont été utilisés pour évaluer les captages d'eau souterraine projetés. Ces bassins versants ont été estimés en divisant le débit réel observé par le débit moyen et en multipliant ce ratio par la superficie du bassin versant des eaux de surface. Par exemple, un débit normalisé de 28 L/s/km<sup>2</sup> pour un bassin versant d'eau de surface de 1 km<sup>2</sup> à Ouéléba, suggère que le bassin versant d'eau souterraine pourrait être de 2 km<sup>2</sup>, (puisque 28 L/s/km<sup>2</sup> est le double du débit normalisé moyen pour Ouéléba de 14 L/s/km<sup>2</sup>). Remarque : les bassins versants sont indicatifs et non absolus, car ils ne tiennent pas compte de facteurs tels que l'hétérogénéité de la recharge des eaux souterraines et des propriétés de l'aquifère.

L'étude 2022 sur l'accrétion de la coulée de Ouéléba a été entreprise dans les mêmes cours d'eau que l'étude 2009 sur Ouéléba. Les débits de base de l'Ouéléba en 2009 et 2022 sont résumés dans le Tableau 8-2.



**Tableau 8-2: Synthèse des résultats de l'étude d'accrétion de flux pour 2022 et 2009 sur Ouéléba**

Variable	Localisation	2022	2009 <sup>23</sup>
<b>Débit total L/s</b>	Côté ouest	155,2 (56 %)	227,9 (58 %)
	Côté est	124,0 (44 %)	164,1 (42 %)
	<b>Ouéléba Total</b>	<b>279,2 (100 %)</b>	<b>392,0 (100 %)</b>
<b>Bassins versants (km<sup>2</sup>)</b>	Côté ouest	16,21	17,37
	Côté est	16,17	10,58
	<b>Ouéléba Total</b>	<b>32,38</b>	<b>27,95</b>
<b>Débit de base spécifique (L/s/km<sup>2</sup>)</b>	Côté ouest	9,6	13,1
	Côté est	7,7	15,5
	<b>Ouéléba Total</b>	<b>8,6</b>	<b>14,0</b>

La comparaison des relevés de 2022 et de 2009 montre que les débits de base et les débits de base spécifiques étaient significativement plus faibles en 2022 qu'en 2009. Les débits de base plus faibles en 2022 peuvent s'expliquer par les précipitations plus faibles en 2021 qu'en 2008, avant l'étude de 2009, et démontrent que l'écoulement des eaux souterraines (débit de base) est variable d'une année à l'autre et que cette variation est susceptible de refléter les précipitations de l'année précédente.

---

<sup>23</sup>Source : SWS (2012) Tableau 3.4

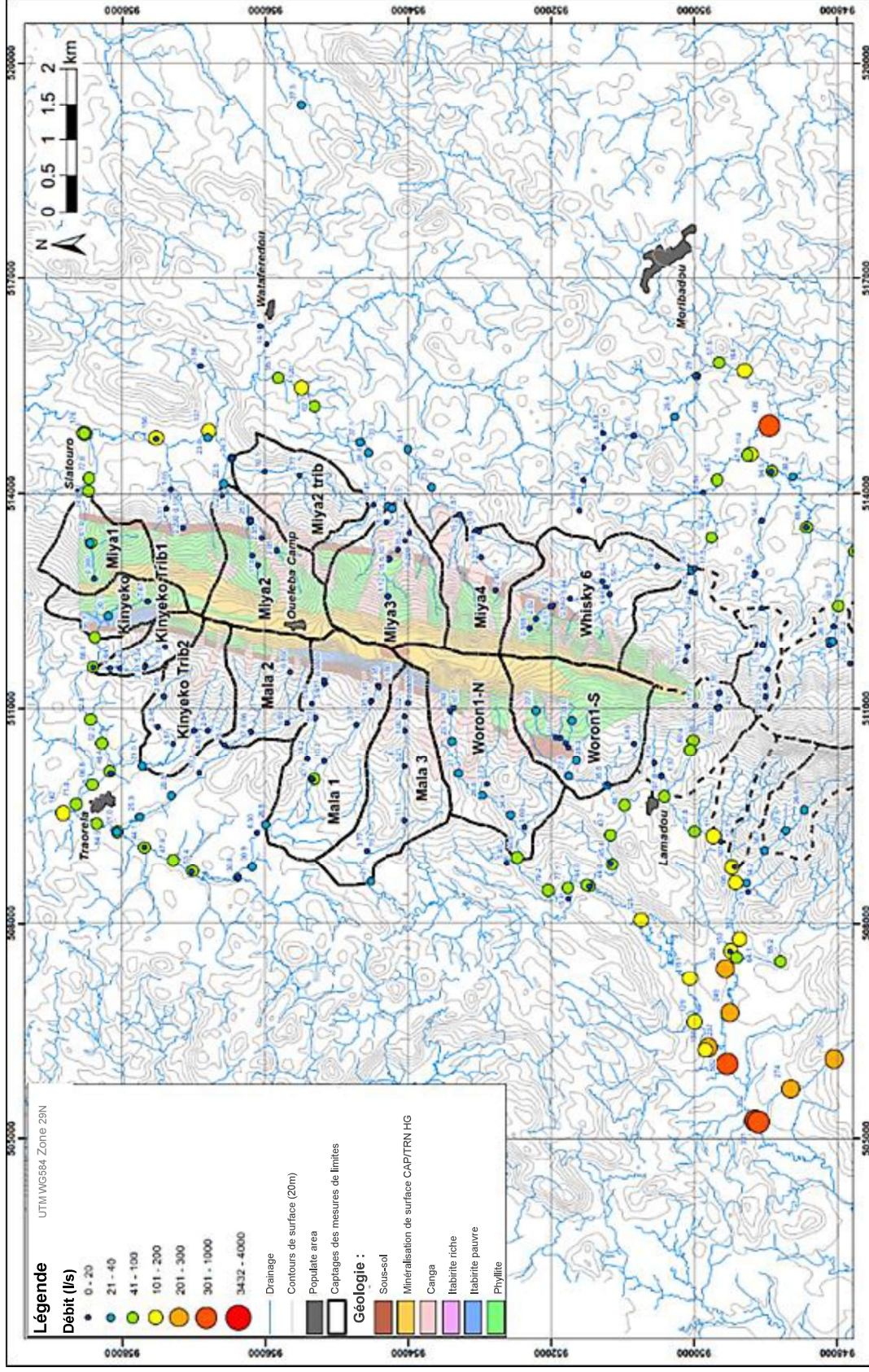


Figure 8-1: Résultats de l'enquête sur l'accrétion de débit en saison sèche 2009 : Ouéléba (d'après SWS, 2012)



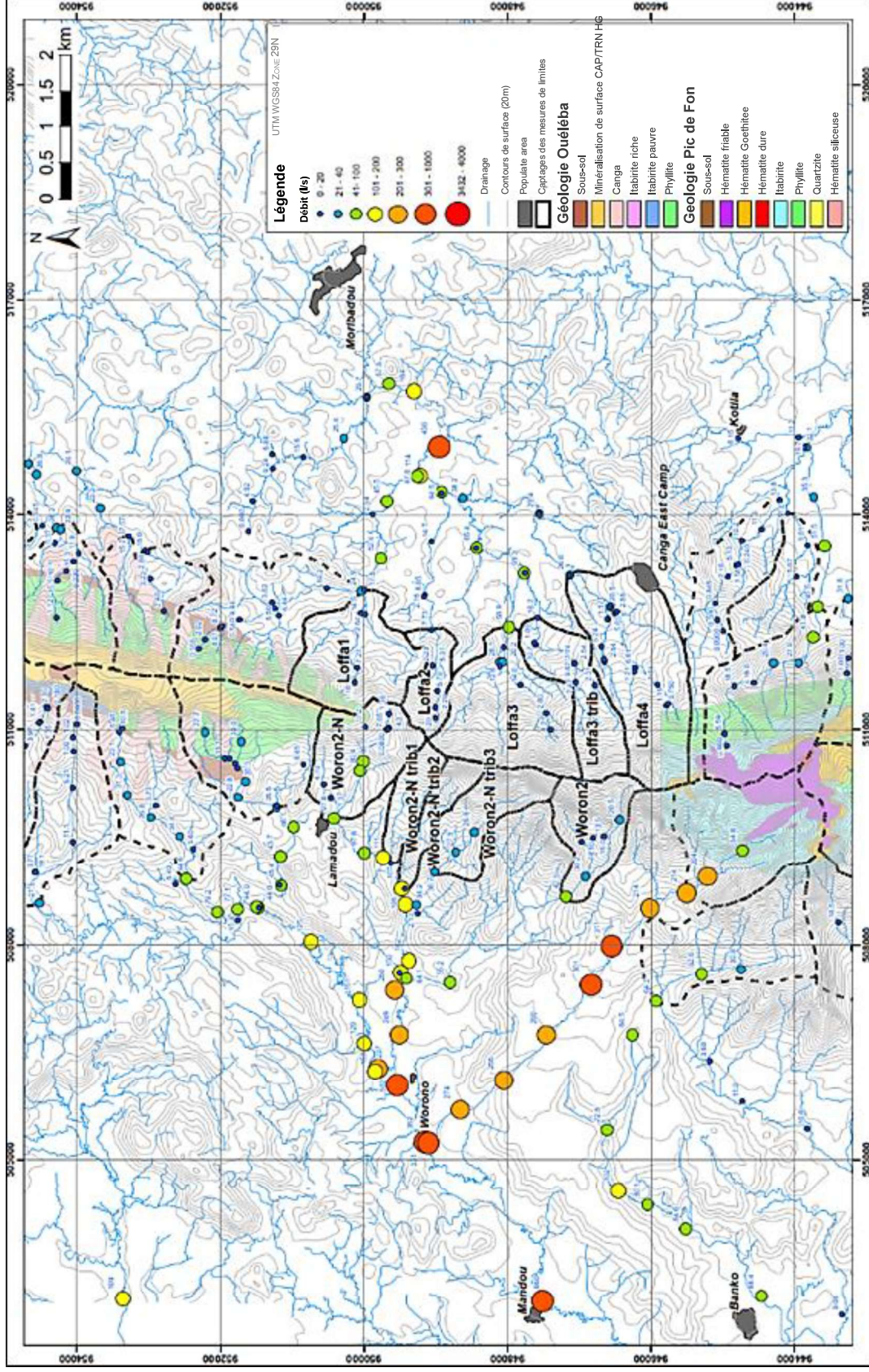


Figure 8-2: Résultats de l'enquête sur l'accrétion de débit en saison sèche 2009 : ligne de crête centrale (d'après SWS, 2012)



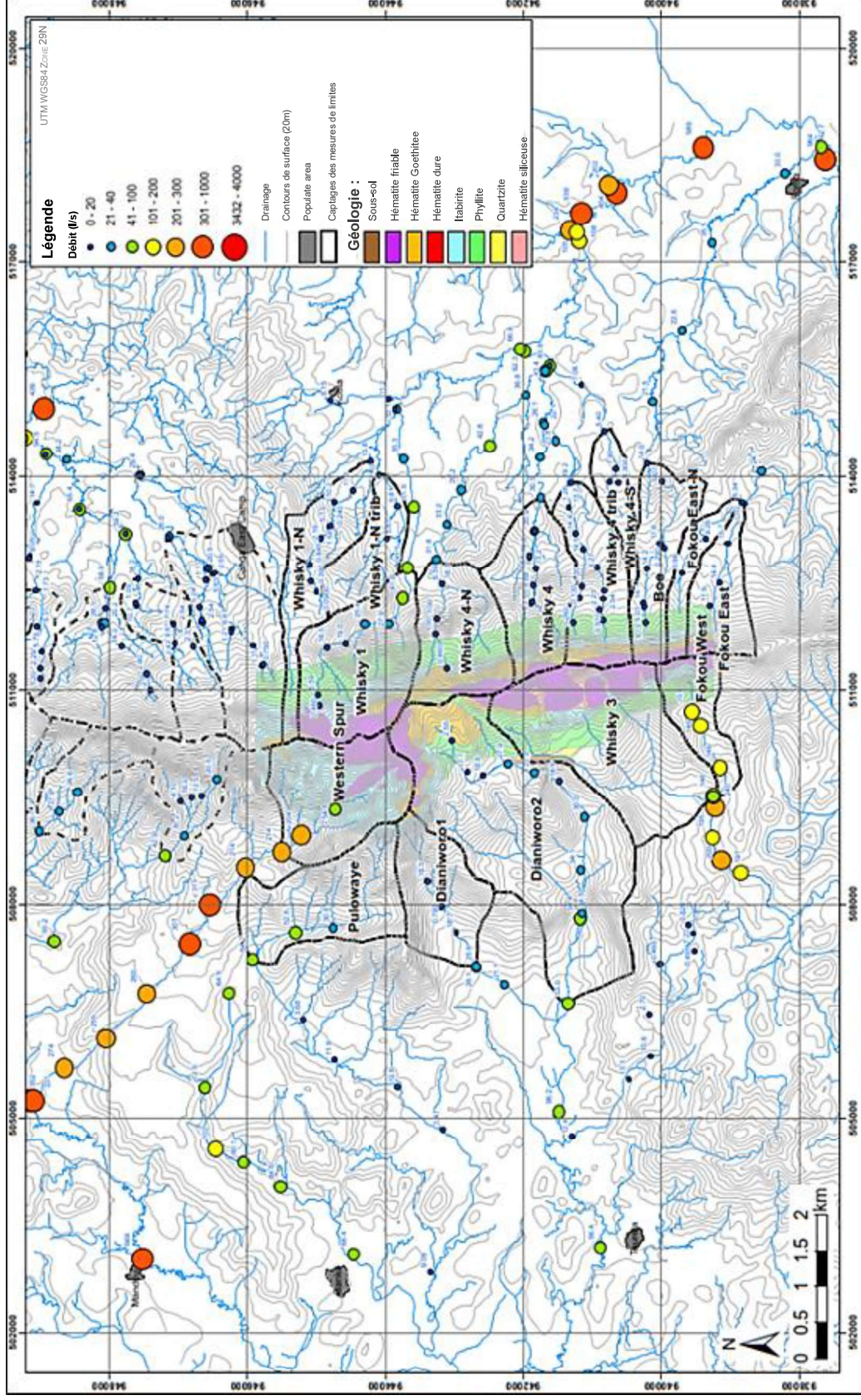


Figure 8-3: Résultats de l'enquête sur l'accrétion de débit en saison sèche 2009 : Pic de Fon (d'après SWS, 2012)