

MÉMOIRE DE MASTER

Situation environnementale et hydrogéologique de la fosse minière de Goro en Nouvelle-Calédonie

Septembre 2011 – Février 2012

Auteur :
Stéphanie Hubert

Tuteur à la Montanuniversität de Leoben :
em.O.Univ.Prof. Dr. Walter Vortisch
Hon.Prof. DI. Dr. Christian Schmid

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Datum : 06-05-2013, Leoben

Unterschrift :

Stéphanie Hubert

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement Professeur Walter Vortisch et Professeur Christian Schmid pour m'avoir permis de réaliser ce projet de master, ce qui n'aurait jamais été possible sans leur support. Merci de votre gentillesse et de votre soutien tout le long de ce travail !

Egalement un grand merci à vous, Frau Schmid, pour votre aide et votre suivi durant ces quatre semestres à Leoben. Ainsi que pour toutes les heures passées à corriger mon mémoire et mon allemand.

Sans oublier Renaud Mégard, mon maitre de stage à Nouméa. Merci pour ton accueil et pour avoir tout fait pour que j'aie de quoi rédiger un rapport complet en hydrogéologie. Et merci à René Rebatel pour m'avoir accepté dans ton entreprise et m'avoir fait confiance.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES ILLUSTRATIONS	7
TABLE DES TABLEAUX.....	8
TABLE DES ANNEXES.....	8
RESUME	9
ABSTRACT	10
INTRODUCTION	11
1 CONTEXTE GENERAL DE NOUVELLE-CALEDONIE	12
1.1 Contexte géographique, climatique et hydrologique de la Nouvelle-Calédonie	12
1.1.1 Contexte géographique.....	12
1.1.2 Contexte géomorphologique	12
1.1.3 Contexte climatique global.....	13
1.1.3.1 Un climat tropical océanique relativement tempéré.....	13
1.1.3.2 L'effet orographique.....	13
1.2 Contexte géologique de la Nouvelle-Calédonie.....	14
1.2.1 Formation de péridotites.....	14
1.2.2 Processus et profil d'altération des péridotites	16
1.3 Exploitation du nickel en Nouvelle-Calédonie.....	18
1.3.1 Les différents types de gisement.....	19
1.3.2 Propriétés et utilisation du nickel	19
1.3.3 Production mondiale et Calédonienne.....	20
2 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU SECTEUR ETUDIE	21
2.1 Contexte géographique de la mine.....	21
2.2 Contexte géologique du plateau de Goro	21
2.2.1 Analyse des cartes et coupes géologiques du plateau.....	21
2.2.2 Un massif ultramafique épais et peu différencié	22
2.2.3 Particularités des latérites de Goro	22
2.2.4 Détail des sept horizons géologiques principaux	23
2.3 Contexte hydrogéologique	24
2.3.1 Répartition de la pluviométrie sur l'année	24
2.3.2 Hydrostratigraphie : un système multi-couches	25
3 METHODE DE FONCTIONNEMENT DE LA MINE DE GORO.....	26
3.1 Histoire de l'entreprise minière: Vale Nouvelle-Calédonie	26
3.2 Méthode d'extraction du minerai : Exploitation à ciel ouvert en gradin.....	26

3.3	Préparation du minerai : mise en pulpe	26
3.4	Technique de traitement du minerai : l'hydrométallurgie.....	27
3.5	Les produits finis : l'Oxyde de nickel et le Carbonate de Cobalt	27
4	LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT : PROBLEMES, LOIS ET MESURES PRISES.....	28
4.1	Les pollutions potentielles des eaux dues à l'activité minière	28
4.2	La réglementation locale sur l'environnement.....	28
4.2.1	L'arrêté ICPE (Installation Classée Pour l'Environnement).....	28
4.2.2	Le principe de précaution et le suivi environnemental.....	29
4.2.3	L'engagement à l'égard du développement durable de Vale Nouvelle-Calédonie	29
4.3	La gestion des eaux, indispensable et obligatoire	29
4.3.1	Les rivières rouges : un phénomène courant du Grand Sud	30
4.3.2	La protection des eaux douces : les bassins de décantation.....	30
4.3.3	Le contrôle des eaux souterraines.....	31
4.3.4	La protection de l'eau : les paramètres qualité à suivre.....	31
4.4	Le traitement des résidus.....	32
4.4.1	Traitement des résidus liquides : rejet de l'eau dans le lagon	32
4.4.2	Traitement des résidus solides	32
5	SUIVI HYDROGEOLOGIQUE DE LA FOSSE MINIERE	33
5.1	Cadre et objectif de l'étude.....	33
5.2	Suivi piézométrique de la fosse minière	33
5.2.1	Objectif et déroulement	33
5.2.2	Description des équipements en place.....	33
5.2.3	Acquisition des données terrain.....	35
5.2.4	Traitement des données	35
5.2.4.1	Mesures manuelles	35
5.2.4.2	Mesures enregistrées	35
5.2.5	Présentation et analyse des résultats.....	36
5.2.5.1	Chroniques piézométriques	36
5.2.5.2	Mesures manuelles	37
5.2.5.3	Mesures automatiques	38
5.2.6	Interprétation	39
5.3	Campagne de caractérisation hydrogéochimique des nappes	42
5.3.1	Campagne de diagraphie sur piézomètres	42
5.3.1.1	Acquisition des données.....	42

5.3.1.2	Présentation des résultats.....	43
5.3.2	Campagne d'échantillonnage	44
5.3.2.1	Objectif.....	44
5.3.2.2	Piézomètres échantillonnés	44
5.3.2.3	Purge du piézomètre	44
5.3.2.3.1	Volume de purge	45
5.3.2.3.2	Méthode de purge	46
5.3.2.3.3	Stabilisation des paramètres physico-chimiques.....	47
5.3.2.3.4	Prélèvement des échantillons	47
5.3.2.4	Présentation des résultats.....	48
5.3.2.4.1	Les différents paramètres suivis	48
5.3.2.4.2	Paramètres physico-chimique mesurés <i>in situ</i>	48
5.3.2.4.3	Suivi et analyse des caractéristiques chimiques	51
5.3.2.4.4	Analyse des éléments majeurs.....	52
5.3.2.4.5	Analyse des métaux.....	59
5.3.2.4.6	Analyse des autres éléments dissous	62
5.3.2.4.7	Silicates	66
5.3.2.4.8	Récapitulatif des résultats.....	67
5.3.3	Interprétation des résultats.....	69
5.3.3.1	L'importance des conditions climatiques.....	69
5.3.3.2	Les données de conductivité.....	70
5.3.3.3	Dureté et alcalinité de l'eau.....	70
5.3.3.4	Géochimie par aquifère captée	70
5.3.3.4.1	Comparaison des trois nappes captées.....	70
5.3.3.4.2	Le diagramme de Piper.....	71
5.3.3.4.3	Nappe captée au niveau des latérites	72
5.3.3.4.4	Nappe captée au niveau des saprolites	73
5.3.3.4.5	Nappe captée au niveau des péridotites.....	73
5.3.3.4.6	Conclusion : des profils géochimique distincts	74
5.3.3.5	Différenciation de trois faciès géochimique différents.....	74
6	CONCLUSION	76
7	RECOMMANDATIONS.....	77
8	BIBLIOGRAPHIE.....	78

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: La Nouvelle-Calédonie, île du pacifique.	12
Figure 2: Température et précipitations annuelles en Nouvelle-Calédonie (croixdusud.info).....	13
Figure 3 : L'effet orographique (ROMIEUX 2011).....	14
Figure 4 : Les terrains ultramafiques en Nouvelle-Calédonie.....	15
Figure 5 : Schéma simplifié de la formation des péridotites de Nouvelle-Calédonie (<i>sln.nc</i>).....	15
Figure 6 : Profil théorique d'altération des péridotites (MAURIZOT et ROBINEAU, 2011).....	16
Figure 7: Carte des massifs miniers et des usines métallurgiques en Nouvelle-Calédonie.....	18
Figure 8: Utilisation du nickel dans le monde, (Institut d'outre-mer (IEOM), DOLIGE 2011).....	19
Figure 9: Réserves mondiales de nickel , (Institut d'outre-mer (IEOM), DOLIGE 2011).....	20
Figure 10 : Carte numérique de la région de Goro au 1/100 000ème (BRGM 2002).....	21
Figure 11: Profil d'altération latéritique avec la profondeur en mètre (VALE.NC).....	23
Figure 12: Pluviométrie enregistrée au niveau de l'ancienne pépinière (Golder Associés NC).....	24
Figure 13: Les produits finis: Oxyde de nickel (gauche) et Carbonate de Cobalt (droite).....	27
Figure 14 : Canal d'évacuation des eaux issues du traitement des résidus liquides (Vale.nc).....	32
Figure 15: Diver.....	33
Figure 16: Piézomètre.....	33
Figure 17 : Plan d'échantillonnage et de diagraphie sur la zone d'étude.....	34
Figure 18: Mesure du niveau d'eau d'un piézomètre.....	35
Figure 19: Mesures manuelles du niveau piézométrique effectuées par Golder NC.....	37
Figure 20: Suivi des niveaux piézométrique d'une plateforme PEC (latérites) / PEL (saprolites).....	38
Figure 21 : Carte des isopièzes de la nappe des saprolites en période de saison sèche (septembre, en haut) et de saison humide (décembre, en bas).....	40
Figure 22 : Carte des isopièzes de la nappe des latérites en période de saison sèche (septembre, en haut) et de saison humide (décembre, en bas).....	41
Figure 23: Diagraphies de conductivité et de température de la plateforme 10EX0248 (PEC)/10EX0245 (PEL).....	43
Figure 24: Schéma général d'un piézomètre.....	45
Figure 25: Echantillonnage en cours.....	46
Figure 26: Mesure des paramètres In-Situ.....	46
Figure 27: Représentation des balances ioniques des 53 échantillons prélevés.....	53
Figure 28 : Vale - Comparaison des concentrations en SiO ₂ et Fe ₂ O ₃ obtenues sur un millier de sondages réalisés dans la région de Goro (Sud de la Grande-Terre) (IRD 2012).	66
Figure 29 : Répartition des ouvrages dont les teneurs de certains éléments dissous sont non conforme à la réglementation en eau potable.....	68
Figure 30 : Evolution des niveaux piézométriques.....	69
Figure 31: Comparaison des teneurs moyennes en éléments majeurs dissous dans les trois nappes....	71
Figure 32: Diagramme de Piper des eaux échantillonnées (%meq/l).....	72

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Composition chimique typique des altérites développées sur les péridotites de Calédonie (PELLETIER 2003)	18
Tableau 2 : Evènements pluvieux importants sur les mois de sept. 2011 à fév. 2012	24
Tableau 3 : Seuils limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine	31
Tableau 4 : Estimation de l'incertitude théorique (GOLDER NC).....	36
Tableau 5 : Résultats des diagraphies : températures et conductivités spécifiques moyennes par nappe	44
Tableau 6 : Exemple d'un calcul du volume minimal de purge.....	45
Tableau 7 : Estimation du volume d'eau d'un puit pour des puits de surveillance de 50 mm de diamètre.	46
Tableau 8 : Paramètres analysés.....	48
Tableau 9 : Résultats des paramètres physico-chimiques mesurés in-situ.....	49
Tableau 10 : Classification des eaux d'après leur pH (Office International des Eaux)	50
Tableau 11 : Résultats des analyses des éléments majeurs au sein des trois nappes captées...	52
Tableau 12 : Résultats des teneurs en sodium et potassium et calcul du ratio Na/K	57
Tableau 13 : Résultats des teneurs moyennes en métaux dans chaque nappe (en mg/l).....	59
Tableau 14 : Teneur moyennes en éléments dissous dans chaque nappe (en mg/l).....	62
Tableau 15 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des différentes nappes captées	74

TABLE DES ANNEXES

Annexe A1 : Carte géologique de la Nouvelle-Calédonie (IRD)
Annexe A2 : Carte géologique de la région de Goro (BRGM 2002)
Annexe B : Plan du secteur d'étude (Vale.nc)
Annexe C : Coupe technique d'un piézomètre
Annexe D : Coupe technique d'un piézomètre
Annexe E : Carte de la répartition pluviométrique de Nouvelle-Calédonie
Annexe F : Tableau des caractéristiques des piézomètres
Annexe G : Tableau récapitulatif des purges des piézomètres
Annexe H : Résultats des duplicatas
Annexe I : Teneurs en éléments majeurs des différentes nappes captées

RESUME

Dans le cadre du lancement d'une étude d'impacts environnementaux de l'exploitation de la future fosse minière à 25 ans, la société Vale Nouvelle-Calédonie a confié à la société Golder NC SARL le suivi hydrogéologique de la mine de Goro, située dans le sud de la Nouvelle-Calédonie. Les eaux souterraines sont soumises à des contrôles stricts et réguliers via un réseau dense de piézomètres permettant le suivi du comportement physico-chimique des eaux souterraines et la mise en évidence des différents faciès géochimiques que l'on peut rencontrer au sein du système aquifère multicouche du secteur de la fosse minière. Ce mémoire présente les résultats de ce suivi entre septembre 2011 à janvier 2012.

Le suivi du comportement physique des eaux souterraines a permis d'observer que les niveaux des nappes réagissent directement aux précipitations. Lorsque ces dernières sont moins fréquentes et moins intenses, ils diminuent. A l'inverse, ils augmentent lors des épisodes pluvieux. Ceci est particulièrement vrai dans les pays tropicaux et subtropicaux, du fait des hautes températures. Des cartes des isopièzes des nappes à différentes périodes de l'année ont pu être créées.

Le suivi qualitatif des eaux a permis de mettre en évidence deux profils géochimiques bien distincts selon l'aquifère capté : celui des latérites et celui des saprolites/péridotites. L'horizon des latérites comprend des eaux acides, très peu minéralisées, essentiellement sodiques et chlorurées, légèrement magnésiennes et bicarbonatées. Au contraire, l'horizon des saprolites/péridotites comprend des eaux légèrement alcalines, peu minéralisées, riches en silice et de type carbonaté-magnésien, avec une légère tendance chlorurée au niveau des saprolites.

A l'origine des profils géologiques des massifs miniers ultrabasiques, le processus d'altération de la péridotite explique ces différenciations géochimiques. L'altération se caractérise par la dissolution des éléments lixiviés qui constituent la phase migratrice (principalement silice et magnésium), et par la concentration des éléments insolubles sous forme oxydée dans la phase résiduelle constitutive des saprolites et latérites (principalement fer, manganèse et nickel).

Les lois environnementales de Nouvelle-Calédonie sont très strictes et fixent des normes précises sur la qualité des eaux et sa potabilité. Les seuils limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine sont dépassés pour cinq éléments (ammonium, chrome, manganèse, aluminium, fluorure) et dans plusieurs ouvrages. Notons que l'environnement géologique et climatique de cette région favorise une forte altération des sols d'où découle la forte dissolution d'éléments dans les eaux souterraines. De plus, leur répartition est homogène sur l'ensemble de la fosse minière, et la très grande majorité des piézomètres concernés est située en amont de la mine. Il n'est pas dit que ces fortes teneurs aient un lien avec l'exploitation minière actuelle.

Cette étude a permis d'établir un état initial du comportement physico-chimique des eaux souterraines de la fosse minière et permettra de suivre à terme l'impact potentiel de l'exploitation sur le fonctionnement hydrogéologique existant.

ABSTRACT

As part of the setting up of an environmental impact study of the exploitation of the future mining pit within 25 years, the company Vale Nouvelle-Calédonie has put the company Golder NC in charge of the hydrogeological follow-up of Goro's mine, located in the south of New Caledonia. The ground-waters are regularly and strictly controlled, via the help of a concentrated network of piezometer, permitting to follow the physico-chemical behaviour of the ground-waters and to highlight the different geochemical facies that we can find within the multiple coating aquifer system in the mining pit area. This report presents the results of this follow-up between September 2011 and January 2012.

It can be noticed that water levels react directly to precipitation. When these are less frequent and less intense, water-levels get down. To the contrary, they get up during rainy episodes. Maps of the isopiezes of water table have been drawn to follow up the evolution of ground-water level during the hydrological cycle.

With the qualitative follow up of waters, two geochemical profiles have been distinguished depending on the captured aquifer: laterites and saprolites/peridotites. The laterites layer has acid waters, with a very low mineralization, mostly with sodium and chlorine, and slightly with magnesium and bicarbonate. To the contrary, the saprolites/peridotites layer has slightly alkaline waters, not very mineralized, silica-rich and from the carbonate-magnesium type, with a slight tendency to chlorine at saprolites level.

Responsible for the geological profile of the ultrabasic mining massif, the weathering process of peridotites explains these geochemical differentiations. Weathering can be characterised by the dissolution of leachate, mostly silica and magnesium (they constitute the migratory phase), and also by the concentration of indissoluble elements, mostly iron, manganese and nickel, in the residual phase constituted by saprolites and laterites.

New Caledonia's environmental laws are very strict and set accurate norms about water quality and drinkability. The limite thresholds of water quality have been exceeded for five elements (ammonium, chromium, manganese, aluminium, fluoride) and in many piezometers. However, we should keep in mind that the geological and climatic environment of this area is favourable to a high weathering of soils, so to a high dissolution of elements in groundwaters. Besides, the repartition of these high contents on the study area is homogeneous and the majority of the concerned piezometers are located upstream from the mine. For these reasons we couldn't say that they are related to the current mining activity.

This study has allowed to established an initial state of the physico-chemical behavior of the underground water of the mining pit (comprising dissolved elements, conductivity, pH, temperature, groundwater level), aiming to follow the future impact of the mining activity on the environment.

INTRODUCTION

L'extrême sud de la Nouvelle-Calédonie offre un sol pauvre en nutriments et très chargé en fer (milieu naturel acide) Il est exposé à des pluies régulières et abondantes. Ces conditions font que le sol est riche en nickel et en cobalt, éléments exploités par l'homme. Mais ces conditions climatiques entraînent également de fortes perturbations des eaux souterraines et de surface.

De plus, la présence d'une zone d'extraction minière à ciel ouvert de latérites très facilement altérables dans un secteur soumis à de fortes précipitations entraîne des perturbations de l'écoulement des eaux et une érosion accélérée du secteur. Il est donc nécessaire de connaître le comportement physique des eaux souterraines du secteur pour dresser un modèle hydrogéologique de la région et suivre les évolutions. La mine est également une source potentielle de nombreuses pollutions des eaux. Les lois environnementales de Nouvelle-Calédonie sont très strictes et fixent des normes précises sur la qualité des eaux et sa potabilité. Une étude physico-chimique des eaux souterraines est donc effectuée régulièrement, dans le but de suivre à terme l'impact potentiel de l'exploitation sur le fonctionnement hydrogéologique existant.

La mine de Goro dans le sud de la Nouvelle-Calédonie n'est en exploitation que depuis 2010. Dans le cadre du lancement d'une étude d'impacts environnementaux de l'exploitation de la future fosse minière à 25 ans, la société Vale Nouvelle-Calédonie a confié à la société Golder NC SARL le suivi hydrogéologique de ce secteur stratégique. Les eaux souterraines sont donc soumises à des contrôles stricts et réguliers via un réseau dense de piézomètres. Le suivi du comportement physico-chimique des eaux souterraines et la mise en évidence des différents faciès géochimiques que l'on peut rencontrer au sein du système aquifère multicouche du secteur de la fosse minière permettra d'établir un état initial de la qualité de ces eaux souterraines avant exploitation de la zone.

Ce mémoire se concentre sur la période de Septembre 2011 à Février 2012, dates de mon stage chez la société Golder Associés. La première partie traite des contextes climatiques et géologiques de la Nouvelle-Calédonie et plus spécifiquement de la mine de Goro. L'histoire de la mine et son mode de fonctionnement est brièvement expliqué dans un deuxième temps, ainsi que le souci de gestion de l'environnement minier. Une troisième partie traite du suivi hydrogéologique de la fosse minière (suivi piézométrique et géochimique).

1.1.3 Contexte climatique global

1.1.3.1 Un climat tropical océanique relativement tempéré

Située en zone intertropicale au nord du Tropique du Capricorne, la Nouvelle-Calédonie est soumise à un climat tropical océanique relativement tempéré.

On distingue deux saisons principales séparées par deux intersaisons, définies selon la pluviométrie :

- **Deux saisons sèches**; une grande (septembre à novembre, durant laquelle les alizés soufflent en quasi permanence) et une petite (avril-mai).
- **Deux saisons pluvieuses**; une grande (décembre-mars dite saison chaude et humide, propice aux cyclones) et une petite (juin-août, dite saison fraîche).

La figure 2 ci-dessous indique les températures et les précipitations moyennes du territoire.

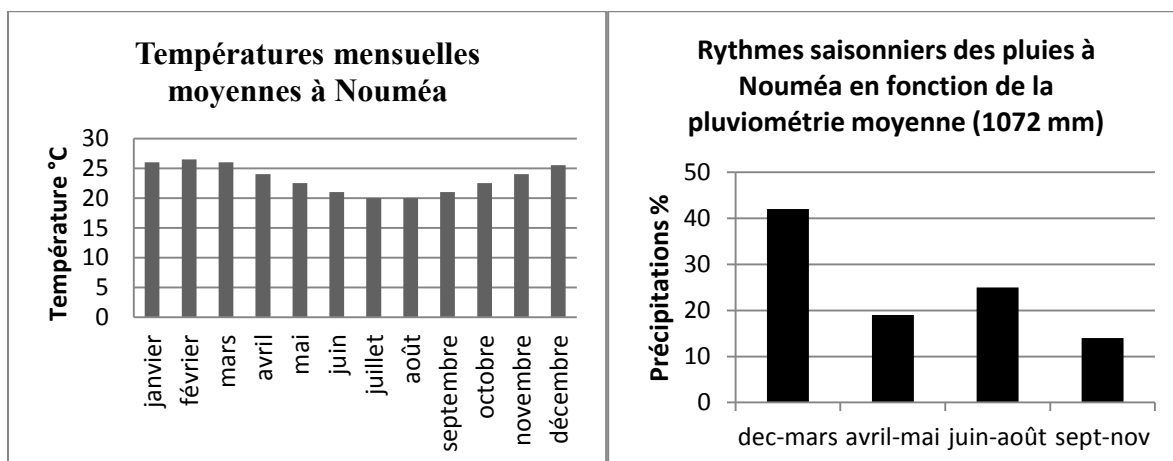


Figure 2: Température et précipitations annuelles en Nouvelle-Calédonie (croixdusud.info)

1.1.3.2 L'effet orographique

La répartition des précipitations est fortement influencée par le relief. En effet, lorsqu'un courant aérien rencontre un relief suffisamment large, une partie au moins de la masse d'air transportée par le vent ne peut contourner l'obstacle que lui oppose le relief mais franchit cet obstacle en subissant un soulèvement orographique. Alors, en amont du relief, les parcelles d'air sont soumises à une détente et se refroidissent. Si la température atteint celle du point de condensation (à un niveau déterminé de pression et donc d'altitude) des nuages se forment, pouvant ainsi générer des précipitations. Puis, une fois franchis les sommets, l'air subit au contraire, en aval du relief, une compression qui le réchauffe, il s'agit de l'effet « foehn ». La condensation et éventuellement les précipitations par lesquelles est passé cet air bloquent ou éliminent une part importante de son humidité. Ainsi le vent soufflant sur le flanc situé en aval du relief est réchauffé et asséché par rapport au courant qui approchait le relief en amont (ROMIEUX, 2011).

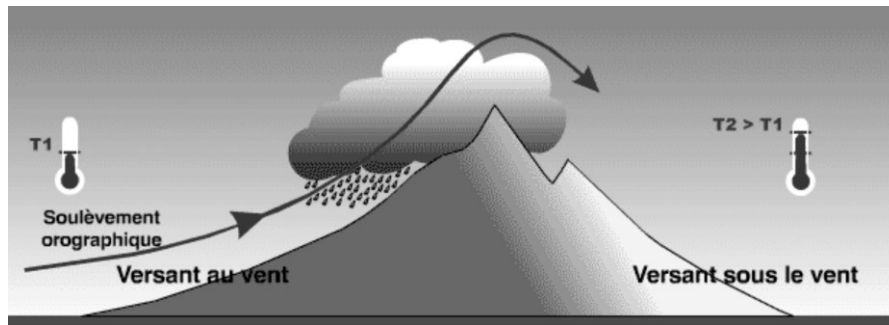


Figure 3 : L'effet orographique (ROMIEUX, 2011)

La côte Est située sur le versant au vent de la chaîne centrale et exposée à des masses d'air humides provenant de la mer, issues du flux d'alizé de Sud-Est, est donc particulièrement sensible à ce phénomène. La prise en compte de l'orographie est donc primordiale pour comprendre la répartition des pluies sur le territoire (ROMIEUX, 2011).

L'annexe E est une carte de la répartition des précipitations en Nouvelle-Calédonie.

1.2 Contexte géologique de la Nouvelle-Calédonie

La carte géologique de l'île au 1/100 000^e est présentée en annexe A1.

1.2.1 Formation de péridotites

La grande terre est un fragment de croûte continentale de la bordure orientale de l'Australie qui s'est détaché du Gondwana (mise en place d'un rift) au crétacé supérieur il y a environ 65 Ma (NEALL et TREWICK, 2008), et s'est mis à dériver vers l'est. Au paléocène, la Nouvelle-Calédonie a commencé une longue période de submersion en eaux profondes, comme le démontre la présence de sédiments marins (*Globigerina limestone*) et la formation de phanites, un type de roche indicatrice de submersion profonde (AITCHISON et al., 1995 ; PELLETIER, 2006).

A l'éocène, la Nouvelle-Calédonie est rentrée en collision avec l'arc des îles Loyauté. Cette obduction a entraîné la mise en place d'une couche de croûte océanique (séquence ophiolitique de 2 km d'épaisseur) au-dessus de la croûte continentale submergée (SCHELLART et al., 2006). Moins dense que le plancher océanique qui le recouvre, le fragment de continent va entraîner un soulèvement et l'émersion de la Nouvelle-Calédonie à l'oligocène, lors d'une phase d'extension de la lithosphère. Les roches lithosphériques ultramafiques de la croûte océanique émergent alors (AITCHISON et al., 1995 ; PELLETIER, 2006 ; SCHELLART et al., 2006). Ce soulèvement s'est accompagné d'une forte altération qui a réduit à un tiers (5500 km²) la surface ultramafique d'origine. La Figure 4 ci-après présente leur disposition sur la Nouvelle-Calédonie.

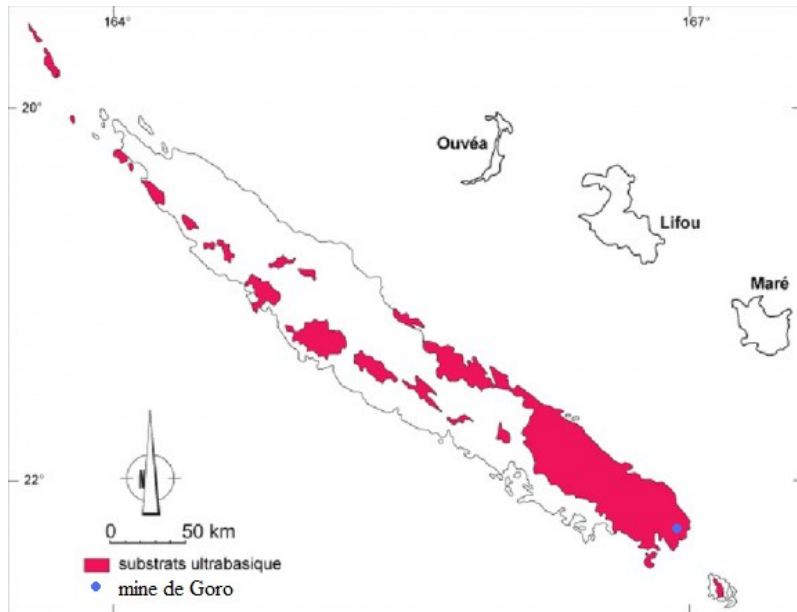


Figure 4 : Les terrains ultramafiques en Nouvelle-Calédonie couvrent environ un tiers de la superficie de la Grande Terre (RICHER DE FORGES et PASCAL, 2008).

Le schéma ci-dessous (Figure 5) illustre la formation géologique de la Nouvelle-Calédonie avec la mise en place des péridotites sur les rides calédoniennes.

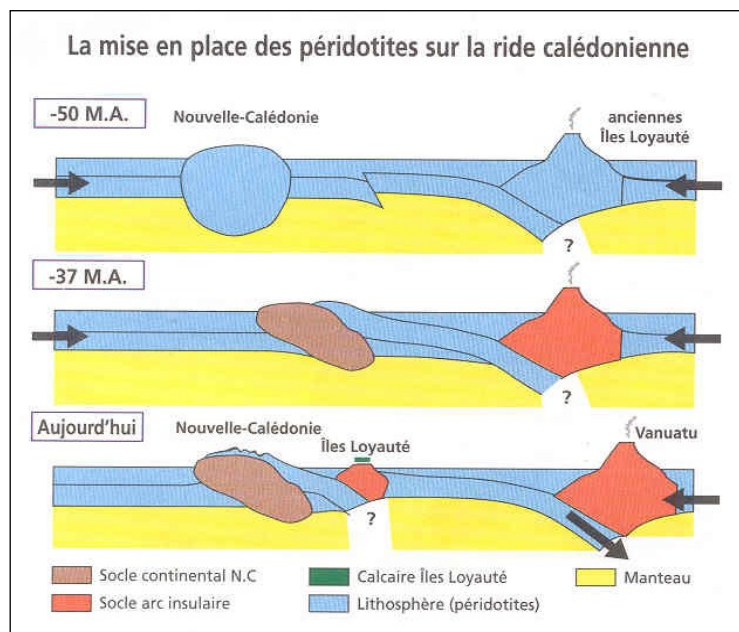


Figure 5 : Schéma simplifié de la formation des péridotites de Nouvelle-Calédonie (sln.nc)

Cela explique la géologie de la Grande Terre : les plaines de la côte Ouest sont les parties visibles du segment continental et les massifs miniers de l'Est représentent la partie inférieure du plancher océanique « soulevé » (la partie supérieure étant érodée).

1.2.2 Processus et profil d'altération des péridotites

Malgré l'érosion très active, plus d'un tiers de la Grande Terre est encore recouvert par les roches du plancher océanique, roches ultramafiques (riches en magnésium et en fer). Ces roches sont en majorité des péridotites, constituées principalement d'olivine, silicate de magnésium de la famille des péridots, contenant en outre du fer et un peu de nickel (0,3 à 0,4%), de cobalt (environ 0,01%) et de manganèse.

L'altération de ces péridotites entraîne la concentration de fortes teneurs en nickel. Formées sous haute pression et à forte température, les péridotites sont très sensibles aux conditions de surface. Dès leur émergence, elles sont soumises au climat tropical et à l'altération. L'altération conduit à la formation ultime de la **cuirasse ferrugineuse** (« chrome de fer »), où ne subsistent que des oxydes et hydroxydes de fer. Les stades intermédiaires de l'altération sont les **saprolites** (roche altérée ayant gardé sa texture initiale, son volume, mais pas sa masse, tous les constituants primaires étant remplacés) et les **latérites** (« terre rouge »). On obtient alors des sols épais en moyenne d'une trentaine de mètres. Le profil théorique d'altération est présenté ci-dessous (Figure 6).

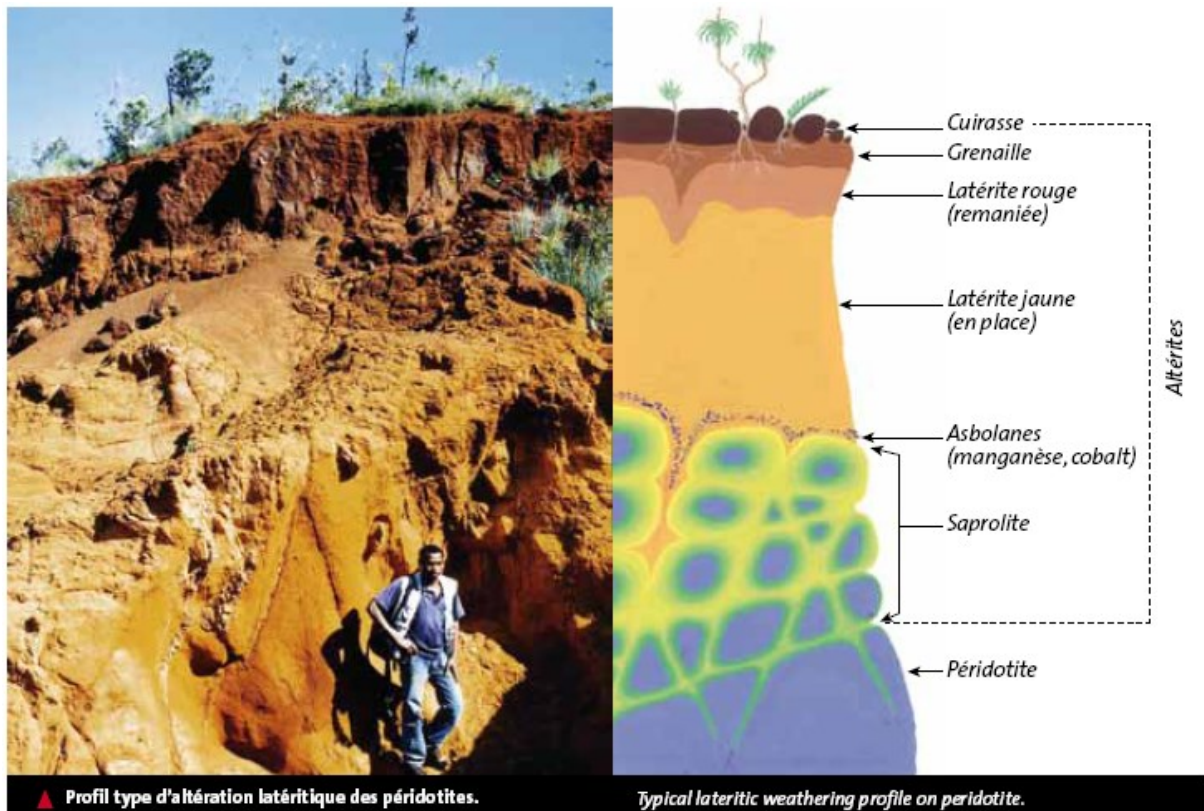


Figure 6 : Profil théorique d'altération des péridotites (MAURIZOT et ROBINEAU, 2011)

Saprolites et latérites ne se sont développées que sur d'anciennes surfaces pénéplanées, plateaux ou terrasses, témoins de phases d'équilibre au cours desquelles la couverture végétale a favorisé l'altération des péridotites par le biais des acides organiques résultant de la décomposition de débris végétaux (PELLETIER, 2003). Ces acides circulent avec l'eau et font « pourrir » les péridotites par lessivage graduel de la silice et de la magnésie.

Les facteurs de concentration du nickel et du cobalt sont multiples et résultent d'une longue évolution. Si le nickel présentait un simple enrichissement résiduel en restant immobile, statique, les autres éléments étant lessivés, les teneurs mesurées ne seraient pas aussi importantes. Il faut donc invoquer d'autres causes :

- Une serpentisation du manteau liée aux activités hydrothermales en milieu intraocéanique lors de leur mise en place.
- Puis, lors de l'évolution supergène, le drainage interne qui redistribue les éléments par le jeu de la dissolution-précipitation est primordial. Il est contrôlé par la structuration de la roche mère (fracturation) qui guide les circulations et demeure un critère fondamental lors de la prospection.

Le rôle combiné de facteurs externes tels que le climat, les déformations tectoniques et les variations eustatiques aboutissent finalement à l'individualisation d'un gisement. (MAURIZOT et ROBINEAU, 2011)

Dans les saprolites, la structure des péridotites est conservée mais la dissolution partielle de la magnésie et de la silice se traduit par une porosité importante (PELLETIER, 2003). Le nickel a d'abord tendance à rester dans la roche altérée, qui connaît alors un enrichissement différentiel ; le départ de Mg et Si fait baisser la densité alors que la quantité de nickel reste identique ; donc, sa teneur augmente. On passe ainsi de 0,3%Ni à des saprolites à 0,9 %Ni environ, teneur encore trop faible pour envisager une exploitation minière. Cette décroissance des teneurs en magnésie et en silice s'accompagne d'une augmentation de la teneur en fer. En effet, en milieu bien drainé, le fer est transformé en oxy-hydroxyde ferrique insoluble qui va donc s'accumuler dans le sol. Rapidement, une organisation cristalline apparaît au sein de ces oxy-hydroxydes, qui caractérise une évolution progressive en goethite. Toutefois, on ne peut pas vraiment parler de goethite tant la cristallinité est médiocre. On parle alors de limonite (PELLETIER, 2003).

Lorsque l'on passe des saprolites aux latérites, le nickel n'a plus sa place dans les nouveaux minéraux formés. Il se déplace alors (dans l'eau) et descend dans le sol. Le nickel peut alors être « fixé » par les saprolites rencontrées, dont les silicates constitutifs peuvent remplacer leur magnésium par du nickel. La teneur des saprolites peut alors s'élever jusqu'à 4%Ni. Lorsqu'il y a excès de nickel par rapport aux possibilités de fixation des minéraux, on peut avoir formation de **garniélite**.

Les latérites, produits d'une altération avancée, presque entièrement dépourvues de magnésie et de silice et essentiellement constituées d'oxy-hydroxydes de fer partiellement cristallisés en goethite fine, ont une faible capacité de rétention du nickel (teneurs plus basses, de l'ordre de 1,3 à 1,6%). Mais depuis quelques années, la partie des latérites située juste au-dessus des saprolites est exploitée comme minerai de nickel et de cobalt. En effet, outre les oxy-hydroxydes ferriques plus ou moins bien cristallisés, il y a aussi dans les latérites d'autres phases accessoires, les unes étant résiduelles (chromite, silicates primaires ou néoformés dans les saprolites) ou néoformées dans l'horizon latéritique : hématite, maghemite, lépidocrocite, et surtout asbolanes et autres minéraux manganésifères riches en cobalt (jusqu'à 3 % Co) qui représentent, dans les minerais latéritiques, une valeur notable (PELLETIER, 2003). On distingue les latérites rouges, riches en hématite, et jaunes, plus riche en goethite.

Une cuirasse de fer se forme à partir de l'horizon latéritique si l'environnement morphologique est favorable, comme des plateaux ou des pentes (TRESCASES, 1973). Des concrétions (nodules) se forment, constitués essentiellement d'hématite et de goethite. (BEAUVAIS et COLINB, 1992).

Le Tableau 1 ci-dessous récapitule les propriétés chimiques des différents horizons du profil d'altération latéritique expliqué dans ce paragraphe. On retrouve bien cette perte de Mg et Si accompagnée d'un enrichissement en fer.

Tableau 1 : Composition chimique typique des altérites développées sur les péridotites de Calédonie (PELLETIER, 2003)

Horizon	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ /MgO
Cuirasse	75 – 77	0,5 – 1,5	1 – 2	76
Grenaille	73 – 75	0,5 – 1,5	1 – 2	74
Latérite « rouge »	70 – 72	1 – 2	1 – 3	35 - 70
Latérite « jaune »	50 – 70	2 – 5	2 – 10	10 – 35
Saprolite « terreuse »	15 – 25	10 – 30	35 – 40	0,8
Saprolite « dure »	10 – 15	30 – 35	40 – 45	0,4

1.3 Exploitation du nickel en Nouvelle-Calédonie

Le nickel fait la fortune de la Nouvelle-Calédonie, le territoire possédant à lui tout seul environ 10 % des réserves mondiales, découvertes par l'ingénieur Jules Garnier en 1864. Le plus gros projet métallurgique au monde est actuellement en construction en Nouvelle-Calédonie : l'usine de Goro, dans le sud de l'île. La Figure 7 ci-dessous montre la forte exploitation en nickel du territoire.



Figure 7: Carte des massifs miniers et des usines métallurgiques en Nouvelle-Calédonie (DOLIGE, 2011)

1.3.1 Les différents types de gisement

Il y a globalement deux types de gisement (MAURIZOT et ROBINEAU, 2011) :

- Les **gisements garniéritiques** ou « silicatés » (ils contiennent une proportion importante de silicates hydratés porteurs de la minéralisation, dont la garniérite) : le nickel est localisé dans les saprolites grossières, dans la partie altérée immédiatement au-dessus de la roche mère. À l'aube du XXe siècle, les teneurs d'exploitation dans ces gisements étaient d'environ 20 % de nickel. Elles sont aujourd'hui entre 2 et 3 %, avec des teneurs en cobalt négligeables.
- Les **gisements latéritiques**, issus des latérites de transition et des latérites jaunes. La ressource est contenue dans les saprolites fines de plus faible teneur où le nickel titre en moyenne 1,5 % et le cobalt 0,2 %.

1.3.2 Propriétés et utilisation du nickel

Le nickel est un métal blanc argenté qui possède un éclat poli. Il fait partie du groupe du fer. C'est un métal ductile (malléable). Comme l'indique la Figure 8 ci-dessous, 64 % de la production mondiale de nickel est destinée à la fabrication d'aciers inoxydables, pour satisfaire à la demande de nombreux secteurs d'activité : chimie, biens d'équipement, biens de consommation courante, automobile, bâtiment. Cette proportion a doublé au cours des quarante dernières années.

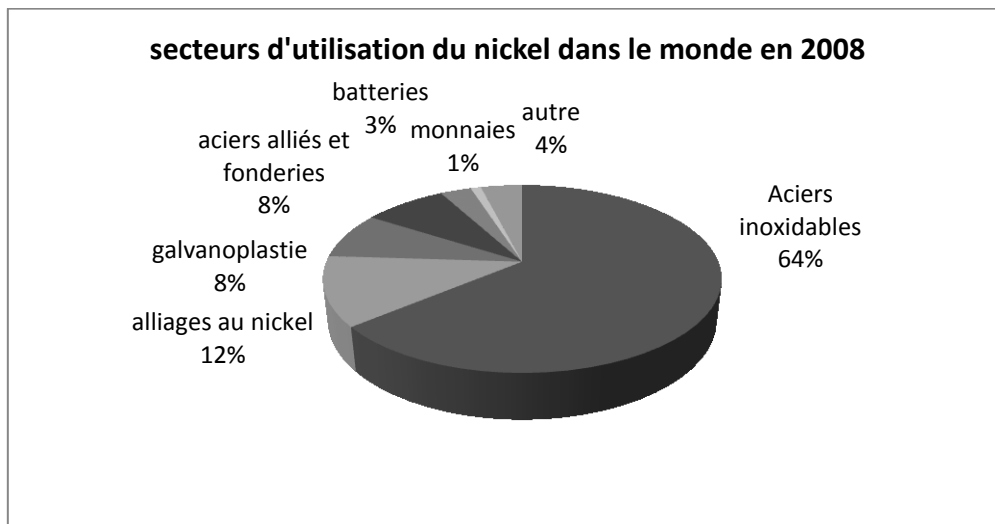


Figure 8: Utilisation du nickel dans le monde, (Institut d'outre-mer (IEOM), DOLIGE, 2011)

La production de nickel est souvent accompagnée de celle de cobalt. Une des propriétés unique du cobalt consiste à conférer aux alliages une capacité de résistance à la chaleur et à la corrosion. Il entre donc dans la composition de nombreux alliages (45% de l'utilisation mondiale). On le trouve également dans les piles (11 % de la consommation), les aimants, les batteries, ou comme catalyseur dans l'industrie chimique et pétrolière.

1.3.3 Production mondiale et Calédonienne

La Nouvelle-Calédonie dispose d'environ 10 % des réserves mondiales de nickel, ce qui est considérable compte tenu de la taille relativement modeste de ce territoire (un peu plus de 3 % de la superficie de la France métropolitaine...) :

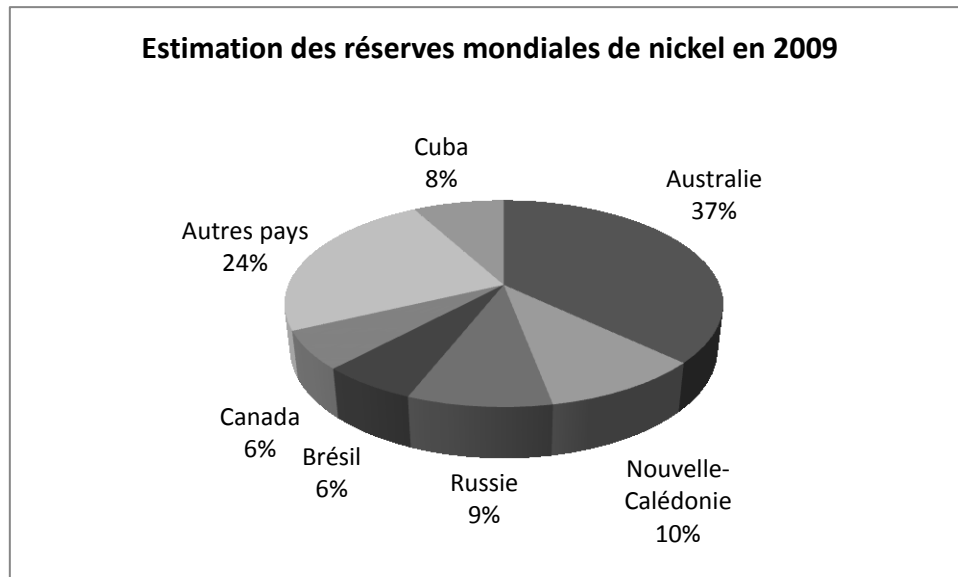


Figure 9: Réserves mondiales de nickel, (Institut d'outre-mer (IEOM), DOLIGE, 2011)

Au-delà de l'importance quantitative de ces ressources, le minerai néo-calédonien présente l'avantage d'être facilement exploitable, ce qui constitue un atout indéniable face à la concurrence internationale, puisque le coût d'extraction, et donc d'exploitation du nickel, en est réduit d'autant.

2 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU SECTEUR ETUDIE

2.1 Contexte géographique de la mine

La mine de Goro est située à l'extrémité Sud de l'île. Elle se situe dans le bassin de la Kwé, entouré de crêtes montagneuses, comme le montre la Figure 10 ci-dessous.

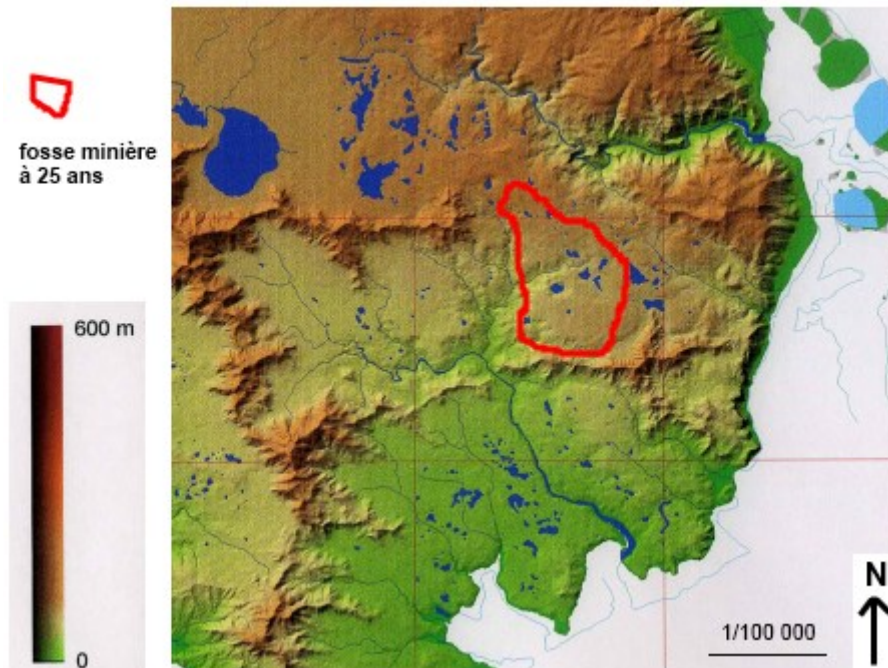


Figure 10 : Carte numérique de la région de Goro au 1/100 000ème (BRGM, 2002)

La zone d'étude a une superficie de 30 km². Elle est constituée par une succession de plateaux et de bassins d'altitude décroissante du NO vers le SE, généralement bien individualisés par une série de crêtes rocheuses.

L'annexe B est une carte de localisation géographique des principaux bassins, rivières, plans d'eau et aménagements miniers sur le secteur d'étude. Elle délimite également la zone étudiée, dont la fosse minière à 25 ans, pour l'instant exploitée qu'en partie.

2.2 Contexte géologique du plateau de Goro

2.2.1 Analyse des cartes et coupes géologiques du plateau

Les annexes A et B sont des cartes géologiques de la Nouvelle-Calédonie et du sud de l'île.

La carte au 1/1000000^{ème} de l'IRD (annexe A1) montre que la fosse minière se trouve dans un complexe ophiolitique charrié à l'éocène supérieur, et plus précisément sur un socle de péridotites indifférenciées (harzburgites pour l'essentiel).

La carte au 1/25000^{ème} du BRGM (annexe A2) confirme un substrat dominant de harzburgites, recouvertes par des formations d'altération : latérites épaisses recouvertes sur quasiment toute la surface de la fosse minière par une cuirasse « in situ ».

Nous avons à disposition les coupes techniques de tous les piézomètres de la fosse (KLOHN et al., 2009). Ces coupes permettent de donner un aperçu du profil géologique local. Les deux coupes en annexe C et D sont assez représentatives de la tendance générale du profil géologique de la région. Ces coupes correspondent à deux piézomètres situés au sud-est de la zone d'étude. Elles révèlent une épaisseur de latérite conséquente par rapport à celui des saprolites, avec un profil similaire au profil type calédonien : chapeau de fer, latérite jaune (limonite), saprolite puis péridotite, avec de nombreux domaines de fracturation au sein de la péridotite.

Les profils géophysiques permettent de différencier les horizons latéritiques, bien moins résistants que les horizons de saprolites et péridotites. La limite latérite/saprolite est également bien définie par le profil de température, qui chute de 0,5 degré en passant des latérites aux saprolites. Idem pour la résistance des fluides.

L'horizon des saprolites est assez finet consiste en une alternance de latérites et péridotites, selon les notes accompagnant le log.

2.2.2 Un massif ultramafique épais et peu différencié

La mine se situe dans le grand massif péridotitique de l'extrémité Sud de la Nouvelle-Calédonie (cf. Figure 4). Ce massif est long de 110km, large de 40 km et épais (actuellement) d'environ 2000 m. Il repose directement soit sur les basaltes soit, et plus fréquemment et comme c'est le cas au niveau de la mine de Goro, sur les formations sédimentaires crétacées et éocènes qui apparaissent en plis isoclinaux, écaillés et déversés vers le SSW (GUILLON et ROUTHIER, 1971). Le profil d'altération dans cette région du Sud de l'île n'a pas de couverture sédimentaire.

Sur Goro, des études des données paléomagnétiques de la cuirasse ferrugineuse ont été effectuées pour dater ces formations dans le but de dater l'altération de la péridotite (SEVIN et al., 2011). Le développement de ces couches ferrugineuses a commencé il y a 25 Ma (oligocène supérieur) et continu de nos jours.

Cet ensemble péridotitique est épais et peu différencié. Il est composé dans son intégralité de trois minéraux : péridot, orthopyroxène et spinelle chromifère (riche en chrome ($57\%Cr_2O_3$) et pauvre en alumine ($14\%Al_2O_3$)). Les roches de cet ensemble sont riches en magnésium et présentent en outre des teneurs particulièrement faibles en aluminium et calcium (GUILLON et ROUTHIER, 1971).

D'après de précédentes études, il semblerait que la fracturation ait une part prépondérante sur le développement de l'altération des péridotites. Deux grandes familles de failles sont recensées : N120-130° (dynamique compressive) et N20-30° (faille en extension), avec des pendages sub verticaux (FOLIO, 2011).

2.2.3 Particularités des latérites de Goro

L'épaisseur totale du profil d'altération du plateau de Goro peut atteindre jusqu'à 60 m, bien que, en moyenne, elle soit plutôt de 40 m. Les latérites de type humide du plateau de Goro sont plus pauvres en nickel que les ressources saprolitiques calédoniennes actuellement exploitées (désignées localement sous le nom de « garniérites »). C'est pourquoi elles sont demeurées inexploitées jusqu'à aujourd'hui. Le procédé hydrométallurgique permet

aujourd'hui de les exploiter de façon rentable. Il s'agit d'un des dépôts latéritiques à plus haute teneur en nickel au monde. Vale Nouvelle-Calédonie pourrait devenir le plus grand producteur de nickel à faible coût au monde. La durée de vie de la mine du plateau de Goro est estimée à 30 ans au moins (VALE.NC).

2.2.4 Détail des sept horizons géologiques principaux

Sept horizons géologiques principaux définissent le profil latéritique du plateau de Goro:

- **Cuirasse de fer** : constituée de goéthite bien cristallisée, toujours très pauvre en nickel (0.5 % Ni en moyenne)
- **Grenaille de fer**
- **Latérite rouge** : faibles teneurs, < 1% Ni : non rentable pour l'exploitation.
- **Latérite jaune**, dite **limonite** (0.8 à 1,7% de nickel et 0,1 % à 0,5 % de cobalt). Seules les latérites ayant une teneur en nickel supérieure à 1.2% sont économiques.
- **Zone de transition** mince contenant 1.2 à 2.0% de nickel et 0.1 à 0.5% de cobalt.
- **Saprolite** (couche irrégulière incluant des blocs rocheux) : minerai silicaté dont la teneur en nickel varie de 0.9 à 2.5%. *Cette teneur en nickel est relativement basse par rapport aux autres gisements saprolitiques de l'île, mais reste exploitable.*
- **Péridotite** : roche-mère, avec une faible teneur en nickel (0.3 à 0.5 %).

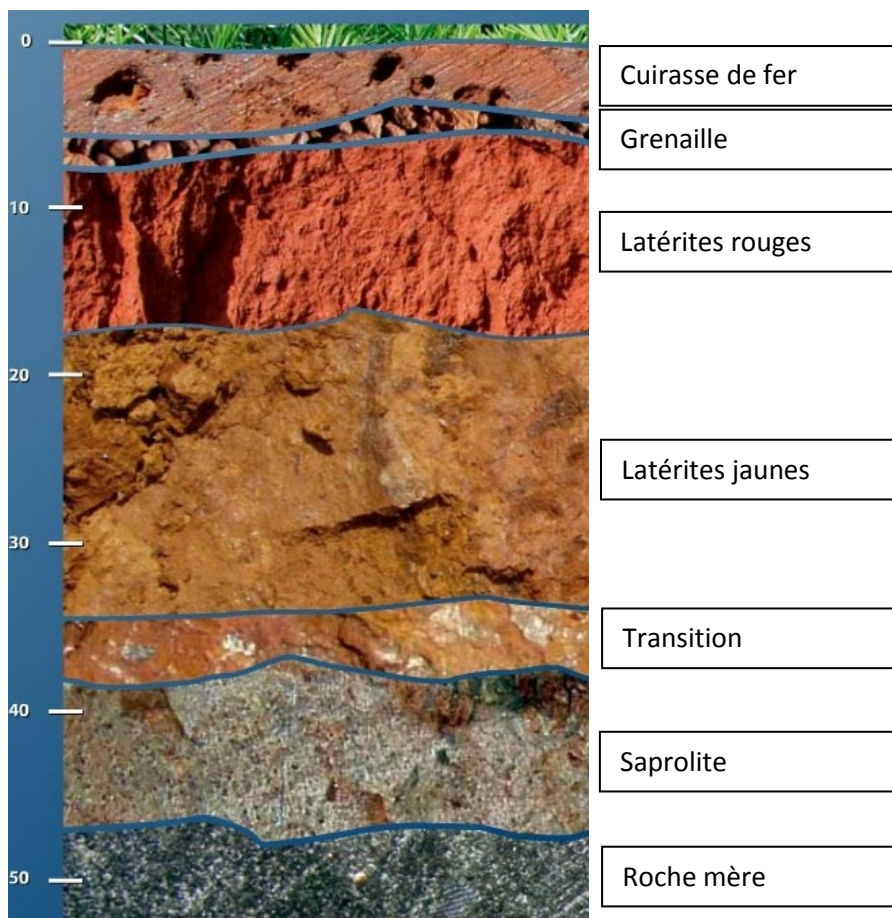


Figure 11: Profil d'altération latéritique en fonction de la profondeur en mètre (VALE.NC)

2.3 Contexte hydrogéologique

2.3.1 Répartition de la pluviométrie sur l'année

Cette région de la Nouvelle-Calédonie est une des plus pluvieuses de l'île, comme le montre la carte de la pluviométrie générale en annexe E. La pluviométrie est enregistrée par un pluviomètre situé sur la fosse minière, à l'Est de la fosse minière. Les données sont présentées sous forme de pluies journalières et de pluies cumulées (cf. Figure 12 ci-dessous).

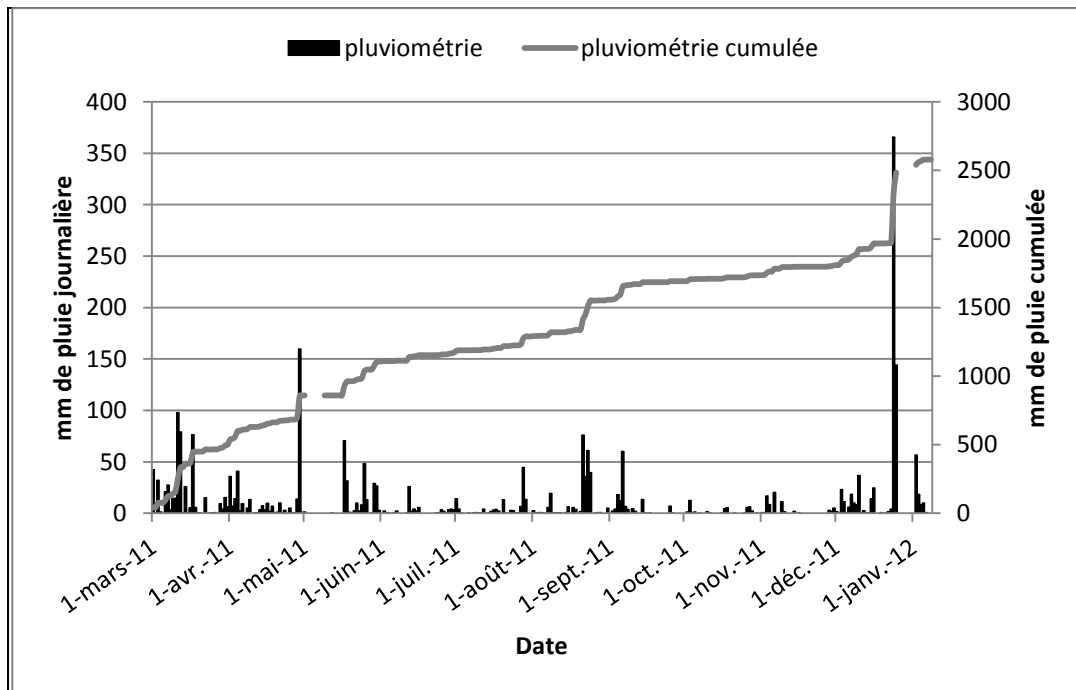


Figure 12: Pluviométrie enregistrée au niveau de l'ancienne pépinière (Golder Associés NC)

Le graphique de pluviométrie met en évidence la période de basses eaux s'étalant de mi-septembre jusqu'aux importants épisodes pluvieux de Noël, où 510 mm se sont cumulés en 2 jours.

Les principaux événements pluvieux observés sur la période sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Evénements pluvieux importants sur les mois de septembre 2011 à février 2012

Mois	Evénements pluvieux	Durée (jours)	Précipitations (mm)	Précipitations mensuelles (mm)
Sept.	Du 02/09 au 8/09	7	107,1	134,9
Oct.				43,2
Nov.	Du 03/11 au 06/11	4	46,2	72,4
Déc.	Du 03/12 au 16/12	14	156,8	720,2
	Du 24/12 au 25/12	2	510	
Jan.	Du 30/12 au 05/01	7	174,7	
Fév.				267,8

2.3.2 Hydrostratigraphie : un système multi-couches

Le contexte hydrogéologique est décrit comme original en raison du développement de nappes dans le manteau d'altération, ce qui apparaît être spécifique aux massifs ultrabasiques de la Nouvelle-Calédonie, notamment dans les secteurs les plus pluvieux (cas du secteur d'étude). Les connaissances actuelles de l'hydrogéologie du site font état d'un système aquifère multicouche (VALE.NC).

Pour mieux appréhender ce système, la Figure 11 présentée précédemment est une coupe lithologique schématique du secteur.

Il se dégage trois unités hydrogéologiques, avec de haut en bas :

- **L'aquifère supérieur**, situé à la base de la cuirasse, permet un écoulement de subsurface non pérenne. Lors de forts événements pluvieux, il peut se mettre en charge et provoquer l'apparition de sources et d'écoulements de surface. Des émergences apparaissent à travers les fissures de la cuirasse et participent aux débits des rivières et des creeks.
- **Une unité semi-perméable** (aquitard), constituée par la latérite rouge puis jaune, qui forme une couche épaisse de faible perméabilité, mais de porosité supérieure à 40% (TRESCASES, 1975) et contribue au caractère capacitif du système. Cette couche réservoir tamponne l'alimentation des horizons sous-jacents. Le peu d'écoulement dans cet horizon correspond à une diminution de la granulométrie et à une fraction fine ($< 50 \mu\text{m}$) estimée à 45% (TRESCASES, 1975). Ainsi, ces formations définissent une couche semi-perméable qui participe à la stratification de l'aquifère. (JOIN et al., 2005).
- **L'aquifère principal**, qui correspond essentiellement à la saprolite grossière au toit de la roche mère. Cette unité est le siège de la nappe la plus importante en termes de flux d'eau. Elle est généralement captive. Cet aquifère est à l'origine du débit de base des rivières pérennes présentes sur le secteur d'étude. Sur le plan géochimique, cet horizon est le lieu principal de la minéralisation des eaux d'infiltration (BRUNI et al., 2002). La granulométrie croissante vers le socle joue le rôle d'un massif filtrant et contribue au contrôle du lessivage de particules fines par les fractures du socle. À l'image du modèle d'altération des socles granitiques, ces fractures présentent une double origine, liée à la tectonique et à l'altération. Mais leur genèse est due principalement à l'altération des minéraux phylliteux (biotite en particulier), dont le gonflement provoque cette fissuration. Cette étude a également montré le rôle majeur, à l'échelle du bassin versant, de la fissuration liée à l'altération dans l'acquisition de la perméabilité des roches de socle ; la fracturation de type tectonique joue un rôle subordonné à cette échelle (MARECHAL et al., 2003).

La cuirasse constitue un milieu de « roches dures », à fissures ouvertes, dont les caractères hydrodynamiques sont difficiles à appréhender. Très perméable, cette couche de surface favorise l'infiltration (JOIN et al., 2005). Elle est associée à une végétation originale de type maquis minier.

3 METHODE DE FONCTIONNEMENT DE LA MINE DE GORO

3.1 Histoire de l'entreprise minière: Vale Nouvelle-Calédonie

L'entreprise Vale Nouvelle-Calédonie est issue de la fusion du groupe brésilien VALE et du groupe minier Inco en 2006. C'est une entreprise d'extraction de minerai et de production de nickel et cobalt. Elle est présente depuis 1902 sur le territoire calédonien, mais les premières recherches sur le massif du Sud de la Grande Terre n'ont eu lieu qu'à partir de 1969.

En 1992, Inco récupère des droits miniers sur le gisement de Goro. Sa composition de latérites à faible teneur en nickel le rend peu attrayant. Il est non exploitable de façon rentable par les procédés existants à l'époque.

En 2000 et 2001, un programme intensif a été mené dans la zone minière de Goro Sud. L'ouverture du projet, prévue à l'origine en 2004, a été repoussée en raison de nombreux problèmes politiques, environnementaux et économiques. Le démarrage progressif du complexe minier et industriel a débuté en 2010, avec une production à pleine capacité prévue en 2013.

3.2 Méthode d'extraction du minerai : Exploitation à ciel ouvert en gradin

L'exploitation minière du gisement de Goro est une mine à ciel ouvert, dans un domaine morphologique de plateau, sur une profondeur de 50 à 60 mètres. Les couches superficielles non économiques sont d'abord décapées.

Le minerai latéritique et saprolitique est extrait en une série de gradins. Des camions-bennes l'acheminent ensuite vers l'Unité de Préparation des Minerais.

Les paramètres principaux de l'exploitation sont les suivants(VALE.NC):

- 4 millions de tonnes sèches de minerai extraites annuellement;
- 12 millions de tonnes de matériel déplacées par an ;
- plan minier prévu sur 29 ans;
- fosses minières qui seront comblées et revégétalisées à la fin de chaque cycle de la mine.

3.3 Préparation du minerai : mise en pulpe

L'unité de préparation du minerai (FPP, Field Preparatory Pulp) est située à proximité de la mine. Les minerais de latérite (limonite) et de saprolite (garniérite) sont mélangés avec de l'eau, criblés et broyés pour former une boue, appelée pulpe. Ce mélange des minerais est rigoureusement contrôlé en termes de granulométrie et de qualité chimique.

Cette pulpe est ensuite acheminée par un tuyau qui s'étend sur 8 km jusqu'à l'autoclave de l'usine de traitement. En pleine production, l'usine sera en mesure de traiter environ 536 tonnes de pulpe de minerai par heure.

3.4 Technique de traitement du minerai : l'hydrométallurgie

L'hydrométallurgie est une technique d'extraction des métaux qui comporte une étape où le métal est solubilisé pour permettre sa purification. C'est un procédé de traitement des métaux par voie liquide, d'où le nom d'hydrométallurgie. Elle consiste à mettre en solution les différents métaux contenus dans un minerai ou un concentré afin de les séparer pour les valoriser.

Un procédé hydrométallurgique typique est composé des opérations suivantes :

- **lixiviation** ou **dissolution** : mise en solution des différents métaux
- **purification** : séparation des différents métaux entre eux
- **électrolyse** : récupération du métal voulu sous forme métallique

La lixiviation est réalisée à l'aide soit d'un acide, tel que l'acide sulfurique, soit d'un oxydant, tel que le chlore. L'usine de Vale Nouvelle-Calédonie fonctionnera par lixiviation à l'acide sous pression (Pressure Acid Leaching ou PAL). Les métaux en solution sont sous forme ionique. La phase de purification est réalisée dans notre cas par extraction par solvant. L'électrolyse est utilisée une fois une solution pure obtenue (ne contenant plus qu'un seul élément) pour récupérer cet élément sous forme "métal".

Les procédés hydrométallurgiques permettent d'obtenir des degrés de pureté des métaux que les autres procédés métallurgiques, tels que la pyrométallurgie, ne permettent pas d'obtenir. Ils ont aussi l'avantage d'être moins énergivores.

3.5 Les produits finis : l'Oxyde de nickel et le Carbonate de Cobalt

A la fin du traitement, on obtient de l'**Oxyde de nickel** et du **Carbonate de Cobalt**. Le nickel est produit sous forme de granulés sphériques pour donner de petites billes grises, rondes et solides. Le carbonate de cobalt est produit sous forme d'une poudre de couleur pourpre.



Figure 13: Les produits finis: Oxyde de nickel (gauche) et Carbonate de Cobalt (droite) (VALE.NC)

4 LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT : PROBLEMES, LOIS ET MESURES PRISES

4.1 Les pollutions potentielles des eaux dues à l'activité minière

La pollution principale due aux mines de nickel à ciel ouvert provient de l'érosion intense de grandes surfaces latéritiques, très fragiles, dénudées par la prospection et les travaux d'extraction ainsi que de stockage non contrôlé des stériles. En conséquence, le transport terrigène intense et anarchique impacte fortement les milieux en aval, engorgeant les rivières et étouffant les écosystèmes littoraux sensibles à la turbidité. Ces dégâts sont difficilement réparables et nécessitent d'empêcher l'érosion par une gestion des eaux de ruissellement et une revégétalisation des zones minières, avec une amélioration environnementale visible qu'après quelques dizaines d'années. La nouvelle réglementation impose désormais aux exploitants un contrôle permanent et rigoureux de l'érosion et du transport solide au cours de tous les travaux miniers et exige une réhabilitation progressive de toutes les surfaces dénudées (MAURIZOT et ROBINEAU, 2011).

D'autres facteurs de pollution des eaux directement liés à l'activité minière et les carrières annexes sont à prendre en compte et à surveiller :

- Pollutions dues au roulage minier : bruits, poussières, pots d'échappement
- L'unité de préparation du minerai : FPP (Field Preparatory Pulpe)
- Contamination des eaux souterraines lors du processus d'extraction, de l'élimination des déchets, et du traitement des minerais et des déchets qu'il crée
- Stockage de minerais et des résidus solides produits
- Fuite des tuyaux conducteurs de la pulpe vers l'usine
- Carcasses de vieilles ferrailles (véhicules à l'abandon...)

Deux catastrophes environnementales majeures sont survenues en avril 2009 et avril 2010. Elles étaient dues au déversement accidentel de milliers de litres d'acide sulfurique dans la baie de Prony. Ces événements ne concernent pas l'exploitation minière mais celle de l'usine.

4.2 La réglementation locale sur l'environnement

4.2.1 L'arrêté ICPE (Installation Classée Pour l'Environnement)

Vale Nouvelle-Calédonie s'est engagé à respecter l'esprit et la lettre de la réglementation environnementale du territoire. Cette réglementation se concrétise principalement par l'octroi d'un **arrêté ICPE**.

Un arrêté ICPE (Installation Classée Pour l'Environnement) est une autorisation d'exploiter délivrée, dans le cas présent, par la Province Sud de la Nouvelle-Calédonie. Il fixe toutes les conditions de conception et d'opération d'une installation, les limites des émissions (air, eau), les objectifs de qualité du milieu et les mesures de protection ou de correction à implanter, avec pour objectif la protection des personnes, des biens et de l'environnement.

Vale Nouvelle-Calédonie a obtenu un arrêté ICPE le 15 octobre 2004 pour exploiter une usine de production de nickel et cobalt.

4.2.2 Le principe de précaution et le suivi environnemental

Toute installation classée qui détient un permis ICPE doit obéir au principe de précaution et se soumettre à un suivi environnemental. Ces mesures permettent :

- une évaluation prédictive des impacts potentiels sur l'environnement
- une anticipation des risques en fonctionnement normal et en situation accidentelle
- l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin d'éviter la réalisation du dommage
- la vérification de l'efficacité des mesures prises

Dans le cas de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie, les contrôles et rapports environnementaux porteront sur :

- les mesures continues des rejets solides, liquides et gazeux
- la conformité des stations de traitement, méthodes et équipements de rejet, etc.
- la surveillance régulière du milieu : qualité de l'air, des eaux douces (souterraines et de surface), de la faune et de la flore, ainsi que du milieu marin.
- les résultats des programmes de recherche menés par les institutions compétentes.

Un **comité de suivi environnemental**, désigné par la province, a pour objectif de s'assurer de la validité des études réalisées, de l'exécution des mesures exigées et de la conformité à la réglementation.

4.2.3 L'engagement à l'égard du développement durable de Vale Nouvelle-Calédonie

Vale a mis en place des mesures concrètes pour la protection de l'environnement :

- Utilisation d'un nouveau procédé hydrométallurgique 4 fois moins consommateur d'énergie que le procédé pyrométallurgique
- Recyclage de 60 % des eaux requises pour le fonctionnement de l'usine
- Neutralisation des résidus solides et leur utilisation pour combler les fosses minières
- Neutralisation des résidus liquides, éliminant la majeure partie des métaux, avant le rejet de l'effluent en mer par un tuyau diffuseur d'un kilomètre dans une zone à fort courant
- Réhabilitation végétale avec des espèces endémiques cultivées dans sa propre pépinière en activité depuis déjà dix ans.
- Mise en place de diverses mesures compensatoires telles que la transplantation corallienne, l'installation de bouées de mouillage, la mise à disposition de points d'eau incendie aux abords des réserves, la signalisation des parcs et réserves, etc.

4.3 La gestion des eaux, indispensable et obligatoire

L'activité minière entraîne également des modifications sur le comportement physique des eaux de surface et souterraines du fait de :

- La création d'une fosse minière
- La déforestation entraînant une érosion plus rapide des sols

- La création de bassins de décantation
- Des pollutions sont également possible (cf. paragraphe 4.3.1).

4.3.1 Les rivières rouges : un phénomène courant du Grand Sud

Le contexte géologique latéritique particulier favorise l'érosion des couches friables lors des écoulements de surface ou souterraines, notamment des latérites rouges (dont la couleur est due à leur forte teneur en fer). Ce secteur est la deuxième zone géographique la plus pluvieuse de Nouvelle-Calédonie, avec plus de trois mètres de précipitations annuelles (cf. annexe E), et de très fortes pluies sévissent pendant la saison humide provoquant une forte érosion. Les rivières qui coulent rouge après une forte pluie sont un phénomène courant dans le Grand Sud. La présence de ces sédiments dans les rivières est donc un phénomène naturel. Cela peut néanmoins être accentué par l'activité humaine et surtout par les exploitations minières et les déboisements intenses, s'ils sont faits sans prendre les mesures nécessaires pour protéger l'environnement. Un système efficace de gestion des eaux de ruissellement est donc requis pour protéger les rivières et les eaux souterraines.

Ces particules fines charriées par les rivières jusqu'à la mer ont plusieurs effets négatifs:

- une augmentation de la turbidité (diminution de la transparence) de l'eau, réduisant ainsi la lumière nécessaire aux coraux.
- la création d'un dépôt sur les fonds marins, tendant à recouvrir les organismes d'une pellicule fine et pouvant engendrer leur asphyxie partielle.

L'expérience et les études récentes ont démontré que la vitalité des milieux combinée aux forts courants le long de la côte limitait l'impact sur les écosystèmes (VALE.NC).

4.3.2 La protection des eaux douces : les bassins de décantation

La mine est située dans le bassin de la rivière Kwé, sur le plateau de Goro. Des bassins de décantation ont été conçus et construits afin de protéger cette rivière, située en amont de l'excavation ainsi que les eaux souterraines. Ces ouvrages sont principalement des bassins de décantation successifs, qui réceptionnent les eaux de pluie chargées en particules ou matières en suspension (MES). En traversant le bassin, les particules, plus lourdes que l'eau, sédimentent et tombent au fond, alors que l'eau claire, débarrassée des particules en suspension, s'évacue par débordement par la partie haute du bassin. Les bassins sont curés régulièrement pour conserver leur capacité de traitement.

Ces bassins utilisés sont surdimensionnés pour le plateau de Goro, compte tenu des épaisseurs latéritiques du sud et de l'envergure des travaux : la mine dispose de 3 grands bassins principaux, évolutifs en fonction de l'avancée de la mine et de la construction de l'usine et une quarantaine d'autres bassins implantés en contrebas de toutes les zones défrichées, dans lesquels des échantillons sont effectués, jusqu'à 2 à 3 fois par jour en période pluvieuse, pour contrôler les rejets.

4.3.3 Le contrôle des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont soumises à des contrôles stricts et réguliers via un réseau dense de piézomètres (puits d'échantillonnage). Si malgré les mesures prises un problème devait être détecté, un système de pompage dans un réseau de drain filtrant (réseau de puits) en aval du stockage permettra d'éviter toute contamination de la nappe phréatique en recyclant les eaux minéralisées vers l'usine pour traitement. Le contrôle de ces eaux souterraines est confié en partie à Golder NC.

4.3.4 La protection de l'eau : les paramètres qualité à suivre

Notre étude permet entre autre le suivi de la qualité des eaux souterraines de la fosse minière. Les trois lacs de la zone d'étude seront également suivis dans le futur (analyse des eaux de surface).

La qualité d'une eau souterraine est caractérisée par un certain nombre de paramètres physiques et chimiques. Les paramètres pris en compte sont (BEAUCHAMP, 2006):

- La **dureté de l'eau** correspondant à sa minéralisation en calcium et magnésium
- Le **pH** qui dépend de la teneur en ions;
- La **teneur en gaz dissous** issus de l'atmosphère (O₂ et CO₂);
- La **teneur en substances minérales dissoutes** généralement sous forme ionique: anions (bicarbonates, chlorures, sulfates, nitrates, fluorures) et cations (calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, manganèse, ammonium);
- La **teneur en éléments dissous** (chrome, aluminium, nitrite, phosphates, carbonates, hydroxydes, silicates)
- La **turbidité**, produite par des matières en suspension (argiles) dans les aquifères karstiques.

L'arrêté métropolitain du 11 janvier 2007 détermine les seuils limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine (cf. tableau ci-dessous).

Tableau 3 : Seuils limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine

seuils limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine (mg/l):			
Aluminium	0,2	Manganèse	0,05
Chlorure dissous	200	Ammonium	0,1
Sulfates dissous	150	Nitrite	0,5
Sodium	200	Nitrate	50
Calcium	100	Aluminium	0,2
Magnésium	50	Chrome dissous et chrome VI	0,05
Potassium	12	Phosphate	5
Fer dissous	0,2	Fluorure dissous	1,5

Les micropolluants tels que l'arsenic, le cyanure, le chrome, le nickel et le sélénium, ainsi que certains hydrocarbures sont soumis à des normes très sévères à cause de leur toxicité. Leur teneur tolérée est de l'ordre du millionième du gramme.

4.4 Le traitement des résidus

Tout au long du procédé, malgré le recyclage d'une partie des rejets, des solutions liquides contenant différentes "impuretés" métalliques et des résidus solides sont produits. Les rejets liquides et solides sont acheminés séparément vers leur propre unité de traitement pour une neutralisation finale. Cette étape consiste à neutraliser les acides (sulfurique et chlorhydrique) et à précipiter les métaux encore dissous en quantités minimales dans la solution afin d'abaisser leur concentration sous le niveau acceptable pour l'environnement, tel que dicté par la réglementation.

4.4.1 Traitement des résidus liquides : rejet de l'eau dans le lagon

Une partie de l'acide chlorhydrique non recyclé dans le procédé et l'acide sulfurique restant à la fin du procédé doit être neutralisés par l'ajout de pulpe de calcaire et de chaux (CaO) pour donner principalement du gypse. Les métaux précipités au cours de la neutralisation rejoignent la pâte de résidus solides qui est neutralisée à son tour.

La composition du rejet liquide, ainsi débarrassé des acides et des résidus solides, est proche de celle du milieu marin : l'acidité (pH) et la concentration en éléments chimiques et métalliques (calcium, magnésium, chlorure, sodium sulfate) y sont comparables.

Cette eau "minéralisée", appelée effluent marin, est rejetée en mer par un tuyau diffuseur. Il s'agit d'un tuyau de 5 kilomètres dont le dernier kilomètre est muni de trous pour permettre à l'effluent d'être dispersé graduellement et de se diluer ainsi rapidement dans l'eau de mer. Le fort courant de la Havannah où se fait la diffusion contribue aussi à une dilution rapide. A quelques mètres du diffuseur, selon Vale Nouvelle-Calédonie, il ne sera plus possible de détecter de différences entre l'eau rejetée et celle du lagon. La Figure 14 montre le trajet du diffuseur (VALE.NC).



Figure 14 : Canal d'évacuation des eaux issues du traitement des résidus liquides(Vale.nc).

4.4.2 Traitement des résidus solides

Les résidus solides sont neutralisés de la même façon que les résidus liquides, par l'ajout de chaux et de calcaire. Il reste alors une pâte contenant des métaux dans des quantités équivalentes à celles présentes dans le minerai naturel, avant le traitement. S'y est ajouté le gypse provenant de la neutralisation. On appelle aussi cette pâte le résidu minier épaissi.

5 SUIVI HYDROGEOLOGIQUE DE LA FOSSE MINIERE

5.1 Cadre et objectif de l'étude

Dans le cadre du lancement d'une étude d'impacts environnementaux de l'exploitation de la future fosse minière à 25 ans du projet Goro nickel, la société Vale Nouvelle-Calédonie a confié à la société Golder NC SARL le suivi hydrogéologique de ce secteur stratégique sur la période de mars 2010 à mars 2012. Ce rapport se concentre sur la période de Septembre 2011 à Février 2012.

Les principaux objectifs de ce suivi sont les suivants :

- L'acquisition de données environnementales permettant d'étayer l'étude d'impact ;
- Le suivi à terme de l'impact potentiel de l'exploitation sur le fonctionnement hydrogéologique existant.

Pour ce faire, deux études principales sont opérées : **Le suivi piézométrique**, effectué mensuellement, et trois **campagnes d'échantillonnage et de diaggraphie** réalisées en période de moyennes, basses et hautes eaux.

5.2 Suivi piézométrique de la fosse minière

5.2.1 Objectif et déroulement

Une tournée de l'ensemble des piézomètres de la fosse minière est effectuée chaque mois. Une équipe relève les niveaux piézométriques de chaque ouvrage, et décharge les données du Diver lorsqu'il y en a un. L'objectif est de suivre l'évolution du niveau de la nappe sur l'année. Les données sont ensuite traitées et rassemblées dans une base de données, qui est envoyée à un autre bureau d'étude chargé de créer un modèle hydrogéologique de la fosse minière.

5.2.2 Description des équipements en place

Le réseau de suivi des eaux souterraines comprend 195 piézomètres (localisés sur la Figure 17). On distingue les PEC (plateforme captant la nappe des latérites), des PEL (plateforme captant la nappe des saprolites) et des piézomètres simples (captant différentes nappes).

Les caractéristiques de l'ensemble des piézomètres (profondeur, nappe captée, localisation...), transmises par Vale et collectées sur le terrain lors des différentes campagnes, sont présentées sous forme de tableau en annexe G.



Figure 15: Diver



Figure 16: Piézomètre

87 de ces piézomètres sont instrumentés de sondes enregistreuses (Mini-Diver, Schlumberger) et 2 contiennent des baromètres (Baro-Diver, Schlumberger).

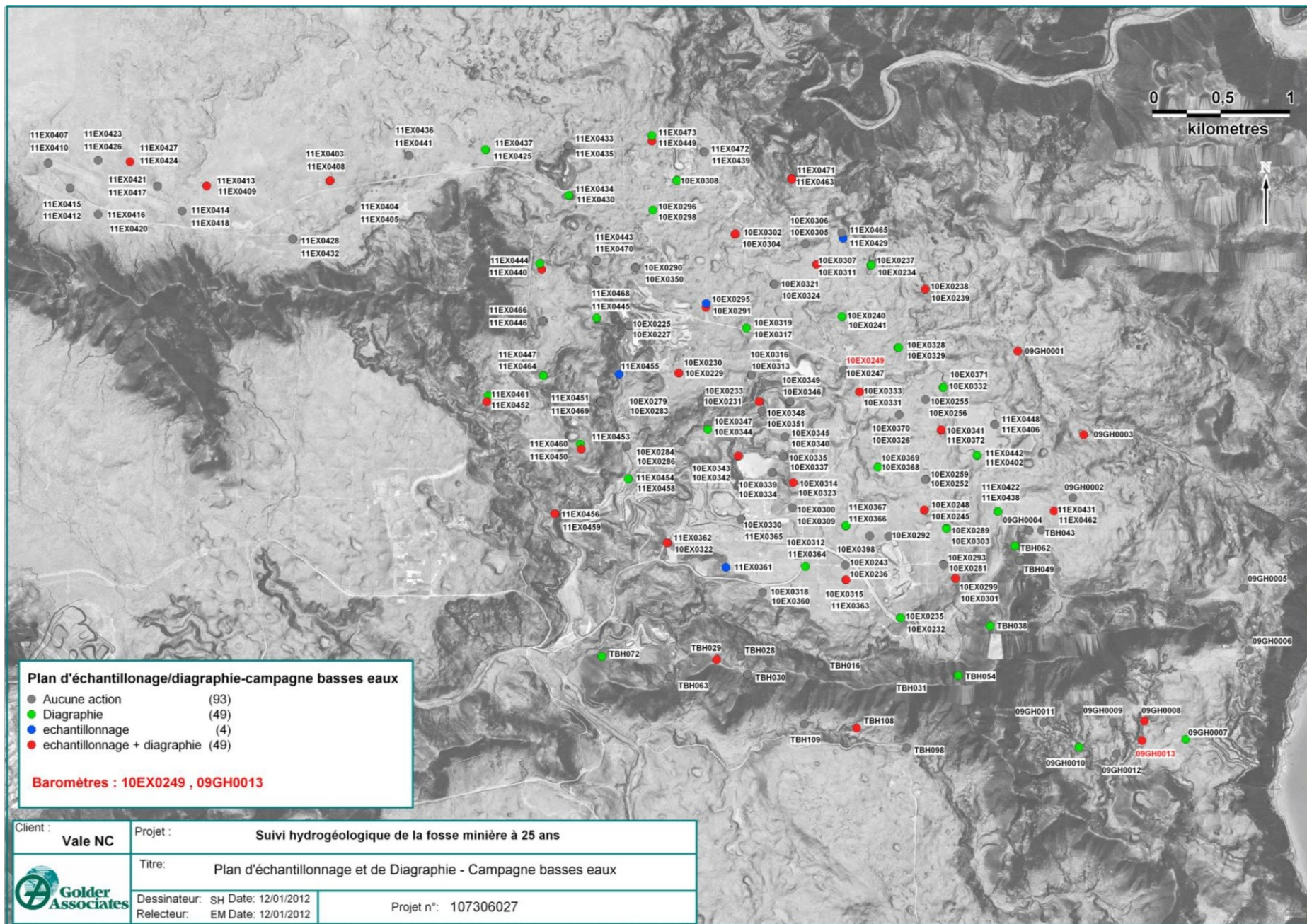


Figure 17 : Plan d'échantillonnage et de diagraphie sur la zone d'étude au moment de la campagne des basses eaux.

5.2.3 Acquisition des données terrain

Les niveaux piézométriques sont relevés par mesures manuelles directes à l'aide d'une sonde piézométrique (incertitude de +/- 1 cm) par rapport à un repère de mesure fixe (Z_{ref}).

Les mini-sondes enregistreuses (Diver) installées dans bon nombre de piézomètres sont déchargées à l'aide d'un pocket PC.

La profondeur des piézomètres est vérifiée trois fois par ans (pour détecter d'éventuels effondrements ou bouchons).

L'ensemble des données collectées est saisi au bureau de Nouméa sous tableur Excel. Une analyse de ces données et des conditions d'acquisition sur le terrain permet d'aboutir à leur validation, puis à leur qualification.



Figure 18: Mesure du niveau d'eau d'un piézomètre

5.2.4 Traitement des données

5.2.4.1 Mesures manuelles

La cohérence des données issues des lectures manuelles est vérifiée par comparaison entre elles (amplitude de variation observée sur plusieurs mois).

Toutes les mesures manuelles sont prises par rapport au capot lorsque sa côte de repère Z_{ref} est connue. Les mesures sont exprimées en hauteur d'eau par rapport au niveau de la mer (mètre NGNC).

5.2.4.2 Mesures enregistrées

Elles correspondent aux mesures enregistrées automatiquement par les mini-sondes (diver).

- **Compensation sur Diver Office**

Les mesures sont compensées pour les ajuster selon la pression atmosphérique enregistrée sur la zone et la profondeur réelle d'installation, susceptible de varier. La pression atmosphérique est mesurée par les deux baromètres de la fosse minière, localisés en rouge sur la Figure 17.

La compensation des enregistrements bruts par les données barométriques est faite avec le logiciel « Diver Office ». Elle est réalisée par rapport la cote du capot en connaissant la profondeur d'installation du Diver (longueur de ficelle). Les erreurs dues aux boucles détectées sur les ficelles sont prises en compte (les boucles se forment lors de la remise en place des diver dans les piézo bouchés par de la boue), et corrigées lors de la compensation.

- **Calcul de l'incertitude théorique**

L'incertitude des mesures est ensuite calculée. Cette incertitude est théorique, la réalité du terrain pouvant être différente de ces estimations. Le Tableau 4 ci-dessous calcule l'incertitude théorique totale des mesures des mini-sondes, selon la profondeur des piézomètres. Z_{ref} est la hauteur de référence par rapport au sol (correspond au niveau de mesure).

Tableau 4 : Estimation de l'incertitude théorique (GOLDER NC)

		Erreur pour un ouvrage de profondeur < 30m (en cm)	Erreur pour un ouvrage de profondeur > 30m (en cm)
Évaluation de l'erreur associée aux données enregistrées	Z_{ref}	2	2
	Longueur ficelle	10	20
	Capteur (spécification constructeur)	2.5	2.5
	Mesure PVC/Capot	1	1
Évaluation de l'erreur associée aux données du baromètre	Z_{ref}	0	0
	Capteur (spécification constructeur)	0.5	0.5
Évaluation de l'erreur associée aux mesures manuelles	Niveau piézométrique	1	1
	Z_{ref}	1	1
Erreur totale		18 cm	28 cm

- **Correction des données sur le logiciel Hydras 3**

Les données brutes sont corrigées à l'aide du logiciel Hydras 3 si la différence entre la mesure automatique et la mesure manuelle est supérieure à l'incertitude estimée :

$$\Delta(\text{mesure manuelle} - \text{donnée enregistrée}) > \Delta\text{Erreur.}$$

5.2.5 Présentation et analyse des résultats

5.2.5.1 Chroniques piézométriques

Les écarts entre mesures manuelles et mesures enregistrées peuvent être dus à plusieurs facteurs:

- Imprécisions sur la longueur des ficelles (lors de l'installation, boucles créées lors de la descente des Divers, élongation des ficelles ...);
- Présence de bouchons (partiels ou totaux) dans les ouvrages (boue, éboulement...);
- Viscosité du milieu supérieure à celle de l'eau;
- Dénoyage des Divers;
- Echantillonnage (et recharge) des ouvrages.

Les mesures manuelles et enregistrées utilisées pour traiter les données sont des hauteurs d'eau. On peut donc en tirer les conclusions suivantes:

- Lorsque $\Delta(\text{mesure manuelle} - \text{donnée enregistrée}) > 0$, la colonne d'eau indiquée par la mesure automatique est sous-estimée. Le Diver n'était peut-être pas localisé à la profondeur d'installation prévue (boucles non répertoriées, Diver reposant sur un bouchon, élongation de la ficelle).
- Lorsque $\Delta(\text{mesure manuelle} - \text{donnée enregistrée}) < 0$, la mesure automatique a été surestimée. Il est possible que le Diver soit localisé dans un milieu plus dense que l'eau (boue, vase).

5.2.5.2 Mesures manuelles

La plateforme piézométrique, dont le graphe de la hauteur d'eau en fonction du temps est inséré ci-dessous, est représentative de la tendance générale de tous les piézomètres de la fosse minière.

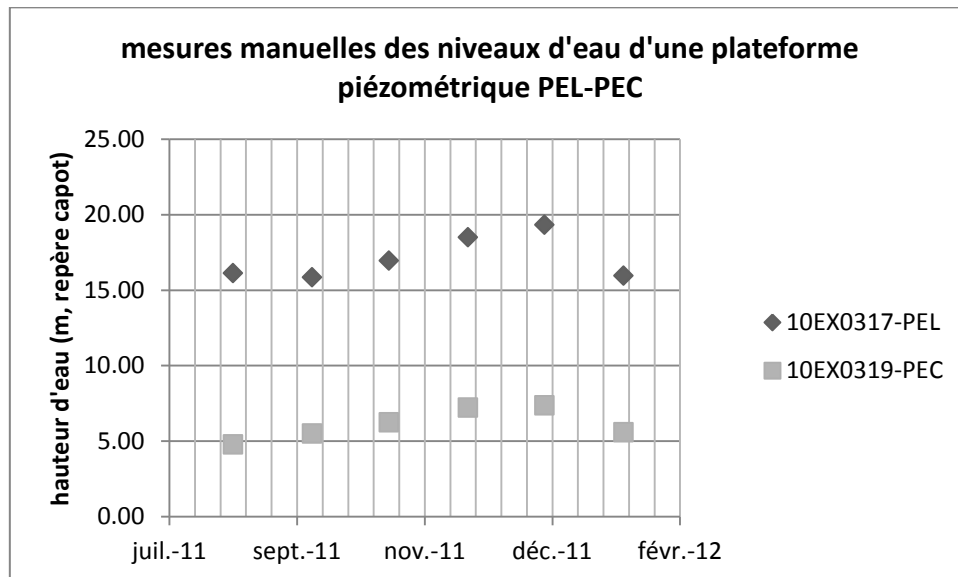


Figure 19: Mesures manuelles du niveau piézométrique effectuées par Golder NC

L'analyse de tous les résultats permet de distinguer les variations suivantes:

- Les niveaux piézométriques les plus élevés sont observés lors de la tournée piézométrique de décembre, période pendant laquelle de fortes précipitations ont été enregistrées (cf. graphe pluviométrie Figure 20).
- Les PEL et les PEC captent 2 nappes différentes, mais qui réagissent de la même manière aux précipitations.

Les mesures manuelles ne sont pas suffisantes pour nous permettre d'analyser le comportement des nappes, car les piézomètres sont très réactifs aux précipitations. Par exemple, si la mesure a été faite en période sèche, mais juste après une grosse pluie, la valeur ne sera pas représentative du mois. Il est donc nécessaire d'analyser les mesures enregistrées, qui enregistrent une mesure par heure. Les mesures manuelles servent à vérifier l'exactitude des minis sondes.

5.2.5.3 Mesures automatiques

Les fluctuations piézométriques enregistrées au niveau des ouvrages équipés d'un Diver, sur la période de septembre 2011 à février 2012 ont été tracées sous forme de graphiques et interprétées. Pour des raisons de confidentialité, seuls les exemples ci-dessous sont dévoilés dans ce mémoire. Quelques ouvrages présentent des courbes difficilement exploitables (ex : Diver dénoyé lors de la baisse de niveau d'eau).

Les graphes ci-dessous suivent le modèle le plus courant rencontré sur les piézomètres et sont donc un exemple représentatif du comportement de la nappe dans la fosse minière. On peut remarquer que :

- Les PEL et PEC réagissent tous les 2 rapidement aux précipitations.
- La période octobre-décembre est une période sèche.
- De fortes pluies ont marqué la fin du mois de décembre.

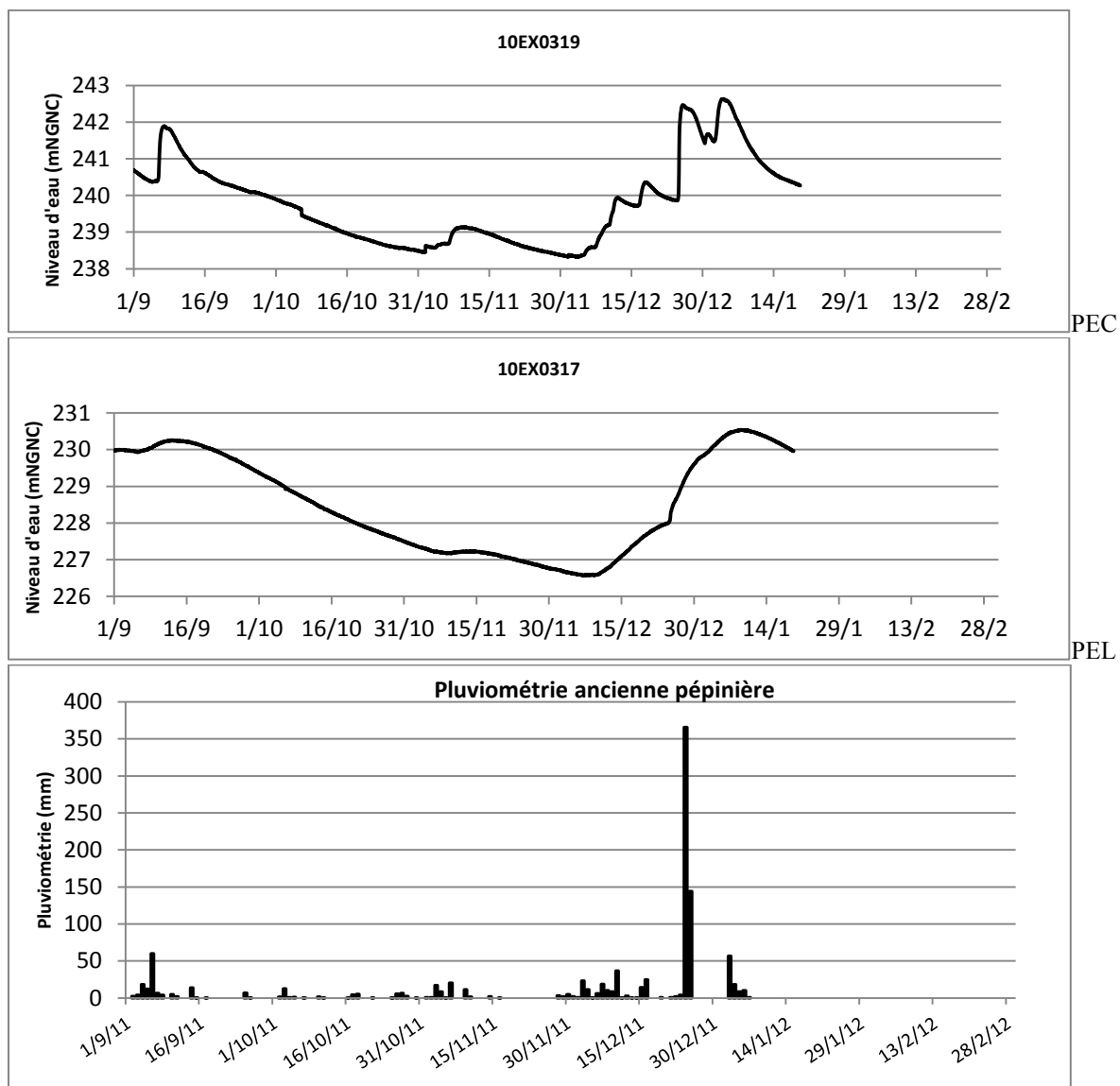


Figure 20: Suivi des niveaux piézométrique d'une plateforme PEC (latérites) / PEL (saprolites) et comparaison avec la pluviométrie.

5.2.6 Interprétation des données piézométriques

Les graphiques montrent que les niveaux d'eau se corrélaient de manière générale relativement bien et offrent les mêmes tendances, que ce soit au niveau des piézomètres simples, des PEC ou des PEL. Les niveaux réagissent directement aux précipitations. Lorsque ces dernières sont moins fréquentes et moins intenses, ils diminuent. A l'inverse, ils augmentent lors des épisodes pluvieux. Les amplitudes de variation diffèrent d'un piézomètre à l'autre. On peut distinguer 3 familles de piézomètres :

- Les PEC

Les PEC sont implantés dans l'aquitard latéritique. Ce dernier réagit immédiatement aux épisodes pluvieux. Suite à l'épisode des 24 et 25/12/2011, les niveaux mesurés au sein des différents piézomètres augmentent le jour même. Cela est valable pour tous les épisodes pluvieux significatifs. La chronique des piézomètres Figure 20 en est un très bon exemple. En revanche, comme il l'a été précisé précédemment, les amplitudes de variations ne sont pas les mêmes selon les piézomètres. Le 24/12/2011, le niveau de l'ouvrage 10ex0372 (variation la plus faible) augmente d'environ 0,82 m pendant que l'ouvrage 10ex0290 (variation la plus forte) augmente d'environ 9,75 m. Par ailleurs, les variations les plus importantes concernent les piézomètres situés au Nord-Ouest et à l'Ouest. La réaction de l'aquifère latéritique est donc plus marquée au sein de cette zone que dans le reste du site où des variations plus faibles sont observées.

- Les PEL

Les PEL sont implantés dans l'aquifère saprolitique. A l'instar de l'aquitard latéritique qui se situe au-dessus, l'aquifère saprolitique réagit très rapidement aux épisodes pluvieux. Les pics d'augmentation de niveau sont généralement moins marqués que ceux observés sur les PEC. Les courbes offrent une allure plus atténuée et les variations sont moins importantes. Là aussi les amplitudes sont très différentes selon les ouvrages. Le 24/12/2011, le niveau de l'ouvrage 11ex0404 (variation la plus faible) augmente d'environ 0,11 m pendant que l'ouvrage 10ex0225 (variation la plus forte) augmente d'environ 19,5 m. Les variations les plus importantes concernent les piézomètres situés au Nord-Ouest à l'entrée de la route des lacs. La réaction de l'aquifère saprolitique est donc plus marquée au sein de cette zone que dans le Sud où les variations les plus faibles sont observées.

- Les piézomètres simples

Seuls les piézomètres TBH029 et 09GH0003 et 09GH0013 seront traités car ils sont implantés dans la péridotite (l'aquifère le plus bas). Les autres atteignent l'aquifère saprolitique. Malheureusement, seules les données du 09GH0003 sont exploitables, les courbes obtenues pour les 2 autres étant incomplètes. Nous pourrions seulement dire que de septembre à janvier, le niveau d'eau du piézomètre 09GH0003 réagit là encore rapidement aux précipitations.

A partir des niveaux mesurés, quatre cartes piézométriques ont pu être dressées avec le logiciel *Surfer* (cf. Figure 21 et Figure 22 pages suivantes) en période de moyennes eaux (du 19 au 21 septembre) et de basses eaux (du 16 au 18 décembre):

- Carte piézométrique de l'aquifère latéritique en période de moyennes eaux ;
- Carte piézométrique de l'aquifère latéritique en période de basses eaux ;
- Carte piézométrique de l'aquifère saprolitique en période de moyennes eaux ;
- Carte piézométrique de l'aquifère saprolitique en période de basses eaux.

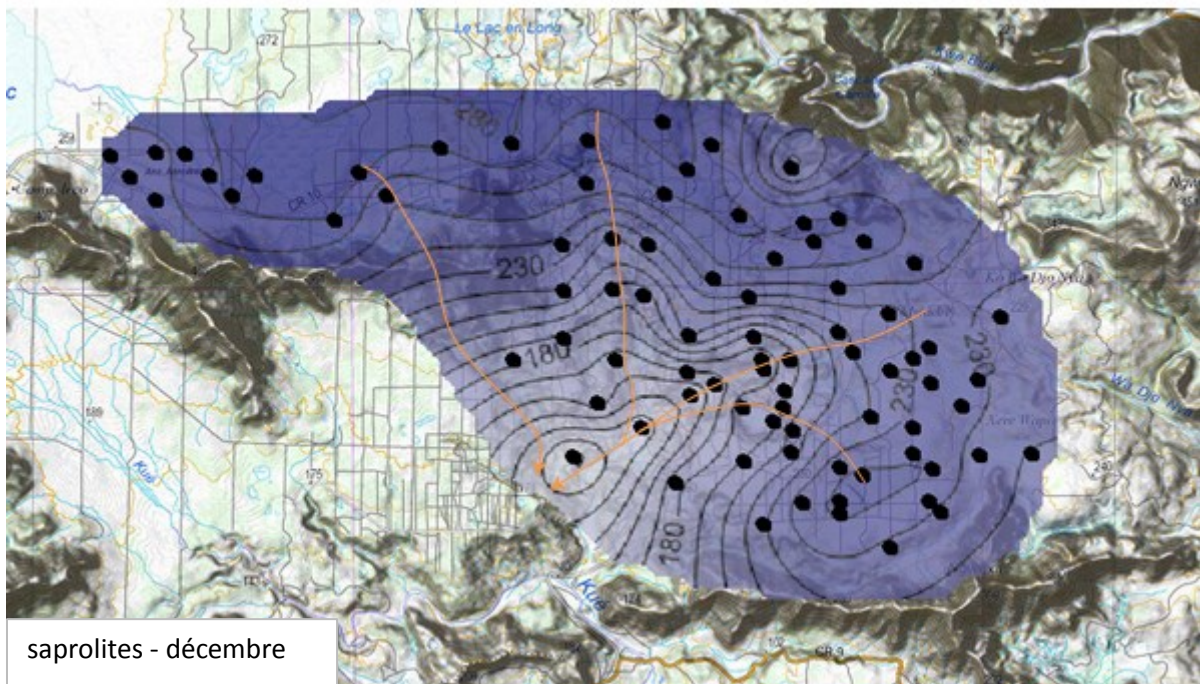
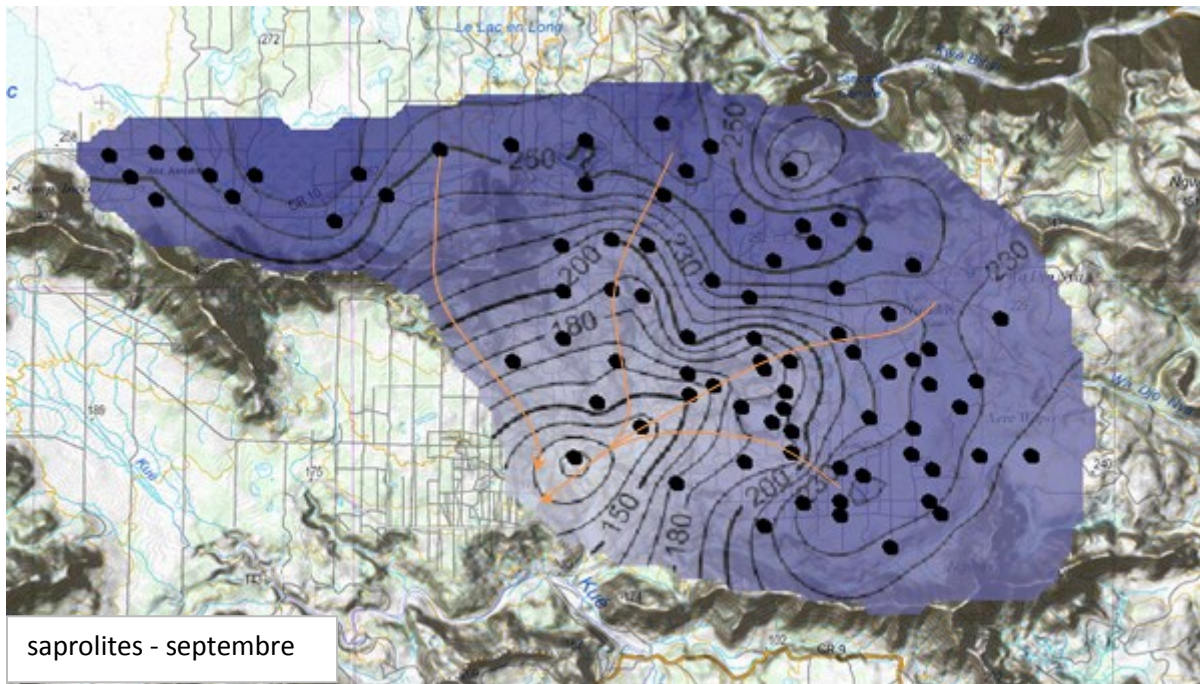


Figure 21 : Carte des isopièzes de la nappe des saprolites en période de saison sèche (septembre, en haut) et de saison humide (décembre, en bas). La ligne orange correspond à l'écoulement des eaux.

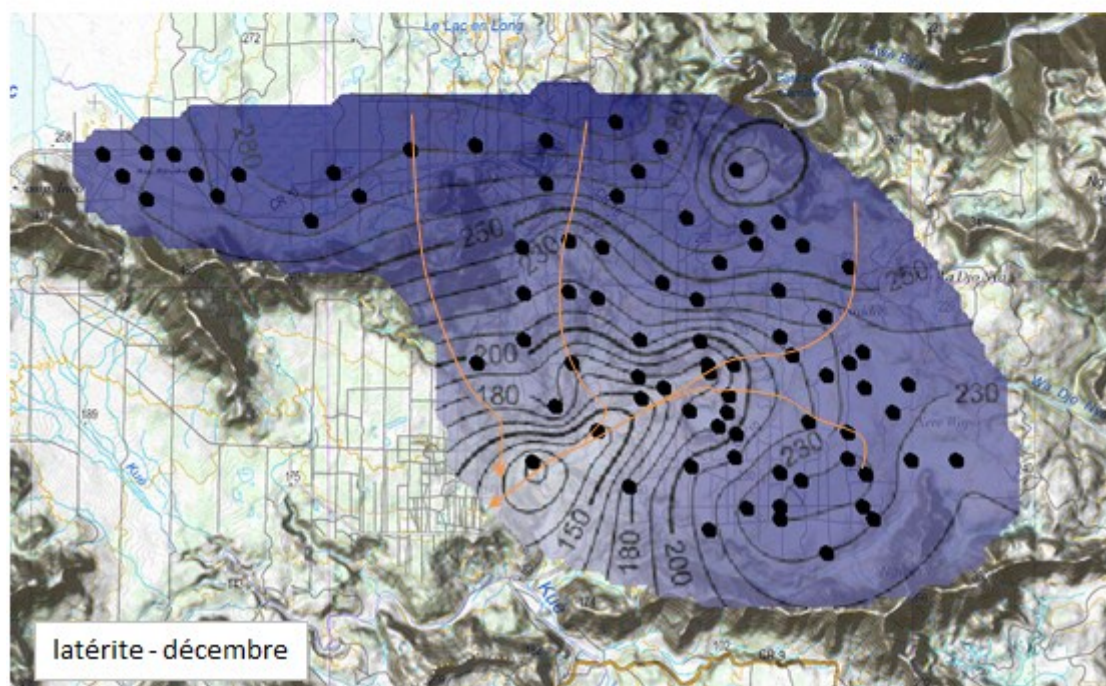
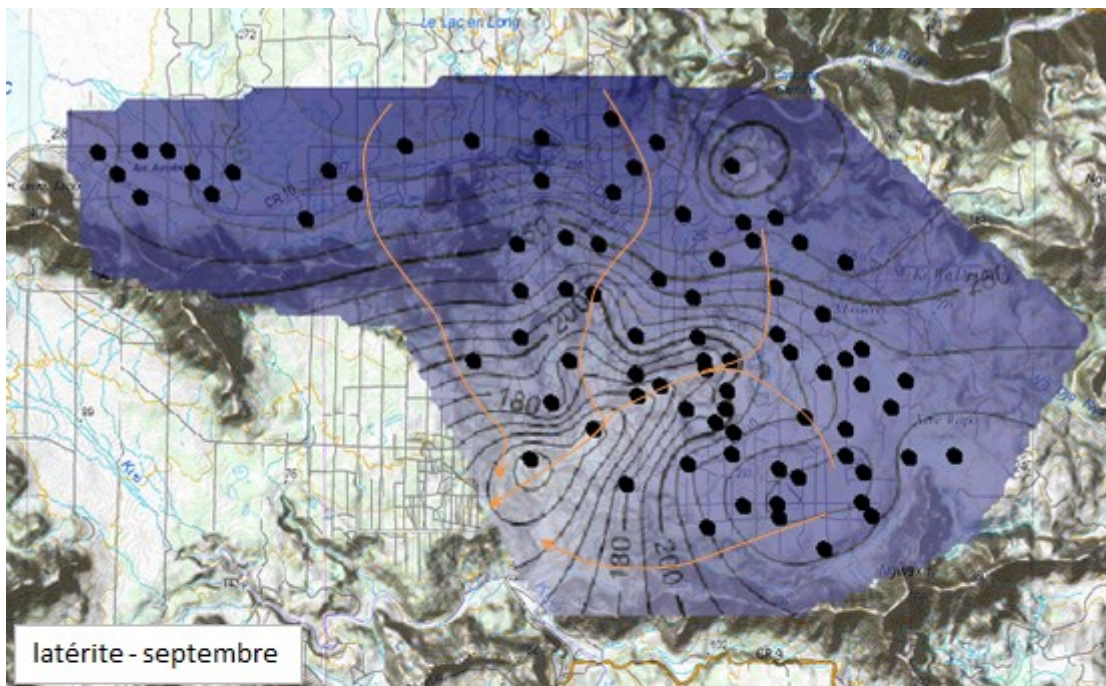


Figure 22 : Carte des isopièzes de la nappe des latérites en période de saison sèche (septembre, en haut) et de saison humide (décembre, en bas). La ligne orange correspond à l'écoulement des eaux.

Ce type de carte permet d'obtenir à une date donnée une représentation de la distribution spatiale des charges et des potentiels hydrauliques. Les axes principaux de flux peuvent être déterminés.

Dans les quatre cas étudiés, on remarque que :

- Le flux **général** des eaux souterraines a une direction NE-SO.
- La quasi-totalité des eaux provenant du bassin versant s'écoulent en direction de la rivière Kwé.

Les crêtes rocheuses qui arment le relief autour de ce bassin sont caractérisées par des niveaux piézométriques élevés. La plaine est pour sa part caractérisée par des niveaux plus faibles, qui décroissent au fur et à mesure qu'on se rapproche de la plateforme 10ex0286/10ex0284. A noter que dans la partie où se situe cette plateforme, les isopièzes décrivent des ellipses fermées qui ne sont pas à prendre en compte étant donné les limites de l'interpolation en bordure.

Pour une meilleure représentation, les lignes d'écoulement sont tracées en orange en sur les Figure 21 et Figure 22.

Les deux aquifères présentent des niveaux piézométriques plus élevés en septembre qu'en décembre. Ces observations sont logiques car ces deux mois appartiennent respectivement à la période des moyennes eaux et des basses eaux. Malgré ces variations de niveau d'eau, la géométrie des isopièzes reste globalement la même d'une période à l'autre, avec toutefois une légère différence entre les deux nappes : les isopièzes apparaissent légèrement plus écartées sur les cartes de l'aquifère saprolitique. Les écoulements gardent généralement les mêmes directions dans les quatre cas de figure.

Enfin, on remarque une sorte de ceinture autour de la plateforme 10ex0286/10ex0284 où les isopièzes sont resserrées. Cette zone témoigne d'un gradient hydraulique élevé à ce niveau. A l'inverse, les zones où les isopièzes sont écartées témoignent d'un gradient hydraulique plus faible.

5.3 Campagne de caractérisation hydrogéochimique des nappes

5.3.1 Campagne de diagraphie sur piézomètres

Trois fois par ans, en période de basses, moyennes et hautes eaux, une campagne de diagraphie est effectuée pour suivre les propriétés hydrogéochimiques des nappes d'eau. Les diagraphies permettent de mesurer la température et la conductivité des nappes en fonction de la profondeur.

5.3.1.1 Acquisition des données

Les mesures sont réalisées à l'aide d'une sonde de type Aqua Troll 200. La sonde est descendue lentement dans chaque piézomètre. Elle enregistre une mesure de conductivité toutes les secondes, lors de la phase de descente. Seules les mesures enregistrées en face des niveaux crépinés sont prises en compte. 92 diagraphies ont été effectuées sur l'ensemble de la fosse minière. La carte page 34 localise ces piézomètres.

5.3.1.2 Présentation des résultats

Les graphiques relatant les données de température et de conductivité spécifique mesurées ont tous été créés et analysés. Ils ne sont pas présentés dans ce mémoire pour cause de confidentialité. La Figure 23 est un exemple parmi d'autres du cas le plus rencontré.

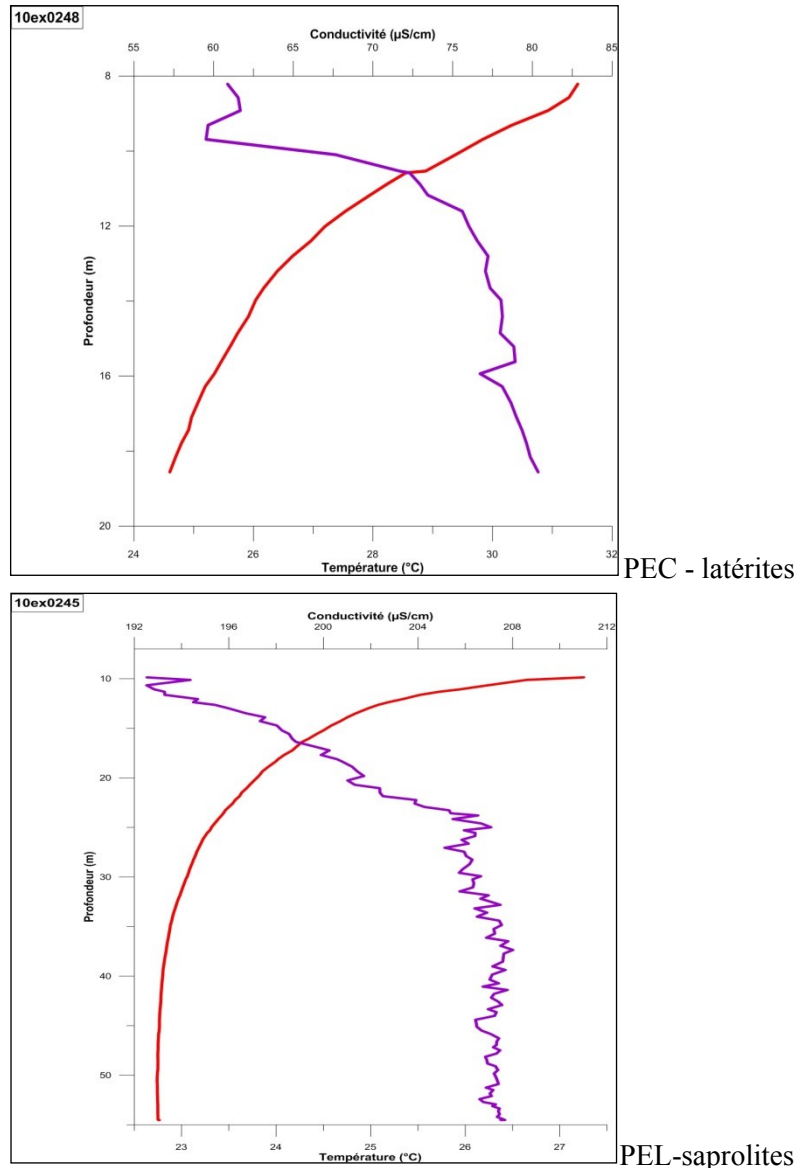


Figure 23: Diagraphies de conductivité (courbe violette) et de température (courbe rouge) de la plateforme 10EX0248 (PEC)/10EX0245 (PEL)

Au niveau des deux nappes, on observe que la **conductivité augmente avec la profondeur** alors que la température diminue. Ceci signifie que la minéralisation des eaux augmente avec la profondeur. Par ailleurs, la **conductivité électrique augmente avec la température**. Ce phénomène s'explique par le fait que la mobilité des ions augmente suite à la diminution de la viscosité du milieu (LIGHT et al., 2004)

Sur une colonne d'eau d'environ 11 mètres d'épaisseur, de haut en bas, la température au sein du piézomètre 10ex0248 varie, de 31 à 25 °C (soit une différence de 6°C), et la conductivité de 60 à 80 µS/cm (soit une différence de 20 µS/cm). La stratification des eaux

souterraines au niveau de la crépine est nette et franche. On observe les mêmes tendances au niveau du PEL 10ex0245, où la température varie de 27,2 à 22,7 (soit une différence de 4,5 °C) et la conductivité de 192 à 207 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (soit une différence de 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Lorsqu'on calcule les moyennes de conductivité et de température au sein de la nappe des latérites, saprolites et péridotites (Tableau 5) on voit clairement des distinctions entre les nappes du système aquifère multicouche. **La nappe des latérites présente des conductivités bien plus faibles que celle des saprolites.** Attention toutefois aux résultats de la nappe des péridotites, les moyennes étant faites sur seulement 3 valeurs et présentant un fort écart type (valeurs étalées entre 100 et 155 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Tableau 5 : Résultats des diagraphies : températures et conductivités spécifiques moyennes par nappe

nappe	Température moyenne °C	conductivité spécifique moyenne ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
latérites	23,907	81,652
saprolites	23,99	199,353
péridotites	23,479	155,367

Une interprétation plus poussée de ces résultats est donnée paragraphe 5.3.3.

5.3.2 Campagne d'échantillonnage

5.3.2.1 Objectif

La caractérisation des eaux souterraines est effectuée trois fois par année hydrologique : en période de basses eaux, de hautes eaux et de moyennes eaux. L'objectif de l'échantillonnage est de connaître la qualité et les fluctuations hydrogéochimiques des nappes du secteur de la fosse minière.

5.3.2.2 Piézomètres échantillonnés

L'échantillonnage a été fait sur 53 piézomètres répartis sur toute la fosse minière et captant différentes nappes :

- 20 PEC captant l'aquifère des latérites ;
- 27 PEL et ouvrages simples captant l'aquifère des saprolites ;
- 3 ouvrages simples captant l'aquifère des péridotites ;
- 3 ouvrages simples dont on ne connaît pas les coupes géologiques.

Un tableau listant les ouvrages visités, et précisant notamment les paramètres caractéristiques des purges, le numéro des échantillons et les nappes captées est présenté en Annexe G. Ces piézomètres échantillonnés sont localisés sur la carte page 34.

5.3.2.3 Purge du piézomètre

Afin d'échantillonner une eau représentative de l'aquifère et non une eau stagnante ayant été en contact avec l'atmosphère, les piézomètres sont purgés avant l'échantillonnage. Pour cela, on applique ici la **méthode des trois volumes d'eau**. Cela consiste à enlever trois fois le volume d'eau compris dans le tube du piézomètre et dans le sable-filtre du piézomètre,

ou bien à l'assécher complètement si les formations géologiques sont peu perméables et ne permettent pas une recharge rapide des nappes lors du pompage.

L'échantillonnage des piézomètres suivant la technique des bas débits (« low flow sampling ») utilisée ici ne nécessite pas un volume de purge prédéterminé mais juste une stabilisation des paramètres physico-chimiques de l'eau pompée. Un suivi régulier des paramètres physico-chimiques pendant la purge a également été effectué.

5.3.2.3.1 Volume de purge

Le volume de purge dépend du diamètre de forage, de la hauteur d'eau dans le forage et de la longueur de la crépine. Pour connaître le volume d'eau à purger, les étapes suivantes sont à effectuer :

- Mesurer le niveau d'eau avec la sonde de niveau d'eau.
- Utiliser la méthode présentée dans la Tableau 6 pour calculer le volume à purger.

Tableau 6 : Exemple d'un calcul du volume minimal de purge

Heure (hh:mm)	Niveau d'eau initial (m)	Profondeur du piézomètre (m)	Hauteur de niveau d'eau (m)	Volume d'un piézo (L)	Volume de purge minimal (L)
	A	B	C = B - A	D = 3 x C	E = D x 3
12 :30	5m	20 m	15 m	45 L	135 L

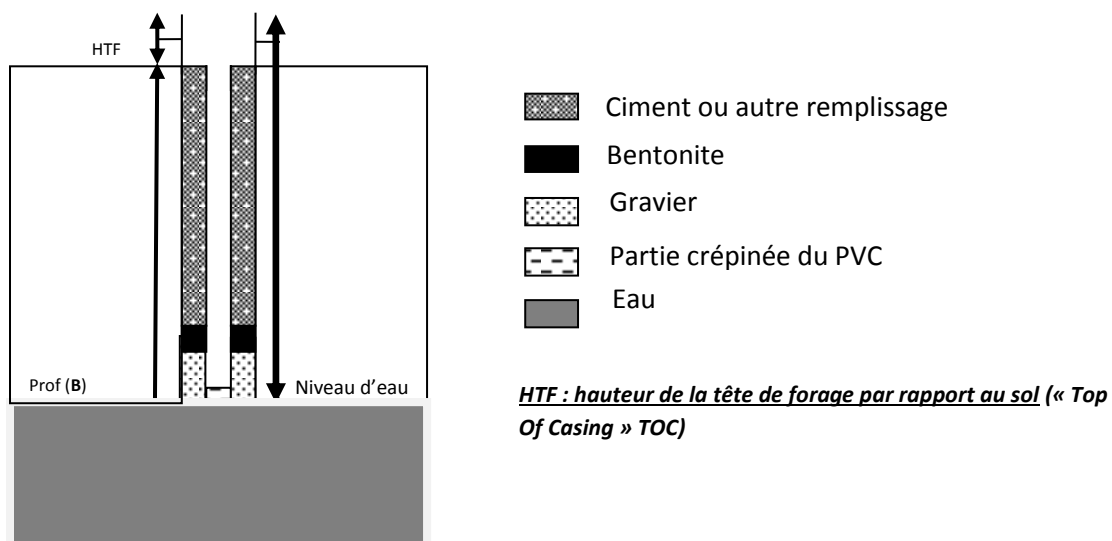


Figure 24: Schéma général d'un piézomètre

Attention : La méthode présentée dans le Tableau 6 a été créée pour des piézomètres de diamètre 100mm (équipés d'un PVC de 50mm) utilisés lors de cette campagne. En effet, le calcul du volume du piézomètre dépend du diamètre total du trou, de la porosité du gravier (prendre 0,3), du diamètre du PVC et de la hauteur de la colonne d'eau présente dans le piézomètre.

La table ci-après permet d'estimer le volume d'eau contenu dans le piézomètre selon son diamètre, en supposant que le PVC installé fait 50mm de diamètre.

Tableau 7 : Estimation du volume d'eau d'un puits pour des puits de surveillance de 50 mm de diamètre (GOLDER ASSOCIATES, 2004).

Diamètre du puits tuyau plus remplissage	100mm	115mm	120mm	125mm	150mm	200mm
Litres par mètre linéaire d'eau dans le puits	3.7	4.5	4.8	5.1	6.7	10.8

5.3.2.3.2 Méthode de purge

La purge a été faite à l'aide d'une tubulure et valve à bille Waterra. L'eau purgée est collectée dans un seau gradué pour mesurer les volumes d'eau purgés, puis rejetée au sol une fois les volumes consignés. La Figure 25 ci-dessous est une photo d'un échantillonnage en cours.

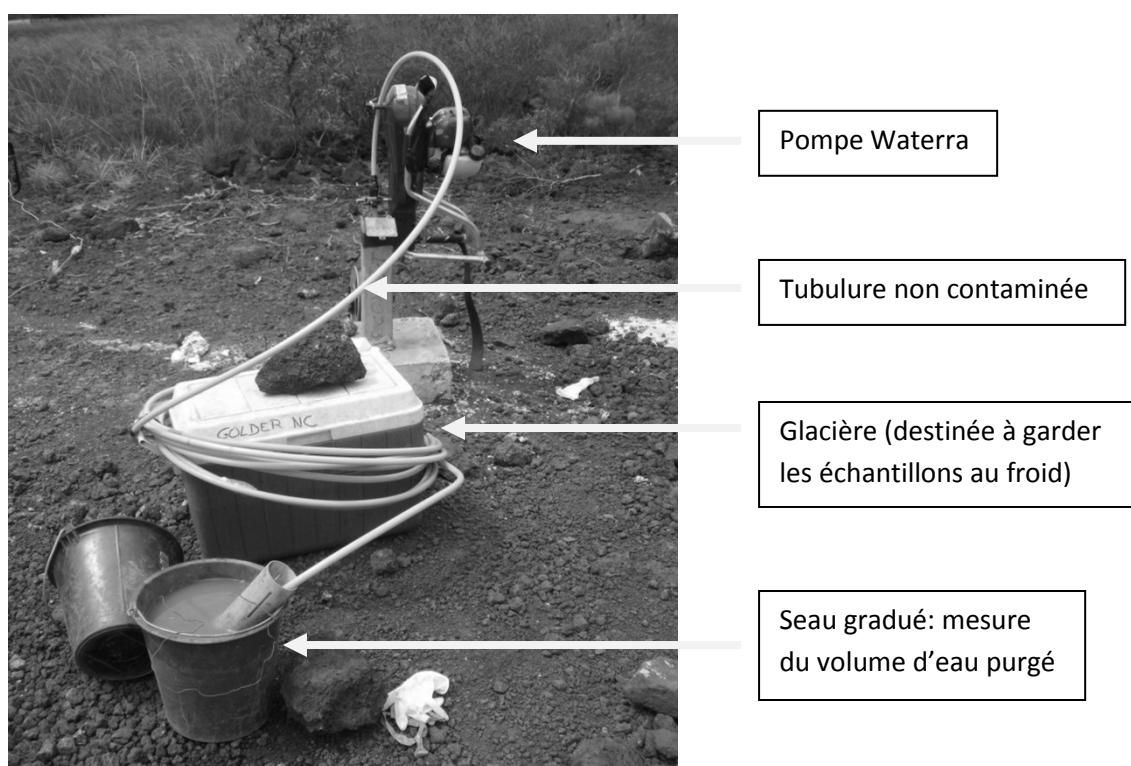


Figure 25: Echantillonnage en cours

Pour éviter de contaminer l'eau du piézomètre, la manipulation des tubulures se fait à l'aide de gants en latex jetables. Environ tous les demi-volumes de purge (par exemple pour 3 volumes de purges on aura 6 mesures au total), une mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau purgée est réalisée. Cette mesure s'effectue avec la sonde multi-paramètres YSI, calibrée une fois par semaine (cf. Figure 26).

Les paramètres mesurés sont les suivants :

- L'**oxygène dissous** (en % saturation) ;
- La **conductivité** (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) ;
- Le **pH** (sans unité) ;
- La **température** de l'eau (en $^{\circ}\text{C}$).



Figure 26: Mesure des paramètres In-Situ

Le potentiel Redox aurait dû être mesuré mais cela n'a pas été fait lors de cette campagne du fait d'un problème avec la sonde, non calibrée par le laboratoire.

La purge est terminée lorsque l'un des cas suivants est atteint :

- **La purge théorique** : le volume d'eau initialement présent dans le piézomètre est purgé 3 fois et les paramètres physico-chimiques (pH, température, conductivité) sont stabilisés. Si la stabilisation des paramètres n'est toujours pas atteinte, un quatrième volume d'eau est alors purgé.
- **Si le volume à purger est très important** (piézomètres avec une très grande colonne d'eau ou ayant de gros diamètres), la purge est arrêtée lorsque les paramètres physico-chimiques sont stabilisés (*cf. paragraphe ci-dessous*). Un volume minimal de purge de 1 volume de piézomètre est tout de même requis.
- **Si le piézomètre s'assèche** (recharge non instantanée), on estime le piézomètre purgé. L'échantillonnage est réalisé dès que la recharge du piézomètre est suffisante pour effectuer le prélèvement.

5.3.2.3.3 Stabilisation des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques sont considérés comme stables lorsque, sur 3 prises de mesures consécutives, leurs variations restent inférieures aux fourchettes de valeurs indiquées ci-dessous :

- Température : ± 0.5 °C	- pH : ± 0.1
- Conductivité électrique (EC) : $\pm 5\%$	- Oxygène dissous : $\pm 10\%$

L'oxygène dissous est plus sujet à des variations, et donc moins pris en compte pour l'établissement des conditions stables.

5.3.2.3.4 Prélèvement des échantillons

A la fin de la purge, des échantillons sont prélevés et mis dans des flacons. Ils sont conservés au froid et envoyés au laboratoire d'analyse. Chaque semaine, un duplicata, un triplicata et un blanc de terrain sont réalisés en plus. Un récapitulatif des purges est donné en annexe G.

Deux laboratoires sont sollicités :

- **un laboratoire primaire** qui analyse les échantillons et dont les résultats seront ceux utilisés par la suite pour l'interprétation et l'analyse des données
- **un laboratoire secondaire** auquel sont envoyés les triplicatas d'échantillons (les duplicatas sont envoyés au laboratoire primaire)

L'objectif des duplicatas et triplicatas est de contrôler la qualité des résultats fournis par le laboratoire primaire. Celui des blancs de terrain est de vérifier que les échantillons ne sont pas contaminés lors des manipulations sur le terrain (air ambiant, tubulures utilisées, récipient adéquat...).

5.3.2.4 Présentation des résultats

5.3.2.4.1 Les différents paramètres suivis

Par souci de confidentialité, nous ne parlerons dans ce rapport que des tendances des résultats obtenus, ceux-ci ne pouvant être divulgués, les données appartenant à Vale NC. Les paramètres analysés sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8 : Paramètres analysés dans les échantillons

Paramètres analytiques	Remarques
Mesures in situ	
pH, potentiel redox, température, conductivité électrique, oxygène dissous	Mesures <i>in situ</i>
Mesures en laboratoire	
Alcalinité: bicarbonates, carbonates, hydroxides	Fraction dissoute
Anions majeurs : Fluorures, Chlorures, sulfates, nitrites, nitrates, phosphates	Fraction dissoute
Cations majeurs : sodium, potassium, calcium, magnésium, ammonium	Fraction dissoute
Métaux : aluminium, chrome, chrome VI, fer, manganèse	Fraction dissoute
Silice	Fraction dissoute

La qualité d'une eau souterraine est caractérisée par un certain nombre de paramètres physiques et chimiques. Les paramètres pris en compte sont:

- La **dureté** de l'eau correspondant à sa minéralisation en calcium et magnésium.
- Le **pH** qui dépend de la teneur en ions.
- La **teneur en substances minérales dissoutes** généralement sous forme ionique: anions (bicarbonates, chlorures, sulfates, nitrates, fluorures) et cations (calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, manganèse, ammonium);
- La **turbidité**, produite par des matières en suspension (argiles) dans les aquifères karstiques.

A ces paramètres physico-chimiques s'ajoutent d'autres éléments pouvant être toxiques en quantité trop élevée, comme certains métaux (fer, chrome, aluminium, manganèse).

La teneur en gaz dissous issus de l'atmosphère (O et CO₂) devrait être prise en compte du fait de son rôle important dans la dissolution des minéraux, mais nos mesures ne permettent pas d'utiliser ces résultats (erreur de sonde).

5.3.2.4.2 Paramètres physico-chimique mesurés *in situ*

Les résultats des analyses mettent en évidence une qualité physico-chimique de l'eau relativement hétérogène sur l'ensemble des 53 piézomètres échantillonnés.

L'oxygène dissous ne sera pas analysé car il n'a pas été prélevé correctement (problème avec la sonde). Le tableau ci-après est un récapitulatif des résultats.

Tableau 9 : Résultats des paramètres physico-chimiques mesurés in-situ

Nappe	Latérites	Saprolites	Péridotites
Conductivité	87,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$	182 $\mu\text{S}/\text{cm}$	144 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Température	23,3°C	23,4°C	
pH	4,9	7,78	7,4
Turbidité	forte	faible	faible

5.3.2.4.2.1 Température

Les températures relevées sur le réseau ont été mesurées in situ, au moment du prélèvement. Le graphe ci-dessous présente les résultats de la campagne. La température moyenne des 53 piézomètres échantillonnés est de 23,5°C. Les températures oscillent entre 21,7 et 25°C. Il n'y a pas de différence notable entre la nappe des latérites et celle des saprolites (de moyenne respective 23,3°C et 23,4°C).

La température dépend de nombreux facteurs tels que l'altitude du site, l'heure de prélèvement et les conditions climatiques au moment du prélèvement. Elle n'est donc pas liée intrinsèquement à la nappe. On note toutefois sa faible variabilité entre les différents piézomètres de la fosse minière.

5.3.2.4.2.2 Conductivité

La **conductivité électrique** de l'eau représente sa **capacité à laisser ses charges électriques se déplacer librement**. Cette caractéristique dépend de la quantité d'ions présents en solution. La conductivité électrique, ici exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$, est donc une **expression de la minéralisation de l'eau** (soit de la quantité de sels dissous dans l'eau). Une conductivité élevée est signe d'une importante minéralisation (également appelée salinité). Ainsi, plus l'eau contient des ions comme le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), le bicarbonate (HCO_3^-), le sulfate (SO_4^{2-}) et le chlorure (Cl^-), plus elle est capable de conduire un courant électrique et plus la conductivité mesurée est élevée.

La conductivité dépend : (BRGM, 2007)

- Du temps de transit et des roches mises en contact avec l'eau.
- De l'intrusion saline (eau de mer) : l'eau de mer est très minéralisée
- De la température de l'eau : la conductivité augmente quand la température augmente.

Les résultats de mesure doivent donc être présentés en termes de conductivité équivalente à 20 ou 25°C. (Nos sondes de terrain effectuent automatiquement cette conversion).

Les eaux se différencient selon leur conductivité : on distingue ainsi les **eaux douces** (moins de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) des **eaux minéralisées** (de 200 à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et des **eaux salées** (plus de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Comme la température, des contrastes de conductivité permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélanges ou d'infiltration...

Bien qu'on note des eaux de minéralisation plutôt faible, *l'écart type** global s'élève à 75 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui montre que la nappe captée et la localisation géographique peuvent influencer fortement sur la conductivité mesurée.

**Un écart type permet de mesurer la dispersion des points autour de la moyenne.*

Parmi les eaux analysées, on remarque que la nappe des latérites a une conductivité moins forte que la nappe des saprolites (conductivité moyenne respective de 87,3 et 182 $\mu\text{S}/\text{cm}$). **La nappe des latérites est donc moins minéralisée que la nappe des saprolites.** La nappe des péridotites a une conductivité moyenne de 144 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mais nous n'avons que 3 mesures disponibles, cette valeur est donc à utiliser avec précaution.

Des études faites sur le massif ultrabasique de Tiébaghi, au nord de la Calédonie, montrent des résultats très semblables aux nôtres. Ils enregistrent des conductivités inférieures à 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$ pour la nappe des latérites, et des conductivités supérieures à 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$ et atteignant 630 $\mu\text{S cm}^{-1}$ pour les émergences dans le socle Ultrabasique (JOIN et al., 2005).

Les analyses effectuées sur les éléments majeurs permettent de comprendre la forte minéralisation de certains points (cf. paragraphe 5.3.2.4.3).

5.3.2.4.2.3 pH

Le pH (potentiel hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau. Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain. Le Tableau 10 ci-dessous classe les eaux en fonction de leur pH.

Tableau 10 : Classification des eaux d'après leur pH (Office International des Eaux)

pH < 5	Acidité forte => présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée => majorité des eaux de surface
5,5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

On observe de grosses variabilités au niveau des pH. Sur l'ensemble des résultats, le pH de la nappe des latérites apparaît légèrement acide avec une moyenne de 4,9 alors que le pH de la nappe des saprolites est plus basique, avec un pH moyen de 7,78. Le pH de la nappe des péridotites est relativement neutre, avec un pH moyen de 7,4.

D'après PELLETIER (2003), le pH est acide (5,5) dans l'horizon latéritique et faiblement basique dans les saprolites (7,5 à 8). Ces valeurs se corrélaient bien avec nos résultats, la nature de l'encaissant étant déterminant quant aux propriétés chimiques des eaux.

5.3.2.4.2.4 Turbidité

La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau. La turbidité traduit la présence de particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...). Une turbidité forte peut permettre à des micro-organismes de se fixer sur des particules en suspension. La turbidité a été évaluée à l'œil nu sur le terrain, elle est donc subjective.

Des eaux troubles rejetées dans le lagon diminuent la clarté de celui-ci, ce qui est néfaste aux coraux qui ont besoin d'une forte luminosité pour vivre.

On remarque globalement que **les eaux de la nappe des latérites sont très troubles**, marron opaque avec beaucoup de sédiments, contrairement aux deux autres nappes dont les eaux sont très claires, avec seulement quelques sédiments en suspension.

5.3.2.4.3 Suivi et analyse des caractéristiques chimiques

5.3.2.4.3.1 Les caractéristiques chimiques

Les caractéristiques chimiques sont l'héritage de l'érosion et du lessivage des roches traversées. Elles varient donc en fonction de la nature de celles-ci. Les substances contenues dans l'eau sont sous forme de solutions salines ou gazeuses d'une part et sous forme de suspensions solides ou liquides d'autre part.

Les quantités relatives (teneurs) de ces solutions et suspensions varient en fonction de quatre facteurs :

- La **solubilité des minéraux** qui composent les roches aquifères.
- La **vitesse d'écoulement** de l'eau souterraine entraînant à des degrés divers l'érosion mécanique des roches aquifères.
- La **température** de l'eau souterraine qui dépend à la fois de la profondeur de la roche aquifère (degré géothermique) et de sa proximité éventuelle d'une zone d'activité magmatique (volcanique).
- La **pression hydrostatique** régnant dans l'espace d'une nappe phréatique captive (dans le cas d'une nappe phréatique libre, cette pression s'équilibre avec la pression atmosphérique).

Les effets du facteur solubilité minérale peuvent varier d'une manière considérable selon l'importance des autres facteurs :

- Plus la température et la pression augmentent, plus la solubilité minérale augmente.
- Plus la vitesse d'écoulement augmente, plus la fragmentation des minéraux s'accroît et favorise la solubilité minérale.

5.3.2.4.3.2 Suivi des analyses laboratoires : Duplicatas et blancs de terrain

Cinq duplicatas ont été réalisés. Les duplicatas étaient « fantômes », le laboratoire ne connaissant pas l'échantillon parent. Pour analyser la qualité des résultats du laboratoire, on calcule l'écart entre les résultats des duplicatas et des échantillons parents en considérant que :

- Pour les valeurs proches du seuil de détection, un écart de 60% est toléré.
- Pour les valeurs éloignées du seuil de détection, un écart de 20% est toléré.

Les résultats de ces calculs sont présentés en annexe K. On note un écart moyen de 8.5%. Sur l'ensemble des résultats, on peut dire que les méthodes du laboratoire primaire sont bonnes. Trois échantillons présentent des écarts suspects entre échantillon parent et duplicata.

Suite à des problèmes avec le laboratoire, les résultats des triplicatas et des blancs ne sont pas exploitables. Seuls les duplicatas seront présentés pour cette campagne.

5.3.2.4.4 Analyse des éléments majeurs

La minéralisation de la plupart des eaux est dominée par huit ions appelés couramment les ions majeurs. On distingue les cations : **calcium**, **magnésium**, **sodium** et **potassium**, et les anions : **chlorure**, **sulfate**, **nitrate** et **bicarbonate**. Les résultats sont exposés en annexe I sous forme de pourcentage, et dans le tableau ci-dessous en mg/l.

Tableau 11 : Résultats des analyses des éléments majeurs au sein des trois nappes captées

	Latérites	Saprolites	Péridotites
ANIONS mg/l			
HCO ₃	20,44	67,55	61
Cl	11,59	9,18	11,92
SO ₄	6,87	4,95	4,01
NO ₃	0,66	0,34	0,37
CATIONS mg/l			
Na	8,68	7,09	7,49
K	1,09	0,47	0,17
Ca	3,17	5,8	2,21
Mg	3,15	12,72	11,39

5.3.2.4.4.1 Contrôle de la cohérence des résultats d'analyse : les balances ioniques

La méthode des balances ioniques permet de contrôler la qualité des analyses effectuées sur les éléments majeurs. Cette démarche de validation est un préalable indispensable à une présentation fiable des résultats d'analyse et à leur interprétation.

La balance ionique est l'expression d'une différence entre les charges positives (cations) et les charges négatives (anions). La théorie physique suppose la neutralité des charges au sein des échantillons d'eau. Autrement dit, la somme des charges positives doit équilibrer la somme des charges négatives. La balance ionique de tout échantillon d'eau devrait avoisiner les 0.

Le calcul de balance ionique se fonde sur la relation suivante (BRGM, 2007) :

$$\text{NICB} = 100 * \frac{[\sum \text{cations} - \sum \text{anions}]}{[\sum \text{cations} + \sum \text{anions}]}$$

Avec :

- NICB (Normalized Inorganic Charge Balance) la balance ionique exprimée en pourcentage
- $\sum \text{cations}$ la somme des cations (en meq*)
- $\sum \text{anions}$ la somme des anions (en meq)

*Meq = milliéquivalent = (nombre de mole x charge ionique)

On considère que l'erreur doit être inférieure à :

- 12% pour un échantillon ayant une conductivité inférieure à 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- 6% pour un échantillon ayant une conductivité supérieure à 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Le graphe ci-dessous présente les résultats de balances ioniques.

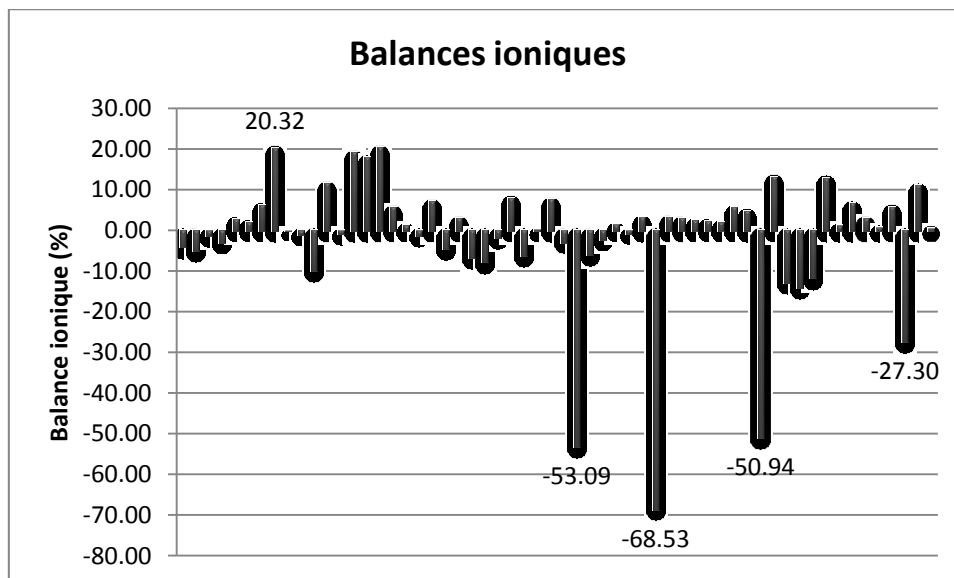


Figure 27: Représentation des balances ioniques des 53 échantillons prélevés

Sur l'ensemble des analyses, la moyenne de la valeur absolue des erreurs est de 8.4 %.

- 61% des analyses sont de bonne qualité avec une erreur de balance inférieure à +/- 6%
- 26% des analyses sont correctes avec une erreur comprise entre +/- 6% et +/- 12% ;
- 13% des analyses présentent des lacunes avec une erreur supérieure à 12% ce qui représente 7 analyses sur les 53 réalisées au total.

Les erreurs de balance ionique peuvent s'expliquer par des erreurs d'analyses mais aussi par la présence d'autres ions organiques ou inorganiques non comptabilisés dans la balance ionique car non analysés ou non détectés. La précipitation de certains éléments peut également être à l'origine de déséquilibres ioniques.

Sur les 7 échantillons présentant un déséquilibre ionique important, trois présentent de faibles volumes purgés avant la mise à sec de l'ouvrage (20 litres), un a été prélevé alors que le suivi de la purge indiquait des paramètres physico-chimiques encore instables malgré les 4 volumes de piézomètre purgés et 3 ne présentent aucun problème dans la méthode d'échantillonnage. Des erreurs d'analyses sont envisageables.

5.3.2.4.4.2 Analyse des anions majeurs

5.3.2.4.4.2.1 Les chlorures (Cl)

Origine des Chlorures dans l'eau :

GOLDSCHMIDT (1954) a démontré que tout le chlore des roches magmatiques était lessivé lors du processus d'altération. Ce chlore est facilement soluble dans les eaux. En effet, le Chlore sous forme anionique se lie par des liaisons faibles à d'autres ions et n'est adsorbé par aucune surface minérale.

La plupart du chlore naturel que l'on retrouve dans les eaux de surface provient de la mer, et dérive soit du transport atmosphérique du chlorure de sodium, soit des roches sédimentaires et des évaporites. Pour cette raison, GOLDSCHMIDT (1954) décrit le chlore comme un élément cyclique.

La teneur en chlore des eaux souterraines des terrains de roches ignées est généralement assez basse. GARRELS (1967) a montré que la majorité du chlore des terrains de roches ignées provient des eaux de pluie, et quelques petites quantités peuvent provenir d'inclusions fluides riches en chlore.

L'eau de mer contient environ 19g/l de chlore et les eaux de pluie environ 3mg/l. Cependant, la teneur en chlore dans les eaux de pluie côtières est bien plus élevée que dans les eaux de pluie dans le continent (ERIKSSON, 1952).

Résultats :

Le seuil limite de chlore pour une eau potable est de 200 mg/l. Nos valeurs sont largement en dessous. Les teneurs moyennes en chlorures des différentes nappes sont les suivantes :

- nappe des latérites : 11,59 mg/l
- nappe des saprolites : 9,18 mg/l
- nappe des péridotites : 11,92 mg/l

La nappe des latérites est plus chargée en chlorures que celle des saprolites. D'après les explications ci-dessus, le chlore en profondeur est rapidement lessivé, et la nappe supérieure est alimentée par les eaux de pluie contenant du chlore, ce qui expliquerait le fait que la nappe des latérites contienne plus de chlore que celle des saprolites. Le fait que la nappe des péridotites contienne plus de chlore que celle des péridotites est inexpliqué.

5.3.2.4.4.2 Les sulfates (SO_4^{2-})

Origine des sulfates dans l'eau :

Le sulfate (SO_4) est un des éléments majeurs des composés dissous dans l'eau de pluie. Les origines des sulfates dans les eaux sont variées. Les analyses $\delta^{34}S$ de plusieurs cristaux de gypse en Nouvelle-Calédonie suggèrent que la source majeure du sulfate contenu dans le gypse est les eaux de pluie et les embruns (« brouillards marins », contenant 1 à 20 mg/l de sulfate) (PODWOJEWSKI et ARNOLD, 1994).

Le sulfate provient également de la mise en solution et l'oxydation de roches sédimentaires évaporitiques, notamment le gypse ($CaSO_4$), mais également la pyrite (FeS) et plus rarement de roches magmatiques (galène, blende, pyrite).

Les origines anthropiques de sulfate sont la combustion de charbon et de pétrole qui entraîne une production importante de sulfures (qu'on retrouve dans les pluies), et l'utilisation d'engrais chimique et de lessive. D'une façon générale, la présence de sulfate dans des eaux naturelles "non polluées" invoque la présence de gypse ou de pyrite.

La solubilité du gypse augmente avec la température. En climat chaud, le gypse est plus fortement lessivé qu'en climat froid (WEDEPOHL, 1978). La solubilité du gypse est fonction de la teneur en NaCl de la solution. Elle augmente jusqu'à un maximum pour une quantité de

NaCl de 175 gNaCl / 100 gH₂O. Elle diminue avec des concentrations plus fortes. Cet effet est dû à l'influence du NaCl sur l'activité de Ca²⁺ et SO₄²⁻.

Résultats :

Les teneurs en sulfate s'étalent entre 0 et 50 mg/l, le seuil limite pour une eau potable étant de 150mg/l. Les teneurs moyennes en sulfates des différentes nappes sont les suivantes :

- nappe des latérites : 6,87 mg/l
- nappe des saprolites : 4,95 mg/l
- nappe des péridotites : 4,01 mg/l

La teneur en sulfate diminue dans les nappes inférieures. L'étude de PODWOJEWSKI (1994) sur la côte ouest de Nouvelle-Calédonie (dans la vallée de Tamoá) montre que sur plusieurs profils, le gypse disparaît quand la calcite apparaît, vers 2 mètres de profondeurs. Ceci est cohérent avec nos résultats.

5.3.2.4.4.2.3 Nitrates (NO₃-)

Origine des nitrates dans les eaux :

L'ion nitrate est la forme la plus oxydée de l'azote. Le nitrate n'est normalement pas dangereux pour la santé à moins qu'il ne soit réduit en nitrite (NO₂). Ses sources naturelles sont principalement les pluies et les interactions du sol avec la végétation. La quantité de nitrate dans les eaux de pluie varie en fonction de la saison et de la localisation. Les pluies continentales contiennent entre 0,3 et 2,5mg/l de nitrate, alors que les eaux près des côtes et au-dessus des océans en contiennent beaucoup moins, entre 0,15 et 0,5mg/l (ERIKSSON, 1952).

La teneur en nitrate des eaux souterraines dépend beaucoup des processus biochimiques qui régissent le cycle de l'azote. D'une manière générale, une teneur supérieure à 10 mg/l traduit un apport anthropique (BRGM, 2007). Les sources anthropiques sont nombreuses (engrais, élevage, rejets domestiques et industriels).

Résultats :

Les teneurs en nitrates relevées dans les échantillons ne dépassent pas 3,25 mg/l. La nappe des latérites est la plus riche en nitrate.

- nappe des latérites : 0,66 mg/l
- nappe des saprolites : 0,34 mg/l
- nappe des péridotites : 0,37 mg/l

Il n'y a donc aucun apport anthropique de nitrates dans la fosse minière. La norme française pour une eau potable est de 50 mg/l (cf. page 31).

5.3.2.4.4.2.4 Bicarbonates (HCO₃⁻)

Origine des bicarbonates dans les eaux :

La dissolution des minéraux carbonatés et l'action combinée du CO₂ des eaux météoriques et du sol sont, d'une manière générale, les principales origines des bicarbonates. Ceux-ci dépendent donc fortement de la nature des sols lessivés. HCO₃⁻ est un composant majeur des eaux de pluie. Des études y ont montré une valeur moyenne de 0,4 ppm (LANEY, 1965).

Le paragraphe 5.3.2.4.6.5 sur les carbonates détaille les réactions de dissolution faisant intervenir le HCO_3^- .

Résultats :

Les bicarbonates sont les constituants majeurs des nappes. On note une très grande différence selon les nappes captées, la nappe des latérites contient trois fois moins de bicarbonates que les deux autres :

- Moyenne nappe des latérites : 20,44 mg/l soit 52% de la charge anionique
- Moyenne nappe des saprolites : 67,55 mg/l soit 82% de la charge anionique
- Moyenne nappe des péridotites : 61 mg/l soit 79% de la charge anionique

5.3.2.4.4.3 Analyse des cations majeurs

5.3.2.4.4.3.1 Potassium

Origine du potassium dans les eaux :

Le potassium (K^+) est abondant sur terre, mais peu fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombinaison dans les sols (sur les argiles notamment). La teneur en K^+ dans les eaux souterraines dépend du taux d'altération des minéraux potassiques comme le feldspath potassique et les évaporites (sylvinite KCl). Elle dépend aussi du taux de formation de minéraux potassiques stables, comme l'illite, de la disponibilité de sites d'échanges sur les minéraux argileux, et sur la réserve en solutions interstitielles (WEDEPOHL, 1978).

L'altération de K-feldspath dépend du pH, de la concentration en Al et Si de la solution, et du taux de formation de silicates d'aluminium hydratés. (FETH et al., 1964). Après son lessivage, K^+ est utilisé soit pour former des minéraux potassiques, comme l'illite, soit absorbé par d'autres argiles, ou enlevé par la migration des fluides.

L'eau de mer a une concentration en potassium d'environ 380 mg/l. Dans les eaux souterraines, la teneur varie généralement de 0 à 5 mg/l.

Résultats :

Les teneurs mesurées en K^+ sont relativement faibles. Cet élément est rapidement lessivé ou adsorbé. Aucune teneur en potassium ne dépasse le seuil limite de 12 mg/l. La nappe des latérites est la plus riche en potassium :

- Moyenne nappe des latérites : 1,09 mg/l soit 7% de la charge cationique
- Moyenne nappe des saprolites : 0,47 mg/l soit 2% de la charge cationique
- Moyenne nappe des péridotites : 0,17 mg/l soit 1% de la charge cationique

5.3.2.4.4.3.2 Sodium

Origine du sodium :

Le sodium est le plus abondant de tous les métaux alcalins. On le retrouve dans les roches cristallines et les roches sédimentaires (sables, argiles, évaporites). Il est généralement peu présent dans les roches carbonatées. Le sodium compose de nombreux minéraux, comme par exemple les feldspaths, pyroxènes, amphiboles et micas. Habituellement, lorsque la teneur en sodium du sol en suspension est élevée, celle des eaux souterraines l'est également, augmentant ainsi la salinité des ruisseaux et des rivières.

La concentration en Na dans les eaux souterraines dépend de (WEDEPOHL, 1978):

- L'altération des plagioclases sodiques : formation de kaolinite et montmorillonite, accompagnée de la mise en solution de Na^+ , Ca^{2+} et HCO_3^-
- Le remplacement de Ca^{2+} par Na^+ sur les surfaces des nouveaux minéraux formés.

Pour résumer, la teneur en Na^+ dépend des minéraux lessivés, du pH, du temps de réaction par rapport au temps de drainage, et des réserves de Ca^{2+} pour former de la montmorillonite (mais dans les sols ultramafiques du sud de la Calédonie, la teneur en calcium est faible, ceci n'est donc pas la source majeure de sodium). De plus, les eaux souterraines peuvent contenir une forte quantité de Na^+ provenant des solutions d'évaporites et de l'intrusion de l'eau de mer (près des côtes), ainsi que de la plus forte teneur en Na^+ provenant des eaux de pluies d'origine marine (WEDEPOHL, 1978).

L'eau de mer a une concentration en sodium supérieure à 10000 mg/l. Dans les eaux souterraines, la teneur varie généralement de 1 à 15mg/l.

Résultats :

Tableau 12 : Résultats des teneurs en sodium et potassium et calcul du ratio Na/K

	latérites	saprolites	péridotites
Na (mg/l)	8,68	7,09	7,49
K (mg/l)	1,09	0,47	0,17
Na/K	7,96	15,09	44,06

D'après les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, la teneur en sodium est la plus élevée dans la nappe des latérites. Le sodium étant très mobile et les couches supérieures étant très lessivées, on aurait pu s'attendre à une plus faible teneur en sodium dans la nappe des latérites. On peut donc penser à une **influence marine** importante.

Le ratio Na/K diminue lorsque l'on passe des péridotites aux latérites (cf. Tableau 12). Ceci confirme une étude stipulant que lors de l'altération des sols, et dans la plupart des systèmes, le ratio Na/K diminue lors de la formation des sols, dû au fait que Na est très soluble et plus mobile que K pendant l'altération (WEDEPOHL, 1978).

5.3.2.4.4.3.3 Calcium (Ca^{2+})

Origine du calcium dans les eaux :

Le calcium Ca^{2+} est présent dans les roches cristallines et les roches sédimentaires. Il est très soluble et est donc largement représenté dans la plupart des eaux. Au sein des massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie, la roche mère ne contient pas de plagioclases et sa teneur en calcium est très faible (GUILLON, 1973). La teneur en CaO dans les péridotites est en moyenne de 3,46% (NOCKOLDS, 1954).

Les plus importants minéraux de calcium qui se décomposent lors de l'altération sont les plagioclases, les pyroxènes, les amphiboles et les épidotes des roches ignées et métamorphiques, ainsi que la calcite (CaCO_3), la dolomie (CaMgCO_3), l'anhydrite et le gypse (CaSO_4) des roches sédimentaires (WEDEPOHL, 1978).

Dans les eaux naturelles, la concentration en calcium dissous est contrôlée en majorité par le carbonate dissous et les espèces de phosphate et sulfate. D'après BISCHOFF et FYFE

(1968), Mg^{2+} et SO_4^{2-} exercent une inhibition spécifique sur la formation de la calcite $CaCO_3$. La solubilité de la calcite augmente quand la pression de CO_2 augmente et diminue quand la température augmente.

Résultats :

Les teneurs globales en calcium des eaux sont faibles. En moyenne, pour chaque nappe on obtient les résultats suivants :

- nappe des latérites : 3,17 mg/l
- nappe des saprolites : 5,80 mg/l
- nappe des péridotites : 2,21 mg/l

La nappe des péridotites est la moins riche en calcium. Celle des saprolites est la plus riche. C'est également la plus riche en Mg^{2+} , de loin par rapport à la nappe des latérites. Le Mg^{2+} a la propriété d'inhiber la précipitation de calcite (voir explication ci-dessus) et donc favorise la présence de calcium dissous, ce qui pourrait expliquer une plus forte teneur en calcium dans cette nappe.

Les teneurs mesurées restent dans les gammes des valeurs naturelles (généralement comprises entre 2 et 120 pour le Calcium).

5.3.2.4.4.3.4 Magnésium (Mg^{2+})

Origine du magnésium dans les eaux :

Le magnésium est présent dans les roches cristallines et les roches sédimentaires. Les péridotites contiennent en moyenne 34,02% de MgO (NOCKOLDS, 1954). Mg^{2+} est très soluble et est donc largement présent dans la plupart des eaux naturelles.

Le magnésium dissous a trois origines possibles, selon une étude de PODWOJEWSKI(1994) dans la vallée de Tamoia (situé sur la côte ouest de Nouvelle-Calédonie):

- Les eaux de pluie et les embruns
- L'altération chimique de dépôts alluviaux composés de péridotites et serpentinites : l'altération de sédiments ultrabasiques libère de fortes quantités d'ions magnésium. En effet, le magnésium étant un élément très mobile, il est très rapidement lessivé des couches latéritiques (IRD, 2012).
- L'inondation par les eaux riches en magnésium des rivières

L'apport de magnésium favorise la précipitation d'aragonite et dolomite et participe à la formation de calcite pseudomorphe. L'altération des roches cristallines libère du magnésium, mais en quantité moindre que certaines roches sédimentaires carbonatées, dont les principales sont la dolomie ($CaMgCO_3$) et la magnésite ($MgCO_3$).

Résultats :

En moyenne, pour chaque nappe on obtient les résultats suivants :

- Moyenne nappe des latérites : 3,15mg/l soit 19% de la charge cationique
- Moyenne nappe des saprolites : 12,72mg/l soit 49% de la charge cationique
- Moyenne nappe des péridotites : 11,39mg/l soit 54% de la charge cationique

La nappe des latérites est très appauvrie en magnésium par rapport aux 2 autres nappes. Ceci est en cohérence avec le fait que le Magnésium est très soluble et rapidement lessivé dans les couches latéritiques.

Les teneurs mesurées restent dans les gammes de valeurs naturelles (généralement comprises entre 2 et 25 pour le magnésium).

5.3.2.4.5 Analyse des métaux

Le tableau ci-dessous est un récapitulatif des mesures moyennes en métaux de chaque nappe. La carte page 68 donne la localisation des ouvrages dont la teneur en certains éléments dépasse la norme française de potabilité des eaux.

Tableau 13 : Résultats des teneurs moyennes en métaux dans chaque nappe (en mg/l).

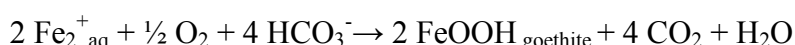
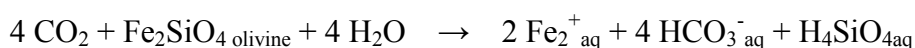
mg/l	Chrome III	Chrome VI	Fer dissous	Aluminium dissous	Manganèse dissous
Latérites	0,03	0,02	0,06	0,13	0,06
Saprolites	0,02	0,01	0,09	0,19	0,06
Péridotites	0,02	0,02	0,06	0,10	0,01

5.3.2.4.5.1 Le fer

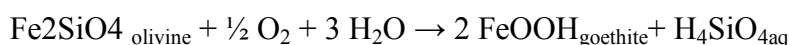
Origine du Fer dans l'eau :

L'extrême sud de la Nouvelle-Calédonie offre un sol pauvre en nutriments et très chargé en fer (milieu naturel acide). Présent sous forme réduite soluble (Fe^{2+}), le fer est oxydé en présence d'oxygène et précipite sous forme ferrique $\Rightarrow \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$. Le fer III précipite ensuite sous forme d'hydroxydes insolubles dans l'eau de couleur rouge rouille.

Selon les études de GARRELS (1967), l'altération de roche ignée primaire peut être décrite par l'attaque des solutions de sol riches en CO_2 sur les minéraux silicatés pour former des nouveaux minéraux aluminosilicatés (argiles), ainsi que des cations dissous, de la silice, et des bicarbonates en solution. Par exemple, l'altération de l'olivine suit la réaction suivante:



La somme de ces 2 réactions donne la réaction suivante:



Les minéraux ignés de fer sont sujets à l'altération et disparaissent dans l'ordre suivant (GOLDICH, 1938) : olivine, puis pyroxène, amphibole et enfin biotite. La magnétite est beaucoup plus résistante à l'altération chimique que les silicates de fer, mais elle peut être sujet à l'oxydation, surtout dans des conditions tropicales (VAN HOUTEN, 1968).

Les argiles ont une grande surface spécifique d'adsorption et le fer lessivé y est facilement adsorbé. Ainsi, les latérites sont très chargées en hydroxydes de fer, notamment en goethite. La couleur rouge de la couche supérieure des latérites est due à la présence d'hématite. La couleur jaune des latérites jaunes est due à la présence de goethite ou de lepidocrotite (WEDEPOHL, 1978).

La concentration en fer dans les eaux souterraines est principalement contrôlée par le pH et le potentiel d'oxydo-réduction (Eh) du milieu, ainsi que par la matière organique. D'une manière générale, deux cas se distinguent :

- **Dans les eaux bien oxygénées**, la concentration en fer ferrique dissous n'excède pas quelques dizaines de µg/l. Elle est limitée par la précipitation d'hydroxyde ferrique Fe(OH)₃.
- **Dans les eaux plus réductrices**, la forme réduite du fer prédomine et peut atteindre des concentrations de quelques mg/l, surtout si le pH est acide.

Par ailleurs en présence de matière organique, la solubilité du fer croît. En revanche, en présence de sulfures, le fer tend à précipiter.

De nombreuses eaux souterraines sont anaérobies. Dans ces conditions, la forme la plus abondante de fer dissous est le Fe²⁺. La teneur en Fer dissous dans les eaux souterraines non thermales sur le continent s'étale entre <0.01 ppm à 500 ppm (WHITE et al., 1963). On trouve de valeurs supérieures à 100 ppm dans les eaux minières acide dont le pH est souvent inférieur à 2, et qui donc peuvent dissoudre une quantité considérable de fer ferrique et ferreux. Les eaux souterraines plus typiques ayant un pH plus élevé (> 4) ont une concentration en ion allant de <0.01 ppm à 10 ppm (WHITE et al., 1963).

Résultats :

La teneur en fer dissous est globalement très faible dans les eaux analysées. La concentration en fer dissous de un ouvrage (localisé Figure 29) est supérieure au seuil limite de 200 µg/L. Cet ouvrage est situé en dehors de la fosse minière et pas dans le même bassin versant. L'origine de cette forte concentration peut être naturelle, comme expliqué ci-dessus, ou provenir d'un apport anthropique ponctuel.

5.3.2.4.5.2 Aluminium

Origine de l'aluminium dans l'eau :

Les péridotites contiennent en moyenne 3,99 % de Al₂O₃, d'après NOCKOLDS (1954). On trouve l'aluminium dans un certain nombre de minéraux, tels les feldspaths et les micas qui, avec le temps, se décomposent en argile. L'aluminium est extrait principalement de la bauxite (minéral contenant de 40 à 60 % d'oxyde d'aluminium) et des latérites. C'est également un composant naturel du sol, des tissus des plantes et des tissus animaux.

La plupart des minéraux composés d'aluminium ont une faible solubilité à l'échelle du pH des eaux naturelles (compris entre pH=5 et pH=9) (WEDEPOHL, 1978).

Résultats :

Deux PEL dépassent la concentration limite en aluminium (0,2 mg/l). La nappe des saprolites est concernée. Ces ouvrages étant situés en amont de la mine, ces hautes teneurs ne sont pas dues à l'activité minière actuelle.

5.3.2.4.5.3 *Chrome*

Origine du chrome dans les eaux :

Les roches ultramafiques sont riches en Cr et Ni, et leur altération peut produire des sédiments et des sols très enrichis en Cr et Ni. La quantité de chrome dans les sols s'étale généralement de 0 à 200 mg/kg. Par contre, sur les sols développés sur des roches ultramafiques, des teneurs en Cr allant jusqu'à 10 000 mg/kg ont été mesurées (SCHWERTMANN et LATHAM, 1986).

Le chrome d'origine naturelle se trouve dans les sols et roches en majorité sous la forme de chromite FeCr_2O_4 , qui est extrêmement insoluble, ou bien intégré à la goéthite par substitution (BECQUERA et al., 2002).

Les sources naturelles de Cr(VI) dans les eaux souterraines sont les minéraux communs des roches ultramafiques comme la chromite, la serpentinite et l'olivine (OZE et al., 2004b). D'autres minéraux comme les argiles (chlorites, smectites) et les oxydes de fer peuvent également contenir de fortes concentrations en Cr (OZE et al., 2004a).

Le chrome a différents degrés de toxicité, qui dépendent de son taux d'oxydation : le Cr(III), présent au pH des sols surtout sous la forme CrOH^{2+} , est adsorbé facilement dans les sols, alors que le Cr(VI), présent sous forme de HCrO_4^- , est très toxique et soluble (FENDORF, 1995). FENDORF (1995) explique que le Cr(III) ne peut être oxydé en Cr(VI) que par des oxydes de manganèse, alors que le Cr(VI) est réduit en Cr(III) par les matières organiques, Fe(II) et les sulfates.

La présence du chrome est donc due à des sources naturelles comme la dissolution de ces minerais, mais elle peut également provenir de sources non naturelles, comme les rejets industriels, le traitement des minerais et l'apport d'eaux usées.

Résultats :

La présence de chrome III et chrome VI est très supérieure à la limite (0,05 mg/l) dans un ouvrage. Deux ouvrages révèlent également des teneurs en chrome III légèrement supérieures à la limite. Les trois piézomètres concernés sont des PEC situés en amont du front minier (cf. Figure 29). Ces teneurs concernent la nappe des latérites. On ne connaît pas leur origine.

5.3.2.4.5.4 *Manganèse*

Origine du manganèse dans les eaux :

On trouve du manganèse à la surface de la terre majoritairement sous forme de Mn^{2+} ou Mn^{4+} . Quelques minéraux contiennent du Mn^{3+} . En général, les composés de Mn^{2+} sont plus solubles que ceux du Mn^{4+} (WEDEPOHL, 1978).

Le Mn^{2+} remplace les ions ferreux, le magnésium et les ions de taille similaire dans les silicates et les oxydes, et est oxydé partiellement lors de l'altération chimique des roches magmatiques, métamorphiques et quelques roches sédimentaires. Son oxydation complète suit celle des ions ferreux. Mn^{4+} forme des oxydes très faiblement solubles là où la roche est en décomposition. Une petite fraction du manganèse est mobilisée en tant que Mn^{2+} . La faible

concentration du manganèse dans les eaux de surface indique une mobilité réduite de cet élément lors de l'altération des roches (WEDEPOHL, 1978).

La solubilité du MnO_2 et du $MnCO_3$ a une influence majeure sur la concentration en manganèse des eaux de surface et subsurface (WEDEPOHL, 1978).

Fer et manganèse sont fréquemment associés car ils ont la propriété de co-précipiter. Leur présence dans l'eau peut avoir diverses origines :

- lessivage des terrains avec dissolution des roches et des minerais contenus dans le sous-sol
- rejets industriels (pollutions minières, métallurgiques, sidérurgiques)
- corrosion d'objets métalliques

Le climat très humide de la région entraîne une forte érosion des sols ce qui favorise un lessivage des terrains, et donc la présence de manganèse. Cependant, le manganèse a tendance à être adsorbé par les argiles, les matières organiques, les oxydes de fer fraîchement précipités, les aluminates, les silicates et les calcites (MEHROTRA et MEHROTRA, 2000), ce qui limite leur concentration dans les eaux.

La teneur moyenne en manganèse des péridotites est de 930 ppm (FLANAGAN, 1973).

Résultats :

La teneur en manganèse est globalement très faible dans les eaux analysées. Cependant, les concentrations en manganèse de 15 ouvrages sont supérieures au seuil limite de 50 $\mu g/l$. Cela concerne à la fois des PEC et des PEL. Ils sont répartis sur l'ensemble de la zone d'étude.

5.3.2.4.6 Analyse des autres éléments dissous

Le tableau ci-dessous est un récapitulatif des teneurs moyennes en certains éléments dissous. La carte page 68 donne la localisation des ouvrages dont la teneur en certains éléments dépasse la norme française de potabilité des eaux.

Tableau 14 : Teneur moyennes en éléments dissous dans chaque nappe (en mg/l).

mg/l	Ammonium dissous	Nitrites dissous	Phosphates dissous	Fluorures dissous	Hydroxydes	Silice dissous	Carbonates
latérites	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	1,49	3,30
saprolites	0,05	0,03	0,00	0,00	3,15	17,58	0,67
péridotites	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	16,50	0,00

5.3.2.4.6.1 Ammonium (NH_4^+)

Origine de l'ammonium dans le milieu naturel :

L'ion ammonium est la forme la plus réduite de l'azote dans le milieu naturel. Il a la propriété d'être fortement adsorbé sur les surfaces minérales. Les sources d'azote ammoniacal sont principalement :

- Les eaux météoriques (concentration commune de 0,1 à 2 mg/l).
- La réduction des nitrates par des bactéries autotrophes ou par des éléments métalliques dans le sol.
- La dégradation de la matière organique (décomposition des déchets végétaux et animaux).

Habituellement, les eaux souterraines sont pauvres en azote ammoniacal (le plus souvent inférieures à 0,2 mg/l), principalement à cause de sa complexation avec des éléments du sol et son oxydation rapide en milieu oxygéné. Mais des eaux issues de sols riches en substances humiques ou riches en fer peuvent présenter des teneurs de l'ordre de 1 à 3 mg/l.

Résultats :

Les concentrations en ammonium de 8 ouvrages sont supérieures au seuil limite de 0,1 mg/l, dont 2 seulement au-dessus de 0,2 mg/l. La teneur en ammonium la plus élevée provient d'un ouvrage situé en pleine forêt, en amont de la mine actuelle. Trois teneurs supérieures au seuil limite proviennent d'ouvrages situés en aval de la mine. Etant donné la forte influence de l'hydrogéologie et la géologie locale sur la teneur en ammonium, l'origine de ces fortes teneurs n'est pas forcément due à l'activité minière. Il faudrait les comparer à des études réalisées avant le début de l'extraction minière pour s'en assurer.

5.3.2.4.6.2 Nitrites (NO_2^-)

Origine des nitrites dans les eaux :

Les nitrites sont généralement absents ou à peine mesurables car ils sont très peu stables. Leur présence est indicatrice d'une pollution de surface proche. Ils sont toxiques à faibles doses (dose létale pour les poissons 3-5 mg/l) et représentent un danger à partir de 0,5 mg/l (norme française pour une eau potable).

Les deux sources principales du nitrite sont la pollution industrielle et la décomposition de la matière organique dans les sols (JUNGE, 1963).

Résultats :

La présence de nitrite à une dose légèrement au-dessus du seuil de potabilité de 0,5 mg/l a été décelée dans un seul piézomètre, situé en amont de la mine actuelle. La teneur reste néanmoins assez faible. La nappe concernée est la nappe des saprolites.

5.3.2.4.6.3 Phosphates

Origine des phosphates dans les eaux :

Les phosphates peuvent être d'origine organique ou minérale. Le pourcentage de P_2O_5 mesuré dans les péridotites est très faible : 0,002% (FLANAGAN, 1973). Le plus souvent, leur teneur dans les eaux naturelles a une origine anthropique : agriculture, détergents et traitement des eaux de chaudières.

Résultats :

Les phosphates n'ont été détectés dans aucun des piézomètres échantillonnés.

5.3.2.4.6.4 Fluorures

Origine du fluorure dans les eaux :

L'ion fluorure est la forme ionique du fluor. En climat humide, les fluor sont lessivés très tôt durant le processus d'altération et dissous dans les eaux souterraines. Le pH acide des eaux accentue fortement la dissolution des fluorures et favorise son adsorption. On peut trouver du fluor dans les eaux de pluie originaires de la mer (WEDEPOHL, 1978).

Les sources naturelles à l'origine du contenu en fluor des eaux souterraines les plus couramment constatées sont (MAZET, 2002):

- les roches de l'aquifère (par exemple des roches sédimentaires comme la fluoapatite des bassins phosphatés, des roches magmatiques et certains filons)
- le temps de contact entre l'eau et les minéraux fluorés
- le contrôle chimique des eaux

Il existe également des sources anthropiques, comme l'exploitation intensive des nappes et certaines activités industrielles (aluminium, briqueteries) ou agricoles (engrais phosphatés) qui peuvent accentuer les concentrations et doivent être pris en considération.

Des études des données chimiques des eaux souterraines dans la région de Andhra Pradesh en Inde (SUBBA RAO, 2010) montrent que le **pH augmente quand la teneur en F^- augmente** : les teneurs en F^- supérieures à 1,20 mg/l sont caractérisées par un pH supérieur à 8,0.

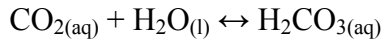
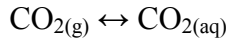
Résultats :

Seul un piézomètre révèle la présence de fluorure avec une teneur très en dessous du seuil limite de potabilité de 1,5 mg/l. On mesure au niveau de cet ouvrage un pH très élevé de 10,09. Ce piézomètre est situé en amont de la mine actuelle.

5.3.2.4.6.5 Carbonates (CO_3^{2-})

Origine des carbonates dans les eaux :

L'ion CO_3^{2-} fait parti d'un système chimique complexe dans les eaux naturelles : le système carbonate-acide, qui inclut les espèces chimiques des ions carbonates et bicarbonates (CO_3^{2-} et HCO_3^-), l'acide carbonique H_2CO_3 , le CO_2 aqueux, et souvent le CO_2 gazeux. La relation entre ces différents ions peut être représentée par les réactions ci-dessous (MORSE et MACKENZIE, 1990) :



L'ion H^+ ayant un rôle important dans ces réactions, ceci montre la forte influence des acides carboniques sur le pH des eaux naturelles. Les ions carbonates participent donc au pouvoir tampon de l'eau, soit la capacité à lutter contre les changements de pH.

La calcite (CaCO_3) et la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ sont les minéraux carbonatés dominants. On trouve des minéraux carbonatés également dans les évaporites et les formations de fer, comme la sidérite (FeCO_3) et la rhodochrosite (MnCO_3).

Les minéraux carbonatés sont très réactifs chimiquement. L'équilibre entre l'eau et la roche est le facteur principal déterminant la dissolution ou précipitation. La dissolution dépend de la température, du pH et de la pression partielle de CO_2 (MORSE et MACKENZIE, 1990).

Un des phénomènes les plus concrets de cette dissolution est la formation de karst dans les massifs calcaires. Mais sur notre zone d'étude constituée d'un massif ultrabasique, ce phénomène n'a pas lieu. On décèle bien des pseudo-karsts, mais ils ne proviennent pas de ce processus de dissolution physico-chimique dans lequel le CO_2 joue un rôle essentiel dans les massifs calcaires (TRESCASES, 1973).

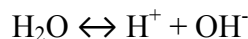
Résultats :

On décèle la présence de carbonates dans seulement 2 piézomètres. Les pH y sont respectivement de 5,41 et 9,05. Il n'y a pas de lien logique entre la présence de carbonate et l'acidité des eaux dans ce cas.

5.3.2.4.6.6 Hydroxydes HO^-

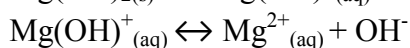
Origine des hydroxydes dans les eaux :

L'hydroxyde est une base forte. L'équilibre de l'eau est régi par l'équation acido-basique ci-dessous :



Tous les ions H^+ dérivent de la dissociation des acides carboniques, qui sont en équilibre avec le CO_2 , dont la pression partielle peut excéder jusqu'à 10 fois celle de l'atmosphère. Ainsi en milieu acide, il y a excès d'ion H^+ , et les ions HO^- sont utilisés pour former de l'eau (FAURE, 1991)

Les HO^- interviennent également dans la solubilité de bases insolubles. Par exemple, la précipitation du $\text{Mg}(\text{OH})_2$ est régie par les équations suivantes :



Résultats :

Seuls deux échantillons de la nappe des saprolites présentent des hydroxydes. Le pH de ces deux échantillons correspond aux deux valeurs les plus élevées de toute la zone étudiée : 9,57 et 10,09. On est donc en milieu basique et il est cohérent d'y trouver des ions hydroxydes. On remarque que ce sont les deux seuls échantillons qui ne comprennent pas de bicarbonates.

5.3.2.4.7 Silicates

Origine des silicates dans les eaux :

Le silicium est, après l'oxygène, l'élément le plus abondant de la croûte terrestre. Il constitue en outre un élément essentiel de nombreux minéraux, en particulier dans les roches ignées, les grès et les argiles (silicates, silicates d'alumine). D'après les études de NOCKOLDS (1954), les péridotites contiennent en moyenne 43,5% de SiO_2 . Les olivines (représentant 90% de la nature des péridotites sur Goro) et les pyroxènes (moins de 10%) se dissolvent en même temps et sont les premiers minéraux silicatés à disparaître sur un profil d'altération d'un sol.

D'une manière générale, les minéraux silicatés sont peu altérables, si bien que les teneurs mesurées dans les eaux sont souvent faibles (quelques dizaines de mg/l). Les zones supérieures des aquifères sont généralement diluées du fait de l'infiltration des eaux météoriques, et les niveaux plus profonds contiennent beaucoup plus de SiO_2 dissous. La concentration en silice dans les eaux souterraines est fonction de la nature pétrographique des roches encaissantes. Ainsi, les aquifères argileux, par exemple, sont pauvres en silice (WEDEPOHL, 1978).

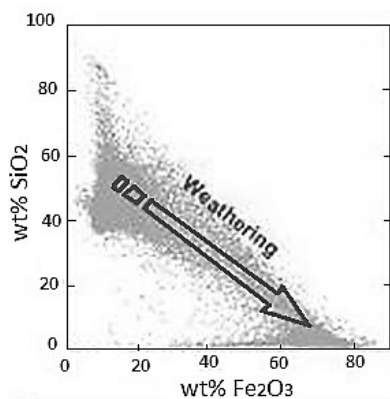


Figure 28 : Vale -Comparaison des concentrations en SiO_2 et Fe_2O_3 obtenues sur un millier de sondages réalisés dans la région de Goro (Sud de la Grande-Terre) (IRD, 2012).

La figure ci-dessus montre que la concentration en silice diminue quand la teneur en fer augmente. Ceci est la marque d'un **appauvrissement des couvertures d'altération en Si** du fait de la mobilité assez importante de cet élément **et un enrichissement relatif en Fe** du fait de la faible mobilité de cet élément (IRD, 2012).

Résultats :

Les concentrations en silice sont globalement 10 fois plus élevées dans les nappes des saprolites et péridotites que dans la nappe des latérites. Ceci est conforme aux observations faites ci-dessus.

5.3.2.4.8 Récapitulatif des résultats

Sur l'ensemble des analyses, les anions prédominants sont, dans l'ordre décroissant, les bicarbonates, les chlorures, les sulfates, et les nitrates. Les cations prédominants, sont dans l'ordre décroissant, le magnésium, le sodium et le calcium. Malgré une forte hétérogénéité, la tendance générale des analyses montre que globalement les eaux souterraines du secteur de la fosse minière sont de types bicarbonatés magnésiens. Des nuances sur ce profil géochimique global sont apportées dans par la suite.

Du point de vue éléments dissous, la carte ci-après (page 68) récapitule les résultats précédents en donnant la localisation des ouvrages dont la teneur en certains éléments dissous dépasse la norme française de potabilité des eaux.

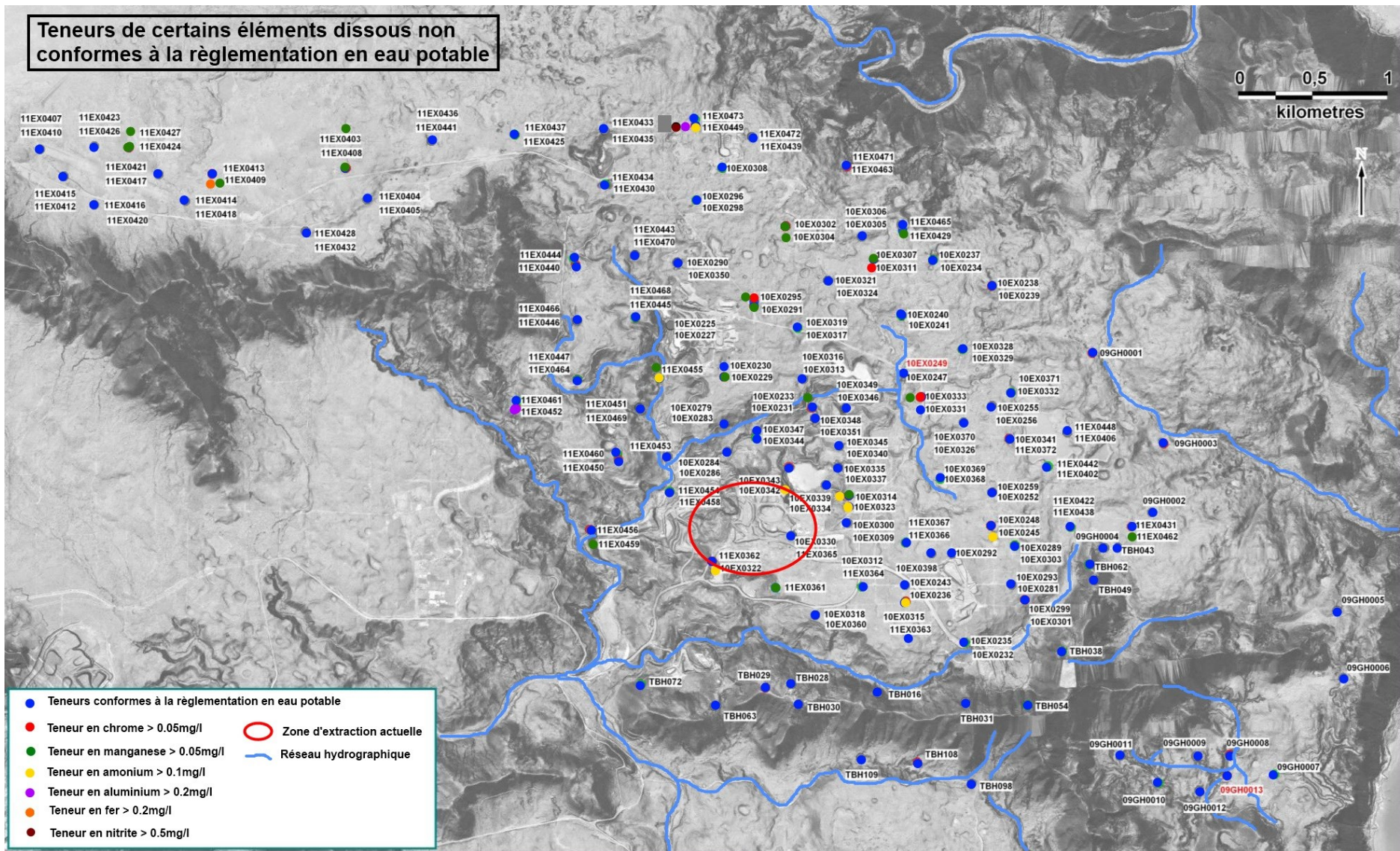


Figure 29 : Répartition des ouvrages dont les teneurs de certains éléments dissous sont non conforme à la réglementation en eau potable.

5.3.3 Interprétation des résultats

La mise en évidence des différents faciès géochimiques que l'on peut rencontrer au sein du système aquifère multicouche du secteur de la fosse minière permettra d'établir un état initial de la qualité de ces eaux souterraines avant exploitation de la zone.

5.3.3.1 L'importance des conditions climatiques

L'hydrodynamique du système aquifère joue un rôle important par le temps de contact entre l'eau et les roches. Lorsque le flux des eaux souterraines est relativement lent, une nette augmentation des teneurs en Substance Totale Dissoute est observée. Le rôle du climat est donc très important. Les faibles précipitations des régions arides entraînent généralement des temps de transfert de l'eau souterraine plus longs que dans les zones humides. Les temps de contact eau/roche plus long provoquent un enrichissement de l'eau en substances minérales, et inversement des temps de contact plus courts entraînent un appauvrissement (MAZET, 2002).

Cette campagne d'échantillonnage a été effectuée à la fin de la période de basses eaux, du 16 novembre au 20 décembre. Le niveau des nappes est donc au plus bas. Les conditions pluviométriques de cette période sont présentées dans le graphe ci-dessous (Figure 30). La plateforme 10EX0315/11EX0363 a été sélectionnée pour sa réactivité et pour la représentativité des signaux des 2 ouvrages (de manière générale, les courbes piézométriques se corrélaient assez bien et offrent les mêmes tendances, que ce soient celles des PEC ou celles des PEL).

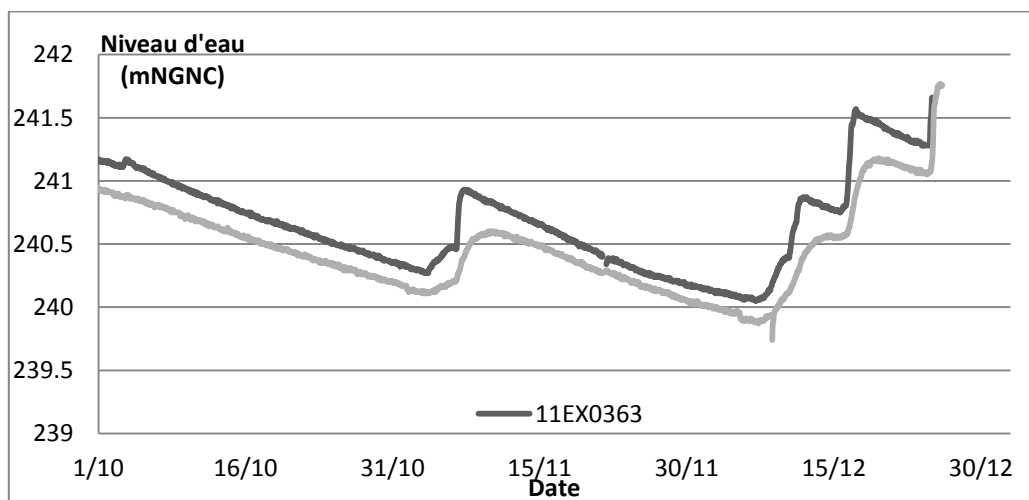


Figure 30 : Evolution des niveaux piézométriques : plateforme 10EX0315 (PEL-saprolites)/11EX0363 (PEC-latérites)

La campagne d'échantillonnage démarre après une augmentation du niveau de la nappe liée à l'épisode pluvieux ayant eu lieu du 3 au 6 novembre 2011 (46 mm). Aucun événement pluvieux majeur n'est à signaler par la suite. Les niveaux des nappes diminuent jusqu'au 6 décembre. Ils commencent à remonter à partir de la deuxième semaine de décembre, suite à l'évènement pluvieux qui s'est déroulé du 7 au 11 décembre 2011, soit une semaine avant la fin de la campagne d'échantillonnage (cf. pluviométrie sur Goro page 24).

5.3.3.2 Les données de conductivité

Les résultats de diagraphie et d'échantillonnage montrent que la conductivité de la nappe des latérites est plus faible que celle des saprolites et des péridotites.

Cela est dû à deux raisons :

- un renouvellement plus important de l'eau souterraine et à une faible interaction entre l'eau et la roche due à un temps de contact limité et à la nature de la latérite essentiellement constituée d'hydroxydes de fer peu solubles.
- En effet, l'eau de pluie, moins minéralisée s'infiltré dans le sol pour atteindre l'aquifère des latérites. Celui-ci présente donc des valeurs de conductivité plus faibles que l'aquifère des saprolites dont les valeurs sont de 2 à 3 fois plus élevées.

5.3.3.3 Dureté et alcalinité de l'eau

La **dureté** totale d'une eau est produite par les sels de calcium et de magnésium qu'elle contient. On distingue:

- La dureté carbonatée : correspond à la teneur en carbonates et bicarbonates de Ca et Mg.
- La dureté non carbonatée, produite par les autres sels.

Les eaux de la nappe des latérites sont moins dures que celles des deux autres nappes. Celles de la nappe des saprolites sont les plus dures.

L'**alcalinité** est une mesure de la capacité de l'eau à résister à des changements du pH. Si l'alcalinité est trop basse, l'eau résiste moins aux changements de pH. L'alcalinité de l'eau est due à la présence de certains ions: carbonates, bicarbonates, et hydroxydes (souvent désignés sous le nom des sels alcalins). Les bicarbonates sont la cause la plus commune de l'alcalinité et se trouvent dans presque toutes les sources d'eau, de même que les carbonates. Les hydroxydes sont plus rares dans l'eau mais leurs concentrations peuvent augmenter après certains traitements.

5.3.3.4 Géochimie par aquifère captée

5.3.3.4.1 Comparaison des trois nappes captées

Les différenciations géochimiques constatées peuvent s'expliquer par les différents niveaux aquifères captés. Les graphes présentés Figure 31 ci-après permettent de différencier les 3 nappes captées en fonction de leurs propriétés chimiques.

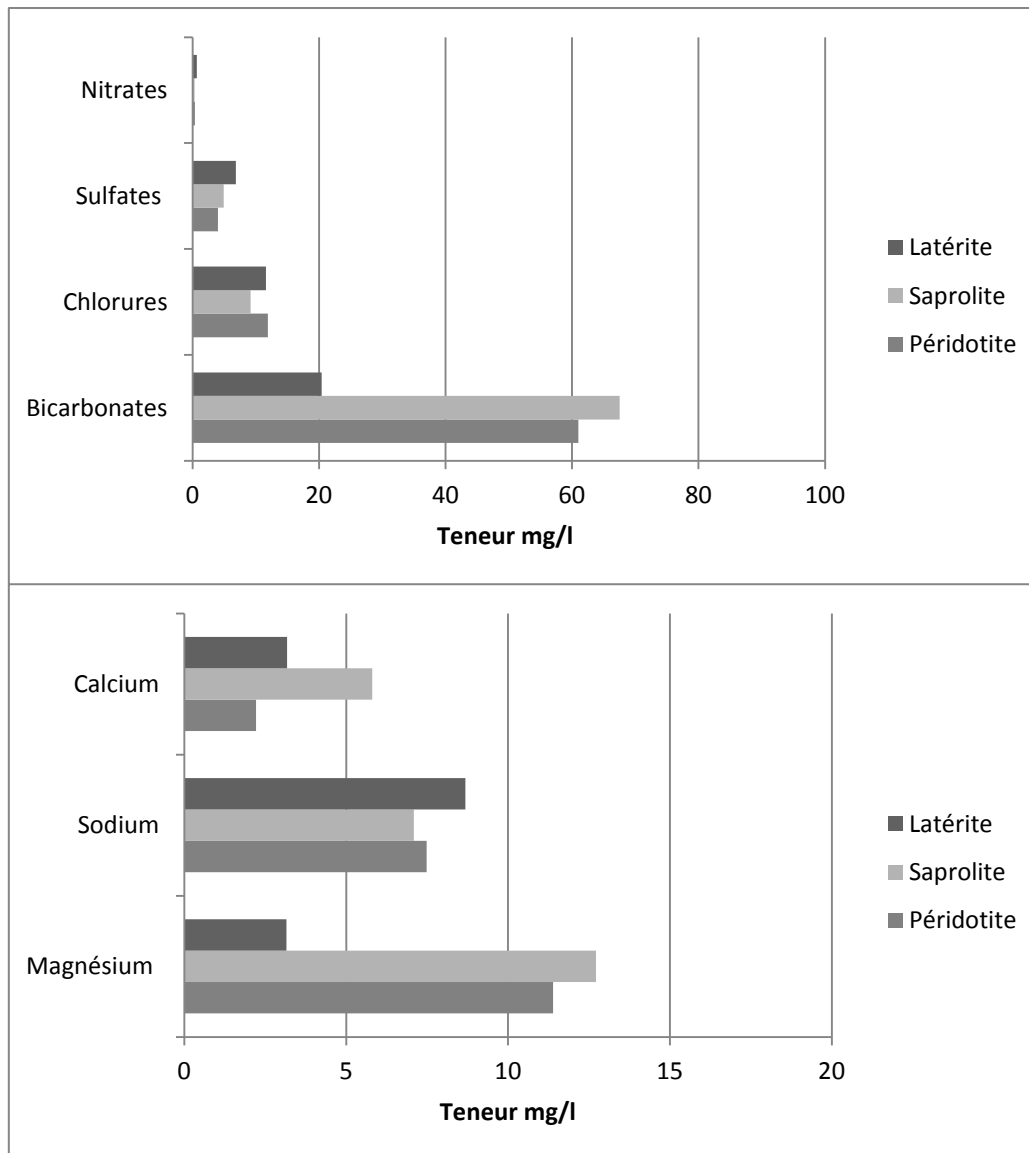


Figure 31: Comparaison des teneurs moyennes en éléments majeurs dissous dans les trois nappes captées

C'est au niveau des teneurs en magnésium, calcium et bicarbonates que la distinction des nappes se fait le mieux. La nappe des latérites a une teneur moindre en magnésium, calcium et bicarbonate que celle des saprolites. Elle est donc moins dure et moins alcaline. Les nappes des saprolites et des péridotites ont des propriétés chimiques très similaires et offrent les mêmes tendances, à l'exception de la teneur en calcium deux fois plus forte dans la nappe des saprolites.

5.3.3.4.2 Le diagramme de Piper

La composition en anions majeurs (bicarbonates, chlorures, sulfates, nitrates) et en cations majeurs (magnésium, sodium, calcium) permet de dresser le diagramme de Piper pour l'ensemble des eaux souterraines échantillonnées. Ce diagramme est présenté en Figure 32. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique ainsi que d'un losange synthétisant le faciès global. Les valeurs utilisées sont exprimées en milliéquivalent (%meq/l). Le diagramme de Piper permet de distinguer les différentes compositions géochimiques en fonction des 3 niveaux d'aquifères captés : le niveau des latérites, le niveau des saprolites et le niveau des péridotites.

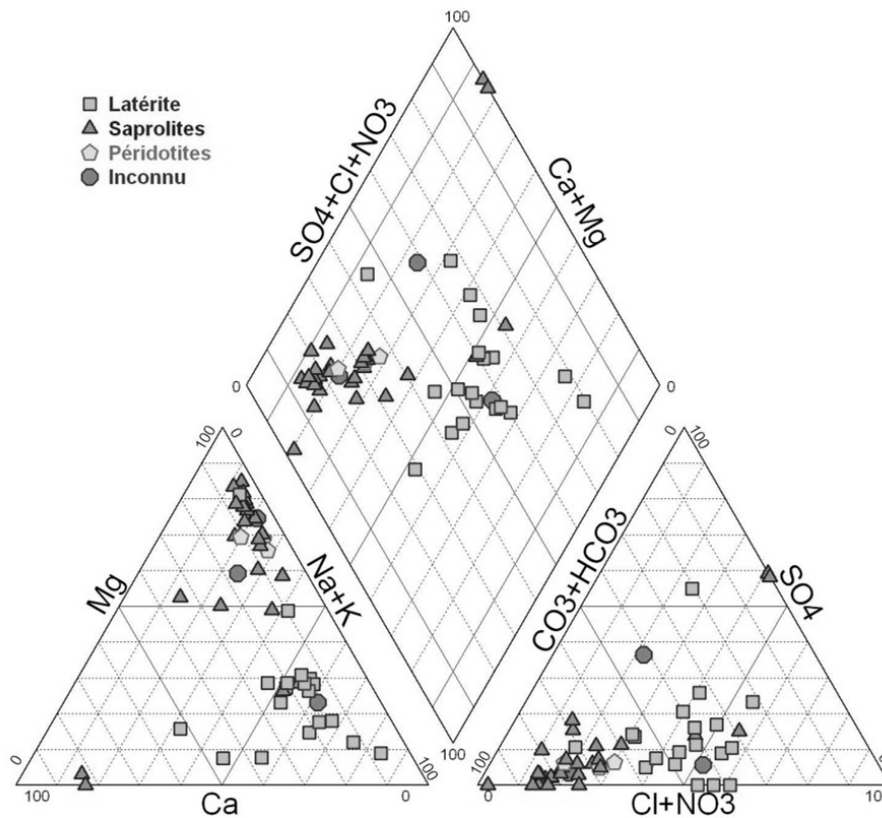


Figure 32: Diagramme de Piper des eaux échantillonnées (%meq/l)

Ce diagramme met en évidence une différenciation nette des profils géochimiques selon la nappe captée. Les eaux souterraines captées au niveau des périidotites et des saprolites présentent des similitudes. Ce sont des eaux plutôt neutres, peu à moyennement minéralisées. Elles se distinguent des eaux de l'aquifère latéritique par des concentrations plus élevées en bicarbonates et en magnésium et plus faibles en sulfates et sodium.

5.3.3.4.3 Nappe captée au niveau des latérites

D'après le losange supérieur de ce diagramme, les faciès géochimiques de ces eaux sont très hétérogènes. Les eaux issues de la nappe des latérites sont majoritairement de type chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique. Trois échantillons tendent vers un type chloruré et sulfaté calcique et magnésien, un vers un faciès carbonaté sodique et potassique et deux vers un faciès bicarbonaté calcique et magnésien.

Lorsqu'on étudie les triangles inférieurs du diagramme, on observe que :

- La charge cationique est principalement due à la présence de sodium et de potassium (plus de 40 %) ; on note la présence modérée du magnésium et du calcium qui interviennent chacun à moins de 30 %
- Dans le triangle des anions, les points sont globalement regroupés dans le pôle chloruré. En effet, la charge anionique est principalement due à la présence de chlorure et de carbonates (entre 30 et 60 %). Les sulfates interviennent à moins de 20 %.

Par conséquent, ce diagramme met en évidence une eau de **type chloruré sodique et potassique**, avec une très légère évolution vers un type **carbonatée sodique et potassique**.

D'autre part, cette nappe se caractérise par :

- une conductivité moyenne de 87 $\mu\text{S}/\text{cm}$, représentative d'une eau peu minéralisée. Quatre valeurs tirent la moyenne vers le haut. En éliminant ces valeurs, la **moyenne est de 68 $\mu\text{S}/\text{cm}$** , avec un écart type de 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- un **pH acide d'une valeur moyenne de 4,9** avec un écart type de 0,6.

5.3.3.4.4 Nappe captée au niveau des saprolites

D'après le losange supérieur du diagramme de Piper, les eaux issues de la nappe des saprolites présentent des faciès géochimiques assez homogènes, de type bicarbonaté calcique et magnésien.

Lorsque l'on étudie les triangles inférieurs du diagramme, on observe que :

- La charge cationique est majoritairement due au magnésium (entre 50 et 90 %). On note la plus faible contribution en sodium et potassium (entre 10 et 40 %) et la faible part en calcium (inférieur à 20 %) ;
- La charge anionique est très majoritairement due aux bicarbonates (plus de 60 %). Les chlorures contribuent à moins de 30 % et les sulfates à moins de 20 %. On note toutefois une légère tendance vers une composition moins carbonatée et plus chlorurée.

Par conséquent, ce diagramme met en évidence une eau de **type carbonaté magnésien** avec une très légère évolution vers une eau chlorurée et sulfatée magnésienne.

D'autre part, cette nappe se caractérise par :

- une **conductivité moyenne de 182 $\mu\text{S}/\text{cm}$** , représentative d'une minéralisation moyenne.
- un **pH légèrement basique** avec une valeur moyenne de **7,8** et un écart type de 1,2.

Deux piézomètres se détachent de la tendance générale par une absence d'hydrogénocarbonates (et présence d'hydroxydes), une concentration en sulfates plus élevée et de très fortes concentrations en calcium. Ces deux échantillons présentent un faciès hyper sulfaté calcique.

5.3.3.4.5 Nappe captée au niveau des péridotites

D'après le losange du diagramme de Piper, les eaux issues de la nappe des péridotites présentent des faciès géochimiques très homogène, de type bicarbonaté calcique et magnésien. Notons que seuls trois échantillons issus de cette nappe ont été analysés.

Lorsqu'on étudie les triangles du diagramme, on observe que :

- La charge cationique est majoritairement due au magnésium (entre 60 et 80 %). On note la part relativement faible en sodium et potassium (entre 20 et 40 %) et la faible part en calcium (inférieure à 10 %) ;
- La charge anionique est très majoritairement due aux bicarbonates (plus de 90 %). Les chlorures interviennent à moins de 30 % et les sulfates à moins de 10 %.

Par conséquent, ce diagramme met en évidence une eau de **type carbonaté magnésien**.

D'autre part, cette nappe se caractérise par :

- une **conductivité moyenne de 144 $\mu\text{S}/\text{cm}$** , représentative d'une minéralisation moyenne.
- un pH légèrement basique avec une valeur moyenne de 7,4 avec un écart type de 0,7.

5.3.3.4.6 Conclusion : des profils géochimique distincts

Deux profils géochimiques se distinguent clairement : celui des latérites, marqué par une plus forte teneur en chlorure, sodium et potassium, et celui des saprolites/péridotites, notamment marqué par une forte teneur en magnésium. Les différents stades d'altération (Péridotite \rightarrow Saprolite \rightarrow Latérite) expliquent ces résultats ; alors que l'altération se fait plus avancée, les teneurs en magnésium diminuent à cause de la mise en solution de la magnésie dans l'horizon latéritique. Parallèlement, on trouve plus de bicarbonates au sein des roches non altérées, ce qui tend à diminuer l'acidité au niveau des saprolites et des péridotites.

Le tableau ci-dessous récapitule les principales caractéristiques des faciès géochimiques des différentes nappes captées.

Tableau 15 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des différentes nappes captées (GOLDER, 2012)

Nappes	Faciès géochimique	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH moyen	Anion prédominant	Cation prédominant
Latérite	chloruré sodique et potassique	87,3	4,9	$\text{HCO}_3 \gg \text{Cl} > \text{SO}_4 \gg \text{NO}_3$	$\text{Na} \gg \text{Mg} > \text{Ca}$
Saprolite	bicarbonaté magnésien	182	7,8	$\text{HCO}_3 \gg \text{Cl} > \text{SO}_4 \gg \text{NO}_3$	$\text{Mg} \gg \text{Na} > \text{Ca}$
Péridotite	bicarbonaté magnésien	144,1	7,4	$\text{HCO}_3 \gg \text{Cl} > \text{SO}_4 \gg \text{NO}_3$	$\text{Mg} \gg \text{Na} \gg \text{Ca}$

5.3.3.5 Différenciation de trois faciès géochimique différents

Pour comprendre ces différents faciès géochimiques, il faut garder en mémoire que la composition d'une eau souterraine dépend des principaux paramètres suivants : la pluie, la nature lithologique de l'encaissant, le temps de séjour et le comportement des différents éléments constitutifs de la roche.

Au niveau de l'horizon des latérites, les eaux sont acides, très peu minéralisées, essentiellement chlorurées sodiques et potassiques (si on la compare aux eaux des autres horizons), et légèrement magnésiennes et calciques. Ce faciès géochimique s'explique vraisemblablement par :

- Une faible interaction entre l'eau et la roche due à un temps de contact limité et à la nature de la latérite essentiellement constituée d'hydroxydes de fer (sous forme de goethite) peu solubles.
- Une influence marine proche apportant sodiums et chlorures, éléments quasiment absent de la péridotite. En effet, les eaux météoritiques, à proximité des côtes, sont riches notamment en chlorure, avec des teneurs pouvant dépasser 10 mg/l.
- Le caractère acide des eaux de pluie qui induit une légère acidité des eaux de l'horizon latéritique.

Lors de la traversée de l'horizon des saprolites, au contact de la roche, l'eau acquiert progressivement son faciès carbonaté magnésien. Le processus de minéralisation se caractérise principalement par la mise en solution du magnésium de la roche mère et l'apparition de carbonates de magnésium, ce qui tend à augmenter le pH.

Cette différence géochimique de l'eau est vraisemblablement liée au processus d'altération de l'harzburgite. En effet, les deux principaux minéraux offerts à l'altération météorique par les roches ultrabasiqes sont le périclase (olivine en général très magnésienne, à 90 % de forstérite) et la serpentine (lizardite dominante). Le site étudié est composé à environ 90 % d'olivine (très magnésienne et partiellement serpentinisée) et à 10 % de pyroxène orthorhombique et de spinelle chromifère. Les olivines sont composées de SiO₂ (40 %), de MgO (jusqu'à 50 %), de FeO (jusqu'à 10 %) (TRESQUES, 1979).

Par interaction avec l'eau et le gaz carbonique, l'altération de cette roche entraîne la formation de Si(OH)₄, acide orthosilicique, forme de dissolution de la silice, de (HCO₃)₂Mg, carbonates de magnésium soluble sous forme ionique, et de Fe(OH)₃, gel ferrique, non soluble, et qui se transforme par la suite en goéthite formant ainsi l'horizon des latérites. Cette altération est nommée ferruginisation.

Siège de l'altération des périclases, l'horizon des saprolites apparaît comme le lieu principal de minéralisation de l'eau.

Concernant l'altération des périclases, on peut distinguer principalement deux groupes d'éléments :

- **Les éléments lixiviés** qui se retrouvent dans la composition géochimique des eaux souterraines. Ce groupe comprend principalement la silice et le magnésium ;
- **Les résiduels**, qui, très peu solubles voire insolubles, sont quasiment absents de la composition chimique de l'eau. Il s'agit principalement du fer, du manganèse, du nickel. Avec une faible mobilité, ils représentent l'essentiel des profils d'altération des saprolites et latérites.

6 CONCLUSION

Ce suivi quantitatif et qualitatif a permis de connaître et comprendre le comportement physico-chimique initial des eaux souterraines de la fosse minière, avec une activité minière encore jeune et localisée.

Au niveau du comportement physique des eaux, on observe globalement que les niveaux des nappes réagissent directement aux précipitations. Lorsque ces dernières sont moins fréquentes et moins intenses, ils diminuent. A l'inverse, ils augmentent lors des épisodes pluvieux. Les amplitudes de variation diffèrent d'un piézomètre à l'autre. Des cartes des isopièzes des nappes à différentes périodes de l'année ont pu être créées.

Le suivi qualitatif des eaux a quant à lui permis de mettre en évidence deux profils géochimiques bien distincts selon l'aquifère capté : celui des latérites et celui des saprolites/péridotites.

- Au niveau de l'horizon des latérites, les eaux sont acides, très peu minéralisées, essentiellement sodiques et chlorurées, légèrement magnésiennes et bicarbonatées.
- Au niveau de l'horizon des saprolites/péridotites, les eaux sont légèrement alcalines, peu minéralisées, riches en silice et de type carbonaté-magnésien, avec une légère tendance chlorurée au niveau des saprolites.

A l'origine des profils géologiques des massifs miniers ultrabasiques, le processus d'altération de la péridotite explique ces différenciations géochimiques. L'altération se caractérise par la dissolution des éléments lixiviés, principalement silice et magnésium, qui constituent la phase migratrice, et par la concentration des éléments insolubles, principalement fer, manganèse et nickel, dans la phase résiduelle constitutive des saprolites et latérites.

On peut noter que les seuils limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine sont dépassés pour cinq éléments et dans plusieurs ouvrages. Cependant, ces anomalies ne paraissent globalement pas en lien direct avec l'exploitation minière actuelle car elles sont réparties sur l'ensemble de la fosse minière (seulement un piézomètre se trouvant en aval de la zone d'extraction minière présente des teneurs trop élevées en ammonium).

Cette étude a permis d'établir un état initial du comportement physico-chimique des eaux souterraines de la fosse minière et permettra de suivre à terme l'impact potentiel de l'exploitation sur le fonctionnement hydrogéologique existant.

7 RECOMMANDATIONS

Il faudrait mesurer l'oxygène dissous et l'électronégativité des échantillons prélevés. En effet ces paramètres sont déterminants dans les phénomènes de dissolution des éléments en contact avec l'eau.

Il est recommandé de continuer à suivre les particularités physico-chimiques de ces eaux et les comparer à l'état initial. Attention cependant aux résultats des piézomètres se trouvant déjà dans ou en aval de la zone d'extraction minière, dont l'état n'est déjà plus « initial ». Il faudrait comparer ces valeurs à des études faites avant ouverture de la mine. Pour comprendre l'origine des fortes teneurs en éléments dissous, on pourrait réaliser des études précises autour et en amont des piézomètres concernés.

Cette étude est le début d'un suivi à long terme et ne permet pas d'analyser les impacts de la fosse minière actuelle. Néanmoins, au jour d'aujourd'hui, les pollutions des eaux souterraines dues à cette activité paraissent mineures, la mine n'étant qu'au début de son activité et le stockage et le traitement des résidus étant très contrôlés.

8 BIBLIOGRAPHIE

AITCHISON, J.C, CLARKE, G.L, MEFFRE, S. et CLUZEL, D. (1995) : Eocene arc-continent collision in New Caledonia and implications for regional Southwest Pacific tectonic evolution. *Geology*. 23, 161–164.

BEAUCHAMP, J. (2006) Qualité et pollution des eaux souterraines.
Université de Picardie Jules Verne

BEAUVAIS, A. et COLINB, F. (1992) Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment.
Chemical Geology, 106 (1993) 77-101

BECQUERA, T., QUANTINB, C., SICOTC, M. et BOUDOT, J.P. (2002) : Chromium availability in ultramafic soils from New Caledonia

BISCHOFF, J.L. et FYFE, W.S. (1968) : Catalysis, inhibition, and the calcite-aragonite Problem. I. The aragonite-calcite transformation. *Am. J. Sci.* 266, 65 (1968).

BRGM (2007) : Contrôle de la surveillance de la qualité des masses d'eau souterraines de la Martinique relatif aux prescriptions de la Directive cadre européenne sur l'eau : campagne de saison sèche 2007 (document public).

BRUNI, J., CANEPA, M., CHIODINI, G., CIONI, R., CIPOLLI, F., LONGINELLI, A., MARINI, L., OTTONELLO, G. et VETUSCHI ZUCCOLINI M. (2002)
Irreversible water-rock mass transfer accompanying the generation of the neutral, Mg-HCO₃ and high-pH, Ca-OH spring waters of the Genova province, Italy
Appl. Geochem. 17 (2002) 455–474.

DOLIGÉ, E. (Mars 2011) « nickel en Nouvelle-Calédonie : tirer les leçons d'une défiscalisation réussie ».

ERIKSSON, E (1952) : Composition of atmospheric precipitation. II. Sulfur, chloride, iodine compounds. *Tellus* 4, 281.

FETH, J.H., ROBERSON, C.E., et POLZER, W.L. (1964): Sources of mineral constituents in water from granitic rocks Sierra Nevada, California and Nevada. *U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper* 1535-I.

FENDORF, SE. (1995) : Surface reactions of chromium in soils and waters.
Geoderma 1995;67:55 –71.

FLANAGAN, F.J. 1973 : 1972 values for international geochemical references samples.
Geochim. Cosmochim. Acta 37, 1189.

FOLIO, J-L. (2011) : Contexte et données disponibles (Document Vale).

GARRELS, R.M. (1967) : Genesis of some groundwaters from igneous rocks. In : *Researches in Geochemistry II*, p.405. New York : John Wiley & Sons 1967.

GOLDER ASSOCIATES (2004)

- Procedure for Groundwater Sampling, 20 pages
- Rapport d'échantillonnage basses eaux 2011

GOLDICH, S.S. (1938) : A study in rock weathering. J. Geol. 46, 17.

GOLDSCHMIDT, G.M. (1954) : Geochemistry. Oxford : Clarendon Press 1954.

GUILLOIN, J.-H. et ROUTHIER, P.(1971) : Les stades d'évolution et de mise en place des massifs ultramafiques de Nouvelle-Calédonie

Bulletin du B.R.G M. (deuxième série) Section IV, n°2, 1971, p. 5-38

GUILLOIN, J.-H. (1973) : Les massifs péridotitiques de nouvelle-calédonie. Type d'appareil ultrabasique stratiforme de chaîne récente.

FAURE, G. (1991) : Principles and applications of Inorganic Geochemistry. 626p, chap 11.

IRD (INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT)(2012) : Les massifs miniers et la question des facteurs de concentration des métaux (Ni, Co).

UR 206 - L'Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés (IMPMP)

JOIN, J.-L., ROBINEAU, B., AMBROSI, J.-P., COSTIS, C., COLIN, F.(2005) : Système hydrogéologique d'un massif minier ultrabasique de Nouvelle-Calédonie.

JUNGE, C.E. (1963) : Air Chemistry and Radioactivity. New York-London : Academic Press 1963

KLOHN CRIPPEN BERGER Ltd. (2009) : Goro – Wajana / Cascade Piezometer program, completion report. Vale Inco New Caledonia

LANEY, R.L. (1965) : A comparison of the chemical composition of rainwater and groundwater in western North-Carolina. Geol. Surv. Res. 1965, Profess. Papers 525, 187 (1965).

LIGHT, T., LICHT, S., BEVILACQUA, A. et MORASHC, K. (2004) : The Fundamental Conductivity and Resistivity of Water Electrochemical and Solid-State Letters, 8 (1) E16-E19 (2005)

MARECHAL, J.-C., WYNS, R., LACHASSAGNE, P., SUBRAHMANYAM, K. et TOUCHARD, F. (2003)

Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération

C. R. Geoscience 335 (2003) 451–460.

MAURIZOT, P., LAFOY, Y. et POUPEE, M. (2002) : Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie – Zone de Goro, Rap. BRGM /RP - 51 623 FR

MAURIZOT, P. et ROBINEAU, B. (2011) : Géologie de la ressource.

Nouvelle-Calédonie, terre de nickel, Geosciences, 2011, pp. 50 - 57

MAZET, P. (2002) Les eaux souterraines riches en fluor dans le monde. Rapport de stage, IRD. 45 pages.

MEHROTRA, P. et MEHROTRA, S. (2000) : ‘Pollution of Groundwater by Manganese in Hindon–Yamuna Doab (Noida area) District, Ghaziabad’, in *Proceedings of the International Seminar on Applied Hydrogeochemistry*, Annamalai University, pp. 106–112.

MORSE, J.W. et MACKENZIE, F.T. (1990)
Geochemistry of Sedimentary Carbonates, 707 pages.

NEALL, V.E et TREWICK, S.A (2008) : The age and origin of the Pacific islands: a geological overview. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 363, 3293–3308.

NOCKOLDS, S.R. (1954) : Average chemical compositions of some igneous rocks. *Bull. Geol. Soc. Am.* 65, 1007.

OZE, C., FENDORF, S., BIRD, D.K. et COLEMAN, R.G. (2004)a. Chromium geochemistry in serpentine ultramafic rocks and serpentine soils from the Franciscan complex of California. *American Journal of Science* 304, 67-101

OZE, C., FENDORF, S., BIRD, D.K. et COLEMAN, R.G. (2004)b. Chromium geochemistry of serpentine soils, *International Geology Review* 46, 97-126.

PELLETIER, B. (2003) : Les minerais de nickel de Nouvelle-Calédonie
Publication dans le bulletin de l’Union Française des Géologues
www.sln.nc

PELLETIER, B. (2006) : Geology of the New Caledonia region and its implications for the study of the New Caledonian biodiversity. *Documents Scientifiques et Techniques IRD, II 7*, pp. 17–30. Nouméa, France: Institut de Recherche pour le Développement.

PODWOJEWSKI, P. et ARNOLD, M. (1994) : The origin of gypsum in Vertisols in New Caledonia determined by isotopic composition of sulphur. *Geoderma*, 63: in press.

PODWOJEWSKI, P. (1994) : The occurrence and interpretation of carbonate and sulfate minerals in a sequence of Vertisols in New Caledonia

REPUBLIQUE FRANCAISE: Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites de référence de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine : Limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine (<http://www.legifrance.gouv.fr>).

RICHER DE FORGES, B. et PASCAL, M. (2008) :
La Nouvelle-Calédonie, un « point chaud » de la biodiversité mondiale gravement menacé par l’exploitation minière. p. 95-112

ROMIEUX, N. (2011) Synthèse et régionalisation des données pluviométriques de la Nouvelle-Calédonie. DAVAR

SCHELLART, W.P, LISTER, G.S. et Toy, V.G (2006) : A Late Cretaceous and Cenozoic reconstruction of the Southwest Pacific region: tectonics controlled by subduction and slab rollback processes. *Earth-Sci. Rev.* 76, 191–233.

SCHWERTMANN, U, GASSER, U et STICHER, H. (1989) : Chromium-for-iron substitution in synthetic goethites. *Geochim Cosmochim Acta* 1989;53:1293 –1297.

SEVIN, B., RICORDEL-PROGNON,C., QUESNEL, F., CLUZEL, D., LESIMPLE, S. et MAURIZOT,P. (2011) : First palaeomagnetic dating of ferricrete in New Caledonia: new insight on the morphogenesis and palaeoweathering of ‘Grande Terre’.

SUBBA RAO,N.(2010) : High-fluoride groundwater, 9 pages

TRESCASES, J.-J. (1973) : Weathering and geochemical behaviour of the elements of ultramafic rocks in New-Caledonia, Bur. Of Miner. Resources, Geology and Geophysics. Dept. Of Minerals and Energy, Canberra, bull 141, pp. 149-161.

TRESCASES, J.-J. (1975) : L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale : formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie, *Mém. Orstom*, 78, 1975, 259 p.

TRESCASES, J.-J.(1979) : Remplacement progressif des silicates par les hydroxydes de fer et de nickel dans les profils d'altération tropicale des roches ultrabasiques – accumulation résiduelle et épigénie. *Sci. Géol, Bull.32, 4*, p181-188, Strasbourg 1979

VAN HOUTEN, F.F. (1968) : Iron oxides in red beds. *Bull. Geol. Soc. Am.* 79, 399.

WEDEPOHL, K.H. (1978) : Handbook of Geochemistry. Tome II-1, II-2 et II-3. Springer-Verlag Berlin – Heidelberg – New York.

WHITE, D.E., JOHN, D. HEM et WARING, G.A., (1963) : Chemical composition of subsurfacewaters. U.S. Geol. Surv. Profess. Papers 440-F.

Sites internet :

WWW.VALE.NC : sites de la société minière Vale et Société Le nickel

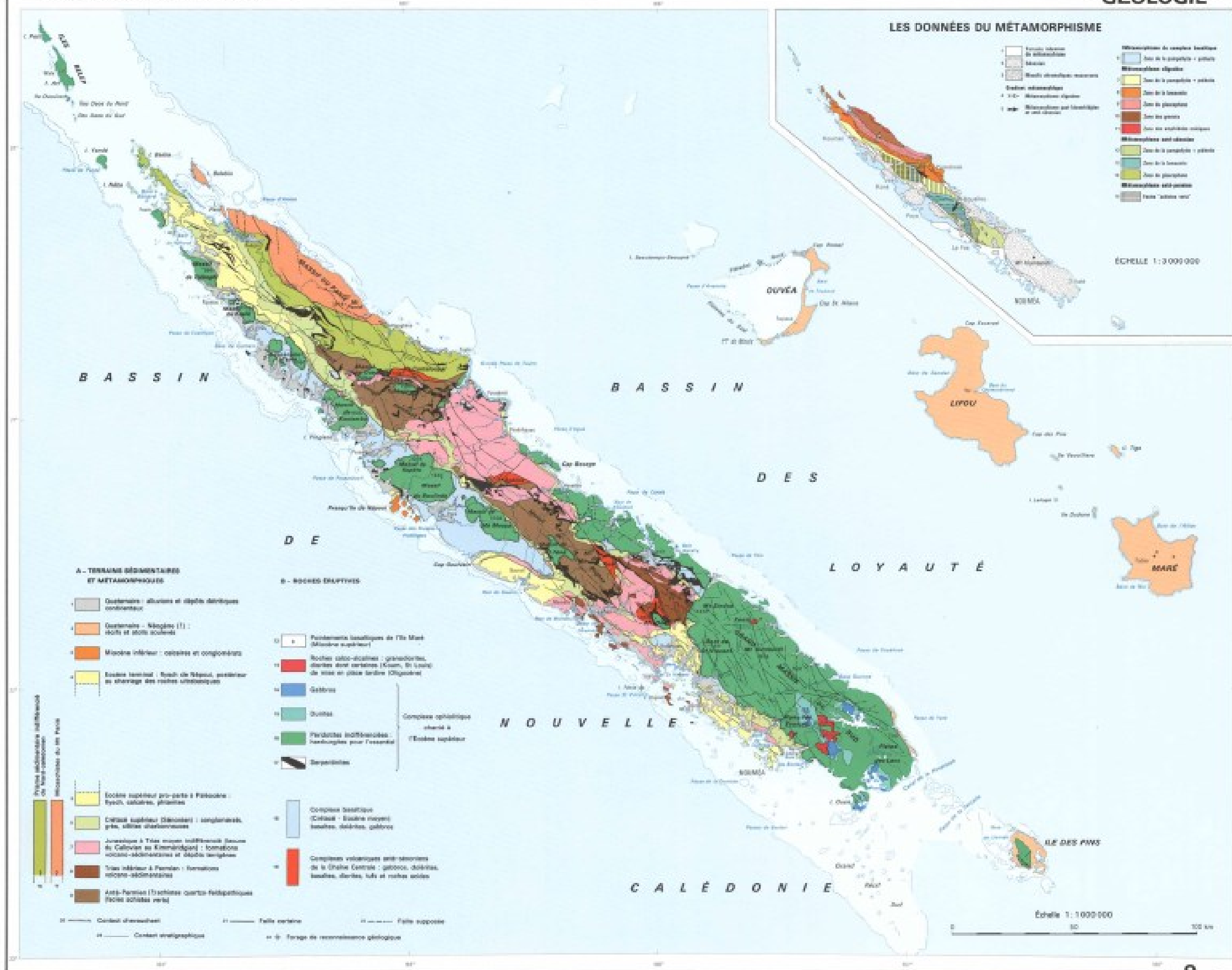
WWW.SLN.NC: site de la Société Le nickel

CROIXDUSUD.INFO: Généralités sur la Nouvelle-Calédonie

WWW.CARTOGRAPHIE.IRD.FR: Cartothèque de l'IRD

ANNEXE A1

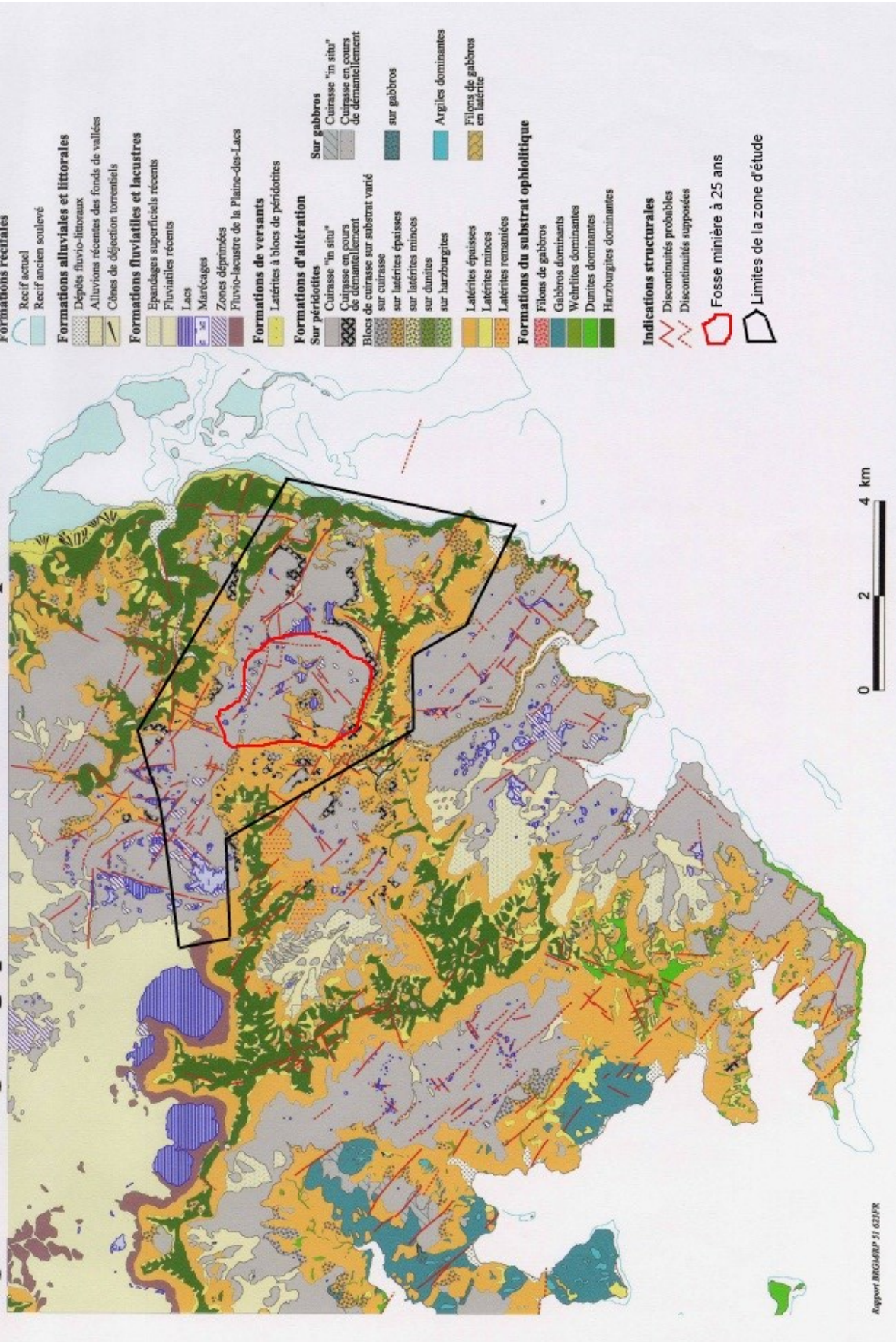
Carte Géologique de la Nouvelle-Calédonie au 1 / 1000000^{ème}(IRD)



ANNEXE A2 (MAURIZOT, LAFOY et POUPEE,2002)
 Carte géologique de la zone d'étude au 1 / 25000^{ème}

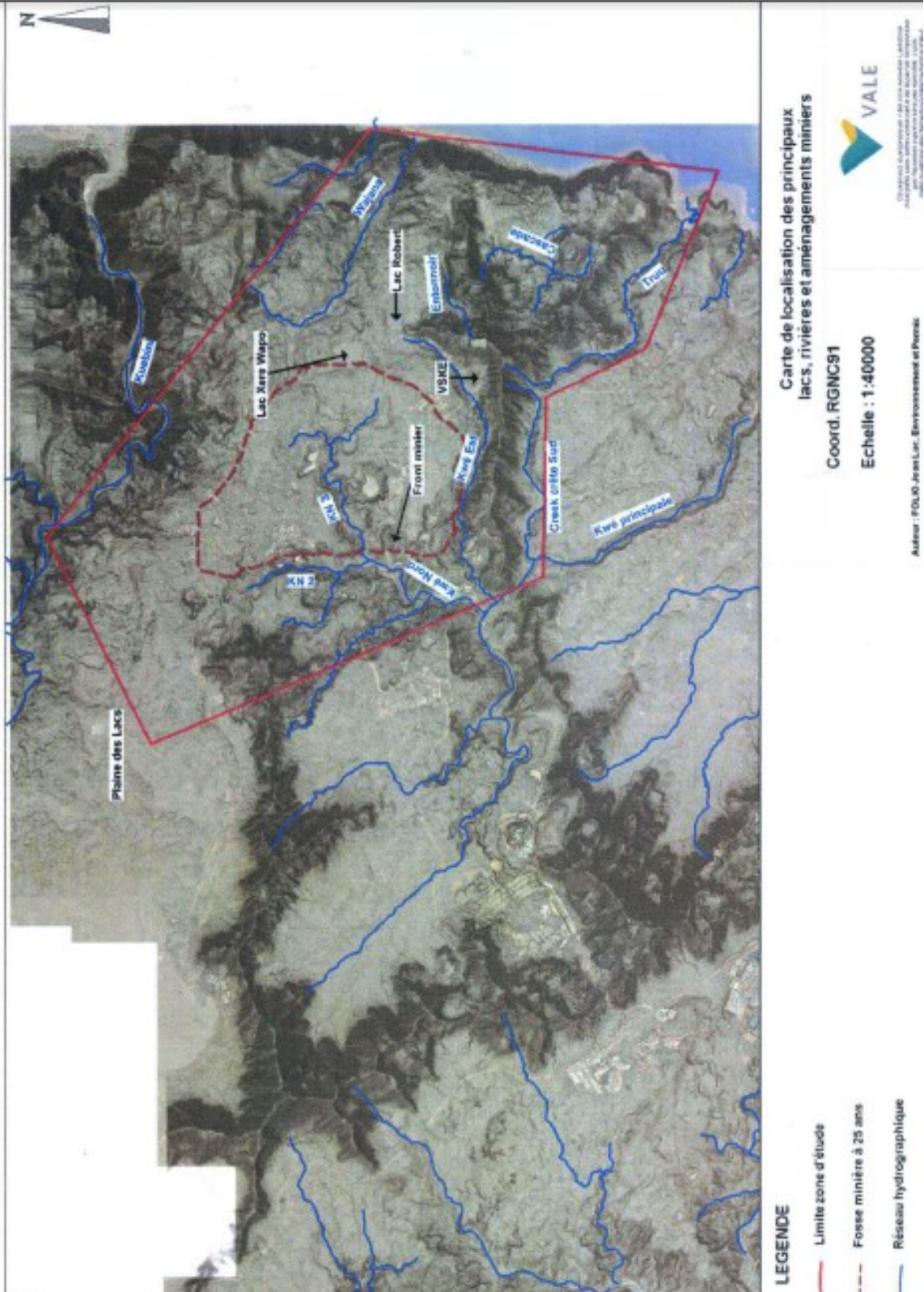
Fig. 4 - Carte géologique et des formations superficielles

Cartographie des formations superficielles et des affils mouvements de terrain, zone de Goro - Nouvelle-Calédonie



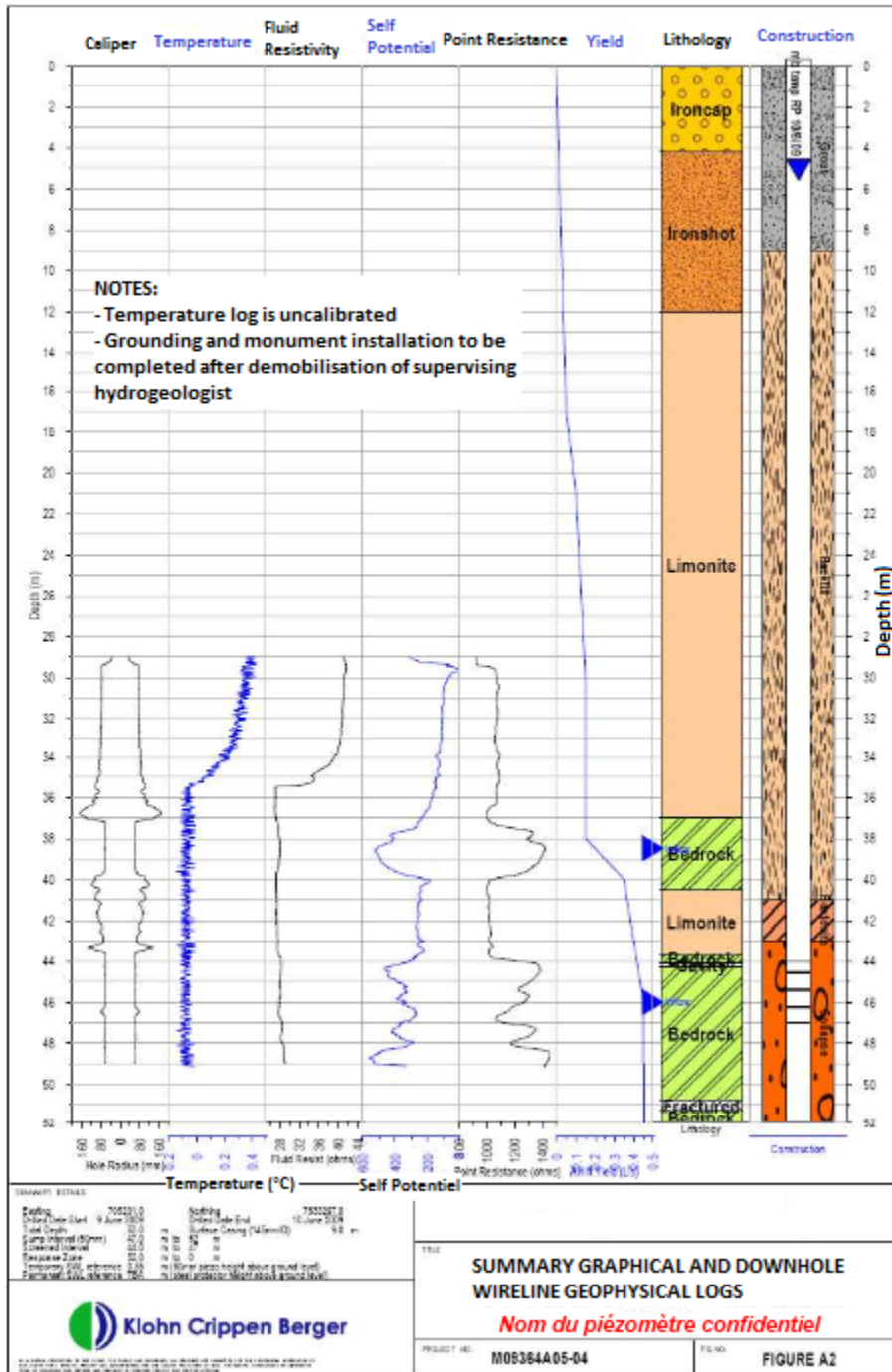
ANNEXE B
Plan du secteur d'étude

Figure 1 : Carte de localisation des principaux lacs, rivières et aménagements miniers sur le secteur d'étude

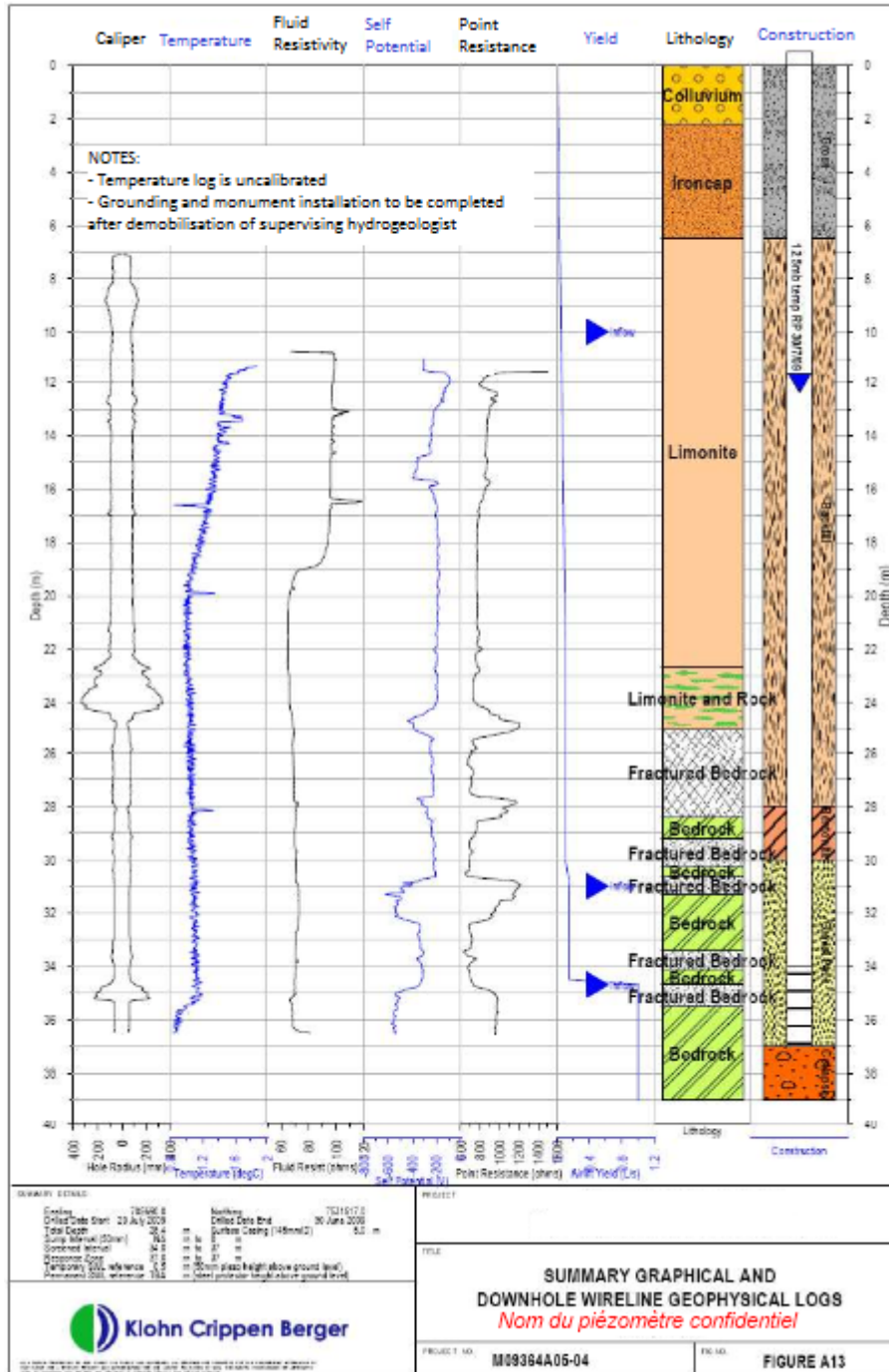


ANNEXES C et D
Coupes techniques de deux piézomètres situés dans la zone d'étude

ANNEXE C : Carottage électrique et géologique



ANNEXE D : Carottage électrique et géologique



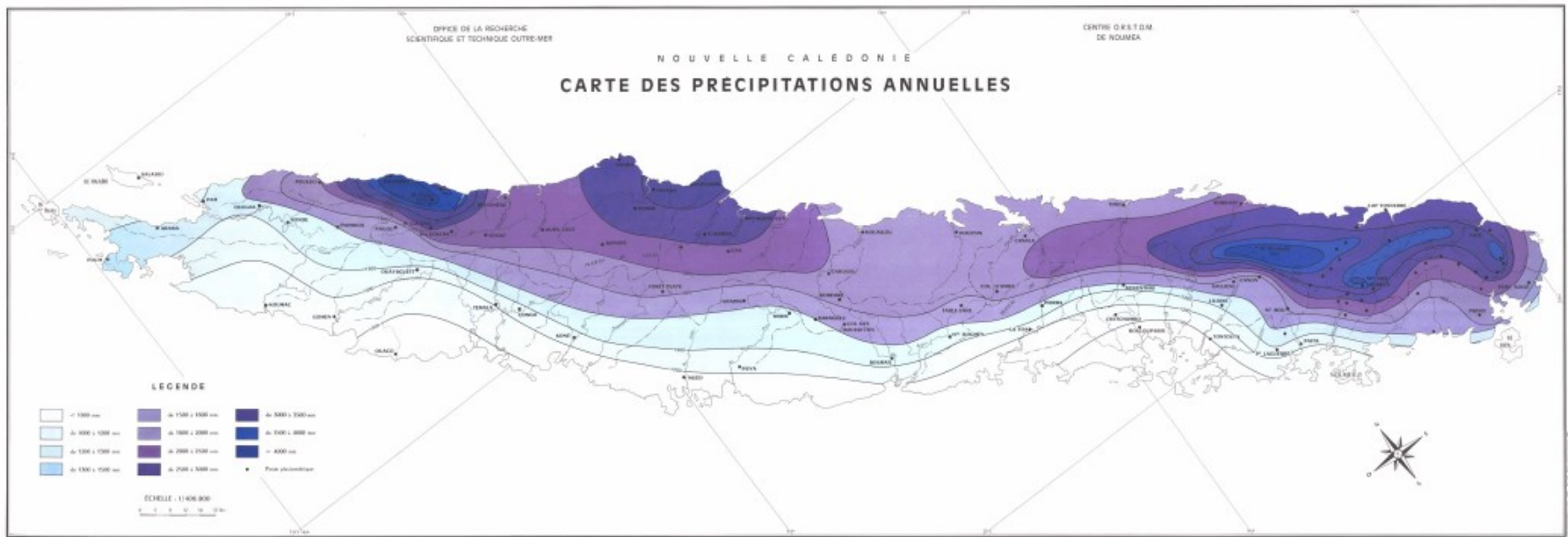
ANNEXE E
Carte de la pluviométrie générale de Nouvelle-Calédonie

DIPES DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE ORESTOM
DE NOUMEA

NOUVELLE CALEDONIE

CARTE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES



ANNEXE F

Tableau des caractéristiques de piézomètres suivis

Piézomètre	PEL/PEC	secteur	Aquifère capté	Z repère mesure (m)	Diamètre tubage (mm)	Hauteur Acier / sol (m)	Profondeur mesurée / repère (m)	profondeur haut de la crépine	profondeur bas de la crépine
09GH0001	simple	GH	saprolite	230.510	50	0.62	37.12	30	33
09GH0002	simple	GH	saprolite	234.716	50	0.39	51.37	44	47
09GH0003	simple	GH	péridotite/cavités	209.377	50	0.42	49.19	40	46
09GH0004	simple	GH	péridotite/fractures	229.047	50	0.67	32.83	29	32
09GH0005	simple	GH	péridotite/cavités	199.561	50	0.19	15.24	12.3	15.3
09GH0006	simple	GH	saprolite	174.234	50	0.87	19.77	16.1	19.1
09GH0007	simple	GH	inconnu	162.103	50	0.11	28.44		
09GH0008	simple	GH	saprolite	158.834	50	0.64	31.85	25	28
09GH0009	simple	GH	péridotite/fractures	163.045	50	0.69	33.35	22	25
09GH0010	simple	GH	péridotite/fractures	151.041	50	0.65	28.22	19	22
09GH0011	simple	GH	péridotite	177.847	50	0.56	63.28	51.1	57.1
09GH0012	simple	GH	péridotite/fractures	154.873	50	0.59	16.99	13.5	16.5
09GH0013	simple	GH	péridotite/fractures	156.430	50	0.67	37.25	34	37
10EX0225	PEL	Ouest	saprolite	202.400	32	0.64	77.44	53.4	77
10EX0227	PEC	Ouest	latérite	202.380	32	0.64	12.55	6	11.9
10EX0229	PEL	Ouest	saprolite	224.950	32	0.72	58.95	43.25	58
10EX0230	PEC	Ouest	latérite	225.340	32	0.67	20.54	7.95	19.75
10EX0231	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	182.960	32	0.69	44.90	33	44
10EX0232	PEL	Est	saprolite	235.060	50	0.73	28.92	24.15	28.15
10EX0233	PEC	Lac Goro Sud	latérite	183.060	32	0.68	19.52	7.9	18.9

10EX0234	PEL	Nord	saprolite	269.890	32	0.66	39.71	24.3	39.05
10EX0235	PEC	Est	latérite	234.690	50	0.61	13.09	9.3	12.3
10EX0236	PEL	Rte aérodrome	saprolite	242.490	50	0.68	49.00	27.3	48.3
10EX0237	PEC	Nord	latérite	269.780	32	0.64	13.43	7	12.9
10EX0238	PEL	Nord	saprolite	277.090	32	0.67	42.70	30.3	42.1
10EX0239	PEC	Nord	latérite	277.210	32	0.66	23.51	8	22.75
10EX0240	PEL	Rte aérodrome	saprolite	249.880	32	0.66	43.77	26.4	44.1
10EX0241	PEC	Rte aérodrome	latérite	249.910	32	0.63	15.67	9	15
10EX0243	PEC	Rte aérodrome	saprolite	242.590	50	0.69	16.45	6.5	15.5
10EX0245	PEL	Est	saprolite	247.970	50	0.70	54.72	42	54
10EX0247	PEL	Rte aérodrome	saprolite	228.530	32	0.62	65.45	49.75	64.5
10EX0248	PEC	Est	latérite	247.890	50	0.58	18.82	9	18
10EX0249	PEC	Rte aérodrome	latérite	228.650	32	0.64	22.63	7.05	21.8
10EX0252	PEL	Est	saprolite	242.610	50	0.59	68.15	40.45	67.45
10EX0255	PEL	Est	saprolite	243.460	32	0.58	57.60	39	57
10EX0256	PEC	Est	latérite	243.750	32	0.70	25.76	8	25
10EX0259	PEC	Est	latérite	242.710	50	0.60	15.86	9	15
10EX0279	PEL	Ouest	saprolite	192.270	32	0.67	59.94	29.45	58.95
10EX0281	PEL	Est	saprolite	248.990	50	0.55	67.81	38.1	67.1
10EX0283	PEC	Ouest	latérite	192.250	32	0.69	15.81	6	15
10EX0284	PEL	Ouest	saprolite	155.810	32	0.69	36.39	23.4	35.4
10EX0286	PEC	Ouest	latérite	155.540	32	0.71	8.50	4.5	7.5
10EX0288	PEL	Nord	saprolite		50	0.58	58.23	44.3	51.6

10EX0289	PEL	Est	saprolite	249.710	50	0.60	58.83	49.2	58.2
10EX0290	PEC	Ouest	latérite	261.040	32	0.70	25.85	7	25
10EX0291	PEL	Rte aérodrome	saprolite	258.130	32	0.65	47.86	41.1	47
10EX0292	PEL	Est	saprolite	246.220	50	1.02	56.84		
10EX0293	PEC	Est	latérite	249.020	50	0.59	33.80	9.15	30.15
10EX0295	PEC	Rte aérodrome	latérite	258.320	32	0.70	31.74	7.4	31
10EX0296	PEL	Nord	saprolite	291.950	32	0.69	57.09	38.6	56.3
10EX0298	PEC	Nord	latérite	291.950	32	0.62	25.63	10.25	25
10EX0299	PEL	Est	saprolite	240.860	50	0.66	52.34	36	59.25
10EX0300	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	231.430	50	0.61	54.92	44	53.05
10EX0301	PEC	Est	latérite	240.790	50	0.56	27.71	10	24.8
10EX0302	PEL	Nord	saprolite	274.960	32	0.70	78.24	54.3	77.9
10EX0303	PEC	Est	latérite	249.890	50	0.61	25.82	10.1	22.1
10EX0304	PEC	Nord	latérite	274.950	32	0.69	20.68	8	20
10EX0305	PEL	Nord	saprolite	267.920	32	0.68		32	50
10EX0306	PEC	Nord	latérite	268.090	32	0.68	11.71	7	10
10EX0307	PEL	Nord	saprolite	260.880	32	0.68	43.21	24.8	42.5
10EX0308	PEC	Nord	latérite	297.340	50	0.62	25.74	8	26
10EX0309	PEC	Lac Goro Sud	latérite	231.360	50	0.64	22.14	8.35	20.35
10EX0311	PEC	Nord	latérite	260.820	32	0.63	14.92	8.4	14.3
10EX0312	PEL	Rte aérodrome	saprolite	239.810	50	0.71	40.74	35.8	38.8
10EX0313	PEL	Rte aérodrome	saprolite	219.510	32	0.68	45.75	41.05	44
10EX0314	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	224.390	32	0.59	80.49	34.75	77

10EX0315	PEL	Rte aérodrome	saprolite	242.610	50	0.60	58.62	39.7	54.7
10EX0316	PEC	Rte aérodrome	latérite	219.490	32	0.65	30.24	8	29
10EX0317	PEL	Rte aérodrome	saprolite	245.920	32	0.64	55.29	39.15	54.15
10EX0318	PEL	Rte aérodrome	saprolite	226.600	50	0.73	58.33	39.8	56.8
10EX0319	PEC	Rte aérodrome	latérite	245.860	32	0.57	31.65	6	30
10EX0321	PEL	Rte aérodrome	saprolite	261.870	32	0.70	44.67	28.2	42.95
10EX0322	PEL	Rte aérodrome	saprolite	190.910	50	0.63	40.76	36.2	39.15
10EX0323	PEC	Lac Goro Sud	latérite	224.470	32	0.67	19.89	9.25	18
10EX0324	PEC	Rte aérodrome	latérite		32	0.70	18.74	11.1	17
10EX0326	PEL	Est	saprolite	232.960	50	1.01	66.17	42.5	66.5
10EX0328	PEL	Nord	saprolite	252.550	32	0.70	62.81	40.35	62
10EX0329	PEC	Nord	latérite	252.620	32	0.68	28.87	6.3	26.95
10EX0330	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	226.620	50	0.85	62.48	48.7	61.7
10EX0331	PEL	Rte aérodrome	saprolite	229.300	32	0.65	57.78	32.55	56.15
10EX0332	PEL	Est	saprolite	240.220	50	1.11	57.28	39.6	54.35
10EX0333	PEC	Rte aérodrome	latérite	229.410	32	0.69	16.32	6.15	15
10EX0334	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	192.730	32	0.74	82.56	49.7	80.7
10EX0335	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	199.390	32	0.73	20.50	16.25	19.2
10EX0337	PEC	Lac Goro Sud	latérite	199.310	32	0.59	9.72	4.9	7.9
10EX0339	PEC	Lac Goro Sud	latérite	192.730	32	0.74	12.63	5.1	11.1
10EX0340	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	215.320	32	0.64	91.72	71.65	89.35
10EX0341	PEL	Est	saprolite	243.150	50	1.00	38.04	33	36
10EX0342	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	195.260	32	0.68	65.62	38.9	63.6

10EX0343	PEC	Lac Goro Sud	latérite	195.160	32	0.62	13.28	6.6	11.5
10EX0344	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	166.290	32	0.69	48.88	31.9	46.9
10EX0345	PEC	Lac Goro Sud	latérite	215.710	32	0.67	20.94	7.2	19.2
10EX0346	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	196.110	32	0.78	60.64	38.25	58.9
10EX0347	PEC	Lac Goro Sud	latérite	166.390	32	0.69	5.03	3	4
10EX0348	PEL	Lac Goro Sud	saprolite	177.390	32	0.60	39.68	22.7	37.7
10EX0349	PEC	Lac Goro Sud	latérite	196.020	32	0.68	6.54	4.7	6.2
10EX0350	PEL	Ouest	saprolite	260,72?	32	0.71	86.90	59.45	83
10EX0351	PEC	Lac Goro Sud	latérite	177.530	32	0.62	5.28	3.7	4.5
10EX0360	PEC	Rte aérodrome	latérite	226.370	50	0.70	23.77	10	22
10EX0368	PEL	Est	saprolite	221.070	50	1.03	56.94		
10EX0369	PEC	Est	latérite	221.260	50	1.01	18.54	7.5	16.5
10EX0370	PEC	Est	latérite	232.970	50	1.01	12.04	6.5	9.5
10EX0371	PEC	Est	latérite	240.150	50	1.04	19.95	9.15	18
10EX0398	PEC	Est	latérite	246.390	50	0.99	18.09		
11EX0361	-	Rte aérodrome	inconnu	212.640	50	0.71	26.75	7.3	25
11EX0362	PEC	Rte aérodrome	latérite	190.750	50	0.61	22.08	13.95	22.8
11EX0363	PEC	Rte aérodrome	latérite	242.670	50	0.62	17.63	9.9	15.9
11EX0364	PEC	Rte aérodrome	latérite	240.000	50	0.91	15.84	11.35	14.35
11EX0365	PEC	Lac Goro Sud	latérite	226.560	50	0.84	22.86	8.8	20.6
11EX0366	PEL	Est	saprolite	245.160	50	1.05	47.14	35.6	44.6
11EX0367	PEC	Est	latérite	245.250	50	1.07	18.76	10.6	16.6
11EX0372	PEC	Est	latérite	243.120	50	1.04	24.10	19	22

11EX0402	PEC	Est bis	latérite	239.070	50	1.03	19.10	27	42
11EX0403	PEL	PdL	saprolite	288.220	32	0.86	61.89	43	61
11EX0404	PEL	PdL	saprolite	281.020	32	0.85	40.75	33	39
11EX0405	PEC	PdL	latérite	281.040	32	0.87	10.85	6	9
11EX0406	PEL	Est bis	saprolite	236.790	50	0.94	67.20		
11EX0407	PEC	PdL	latérite	262.970	32	0.68	10.78	23.5	32.5
11EX0408	PEC	PdL	latérite	288.310	32	0.82	30.53	7.7	28.7
11EX0409	PEL	PdL	saprolite	280.480	32	0.83	64.84	47.6	62.6
11EX0410	PEL	PdL	saprolite	262.970	32	0.66	34.32	6	9
11EX0412	PEL	PdL	saprolite	266.070	32	0.74	35.92	31.25	34.25
11EX0413	PEC	PdL	latérite	280.560	32	0.86	27.31	10.4	25.4
11EX0414	PEC	PdL	latérite	277.590	32	0.83	10.51	20	26
11EX0415	PEC	PdL	latérite	266.110	32	0.75	22.92	12	21
11EX0416	PEL	PdL	saprolite	272.010	32	0.80	49.77	33.95	48.95
11EX0417	PEL	PdL	saprolite	273.680	32	0.82	36.68	25.7	34.7
11EX0418	PEL	PdL	saprolite	277.500	32	0.81	27.98	6	9
11EX0420	PEC	PdL	latérite	272.110	32	0.80	20.87	13	19
11EX0421	PEC	PdL	latérite	273.900	32	0.81	14.97	7	13
11EX0422	PEL	Est bis	saprolite	226.720	50	1.07	23.95	15.9	21.9
11EX0423	PEL	PdL	saprolite	265.380	32	0.87	62.47	45.4	60.4
11EX0424	PEL	PdL	saprolite	269.160	32	0.80	64.74	48	63
11EX0425	PEL	Nord bis	saprolite	305.670	32	0.83	67.89	54	66
11EX0426	PEC	PdL	latérite	265.390	32	0.82	28.95	20	26

11EX0427	PEC	PdL	latérite	269.240	32	0.84	26.81	16	25
11EX0428	PEL	PdL	saprolite	276.910	32	0.85	69.20	41.45	65.45
11EX0429	PEC	Nord bis	saprolite	264.030	50	0.77	56.70	43	55
11EX0430	PEC	Ouest bis	latérite	292.170	32	0.86	29.04	38.55	44.55
11EX0431	PEL	Est bis	saprolite	229.370	50	0.82	62.52	11	23
11EX0432	PEC	PdL	latérite	276.790	32	0.86	20.10	9.05	18.05
11EX0433	PEL	Nord bis	saprolite	302.260	32	0.92	55.78	37	54
11EX0434	PEL	Ouest bis	saprolite	292.010	32	0.79	46.53	9	27
11EX0435	PEC	Nord bis	latérite	302.100	32	0.80	17.85	7	16
11EX0436	PEL	PdL	saprolite	297.520	32	0.85	79.90	50	78
11EX0437	PEC	Nord bis	latérite	305.860	32	0.87	24.94	8.05	23.05
11EX0438	PEC	Est bis	latérite	226.470	50	1.08	11.40	6	9
11EX0439	PEL	Nord bis	saprolite	296.930	50	0.82	64.06	44.3	62.3
11EX0440	PEL	Ouest bis	saprolite	254.610	32	0.80	51.93	29	50
11EX0441	PEC	PdL	latérite	297.390	32	0.81	23.32	9.3	21.3
11EX0442	PEL	Est bis	saprolite	239.110	50	1.09	44.22	8	17
11EX0443	PEL	Ouest bis	saprolite	247.420	32	0.84	52.74	32.8	50.8
11EX0444	PEC	Ouest bis	latérite	254.510	32	0.81	15.78	8	14
11EX0445	PEL	Ouest bis	saprolite	239.330	32	0.92	71.98	37.7	55.7
11EX0446	PEL	Ouest bis	saprolite	244.970	32	0.75	59.77	39.5	57.5
11EX0447	PEL	Ouest bis	saprolite	221.070	32	0.80	52.02	29.15	50.15
11EX0448	PEC	Est bis	latérite	236.730	50	0.86	27.30	10	25
11EX0449	PEL	Nord bis	saprolite	303.640	50	0.82	48.69	41.3	47.3

11EX0450	PEL	Ouest bis	saprolite	203.560	32	0.79	60.24	43.2	58.2
11EX0451	PEL	Ouest bis	saprolite	178.880	32	0.85	20.76	16	19
11EX0452	PEL	Ouest bis	saprolite	206.450	32	0.80	43.05	23.5	41.5
11EX0453	simple	Ouest bis	inconnu	144.180	32	0.75	21.46	10.5	19.5
11EX0454	PEL	Ouest bis	saprolite	134.720	32	0.84	16.96	12.1	15.1
11EX0455	simple	Ouest bis	inconnu	175.740	32	0.85	16.98	9	15
11EX0456	PEL	Ouest bis	saprolite	132.640	32	0.92	63.84	32.65	59.65
11EX0458	PEC	Ouest bis	latérite	134.740	32	0.81	9.77	5	8
11EX0459	PEC	Ouest bis	latérite	132.470	32	0.85	23.60	15.5	21.5
11EX0460	PEC	Ouest bis	latérite	205.560	32	0.81	20.86	13	19
11EX0461	PEC	Ouest bis	latérite	206.290		0.83	13.36	5	11
11EX0462	PEC	Est bis	latérite	228.600	50	1.02	25.27		
11EX0463	PEL	Nord bis	saprolite	237.080	50	0.88	35.69	31.3	34.3
11EX0464	PEC	Ouest bis	latérite	221.140	32	0.80	15.86	7.95	13.95
11EX0465	PEL	Nord bis	saprolite	263.890	50	0.90	14.68	7.3	13.3
11EX0466	PEC	Ouest bis	latérite	244.980	32	0.78	24.85	8	23
11EX0468	PEC	Ouest bis	latérite	239.220	32	0.82	28.94	9	21
11EX0469	PEC	Ouest bis	latérite	178.960	32	0.83	10.83	6	9
11EX0470	PEC	Ouest bis	latérite	247.410	32	0.82	27.15	7	25
11EX0471	PEC	Nord bis	latérite	237.100	50	0.87	20.85	13	19
11EX0472	PEC	Nord bis	latérite	297.030	50	0.90	17.55	13	16
11EX0473	PEC	Nord bis	latérite	303.720	50	0.81	11.23	6	9
TBH016	simple	TBH	Péridotite/Silty Gravel	215.175	40	0.82	22.74	11.62	20.62

TBH028	simple	TBH	Saprolite	245.555	40	0.98	68.27	64	69
TBH029	simple	TBH	Péridotite	256.373	40	1.04	25.85	15	25
TBH030	simple	TBH	saprolite	253.016	40	0.94	26.56	20.8	25.8
TBH031	simple	TBH	saprolite	287.624	32	0.31	56.56	51.9	55.9
TBH038	simple	TBH	Péridotite/Silty Gravel	305.205	40	0.44	45.02	40.2	48.2
TBH043	simple	TBH	inconnu	225.174	40	0.65	2.59		
TBH049	simple	TBH	saprolite	269.255	40	1.01	56.58	52.6	55.7
TBH054	simple	TBH	saprolite	316.799	40	0.71	62.20	54.2	62.2
TBH062	simple	TBH	Péridotite/ Clavey Silt	262.291	40	0.78	64.94	61.3	64.3
TBH063	simple	TBH	saprolite	153.746	40	0.91	48.10	40.1	50.1
TBH072	simple	TBH	saprolite	114.319	40	0.25	79.40	75.15	78.15
TBH098	simple	TBH	inconnu	155.855	40	0.46	68.05		
TBH108	simple	TBH	inconnu	138.403	40	0.45	36.60		
TBH109	simple	TBH	inconnu	120.709	40	0.47	28.90		

--

ANNEXE G

Caractéristiques des purges (campagne d'échantillonnage basses eaux)

Ms = Mise à sec Pt = Purge théorique

Vm = Volume minimal

Nom du piézo	PEC-PEL-simple	nappe captée	Profondeur piézomètre (m)	Volume purge (L)	Méthode de purge	Numéro échantillon	Duplicata O/N
10EX0323	PEC	Latérite	19.33	2.00	Ms	Ech1	N
09GH0001	simple	Saprolite	37.3	270.00	Pt	Ech2	N
09GH0003	simple	Péridotite	49.75	275.00	Vm	Ech3	N
10EX0314	PEL	Saprolite	80	340.00	Vm	Ech4	N
11EX0363	PEC	Latérite	17.6	176.00	Pt	Ech5	N
10EX0301	PEC	Latérite	27.73	132.00	Pt	Ech6	N
10EX0299	PEL	Saprolite	52.67	300.00	Pt	Ech7	N
10EX0343	PEC	Latérite	13.2	48.00	Pt	Ech8	N
10EX0342	PEL	Saprolite	64.5	253.00	Vm	Ech9	N
10EX0333	PEC	Latérite	16.34	11.00	Ms	Ech10	N
10EX0331	PEL	Saprolite	57.8	300.00	Vm	Ech11	N
10EX295	PEC	Latérite	31.8	144.00	Pt	Ech12	N
10EX0291	PEL	Saprolite	47.7	270.00	Pt	Ech13	N
10EX0233	PEC	Latérite	19.45	108.00	Pt	Ech14	N
10EX0231	PEL	Saprolite	44.75	200.00	Vm	Ech15	N
10EX0230	PEC	Latérite	20.47	35.00	Ms	Ech16	N
10EX0229	PEL	Saprolite	58.8	330.00	Vm	Ech17	N
11EX0362	PEC	Latérite	22	72.00	Ms	Ech18	N
10EX0322	PEL	Saprolite	40.93	40.00	Ms	Ech19	N
11EX0459	PEC	Latérite	23.5	12.00	Ms	Ech20	N
11EX0456	PEL	Saprolite	63.65	325.00	Vm	Ech21	N
11EX0408	PEC	Latérite	30.5	240.00	Pt	Ech22	N
11EX0403	PEL	Saprolite	61.9	455.00	Pt	Ech23	N

11EX0409	PEL	Saprolite	64.5	540.00	Pt	Ech24	N
11EX0413	PEC	Latérite	27.3	280.00	Pt	Ech25	N
11EX0427	PEC	Latérite	26.8	180.00	Pt	Ech26	N
11EX0424	PEL	Saprolite	64.75	425.00	Vm	Ech27	N
10EX0341	PEL	Saprolite	38.2	376.00	Pt	Ech28	O
11EX0372	PEC	Latérite	24.03	90.00	Ms	Ech29	N
10EX0238	PEL	Saprolite	42.75	30.00	Ms	Ech30	N
10EX0239	PEC	Latérite	23.5	8.00	Ms	Ech31	N
10EX0311	PEC	Latérite	15.2	90.00	Ms	Ech 33	N
10EX0307	PEL	Saprolite	43.25	360.00	Pt	Ech 34	N
10EX0248	PEC	Latérite	18.78	60.00	Ms	Ech 35	N
10EX0245	PEL	Saprolite	55.1	280.00	Vm	Ech 36	N
11EX0449	PEL	Saprolite	47.25	20.00	Ms	Ech36bis	N
TBH029	simple	Péridotite	26.05	15.00	Ms	Ech37	N
09GH0008	simple	Saprolite	32.2	120.00	Pt	Ech38	O
09GH0013	simple	Péridotite	37.05	150.00	Pt	Ech40	N
TBH108	simple	-	36.7	175.00	Vm	Ech41	O
10EX0315	PEL	Saprolite	58.82	425.00	Vm	Ech43	N
11EX0452	PEL	Saprolite	42.9	15.00	Ms	Ech44	N
11EX0462	PEC	Latérite	25.15	270.00	Pt	Ech45	N
11EX0431	PEL	Saprolite	55.3	325.00	Vm	Ech46	O
11EX0463	PEL	Saprolite	35.7	90.00	Pt	Ech48	N
11EX0471	PEC	Latérite	20.9	20.00	Ms	Ech49	N
11EX0440	PEL	Saprolite	51.8	10.00	Ms	Ech50	N
11EX0450	PEL	Saprolite	60.2	42.00	Vm	Ech51	N
10EX0304	PEC	Latérite	20.1	100.00	Vm	Ech52	N
10EX0302	PEL	Saprolite	78.3	600.00	Pt	Ech53	O
11EX0455	simple	-	16.9	20.00	Ms	Ech55	N
11EX0361	simple	-	26.2	100.00	Ms	Ech56	N

ANNEXE H
Résultats des analyses des duplicatas de laboratoire

Numéro de l'échantillon - Piézomètre	Limites de détection	Chrome dissous	Chrome VI	Fer dissous	Fluorures dissous	Manganèse dissous	Nitrates dissous	Nitrites dissous	Phosphates dissous
	Lab'eau Unités	0,001 mg Cr/L	0,02 mg CrVI/L	0,01 mg Fe/L	0.1 mg F/L	0,001 mg Mn/L	0,5 mg NO3/L	0,05 mg NO2/L	0,5 mg PO4/L
Ech 28 - 10EX0341	Ecart ech-dup	9.1%		15.8%		33.3%			
Ech 32 - 10EX0341									
Ech 38 - 09GH008	Ecart ech-dup	<0,1%		17.9%		47.4%	1.0%		
Ech 39 - 09GH008									
Ech 41 - TBH108	Ecart ech-dup	5.9%		17.5%		25.0%			
Ech 42 - TBH108									
Ech 46 - 11EX0431	Ecart ech-dup	<0.1%		10.6%		68.4%			
Ech 47 - 11EX0431									
Ech 53 - 10EX0302	Ecart ech-dup	<0,1%	-39.4%	29.4%		14.3%			
Ech 54 - 10EX0302									

Numéro de l'échantillon - Piézomètre	Limites de détection	Ammonium dissous	Aluminium dissous	Carbonates	Chlorures dissous	Hydrogénocarbonates	Hydroxydes	Silice dissous	Sulfates dissous
	Lab'eau Unités	0.025 mg NH4/L	0,01 mg Al/L	3 mg/L	0.125 mg Cl/L	6 mg/L	2 mg/L	1 mg SiO2/L	1.25 mg SO4/L
Ech 28 - 10EX0341	Ecart ech-dup		1.0%		0.4%	9.1%		10.3%	2.8%
Ech 32 - 10EX0341									
Ech 38 - 09GH008	Ecart ech-dup		8.0%		0.4%	<0.1%		7.6%	0.3%
Ech 39 - 09GH008									
Ech 41 - TBH108	Ecart ech-dup		29.4%		1.5%	10.0%		16.3%	3.7%
Ech 42 - TBH108									
Ech 46 - 11EX0431	Ecart ech-dup	<0.1%	18.9%	<0.1%	1.1%	<0.1%		4.0%	0.1%

Ech 47 - 11EX0431								
Ech 53 - 10EX0302	Ecart ech-dup	<0.1%	3.1%		0.1%	16.7%		13.5%
Ech 54 - 10EX0302								

Numéro de l'échantillon - Piézomètre	Limites de détection	Calcium dissous	Magnésium dissous	Sodium dissous	Potassium dissous
	Lab'eau	0.25	0.1	0.1	0.1
	Unités	mg Ca/L	mg Mg/L	mg Na/L	mg K/L
Ech 28 - 10EX0341	Ecart ech-dup	18.6%	2.1%	17.5%	25.7%
Ech 32 - 10EX0341					
Ech 38 - 09GH008	Ecart ech-dup	4.7%	1.2%	0.3%	
Ech 39 - 09GH008					
Ech 41 - TBH108	Ecart ech-dup	5.3%	<0.1%	0.9%	
Ech 42 - TBH108					
Ech 46 - 11EX0431	Ecart ech-dup	5.0%	0.6%	1.7%	8.1%
Ech 47 - 11EX0431					
Ech 53 - 10EX0302	Ecart ech-dup	2.3%	1.4%	3.8%	7.1%
Ech 54 - 10EX0302					

ANNEXE I

Résultats des teneurs en éléments majeurs des différentes nappes

