



PROJET GORO NICKEL

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU PARC A RESIDUS MINIERS DE LA KWE OUEST

JUILLET 2007

RESUME DU RAPPORT

Le rapport présente les résultats des études qui ont mené à la compréhension du régime d'écoulement des eaux souterraines sur le site de l'aire de stockage des résidus miniers de la Kwe Ouest, en incluant l'étude de la source WK17 localisée en aval de la berme.

Les paragraphes qui suivent présentent un résumé succinct des principales conclusions des études.

Le contexte géomorphologique.

Les études ont montré que le site de l'aire de stockage (le site de la Kwe Ouest) est totalement isolé de la Plaine des Lacs et des circulations importantes d'eau souterraine à cet endroit qui contrôlent le profil d'altération des terrains en aval.

Au site de la Kwe Ouest, le profil latéritique est généralement simple et peu développé, à cause de sa récente histoire géologique de création. Une importante différence dans les profils est cependant remarquée entre l'aval de la berme où on rencontre un domaine cuirassé à profil épais et l'amont de la berme qui est plutôt caractérisé par un domaine colluvial à profil peu développé.

La cartographie de surface structurale met en place deux systèmes de linéaments, dont les directions principales sont N50° -N80°E et N130°-140° E.

Les phénomènes d'effondrement

Les phénomènes d'effondrement au site de l'aire de stockage sont, pour la majorité, des paléochenaux en cavités dans le système colluvial, et sont généralement rencontrés en amont de la berme. Toutes ces cavités ont été rencontrées entre 0 et 3 m de profondeur, dans un secteur du bassin où la latérite sera excavée jusqu'à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 5 à 10 m.

Des cavités sur- et sous-cuirasse sur un petit domaine de palier rocheux en cours d'érosion sont aussi observés dans la partie sud de la berme.

Les quelques dolines liées aux contextes structuraux dans le domaine cuirassé, dont la source WK17, sont rencontrées essentiellement en aval de la berme.

Le contexte hydrogéologique

L'examen des profils piézométriques montre une correspondance avec les précipitations et une bonne adéquation des creux et bosses et des tendances croissante/décroissante. Cette similitude des profils, qui est surtout marquée pour

les piézomètres aménagés dans le socle rocheux, suggère l'existence d'un bon degré de connectivité entre l'aquifère du roc et le régime pluviométrique de surface.

La source WK17

La source WK17 est l'expression en surface d'une zone de résurgence d'eau souterraine formant une cavité quasi-circulaire formée dans les dépôts meubles d'un diamètre de l'ordre de 6 à 7 mètres et d'une profondeur de l'ordre de 3 à 4 mètres. Le débit de la source est de l'ordre de 30 L/s.

Les dépôts meubles à l'endroit de la source auraient environ 15 m d'épaisseur. Lors du forage du WKBH102, l'existence d'un lien hydraulique entre le roc et la source a été démontrée. La comparaison des résultats d'analyses chimiques réalisées sur les échantillons d'eau tend à appuyer l'hypothèse d'une alimentation de la source à partir de l'aquifère du socle rocheux.

Les essais de pompage réalisés au site de la source ont causé une baisse de niveau dans des piézomètres situés à plusieurs centaines de mètres. L'onde de rabattement se serait principalement propagée latéralement au niveau du roc et verticalement dans les dépôts meubles. Il existerait donc un réseau de fractures dans le roc avec un degré d'interconnexion significatif. La répartition spatiale des piézomètres affichant une réaction au pompage, indique que ce réseau de fractures est généralisé et n'est pas le fait d'uniquement un ou deux linéaments. Par ailleurs, ce réseau de fractures serait vraisemblablement de volume limité comme en témoigne la rapidité avec laquelle l'onde de rabattement s'est propagée. Finalement la réaction au pompage n'est pas homogène et isotrope comme en témoigne la différence de réaction entre les piézomètres localisés dans les secteurs de l'appui sud et ceux de l'appui nord.

En dépit de certaines limitations discutées dans le rapport, l'interprétation quantitative des essais de pompage indique une valeur de conductivité hydraulique de l'ordre de 7×10^{-4} m/s, ce qui est comparable à certains résultats d'essais obtenus dans des zones de roc très fracturé.

Le degré de connectivité hydraulique significatif avec l'aquifère rocheux, et ce sur une proportion relativement grande de la surface de l'aire de stockage, fait en sorte que la source WK17 serait un excellent point de surveillance de la qualité de l'eau souterraine et, le cas échéant, un excellent point de contrôle hydraulique pour intercepter les eaux souterraines en provenance de l'aire de stockage.

TABLE DES MATIÈRES

SECTION	PAGE
RESUME DU RAPPORT	i
1.0 INTRODUCTION	1
1.1 Objectif du présent rapport	1
1.2 Organisation du rapport	1
2.0 CONTEXTE GÉOLOGIQUE	3
2.1 Introduction	3
2.2 Sous-Bassin Kué Ouest au Massif du Sud	6
2.2.1 Domaines géologiques et hydrogéologiques	6
2.2.2 Les grandes lignes structurales	7
2.3 Cartographie Géologique	9
2.3.1 Cartographie structurale	9
2.3.2 Géologie de surface	10
2.4 Profils latériques	12
2.4.1 Description minéralo-chimique	12
2.4.2 La typologie des profils Kué Ouest	16
2.5 Les phénomènes d'effondrement	17
2.5.1 Morphogenèse	17
2.5.2 Le contexte des dolines liées aux nappes profondes. Exemple Doline « LE TROU »	19
2.5.3 Exemple de morphologie du Lac Xere Wapo.	19
2.5.4 Exemple de cavités communes sur le plateau de Goro et la KO2.	20
2.5.5 Les paléochenaux en zone colluvionaire	21
2.5.6 L'érosion de surface sur le dôme rocheux	21
2.5.7 L'expérience des linéaments dans la vallée Kué Est.	22
2.6 Tomographie électrique 2D	23
2.6.1 Base de données	23
2.6.2 Sélection des zones mesurées et Objectifs	24
2.6.3 Interprétations géologiques des quatre profils de mesures ...	26
2.7 La Source WK17	30

2.7.1	Cartographie géologique et hydrogéologique.....	30
2.7.2	Coupe géologique et interprétation des forages et de la tomographie.....	31
3.0	CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	35
3.1	Unités Hydrogéologiques	35
3.1.1	Aquifère superficiel (cuirasse de fer/grenaille)	35
3.1.2	Aquitard (limonite)	35
3.1.3	Aquifère profond (saprolite).....	36
3.1.4	Aquifère du socle (zones de fractures profondes).....	36
3.1.5	Recharge des aquifères	36
3.1.6	Variations saisonnières des niveaux de la nappe phréatique	37
3.2	Secteur de l'aire de stockage de la Kwé Ouest - Piézométrie.....	38
3.2.1	Profils temporels et gradient verticaux	38
3.2.2	Cartes piézométriques et écoulement horizontal	39
3.2.3	Conductivité Hydraulique.....	40
4.0	ÉTUDES AU SITE DE LA SOURCE WK17	41
4.1	Inspection visuelle, échantillonnage et bathymétrie	41
4.2	Jaugeage du ruisseau	41
4.3	Relevés Géophysiques.....	41
4.4	Forage et aménagement des piézomètres WKBH102 et 103	42
4.4.1	Forage	42
4.4.2	Aménagement de piézomètres.....	43
4.5	Essais de pompage à la source WK17.....	43
4.5.1	Interprétation des résultats	44
4.6	GÉOCHIMIE	1
5.0	CONCLUSIONS.....	2

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	2.1	- Comparaison des débits des eaux de surface – Période sèche de Décembre 2005 à Janvier 2006
Tableau	2.2	- Paramètres du profil latéritique
Tableau	2.3	- Coordonnées des lignes et leurs Objectifs
Tableau	3.1	- Valeurs moyennes de conductivité hydraulique
Tableau	4.1	- Résumé des travaux de terrain reliés au site de la source
Tableau	4.2	- Coordonnées des forages autour de la source WK17
Tableau	4.3	- Paramètres d’opération des essais hydrauliques au WK17
Tableau	4.4	- Commentaires sur les profils piézométriques de l’essai de pompage du 15 mai
Tableau	4.5	- Liste des piézomètres à corde vibrante
Tableau	4.6	- Interprétation de l’essai de pompage du 15 mai - Paramètres hydrauliques
Tableau	4.7	- Résultats analyses chimiques des eaux

LISTE DES FIGURES

Figure	2.1	- Interprétation des analyses de linéaments-Massif du Sud
Figure	2.2	- Schéma des compartiments
Figure	2.3	- Distribution chimiques en profil total – Analyses sur forages carottés
Figure	2.4	- Photos minéralogiques (MET)
Figure	2.5	- Photos minéralogiques (Lame mince polarisée)
Figure	2.6	- Section globale du bassin
Figure	2.7	- Comparaison des profils
Figure	2.8	- Morphogenèse du bassin
Figure	2.9	- Photographie de l’écoulement profond (Exercice minier)
Figure	2.10	- La doline « Le Trou »
Figure	2.11	- Photographies de cavités sous cuirasse
Figure	2.12	- Photographie de paléochenaux
Figure	2.13	- Erosion sur dôme
Figure	2.14	- Synthèse des données géologiques, granulométriques, hydrogéologiques, géo-électriques du site de Goro
Figure	2.15	- Profil tomographique Ligne1 -Travers du bassin-berme
Figure	2.16	- Profil tomographique linéament Sud et résultat de conductivité
Figure	2.17	- Degré de serpentinsation sur Dunite
Figure	2.18	- Profil tomographique Lignes 6-Nord de la berme
Figure	2.19	- Profil tomographique Ligne 14-Piémont Nord-ouest
Figure	2.20	- Profil tomographique Ligne 10-Flanc sud du bassin KO2
Figure	2.21	- Profil tomographique Ligne 11-Aval de la lavaka
Figure	2.22	- Profil tomographique Ligne 15-Exutoire de la lavaka
Figure	2.23	- WKBH104 sur le profil tomographique Ligne 15
Figure	2.24	- WKBH104. Photographies minéralogiques
Figure	2.25	- Interprétation de la conductivité des réseaux serpentins en roche-mère sur un profil vertical
Figure	2.26	- Photographie de la fracturation cuirassée de surface
Figure	2.27	- Coupe géologique NW-SE proche de la Source – Section « D »
Figure	2.28	- WKBH 102
Figure	2.29	- WKBH 103
Figure	2.30	- Profil tomographique « LigneLS1 »
Figure	2.31	- Profil tomographique « LigneLS2 »
Figure	3.1	- Aquifères de Goro
Figure	3.2	- Aquifère de cuirasse et grenaille de fer

Figure	3.3	-	Aquifère profond
Figure	3.4	-	Surface piézométrique – Saison sèche
Figure	3.5	-	Surface piézométrique – Saison humide
Figure	3.6	-	Synthèse des valeurs de K
Figure	4.1	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mini-Trolls
Figure	4.2	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mesures Manuelles (153-160m)
Figure	4.3	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mesures Manuelles (160-165m)
Figure	4.4	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mesures Manuelles (166-168m)
Figure	4.5	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mesures Manuelles (170-175m)
Figure	4.6	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mesures Manuelles (175-181m)
Figure	4.7	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-1-3 (chainage 400)
Figure	4.8	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-4-8 (chainage 500)
Figure	4.9	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-9-10 (chainage 705)
Figure	4.10	-	Essais de pompage - Profils piézométriques - WF-11-16 (chainage 400)
Figure	4.11	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-17-23 (chainage 600)
Figure	4.12	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-24-29 (chainage 400)
Figure	4.13	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-30-36 (chainage 600)
Figure	4.14	-	Profil des concentrations en magnésium
Figure	4.15	-	Profil des valeurs de pH

LISTE DES CARTES

Carte	2.1	-	Relief géologique 1/50 000
Carte	2.2	-	Bassins versants de la Kué
Carte	2.3	-	Photo aérienne 1985 et grandes lignes des interprétations structurales
Carte	2.4	-	Carte géomorphologique et structurale des sous-bassins KO1-KO2 de la Kué Ouest
Carte	2.5	-	Domaines morphologiques du bassin KO2 de la Kwé Ouest
Carte	2.6	-	Epaisseur du profil latéritique
Carte	2.7	-	Sections tomographiques sur les linéaments
Carte	2.8	-	Sections tomographiques et forages sur le fond 3D topographique
Carte	2.9	-	Intersection de la topographie et du niveau piézométrique
Carte	4.1	-	Plan de localisation – Région de l'aire de stockage de la Kwé Ouest

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photo	4.1	-	Vue de la source WK17
Photo	4.2	-	Vue de la source WK20
Photo	4.3	-	Changement de couleur de la source WK17
Photo	4.4	-	Essai de pompage à la source WK17
Photo	4.5	-	Essai de pompage à la source WK17

LISTE DES ANNEXES

Annexe	A	-	Rapport géotechnique – Golder 474
Annexe	B	-	Rapports d'études spécifiques réalisées par Golder dans le secteur de la Kwé Ouest
Annexe	C	-	Rapports d'études géophysiques de Tomographie Electrique 2D – Préparé par la firme <i>Geophysical</i>
Annexe	D	-	Rapport sur les dolines – Préparé par GCT
Annexe	E	-	Données factuelles complémentaires

1.0 INTRODUCTION

Dans le cadre du projet de développement minier Goro Nickel, il est prévu d'utiliser l'aire de stockage de la Kwé¹ Ouest (KWRSF) pour accumuler les résidus miniers des premières années d'exploitation de la mine. Cette zone a déjà fait l'objet, au fil des années, de campagnes d'exploration géologique, géotechnique et hydrogéologique avec la production des rapports associés. De manière générale, ces études ont été produites avec des objectifs spécifiques correspondant au stade de développement du projet.

1.1 Objectif du présent rapport

Le présent rapport a pour objectif de compiler en un document unique, les données disponibles sur la géologie, la géotechnique et l'hydrogéologie qui sont pertinentes à une meilleure compréhension du régime d'écoulement des eaux souterraines de l'aire de stockage de la Kwé Ouest. De plus, ce document inclut les résultats des travaux de terrain les plus récents concernant les linéaments, les dolines/vides/cavités ainsi que les essais de pompage réalisés à la source WK17.

1.2 Organisation du rapport

Le présent rapport représente la somme d'une série de rapports sectoriels ou spécifiques produits par différents intervenants au dossier (Goro Nickel (GNi), Goro Construction Team (GCT), Golder Associates Pty. Ltd. (Golder)). Ces rapports sont pour la plupart, reproduits intégralement en annexe. Puisque certains des documents annexés comprennent des centaines, voire des milliers, de pages de données factuelles, ils ont été inclus au rapport en format électronique (*Acrobat Reader*) sur un CD en pochette. Le corps du rapport résume et présente l'information qui est contenue dans ces annexes.

Les tableaux, figures, photographies et cartes associés au présent rapport sont situés à la fin du texte et avant les annexes.

Les annexes sont organisées comme suit :

Annexe A	<i>Geotechnical and Hydrogeological Studies of the West Kwe Residue Storage Facility - Goro Nickel Project - New Caledonia 474-03639030-R-pc-KWRSF Geotech and Hydro Report Rev 0</i>
Annexe B	Rapports d'études spécifiques réalisées par Golder dans le secteur de la Kwé Ouest <ul style="list-style-type: none"> • <i>Factual Report - Piezometer Installations - KWE WEST- Goro Nickel Project. 1132-03639030r-bd-Kwe West Piezo Report Rev</i>

¹ Selon les documents consultés on retrouvera l'orthographe « Kwé » ou « Kué ». Le terme « Kué » proviendrait des cartes topographiques IGN, mais le terme « Kwé » revient fréquemment dans les rapports techniques. Dans le présent rapport, ces deux termes sont de façon équivalente.

	<p><i>AI</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Factual Report - Geotechnical Investigations - KWRSF Lineament - Goro Nickel Project. 1078-03639030r-bd-Lineament Report-RevA1</i> • <i>Le milieu physique – Rapport de base sur le climat, la géologie, l'hydrologie et l'hydrogéologie. Projet Goro Nickel, Nouvelle-Calédonie. Novembre 2004. 412-03639030</i>
Annexe C	Rapports d'études géophysiques de Tomographie Electrique 2D – Préparé par la firme <i>Geophysical</i>
Annexe D	Rapport sur les dolines – Préparé par GCT
Annexe E	<p>Données factuelles complémentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> • Données et graphiques des campagnes de suivi piézométrique 2004-2007 • Note de service GNi sur la méthodologie de construction des cartes piézométriques • Tableau synthèse des valeurs de conductivité hydraulique • Résultats de la bathymétrie sommaire réalisée au site WK17 • Résultats du jaugeage du ruisseau en aval de la source WK17 • Journaux de forages et schémas d'installation de piézomètres (2007). • Schémas d'installation de piézomètres à corde vibrante WF-1 à 36 • Tableaux des niveaux d'eau mesurés pendant les essais de pompage • Tableaux des mesures piézométriques réalisées dans les piézomètres à corde vibrante • Données factuelles des essais de pompage réalisés à la source WK17 • Résultats d'analyses chimiques des eaux • Journaux de forages et schémas d'installation de piézomètres complémentaires

2.0 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

2.1 Introduction

Dans le cadre de ce contexte géologique, le support de cartographie, de schémas, de figures, de photographies est primordial. Chaque paragraphe intègre en introduction la liste des documents techniques qui sont les références du texte.

Ces cartes et figures se trouvent à la suite du texte du rapport.

Première partie des applications expérimentales

La zone d'étude est située à l'extrémité méridionale du Massif du Sud, dont les formations d'altération développées sur les péridotites bien préservées en « plateaux » et « bassins » sont encore fonctionnels et localement encore actifs, avec quelques secteurs démantelés par l'érosion.

Cette unité régionale recèle en outre la réserve en minerai latéritique nickélifère la plus importante du territoire. INCO a donc justifié la description des principales entités altéritiques afin de fournir la distribution, la compartimentation des grandes masses latéritiques et le contrôle des minéralisations.

Les grandes unités latéritiques concernées sont le bassin de la Plaine des Lacs, le bassin de la Kué intégrant le gisement de Goro, la partie est du bassin de Prony et le bassin de Port-Boisé. Ces bassins sont limités par des chaînons qui portent une couverture latéritique réduite et peu étudiée.

Avec la mise au point des procédés (dont la Lixiviation à l'acide sous pression), la zonalité hiérarchisée des zones minières à exploiter est définie en fonction des répartitions de teneur en nickel, cobalt et magnésium, ce qui implique le développement de la connaissance du profil, jusqu'à la roche-mère : l'horizon d'oxy-hydroxyde de fer (latérite), l'horizon silico-magnésien (saprolite).

Les applications expérimentales et économiques sur les bassins latéritiques ont donc intégré (dès les années 70) les paramètres suivants :

- Cartographie de surface
- Lithologie et géochimie du profil en profondeur de la roche
- Géotechniques de la latérite, de la zone de transition au sommet de la saprolite pour l'étude de stabilité concernant les pentes intégratrices d'une fosse
- Hydrogéologie, en positionnement de piézomètres et d'analyse des eaux souterraines, tests de pompages pour les mesures de conductivités hydrauliques

En récente application de réconciliation par rapport aux mesures des forages, l'Exercice minier Goro Nickel (2004-2005) a permis de prendre en compte désormais les influences conjuguées d'une configuration structurale particulièrement défavorable et de conditions hydrogéologiques localement et temporairement critiques lors des événements pluvieux.

L'objectif de cette Section est donc l'application expérimentale des données géologiques et hydrogéologiques pour le choix prioritaire d'un sous-bassin de la Kué Ouest (référence : le bassin KO2) en tant qu'aire de stockage des résidus du procédé.

La géomorphologie des alvéoles est le critère de base de la compréhension du développement des « sous-bassins ».

Les trois secteurs d'études principaux sont :

- la structurale, établie en compréhension à partir d'une cartographie de linéaments ;
- la morphologie des répartitions des profils d'altération ;
- la lithologie de la roche-mère péridotitique et son degré de serpentinitisation.

Les impacts naturels des créations de cavités sont les points critiques d'un site industriel à long terme : les processus géologiques de ces formations sont définis en classification des observations.

Les mesures pratiques sont des relevés géophysiques de résistivité, des forages carottés et les mises en place des piézomètres depuis 2005.

Deuxième partie des applications expérimentales

La seconde étape d'études sélectionnées est liée aux notions d'aléa et de risques.

La cartographie des formations superficielles fait le bilan de toutes les informations disponibles sur les phénomènes d'instabilité (mouvements de terrain et érosion) significatifs. L'étude délimite les zones susceptibles d'être affectées par les phénomènes naturels suivants :

- les mouvements de terrain tels que les glissements, éboulements, chutes de blocs, effondrements, affaissements, coulées boueuses, ...
- la dégradation naturelle de zones qui seront recensées en tant que facteur aggravant ;
- l'interprétation des données de photographies aériennes (historiques à récentes) ;
- la compilation des études existantes : topographiques, géomorphologiques, géologiques, de densité du couvert végétal, cartes de localisation des phénomènes (sources, dolines) ;

- les traitements informatiques d'analyse et de modélisation des profils et nappes d'eaux.

Les différentes cartes thématiques en superposition de la Carte Géologique, permettent de tenir compte si possible, de la nature des phénomènes, de leur probabilité d'occurrence et de leur intensité, de localiser et de hiérarchiser les zones exposées aux phénomènes concernés.

Les principaux aléas naturels correspondent aux inondations, cyclones tropicaux ou événements pluvieux, séismes, mouvements de terrain (glissements, érosion, stabilité des versants,...). Les principaux aléas naturels au Massif du Sud proviennent de crises aiguës pluviométriques dans un contexte d'altération dont la roche-mère est transformée en latérite, dont l'altération est pénétrante et dont la structurale néo-tectonique développe les effets karstiques.

Dans le cadre du Projet minier (extractions, dépôts des matériaux, constructions d'infrastructures de stockage, de bassins de gestion des eaux), la vulnérabilité est un facteur complexe qui présente des termes qui sont de deux natures différentes : nature physique (exprimables, par exemple, en fonction de l'intensité de l'événement), comme la stabilité des constructions aux mouvements du sol, et natures socio-économiques, tels que la perception du risque par la population. La vulnérabilité a un faible degré de conséquences historiques, puisque les sols ferrallitiques qui se développent sur ces profils altéritiques présentent une faible fertilité végétale naturelle en raison de nombreuses carences N-P-K et de la toxicité due aux métaux. La perception du risque par la population est donc essentiellement liée aux effets environnementaux des circulations d'eaux souterraines vers les zones d'habitats, côtières et maritimes. L'organisation de la gestion des crises doit intégrer la connaissance hydrogéologique.

Les premiers tests de méthodes géophysiques appliquées aux latérites sont réalisés en 1994, avec pour objectif de tracer les zones de faiblesse karstique sous cuirasse puis de tenter de modéliser l'interface du substrat rocheux, sur le domaine minier qui intègre déjà de nombreuses données géologiques et géotechniques.

Troisième partie des applications sur le sous-bassin Kué Ouest (KO1-KO2)

L'altération propre au milieu tropical développe des manteaux épais et les éléments primitifs géochimiques de la roche y sont complètement redistribués. Le nickel, en particulier se retrouve piégé à la base des profils d'altération.

La partie Sud-Ouest de la « vallée Kué Ouest » est une série de cellules géomorphologiques en véritables bassins (KO2, KO1, alvéoles lavakas) totalement isolées des domaines cuirassés correspondant eux à des « plateaux ».

Or, ce sous-bassin n'a jamais été une concession du domaine minier INCO, INCO-CVRD Goro Nickel. Les mailles de forages en études économiques les plus proches ont porté une maille de 400mx400m en type destructif.

La première conclusion est donc que ce bassin ne développe pas un profond profil latéritique complexe, à cause de sa très récente histoire géologique de création, et son isolement total par rapport à la Plaine des Lacs, dont sa circulation souterraine et ses effets météorologiques contrôle la partie Sud-Est des épaisse altérations.

2.2 Sous-Bassin Kué Ouest au Massif du Sud

Réf. :	Carte 2.1	Relief géologique 1/50 000
	Carte 2.2	Bassins versants de la Kué
	Carte 2.3	Photo aérienne 1985 et grandes lignes des interprétations structurales
	Tableau 2.1 :	Comparaison des débits des eaux de surface – Période sèche de Décembre 2005 à Janvier 2006
	Figure 2.1	Interprétation des analyses de linéaments-Massif du Sud
	Figure 2.2	Schéma des compartiments

2.2.1 Domaines géologiques et hydrogéologiques

L'extrême sud du Massif s'est développé à la faveur d'une tectonique cassante post-charriage qui a modelé des horst et graben dont les grandes unités se définissent morphologiquement à l'échelle régionale et se retrouvent à l'échelle minière sous la forme de plateaux, de crêtes résiduelles et de cellules latéritiques séparées par des septa rocheuses.

Les facteurs gouvernant l'hydrolyse des péridotites ont été ici réunis:

- forte pluviométrie (3000 à 4000 mm/an) de climat tropical humide à intensités aiguës couvert végétal dense (action des acides organiques) ;
- rétention des eaux de surface et souterraines dans de vastes cuvettes fluctuation importante du niveau des nappes souterraines ;
- bonne percolation et excellent drainage vertical densité de la fracturation ;
- degré de serpentinisation.

L'approfondissement des vallées terrestres entaillées sous la forme de canyons dans les reliefs péridotitiques, la présence de vallées suspendues, et surtout donnant la mesure des fluctuations historiques de la nappe souterraine (instabilité eustatique) est particulièrement visible pour tous les bassins bordant le sud de la grande dépression de la Plaine des Lacs (PdL). C'est un bassin d'effondrement créant un réservoir perché de 80 à 100 km², dont les captures multiples souterraines ont contribué à l'approfondissement des profils d'altération périphériques et en phase finale à la coalescence de plusieurs petites dépressions. Mais à 250m, c'est le plus élevé de tous les bassins.

Les cartes 2.1 et 2.2 montrent l'isolement total des sous-bassins KO1-KO2 par rapport à la Plaine des Lacs.

Le bassin de la Kué Ouest présente une altitude moyenne inférieure à 200 mètres.

Lors d'une période particulièrement sèche en Décembre 2005-Janvier 2006, un exemple de mesure des débits de surface des creeks de ces sous-bassins de la Kué ont prouvé l'important effet souterrain en résurgence du domaine hydromorphe de la Plaine des Lacs (voir tableau 2.1 pour données des débits). Les compartiments Centre et Est sont donc activement drainés, sous-tirés et incisés par la Kué qui franchit la cloison limitant le bassin au Sud par une cluse.

Les sols ferrallitiques développés présentent une faible fertilité naturelle en raison de nombreuses carences et de la toxicité des métaux. La couverture végétale endémique a réussi à s'adapter à ce milieu difficile. La photo aérienne (carte 2.3) en 1985 montre bien les couvertures végétales en fonction de la fertilité des circulations et suspensions des eaux.

2.2.2 *Les grandes lignes structurales*

Les principaux traits structuraux sont :

- un système de failles N130°E en compression ;
- un système de failles N50°E en extension.

Les linéaments sont marqués à partir de :

- mini-falaises, fractures en roche-mère faces rocheuses sur crêtes de très forte pente ;
- creek, vallées, lavakas en réseaux orientés ;
- alignement de dolines ;
- gradins en cuirasses ;
- joints principaux et profonds en rares flancs latéritiques (zones d'arrachements).

Sur le gisement de Goro, le système de failles majeur NW-SE est de N130° à 140°E. Le système plus discret est de N20-30°E, qui tourne à N50°E vers le Sud du bassin de la Kué.

Des surfaces cuirassées sont prises comme niveau de référence (ayant appartenu à un même bassin) pour marquer les décalages. Un des systèmes d'accidents les plus importants décalant à la fois la roche-mère, la cuirasse et se traduisant par des contrastes morphologiques, peut se suivre sur la bordure nord du bassin de Port-Boisé : le décalage très net selon **la cassure NW-SE**.

Il se traduit par une à deux marches d'escalier, complexes dans le détail, provoquant un décalage global de la cuirasse d'une quarantaine de mètres d'amplitude, le compartiment NE (plateau Goro) étant surélevé, par rapport au plateau intermédiaire Kué ouest (bassin KO5) et les bassins colluviaux Kué Ouest (KO2-KO3-KO4) .

Des décalages dans la morphologie sont visibles au niveau des cloisons rocheuses. Les altitudes des crêtes confirment les compartiments à grande échelle (voir figure 2.2).

Parallèlement, le raccord de la surface cuirassée au chaînon est largement incisé au pourtour du compartiment NE : la vallée Kué Est. Alors que le raccord est progressif au SW : les vallées basses à colluvions en Kué Ouest (KO2-3-4) sont entourées de piémonts marquant le lien avec la crête péridotitique (et ses cellules perchées altérées) qui alimentent le flanc. Par contre, l'aval des bassins KO2, KO1, dans un domaine cuirassé et non colluvial, comporte aussi une incision profonde par rapport au contact du chaînon rocheux isolé (« îlot rocheux Audemard ») : les systèmes structuraux croisés, et l'altération profonde expliquent cette dépression.

Ces indications structurales peuvent aider dans la reconstitution de la structure profonde du substrat péridotitique et de la compartimentation des masses latéritiques. Ces traits structuraux et morphologiques sont parfois étroitement associés et interdépendants. En effet l'évolution du relief au cours de l'altération se calque sur le canevas structural pré-établi du substrat rocheux. Les diverses discontinuités du substrat jouent le rôle de guides pour l'altération dont la progression différentielle révèle ainsi la structuration profonde. Réciproquement, les accidents du substrat peuvent rejouer et décaler le manteau altérétique que ce dernier supporte.

Les indications structurales sont des discontinuités probables et supposées. Les discontinuités que l'on peut discerner dans le paysage et les "failles" que l'on peut dessiner notamment en milieu latéritique et cuirassé, sont sujettes à une bonne part d'interprétation, mais supportée par des mesures géophysiques.

Des discontinuités d'origine tectonique affectent et recourent ces grandes unités morphologiques. Les déformations affectent non seulement le substrat rocheux ophiolitique mais également les surfaces cuirassées.

La déformation peut être appréciée globalement à l'échelle de l'ensemble des bassins. À l'extrémité de la Kué Ouest, les 2 bassins colluviaux sont proches mais totalement liés à des discontinuités opposées :

- bassin KO4 : axe N140°-150°E;
- bassin KO2: axe N80°E, en lien progressif vers le système N50°- N20° E du plateau Goro.

La récente expérience des fracturations latéritiques sur la fosse du profil de Goro (« Exercice Minier ») a prouvé un contact bien marqué entre les réseaux fracturés de dimension

kilométrique du Bassin de la Kué (et Gisement de Goro) et le profil supérieur de l'altération. Ces fractures hydroplastiques en latérites, ou miroirs de stries, ont marqué le lien hydraulique entre le sommet du profil et la couche profonde (Transition). Elles sont dans le sens de la plus grande pente, et en fonction du mouvement d'enfoncement des latérites dans les lapiaz.

La structurale est donc également un effet important lors des évènements pluvieux pour la compréhension des réseaux de nappes entre l'aquifère de latérite et l'aquifère saprolitique.

2.3 Cartographie Géologique

Réf. : Carte 2.4 Carte géomorphologique et structurale des sous-bassins KO1-KO2 de la Kué Ouest

2.3.1 Cartographie structurale

Le bassin représente un axe principal d'effondrement altéritique de direction N50°E, entouré de crêtes péridotitiques en morphologie de cloisons.

Les traits structuraux rectilignes ou planaires liés à la structure tectonique du substrat sont représentés par :

- des arêtes rocheuses remarquables : des objets linéaires et rectilignes, matérialisés par des alignements rocheux de formes aiguës.
- des faces rocheuses. des surfaces planes mises en évidence par l'érosion et l'altération, représentant des plans de fractures ravivées.

Ce type de structure bien visible sur les reliefs périphériques des bassins se prolonge par des saillis ou des cloisons à l'intérieur des bassins. Le vocabulaire est « linéament », ce sont des directions principales dont les forages carottés vérifient la définition lithologique réelle : fracturation ou non, bréchification, dykes, simples joints, contacts différenciés entre caractéristiques rocheuses.

Les directions principales sont donc :

- **N50° à N80° E, l'axe de création de la cellule du bassin ;**
- **N 130°-140° E**

Les traits morphologiques circulaires liés au fonctionnement de l'altération sont représentés par des **alvéoles circulaires**. Ces entailles traduisent la progression de la dissolution et de l'altération en zone de substrat isotrope : ce sont les alvéoles de latérite jaune. Sur les chaînons résiduels bordant les principaux bassins, ces formes caractéristiques sont souvent déblayées et le cirque rocheux périphérique préservé en partie. Il y a toute une hiérarchie d'alvéoles emboîtées à différentes échelles, les diamètres s'échelonnent entre 100 et 1000 mètres.

Le meilleur exemple est l'îlot rocheux de la carrière « Audemard »

Les traits morphologiques en domaine altéritique, le plus souvent en zone de cuirasse sont constitués par des escarpements, crêtes, bordures de dolines contrôlées par des ruptures morphologiques et alignements de dolines.

Dans le domaine des bassins, les surfaces cuirassées sont limitées sur leurs bordures par différents types de contacts. Le contact peut être graduel avec le glacis amont. Il est parfois recouvert par de l'alluvionnement en fond de vallée. Le contact peut également correspondre à une incision de la surface et à une ligne de recul de l'érosion régressive (dégradation).

Dans le domaine des reliefs cloisonnant les bassins on a individualisé les principaux segments de crêtes rectilignes qui s'organisent selon des directions privilégiées souvent parallèles aux failles régionales.

Le réseau de fracturation peut comporter des familles d'orientation plus ou moins parallèles (conformes) au versant ou déterminant des coins rocheux (dièdres) dont l'arête est inclinée vers la vallée. Le déclenchement résulte souvent de la mise en pression hydrostatique interstitielle au sein des discontinuités lors des épisodes pluvieux, voire de la croissance de racines (thalwegs des forêts primaires).

2.3.2 Géologie de surface

Colluvions

Remplissant le fond de vallée, très hydromorphe, ils sont également présents dans des larges dépressions peu profondes du plateau cuirassé. Ce sont des limons fins et de la grenaille de fer, mais aussi des blocs conglomératiques et galets cuirassés transportés.

Cuirasse de fer (secondaire)

La cuirasse intacte est rare, mais elle se développe en aval en portions de surfaces des sommets de plateaux, avec des positions de fractures. En amont, seules subsistent des reliques en cours de démantèlement. Les cuirasses sur pentes sont rares.

Cuirasse de fer fluvio lacustre

La différenciation est géomorphologique. Référence : carte 2.2. Elle occupe en KO2 des petits dépôts marécageux en amont. Les dépressions marécageuses majeures sont sur de la branche nord principale de la KuéOuest(bassin KO4).

Cuirasse démantelée

Les dalles de cuirasse massive sont rares : en cours de démantèlement, elles donnent des amas de blocs disloqués, ou en partie basculés par gravité. Au stade ultime de ce démantèlement il ne subsiste que des nappes de gravillons ferrugineux à petits blocs centimétriques. À certains

endroits, l'effet conglomératique des galets de cuirasse est proche de points d'effondrements (dolines, escarpements de fractures) dont la « cimentation » marque un site d'ancienne histoire d'évolution tertiaire de profil.

Latérite indifférenciée

C'est la formation la plus abondante des versants : cette latérite contient une proportion importante de pisolithes et de rares blocs de cuirasse. Deux types de latérites peuvent coexister en contrebas des crêtes : latérite en place appartenant au profil, latérites issues du glissement des crêtes.

Latérite jaune

Elle affleure au creux des lavakas, qui incisent les cellules. On y observe des reliques de textures de la roche mère.

Les aléas résultants de la cartographie de surface du bassin KO2 et des environs sont finalement peu nombreux :

- Ravinement actif à l'amont de certaines alvéoles ouvertes, en engravement du creek de la vallée.
- Anciennes coulées boueuses en colluvions.
- Aucun mouvement de terrains tels que glissements
- Quelques rares écroulements rocheux sur les faces de pentes $>40^\circ$, (des thalwegs comportant les forêts primaires) en chute gravitaire dans l'air, l'eau n'étant pas impliquée dans le transport. La cause principale de ce type d'aléa est lié à un découpage des masses rocheuses en éléments de formes diverses par les fractures affectant la formation concernée.
- Pas de glissements de terrain en zone argileuse (absence de gabbros).
- Pas d'effondrements liés aux cavités souterraines (en contre-comparaison de la zone de subsidence de la doline « Le Trou »).

En conclusion, les gradients d'altitude sont généralement faibles dans cette zone sélectionnée qui offre un paysage de plaine à morphologie colluviale. Cette caractéristique ne fait pas de la région une zone particulièrement riche en phénomènes d'instabilité. La variété et le nombre des phénomènes recensés dans la zone d'étude reste faible. La zone présente le potentiel de stabilité le plus grand, à comparer avec des zones d'escarpements plus raides et surtout des profils complexes cuirassés karstiques à dolines profondes (phénomènes d'effondrements), qui existent sur les plateaux du bassin de la Kué.

2.4 Profils latériques

2.4.1 . Description minéralo-chimique

Réf. :	Figure 2.3	Distribution chimiques en profil total – Analyses sur forages carottés
	Tableau 2.2	Paramètres du profil latéritique
	Figure 2.4	Photographies minéralogiques
	Figure 2.5	Photographies minéralogiques

2.4.1.1 Les transformations hydrothermales des roches UM

Altération hydrothermale (en profondeur)

Les roches ultramafiques composées de harzburgite et dunite, sont en degrés variables de serpentinitisation. La fracturation et la serpentinitisation sont les effets de l'obduction de la nappe ophiolitique. La serpentinitisation hydrothermale est une auto-hydratation où les minéraux olivine et pyroxènes sont transformés en silicates hydratés :

- Harzburgite

Péridot + Enstatite -----> Serpentine

- Dunite

Olivine + Eau -----> Serpentine (antigorite) + Brucite + Magnétite

Selon les conditions de drainage, la transformation de l'olivine peut donner soit des smectites (drainage faible), soit des oxy-hydroxydes ferriques (limonites) en drainage fort.

Note : sur une zone de l'Exercice minier, dont le fond UM comporte des dunites, de la smectite en saprolite fut identifiée proche de la zone de transition de circulation d'eau.

- Pyroxenite

Enstatite + Eau -----> Serpentine + Talc

Sous le microscope, on constate que les anciens joints entre cristaux ou les anciennes fissures ont permis à l'eau de s'introduire dans la péridotite, transformant ainsi plus ou moins profondément en serpentine.

Altération latéritique exogène (en affleurement)

La latérisation est une lixiviation de cations basiques par des fluides acides ou neutres, en destruction des minéraux primaires, presque complète du Mg, et en rétention partielle de Si. C'est la FERRITISATION, une hydrolyse des silicates ferro-magnésiens. La saprolite comporte la texture préservée de la péridotite : l'hydrolyse fait circuler Si/Mg/Cr alors que Ni/Fe/Co/Mn restent en place.

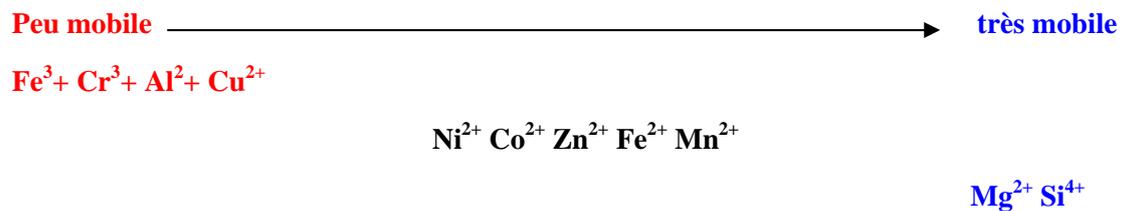
La latérite jaune, couche intermédiaire, est in-situ, elle comporte quelques textures résiduelles (pyroxènes oxydés) mais surtout la goethite. La dissolution affecte la chromite vers la saprolite et la lixiviation affecte les Cr et Al.

Ni/Fe/Co/Mn sont transférés vers la couche altérée profonde, en formation de la zone « Transition ».

La latérite rouge et la cuirasse de fer en sont les étapes finales résiduelles des oxy-hydroxides de fer.

Résumé :

Ce sont les degrés de solubilité des hydroxydes qui gouvernent la mobilité des métaux.



- Mg et Si sont emportés dans les eaux de drainage.
- Ni, Co et Mn également mais à des pH plus faibles.
- Fe²⁺ des olivines et des pyroxènes est oxydé en Fe³⁺ qui précipite sous forme d'hydroxydes colloïdaux (limonite), seuls résidus dans le sol du minéral originel.
- La réaction d'échange la plus commune concerne le Ni dissous qui remplace le magnésium des serpentines

$$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 3\text{Ni}^{2+} \longrightarrow \text{Ni}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 3\text{Mg}^{2+}$$
- Ni et Mg libérés par hydratation d'olivine vont se concentrer dans les fractures per ascensum

Un résumé des paramètres du profil latérique est présenté au tableau 2.2.

2.4.1.2 Minéralogie et caractéristiques géotechniques d'une latérite

2.4.1.2.1 LATERITE JAUNE

Les photographies minéralogiques montrées à la figure 2.4 sont des images d'une limonite de Goro (Ni1.5%, Fe42%) au microscope électronique à transmission (MET). Les images du microscope montrent des agrégats de goethite bien cristallisée en fines aiguilles de dimensions approximatives 0.2-0.3 mm de longueur et de moins de 0.02 mm de diamètre. L'existence de ces microstructures joue un rôle majeur dans les caractéristiques physiques des latérites (application en rhéologie).

Lorsque ce squelette relique existe, la limonite a un comportement anisotrope à cohésion faible. Sinon, elle a un comportement plastique à cohésion élevée typique des silts. Une des trois phases alumineuses mise en évidence: une particule de gibbsite $Al(OH)_3$ (voir figure 2.4).

Leurs caractéristiques de plasticité rangent ces matériaux parmi les limons plastiques à très plastiques, tandis que leur granularité les classe parmi les argiles limoneuses. La densité spécifique est comprise entre 3.6 et 4.0 et la densité sèche varie de 0.65 à 1.30, ce qui signifie que la porosité est extrêmement élevée : 65 à 83%. Ces sols étant dans la majorité des cas saturés, leur humidité est par conséquent de l'ordre de 30 à 60% (référence de calcul géologique, c'est la proportion d'eau par rapport au poids total humide de l'échantillon). Cette compacité exceptionnellement faible est liée à la micro-structure alvéolaire et dendritique, plus ou moins organisée et micro-fracturée, formée par les oxy-hydroxydes de fer au cours des différents stades de la latéritisation. Les pores étant micrométriques, la perméabilité à l'échelle de l'échantillon de laboratoire reste très faible, de l'ordre de 10^{-9} m/s, alors que le réseau de fractures parcourant les massifs latéritiques peut leur conférer une perméabilité in situ 100 à 10000 fois supérieure.

Leur extrême sensibilité au remaniement est un autre trait marquant de ces latérites, lui aussi lié à leurs caractéristiques minéralogiques, micro-structurales et hydriques. Non remaniés, ces matériaux présentent une cohésion non drainée moyenne de l'ordre de 100 kPa, les paramètres drainés avoisinant 20 kPa pour la cohésion et 45° pour l'angle frottement interne, valeur singulièrement élevée qui est certainement liée à la forme aciculaire et à l'imbrication des cristaux de goethite. Leur compressibilité, de même que leur taux de retrait, sont faibles et ces matériaux ne présentent quasiment pas de gonflement. S'ils sont remaniés, ils perdent une grande partie de leur cohésion, leur teneur en eau approchant ou excédant leur limite de liquidité ; ainsi, un échantillon de consistance très ferme, d'apparence peu humide bien que saturé, peut-il être transformé en une masse boueuse après écrasement.

Ces latérites offrent donc des propriétés géotechniques globalement favorables bien qu'atypiques.

2.4.1.2.2 SAPROLITE

Dans la saprolite, les structures de la roche-mère sont préservées et l'altération se traduit par une augmentation progressive de la porosité. La densité de la fracturation influence le taux d'altération et son approfondissement.

Le degré d'altération est irrégulier et peut créer les « pinacles rocheux » dont la plupart sont en roche saine à croûte altérée :

- L'olivine est le premier minéral touché par l'altération, remplacée par la limonite ou l'argile magnésienne (smectite), en fonction du drainage.
- La serpentine subsiste dans la saprolite. Elle est progressivement détruite et dans les zones altérées, il ne reste plus que des limonites, avec plus ou moins de silice. En altération modérée, les filonnets serpentiniteux primaires sont des mélanges complexes de serpentine résiduelle.
- Le pyroxène est plus résistant.

La texture des saprolites est très dépendante du degré de serpentinisation des péridotites dont elles sont issues :

- Péridotite non serpentinisée : saprolites terreuses, à limonites et argiles, avec blocs de péridotite saine. Les garniérites sont dans les fissures. Exemple : Profil de l'Exercice minier.

Les eaux se fraient des passages nombreux par dissolution.

- Péridotite serpentinisée : l'altération est plus diffuse, les parties moins altérées sont encore dures mais riches en Ni. La totalité du Ni est fixé par la serpentine. Les eaux ne peuvent y percoler que très lentement.

2.4.1.2.3 SUBSTRAT

Le substrat rocheux étant systématiquement foré au minimum sur 3 à 4 m de profondeur, une étude pétrographique en lames minces a pu mettre en évidence les lithologies suivantes.

La dominante régionale est essentiellement une harzburgite à pyroxènes foliés, cependant des prismes à dunités massives particulièrement riches en gabbros et des rubanements denses de pyroxénites permettent d'isoler des secteurs lithologiques complexes dont l'influence sur la chimie des phases altérées et sur le degré d'altération lui-même sont en cours d'évaluation. Le bassin KO2 intègre des unités dunitiques.

La Figure 2.5 est une photographie en lame mince de péridotite saine, lumière polarisée qui montre les preuves descriptives des transformations des olivines en SERPENTINE, MAGNETITE et LIMONITE.

Les gabbros cumulats autour de la baie de Prony représentent la chambre magmatique du secteur. Plusieurs générations de filons sont reconnues : wehrnite, pyroxénite, gabbros, proches des gabbros cumulats. Par contre, des roches filoniennes plus tardives, les filons de gabbros, accompagnent les failles de direction NW-SE. La circulation préférentielle peut entraîner alors une argilisation. Le col de l'Antenne comporte un réseau de fins filons gabbroïques et pyroxénites.

2.4.2 La typologie des profils Kué Ouest

Réf. : Carte 2.5 : Domaines morphologiques du bassin KO2 de la Kué Ouest

Figure 2.6. Sections globales « B » et « C » du bassin KO2

Carte 2.6. Epaisseur du profil latéritique

Figure 2.7 Comparaison d'épaisseur des profils

La modélisation du profil des bassins KO1-KO2 montre le lien entre le développement de la cuirasse de surface et les fortes épaisseurs du profil intégrant la latérite et la saprolite (Carte 2.6) :

- Essentiellement à l'extrémité Est de la cellule du KO2.
- Dans l'unité très isolée (sous-bassin KO1) au sud-est du KO2.

Le comparatif entre un profil de plateau cuirassé et le sous-bassin colluvial KO2 est figuré en schéma de la figure 2.7.

Divers types de profils latéritiques sont observés sur la zone étudiée, chaque type est lié à une géomorphologie particulière.

Profil de plateau

Les profils de plateau ont été observés au centre de la vallée dans la zone aval. Ici, la cuirasse est préservée. Les horizons allochtones sont bien développés avec par endroits une composante sédimentaire (dominante dans la branche Kué-Ouest Nord). C'est dans ce seul type de profil que l'horizon saprolitique s'est vraiment développé.

La coupe géologique transversale de la vallée (section C) donne une bonne idée de l'organisation des couches du profil. Les couches ont une épaisseur maximale au centre de la vallée, alors qu'elles se biseautent graduellement sur les bordures, à l'approche des flancs de péridotite.

Profil de pied de pentes

En bordure des crêtes de péridotite s'est développé un profil dont la partie supérieure est constituée *pro parte* de colluvions issus d'éboulis de pentes. La cuirasse est absente de ces profils. C'est sur la zone amont, où la vallée est la plus étroite, que ces types de profils sont dominants.

Profil des alvéoles suspendues

Il s'agit d'un profil avec une forte épaisseur de latérite jaune. Le haut du profil est assez érodé sur l'alvéole de la partie ouest du KO2 alors qu'il est préservé par la cuirasse dans la cellule au sud de l'îlot rocheux « Audemard ».

La saprolite ne semble pas très développée mais peu de sondages ont été réalisés sur ces unités géomorphologiques particulières.

Profil de bassin

Il s'agit d'un profil peu épais essentiellement latéritique. La plus grande partie des latérites sont allochtones avec en particulier assez souvent la présence de latérites sédimentaires.

2.5 Les phénomènes d'effondrement

Réf.	Figure 2.8	Morphogenèse du bassin
	Figure 2.9	Photographie de l'écoulement profond (Exercice minierGoro)
	Figure 2.10.	La doline « Le Trou »
	Figure 2.11	Photographies de cavités sous cuirasse
	Figure 2.12	Paléochenaux
	Figure 2.13	Erosion sur dôme

2.5.1 Morphogenèse

Le vocabulaire de « karst » a été employé par Withman (1965) et Trescases (1975), la dissolution (voir Chap.2.4.1) se traduit par une progression du profil d'altération, sous sa couverture résiduelle. Ils s'accompagnent de l'entraînement et du soutirage des latérites et grenailles, ce qui résulte en dépressions remplies par les eaux de surface et comblées par des sédiments. Les vocabulaires morphologiques sont :

- Lacs, dolines, bassins endoréiques, marécages, cuvettes.

Des déplacements récents de matériaux meubles sous forme de colluvions et d'alluvions sédimentent et colmatent ces dépressions. Cela crée un aplanissement.

La morphologie de plateau karstique transparait dans la topographie : les grands bassins, partiellement fermés, les alvéoles séparées par les cloisons.

Une couronne de crêtes rocheuses de 400m d'altitude, parsemées de reliquats de cuirasses, enferme des bassins latéritiques. Ces bassins subissent une érosion qui les entaille jusqu'à la roche mère et se traduit par un relief inversé dit « de plateau ». Les lits de rivières révèlent des formations de lapiez.

Sur le domaine de Goro, des sous-plateaux s'étagent entre 320m d'altitude au contact de la Plaine des Lacs jusqu'à 70m au fond de la vallée de la Kué, selon une pente de 2 à 6%. Ces divisions, ou marches emboîtées, s'expliquent par des prismes d'altération différentielle liés aux cassures tectoniques et à des anisotropies lithologiques du substrat péridotitiques. Des horst-et-graben affectent le substrat. La mobilité des matériaux meubles, le tassement des matériaux latéritiques créent un phénomène de soutirage vertical qui résulte soit en un colmatage des fractures ouvertes (des éléments gravillonnaires de sub surface peuvent se retrouver entraînés jusqu'à 70m sous la surface dans le substrat rocheux) soit en une exagération des dépressions.

Les grands axes de failles se révèlent souvent par des alignements d'effondrements superficiels: les dolines. Les lacs qui parsèment le gisement sont cependant d'origine variée: accumulation après percolations sous la cuirasse de surface perméable, cônes d'effondrements, zones imperméables.

Les dolines et l'ensemble des dépressions associées se substituent au réseau hydrographique de surface dont elles constituent une ébauche d'une circulation complexe en profondeur. L'alignement de plusieurs dolines traduit en profondeur la présence d'un sillon important (exemple : zone Est Plaine des Lacs).

Les chaînons rocheux entourant les bassins résultent de reliefs résiduels suite à la coalescence de plusieurs dépressions. L'intersection de structures circulaires crée des îlots pyramidaux (carrière Audemard). Mais aussi, dans les chaînons, on peut trouver des formes de dissolution « alvéoles » perchées, en formes emboîtées – en particuliers au NE du col de l'Antenne. Les formes semi-circulaires d'« alvéoles » ne doivent pas être confondues avec des niches d'arrachement de glissements/effondrements. Près du col de l'Antenne, avec son remplissage latéritique souvent évidé, il s'agit bien d'alvéoles de cellules.

La progression de l'altération s'explique par des accidents pré existants liés à des discontinuités affectant le substrat : structuration tectonique, composition lithologique. Ces accidents introduisent un contrôle directionnel. Fentes de tension, fractures, zones broyées, serpentinisées, diaclases, sont les lignes de faiblesse qui sont exploitées par les circulations, deviennent les drains internes guidant la progression de la dissolution chimique. La progression différentielle révèle ainsi la structuration profonde et les discontinuités du substrat.

Les résurgences sont distribuées le long de deux interfaces : la base de la cuirasse perméable, le sommet de la roche mère. Les mesures de pH sur le réseau hydrographique permettent de

tracer les contributions respectives de ces deux sources potentielles le long d'un profil entaillé, puisque l'une est plutôt acide (sub surface) l'autre plutôt basique (horizon profond).

2.5.2 *Le contexte des dolines liées aux nappes profondes. Exemple Doline « LE TROU ».*

Les nombreuses investigations géologiques et géotechniques ont permis d'établir que les formations de caractéristiques hydrogéologiques comportent une nappe profonde, permanente et globalement peu fluctuante, baignant le substratum fracturé et s'étendant au moins jusqu'au sommet des saprolites. La figure 2.9 est un exemple photographique du profil de l'Exercice minier au niveau « Transition » qui montre l'écoulement constant profond.

Cette nappe siégeant dans des milieux peu à très peu perméables, les vitesses de circulation des eaux y sont très faibles et les pertes de charge importantes.

Il n'est pas exceptionnel de rencontrer des cavités de dissolution plus ou moins colmatées, d'épaisseur variant de quelques centimètres à plusieurs mètres et s'étendant le long de plans de fracturations hérités de la formation rocheuse d'origine (structurale ou différence lithologique). Ces cavités, en constituant un réseau tridimensionnel communiquant par endroits avec l'aquifère superficiel, prennent une grande part dans l'alimentation et l'évacuation de la nappe profonde. Sachant que la perméabilité des latérites jaunes compactes et non fissurées peuvent être inférieures à 10^{-9} m/s, il est possible qu'en certaines zones cette nappe soit captive, par conséquent que le niveau piézométrique mesuré en un point ne corresponde pas à l'altitude du toit de l'aquifère.

D'autre part, les niveaux mesurés en des points voisins peuvent différer sensiblement suivant leur conductivité hydraulique, qui va commander à la fois les pertes de charge affectant les écoulements et les temps de réponse aux variations de charge provoquées par les précipitations.

La doline « Le Trou » (32m de profondeur, 712 000 m³, 400m est-ouest, 300m nord-sud, voir figure 2.10) est un exemple de joint des fractures qui a créé l'effondrement majeur sur tout le profil, et dont les surfaces de subsidences actives se développent autour. De fortes amplitudes saisonnières sont observées dans la partie du gisement située au nord de la KN2, en particulier autour de « Le Trou » : ce comportement est sans doute dû à une recharge rapide rendue possible par le développement important des structures géologiques, lui-même dû en partie à d'importantes circulations d'eau provenant de la Plaine des Lacs.

Aucun cas équivalent n'est noté dans le bassin KO2.

2.5.3 *Exemple de morphologie du Lac Xere Wapo.*

L'exemple du profil sous-jacent du plus grand lac du plateau, le Xere Wapo, est symptomatique d'une histoire complexe qui a affecté non seulement les terrains mais également la végétation. Ces zones sont généralement remplies par des sédiments fins de type lacustre ou palustre.

Les effondrements en cuirasse qui forment les dolines sont dans la plupart des cas liés à la tectonique qui affecte le massif ultramafique rocheux. Sur Xere Wapo et le lac de Goro Sud, des accumulations de sédiments organiques remontent à plusieurs milliers d'années (communication G.HOPE, Australian National University). Les forages profonds dans ce lac identifient jusqu'à 25m de sédiments superposés à des accumulations de ferralites démantelées issues de l'érosion latérale. On note une nette troncature du profil latéritique classique au niveau de ces dépressions. Certains prismes se retrouvent en profondeur, sous les couches de sédiments.

L'examen minéralogique montre que les grenailles de fer sous-jacentes sont formées de goéthite qui est peu à peu remplacée par un réseau de carbonates de fer (sidérite) de plusieurs générations, cristallisés en conditions réductrices probablement à partir de percolations au travers des débris végétaux accumulés et décomposés.

Aucun cas équivalent n'est noté dans le bassin KO2.

2.5.4 Exemple de cavités communes sur le plateau de Goro et la KO2.

Sur les dalles cuirassées, des réseaux de cavités (dolines, fractures visibles) peuvent conduire les grandes quantités d'eau. On observe que très rarement des eaux stagnent en surface, l'absorption est rapide. La végétation est clairsemée mais prend en majeure partie des cas leurs racines sous la couche de dalle cuirassée.

La figure 2.11 montre des photographies de cavités sous cuirasse

Une nappe perchée, intermittente et morcelée, siège dans les horizons perméables que constituent la cuirasse et les premières couches de latérites gravillonnaires et peu compactes. Son niveau fluctue largement en fonction des précipitations, qui sont en partie menées par elle vers les cours d'eau ou les bassins de stagnation que sont les dolines comblées et les marécages.

En aval du bassin KO2 :

- sur la zone cuirassée ;
- à proximité d'un contact latéritique et d'un piton rocheux (carrière Audemard) qui est l'isolement de l'ancien chaînon de contour péridotitique de l'alvéole ;
- dans un réseau de fracturations visuelles de surface et de mesures en carottages ;

La cavité karstique sous cuirasse proche de la dépression de la Source WK17 explique le lien équivalent avec les sous-cavités des dolines de suffosion des plateaux de Goro. Des faciès à cloisons parallèles subverticales sont visibles sur cuirasse.

2.5.5 Les paléochenaux en zone colluvionnaire

Le profil du bassin central principal, cartographié, puis prouvé en activités de décapages, montre que les dépôts colluviaux et alluviaux sont très complexes, incluant des paramètres de perméabilité différents. Il s'agit de dépôts « stratifiés » de produits latéritiques remaniés, créés par :

- des ruissellements diffus ou catastrophique des flancs et plate-formes altérées des crêtes ;
- des évolutions d'érosion des sous-plateaux intégrés dans le même bassin, démantelés horizontalement et verticalement.

Les grenailles, blocs de cuirasse et les épandages superficiels récents de faibles épaisseurs nappent par endroit les ensembles latéritiques. Ces dépôts passent probablement graduellement aux latérites en place du bassin.

Les paramètres de porosité et perméabilité sont différents entre:

- latérites transportées ;
- grenailles accumulées, non stratifiées (nodules ferrugineux) ;
- blocs cuirassés conglomératiques transportés (on peut observer tous les stades de destruction par l'érosion : blocs de cuirasse basculés, amoncellement de blocs de cuirasse démantelée sur talus, semis de blocs de cuirasses épars). Lors des ces accumulations, les porosités existent déjà, ainsi que des micro-cavités ;
- alternance des contacts de ces différents matériaux d'accumulations.

Les cavités existent donc à plusieurs niveaux de profondeur, en fonction du positionnement des réseaux d'accumulation de matériaux à faciès pisolithiques non soudés. Des fissures drainent l'eau *per descensum*, les concrétions ferrugineuses se développent de part et d'autre. Dans les cavités, les cristallisations de manganèse, d'hématite se développent dans des géodes à goethite. Le moteur de ce phénomène, c'est bien l'eau.

La photo de droite de la figure 2.12 montre bien le démantèlement à cette échelle des blocs accumulés : érosion chimique, érosion des particules.

2.5.6 L'érosion de surface sur le dôme rocheux

Une grande proportion de proches cavités de largeurs 1-5m, à faible profondeur, est située sur la surface de coordonnées 698100E / 7531600N, près du flanc sud sur un dôme cuirassé.

Les profils tomographiques « Lignes 1-2-3-4 »², la mise en place d'une excavation (chenal de déviation des eaux), ont prouvé la présence d'un dôme rocheux qui est l'extension de la crête principale sud, et dont la séparation est expliquée par le grand linéament Sud.

La figure 2.13 schématise les phases de développement d'un bord de cellule :

- par effondrement initial de la cloison « en paliers », dont la couche de surface est déjà en altération ;
- par uniformisation de l'altération sur ces paliers, en cuirassement ;
- et enfin, sur un domaine comportant le dôme rocheux, une érosion de surface, sans développement de profil et créant le démantèlement de la cuirasse (dont certaines sont visuellement conglomératiques). Les cavités se forment donc par décomposition des matériaux.

Les mesures des 4 profils tomographiques ont précisé la position du dôme rocheux en tant que compartiment aval de la crête rocheuse, séparés par le linéament serpentineux (définition en chapitre 2.6).

2.5.7 L'expérience des linéaments dans la vallée Kué Est.

Le contexte morphologique du contact d'une « vallée » en aval d'une crête rocheuse a également été observé lors des travaux en cours (expérience 2007) du dépôt des stériles miniers dans la vallée Kué Est (équivalente en morphologie à la KO2). Au site Kué Est, la vallée et le versant rocheux (crête péridotite sud – sud est) sont le siège de circulations d'eau souterraine de grande ampleur, qui avaient été mises en évidence par un essai de traceur (2002, injection en doline). En plus de la trace notée dans la vallée KE, une trace importante avait été notée dans le bassin opposé à la crête, côté nord-est.

Au niveau de la verse à stériles, de faibles écoulements ont été observés dans le caniveau-amont de détournement, ce qui signifie que la majeure partie des précipitations tombant sur le versant rocheux s'infiltré rapidement dans des crevasses situées dans des fonds de thalwegs puis atteignent les linéaments du fond de la vallée (existence de dolines).

Trois (3) cavités proches de la surface, dans l'emprise de la verse du dépôt, ont été identifiées hors des fils d'eau des thalwegs : cela confirme que les circulations intenses d'eau souterraines se produisent le long des linéaments, et pas uniquement dans le fond de la vallée.

Aucun cas équivalent n'est noté dans le bassin KO2.

Néanmoins, l'étude de résistivité des zones de linéaments a été développée au KO2, avec les supports d'interprétations des anomalies par carottages, pour comprendre la qualité d'hydraulicité des « linéaments ».

² référence au paragraphe 2.6.3. *Interprétations géologiques des profils de mesures de résistivité.*

2.6 Tomographie électrique 2D

Réf. : Figure 2.14 Synthèse des données géologiques, granulométriques, hydrogéologiques, géo-électriques du site de Goro

Tableau 2.3 Coordonnées des lignes et leurs Objectifs

Carte 2.7	Sections tomographiques sur les linéaments
Carte 2.8	Sections tomographiques et forages sur le fond 3D topographique
Figure 2.15	Profil tomographique Ligne1 -Travers du bassin-berme
Figure 2.16	Profil tomographique linéament Sud et résultat de conductivité
Figure 2.17	Degré de serpentinisation sur Dunite
Figure 2.18	Profil tomographique Lignes 6-Nord de la berme
Figure 2.19	Profil tomographique Ligne 14-Piémont Nord-ouest
Figure 2.20	Profil tomographique Ligne 10-Flanc sud du bassin KO2
Figure 2.21	Profil tomographique Ligne 11-Aval de la lavaka
Figure 2.22	Profil tomographique Ligne 15-Exutoire de la lavaka
Figure 2.23	WKBH104 sur le profil tomographique Ligne 15
Figure 2.24	WKBH104. Photographies minéralogiques.
Figure 2.25 :	Interprétation de la conductivité des réseaux serpentines en roche-mère sur un profil vertical.

2.6.1 Base de données

Voir la figure. 2.14 qui montre une synthèse des données géologiques, granulométriques, hydrogéologiques, géo-électriques du site de Goro : mesures sur le faciès du profil d'altération Exercice minier, 2005.

La société intervenant est « GEOPHYSICAL Expertise », avec dès 2006, l'assistance du chercheur de l'UR037 de l'IRD-Nouméa sur les premières campagnes de mesures du sous-bassin Kué Ouest.

L'Annexe C contient les rapports préparés par ces experts concernant les :

CAMPAGNE DE TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE 2D SUR LE SITE KUE-OUEST: Résultats-Interprétations

Inversion des données de résistivités apparentes mesurées.

Les valeurs obtenues du terrain sont des résistivités apparentes. Chaque mesure intègre les résistivités d'un certain volume du sous-sol, fonction de l'écartement des électrodes.

À partir de ces valeurs, on cherche à retrouver les épaisseurs et résistivités calculées des différentes couches, c'est-à-dire à trouver un modèle.

Ces résistivités calculées se rapprochent au mieux des résistivités vraies des couches. Le procédé est celui des méthodes inverses.

Les étapes :

- modélisation à partir des valeurs de résistivités apparentes. Aucune contrainte par rapport aux données forages-mesures de résistivité insitu n'a été utilisée. Les résultats des forages ont été intégrés qu'après le profil finalisé ;
- calcul de la réponse du modèle, le problème direct étant les calculs des résistivités apparentes à partir des résistivités vraies ;
- modification du modèle pour obtenir une erreur minimale ;
- l'interprétation des images géo-électriques obtenues suppose une bonne connaissance des significations des variations de résistivités du milieu ;
- toutes les pseudo-sections sont inversées avec un logiciel de Locke, 1997 (technique décrite par « Géophysical Expertise »), par doublement du nombre de blocs et un bon contraste entre les différentes unités géo-électriques.

La conclusion des modélisateurs a été que les images de la distribution des résistivités vraies en fonction de la profondeur obtenue pour toutes les lignes représentent une réalité géo-électrique incontestable des terrains sous-jacents.

Les données obtenues ont été d'excellente qualité. Les interprétations géologiques sont donc toutes développées.

2.6.2 Sélection des zones mesurées et Objectifs

L'objectif principal des profils tomographiques est d'imager les changements lithologiques (la géométrie des couches d'altération) et/ou les principales structures associées. Les failles cartographiées ont-elles des couloirs conducteurs profonds? La porosité (taille des grains) par rapport à la perméabilité est un critère important dans l'interprétation de conductivité hydraulique.

- Définition des 5 ensembles géo-électriques :

1. Couche résistante. 300-1000 Ohm.m  

Cuirasse. Couche supérieure de latérite rouge, à grenailles de fer.

2. Couche conductrice. 50-200 Ohm.m  

Couche inférieure de latérite rouge, latérite jaune, saprolite à grain fin, dont la « Transition » peu silico-magnésienne.

3. Substrat résistant. 300-5000 Ohm.m  

Péridotite saine, saprolite très silico-magnésiennes (dont les blocs rocheux).

4. Substrat à anomalie résistante anormale. 500-1000 Ohm.m  

Interprétation de réseaux veinés latéritiques très altérés dans la roche-mère. Caractérisation d'un drainage profond potentiel.

5. Couche conductrice profonde. 20-200 Ohm.m   

Zone de fracturation, zone de drainage par les mesures de perméabilités.

Zone de forte micro serpentinitisation :hydrothermalisme. Microporosité par présence d'eau interstitielle.

Potentiel de bancs dunitiques

Potentiel de dykes de gabbros.

Voir le tableau 2.3 pour un résumé des données géographiques des campagnes de mesures et leurs objectifs

2.6.3 Interprétations géologiques des quatre profils de mesures.

L'interprétation des profils de la Source est notée en Chapitre 2.7.

Partie 1 : BARRAGE-BERME –FLANC SUD et Partie 2 : BARRAGE-BERME –PARTIE CENTRALE ET FLANC NORD

Le profil défini en résistivité est tout à fait corollaire au centre du bassin, par rapport au profil latéritique tel que modélisé sur la section géologique montrée en figure 2.6 – Section B. La surface irrégulière correspond aux colluvions et aux cuirasses démantelées. La saprolite est peu épaisse. Les flancs des chainons comportent des phénomènes de paliers avec en particuliers la forte anomalie de conductivité concernant la position du linéament Sud.

Figure 2.15 : LIGNE 1 – Travers du bassin de la berme - Coupe NordOuest-SudEst

Un résultat important en interprétation est détaillé en figure 2.16, dont le forage vertical carotté WKBH 101 en zone conductrice précise la présence de dunité (olivine) mais surtout de zone bréchifiée en serpentinite-antigorite.

Le résultat récent, en Mai 2007, montre que le stockage des carottes en zone sèche et aérée après 1 an a « explosé » le micro-réseau de serpentinite. (voir photographies de la figure 2.17).

L'angle de cette fracturation est de 70-75° pendage NW. La serpentinitisation y est parallèle. En référence à la microminéralogie serpentineuse, la conductivité électrique est prouvée par un microréseau de serpentines et une lithologie d'unité très dunitique. Il faut remarquer que le niveau de nappe d'eau profonde chute sérieusement à la base de ce flanc sud (Réf. : Niveau piézométrique sur la Section B, WKBH02 et WKBH21, nappe en limite de profondeur des forages en roche-mère). Une potentielle explication serait qu'une circulation d'eau soit un écoulement extrêmement profond dans ce réseau serpentineux sub-vertical de la roche-mère.

De nombreuses cavités ont été repérées en contrebas de ce flanc sud, mais uniquement sur la surface cuirassée du dôme rocheux, dont l'interprétation morphologique est un palier et en plus l'ancienne extension circulaire de l'alvéole cellulaire. C'est la désagrégation et l'érosion de surface de cette croûte cuirassée qui a créé ces cavités

Sur le flanc Nord, l'équivalent de dôme rocheux en palier a été prouvé, mais avec très peu de conséquences de fracturations ou de serpentinsations profondes.

Il s'agit bien du précédent contact de l'extension circulaire de l'alvéole (Cellule). Le profil tomographique LIGNE6 défini : à l'ouest, l'accumulation en couches colluvionnaires, à l'est, l'épaisseur de développement d'un profil cuirassé-latéritique-saprolitique.

Figure 2.18 LIGNE 6 – Nord de la berme -Coupes SudOuest-NordEst .

On marque le dôme rocheux de l'ancienne alvéole KO2.

Partie 3 : PIEMONT NORD-OUEST

Figure 2.19 LIGNE 14 – Piémont nord-ouest - Coupe SudOuest-NordEst

La forte conductivité « bleue » de surface montre bien le positionnement de colluvions en paramètres « sédimentaires » d'écoulements à partir du flanc nord anciennement latéritisé.

Il est important de noter qu'aucune trace critique de conductivité, ni de résistivité anormale (500-1000 Ohm.m) ne correspond à la structurale N140°-150°E perpendiculaire au bassin KO2, donc à cette Ligne14.

Par contre, on note l'influence des creeks d'écoulements temporaires du flanc de crête. Le seuil de roches saines affleurantes montre que l'on est bien sur la zone de contour d'alvéole du bassin KO2 amont.

Partie 4 : FLANC SUD – LINEAMENT – AVAL LAVAKA

Introduction : Les lignes 10-15 montrent d'abord que le linéament du flanc sud est décalé ou interrompu dans son extension sud-ouest, par décalage d'un « bloc » du chaînon sud, ou une interception par l'ancien contour de crête de la lavaka latéritique (voir figure 2.20 pour résultats de la ligne 10, figure 2.21 pour la ligne 11 et figure 2.22 pour la ligne 15). L'ouverture de ce sous-bassin latéritique vers le bassin KO2 est confirmé par une nouvelle forte anomalie de conductivité en Lignes 11-15, forée en carottage par WKBH 104.

L'axe de la ligne de mesure est de N60°E. Le grand linéament au sud du bassin, en contrebas du flanc rocheux est souligné par cet axe sur la partie 1/3 nord-est en forte conductivité, qui confirme l'intersection verticale de ce profil tomographique avec l'angle de fracturation de 70-75° de pendage nord-ouest.

Le tiers sud-ouest définit un compartiment rocheux très péridotitique. Il faut noter qu'aucune interprétation de fracture du système N140°-N150°E n'est marquée entre les 2 zones différentielles de résistivité (contact noir/rouge/bleu à la distance 560), ce qui est prouvé par

l'absence de trace conductrice sur la LIGNE 15, parallèle à la LIGNE10, en contrebas dans le bassin et donc perpendiculaire à ce système N140-150°.

Le 1/3 central prouve donc que l'axe du linéament est décalé en direction par rapport à la LIGNE10.

La carte 2.8 du modèle de topographie et des profils tomographiques montre bien l'axe NNE-SSW du linéament sud. Lié à une forte serpentinitisation en dunité, ce linéament est en fait une série de formes fracturées en « poissons », sub-parallèles et décalées horizontalement et verticalement. Le couloir est profond, la conductivité confirme l'influence de la serpentinitisation aux abords des fractures.

La seconde étape d'interprétation est donc la question de l'extension sud-ouest de ce linéament qui serait décalé par le compartiment rocheux vers le nord, créant le lien d'ouverture entre la cellule perchée « lavaka » et l'amont du bassin KO2.

La lavaka est une cellule latéritique équivalente au sous-bassin KO1, dont le piton rocheux en cloison est aussi équivalent à l'îlot rocheux « carrière Audemard ». Cette lavaka est bien définie comme une forte érosion par circulations d'eau :

- Aucune cuirasse maintenue (probablement décomposée) ;
- fortes ravines ;
- importantes concentrations de cobaltifère (galeries de prospecteurs).

La LIGNE 11 est perpendiculaire à la vallée de l'exutoire de la lavaka, en touchant les crêtes rocheuses de l'ancienne alvéole aux extrémités sud-est et nord-ouest. Le palier rocheux en contrebas du flanc sud est confirmé. L'anomalie conductrice se développe en profondeur à partir de l'altitude 180-185m, et sur une largeur de près de 100m (voir figure 2.21).

La LIGNE 15 est parallèle à la vallée de l'exutoire : de la crête rocheuse du col de l'Antenne au contrebas du bassin KO2. Elle mesure la même anomalie conductrice à partir de 180m d'altitude, sous la surface de la lavaka (près de 440m de longueur le long de la LIGNE15), et à plus de 80m de profondeur. L'interprétation principale est donc la traçabilité rouge sur la figure 2.22 : les intersections de systèmes de fracturation et/ou de serpentinitisation.

L'effondrement du contour de l'alvéole « lavaka » à cet endroit précis est donc bien confirmé par la poche conductrice qui est le joint entre les systèmes de fracturation/serpentinitisation.

La carte 2.9 montre bien l'extrême hauteur de surface de la nappe piézométrique à 180-190m dans cette vallée exutoire. Après l'événement pluvieux du 29 Juin (120mm/24h), une source temporaire de sortie d'eau a été notée dans la ravine du contrebas de la lavaka, en alimentation du creek du bassin KO2.

Forage WKBH104

Voir la figure 2.23 LIGNE 15 – Position du WKBH 104 sur l’anomalie. Diam.HQ carotté vertical

	Coordonnées GPS (m)		
WKBH104	N 7 530 961.4	E 696 978.8	Z 196.4

Ce carottage a défini 2 lithologies : une couche altérisée très peu épaisse, et une roche-mère serpentinisée en continuité en profondeur.

La couche de latérite transportée, intégrant des blocs cuirassés est de 10m d’épaisseur, incluant une étroite couche in-situ saprolitique.

La roche-mère est très proche de la surface (altitude 186.6m), et le toit de la conductivité s’explique donc par la même minéralogie et structurale du forage WKBH101 du linéament de flanc sud : LA SERPENTINISATION.

Le profil lithologique péridotitique est essentiellement harzburgitique, avec une foliation des pyroxènes 45-50°. Aucune veine altérée n’existe. La perte de récupérations est liée à du forage en blocs serpentineux, dont les joints montrent différents systèmes de croisement de fractures.

Le forage a été arrêté à 58.8m de profondeur (altitude 137.6m)

- La brèche principale, très serpentineuse, en 2 croisements d’angle 70° est de 44.8m (alt. 151.6m) à 52.8m (alt.143.6m) ;
- la seconde fracturation importante est de 24.8m (alt. 171.6m) à 34.1m (alt. 162.3m) avec des angles de 50° et 70°;
- Il faut noter également de nombreux joints horizontaux.

Comme suite aux 6 tests Lugeon, comme suite à l’absence de perte d’eau souterraine, la caractéristique de ce profil est donc une bonne étanchéité, malgré l’important réseau de fracturation qui est cependant marqué par un bon colmatage des fibres serpentineuses.

Figure 2.24 WKBH104. Photographies minéralogiques

Figure 2.25 : Interprétation de la conductivité des réseaux serpentineux en roche-mère sur un profil vertical.

La conductivité (contours bleus) est associée aux axes principaux mais surtout aux joints secondaires de chaque compartiment structural.

PARTIE 5 : SOURCE WK17

L'interprétation géologique des profils de mesures effectués dans la région de la source est donnée à la fin de la section 2.7.2

2.7 La Source WK17

Réf. :	Carte 2.9	Intersection de la topographie et du niveau piézométrique
	Figure 2.26	Photographie de la fracturation cuirassée de surface
	Figure 2.27	Coupe géologique NW-SE proche de la Source ; Section « D »
	Figure 2.28	WKBH 102
	Figure 2.29	WKBH 103
	Figure 2.30	Profil tomographique « LigneLS1 »
	Figure 2.31	Profil tomographique « LigneLS2 »

Positionnement de 2 sources reconnues en contrebas du plateau cuirassé, au nord-ouest (uniquement) du bassin hydromorphe.

	Coordonnées GPS (m)		
Source 1-Principale-WK17	N 7 531 837	E 698 265.1	Z 157.24
Source 2 – WK20	N 7 531 887	E 698 322	Z 155

2.7.1 Cartographie géologique et hydrogéologique

Le creek principal de la vallée s'écoule sur l'axe central de la vallée (KO2). Il s'agit de la grande cellule principale, incluant « récemment » la cellule de « lavaka » latéritique en amont qui s'est ouverte en s'emboitant au même réseau.

Par contre, le bassin latéritique cuirassé au sud de l'îlot Audemard a un réseau hydrographique séparé : **KO1**. C'est une autre cellule-alvéole originelle séparée. Au contour nord de cet îlot un nouveau réseau s'est développé par création d'une vallée ouverte entre cette crête rocheuse et le plateau cuirassé. Deux (2) sources ont été repérées à un débit global de 30-35 l/s. La bordure du plateau cuirassé y est verticale, marquée par des joints fracturés profonds de N140°-150° E à pente subverticale. Voir figure 2.26 ci-jointe.

Un second réseau plus discret est de N80°-90°E sur cuirasse, qui intercepte les joints fracturés. La cuirasse notifiée est conglomératique. Il faut noter que ces 2 équivalents systèmes de direction avaient déjà été marqués sur la colline rocheuse (« Audemard »).

La dépression entre l'amont du plateau cuirassé et l'îlot rocheux est tout à fait typique de ce que l'on note sur d'autres plateaux exemple Goro Sud : la vallée KuéEst. Ces vallées en dépression accumulent des sédiments latéritiques récents et surtout un contexte très hydromorphe, intégrant de véritables dolines.

En résumé global de la carte géomorphologique (réf. Carte 2.2.et Carte 2.4), on définit 2 grandes cellules dont les chaînons sont :

- vallée KO2 : chaînons principaux en crêtes de la grande vallée, dont l'amont (site de la berme) a été ouvert mais où subsistent les résiduels en dômes rocheux profonds ;
- vallée KO1 : chaînons principaux en contact avec KO2, en contact avec la vallée Port-Boisé, mais ouvert à l'origine à l'ouest de la colline résiduelle « Audemard ».

La dépression hydromorphe est le « triangle » de contact entre ces 2 cellules.

Une partie de l'eau du bassin KO2 est directement évacuée dans le réseau vertical très profond de la roche-mère. Par contre, une partie de l'eau remonte dans ce bassin (que l'on considère comme « la cellule d'altération » ou « de résorption ») par des conduits préférentiels que représentent les failles de base (structurale) et participe dans ce cas au remplissage d'un « marécage » de surface.

2.7.2 Coupe géologique et interprétation des forages et de la tomographie.

Les objectifs des 2 positionnements sont : l'amont 45m (WKBH102) et l'aval 31m (WKBH103) de la Source, ce qui correspond morphologiquement au sommet du plateau cuirassé par rapport au fond de la zone de dépression hydromorphe entre ce plateau et la colline rocheuse Audemard (voir figure 2.27 pour coupe géologique schématique).

Voir la figure 2.28 Log descriptif WKBH 102. Diam.HQ carotté vertical.

	Coordonnées GPS (m)		
WKBH102	N 7 531 843.6	E 698 220.6	Z 166.89

Le profil complet typique d'un plateau cuirassé a été défini par la lithologie : Cuirasse / latérite rouge et jaune « insitu », mais surtout le contact « transition » à 19m de profondeur.

La zone d'altération saprolitique est à 20m (alt. 146.9m), incluant des blocs rocheux en forte gangue d'altération « Transition » qui inclut les joints miroirs et les contacts altérés de 75-80° d'angle.

La saprolite silico-magnésienne est à 25.4m (alt. 141.5m). L'épaisseur totale de l'altération Transition et saprolite est donc classée de 10m en touchant la roche-mère à 29m (alt. 137.9m)

La roche-mère est une harzburgite saine à quelques joints serpentineux, mais le réseau le plus altéré sont des veines de matériau « transition » d'environ 1m d'épaisseur. La perte totale du

retour d'eau correspond à la veine de 33.2 à 33.9m (alt. 133.7-133.0). Soit 24.2m sous la surface de la Source, 19.2m sous le fond de la doline de Source. La couleur de l'eau de la Source a été modifiée en rougeâtre (l'équivalent du réseau de veines altérées) dès la traversée en carottage de cette veine 33.2-33.9m.

Fin du forage à 39m (alt. 127.9m)

Voir la figure 2.29 pour le Log descriptif WKBH 103. Diam.HQ carotté vertical.

		Coordonnées GPS (m)	
WKBH103	N 7 531 813.9	E 698 286.9	156.36

Le profil est dans cette dépression, beaucoup moins typique dans sa partie supérieure, puisque 15.9m de latérites transportées et de blocs de cuirasse couvrent le fond de vallée. Le contact original est donc une cuirasse de 1.6m d'épaisseur à l'altitude 140.5m et une couche directe de « Transition » sous cette cuirasse. Il est clair que le profil de latérite jaune a été érodé, que la cuirasse « originale » n'est pas primaire ni secondaire : ce fut une recristallisation d'un profil érodé. En comparaison du plateau cuirasse de surface, l'estimatif de la dépression est d'environ 26m.

La zone d'altération saprolitique est à 18.6m (alt.137.8m) avec une épaisseur de 2.9m. C'est 9.1m plus bas que le profil saprolitique du WKBH 102.

La roche-mère est une harzburgite majeure, avec quelques bancs étroits de dunites, à 21.5m (alt. 134.9m), dont la pente très régulière est donc de 3° de l'amont à l'aval de cette vallée.

Les veines « transition » sont également présentes, beaucoup plus visibles en contact avec des joints serpentineux 70-80°, beaucoup plus larges que le réseau WKBH102. La perte d'eau a donc été notée vers 27.5m (alt.128.9m) lors du contact de la première veine altérée en roche-mère. Une veine très humide, à multi-éléments granuleux est notée de 41 à 43m (alt. 115.3-113.2m).

Une importante bréchification d'angle 75°-80° a été interceptée à 48.7m (alt.107.7m) sur une épaisseur réelle de 2.6m. L'antigorite est un réseau serpentineux fibreux. Ce descriptif est une FAILLE BRÉCHIFIÉE.

De 57.5m (alt. 98.9m) jusqu'à 60.2m (alt. 96.2m) une véritable cavité est définie par la Géologie: les tubes de carottages ont été visualisés en enfoncement anormal par leur poids. Il s'agit par rapport à la brèche supérieure, d'un axe de 80° effondré en compartiment inférieur dans la roche-mère.

Le premier banc dunitique d'un mètre est sous cette cavité, ce qui peut expliquer le développement d'une serpentinisation micro fine et de sa dissolution rapide par olivines.

Fin du forage en harzburgite très saine à 64.6m (alt. 91.8m)

Partie 5 : SOURCE WK17

Les figures des lignes LS1-LS2 descriptives prennent en compte les lithologies des carottages réalisés.

La Ligne LS1, d'axe sud-ouest à nord-est, est positionnée en aval de l'axe du bassin KO2.

Cette ligne confirme du SW au NE :

- le profil cuirassé qui est en contrebas de la berme-barrage, le profil d'altération classique ;
- la traversée du bassin de dépression qui s'est développé entre ce plateau et la crête rocheuse dont le reliquat est « l'îlot Audemard ». L'accumulation des latérites transportées est bien prouvée par WKBH103 ;
- la crête rocheuse « îlot Audemard » se poursuit en profondeur. Sur son versant profond SW, une anomalie de conductivité apparaît sous l'altitude de 100m, et peut être expliquée par le réseau structural N140°-150° E qui sépare en vallée étroite la crête principale flanc sud du bassin KO2 de cet « îlot Audemard » ;
- la suite du plateau cuirassé qui contourne l'îlot rocheux et se retrouve sur la partie NE.

Sous le bassin de dépression, la mesure du gradient de résistivité est faible entre l'ensemble latérites-saprolites conducteur (150 Ω .m) et la roche saine résistante (1000 Ω .m) : il s'agit du substrat à anomalie résistante anormale. (500-1000 Ω .m). L'explication du WKBH103 est l'intersection du réseau veineux latéritique très altéré dans la roche-mère. C'est la caractérisation d'un drainage profond potentiel sous ce bassin de dépression à sources continues.

Cette limite de résistivité anormale est très stricte par rapport à la limite du bassin de dépression.

La Ligne LS2, d'axe nord-nord-ouest à sud-sud-est, est positionnée perpendiculairement en aval de l'axe du bassin KO2. Elle confirme du NNW au SSE :

- le profil cuirassé qui est en contrebas de la berme-barrage, le profil d'altération classique ;
- la traversée du bassin de dépression qui s'est développé entre ce plateau et la crête rocheuse dont le reliquat est « l'îlot Audemard » ;
- la trace de son extension nord-est du linéament principal du flanc Sud. Il est recoupé perpendiculairement en pente 70°-80° NW ;

- la crête rocheuse en extension du flanc sud du bassin KO2.

La mesure du gradient de faible résistivité (500-1000 Ω .m) en roche-mère est aussi confirmée sous le bassin de dépression. Son épaisseur est importante sous la source WK17.

Le point principal est par contre l'extension de cette résistivité anormale vers le NW, c'est à dire sous le plateau cuirassé : le réseau veineux latéritique très altéré dans la roche-mère s'y est développé en définition saprolitique.

3.0 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Cette section fera, en premier lieu (section 3.1) une description du contexte hydrogéologique général pour le secteur de Goro tel qu'établi à partir des diverses études sur l'ensemble du territoire (voir rapport Golder 412 en annexe B pour une description plus complète). Aux sections 3.2 et subséquentes, on s'intéressera plus spécifiquement au secteur de l'aire de stockage de la Kwé Ouest³.

3.1 Unités Hydrogéologiques

Les unités hydrogéologiques du site de Goro incluent un aquifère superficiel, un aquitard, un aquifère profond et un aquifère de zone de fracture profond. La figure 3.1 montre un schéma de ces unités hydrogéologiques et les sections suivantes décrivent chaque unité en détail.

3.1.1 Aquifère superficiel (*cuirasse de fer/grenaille*)

L'aquifère superficiel comprend principalement la zone de grenailles à la base de la cuirasse de fer et des fissures à l'intérieur de la cuirasse de fer. L'aquifère superficiel est un aquifère saisonnier (éphémère) caractérisé par des conductivités hydrauliques potentiellement élevées et des écoulements importants associés à des pluviosités importantes.

Cet aquifère réagit directement aux précipitations en acceptant les eaux de pluie qui s'infiltrent et en transmettant de l'eau latéralement à faible profondeur vers les points topographiquement bas, tels que les cours d'eau qui drainent la zone (figure 3.2).

Les directions d'écoulement dans cet aquifère superficiel sont semblables à celles de l'écoulement de surface (c-à-d. le ruissellement) lesquelles correspondent à la pente du terrain. Cet aquifère est limité principalement à la zone du Plateau de Goro avec des présences mineures quand des zones restantes de cuirasse de fer sont présentes hors du plateau principal. Dans le secteur de l'aire de stockage de la Kwé Ouest, tel que discuté en section 2, l'horizon de cuirasse est peu présent.

3.1.2 Aquitard (*limonite*)

On sait que la zone de limonite transmet de l'eau dans les directions latérales et verticales. La partie supérieure de la limonite présente des fissures ouvertes qui peuvent transmettre des volumes significatifs d'eau, principalement pendant la saison humide. Cet écoulement contribue à l'écoulement de base qui continue dans les cours d'eau locaux après le ruissellement rapide initial. Cette portion supérieure de la limonite n'est toutefois pas saturée toute l'année et a tendance à se comporter comme l'aquifère superficiel (saisonnier).

³ En référence à la nomenclature de la section 2, on comprendra que l'appellation de *Vallée de la Kwé Ouest* (KO) couvre un territoire plus large que la vallée où sera construite l'aire de stockage qui est le sous-bassin KO2. À partir de maintenant et sauf indication contraire, les mentions de l'aire de stockage ou de la vallée de la Kwé Ouest se réfèrent au KO2.

Il est interprété que la portion inférieure de la limonite se comporte comme un aquitard qui recharge lentement l'aquifère profond (saprolite) pendant toute l'année. Cet aquitard est présent sur la plus grande partie du Site de Goro, hormis certaines vallées où la péridotite est exposée à la surface et certaines vallées qui sont remplies d'alluvions récents.

3.1.3 *Aquifère profond (saprolite)*

L'aquifère profond est composé de la zone de transition et la saprolite (figure 3.3). Les directions de l'écoulement des nappes d'eau souterraines dans cet aquifère ne correspondent pas nécessairement à celles de l'aquifère superficiel et sont contrôlées localement par des structures géologiques (failles). L'aquifère profond est en général confiné ou partiellement confiné par l'unité de limonite qui sépare les aquifères superficiels et profonds.

3.1.4 *Aquifère du socle (zones de fractures profondes)*

Le substratum rocheux de péridotite non fracturé est caractérisé par de faibles conductivités hydrauliques. Toutefois, lorsque des zones de fracture sont présentes, la conductivité hydraulique peut être relativement élevée. Quand un "pseudo-karst" se développe dans ces zones de fracture, l'augmentation de la conductivité hydraulique peut être encore plus significative avec des valeurs estimées de l'ordre de 10^{-3} m/s. Il est à noter que les valeurs de conductivité hydraulique de la péridotite fracturée rencontrées au site de l'aire de stockage sont généralement plus de l'ordre de 10^{-4} m/s et moins.

Les configurations de l'écoulement dans les fractures peuvent suivre les directions d'écoulement des aquifères profonds mais, comme des essais au traceur l'ont indiqué pour les vallées de la Kwé Est et Kwé Nord, un écoulement à travers les bassins-versants peut également se produire. Ce type d'écoulement est strictement dicté par l'orientation de la(des) zone(s) fracturée(s) et, quand il se produit, ne présente pas forcément de coïncidence avec les directions d'écoulement observées dans l'aquifère profond ou dans la péridotite non fracturée adjacente.

3.1.5 *Recharge des aquifères*

À Goro, presque toutes les précipitations s'infiltrent immédiatement dans le sol, dans l'aquifère superficiel. Cependant, seule une partie d'entre elles s'infiltrer plus profondément. Une recharge vers des zones plus profondes se produit quand les conditions topographiques et géologiques permettent à une partie importante des précipitations de s'infiltrer au-delà de l'aquifère superficiel, vers l'aquifère profond. Ceci est généralement le cas sur le Plateau de Goro où l'infiltration se produit directement quand une "fenêtre" existe dans la couche de limonite (c.-à-d. un entonnoir ou une doline) ou indirectement via la couche confinante de limonite lorsque l'aquifère profond est confiné.

Les zones de décharge correspondent aux zones où la nappe phréatique pénètre dans les cours d'eau via divers mécanismes.

Le haut potentiel d'infiltration du sol dans les bassins-versants du système de la Kwé Nord entraîne un ruissellement primaire qui produit un "écoulement rapide"⁴ à partir des précipitations qui s'infiltrent à la surface, lequel "écoulement rapide" se déplace latéralement dans une zone saturée temporaire (l'aquifère superficiel) dans la cuirasse de fer⁵. Cette eau atteint rapidement les canaux fluviaux et diffère de l'écoulement d'aquifère profond par la rapidité de sa réponse et sa magnitude relativement grande. En général, cette eau est aussi d'un pH faible (4.0 à 4.5).

Une partie de l'eau qui atteint l'interface entre la cuirasse de fer et la limonite sous la cuirasse de fer, se dirige vers le bas pour recharger l'aquifère profond tandis que le reste se déplace latéralement vers le fond des vallées, constituant ainsi une partie de l'écoulement de base.

L'écoulement de base qui atteint les cours d'eau à Goro provient de l'aquifère profond (surtout là où il est proche de la surface topographique ou bien lorsqu'il affleure) et du drainage lent de la partie supérieure de la séquence de limonite, là où celle-ci est plus largement fissurée. Le débit de base suit l'écoulement rapide avec un décalage de temps étant donné la plus grande distance et la plus haute "résistance" que l'eau doit traverser.

3.1.6 Variations saisonnières des niveaux de la nappe phréatique

Les niveaux de la nappe phréatique mesurés par la plupart des piézomètres installés sur le site de Goro présentent des variations saisonnières nettes qui sont associées au cycle des saisons humide/sèche, avec des niveaux élevés pendant la saison humide et des niveaux plus bas pendant la saison sèche.

Les piézomètres à niveaux multiples placés sur le Plateau de Goro indiquent que, pour presque tous les piézomètres dont la crépine supérieure est installée dans l'aquifère superficiel (cuirasse de fer) ou dans la zone intermédiaire (aquitard de limonite) et dont la crépine inférieure est installée dans l'aquifère profond (saprolite), des gradients verticaux descendants existent. Les données indiquent également que l'aquifère superficiel se dessèche après la saison humide, tandis que la partie inférieure de la zone intermédiaire demeure généralement saturée. Les gradients verticaux descendants indiquent que la limonite transmet une recharge à l'aquifère de saprolite profond sur une plus longue période.

Les données des piézomètres à niveaux multiples placés dans les vallées indiquent également des gradients verticaux, mais ces gradients varient d'un endroit à l'autre, étant ascendants à certains endroits et descendants à d'autres.

Les zones de crête indiquent généralement des variations saisonnières importantes (de l'ordre de 20m) dans les niveaux de la nappe phréatique. Bien que l'infiltration sur les crêtes soit vraisemblablement limitée, l'interprétation des fluctuations importantes est qu'elles résultent

⁴ L'écoulement du cours d'eau est généré par la combinaison d'un "écoulement de base" (écoulement restitué de la nappe phréatique), un "écoulement hypodermique" (écoulement rapide à travers des fissures ouvertes, des macro-pores, et des zones d'infiltration dans le sol superficiel) et le ruissellement à la surface d'un sol peu perméable ou temporairement saturé. L'écoulement hypodermique et le ruissellement constituent "l'écoulement rapide" qui, à Goro, se produit dans l'aquifère superficiel.

⁵ Dans ce contexte, la cuirasse de fer inclut les zones de cuirasse et de grenaille.

du faible coefficient d'emmagasinement de la péridotite et de la topographie escarpée de la crête qui favorise le drainage de la nappe phréatique après la saison humide.

En général, les vallées présentent des variations saisonnières modérées (de l'ordre de 5 à 10 m) des niveaux de la nappe phréatique. C'est parce que les vallées sont principalement des points de décharge permettant une accumulation limitée de pression piézométrique pendant la saison humide. De plus, les vallées sont alimentées pendant toute l'année par le système aquifère adjacent, et, par conséquent, les niveaux d'eau de la nappe phréatique ne présentent pas de baisses très prononcées durant la saison sèche.

3.2 Secteur de l'aire de stockage de la Kwé Ouest - Piézométrie

Les niveaux d'eau souterraine dans le secteur de l'aire de stockage de la Kwé ouest font l'objet d'un suivi régulier depuis l'aménagement des premiers piézomètres en 2004. Toutes les données mesurées sont consignées au tableau E-1 de l'annexe E et illustrées sous forme de courbes d'évolution des niveaux d'eau en fonction du temps (voir annexe E).

L'examen des données du tableau E-1 montre qu'au fil du temps, le nombre et l'identité des piézomètres faisant l'objet d'un suivi ont varié. Certains piézomètres ont relativement peu de mesures, soit parce que leur durée de vie a été limitée ou encore parce qu'ils ne faisaient pas partie des tournées régulières de mesure en raison de difficultés d'accès. Les piézomètres installés pour le suivi de la qualité des eaux souterraines installés au début de 2007 n'ont pas encore été formellement intégrés au suivi piézométrique et n'ont pas encore beaucoup de données. Néanmoins, plusieurs piézomètres comptent plus d'une cinquantaine de mesures étalées sur quelques années qui permettent d'apprécier les fluctuations normales sur plusieurs cycles saisonniers et tracer des cartes piézométriques de l'écoulement horizontal de l'eau souterraine. À quelques endroits, les piézomètres ont été aménagés en paires dont l'un est aménagé au niveau du roc et l'autre dans les dépôts meubles afin de pouvoir déterminer les gradients hydrauliques verticaux.

3.2.1 Profils temporels et gradient verticaux

Les profils temporels de piézométrie sont répartis sur plus d'une figure selon des fourchettes d'élévation afin de permettre l'utilisation d'une échelle verticale appropriée et éviter un encombrement afin de faciliter l'examen des données. De plus, sur ces graphiques on a ajouté les données de précipitations sous forme d'une courbe cumulative des valeurs résiduelles de précipitation⁶ pour fin de comparaison des régimes pluviométrique et piézométrique.

L'examen des figures révèle, qu'en général, les profils piézométriques correspondent assez bien à celui des précipitations avec une bonne adéquation des creux et bosses et surtout des

⁶ Cette courbe est obtenue calculant la moyenne des données quotidiennes de précipitations (station SMAC, données de janvier 1997 à mai 2007) et en traçant la courbe cumulative des écarts des précipitations quotidiennes par rapport à cette moyenne. Traité de cette façon, le profil des précipitations devrait ressembler au profil piézométrique pour les piézomètres avec un bon degré de connectivité avec la surface.

tendances croissante/décroissante. Cette similitude des profils, qui sont surtout issus de piézomètres aménagés dans le socle rocheux, suggère l'existence d'un bon degré de connectivité entre l'aquifère du roc et le régime pluviométrique de surface. En ce qui concerne les dépôts meubles, on constate que les profils piézométriques correspondent souvent moins bien à celui des précipitations que ceux des piézomètres voisins aménagés à plus grande profondeur dans le roc.

Aux endroits où des paires de piézomètres ont été installées, avec un piézomètre dans les dépôts meubles et l'autre de le socle rocheux, le gradient hydraulique vertical semble toujours orienté vers le bas et ce, quel que soit le cycle pluviométrique ou la localisation dans le secteur de l'aire de stockage⁷. Si le sens du gradient semble assez constant, son intensité est plutôt variable avec des écarts de l'ordre de la dizaine de centimètres (WKBH11 et 11A) à près de la dizaine de mètres (WKBH10 et 10B). Compte tenu de l'élévation des crêtes entourant la vallée de l'aire de stockage et de l'hypothèse que la portion centrale de cette vallée sert d'exutoire principal à l'écoulement de l'eau souterraine (zone de décharge), on s'attendrait à ce que les gradients hydrauliques verticaux dans cette zone soient orientés vers le haut. Or, comme on l'a indiqué précédemment, ils sont orientés des dépôts meubles vers le socle rocheux et donc vers le bas.

Une interprétation de ce phénomène serait qu'il existe entre le socle rocheux et les latérites sus-jacentes un 'exutoire' où se dissipe la charge hydraulique de la nappe du socle rocheux. Cet exutoire serait toutefois de capacité limitée puisqu'en général les niveaux d'eau des piézomètres aménagés dans le socle rocheux se situent tout de même à hauteur des dépôts meubles. Les résultats des essais hydrauliques récemment réalisés à la source (voir section 4) tendent à appuyer cette hypothèse.

Il est à noter qu'au piézomètre WKBH102 aménagé dans le roc situé à moins de 50m de la source, le niveau d'eau se situe à une élévation de l'ordre de 157,5m soit pratiquement l'élévation du sol entourant la source.

3.2.2 *Cartes piézométriques et écoulement horizontal*

Compte tenu des variations significatives des niveaux piézométriques associées aux cycles pluviométriques, deux cartes piézométriques ont été tracées (voir figures 3.4 et 3.5) soit une pour des conditions de saison sèche (janvier-mars 2005) et l'autre pour la saison des pluies (octobre-décembre 2005). La méthode utilisée pour la construction des cartes est expliquée en détails dans la note de service GNI reproduite en annexe E. Compte tenu de la répartition spatiale des points de mesures, la définition du patron d'écoulement est meilleure vers le centre de la vallée que près de ses limites.

⁷ Par ailleurs, il est à noter que la plupart des paires de piézomètres sont localisées près de l'axe de la berme et qu'il n'y en a pas sur la partie amont de la vallée ou sur les flancs de cette dernière.

De l'examen des cartes, on constate que l'écoulement⁸ converge vers le centre de la vallée puis vers son embouchure à l'est/nord-est, ce patron d'écoulement étant similaire pour les saisons sèche ou humide.

Les gradients hydrauliques horizontaux au centre de la vallée pour l'aquifère du socle rocheux, calculés à partir du tracé des isopièzes varient de 0,02 m/m à 0,03 m/m en période sèche ou en période humide. Sur les flancs de la vallée, les gradients sont orientés vers le centre de la vallée et tendent à être plus prononcés avec des valeurs de l'ordre 0,06 m/m jusqu'à 0,018 m/m. Toutefois, dans ce dernier cas, étant donné le nombre limité de points de contrôle sur les flancs de la vallée, on doit considérer avec prudence la définition piézométrique dans ce secteur.

3.2.3 Conductivité Hydraulique

Lors des études de caractérisation géotechnique et hydrogéologique menées en 2004/2005 au site de l'aire de stockage de la Kwé ouest (voir rapport Golder 474 en annexe A) la plupart des forages réalisés ont été l'objet d'essais de perméabilité in situ (essais Lefranc, essais Lugeon) dans les différents horizons de dépôts meubles ainsi que dans le socle rocheux. Les valeurs de conductivité hydraulique⁹ obtenues à partir de ces essais sont consignées au tableau E-2 et illustrées à la figure 3.6.

Les valeurs moyennes de conductivité hydraulique, établies à partir des données disponibles pour chacune des principales couches, sont présentées au tableau 3.1.

Les valeurs moyennes de conductivité hydraulique des dépôts meubles obtenues à partir des essais en forage, sont plutôt similaires¹⁰ avec une fourchette de valeur comprise à l'intérieur d'un demi-ordre de grandeur. La moyenne des valeurs pour le socle rocheux est quant à elle, plus faible de 1 à 2 ordres de grandeur, alors que la fourchette de valeurs s'étale sur environ 4 ordres de grandeur. Les valeurs maximales observées dans le socle rocheux sont de l'ordre de 10^{-5} et 10^{-4} m/s et ont été observées dans des zones fracturées.

⁸ En supposant que l'écoulement de l'eau souterraine soit perpendiculaire aux isopièzes. Les directions réelles d'écoulement dans le socle rocheux seront également affectées par le patron de fracturation de ce dernier.

⁹ Dans le cadre du présent rapport, les termes *perméabilité* et *conductivité hydraulique* seront utilisés de façon interchangeable et entendus comme représentant la conductivité hydraulique.

¹⁰ Excluant la cuirasse ferrugineuse, peu présente dans l'aire de stockage, à laquelle on attribue une perméabilité élevée, bien que non chiffrée, à la lueur des taux d'infiltration élevés visuellement observés

4.0 ÉTUDES AU SITE DE LA SOURCE WK17

Dans le secteur en aval de l'axe proposé de la berme, se trouvent un alignement de dolines ainsi que deux sources WK17 et WK20 de débits estimés respectifs de 35 L/s et 2-3 L/s (voir carte 4.1 pour localisation).

Afin de mieux comprendre le rôle hydraulique de la source WK17, des travaux de caractérisation complémentaire ont été réalisés d'avril à juin 2007. Ces travaux sont résumés au tableau 4.1 et leurs résultats sont présentés dans les sections subséquentes.

4.1 Inspection visuelle, échantillonnage et bathymétrie

Dans le cadre du programme d'inspection des dolines/vides/cavités (voir section 2 et annexe D), les sources WK17 et 20 avaient déjà été identifiées. Les photographies 4.1 et 4.2 montrent respectivement les sources WK17 et WK20 telles qu'elles se présentaient en avril 2007. La source WK17 émerge d'une cavité de forme circulaire d'environ 6 à 7 mètres de diamètre. Cette cavité est entourée d'une zone hydromorphe qui s'étend vers l'aval sur environ 500m en suivant les contours du ruisseau alimenté par la source (largeur maximale de l'ordre de 30m, voir carte 4.1 pour localisation). La zone hydromorphe couvre une superficie d'environ 4 500m² qui est marquée par un changement de végétation. Ce contraste de végétation tend à confirmer le caractère pérenne de la source qui selon les observations de terrain des dernières années, alimente un ruisseau qui coule à l'année longue.

Un échantillon de l'eau de la source a été prélevé le 26 avril pour fins d'analyses chimiques. Les analyses ont été réalisées sous la responsabilité du laboratoire de la *Calédonienne des Eaux* basé à Nouméa.

Une bathymétrie sommaire (voir annexe E), réalisée le 3 mai à l'aide d'un petit canot gonflable et d'une sonde lestée, a permis d'établir que les rebords étaient sub-verticaux et que la profondeur était de l'ordre de 3 à 4 m avec un maximum mesuré de 5,1 mètres.

4.2 Jaugeage du ruisseau

Le 8 mai, le débit du ruisseau a été estimé à 30 L/s par la mesure du profil des vitesses de courant sur une section du ruisseau située à l'aval de la zone hydromorphe (voir résultats à l'annexe E). Ce résultat tend à confirmer les observations de débit réalisées lors des essais de pompage subséquents (voir section 4.5) bien que l'on doive surtout considérer cette mesure de débit à titre indicatif puisque ponctuelle dans le temps (mesure « instantanée »).

4.3 Relevés Géophysiques

Les travaux de géophysique réalisés dans le secteur de l'aire de stockage font l'objet d'une description complète dans les rapports spécifiques reproduits à l'annexe C. Les principaux résultats de ces relevés ainsi que leur interprétation en rapport avec la géologie sont présentés à la section 2.

Au total, 3 lignes de résistivité électrique ont été réalisées (LS-1 à LS-3, voir l'annexe C pour localisation) pour un total d'environ 2 050m linéaires.

4.4 Forage et aménagement des piézomètres WKBH102 et 103

L'interprétation des résultats de l'étude géophysique ont été utilisés pour le positionnement des forages WKBH102 et WKBH103 (voir tableau 4.2 pour coordonnées géodésiques et carte 4.1 pour localisation) qui avaient pour objectifs de vérifier les résultats de relevé géophysique, de mieux définir le profil stratigraphique aux abords de la source et de constituer des points de mesure des niveaux de l'eau souterraine.

4.4.1 Forage

Les deux forages ont été réalisés par carottage au diamant en calibre H. Les échantillons recueillis par carottier ont fait l'objet d'un examen et leur description est consignée dans les journaux de forage de l'annexe E. Il est à noter que le terme « core loss » (perte d'échantillon) qui revient assez fréquemment dans les descriptions témoigne des difficultés de récupération des échantillons et ce particulièrement dans les dépôts meubles et ne devrait pas être interprété comme des vides. Le terme « void » (vide) beaucoup moins fréquent, a été utilisé dans les cas où il y a eu perte de résistance à l'enfoncement des tiges de forages, ce qui n'indique pas automatiquement l'existence d'un vide perméable compte tenu de l'occurrence fréquente de matériaux de remplissage à grain fin dans les fissures du roc.

Le forage WKBH102 a été poursuivi jusqu'à une profondeur d'environ 39m (élévation : 127,9m) sous la surface du terrain et les contacts entre la zone de latérite, celle de transition, la saprolite rocheuse et ensuite le socle rocheux¹¹ ont été positionnés aux profondeurs respectives de 19m, 25.5m et 29m. Il est à noter que lors du forage, il y a eu perte totale du retour d'eau aux alentours de 32-34m de profondeur et quelque temps après on a constaté un changement de couleur de l'eau de la source (située à environ 50m du WKBH102) qui est devenue rougeâtre (voir photos 4.1 et 4.3). L'examen des carottes de forage a montré l'existence d'une zone fracturée du socle rocheux entre 33 et 34m de profondeur avec présence d'altération rougeâtre.

Le forage WKBH103 a été poursuivi jusqu'à une profondeur d'environ 65m (élévation : 91,8m) sous la surface du terrain et le contact avec le socle rocheux a été positionné à une profondeur de 21,5m. Les dépôts meubles sus-jacents sont constitués d'une mince zone de transition (environ 2m) surmontée d'une cuirasse ferrugineuse sur lesquelles reposent approximativement 16 mètres de latérites transportées. Lors du forage, il y aurait eu perte du retour d'eau de forage à partir du moment où une profondeur d'environ 27,5m a été atteinte et ce jusqu'à 61m de profondeur. Contrairement à ce qui s'est produit lors du forage du WKBH102, aucun changement de couleur de la source WK17 n'a été observée pendant le forage.

¹¹ Le lecteur se reportera à la section 2 pour une description géologique détaillée des différents horizons rencontrés.

Une importante zone bréchifiée d'environ 4 mètres d'épaisseur a été rencontrée dans le socle rocheux à des profondeurs entre 48,5m et 52,5m. Sous cette zone de brèche, il y a eu un avancement des tiges de forage sous leur propre poids entre 59,5 et 60,2m de profondeur¹². Un essai d'injection d'eau subséquent a montré une forte capacité d'absorption d'eau dans ce secteur et lors de l'aménagement du piézomètre, une quantité importante de sable filtrant a été injectée à ce niveau sans remontée observable du niveau de sable dans le forage à la profondeur de 56m. Environ 7 sacs de sable (un volume total d'environ 120L) ont été requis pour amener, le niveau du sable filtrant de 61,65m (fond du forage) à 56m. Le volume théorique de l'espace annulaire entre le tubage de PVC et le forage serait plutôt de l'ordre de 36L.

Ces éléments combinés suggèrent l'existence d'une cavité significative en profondeur au droit du WKBH103, mais ils ne permettent pas d'établir si cette cavité est « connectée » avec le système aquifère ou si elle est en lien hydraulique avec la source WK17.

4.4.2 Aménagement de piézomètres

Des piézomètres ont été aménagés dans les forages WKBH102 et 103, avec une zone crépinée au niveau du socle rocheux. De plus au site du WKBH102, un deuxième forage peu profond a été réalisé à proximité afin de permettre l'aménagement d'un piézomètre dans les dépôts meubles. La description détaillée des aménagements se trouve à l'annexe E.

4.5 Essais de pompage à la source WK17

Lors de l'inspection de la source en fin avril, deux hypothèses ont été émises quant à la provenance de l'eau qui alimente son débit. Une première hypothèse était que l'eau circule dans les dépôts meubles à la base de la cuirasse secondaire située en amont de la source. La deuxième hypothèse impliquait une alimentation provenant du socle rocheux via un linéament parallèle à l'axe de la vallée et au long duquel se trouve un alignement de dolines.

Dans le but de vérifier ces hypothèses, un essai de pompage rapide et simple a initialement été proposé avec l'idée de pomper la cavité de la source pour permettre la visualisation de la provenance de l'eau (i.e. paroi latérale et/ou fond de l'excavation) et estimer le débit de la source. En fin de compte, deux essais ont été réalisés selon les paramètres résumés au tableau 4.3.

Comme on le constate, les deux essais se sont déroulés de façon très similaire. Le deuxième essai a été entrepris quelques jours plus tard à la lueur des résultats du premier qui indiquaient que des piézomètres relativement éloignés de la source semblaient avoir réagi au pompage. Entre autres, les piézomètres électriques à corde vibrante installés dans le cadre du programme d'instrumentation géotechnique de la berme (WF-1 à 36, pour plus de détails sur ces piézomètres le lecteur de réfèrera aux journaux de forage en annexe E), qui font l'objet de mesures quotidiennes, semblaient avoir subi une baisse en réaction au pompage. Une telle

¹² Lors des courses de forage précédentes de 57.5m à 59.5m aucun échantillon n'a été récupéré. Il est donc possible que cette cavité présumée (« inferred void ») s'étende entre 57,5m et 60,2m même si la chute des tiges de forage s'est effectuée sur un intervalle plus restreint.

réaction, si causée par le pompage, aurait signifié que la zone d'influence du pompage était relativement plus importante qu'initialement envisagé et modifié substantiellement l'interprétation des résultats.

Un deuxième essai a donc été démarré 5 jours plus tard avec des modifications apportées aux paramètres d'opération :

- Un seul débit de pompage ;
- une période de pompage plus longue (480 minutes au lieu de 340);
- une fréquence de mesure un peu plus élevée dans les piézomètres à corde vibrante (3 au lieu d'une seule) et ;
- suivi d'un plus grand nombre de piézomètres conventionnels (20 au lieu de 14).

Les données des mesures des niveaux d'eau des essais de pompage #1 et #2 sont consignées aux tableaux E-3 et E-4 à l'annexe E. Les données de suivi des piézomètres à corde vibrante depuis leur installation au début de l'année 2007 sont également trouvées à l'annexe E. En raison de la similitude du déroulement des essais, l'interprétation des résultats présentée dans les prochaines sections se concentrera principalement sur le deuxième essai étant donné son caractère plus complet.

4.5.1 *Interprétation des résultats*

Le pompage réalisé à partir du trou de la source ne correspond pas à l'approche classique d'un tel essai à partir d'un puits de pompage dont la construction et la géométrie sont bien définies. L'ignorance de la forme et dimension de la zone d'entrée d'eau limite l'applicabilité des méthodes classiques d'interprétation. Pour cette raison, les interprétations quantitatives des résultats exposées ci-dessous doivent être considérées avec prudence. Toutefois, en dépit de ces limitations, plusieurs informations intéressantes sont tirées de cet essai quant à la nature du système hydraulique.

4.5.1.1 **Essai à charge constante (10 mai)**

Le 10 mai, après une période initiale d'ajustement, le débit a été maintenu à une valeur relativement constante de 35 L/s pendant un peu plus de 4 heures (247 minutes) en induisant un rabattement stable d'environ 2 mètres. Si on assimile cette procédure à un essai à charge constante, alors :

$$Q = F K \Delta H \quad \text{ou} \quad K = Q / F \Delta H \quad [1]$$

Où

Q : débit de pompage (L^3/T) = 35 L/s = 0,035 m³/s

F : facteur de forme pour tenir compte de la géométrie de la zone de pompage (L)

K : conductivité hydraulique (L/T)

ΔH : charge hydraulique imposé par le pompage (L) = 2m

Tel que mentionné, la géométrie du système de pompage est mal définie, ce qui affecte la détermination du facteur de forme. Différentes hypothèses ont été examinées afin d'obtenir des valeurs de conductivité hydraulique pour la zone de la source.

Cas 1 –Écoulement uniquement par le fond du trou

En supposant que toute l'eau qui alimente la source ne provient que du fond de l'excavation (i.e. pas d'écoulement des parois latérales) on pourrait assimiler cette géométrie à celle d'un essai en bout de tubage pour lequel le facteur de forme est assimilé à une demi-sphère et :

$$F = \Pi D \quad [2]$$

Où

D: diamètre du fond de la cavité par lequel transite l'eau.

Si l'on pose l'hypothèse initiale que l'eau s'écoule par tout le fond de la cavité alors $D = 6m$ et en utilisant la valeur de F résultante dans l'équation [1] on obtient $K = 9 \times 10^{-4} m/s$

On peut également examiner le cas où seule une partie du fond contribue à l'écoulement de l'eau par le biais de « conduits » connectés avec le socle rocheux.

D = 3m, alors $K = 2 \times 10^{-3} m/s$

D = 2m, alors $K = 3 \times 10^{-3} m/s$

D = 1m, alors $K = 6 \times 10^{-3} m/s$

Cas 2 - Écoulement par le fond et les parois latérales

Si l'on suppose qu'une partie de l'eau provient également d'écoulement latéral sur une hauteur L, alors :

$$F = 2 \Pi L / \ln [L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2}] \quad [3]$$

Utilisant une valeur de $D = 6m$ et $L = 3m$ dans les équations [3] puis [1] on obtient $K = 4 \times 10^{-4} m/s$. Comme pour le cas précédent, si l'on suppose que seule une partie du fond de la cavité participe à l'écoulement de l'eau, on obtiendra des valeurs de perméabilité plus élevées.

On constate que selon les hypothèses utilisées, la valeur de K obtenue peut varier de l'ordre de $10^{-3} m/s$ à $10^{-4} m/s$. De plus, les facteurs de forme utilisés supposent que l'eau provient des dépôts meubles dans lesquels se trouve le trou de la source. Or, la réaction enregistrée dans les autres piézomètres (voir prochaine section) suggèrent l'existence d'un lien hydraulique via l'aquifère rocheux. Pour cette raison, l'interprétation des essais hydrauliques s'intéressera aussi à la réaction mesurée dans les piézomètres.

4.5.1.2 Essai de pompage No2 – interprétation qualitative

L'interprétation du 2eme essai de pompage et particulièrement de la réponse hydraulique observée dans les piézomètres suite au pompage à la source WK17, est faite en 2 étapes. La première, décrite dans la présente section, est qualitative et visait l'identification des piézomètres dans lesquels une réaction hydraulique due au pompage était perceptible. Dans la seconde qui est décrite à la section suivante, on a tenté, pour quelques piézomètres, d'interpréter la réponse et estimer des valeurs des paramètres hydrauliques.

Les mesures de niveau d'eau dans les piézomètres sont présentées sur 13 graphiques de niveau d'eau en fonction du temps (figures 4.1 à 4.13).

Le premier graphique (figure 4.1) montre les résultats enregistrés avec les sondes automatiques mini-troll avec prise de données à intervalle de 5 minutes dans les piézomètres WKBH01, WK6-11 et WK 6-12 formant un profil piézométrique quasi-continu¹³. Les cinq graphiques suivants (figures 4.2 à 4.6) montrent les mesures manuelles dans les piézomètres. Étant donné que l'intervalle des niveaux d'eau mesurés dans les différents piézomètres pendant l'essai varie entre 155m et 180m, l'utilisation de plusieurs graphiques s'avérait nécessaire pour avoir une échelle verticale suffisamment fine pour permettre la visualisation des variations de niveau d'eau. Finalement, les 7 derniers graphiques (figures 4.7 à 4.13) illustrent les variations piézométriques observées quotidiennement aux 36 piézomètres à corde vibrante installés au début de 2007 pour l'instrumentation de la berme.

Mini-Troll

Comme on le constate de l'examen de la figure 4.1, la réponse enregistrée aux piézomètres WK6-11 et WK6-12, situés respectivement à une distance horizontale de 180m et 96m de la source, est rapide et relativement prononcée compte tenu du rabattement limité qui était imposé à la source (environ 3 mètres), ce qui suggère un bon degré de connexion hydraulique de ces piézomètres avec la source. Une réponse similaire avait été observée au WKBH102 (47m de la source) lors du premier essai avec un profil piézométrique pratiquement identique à celui de la source. Par contraste, le profil piézométrique au WKBH01 situé sur le flanc sud de la vallée à 261m de la source, ne semble pas du tout réagir au pompage.

Mesures Manuelles

L'interprétation des graphiques des mesures manuelles réalisées sur les 20 piézomètres suivis pendant l'essai est un peu plus compliquée que pour les profils générés par les sondes mini-trolls, en raison du nombre limité de mesures et de l'amplitude restreinte des variations piézométriques observées pendant cette période (15 et 16 mai. i.e. pendant le pompage et le lendemain de ce dernier). Néanmoins, certains commentaires sont formulés sur les profils piézométriques, tel que résumé au tableau 4.4.

¹³ Lors du premier essai, les 3 sondes automatiques avaient été installées à la source WK17, au WK6-11 et au WKBH102.

Ainsi, un certain nombre de piézomètres localisés au nord et au nord-ouest de la source WK17 ont montré une baisse de niveau d'eau pendant le jour du pompage et parfois son lendemain. Cette baisse pourrait être causée par l'effet du pompage mais pourrait également correspondre à une baisse généralisée du niveau piézométrique ou même à une superposition des deux effets. Malheureusement les limitations (le temps et le rabattement induit) de l'essai de pompage font en sorte qu'il n'est pas possible de répondre de façon concluante à cette question.

Par ailleurs, du côté du flanc sud de la vallée, il n'y a pas eu de réaction notable dans les piézomètres WKBH01, 02 et WK6-13 et cette portion de la vallée ne semble pas avoir été influencée par l'essai.

Les quelques piézomètres qui sont aménagés dans les dépôts meubles ont, en général, exhibé moins de baisse de niveau d'eau que leur contrepartie installée dans le socle rocheux, ce qui suggère que la transmission du cône de rabattement se fait en premier lieu via le socle rocheux.

Finalement, si la baisse observée au WKBH13, situé à plus de 500m de la source, était une réponse à l'essai de pompage, cela indiquerait une zone d'influence étendue vers l'amont malgré la durée limitée de l'essai.

Piézo-mètres à cordes vibrantes

Les figures 4.7 à 4.13 montrent le suivi des pressions interstitielles (montrées en élévation de niveau d'eau équivalente) mesurées dans les piézomètres à corde vibrante. Pour fin d'interprétation, un histogramme de la pluviométrie quotidienne y est également superposé. Pour chacun de ces piézomètres, une (1) mesure a été prise lors de l'essai de pompage du 10 mai et trois (3) mesures ont été prises lors de l'essai de pompage du 15 mai. Le tableau 4.5 fournit la liste des piézomètres ainsi que leur distance horizontale par rapport à la source WK-17.

Les observations suivantes sont faites à partir des figures :

- La grande majorité des profils montrent des fluctuations qui semblent correspondre assez bien avec le régime pluviométrique. Les profils qui montrent le moins de fluctuations sont ceux des piézomètres les moins profonds. Ces fluctuations en phase avec la pluviométrie suggèrent que les piézomètres ne sont pas isolés du régime hydrogéologique.
- À chacun des nids de piézomètres, les gradients hydrauliques développés dans les dépôts meubles sont tous orientés vers le bas (i.e. les piézomètres de surface ont un niveau hydraulique équivalent plus élevé que les piézomètres profonds) et ce malgré les variations causées par la pluviométrie. Cette observation tend à appuyer ce qui a été observé à propos des gradients verticaux entre les dépôts meubles et le socle rocheux, dans les paires de piézomètres conventionnels.

- Aux dates correspondant aux essais de pompage (10 et 15 mai), on observe deux pics vers le bas correspondant à des baisses de niveau d'eau sur plusieurs des profils, suivis d'une remontée après l'essai. La réponse semble plus marquée dans les piézomètres profonds et les plus près du socle rocheux et s'atténue au fur et à mesure qu'on s'élève dans le profil stratigraphique ce qui suggère que l'onde de rabattement s'est propagée du bas vers le haut.
- Le phénomène du double pic est observable pour le niveau le plus profond dans pratiquement tous les nids de piézomètres situés à des distances de la source pouvant aller d'environ 200m jusqu'à près de 400m.

Conclusions sur les observations qualitatives

Les observations faites dans les différents piézomètres suggèrent les conclusions suivantes :

- En dépit de sa durée et son rabattement induit assez limités, l'essai de pompage est parvenu à causer une baisse de niveau dans des piézomètres situés à plusieurs centaines de mètres de la source WK17 et créer une zone substantielle d'influence hydraulique.
- L'onde de rabattement se serait principalement propagée latéralement au niveau du roc et verticalement dans les dépôts meubles. Il existerait donc un réseau de fractures dans le roc avec un degré d'interconnexion significatif. La répartition spatiale des piézomètres affichant une réaction au pompage, indique que ce réseau de fractures est généralisé et n'est pas le fait d'uniquement un ou deux linéaments. Par ailleurs, le volume de ce réseau fracturé serait relativement restreint comme en témoigne la rapidité de propagation de l'onde de rabattement.
- La réaction au pompage n'est pas pour autant homogène et isotrope comme en témoigne la différence de réaction entre les piézomètres localisés dans les secteurs de l'appui sud et l'appui nord.
- L'expression de surface de la source WK17 est une cavité dans les dépôts meubles d'une profondeur moyenne de l'ordre de 3-5 m. Le socle rocheux dans le forage WKBH103 voisin a été rencontré à une profondeur de l'ordre d'une vingtaine de mètres et il y aurait une quinzaine de mètres de dépôts meubles sous le plancher de la cavité de la source. Il existe donc un « conduit » très perméable (le débit de la source étant de l'ordre de 30-35 L/s) traversant les dépôts meubles et qui connecte le réseau de fractures à la source. La nature et la géométrie de ce conduit ne sont pas connues.

4.5.1.3 Essai de pompage No2 – interprétation quantitative

En dépit des limitations d'exécution de l'essai de pompage et des incertitudes quant à la géométrie du système pompé (puits de pompage, aquifère pompé), une interprétation quantitative a été tentée à partir des réponses piézométriques mesurées dans les puits

d'observation afin d'obtenir des valeurs de paramètres hydrauliques de l'aquifère qui alimente la source WK17.

Géométrie – Hypothèses

Pour l'interprétation de l'essai, certaines hypothèses ont été posées quant à la géométrie du système :

- L'aquifère pompé que l'on suppose être composé de la partie supérieure du socle rocheux et de la saprolite/transition sus-jacente, est horizontal, homogène, isotrope et est assimilé à un milieu poreux équivalent. Cet aquifère est confiné et on lui attribue une épaisseur de 15m.
- La source est assimilée à un puits de pompage vertical d'un diamètre de 1 mètre dont la portion de prise d'eau traverse complètement l'aquifère confiné. Le choix du diamètre est arbitraire puisque la connexion entre la cavité de la source et l'aquifère sous-jacent se fait par une zone conductrice de géométrie inconnue, mais ce dernier est certainement inférieur à 6m puisque la bathymétrie a confirmé que la cavité a un plancher (i.e. le trou ouvert ne se poursuit pas jusqu'au roc).

Les données des piézomètres WK6-11 et WK6-12, dans lesquels une réaction claire a été observée et où des sondes mini-trolls fournissaient de bons profils de suivis des niveaux d'eau, ont été utilisées pour l'interprétation des essais. Les piézomètres où les mesures ont été faites manuellement n'ont pas été utilisés pour l'interprétation de l'essai en raison du nombre limité de mesures (2 à 4) pendant le pompage qui ne permettent pas un bon ajustement des courbes d'interprétation.

Les données ont été traitées avec AQTESOLV, un logiciel d'interprétation reconnu et largement utilisé dans l'industrie depuis plus d'une dizaine d'années. Les résultats sont consignés à l'annexe E sous forme de tableaux et courbes rabattement-temps. Les valeurs de paramètres hydrauliques obtenus de l'interprétation avec les méthodes de Theis (1935) et Cooper-Jacob (1946) sont compilées au tableau 4.6.

Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues sont de l'ordre de 7×10^{-4} m/s, ce qui est comparable aux valeurs obtenues de l'interprétation de l'essai à charge constante du 10 mai (10^{-4} à 10^{-3} m/s). Ces valeurs sont plus élevées que la valeur moyenne qui avait été attribuée à la zone de transition/saprolite (voir tableau 3.1) sur la base d'essais menés dans un nombre limité de piézomètres. Elles sont par ailleurs comparable aux résultats obtenus pour certains essais réalisés dans des zones de roc très fracturé.

Les valeurs de coefficient d'emménagement S sont de l'ordre de 0,003 à 0,006 ce qui peut être, entre autres, interprété comme l'indication d'un aquifère poreux semi-confiné ou encore d'un aquifère de milieu fracturé non-confiné. Étant donné que le niveau de l'eau souterraine des piézomètres aménagés dans le socle rocheux, est situé à la hauteur des dépôts meubles qui exercent un certain confinement, l'hypothèse d'une porosité plus élevée et d'un semi-confinement apparaît plus vraisemblable.

4.6 GÉOCHIMIE

Un échantillon de l'eau de la source a été prélevé le 26 avril, soit avant les essais de pompage, pour fins d'analyses chimiques. Les analyses (essentiellement des paramètres inorganiques) ont été réalisées sous la responsabilité du laboratoire de la *Calédonienne des Eaux* basé à Nouméa et les résultats sont consignés à l'annexe E. Ces résultats ont été consignés au tableau 4.7. Pour fin de comparaison, les résultats de la campagne d'échantillonnage des eaux souterraines réalisée en décembre 2006 sur les piézomètres WK6-9 à WK6-13 sont également consignés au même tableau. On notera toutefois qu'en raison, entre autres, du fait que les échantillonnages aient été réalisés à des périodes différentes (saison sèche vs saison humide), et que la qualité de l'eau n'est établie que sur la base d'une unique campagne d'échantillonnage, cette comparaison doit être considérée avec prudence.

Dans cette comparaison des résultats analytiques, on s'est surtout attardé à tenter d'établir s'il y avait plus de similitudes de profil géochimique de l'eau de la source avec celles provenant de piézomètres aménagés dans le socle rocheux ou ceux des dépôts meubles afin d'obtenir des indices supplémentaires sur la provenance de l'eau alimentant la source.

De façon générale, les concentrations en métaux dans les eaux des piézomètres et de la source sont relativement peu élevées et lorsque détectées sont souvent de l'ordre du $\mu\text{g/L}$ ou de dizaines de $\mu\text{g/L}$. Les métaux montrant les concentrations les plus élevées sont le chrome et le nickel ce qui, considérant le contexte géologique, n'est pas totalement surprenant.

Dans l'ensemble, il n'y a pas de contraste frappant entre les concentrations observées dans les piézomètres et la source. Toutefois, lorsqu'on sépare les piézomètres en deux groupes selon qu'ils sont aménagés dans le socle rocheux ou dans les dépôts meubles et qu'on met l'eau de la source en parallèle, on constate certaines similitudes entre l'eau de la source et celle des piézomètres du socle rocheux (voir figures 4.14 et 4.15). Par exemple, les teneurs en magnésium dans les piézomètres du roc sont généralement de l'ordre de la dizaine de mg/L alors que celles des piézomètres des dépôts meubles sont généralement inférieures à 5 mg/L et la source se situe autour de $8,5 \text{ mg/L}$.

De même le pH des eaux des piézomètres du roc semble généralement plus élevé que celui des piézomètres des dépôts meubles (ce pH décroissant vers la surface est consistant avec le fait que le pH des eaux de surface sur l'ensemble du site Goro est acide). Le pH de la source est presque neutre avec une valeur de 6,5. Lors de l'essai de pompage, le pH a fait l'objet d'un suivi régulier et les valeurs mesurées in situ se situaient entre 7,0 et 7,3 ce qui tend à confirmer le caractère neutre de l'eau de la source.

Bien que ces résultats, à eux seuls, ne permettent pas de conclure sans doute sur la provenance de l'eau souterraine, ils tendent à appuyer l'hypothèse établie par la réponse hydrauliques aux essais de pompage que la source WK17 est alimentée en bonne partie par un aquifère situé dans le socle rocheux. Compte tenu que l'eau doit traverser une épaisseur considérable de dépôts meubles pour parvenir à la surface, il est possible que le contact avec ces derniers vienne modifier la composition géochimique de l'eau de la source.

5.0 CONCLUSIONS

Cette section du rapport regroupe les principales conclusions obtenues des études.

5.1 Le contexte géomorphologique

Le site du sous-bassin KO2 (appelé aussi vallée de la Kwe Ouest), est totalement isolé de la Plaine des Lacs; dans cette dernière région, la circulation des eaux souterraines et les effets météorologiques contrôlent le profil d'altération des terrains en aval.

Au site du sous-bassin KO2, on ne rencontre pas un profil latéritique développé et complexe, à cause de sa récente histoire géologique de création.

Le site du sous-bassin KO2, est donc un excellent choix pour l'établissement d'une aire de stockage de résidus miniers.

L'étude des profils latéritiques au site de la Kwe Ouest montre une grande différence entre l'aval de la berme où on rencontre un domaine cuirassé à profil épais, à couches latéritiques épaisses et l'amont qui est plutôt caractérisé par un domaine colluvial à profil peu développé, à couches très peu épaisses et à couche de surface de matériaux transportés.

5.2 L'interprétation structurale

La cartographie de surface structurale met en place deux systèmes de linéaments, dont les directions principales sont N50° -N80°E, l'axe de création de la cellule du bassin, et N130°-140° E.

L'application récente de mesures de résistivité, soutenue par des contrôles de carottage, confirme l'importance de la conductivité électrique des axes serpenteux direction N50°-N80°, angle sub vertical 70°-80°, en partie sud du sous-bassin.

5.3 Les phénomènes d'effondrement

Les phénomènes d'effondrement au site de l'aire de stockage sont classés selon les trois types suivants:

- les dolines liées aux contextes structuraux dans le domaine cuirassé. Ces dolines, qui incluent la source WK17, sont essentiellement situées en aval de la berme.
- les paléochenaux en cavités dans le système colluvial. Ces phénomènes sont les cavités en zone de colluvion généralement rencontrées en amont de la berme. Dans ce secteur, de la latérite est excavée (comme matériau de construction pour la berme) à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 5 à 10 m. Les cavités, au nombre de 15 environ, ont toutes été rencontrées entre 0 et 3 m de profondeur.

- les cavités sur- et sous-cuirasse sur un petit domaine de palier rocheux en cours d'érosion. Ces phénomènes, qui sont le résultat d'érosion de surface, ont été observés essentiellement dans la partie sud de la berme.

Il faut également noter que des cellules-alvéoles sont perchées dans le domaine circulaire des crêtes rocheuses, définies en carte géomorphologique.

5.4 Les mesures de résistivité

Les mesures de résistivité ont confirmé la morphologie géologique des différents types de profils latéritiques, ainsi que des dômes ou paliers rocheux souterrains.

Le positionnement de la source WK17 est confirmé entre l'intersection de la morphologie du sous-bassin et de la nappe phréatique profonde. Les résultats des carottages et des mesures de résistivité autour de cette source, ont inclus l'interprétation d'un effet de la source par l'aquifère de la roche-mère. En contrebas d'un sous-bassin KO2 originellement fermé en cellule-alvéole, cette source est une logique de sortie d'eau dans une petite vallée effondrée entre le contact cuirassé/latéritique et l'îlot rocheux d'une seconde cellule-alvéole KO1. Cette source est un point principal de mesures de détection en contrebas du sous-bassin.

Le contexte de roche-mère saine y inclut un réseau de veinules altérées oxy hydroxydes dont la mesure de résistivité définit une anomalie particulière 500-1000 Ohm.m, étendue en profondeur sous le plateau au nord des 2 sources repérées.

5.5 Le contexte hydrogéologique

Les unités hydrogéologiques au site de l'aire de stockage incluent un aquifère superficiel, un aquitard, un aquifère profond et un aquifère de zone de fracture profond.

L'examen des profils piézométriques montre une correspondance avec les précipitations et une bonne adéquation des creux et bosses et surtout des tendances croissante/décroissante. Cette similitude des profils, qui sont surtout issus de piézomètres aménagés dans le socle rocheux, suggère l'existence d'un bon degré de connectivité entre l'aquifère du roc et le régime pluviométrique de surface.

5.6 Étude de la source WK17

La source WK17 est l'expression en surface d'une zone de résurgence d'eau souterraine formant une cavité quasi-circulaire formée dans les dépôts meubles d'un diamètre de l'ordre de 6-7 mètres et une profondeur de l'ordre de 3-4 mètres. Cette cavité est entourée d'une zone hydromorphe d'une superficie de l'ordre de 4500m² qui s'étend sur environ 500m en suivant le ruisseau alimenté par la source et qui est marquée par un changement de végétation. Ce contraste de végétation tend à confirmer le caractère pérenne de la source qui selon les observations de terrain des dernières années alimente un ruisseau situé en aval et qui coule à l'année longue. Un jaugeage ponctuel de ce ruisseau a permis d'établir un débit de l'ordre de 30 L/s.

Deux forages ont été réalisés à quelques dizaines de mètres de part et d'autre de la source WK17 pour vérifier les résultats de relevé géophysique, établir la stratigraphie à proximité de WK17 et permettre l'aménagement de piézomètres pour le suivi des niveaux d'eau souterraine. Les observations ont montré qu'il pourrait y avoir une quinzaine de mètres d'épaisseur de dépôts meubles séparant le socle rocheux du plancher de la cavité de la source. Lors du forage du WKBH102, les observations de chantier ont montré l'existence d'un lien hydraulique entre le roc à cet endroit et la source.

Deux essais de pompage ont été réalisés au site de la source. En dépit de durée et rabattement induit assez limités, les essais de pompage sont parvenus avec un débit moyen de l'ordre de 35-40 L/s à causer une baisse de niveau dans des piézomètres situés à plusieurs centaines de mètres de la source WK17 et créer une zone d'influence hydraulique substantielle.

L'onde de rabattement se serait principalement propagée latéralement au niveau du roc et verticalement dans les dépôts meubles. Il existerait donc un réseau de fractures dans le roc avec un degré d'interconnexion significatif. La répartition spatiale des piézomètres affichant une réaction au pompage, indique que ce réseau de fractures est généralisé et n'est pas le fait d'uniquement un ou deux linéaments. Par ailleurs, ce réseau de fractures serait vraisemblablement de volume limité comme en témoigne la rapidité avec laquelle l'onde de rabattement s'est propagée.

La réaction au pompage n'est pas pour autant homogène et isotrope comme en témoigne la différence de réaction entre les piézomètres localisés dans les secteurs de l'appui sud et ceux de l'appui nord.

L'hypothèse est faite sur l'existence d'un 'conduit' très perméable (le débit de la source étant de l'ordre de 30-35 L/s) traversant les dépôts meubles et qui connecte le réseau de fractures à la source. La nature et la géométrie de ce conduit ne sont pas connues.

L'interprétation quantitative des essais a été tentée en dépit des limitations des paramètres d'opération de ces essais. Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues sont de l'ordre de 7×10^{-4} m/s, ce qui est comparable aux valeurs obtenues de l'interprétation de l'essai à charge constante du 10 mai (10^{-4} à 10^{-3} m/s). Ces valeurs sont plus élevées que ce qui avait été attribué à la zone de transition/saprolite sur la base d'essais menés dans un nombre limité de piézomètres. Elles sont par ailleurs comparables aux résultats obtenus pour certains essais réalisés dans des zones de roc très fracturé.

Les valeurs de coefficient d'emmagasinement S sont de l'ordre de 0,003 à 0,006 ce qui peut être, entre autres, interprété comme l'indication d'un aquifère poreux semi-confiné ou encore d'un aquifère de milieu fracturé non-confiné. Étant donné que le niveau de l'eau souterraine des piézomètres aménagés dans le socle rocheux, est situé à la hauteur des dépôts meubles qui exercent un certain confinement, l'hypothèse d'une porosité plus élevée et d'un semi-confinement apparaît plus vraisemblable.

La comparaison des résultats d'analyses chimiques réalisées sur des échantillons de la source et d'eau souterraine provenant du secteur de la Kwé ouest a montré, pour certains paramètres,

des similitudes plus grandes de l'eau de la source avec celle de piézomètres aménagés dans le socle rocheux. Ceci tend à appuyer l'hypothèse d'une alimentation de la source à partir de l'aquifère du socle rocheux.

La présente étude a démontré que la source WK17 possède un degré de connectivité hydraulique significatif avec l'aquifère rocheux sous-jacent aux dépôts meubles et ce sur une proportion considérable de l'aire de stockage proposée. Cette caractéristique confère à la source WK17 un excellent potentiel à servir de point de surveillance de la qualité de l'eau souterraine et, le cas échéant, de point de contrôle hydraulique pour intercepter les eaux émanant de l'aire de stockage.

TABLEAUX

Tableau 2.1 : Comparaison des débits des eaux de surface – Période sèche de Décembre 2005 à Janvier 2006

Tableau 2.2 : Paramètres du profil latéritique

Tableau 2.3 : Coordonnées des lignes et leurs Objets

Tableau 3.1 : Valeurs moyennes de conductivité hydraulique

Tableau 4.1 : Résumé des travaux de terrain reliés au site de la source

Tableau 4.2 : Coordonnées des forages autour de la source WK17

Tableau 4.3 : Paramètres d'opération des essais hydrauliques au WK17

Tableau 4.4 : Commentaires sur les profils piézométriques de l'essai de pompage du 15 mai

Tableau 4.5 : Liste des piézomètres à corde vibrante

Tableau 4.6 : Interprétation de l'essai de pompage du 15 mai - Paramètres hydrauliques

Tableau 4.7 : Résultats analyses chimiques des eaux

Tableau 2.1 : Comparaison des débits des eaux de surface – Période sèche de Décembre 2005 à Janvier 2006

Lien présumé	Bassin Versant	Superficie (km ²)	Débit (L/s)	
			Décembre 2005	Janvier 2006
Lien Plaine des Lacs (PdL)	KN1	2,07		29,5
	KN2	3,13		81,5
	KN3	3,79		5,3
	KO5	3,50	89	
Pas de lien PdL	KE	2,00		Sec
	KO 1-2-3-4	12,03	10	Sec

Tableau 2.2 : Paramètres du profil latéritique

LITHOLOGIES	Gamme d'épaisseur (m)	Humidité (%)	Densité sèche (g/cm ³)	Caractéristiques
Cuirasse et grenaille	1-5 1-2	12 20	2.0 1.5	Oxydes de fer et de chrome résiduels Perméable Trace de grands éléments
Latérite rouge	6-10	38	1.0	Horizon remanié Quelquefois cobaltifère à sa base
Latérite jaune	15-20	45	0.9	Niveaux à manganèse-cobalt Textures reliques Jointis structuraux
Transition	2-4	49	0.9	Textures et structures reliques Aquifère profond Enrichissement en oxydes de manganèse
Saprolite	1-6	35	1.1	Très hétérogène, terreux ou rocheux
Blocs rocheux		8	2	Altération en croûtes
Substratum		4	2.4	Peu à moyennement serpentinisé Harzburgites dominantes

Tableau 3.1 Valeurs moyennes de conductivité hydraulique

Unité stratigraphique	Conductivité hydraulique moyenne [m/s]
Colluvions	$5,4 \times 10^{-6}$
Limonite	$4,6 \times 10^{-6}$
Transition/Saprolite	$1,3 \times 10^{-5}$
Péridotite (socle rocheux)	$2,9 \times 10^{-7}$

Tableau 4.1 Résumé des travaux de terrain liés au site de la source

Activité	Dates
Inspection visuelle, échantillonnage et bathymétrie	25-26 avril et 3 mai
Jaugeage du ruisseau situé en aval de la zone hydromorphe entourant la source et situé à l'aval de cette dernière	8 mai
Relevé de tomographie électrique 2D	7 au 10 mai
Forages et aménagement des piézomètres WKBH102 et 103	8 mai au 5 juin
Essais de pompage de la source	10 et 15 mai

Tableau 4.2 Coordonnées des forages autour de la source WK17

Station	Coordonnées géodésiques (IGN72) ¹		
	Est (m)	Nord (m)	Élévation du terrain à proximité (m)
Source (WK17)	698266	7531837	157,2
Source (WK20)	698322	7531887	155
WKBH102	698220	7531844	166,9
WKBH102A	698221	7531843	167,0
WKBH103	698287	7531814	156,4

Note : L'altitude de la source WK20 a été déduite à partir de la carte topographique.

¹ UTM – Zone 98S. Les coordonnées ont été obtenues par arpentage RTE (Real Time Kinematic) GPS.

PHOTOGRAPHIES

Photographie 4.1 : Vue de la source WK17

Photographie 4.2 : Vue de la source WK20

Photographie 4.3 : Changement de couleur de la source WK17

Photographie 4.4 : Essai de pompage à la source WK17

Photographie 4.5 : Essai de pompage à la source WK17

FIGURES

Figure	2.1	-	Interprétation des analyses de linéaments-Massif du Sud
Figure	2.2	-	Schéma des compartiments
Figure	2.3	-	Distribution chimiques en profil total – Analyses sur forages carottés
Figure	2.4	-	Photos minéralogiques (MET)
Figure	2.5	-	Photos minéralogiques (Lame mince polarisée)
Figure	2.6	-	Section globale du bassin
Figure	2.7	-	Comparaison des profils
Figure	2.8	-	Morphogenèse du bassin
Figure	2.9	-	Photographie de l'écoulement profond (Exercice minier)
Figure	2.10	-	La doline « Le Trou »
Figure	2.11	-	Photographies de cavités sous cuirasse
Figure	2.12	-	Photographie de paléochenaux
Figure	2.13	-	Erosion sur dôme
Figure	2.14	-	Synthèse des données géologiques, granulométriques, hydrogéologiques, géo-électriques du site de Goro
Figure	2.15	-	Profil tomographique Ligne1 -Travers du bassin-berme
Figure	2.16	-	Profil tomographique linéament Sud et résultat de conductivité
Figure	2.17	-	Degré de serpentinsation sur Dunite
Figure	2.18	-	Profil tomographique Lignes 6-Nord de la berme
Figure	2.19	-	Profil tomographique Ligne 14-Piémont Nord-ouest
Figure	2.20	-	Profil tomographique Ligne 10-Flanc sud du bassin KO2
Figure	2.21	-	Profil tomographique Ligne 11-Aval de la lavaka
Figure	2.22	-	Profil tomographique Ligne 15-Exutoire de la lavaka
Figure	2.23	-	WKBH104 sur le profil tomographique Ligne 15
Figure	2.24	-	WKBH104. Photographies minéralogiques
Figure	2.25	-	Interprétation de la conductivité des réseaux serpentins en roche-mère sur un profil vertical
Figure	2.26	-	Photographie de la fracturation cuirassée de surface
Figure	2.27	-	Coupe géologique NW-SE proche de la Source – Section « D »
Figure	2.28	-	WKBH 102
Figure	2.29	-	WKBH 103
Figure	2.30	-	Profil tomographique « LigneLS1 »
Figure	2.31	-	Profil tomographique « LigneLS2 »
Figure	3.1	-	Aquifères de Goro
Figure	3.2	-	Aquifère de cuirasse et grenaille de fer
Figure	3.3	-	Aquifère profond
Figure	3.4	-	Surface piézométrique – Saison sèche
Figure	3.5	-	Surface piézométrique – Saison humide
Figure	3.6	-	Synthèse des valeurs de K
Figure	4.1	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mini-Trolls
Figure	4.2	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mesures Manuelles (153-160m)
Figure	4.3	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mesures Manuelles (160-165m)
Figure	4.4	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mesures Manuelles (166-168m)
Figure	4.5	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mesures Manuelles (170-175m)
Figure	4.6	-	Essai de Pompage du 15 mai - Profils piézométriques - Mesures Manuelles (175-181m)
Figure	4.7	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-1-3 (chainage 400)
Figure	4.8	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-4-8 (chainage 500)
Figure	4.9	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-9-10 (chainage 705)
Figure	4.10	-	Essais de pompage - Profils piézométriques - WF-11-16 (chainage 400)
Figure	4.11	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-17-23 (chainage 600)
Figure	4.12	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-24-29 (chainage 400)
Figure	4.13	-	Essais de pompage - Profils piézométriques WF-30-36 (chainage 600)

- Figure 4.14 - Profil des concentrations en magnésium
Figure 4.15 - Profil des valeurs de pH

CARTES

Carte	2.1	- Relief géologique 1/50 000
Carte	2.2	- Bassins versants de la Kué
Carte	2.3	- Photo aérienne 1985 et grandes lignes des interprétations structurales
Carte	2.4	- Carte géomorphologique et structurale des sous-bassins KO1-KO2 de la Kué Ouest
Carte	2.5	- Domaines morphologiques du bassin KO2 de la Kwé Ouest
Carte	2.6	- Epaisseur du profil latéritique
Carte	2.7	- Sections tomographiques sur les linéaments
Carte	2.8	- Sections tomographiques et forages sur le fond 3D topographique
Carte	2.9	- Intersection de la topographie et du niveau piézométrique
Carte	4.1	- Plan de localisation – Région de l'aire de stockage de la Kwé Ouest

ANNEXE A

*Geotechnical and Hydrogeological Studies of the West Kwe Residue Storage Facility -
Goro Nickel Project - New Caledonia 474-03639030-R-pc-KWRSF Geotech and Hydro
Report Rev 0*

ANNEXE B

Rapports d'études spécifiques réalisées par Golder dans le secteur de la Kwé Ouest

- *Factual Report - Piezometer Installations - KWE WEST- Goro Nickel Project. 1132-03639030r-bd-Kwe West Piezo Report Rev A1*
- *Factual Report - Geotechnical Investigations - KWRSF Lineament - Goro Nickel Project. 1078-03639030r-bd-Lineament Report-RevA1*
- *Le milieu physique – Rapport de base sur le climat, la géologie, l'hydrologie et l'hydrogéologie. Projet Goro Nickel, Nouvelle-Calédonie. Novembre 2004. 412-03639030*

ANNEXE C

Rapports d'études géophysiques de Tomographie Electrique 2D – Préparé par la firme *Geophysical*

- Campagne de Tomographie Electrique 2D sur le site Kué-Ouest: Résultats et Interprétation. Mars 2006.
- Campagne de Tomographie Electrique 2D sur le futur site de stockage des résidus de la Kué-Ouest: Identification des linéaments. Mars-Avril 2007.
- Deuxième campagne de tomographie électrique 2D sur le site Kué-Ouest : Résultats et interprétation. Juin 2006
- Campagne de tomographie électrique 2D sur le futur site de stockage des résidus de la Kué-Ouest : Identification des linéaments et caractérisation de la source. Synthèse des campagnes 2006 et 2007. Mai-Juin 2007.

ANNEXE D

Rapport sur les dolines – Préparé par GCT

Dolines at the KWRSF Construction Phase - 3.1. Note de service préparée par GCT Geotechnical, 15 mai 2007.

ANNEXE E

Données factuelles complémentaires

- Données et graphiques des campagnes de suivi piézométrique 2004-2007
- Note de service sur la méthodologie de construction des cartes piézométriques
- Tableau synthèse des valeurs de conductivité hydraulique
- Résultats de la bathymétrie sommaire réalisée au site WK17
- Résultats du jaugeage du ruisseau en aval de la source WK17
- Journaux de forages et schémas d'installation de piézomètres (2007).
- Schémas d'installation de piézomètres à corde vibrante WF-1 à 36
- Tableaux des niveaux d'eau mesurés pendant les essais de pompage
- Tableaux des mesures piézométriques réalisées dans les piézomètres à corde vibrante
- Données factuelles des essais de pompage réalisés à la source WK17
- Résultats d'analyses chimiques des eaux
- Résultats d'essais de perméabilité