HAL open science

Hydrogéologie des péridotites karstifiées de Nouvelle-Calédonie. Rapport scientifique final

Jean-Lambert Join, Julie Jeanpert, Benoît Dewandel, Pierre Genthon, Gaëlle Bouichet, Brice Sevin, Pierre Maurizot, Jean-Christophe Maréchal, Bernard Ladouche, Pierre M. Adler, et al.

To cite this version:

Jean-Lambert Join, Julie Jeanpert, Benoît Dewandel, Pierre Genthon, Gaëlle Bouichet, et al.. Hydrogéologie des péridotites karstifiées de Nouvelle-Calédonie. Rapport scientifique final. [Rapport de recherche] Programme Hyperk. Tome Nickel et Environnement, CNRT Nickel et son environnement. 2017, 57 p. ird-01934374

HAL Id: ird-01934374

https://ird.hal.science/ird-01934374

Submitted on 26 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

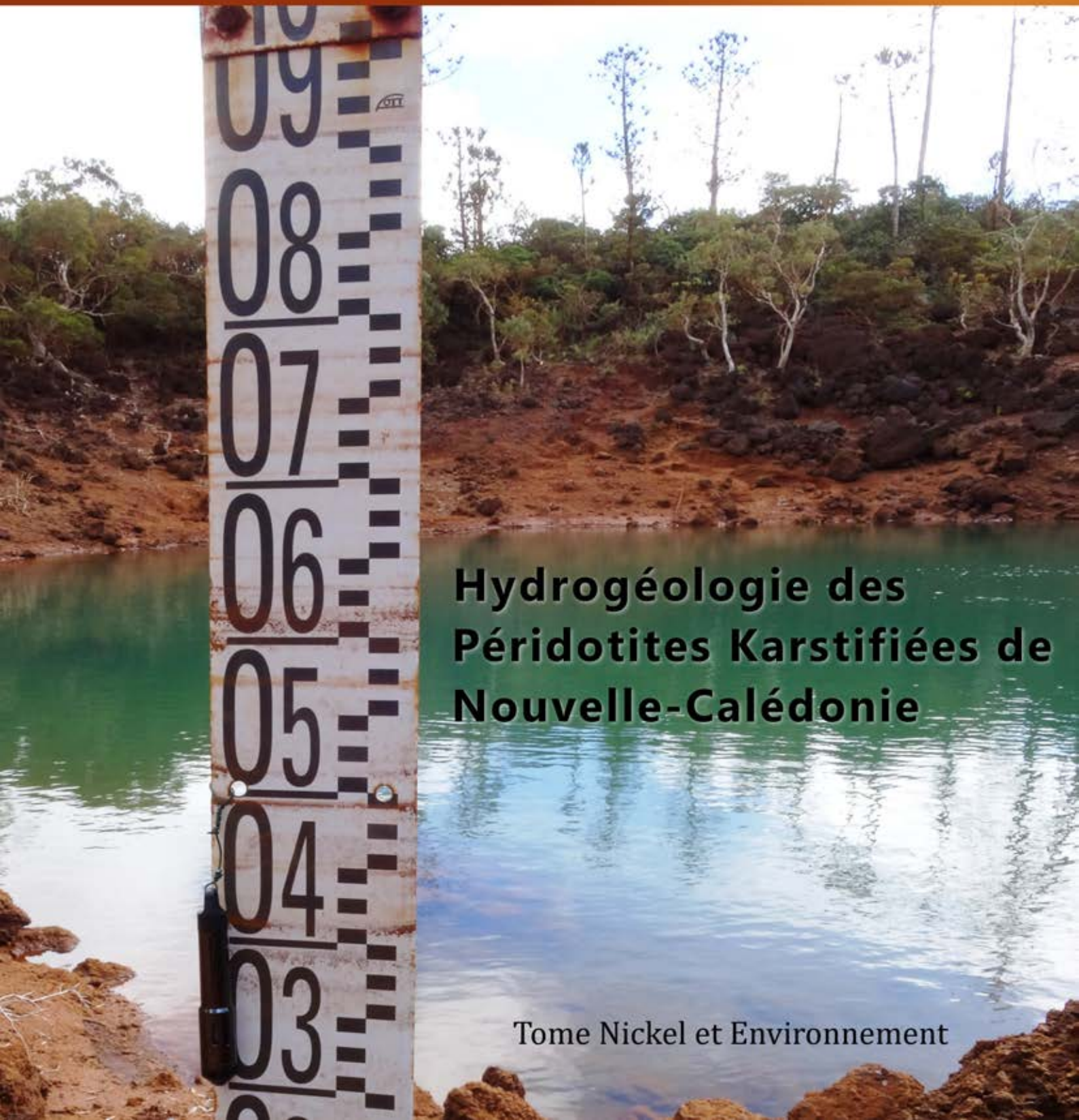
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

CNRT "Nickel et son environnement"

Rapport scientifique

Edition 2017



Hydrogéologie des Péridotites Karstifiées de Nouvelle-Calédonie

Tome Nickel et Environnement

Rapport Scientifique 2017

HYDROGÉOLOGIE DES PÉRIDOTITES KARSTIFIÉES DE NOUVELLE-CALÉDONIE

Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par le CNRT « Nickel & son environnement »

Juin 2017

« HYDROGÉOLOGIE MINIÈRE : HYPERK HYDROGÉOLOGIE DES PÉRIDOTITES KARSTIFIÉES DE NOUVELLE-CALÉDONIE »

Rapport final

Juin 2017

Ouvrage collectif coordonné par Jean-Lambert JOIN (Université de la Réunion)

Pour le consortium du projet CNRT « HYPERK » : Université de la Réunion - Golder Associates – SGNC/DIMENC – BRGM – IRD – HSM – UPMC – GNS Science

AUTEURS :

Join J.-L., Jeanpert J., Dewandel B., Genthon P., Bouichet G., Sevin B., Maurizot P., Maréchal J.-C., Ladouche B., et Adler P.M., Morgenstern U.

RÉVISION DU DOCUMENT

Réf.	CSF n° 04CNRT.URéunion/Hyperk du 18/09/12			
Version	**Date**	**Rédacteur(s)**	**Qualité du rédacteur(s)**	**Révision pour CNRT**
V1	23/04/2017	Jean-Lambert JOIN (Université de La Réunion)	Coordinateur du programme	F. Bailly CNRT
V2	23/06/2017	Jean-Lambert JOIN (Université de La Réunion)	Coordinateur du programme	F. Bailly CNRT

CITATION DU DOCUMENT

Mots clés : hydrogéologie, conductivité hydraulique, piézométrie, pseudo-karst, fracturation.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Join J.-L., Jeanpert J., Dewandel B., Genthon P., Bouichet G., Sevin B., Maurizot P., Maréchal J.-C., Ladouche B., et Adler P.M., Morgenstern U., Taupin J.D., 2017. Hydrogéologie minière - HYPERK: Hydrogéologie des Péridotites karstifiées de Nouvelle-Calédonie. Rapport final. Projet CNRT "Nickel et son environnement". 56 p.

SYNTHÈSE

Les massifs de péridotites en tant que système aquifère ont été historiquement peu étudiés. Cette méconnaissance a suscité le lancement d'un appel à projet sur la problématique de l'hydrogéologie minière en 2012 par le CNRT « Nickel et son environnement ». Pour répondre à cet appel à projet, une équipe composée de l'université de la Réunion, du BRGM, du Service Géologique de Nouvelle-Calédonie, de l'IRD, des laboratoires d'HydroSciences Montpellier et de GNS (service géologique néo-zélandais), de l'université Pierre et Marie Curie et du bureau d'études Golder Associés a bâti le projet « HYPERK » articulé autour de quatre tâches. La première s'est attachée à la caractérisation de l'hydrosystème des péridotites et à ses spécificités. Les tâches 2 et 3 ont abordé la caractérisation hydrogéologique du système à partir de l'analyse des caractéristiques hydrodynamiques pour l'une, et la distribution de la fracturation pour l'autre. La dernière tâche, plus appliquée, a été consacrée à la définition d'un modèle conceptuel de fonctionnement et la rédaction d'un guide méthodologique pour l'analyse et le suivi des circulations d'eau souterraine en milieu minier. Les livrables du projet HYPERK associés à ce rapport sont la thèse de doctorat réalisée par Julie Jeanpert au SGNC, et le guide méthodologique fournis en annexe 1 et 2 de ce document.

Les observations de terrain ont mis en évidence les « curiosités hydrogéologiques » propres aux péridotites altérées en climat tropical. Ainsi des dolines et des faciès d'altération (lapiaz) sont observés sur tous les massifs. Ces figures caractéristiques d'un milieu karstique résultent des mécanismes de l'altération et notamment de l'hydrolyse des péridotites. La synthèse de ces observations et études existantes, permet de définir la structure de l'hydrosystème avec du haut vers le bas : 1/ la cuirasse perméable qui favorise l'infiltration et porte temporairement une nappe perchée, 2/ l'horizon des latérites (rouge) et des saprolites fines qui constituent un horizon peu perméable mais très poreux et donc un réservoir important ; 3/ l'horizon des saprolites grossières et du saprock (défini comme l'horizon des péridotites fracturées avec 20 % maximum de matériaux altérés) représente un niveau plus perméable qui est associé à l'aquifère principal.

La caractérisation hydrogéologique porte d'abord sur le manteau d'altération constitué de la cuirasse, des latérites, des saprolites grossières et du saprock. Plus de 60 essais hydrauliques ont été menés sur les massifs de péridotites et les résultats et ont été compilés aux données existantes. La conductivité hydraulique moyenne des latérites est évaluée à 1.10^{-7} m/s et celle des saprolites grossières et du saprock à 8.10^{-7} m/s. L'hétérogénéité de cet horizon altéré est marquée par une gamme de variation de la conductivité hydraulique sur six ordres de grandeur et l'analyse piézométrique met en évidence des connexions hydrauliques avec le substratum profond fracturé.

Le substratum est ensuite considéré. L'étude de la fracturation est réalisée à partir de mesures structurales sur affleurement et de la description de près de 1000 m de carottes de forages. L'analyse de la fracturation met en évidence l'importance du réseau serpentineux par sa densité d'une part, et par son lien avec l'altération supergène d'autre part. De plus, il est montré que la conductivité hydraulique du substratum diminue avec la profondeur. Cette variation est liée à la diminution de la densité de fractures altérées.

Ainsi, à l'issue de ces analyses, la structure des massifs de péridotites est définie. Un réseau de fractures primaire décimétrique (20 – 30 cm) lié au réseau serpentineux préstructure les péridotites. Sur ce réseau se surimpose un réseau de fractures dont l'espacement est décamétrique (30 m environ) et caractérisé par une altération supergène. Les fractures

altérées présentent de fortes conductivités hydrauliques, de l'ordre de 10^{-5} m/s. En profondeur, l'espacement des fractures est hectométrique et les fractures sont majoritairement fermées, scellées par les minéraux néoformés ou par l'effet de la pression lithostatique.

Les réseaux de fractures déca et hectométriques, visibles également sur l'effet d'échelle de la conductivité hydraulique, sont majoritairement verticaux, développés par instabilité de dissolution lors des processus d'altération. Cependant, des structures à faible pendage existent également et permettent la percolation du réseau.

Enfin, à partir de ces nouveaux résultats et de l'intégration de l'ensemble des données acquises sur les différents massifs, un modèle de structure et de fonctionnement hydrogéologiques est proposé à l'échelle du massif. Ce modèle comprend l'horizon des latérites qui constitue un horizon aquitard homogène sous lequel se développe l'horizon aquifère dont l'épaisseur est de l'ordre de la cinquantaine de mètres. Le substratum est divisé en trois couches dont la conductivité décroît de 2.10^{-7} à 2.10^{-8} m/s entre 50 m et 250 m environ sous le mur de l'aquifère. Les modèles numériques construits permettent de valider le modèle conceptuel unitaire et montrent que l'état de saturation des massifs est contraint par leur géomorphologie.

Au terme de ce travail, plusieurs aspects doivent encore être approfondis. Le rôle hydrogéologique de la cuirasse doit être précisé et considéré dans le modèle hydrogéologique. Enfin, compte tenu du développement possible de structures très perméables, voire pseudo-karstiques, au sein des péridotites, la connaissance de la distribution des structures drainantes doit être améliorée.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 12

2. SYNTHESE DES TRAVAUX ET RESULTATS OBTENUS 14

2.1. DÉROULÉ DU PROGRAMME 14

2.2. CARACTÈRES SPÉCIFIQUES DE L'HYDROSYSTÈME DES PÉRIDOTITES (WP1) 16

2.2.1. Structure générale 16

2.2.2. Figures karstiques 18

2.2.3. Les dolines 20

2.3. L'APPROCHE MULTI ÉCHELLE DES CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES (WP2) 22

2.3.1. Méthodes de mesure et estimation de la conductivité hydraulique 22

2.3.2. Conductivités hydrauliques de l'aquitard et de l'aquifère 22

2.3.3. Analyse de l'effet d'échelle 32

2.4. L'ANALYSE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FRACTURATION (WP3) 36

2.4.1. Analyse de la perméabilité en lien avec la fracturation 36

2.4.2. synthèse sur la structure et la perméabilité des péridotites du socle 37

2.5. APPLICATION À LA GESTION MINIÈRE (WP4) 41

2.5.1. Elaboration de modèles numériques à l'échelle du massif 41

2.5.2. Elaboration d'un guide appliqué aux problématiques minières 47

3. CONCLUSION DU RAPPORT 48

4. PERSPECTIVES ET OPPORTUNITÉS 49

5. BILAN DE LA PRODUCTION SCIENTIFIQUE ASSOCIÉE AU PROGRAMME 50

5.1. PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DE RANG A 50

5.2. COLLOQUES ET CONFÉRENCES 50

5.3. MÉMOIRES ET THÈSE UNIVERSITAIRES 51

5.4. RAPPORTS TECHNIQUES 51

6. BIBLIOGRAPHIE 53

7. ANNEXES 56

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Déroulé du programme Hyperk.....12

Figure 2 : Organisation et partenaires impliqués dans le projet Hyperk 13

Figure 3 : Tassement et érosion mécanique des latérites sous la cuirasse indurée à l'origine d'une voûte cuirassée et de la formation d'un vide sous cuirasse, secteur de Goro. 16

Figure 4 : Modèle hydrogéologique des péridotites de Nouvelle-Calédonie établi à partir de l'étude du massif de Tiebaghi et du Massif du Sud (Jeanpert, 2010; Join *et al.*, 2005). .17

Figure 5 : Péridotite lapiazée presqu'île de Bogota, massif de Ouassé.....18

Figure 6 : Pseudo-épikarst sur une crête du massif du Sud, zone de Goro : péridotite lapiazée et latérites comblant les fissures ouvertes. 19

Figure 7 : Représentation schématique d'un aven avec vue sur les écoulements et photographie de l'émergence (a), et de la perte (b), massif du Sud, zone des « Bois du Sud ». 19

Figure 8 : Bassin endoréique, abusivement appelé doline, presqu'ile de Bogota, massif de Ouassé.....20

Figure 9 : Dolines du paysage calédonien : a) doline en eau sur le plateau de Tia ; b) doline de la mine Pinpin sur le Me Maoya, en eau en février 2014 et à sec en novembre 2014, et c) grande doline et point de soutirage à Nakety. 21

Figure 10 : Schéma d'installation d'un système Packer simple sur forage ouvert. 22

Figure 11 : Localisation des ouvrages testés au cours de la thèse et du projet CNRT "HYPERK" sur le secteur de Dôme, massif de Tiébaghi. 23

Figure 12 : Distribution des perméabilités mesurées sur les piézomètres et trous nus du massif de Tiébaghi (moyenne=6,35 et écart-type=0,93). 24

Figure 13 : Distributions des perméabilités estimées sur les piézomètres captant a) les latérites et b) les saprolites grossières et péridotites, Massif de Tiébaghi. 25

Figure 14 : Localisation des ouvrages sur lesquels des essais hydrauliques ont été réalisés, secteur de Goro, Massif du Sud. 26

Figure 15 : Histogramme de fréquence de la transmissivité estimée par pompage d'essai sur les ouvrages captant les latérites, secteur de Goro. 26

Figure 16 : Histogramme de fréquence de la conductivité hydraulique estimée par essai slug test mesurée sur les ouvrages captant les latérites. 27

Figure 17 : Histogramme de fréquence de la conductivité hydraulique sur les ouvrages captant les latérites, tous types d'essai confondus. 27

Figure 18 : Histogramme de fréquence de la transmissivité estimée lors de pompages d'essai sur 13 ouvrages captant l'aquifère des saprolites grossières et péridotites fracturées, secteur de Goro, Massif du Sud.....28

Figure 19 : Histogramme de fréquence de la conductivité hydraulique estimée à partir d'essais de type slug test sur les ouvrages captant les saprolites grossières et péridotites fracturées, secteur de Goro, Massif du Sud. 28

Figure 20 : Histogramme de fréquence de la conductivité hydraulique estimée par essais entre Packer, sur les ouvrages captant l'aquifère des saprolites grossières et péridotites fracturées, secteur de Goro, Massif du Sud.....29

Figure 21 : Histogramme de fréquence de la conductivité hydraulique estimée sur les ouvrages captant les saprolites grossières et péridotites fracturées, tous types d'essai confondus. 30

Figure 22 : Valeurs de conductivité hydraulique sur les latérites et sur les saprolites grossières et péridotites fracturées, données des massifs de Goro (n=92), Tiébaghi (n=26), et Poro (n=2).....31

Figure 23 : Coupe schématique du modèle de Boussinesq pour l'estimation de la perméabilité à l'échelle du bassin versant (Dewandel *et al.*, 2004).....33

Figure 24 : Variation du débit des rivières en fonction de la surface drainée, secteur de Goro (données Vale NC).....33

Figure 25 : Conductivité hydraulique en fonction du rayon d'investigation sur le massif de Tiébaghi. 34

Figure 26 : Conductivité hydraulique en fonction du rayon d'investigation sur le secteur de Goro, Massif du Sud.....34

Figure 27 : Résultats de l'inversion du profil de résistivités MZ08b (Geophysical, 2013), massif de Koniambo. Structures mises en évidence par géophysique en pointillés rouge. 38

Figure 28 : Résistivités mesurées sur la coupe WE03 sur le massif du Koniambo orientée NW - SE. 39

Figure 29 : Modèle de socle fracturé des péridotites de Nouvelle-Calédonie. 40

Figure 30 : Modèle 2D d'un massif type "plateau" : a) localisation de la coupe topographique sur le Massif de Tiébaghi sur fond de carte topographique et carte géologique, b) Logs lithologiques de trois forages du plateau, et c) coupe et modèle numérique du massif d Tiébaghi.....43

Figure 31 : Modèle 2D d'un massif type "plateau disséqué" : a) localisation de la coupe topographique sur le Massif de Koniambo, b) Epaisseur de l'aquitard, d'après Quesnel (2015), et c) coupe et modèle géologique du massif de type plateau disséqué, drainé de part et d'autre du plateau cuirassé. 44

Figure 32 : Modèle 2D d'un massif type « bassin » : a) localisation de la coupe topographique sur le Massif du Sud, secteur de Goro, b) coupes lithologiques de quatre piézomètres et niveaux piézométriques mesurés dans l'aquitard (en bleu) et l'aquifère (en noir), c) modèle Feflow et conditions aux limites. 45

Figure 33 : Résultats des modèles 2D pour évaluer l'influence de la topographie sur l'état de saturation du système : a) massif de Tiébaghi, b) massif du Koniambo, c) secteur de Goro, Massif du Sud. La ligne blanche correspond à la surface piézométrique modélisée.....46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Résultats des essais slug tests réalisés sur les ouvrages du site de Poro 30

LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

CNRT	Centre National de Recherche Technologique
HYPERK	HYdrogéologie des PÉRidotites Karstifiées
DIMENC	Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de la Nouvelle-Calédonie
SGNC	Service Géologique de la Nouvelle-Calédonie
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
UPMC	Université Pierre et Marie Curie
HSM	HydroSciences Montpellier
BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière
GNS	Service géologique de Nouvelle-Zélande

1. INTRODUCTION

L'exploitation de nickel en Nouvelle-Calédonie a vu son activité grandir à travers l'ouverture de deux nouvelles usines de traitement du nickel de procédé hydrométallurgique dans le Sud et pyrométallurgique dans le Nord, associées au minerai latéritique d'une part et saprolitique d'autre part. Les contraintes liées à l'exploitation des niveaux saprolitiques surmontés d'un épais manteau d'altération et latéritiques mettent en exergue la méconnaissance de l'hydrogéologie des péridotites de Nouvelle-Calédonie. Aux problématiques techniques rencontrées par les mineurs s'ajoutent les exigences réglementaires du nouveau Code minier et du schéma de mise en valeur des richesses minières de la Nouvelle-Calédonie, imposant un état des lieux initial et un suivi environnemental qui requièrent une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique des massifs miniers.

Le projet « Hydrogéologie minière » tente de répondre aux questionnements des mineurs en abordant le système aquifère multi-couche dans son ensemble englobant la fracturation du substratum rocheux. En s'appuyant sur les études réalisées par les partenaires de ce projet sur les péridotites de Nouvelle-Calédonie au travers des projets de recherche récents comme ceux du CNRT « Petits Bassins Versants », « Typologie des latérites » et « Dolines », ainsi que des études sur des systèmes similaires de milieux de socle fracturés, altérés ou karstifés, le projet HYPERK propose de caractériser les spécificités hydrogéologiques des massifs de péridotites calédoniens et d'en déduire des recommandations en matière de gestion des eaux souterraines.

Ce programme organisé initialement sur 3 ans (Figure 1), a été prolongé par avenant jusqu'en avril 2017. Les deux trimestres complémentaires du projet ont été entièrement consacrés à la synthèse générale des résultats obtenus et la valorisation des résultats en termes de communication institutionnelle et scientifique.

	Durée	T11	T12	T13	T14	T21	T22	T23	T24	T31	T32	T33	T34
Intitulé des Tâches	trimestre												
WP1. Synthèse des connaissances et Programmation													
Dimenc/UnivRéunion		T11	T12	T13	T14	T21	T22	T23	T24	T31	T32	T33	T34
Identification des données utilisables pour le projet	2												
Identification des sites pilotes fracturation	2												
Identification et programmation d'essais complémentaires	6												
WP2 : Approche multi-échelle des caractéristiques hydrodynamiques													
BRGM													
Analyse et réinterprétation de tests hydrauliques	9												
Hydrodynamique zone profonde	8												
Analyse fonctionnelle des hydrosystèmes	8												
Synthèse	3												
WP3 : Analyse hydrogéologique de la fracturation													
IRD Paris VI													
Mesures et analyses de terrain	9												
Description quantitative et multi échelle du milieu fracturé	8												
Modélisation des propriétés de transport du milieu fracturé	3												
WP4.Applications gestion minière													
Dimenc/UnivReunion/Golder													
Simulation synthétique	8												
Applications (drainage latérite, infiltration, pseudokarst)	8												
Recommandations et guides pour l'exploitation	4												
Synthèse générale	3												
WP5 : Hydrochimie													
Etude de faisabilité du traçage isotopique (budget SGNC-DIMENC en 2013)													

Figure 1 : **Déroulé du programme Hyperk**

Pour réaliser ces objectifs, l'équipe proposante s'est appuyée sur 4 groupes partenaires qui représentent au final 8 institutions différentes. Le schéma ci-après (Figure 2) présente cette organisation centrée sur la thèse de doctorat de Mme Jeanpert dont le document (annexe 1) présente en détail la méthodologie et les principaux résultats scientifiques de ce programme.

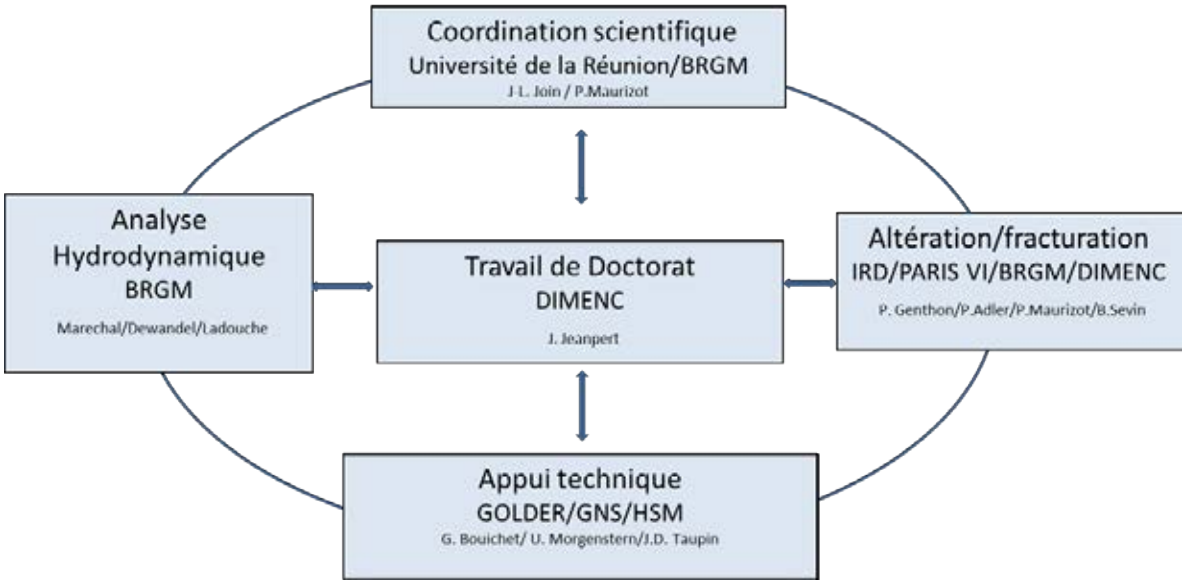


Figure 2 : **Organisation et partenaires impliqués dans le projet Hyperk**

Les travaux réalisés ont été distingués selon quatre tâches principales pilotées par les différents partenaires du projet et visant chacune à préciser ces différents compartiments :

- WP1 : Synthèse des connaissances hydrogéologiques des massifs miniers, inventaire des données disponibles, base de données hydrodynamiques;
- WP2 : Approche multi-échelle des caractéristiques hydrodynamiques de l'hydrosystème ;
- WP3 : Analyse hydrogéologique de la fracturation, structure et évolution au cours des temps géologiques. Lien altération/fracturation: définition des champs de perméabilité du milieu fracturé, analyse de la dynamique de l'altération ;
- WP4 : Applications à la gestion des massifs miniers et production d'un guide méthodologique pour la gestion des eaux souterraines.

Ce rapport de synthèse présente les résultats et données scientifiques obtenus par l'ensemble des partenaires sur l'ensemble du programme. Il est organisé en trois parties :

- La première partie fournit un condensé des principaux résultats obtenus au regard des travaux accomplis dans les différents WP ;
- La deuxième partie expose le bilan de la production scientifique associée au programme ;
- La troisième partie fournit les fiches de méta données correspondantes aux tests effectués.

Ce rapport final est un extrait synthétique des résultats du projet et de la thèse de doctorat de Julie Jeanpert. Il convient de se référer au manuscrit de la thèse pour la description détaillée et complète des méthodologies et des résultats. Enfin, le guide méthodologique constitue un troisième livrable du projet et il convient également de s'y référer pour répondre en détails à la quatrième tâche (WP4).

2. SYNTHESE DES TRAVAUX ET RESULTATS OBTENUS

2.1. DÉROULÉ DU PROGRAMME

Si la convention a été signée en avril 2013, les premières actions du programme Hyperk ont démarré dès l'année 2012, depuis cette date, le programme a permis d'organiser chaque année, plusieurs missions concernant les différents partenaires et visant à l'acquisition de nouvelles données hydrodynamiques sur le terrain ou à des séminaires d'avancement regroupant l'ensemble de l'équipe. Le déroulé des principales missions est rappelé ci-dessous :

- Nouméa, Avril à octobre 2012 : Stage M2 de Simon Grossiord (ENGREF/Paris) : Création d'une base de données hydrodynamiques, analyse exploratoire de l'hydrogéologie des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie (WP1), encadrement G. Bouichet (Golder Associates) et J. Jeanpert (SGNC), financement (SGNC). Le rapport de stage est disponible sur la plateforme du CNRT ;
- Nouméa, Juillet 2012 : mission de P. Genthon en Nouvelle-Calédonie dans le cadre des projets CNRT HYPERK (WP1) mais aussi « Diagnose Dolines » (financement projet doline);
- Nouméa, Mars 2013, mission de P. Genthon et P. Adler pour l'étude de la fracturation des massifs de péridotites (WP3) ;
- Nouméa, Avril à Septembre 2013 : stage M2 de Jonathan Schuite : Modélisation des propriétés de transport des péridotites fracturées de Nouvelle-Calédonie (Sud-Ouest Pacifique) (WP23) encadré par P. Genthon, J-F Thovert, V. Mourzenko (Institut PPRIME, SP2M, Futuroscope cedex) et P. Adler (UPMC);
- Montpellier, Mai 2013 : Réunion de lancement du projet CNRT à Montpellier en présence de tous les partenaires du projet, hors Pierre Maurizot et Brice Sevin ;
- Paris, Mai 2013, mission de Julie Jeanpert au laboratoire METIS (anciennement SISYPHE) de l'UPMC de Jussieu pour travailler sur la modélisation du milieu fracturé (WP2) ;
- Nouméa, Novembre 2013 : mission de Uwe Morgentern (GNS) et Jean-Lambert Join pour les échantillonnages pour les analyses isotopiques ;
- Nouméa, Novembre 2013 : présentation au comité de pilotage du CNRT de l'avancée du projet HYPERK et présentation, ouverte à tous les BET, compagnies minières et institutions, des méthodes isotopiques pour la datation des eaux par Uwe Morgenstern ;
- Montpellier, Mai 2014 : mission de Julie Jeanpert au BRGM à Montpellier pour travailler sur l'analyse hydrodynamique de la piézométrie et l'approche multi-échelle des caractéristiques hydrodynamiques (WP2) ;
- Montpellier, Mai 2014 : Travaux du comité de pilotage Hyperk et comité de thèse de Julie Jeanpert.
- Nouméa, Novembre 2014, Mission de Benoît Dewandel et Jean-Christophe Maréchal du BRGM; slug tests et diagraphies température conductivité, pompages, sur les massifs de Tiebaghi, Nakety, massif du Sud (zone de Goro), tunnel chromical;
- Nouméa, Novembre 2014, Mission de Pierre Genthon (IRD) et Pierre Adler (UPMC) : analyse de la fracturation dans le Massif du Sud ;
- Nouméa, Février 2015, Mission Join ; Copil CNRT ; essais hydrodynamiques sur Goro.
- Nouméa, 2015, SGNC : stage L3 de Laïna Pérotin (UNC) sur la « Caractérisation de la fracturation des péridotites à partir de l'étude des carottes de trois forages profonds

du massif du Koniambo »; stage L3 de Jonathan Gallois (Univ. Avignon) sur la « Caractérisation de la perméabilité des péridotites du site de Goro – Massif du Sud de Nouvelle-Calédonie » (annexe 3); stages encadrés par J. Jeanpert (SGNC/DIMENC) ;

- Nouméa, 12-13 mai 2015 : réunion d'avancement du projet CNRT et comité de thèse de Julie Jeanpert à Nouméa et par visio-conférence avec Montpellier.
- Nouméa, Octobre 2015 : Mission de Benoît Dewandel (BRGM), compléments de tests hydrodynamiques sur Goro, et journée de formation CNRT/Mines/BET ;
- Nouméa, Novembre 2015, Mission Genthon IRD; analyse de la fracturation Tiebaghi et Sud ; traitement de données. Réunion CNRT. Stage M2 en cours « Effets d'échelle dans les propriétés de transport des péridotites fracturées de Nouvelle-Calédonie » encadré par P. Genthon (IRD) et P. Adler (UPMC / METIS)
- Nouméa, Janvier 2016 : Mission Join, Modélisation et réunion de restitution de l'état d'avancement du projet.
- Montpellier, Avril 2016 : mission de Julie Jeanpert à Montpellier pour le comité de Thèse et avancée du projet HYPERK ;
- Nouméa, SGNC : stage M1 de Leila Courtot (Univ. Montpellier) Caractérisation géochimique des eaux des massifs de péridotites de Nouvelle-Caléodonie, encadré par J. Jeanpert (SGNC/DIMENC) ;
- Montpellier, Septembre 2016 : mission de J-L Join et de J Jeanpert à Montpellier pour la participation au congrès de l'IAH et bilan du programme HYPERK ;
- Avril 2017 : Mission JL Join (Univ. Reunion) et P. Genthon (financement IRD) pour la restitution du projet et soutenance de thèse de Julie Jeanpert, les 26 et 27 avril 2017.

2.2. CARACTÈRES SPÉCIFIQUES DE L'HYDROSYSTÈME DES PÉRIDOTITES (WP1)

2.2.1. STRUCTURE GÉNÉRALE

Les péridotites peuvent être assimilées aux milieux fracturés. La structure de l'hydrosystème des péridotites est bien sûr dépendante de celle du profil d'altération. Ce chapitre WP1 présente l'état des connaissances de l'hydrosystème des péridotites.

Les études menées par l'IRD (Join *et al.*, 2005), par le BRGM (Genna *et al.*, 2005a; Genna *et al.*, 2005b) et par les compagnies minières ((Camus *et al.*, 2015; SLN, 2009; Vale Nouvelle-Calédonie, 2015), pour en citer quelques-unes) ont permis de définir un modèle conceptuel du système hydrogéologique des massifs de péridotites. La Figure 4 présente le profil d'altération et les niveaux hydrogéologiques correspondant.

2.2.1.1. Aquifère supérieur, temporaire : cuirasse et grenaille

La cuirasse, dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs mètres, présente une double perméabilité : alvéolaire due à sa structure, et de fracture due à son démantèlement. Elle favorise l'infiltration rapide de l'eau précipitée et ruisselée. La formation de la carapace (stade précoce de la cuirasse (Sevin, 2014)) combinée à l'effet de tassement de la latérite peut s'accompagner de la formation de vide sous le niveau induré (Figure 3). Ce niveau perméable crée un fort contraste de perméabilité avec la latérite et on observe une circulation rapide de l'eau, qui donne souvent naissance à une ligne de sources temporaires en bordure de plateaux. Dans le cas d'une précipitation importante, la nappe temporaire dans cet aquifère peut se mettre en charge sous la cuirasse et donner localement naissance à des sources artésiennes (Join *et al.*, 2005).

Figure 3 : **Tassement et érosion mécanique des latérites sous la cuirasse indurée à l'origine d'une voûte cuirassée et de la formation d'un vide sous cuirasse, secteur de Goro.**

2.2.1.1.1. Aquitard, ou unité semi-perméable

Ce niveau hydrogéologique correspond aux horizons des latérites rouges et jaunes. Il est caractérisé par une forte porosité et une faible perméabilité qui lui confèrent la fonction capacitive du système (Join *et al.*, 2005). Des zones de suintement peuvent localement être observées sur les affleurements de latérites en période de hautes eaux.

2.2.1.1.2. Aquifère principal semi-captif

Cet aquifère correspond au niveau des saprolites grossières au toit de la roche saine. Le système hétérogène composé de la roche très altérée facilite la circulation de l'eau. Cet aquifère a la fonction transmissive du système et alimente les principales résurgences des versants. C'est également dans cet horizon qu'a principalement lieu la minéralisation de l'eau.

2.2.1.1.3. Aquifère profond

La péridotite non altérée, dure, a jusqu'à récemment été considérée comme composant le substratum de l'aquifère principal des saprolites. Join et al. (2005) ont cependant observé des suintements dans la roche-mère ce qui tend à prouver l'existence d'un écoulement souterrain plus profond, probablement dans les fractures du socle. Bien qu'aucune donnée n'existe sur l'état de fracturation des péridotites saines de Nouvelle-Calédonie, une étude similaire sur les péridotites d'Oman (Dewandel *et al.*, 2005) laisse supposer une extension de la zone de fracturation sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Cette étude indique des valeurs de perméabilité de 10^{-7} voire 10^{-4} m/s. L'existence de cet aquifère est l'objet d'un questionnement actuel.

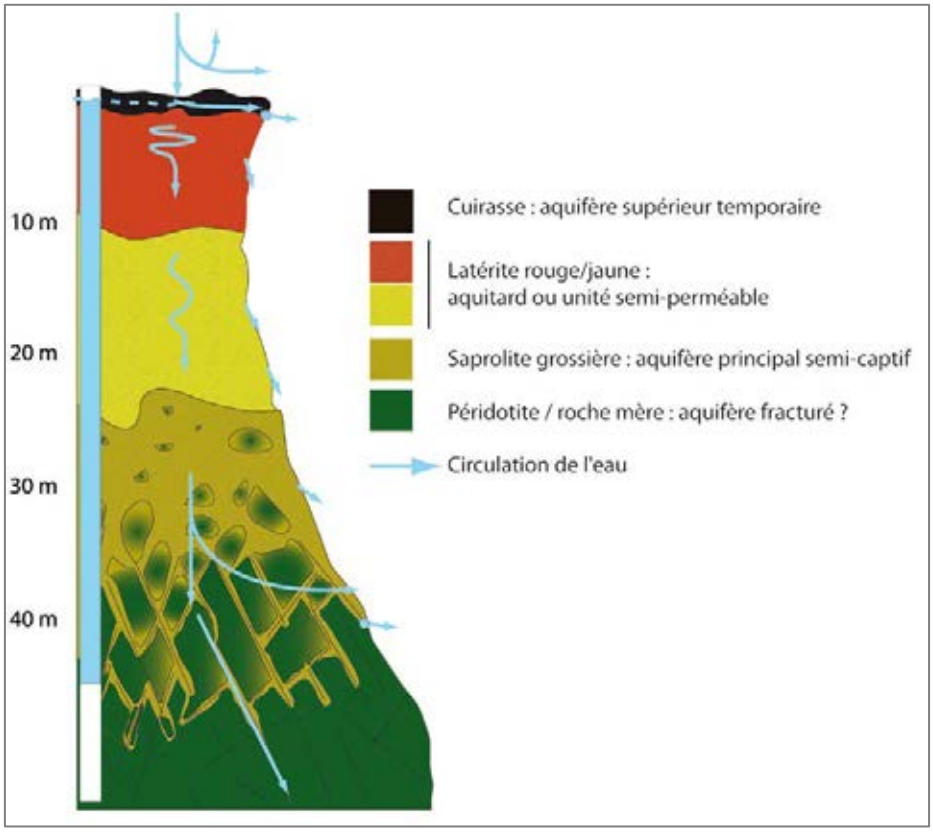


Figure 4 : **Modèle hydrogéologique des péridotites de Nouvelle-Calédonie établi à partir de l'étude du massif de Tiebaghi et du Massif du Sud (Jeanpert, 2010; Join *et al.*, 2005).**

L'hydrosystème des péridotites de Nouvelle-Calédonie consiste ainsi en un système multicouche dont les strates sont *a priori* hydrodynamiquement différentes. Cependant, à cette structure similaire à celles des aquifères de socle, il existe des spécificités qui en font un hydrosystème particulier. En effet, la solubilité des silicates permet la formation de vides, voire de drains, comme cela est observé dans les milieux calcaires, à cela près que dans le cas des péridotites le produit résultant de l'hydrolyse génère un résidu solide d'altération susceptible de boucher les vides formés. On parle dans le cas des péridotites de Nouvelle-Calédonie de pseudo-karst (Genna *et al.*, 2005a; Genna *et al.*, 2005b; Nicod, 1994). La partie suivante est consacrée à un état des lieux des figures karstiques témoins de surface d'un système karstique, selon la nomenclature des milieux calcaires.

2.2.2. FIGURES KARSTIQUES

2.2.2.1. Témoins de l'altération des péridotites

Wirthmann (1966) note que la sensibilité particulière de la péridotite à l'altération chimique a pour conséquence que cette roche, au moins en conditions tropicales humides, est susceptible de développer de véritables modelés karstiques.

Sont présentées et illustrées ici, les indices karstiques observés sur les péridotites de Nouvelle-Calédonie. Les termes utilisés par les mineurs ou bureaux d'études sont redéfinis et parfois remis en question compte du tenu du contexte et de la définition réelle du terme.

Tout d'abord, les lapiaz se présentent sous la forme de champs de cannelures ou de sillons, plus ou moins profonds, creusés à la surface des roches solubles comme les calcaires ou les péridotites. La Figure 5 présente les péridotites dites « lapiazées ».

Figure 5 : **Péridotite lapiazée presqu'île de Bogota, massif de Ouassé.**

Sur les crêtes des péridotites, on observe parfois ces formes lapiazées des péridotites, et le terme d'épikarst est utilisé. En milieu karstique il est utilisé pour définir la surface superficielle du karst ; elle correspond à la partie supérieure de la zone vadose (non saturée) où l'eau s'infiltre plus ou moins verticalement. Elle est caractérisée par un réseau de fissures et de cavités ; à l'affleurement l'épikarst correspond à des péridotites lapiazées et des fissures remplies de matériaux fins latéritiques. Elle constitue la zone d'infiltration ou de transfert vertical (Salomon, 2000).

La Figure 6 présente l'épikarst sur une crête péridotitique. Il faut néanmoins mettre en garde sur ce terme qui est utilisé en contexte karstique où l'épikarst est relié au karst et à ses conduits ouverts ; si les péridotites montrent des formes de dissolution, la partie inférieure et ouverte du karst n'est pas avérée à l'échelle des massifs de péridotites. On préférera donc le terme de « pseudo-épikarst ».

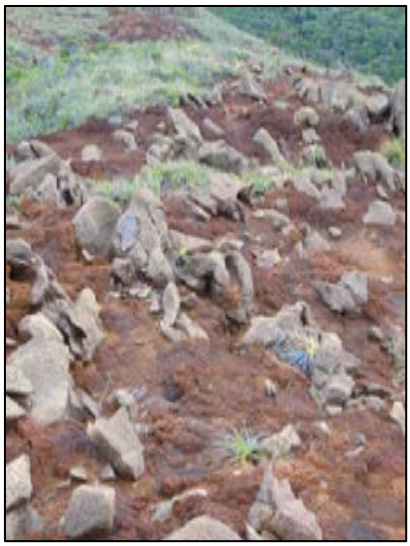


Figure 6 : **Pseudo-épikarst sur une crête du massif du Sud, zone de Goro : péridotite lapiazée et latérites comblant les fissures ouvertes.**

Enfin, les paysages karstiques sont caractérisés par l'existence de *sources (spring)*, également appelés résurgences, et de *pertes* (ou point d'infiltration) qui correspondent respectivement au point d'émergence des eaux souterraines et de disparition d'un cours d'eau, Figure 7.

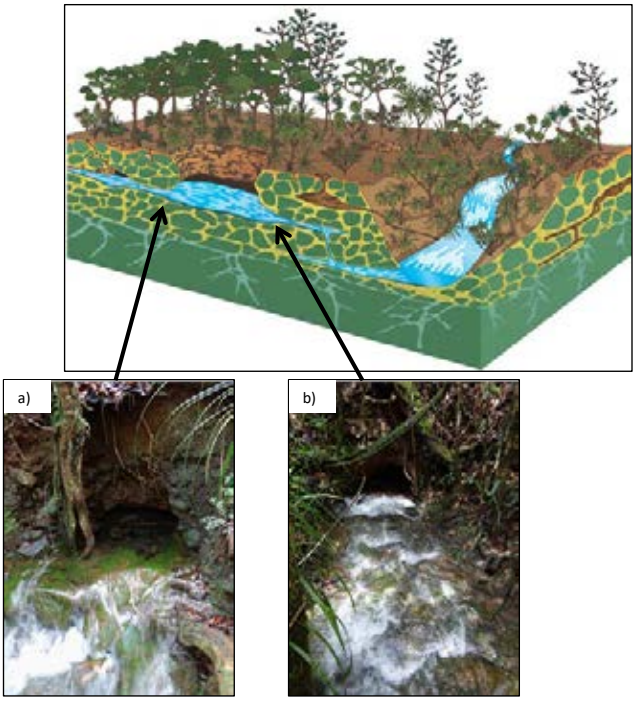


Figure 7 : **Représentation schématique d'un aven avec vue sur les écoulements et photographie de l'émergence (a), et de la perte (b), massif du Sud, zone des « Bois du Sud ».**

Les poljés dont des dépressions fermées de grandes dimensions (quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres), plus longues que larges, à fond plat, soumises à des inondations périodiques et parcourues par des petits cours d'eau, pérennes ou temporaires, dont les eaux sont absorbées par des gouffres, appelés ponors. Ils sont le plus souvent d'origine tectonique et se développent au niveau de la surface libre de la nappe phréatique et peuvent même être perchés. La Figure 8 illustre cet objet. De par leur morphologie, ils constituent des bassins endoréiques, c'est-à-dire un bassin versant clos retenant les eaux (superficielles ou non) dans une dépression fermée. Tout apport hydrique ne peut quitter un bassin endoréique que par évaporation ou infiltration.

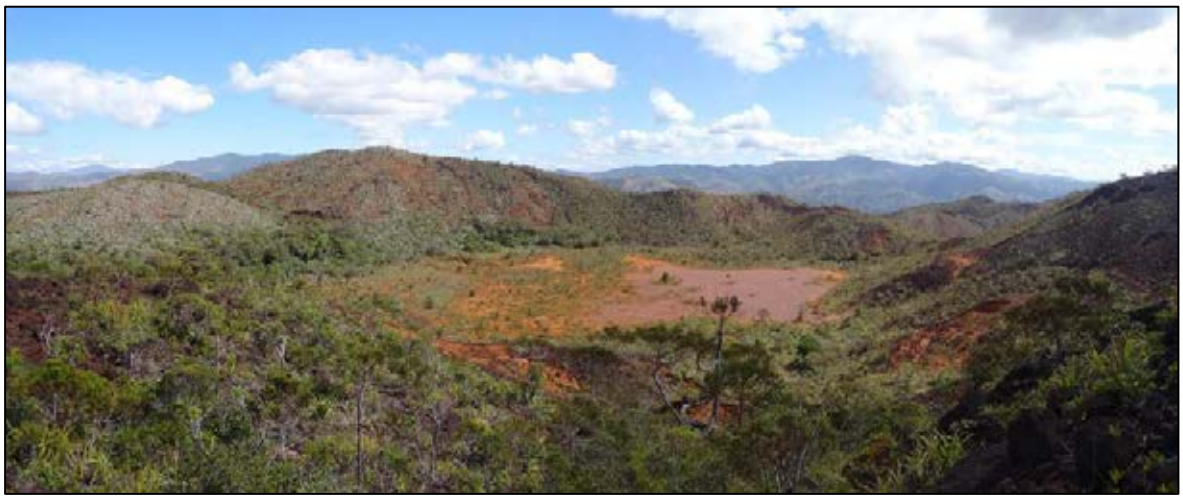


Figure 8 : **Bassin endoréique, abusivement appelé doline, presqu'ile de Bogota, massif de Ouassé.**

2.2.3. LES DOLINES

Les dolines *(SINKHOLES, DOLINES)* sont les formes de surface les plus caractéristiques du karst. Ce sont des dépressions topographiques fermées, circulaires ou ovales, dont la profondeur peut atteindre une centaine de mètres. Elles sont caractéristiques du paysage calédonien et on les observe sur tous les massifs de péridotites, avec des formes ou tailles variables. Les Figure 9-a et 9-b illustrent cet objet avec un exemple de doline en eau comme sur le plateau Tia, mais qu'on connaît également sur le massif de Tiébaghi, sur le Me Maoya (la doline Pinpin), ou encore à Nakéty et sur le secteur de Trazy sur le massif du Koniambo. Un exemple plus particulier illustré sur la Figure 9-c, est observé à Nakéty où au sein du bassin endoréique on observe une doline correspondant au point de soutirage des matériaux fins.

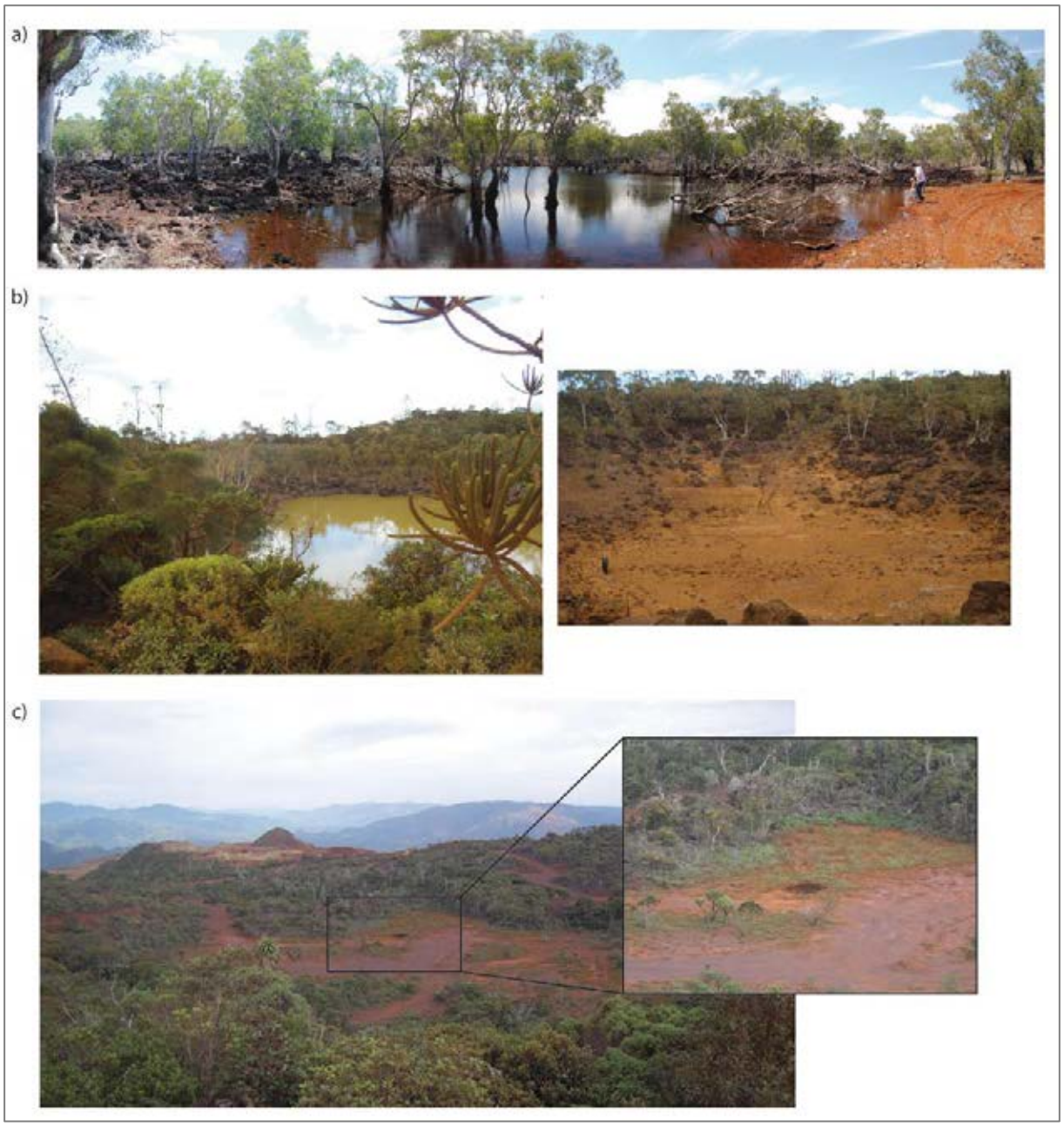


Figure 9 : **Dolines du paysage calédonien : a) doline en eau sur le plateau de Tia ; b) doline de la mine Pinpin sur le Me Maoya, en eau en février 2014 et à sec en novembre 2014, et c) grande doline et point de soutirage à Nakety.**

2.3. L'APPROCHE MULTI ÉCHELLE DES CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES (WP2)

L'hydrosystème péridotitique est étudié à partir de la caractérisation des conductivités hydrauliques des deux horizons principaux de l'hydrosystème, à savoir l'horizon aquitard qui correspond aux latérites rouge et jaune, et l'horizon aquifère qui correspond aux saprolites grossières (selon la terminologie calédonienne). Après une présentation des méthodes de mesure et d'interprétation qui sont utilisées, une analyse de la dispersion de ce paramètre sera réalisée au sein du profil d'altération et au sein des différents massifs de Nouvelle-Calédonie. Enfin l'effet d'échelle sur la conductivité hydraulique est considéré.

2.3.1. MÉTHODES DE MESURE ET ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

Plusieurs essais ont été réalisés sur les piézomètres ou sur les trous de sondages d'exploration des massifs de Tiébaghi et Goro mais aussi plus ponctuellement sur les zones de Poro et Nakety dans le Massif du Sud. Les essais menés sont de type pompage courte à moyenne durée et des essais de type slug test. Un autre type d'essais est présenté, les essais de type Lugeon réalisés par les bureaux d'études mandatés par certaines compagnies minières sur trous nus entre Packer. La Figure 10 présente le schéma d'installation d'un système Packer sur trou nu. Enfin, notons que des essais à charge constante ont également été réalisés par des bureaux d'études à l'avancement sur certains ouvrages et font partie des données existantes.

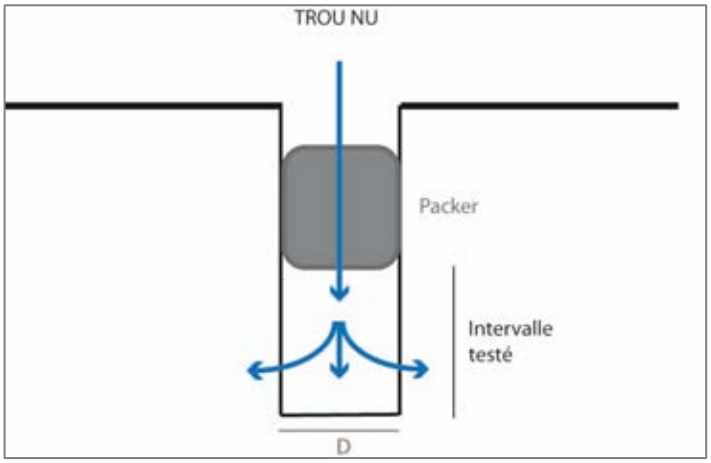


Figure 10 : **Schéma d'installation d'un système Packer simple sur forage ouvert.**

2.3.2. CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES DE L'AQUITARD ET DE L'AQUIFÈRE

Une synthèse des données est présentée ici, par massif d'abord, et par lithologie. Rappelons que « l'aquitard » désigne les latérites (latérites rouge et saprolites fines), et « l'aquifère » désigne les saprolites grossières et les péridotites.

2.3.2.1. Distribution de la conductivité hydraulique par massif

2.3.2.1.1. Massif de Tiébaghi

Des essais hydrauliques ont été réalisés sur le massif de Tiébaghi, sur des trous nus (anciens sondages d'exploration équipés parfois en tête d'un tubage PVC pour éviter l'effondrement du niveau de la cuirasse-grenaille) et des piézomètres équipés (forages anciens ou récents réalisés en 2012). Ainsi dans le cadre du projet HYPERK, 21 ouvrages ont été testés. Les ouvrages testés sont localisés sur la Figure 11. Les essais sont de type slug test (par injection instantanée d'un volume d'eau) et un pompage de courte durée a également été réalisé sur le piézomètre PZ_ON1_SAP avec un suivi sur le piézomètre captant les latérites se situant sur la même plateforme.

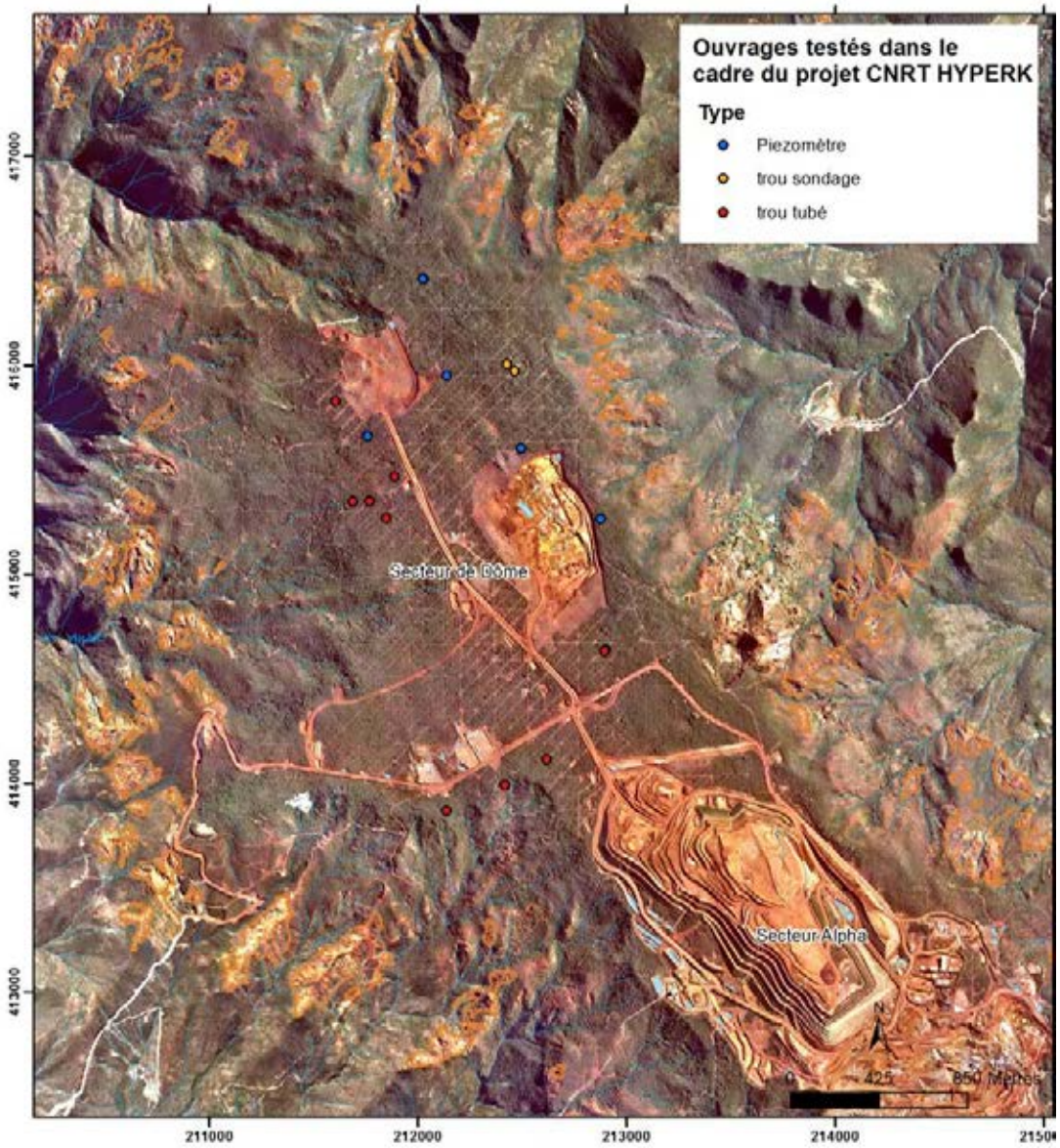


Figure 11 : **Localisation des ouvrages testés au cours de la thèse et du projet CNRT "HYPERK" sur le secteur de Dôme, massif de Tiébaghi.**

Par ailleurs, les données existantes et compilées par MICA (2009) ont été intégrées. Vingt essais par pompage et slug tests ont été réalisés sur des forages captant les latérites ou les saprolites grossières.

Pour utiliser les données et utiliser la transmissivité ou la conductivité hydraulique, l'épaisseur saturée a été calculée. Par défaut elle résulte de la différence entre le fond de l'ouvrage et le niveau piézométrique mesuré ; le calcul est donc homogénéisé au maximum.

La Figure 12 présente la distribution des perméabilités mesurées sur l'ensemble des ouvrages de Tiébaghi. La distribution de log K suit une loi normale centrée en -6,35 et un écart type de 0,93. Les résultats des pompages d'essai permettent d'estimer le coefficient d'emmagasinement moyen, à 4.10^{-4} pour les saprolites grossières et péridotites fracturées.

En fonction des informations sur la lithologie et l'équipement, une distinction a été faite sur les perméabilités mesurées dans la latérite d'une part, et dans les saprolites grossières – péridotites d'autre part. La Figure 12 présente la distribution des conductivités hydrauliques par formation captée pour le massif de Tiébaghi. Le nombre d'essais présentés par lithologie est inférieur au nombre total d'essais puisque parfois la lithologie n'est pas connue et le trou n'est pas équipé, c'est donc l'hydrosystème dans son ensemble qui est sollicité.

Les valeurs moyennes des conductivités hydrauliques mesurées sur le massif de Tiébaghi sont respectivement logK = -6,8 et logK = -6,1 dans l'aquitard et l'aquifère des péridotites.

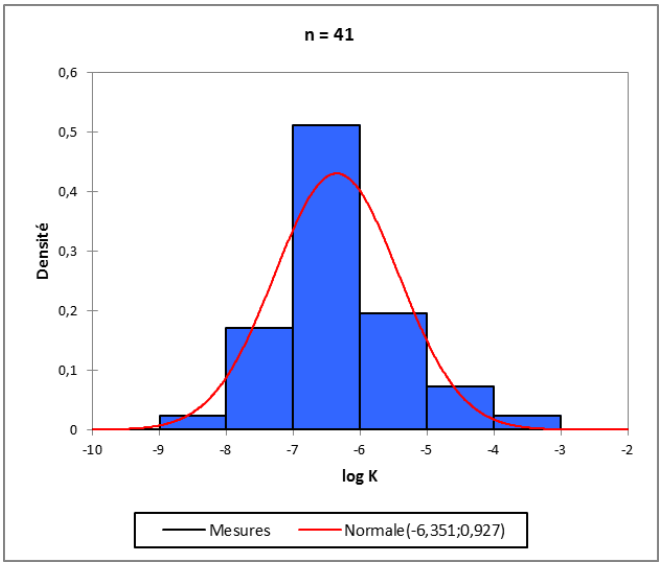
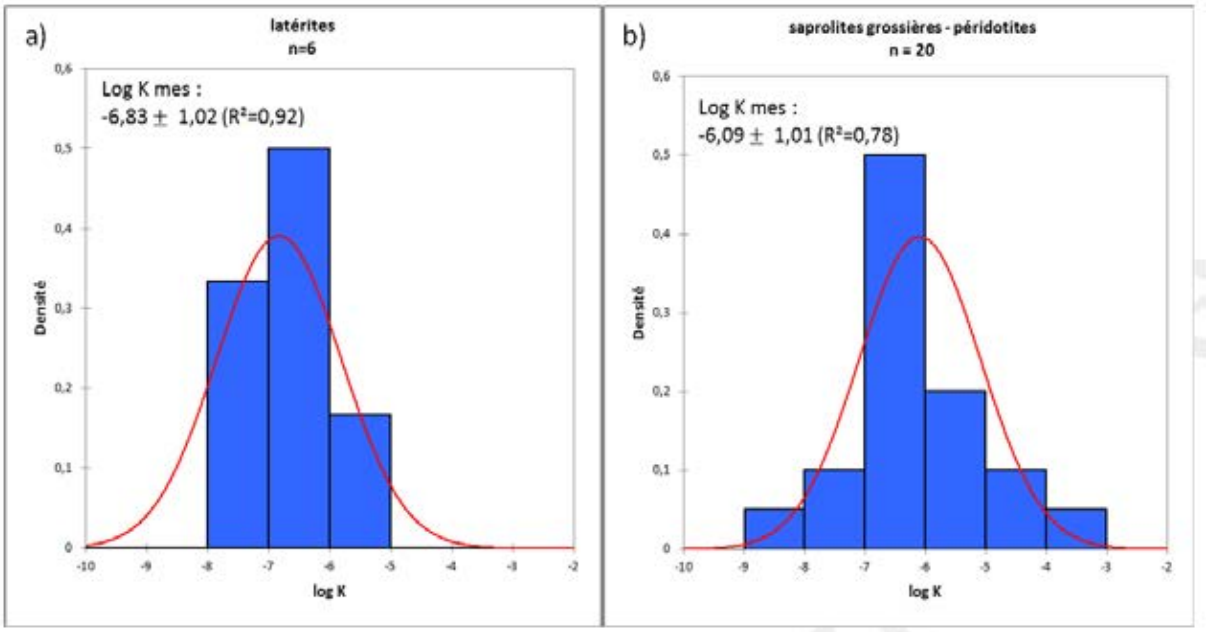


Figure 12 : **Distribution des perméabilités mesurées sur les piézomètres et trous nus du massif de Tiébaghi (moyenne=6,35 et écart-type=0,93).**



R·=·coefficient·de·corrélation·entre·les·données·et·la·distribution·normale.¶

Figure 13 : **Distributions des perméabilités estimées sur les piézomètres captant a) les latérites et b) les saprolites grossières et péridotites, Massif de Tiébaghi.**

2.3.2.1.2. Massif de Goro

Les données de conductivité hydraulique sur Goro sont issues d'essais terrain de type slug test réalisés dans le cadre de cette thèse (38 ouvrages testés) ou issus de la bibliographie (42 forages testés) (Golder Associates, 2002a, 2002b, 2005). Les essais de type Lugeon ou Lefranc réalisés par les bureaux d'études sur Goro n'ont pas été réinterprétés mais les interprétations de ce même type d'essais réalisés sur le massif du Koniambo ont été validées en partant de la donnée brute (Jeanpert et Dewandel, 2013). Lorsque les essais ont été réalisés entre Packer à plusieurs profondeurs et que plusieurs valeurs de conductivité sont disponibles sur un même ouvrage (K_i pour l'essai *i*), une valeur moyenne (K_{moy}) pondérée par la longueur de l'intervalle testé (l_i) est calculée selon la formule : $K_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i \times l_i}{\sum_{i=1}^{n} l_i}$, avec n le nombre d'essais réalisés sur un même ouvrage.

Des valeurs de transmissivité sont également disponibles issues de 10 pompages d'essai courte durée réalisés dans le cadre de cette étude (Gallois, 2015). D'autres données (8 valeurs) de transmissivité ont également été récupérées à partir de la bibliographie (Golder Associates, 2008; Roche, 2013).

La Figure 14 présente la localisation des ouvrages sur lesquels un ou des essais hydrauliques ont été conduits. Le figuré traduit le type d'ouvrage et la source de la donnée : en rouge/marron : les pompages réalisés au cours du projet HYPERK, en noir/gris : les essais slug tests réalisés au cours du projet HYPERK, et en orange les données issues de la bibliographie. Les triangles et les ronds représentent respectivement les ouvrages captant les latérites et les saprolites grossières – péridotites fracturées.

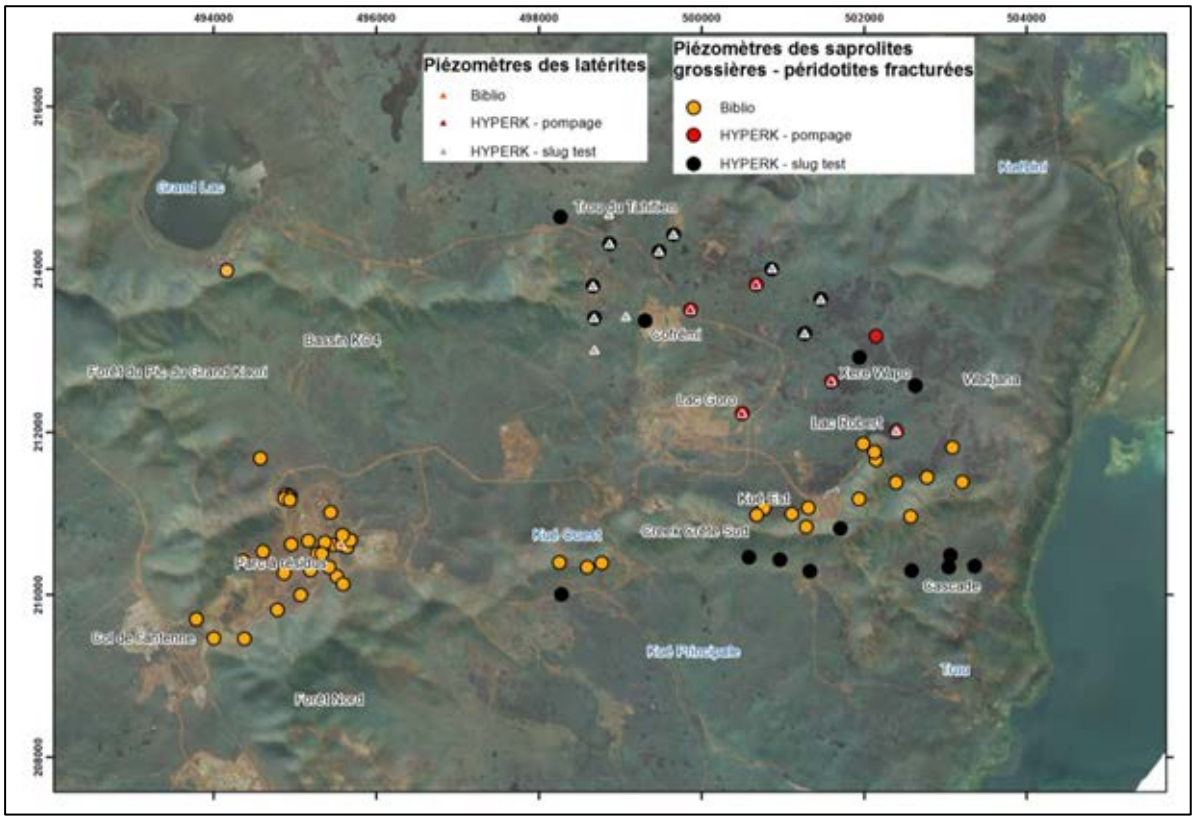


Figure 14 : **Localisation des ouvrages sur lesquels des essais hydrauliques ont été réalisés, secteur de Goro, Massif du Sud.**

Conductivité hydraulique des latérites

Cinq essais par pompage ont été réalisés sur des piézomètres captant les latérites (quatre pour cette étude et un par Golder en 2008). La distribution des transmissivités est présentée sur la Figure 15. La plage de variation de la transmissivité est importante ; logT varie sur 5 ordres de grandeur dans les latérites sur la zone de Goro (moyenne géométrique = -4,8 ; écart-type = 1,7). Quatre valeurs du coefficient d'emmagasinement sont de l'ordre de 10^{-5} (écart-type égal à 0,3) et une seule valeur se distingue avec une valeur élevée S= 0,67 (sur le WKBH102A lors du pompage sur la source WK17, (Golder Associates, 2008))

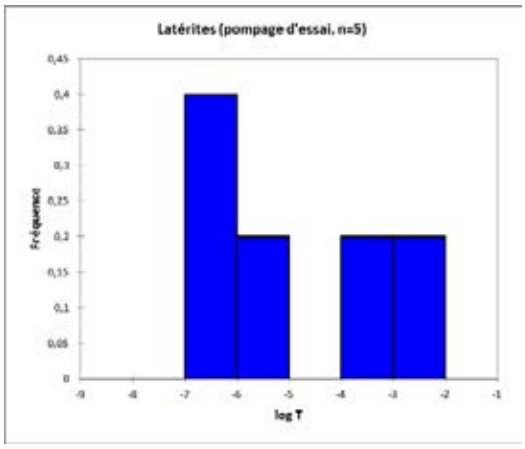


Figure 15 : **Histogramme de fréquence de la transmissivité estimée par pompage d'essai sur les ouvrages captant les latérites, secteur de Goro.**

Un second jeu de valeurs correspond aux essais de type slug test réalisés dans le cadre de cette étude. Quatorze piézomètres captant la latérite ont été testés ; la distribution des données est présentée sur la Figure 16. Les essais slug test permettent d'évaluer la perméabilité proche du piézomètre (à quelques mètres de distance) qui est, d'après ces résultats, très homogène dans les latérites à cette échelle : log K moyen = -7,4, écart-type = 0,2.

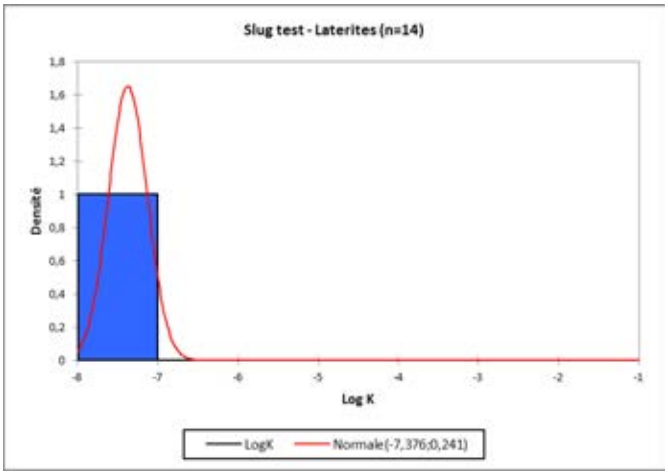


Figure 16 : **Histogramme de fréquence de la conductivité hydraulique estimée par essai slug test mesurée sur les ouvrages captant les latérites.**

Sur les forages ayant fait l'objet de deux types d'essai la valeur issue du pompage d'essai est conservée. La distribution des conductivités hydrauliques mesurées dans les latérites est présentée sur la Figure 17 et hormis trois valeurs (dont une seule >-4 sur la zone du parc à résidus), se concentre autour de logK=-7.

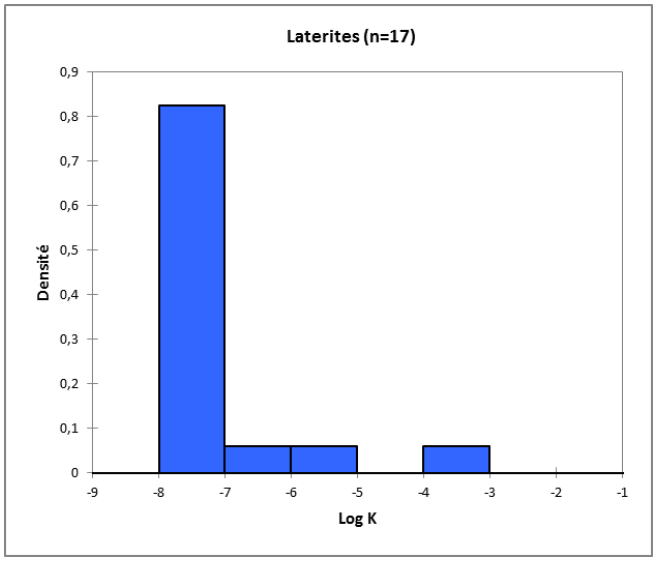


Figure 17 : **Histogramme de fréquence de la conductivité hydraulique sur les ouvrages captant les latérites, tous types d'essai confondus.**

La conductivité hydraulique des latérites de Goro est homogène, de l'ordre de K= 10^{-7} m/s.

Caractérisation de la conductivité hydraulique des saprolites grossières

Treize essais par pompage ont été réalisés sur des piézomètres captant les saprolites (six dans le cadre de cette étude sur la zone de la fosse minière Plaine des Lacs, et sept par Golder en 2008 sur la zone du parc à résidus de la Kué Ouest (Golder Associates, 2008)). La distribution des transmissivités est présentée sur la Figure 18.

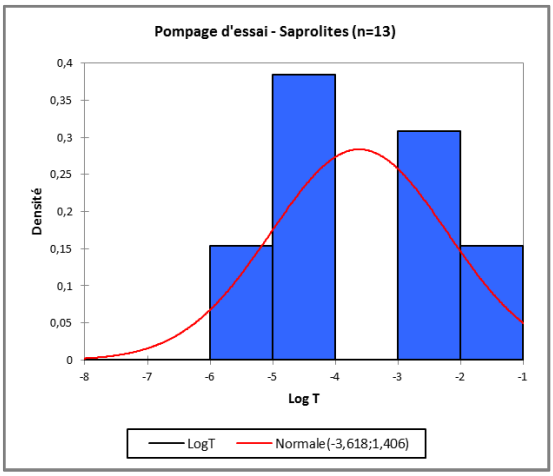


Figure 18 : **Histogramme de fréquence de la transmissivité estimée lors de pompages d'essai sur 13 ouvrages captant l'aquifère des saprolites grossières et péridotites fracturées, secteur de Goro, Massif du Sud.**

La plage de variation de la transmissivité est importante ; logT varie sur 5 ordres de grandeur dans les saprolites sur la zone de Goro : log T moy = -3,6 et écart-type = 1,4.

Le coefficient d'emmagasinement varie entre 10^{-2} et 10^{-5}. Les valeurs élevées se situent exclusivement autour de la zone du parc à résidus de la Kué Ouest (voir Figure 14 pour la localisation).

Un second jeu de valeurs correspond aux essais de type slug test réalisés dans le cadre de cette étude. Vingt-quatre piézomètres captant la saprolite ont été testés. La Figure 19 présente la distribution de la conductivité hydraulique mesurée.

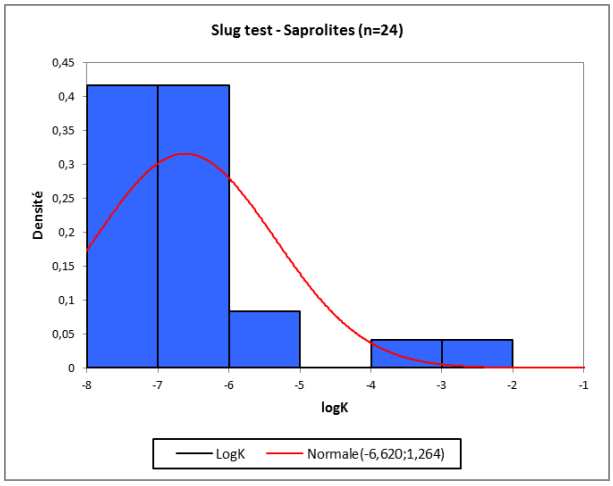


Figure 19 : **Histogramme de fréquence de la conductivité hydraulique estimée à partir d'essais de type slug test sur les ouvrages captant les saprolites grossières et péridotites fracturées, secteur de Goro, Massif du Sud.**

Les deux valeurs élevées (logK > -4) correspondent à des essais slug test dont la réponse est oscillatoire. Comme cela est présenté en documents complémentaires de cette partie, ce type de réponse peut être observé dans les milieux très perméables ou présentant un vide, un sous-cavement. Il est possible qu'une cavité souterraine à l'interface grenaille / latérite rouge soit à l'origine de cette réponse. Une autre hypothèse serait l'existence d'une fracture très ouverte.

Enfin des essais (437 au total) ont été réalisés entre Packer lors de la foration, sur des intervalles de longueur 5 m en moyenne. Parfois l'essai a échoué pour une raison inconnue et aucune valeur n'est estimée, parfois la perméabilité estimée est inférieure, ou supérieure, à la valeur limite de l'essai, respectivement 10^{-8} et 10^{-4} m/s. En utilisant exclusivement les essais pour lesquels une conductivité hydraulique a pu être estimée, 336 valeurs au total sont utilisées pour calculer la conductivité moyenne sur les 42 ouvrages testés (on utilise la moyenne pondérée par la longueur de l'intervalle testé). La distribution des perméabilités estimées par essais entre Packers est présentée sur la Figure 20. Seuls les piézomètres captant les saprolites grossières – péridotites ont été testés.

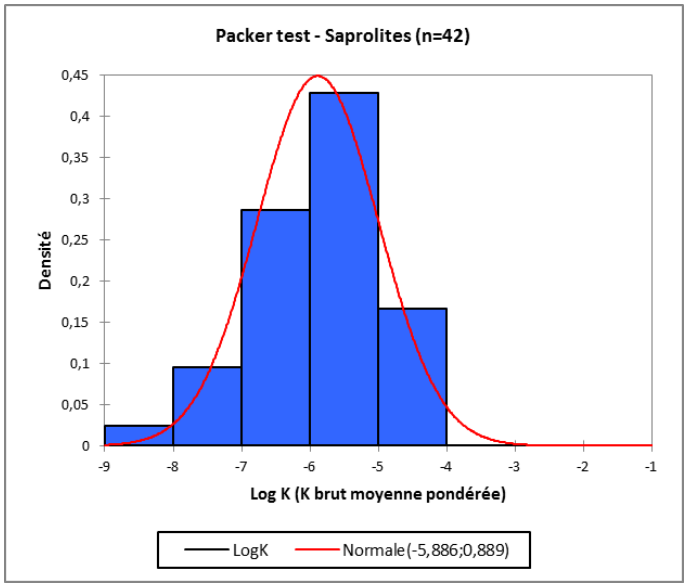


Figure 20 : **Histogramme de fréquence de la conductivité hydraulique estimée par essais entre Packer, sur les ouvrages captant l'aquifère des saprolites grossières et péridotites fracturées, secteur de Goro, Massif du Sud.**

La conductivité hydraulique sur ces 42 ouvrages varie sur 5 ordres de grandeur, entre log K =-8,2 et -4,1, avec log Kmoy = -5,8 et un écart-type de 0,9.

En compilant ces trois types d'essai terrain, on obtient 81 valeurs de conductivité hydraulique. Comme présenté dans le paragraphe suivant, quand plusieurs méthodes ont été appliquées sur un même ouvrage, une seule valeur est utilisée. La Figure 21 présente la distribution de la conductivité hydraulique mesurée sur les 75 piézomètres captant les saprolites grossières – péridotites fracturées.

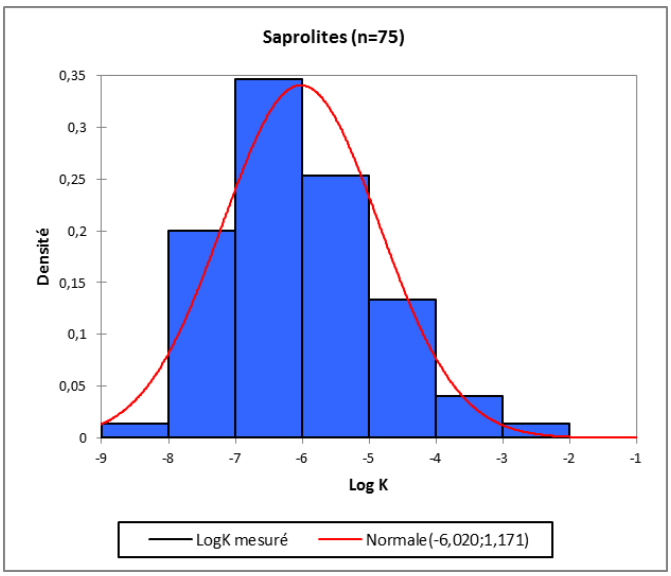


Figure 21 : **Histogramme de fréquence de la conductivité hydraulique estimée sur les ouvrages captant les saprolites grossières et péridotites fracturées, tous types d'essai confondus.**

La distribution quasi normale est unimodale, Log K varie sur huit ordres de grandeur, attestant de la grande variabilité de la conductivité des saprolites grossières et péridotites fracturées sur la zone de Goro. La loi normale qui reproduit le mieux le jeu de données est centrée en logK = -6,0 et l'écart-type vaut 1,2. La répartition géographique de ce paramètre sera considérée dans la section suivante sur la cartographie des zones de drainage sur le massif de Goro.

2.3.2.1.3. Essais hydrauliques sur d'autres massifs de péridotites

Des essais de type slug test ont été réalisés sur d'autres massifs de péridotites en Nouvelle-Calédonie. En 2014, deux essais ont été réalisés sur le massif de Poro sur un trou nu protégé en tête par un PVC, et sur un piézomètre équipé (Verdier, 2014). Enfin, en 2015 une mission de l'équipe HYPERK a eu lieu sur la mine de la SMN (Société des Mines de Nakety, groupe Ballande) pour réaliser des essais sur leur réseau de piézomètres. Malheureusement, compte tenu des tubages de petite dimension, des forages parfois non parfaitement verticaux et surtout à cause des niveaux piézométriques très bas, les essais hydrauliques n'ont pas permis d'obtenir des valeurs de conductivité hydraulique.

Tableau 1 Résultats des essais slug tests réalisés sur les ouvrages du site de Poro

Nom ouvrage	Profondeur ouvrage (m/sol)	Lithologie captée	Conductivité hydraulique (m/s)
ISA03	15	Saprolites grossières et péridotites fracturées	$5{,}5.10^{-7}$
ISA17	12		$4{,}5.10^{-8}$

2.3.2.2. Distribution de la conductivité hydraulique par lithologie

Les données par massif ont montré de fortes similitudes sur les gammes de valeur et de variation de la conductivité hydraulique des péridotites de Nouvelle-Calédonie. Sur la Figure 22 sont indiquées les valeurs moyennes et les écarts-type pour l'ensemble des mesures en fonction de la lithologie.

Sur la boite à moustaches sont aussi représentées les valeurs médianes, les premier et troisième quartiles (50% des données centrales se trouvent entre ces deux limites, 25% se trouvent au-dessus et 25% en-dessous). Les données situées hors des extrémités sont considérées comme des valeurs extrêmes (c'est-à-dire hors d'une distribution gaussienne), c'est le cas d'une valeur très élevée de perméabilité mesurée sur un ouvrage captant les latérites.

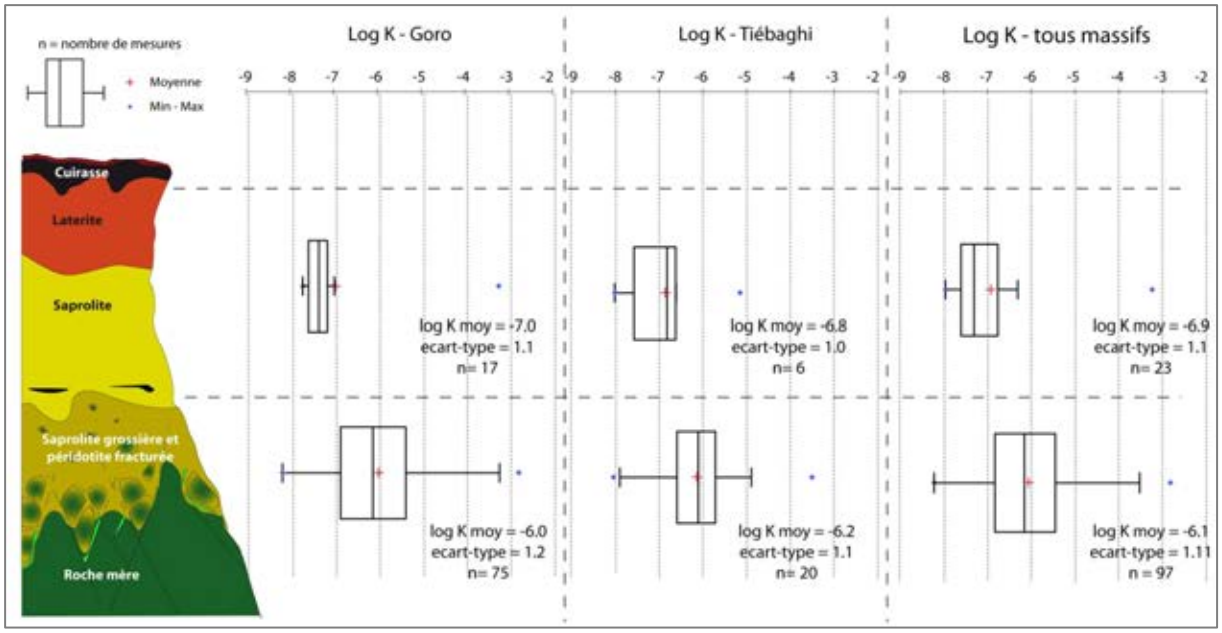


Figure 22 : **Valeurs de conductivité hydraulique sur les latérites et sur les saprolites grossières et péridotites fracturées, données des massifs de Goro (n=92), Tiébaghi (n=26), et Poro (n=2).**

Il apparait nettement que la distribution des valeurs est peu étalée pour le niveau des latérites, ou niveau aquitard, alors que les conductivités hydrauliques mesurées sur les saprolites grossières et péridotites fracturées sont fortement variables, de très perméables à quasi imperméables, mettant en évidence une hétérogénéité importante à l'échelle des essais hydrauliques.

Dans la section suivante, les hétérogénéités de l'aquifère vont être considérées spatialement et mises en relation avec d'autres paramètres hydrodynamiques liés à la piézométrie de l'aquifère.

2.3.3. ANALYSE DE L'EFFET D'ÉCHELLE

Schulze-Makuch et al. (1999) étudient l'effet d'échelle observé sur la conductivité hydraulique. Ils expliquent que cet effet résulte de l'existence d'hétérogénéités de types fractures ou conduits karstiques qui constituent des chemins préférentiels pour l'écoulement. Selon ces mêmes auteurs, l'hétérogénéité d'une formation géologique est estimée selon la variance des conductivités hydrauliques estimées à une même échelle, l'échelle du forage dans le cas de cette étude, qui intègre le plus grand nombre de données. Si la variance de la conductivité hydraulique est inférieure à 0.5 cycles log, l'unité géologique est considérée homogène ; si cette condition n'est pas vérifiée, l'unité géologique est considérée hétérogène ; c'est le cas des latérites et des saprolites grossières – péridotites fracturées de Nouvelle-Calédonie.

2.3.3.1. Méthode

La relation entre la conductivité hydraulique et l'échelle de mesure est examinée. Pour cela trois paramètres peuvent être considérés : la distance parcourue par la dépression pendant l'essai, le rayon d'influence, ou le volume du milieu testé (Schulze-Makuch *et al.*, 1999). Dans notre cas, c'est le rayon d'investigation qui est considéré. Il est calculé selon les formules suivantes :

- pour un pompage d'essai, $Re = \sqrt{\frac{2.25 * T \times t_p}{S}}$ (m) avec T la transmissivité (m²/s) et S le coefficient d'emmagasinement (-), et t_p le temps de pompage pour chaque essai (s) (selon la formule de Jacob);
- pour un essai slug test : Re = f(rayon du forage, hauteur mouillée, paramètres de forme)(Bouwer et Rice, 1976).

Les mesures de perméabilité in situ sont complétées par une estimation de la perméabilité minimale basée sur les débits des creeks drainant l'aquifère (Dewandel *et al.*, 2004). La relation linéaire entre le débit mesuré et la surface drainée doit être vérifiée pour que la relation soit appliquée. Basée sur la méthode de Boussinesq, une loi empirique est établie, et permet d'estimer la perméabilité en fonction du débit drainé en période de basses eaux : $Q = 2l\frac{0.862\ K\ h^2}{L}$, avec

- l= longueur du creek pérenne ;
- L = largeur de l'aquifère ;
- h = niveau piézométrique ;
- K = perméabilité (m/s).

La Figure 23 présente schématiquement les paramètres de la formule précédente.

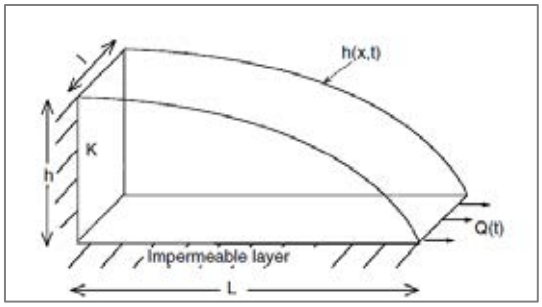


Figure 23 : **Coupe schématique du modèle de Boussinesq pour l'estimation de la perméabilité à l'échelle du bassin versant (Dewandel *et al.*, 2004).**

Le rayon d'action associé à la valeur de perméabilité estimée à l'échelle régionale correspond à la distance moyenne entre le point d'entrée et l'exutoire, c'est-à-dire la demi-largeur du bassin versant.

2.3.3.2. Effet d'échelle sur la conductivité hydraulique

L'ensemble des résultats des essais hydrauliques est compilé et complété par l'estimation de la conductivité hydraulique sur les bassins versants de la Wadjana, de la Truu et du Creek de la Crête Sud qui drainent l'aquifère des saprolites grossières et péridotites (Roche, 2014). La Figure 24 présente la variation du débit avec la surface drainée ; la relation est linéaire et la loi définie par Dewandel (2004) peut être appliquée aux creeks de Goro.

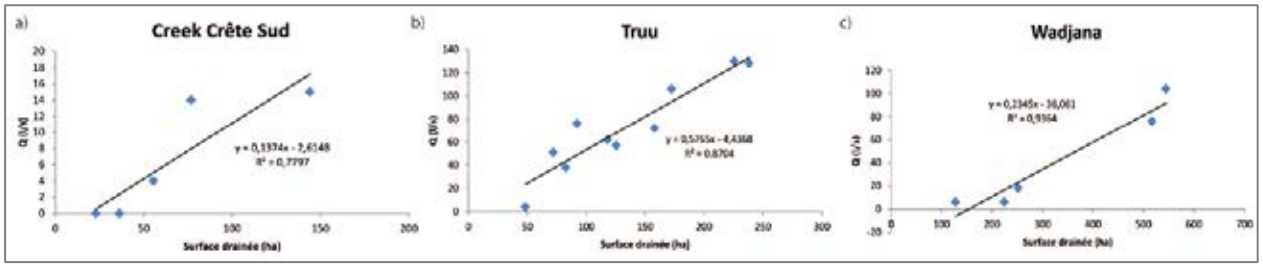


Figure 24 : **Variation du débit des rivières en fonction de la surface drainée, secteur de Goro (données Vale NC).**

Les Figure 25 et Figure 26 présentent la conductivité hydraulique en fonction du rayon d'investigation des essais réalisés sur le massif de Tiébaghi et sur le secteur de Goro dans le Massif du Sud.

Sur Tiébaghi (Figure 25), on observe une forte variabilité de la conductivité hydraulique pour un rayon d'investigation compris entre 1 et 10 m. La dispersion des données diminue avec le rayon d'investigation. Un seuil est observé pour un rayon de 10 – 20 m avec une augmentation de la conductivité hydraulique, qui se stabilise à plus grande échelle (échelle régionale) autour de 10^{-6} m/s.

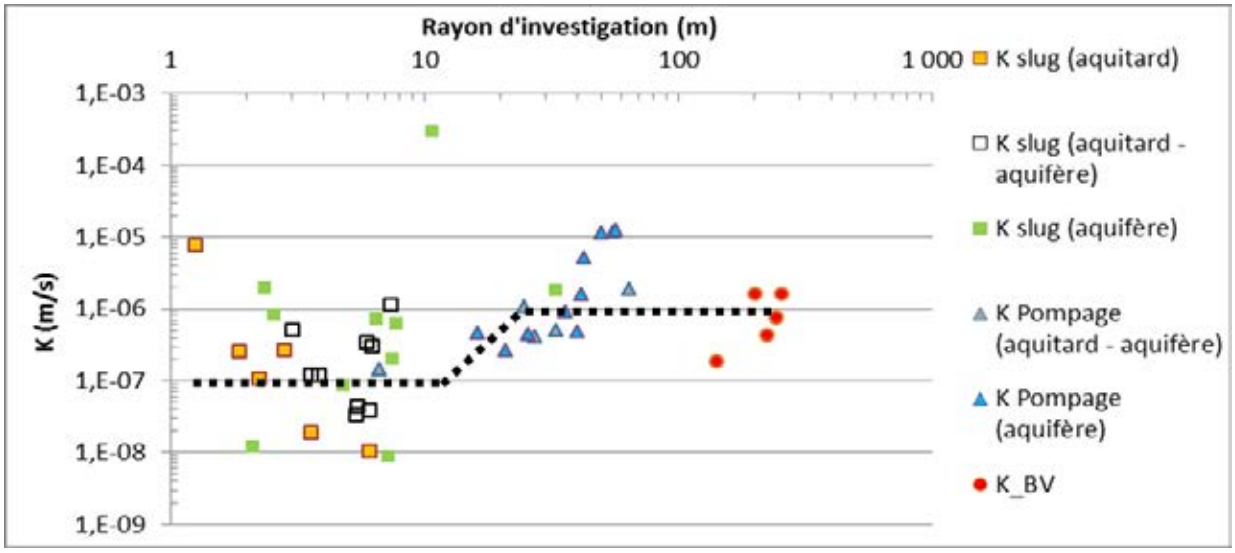


Figure 25 : **Conductivité hydraulique en fonction du rayon d'investigation sur le massif de Tiébaghi.**

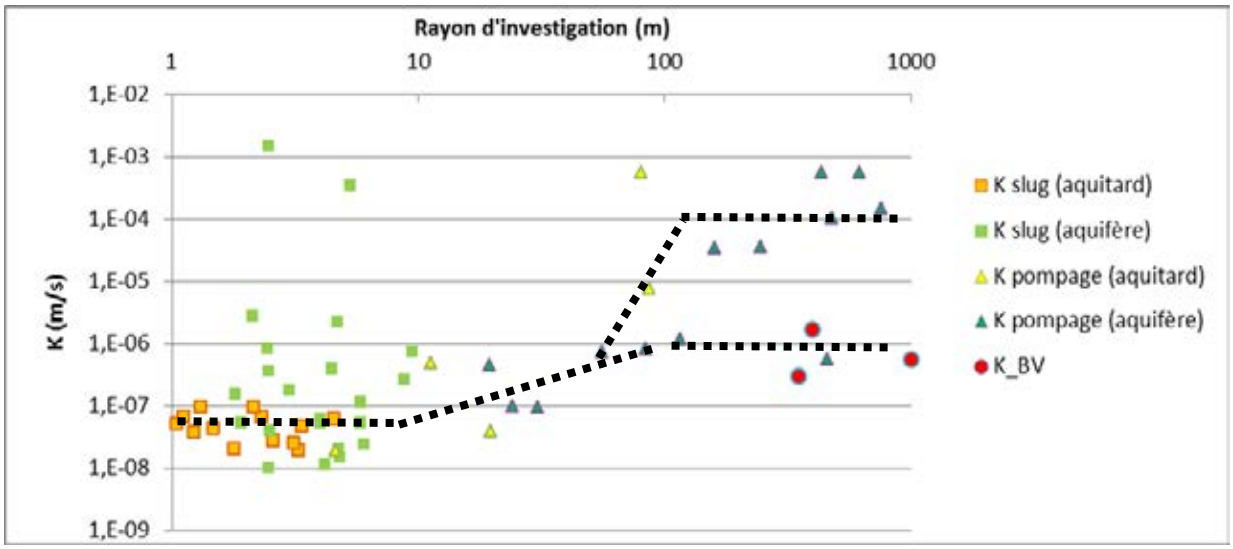


Figure 26 : **Conductivité hydraulique en fonction du rayon d'investigation sur le secteur de Goro, Massif du Sud.**

Les données de terrain sur Goro, essais slug tests et pompages d'essais, montrent également un effet d'échelle caractéristique des milieux hétérogènes avec une augmentation de la perméabilité avec le rayon d'investigation, et notamment un seuil atteint pour un rayon de l'ordre de 10 m. Un second seuil est observé autour de 100 m. La distribution est plus complexe avec deux tendances et une conductivité hydraulique qui se stabilise autour de 10^{-4} m/s et autour de 10^{-6} m/s.

À l'échelle hectométrique à kilométrique, on observe donc une augmentation de la conductivité hydraulique qui traduit la probabilité d'intersecter des fractures drainantes, que l'on observe également à petite échelle.

Sur Goro, on observe donc deux plateaux à grande échelle ; on peut expliquer ces deux tendances par la distribution géographique des pompages d'essais longue durée qui montrent des conductivités hydrauliques élevées; en effet ces points sont localisés sur un secteur particulier (Kué Ouest et proche du Parc à Résidus). Sur ce secteur les fractures régionales sont certainement bien connectées ou bien drainées. Une autre hypothèse est que, sur Goro, la distribution des conductivités hydrauliques sur plusieurs ordres de grandeur est identique à toutes les échelles investiguées et le « plateau » observé dans les milieux hétérogènes n'est pas atteint.

Ainsi, la relation entre la conductivité hydraulique et le rayon d'investigation met en évidence un seuil autour de 10 – 20 m. Il est vraisemblablement lié à un réseau de fractures plus perméables de dimension pluri-décimétrique. Ce type de distribution est observée par Rovey et Cherkauer (1995) ; ils l'expliquent par le fait qu'à petite échelle la conductivité hydraulique et les écoulements sont peu influencés par les rares hétérogénéités qui augmentent fortement la perméabilité et les écoulements à l'échelle régionale. Cependant en moyenne, la conductivité hydraulique locale et régionale est proche, seul un facteur 10 les distingue. La fracturation à l'origine de cet effet d'échelle doit ainsi être considérée et caractérisée.

Sur Goro, il existe un second seuil plus significatif à l'échelle hectométrique avec localement une conductivité hydraulique proche de 10^{-4} m/s, lié probablement à un réseau de fractures qui est localement très perméable (plus ouvert), ou mieux connecté.

2.4. L'ANALYSE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FRACTURATION (WP3)

2.4.1. ANALYSE DE LA PERMÉABILITÉ EN LIEN AVEC LA FRACTURATION

L'analyse fine de la fracturation des cinq forages profonds et l'étude de la fracturation sur affleurement a permis de mettre en évidence une fracturation dense des péridotites, et une altération plus ou moins importante associée à ces fractures. L'altération est plus ou moins intense, marquée par exemple par une oxydation de surface ou un remplissage de matériaux fins latéritiques, en fonction du forage, de la profondeur et *a fortiori* de la connectivité des fractures qui est variable, drainant ou non à l'état actuel comme il l'a été observé dans le tunnel Chromical.

Sur les quatre forages du Koniambo des essais de perméabilité ont été réalisés à différentes profondeurs et permettent d'analyser la relation entre la fracturation et la conductivité hydraulique du milieu. L'objectif est d'estimer la perméabilité des péridotites fracturées, établir la géométrie et le fonctionnement hydrodynamique du socle.

Pour chaque intervalle de forage testé par essai Lefranc, l'analyse de la fracturation est réalisée et notamment les paramètres « densité de joints » et pourcentage de la longueur testée de type altérée / fracturée.

Cette analyse montre que :

- la perméabilité diminue avec la profondeur, avec la densité de fractures individuelles (joints cassés et ouverts) et avec la densité de joints présentant une minéralisation de type supergène ;
- la perméabilité croit avec le pourcentage de longueur de zone altérée par intervalle et avec la densité de joints présentant une altération aux épontes ;
- La perméabilité ne semble aucunement corrélée avec le pourcentage de longueur de zone fortement fracturée.

Ces observations permettent d'établir que:

- la perméabilité des zones fortement altérées est plus élevée que celle de la matrice péridotitique ; sur les intervalles totalement altérés la conductivité hydraulique est en moyenne $K=1.24\ 10^{-5}$ m/s, soit log K=-4.9 ;
- les joints montrant une altération aux épontes favorisent l'écoulement et sont ouverts *in situ* ;
- La majorité des joints cassés décrits sont vraisemblablement scellés ou très peu ouverts *in situ* et ne contribue pas ou peu à l'écoulement souterrain. Ils résultent des contraintes exercées lors de la foration et/ou de la remontée de la carotte. Les résultats de ce calcul tendent même à montrer que les joints présentant une minéralisation supergène, donc qui ont été ouverts au cours de l'histoire post-obduction, sont aujourd'hui scellés et ne contribuent pas aux écoulements ;
- la diminution de la perméabilité avec la profondeur est à relier à la diminution du nombre de zones altérées avec la profondeur. A l'inverse la densité des joints augmente avec la profondeur, en « compensation » des zones altérées et explique probablement la corrélation négative entre la densité de joints et la perméabilité ;

- Les zones fortement fracturées ne marquent pas la perméabilité. On peut penser que ces zones densément fracturées seraient scellés *in situ*. Une autre hypothèse est que ces zones sont trop localisées et ne marquent pas statistiquement les mesures de perméabilité.

Une analyse par composantes principales (ACP) a été réalisée sur un jeu de paramètres légèrement modifié. La valeur de la perméabilité a été « transformée » de sorte à utiliser un paramètre de type binaire selon que la valeur mesurée est supérieure ou inférieure à la valeur de log K = -5. Ce calcul doit permettre d'appuyer certaines relations entre paramètres.

Cette analyse permet de montrer que les joints cassés sont majoritaires mais qu'ils sont majoritairement fermés *in situ*, et que les zones bréchifiées très localisées peuvent être assimilées à des joints cassés de forte densité.

2.4.2. SYNTHÈSE SUR LA STRUCTURE ET LA PERMÉABILITÉ DES PÉRIDOTITES DU SOCLE

2.4.2.1. Synthèse des travaux

La fracturation des péridotites a été étudiée qualitativement et quantitativement à l'échelle centimétrique (carottes du massif du Koniambo et du Massif du Sud), décamétrique et hectamétrique (affleurements du Massif du Sud et de Tiébaghi). Une approche similaire a été réalisée sur la perméabilité à partir des données d'essais *in situ* et de l'estimation de la perméabilité dans la galerie Chromical qui aboutit à une valeur de perméabilité plus intégratrice.

Les différentes observations convergent et permettent d'établir que :

- La fracturation des péridotites est intense et comprise d'après les observations des carottes, à l'échelle centi- à métrique, entre 3 et 5 fractures par mètre ;
- La fracturation est associée au réseau serpentineux pré-existant ;
- L'altération *per descendum* emprunte *a fortiori* préférentiellement les discontinuités verticales ;
- Dans le pseudo-épikarst, le réseau de fractures percole dans toutes les directions ;
- Des niveaux altérés sont observés sur une longueur de plusieurs mètres jusque 180 m de profondeur sous la surface du sol ;
- Ces niveaux altérés portent la perméabilité ;
- L'espacement moyen de ces zones altérées est de l'ordre de 30 m verticalement;
- A plus grande profondeur, entre 200 et 400 m sous la surface du sol, les fractures sans trace macroscopique d'altération supergène drainent de l'eau souterraine et sont espacées de 200 m environ ;
- La perméabilité et sa gamme de variation diminuent avec la profondeur.

2.4.2.1.1. Apports de la géophysique sur la structure du socle

Les études présentées ont permis de mieux caractériser la structure des péridotites depuis l'horizon pseudo-épikarstique ou encore depuis le toit des saprolites grossières jusqu'à 400 m de profondeur pour le massif de Tiébaghi, à partir d'observations locales. Les données de géophysique sont considérées ici car elles apportent une vision plus régionale, mais aussi plus intégratrice de la structuration du socle. Deux méthodes de géophysiques sont utilisées : la tomographie électrique au sol et l'électromagnétisme par levé aéroporté. Quelques résultats obtenus sur le massif de Koniambo sont présentés ici.

La tomographie électrique 2D est utilisée sur les massifs miniers depuis une dizaine d'années (Robineau *et al.*, 2007; Savin *et al.*, 2003). La présence de serpentine peut rendre l'interprétation structurale difficile puisque la serpentine ou la péridotite serpentinisée, est caractérisée par une résistivité très faible (<100 Ω). Elle peut donc être confondue avec la saprolite grossière qui présente des résistivités similaires. Si l'anomalie conductrice est large on peut penser à un encaissant serpentinisé alors qu'une structure étroite sera plutôt associée à une structure géologique, très souvent serpentinisée.

Sur le massif de Koniambo une campagne de tomographie a été réalisée en 2012 (Geophysical, 2013). Sur le profil MZ08b (Figure 27) deux structures moins résistantes sub-verticales sont observées. Elles traversent tout le profil, soit près de 90 m de profondeur, sont espacées de moins de 400 mètres et sont larges d'environ 40 m.

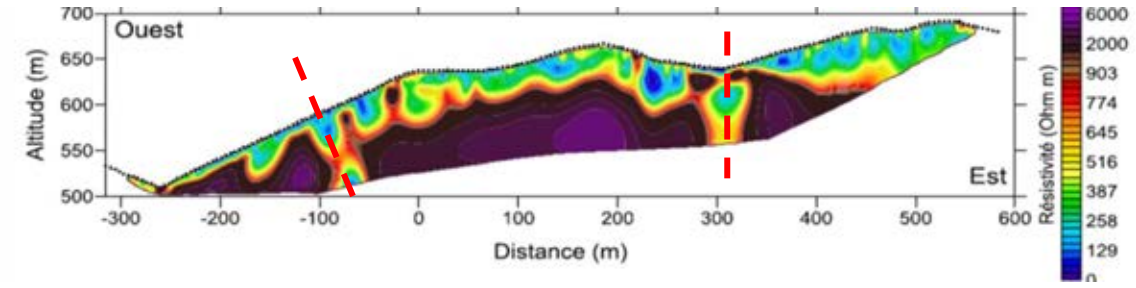


Figure 27 : **Résultats de l'inversion du profil de résistivités MZ08b (Geophysical, 2013), massif de Koniambo. Structures mises en évidence par géophysique en pointillés rouge.**

L'électromagnétisme en domaine temporel (TDEM) est une méthode géophysique permettant de caractériser la distribution de la conductivité électrique des roches de subsurface. Celle-ci opère par induction de courants de Foucault dans le sous-sol et en analysant l'amplitude de sa dissipation. Le système SkyTEM développé par une équipe danoise a été utilisé en Nouvelle-Calédonie. En 2015, un levé géophysique a été réalisé sur différents secteur dans le cadre du projet CNRT « OPHIOSTRUCT » dont l'objectif est de caractériser la structuration de l'ophiolite. Les secteurs levés qui sont présentés ici concernent : le massif de Koniambo, le massif de Boulinda et le massif du Sud.

Sur le massif du Koniambo, la profondeur de pénétration est variable mais peut atteindre 400 m. Sur l'extrémité SE d'un profil NW SE réalisé dans le secteur nord du massif (Figure 28), on image nettement la semelle de serpentine (limite marquée par le trait continu noir) et latéralement on observe de nombreuses discontinuités moyennement à peu pentées qui découpent le massif. Quelques-unes de ces discontinuités sont présentées sur la figure par des tiretés noirs. Leur espacement est kilométrique et elles traversent tout le massif. Ces fractures d'origine tectonique structurent le massif à l'échelle régionale. Notons enfin qu'un milieu moins résistant que le socle suit la topographie et est imagé sur l'ensemble du profil.

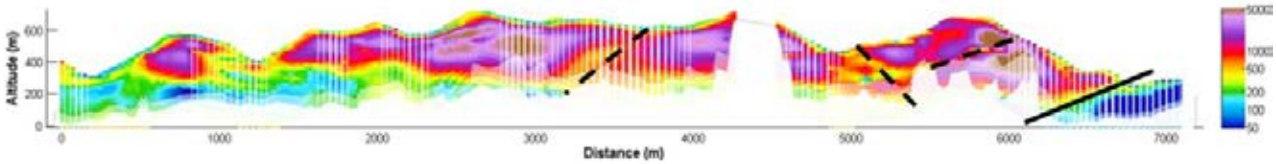


Figure 28 : **Résistivités mesurées sur la coupe WE03 sur le massif du Koniambo orientée NW - SE.**

Les résultats de géophysiques mettent en évidence une structuration des massifs à l'échelle hecto à kilométrique. Des structures tectoniques traversent les massifs et sont observées jusque plusieurs centaines de mètres de profondeur. Leur espacement est variable et compris entre 50 et plusieurs centaines de mètres.

2.4.2.1.2. Modèle de socle fracturé des péridotites de Nouvelle-Calédonie

La structure du socle a été étudiée à différentes échelles et la fracturation des péridotites a pu être approchée à différents niveaux dans le socle et sur différents massifs. Il en résulte des concordances qui permettent de proposer un modèle de socle fracturé des péridotites de Nouvelle-Calédonie.

On a montré d'abord que le réseau serpentineux correspond aux discontinuités qui guident l'altération. Ce réseau résulte d'abord de la serpentinisation à la dorsale et est associé à un réseau anastomosé. Il est lié également à la semelle tectonique et à la mise en place de l'ophiolite ; on observe alors un gradient décroissant du taux de serpentinisation de la semelle vers la surface, mais qui reste très élevé (Orloff, 1968). La serpentinisation crée une augmentation de volume et une microfissuration à l'origine de la perméabilité de la matrice, et qui va favoriser les écoulements et permettre l'altération supergène. Dewandel *et al*. (2005) observent qu'en Oman la serpentinisation est telle que la perméabilité de la matrice est de l'ordre de 10^{-9} m/s (et ce sans lien avec l'altération supergène). L'espacement des fractures sur affleurement et sur carottes est de l'ordre de 0.2 à 0.3 m. Cet ordre de grandeur est utilisé pour représenter le réseau de plans serpentineux à l'origine de la perméabilité de « la matrice fracturée » des péridotites bien qu'à une échelle microscopique ce réseau existe également. Ce réseau qui apparait ouvert sur les carottes et sur les affleurements de la zone pseudo-épikarstique est scellé, en tous cas macroscopiquement, en profondeur. Par l'effet de l'écoulement *per descensum*, les plans verticaux sont préférentiellement empruntés par l'eau météorique.

A ce réseau de discontinuité « primaire » des discontinuités observées à plus grande échelle sont observées. Elles sont majoritairement verticales à sub-verticales. Leur espacement est de l'ordre de la cinquantaine à la centaine de mètres d'après les données sur les carottes de Koniambo et Goro, mais également d'après les observations dans la galerie profonde Chromical ou encore d'après les données de géophysique. Ce réseau de fractures pourrait être attribué aux fractures tectoniques ou aux discontinuités lithologiques comme le cortège filonien.

Les observations sur les carottes et la galerie souterraine mettent en évidence une limite de l'altération en profondeur. Les fractures drainantes sont plus espacées et les traces d'altération sont absentes à l'échelle macroscopique. Ces observations permettent d'affirmer qu'avec la profondeur la connectivité des fractures diminue. Ceci corrobore avec la diminution de la perméabilité avec la profondeur qui peut s'expliquer par la diminution de la densité de fracture ou leur fermeture. Il a été démontré que la pré-structuration des péridotites qui correspond à la « matrice fracturée » est uniforme en profondeur, on peut donc favoriser l'hypothèse d'une fermeture des fractures avec la profondeur et la pression lithostatique, et l'absence d'exutoire pour les eaux souterraines.

La Figure 29 présente un massif de péridotites et la structure du socle établie à partir des observations précédentes. Les différents éléments issus de l'analyse qualitative de la fracturation sont intégrés, définis et représentés. On distingue deux niveaux de fracturation : une péridotite caractérisée par une pré-structuration à l'échelle décimétrique nommée « matrice fracturée » (a) sur laquelle se surimpose un réseau secondaire (b et c). Les fractures à l'origine du drainage profond sont intégrées et associées à ce réseau secondaire, lié aux discontinuités tectoniques ou lithologiques. Notons que ces discontinuités sont très probablement également liées à la pré-structuration par le réseau serpentineux. Ce réseau secondaire se distingue en deux niveaux selon sa profondeur : proche de la surface l'espacement des fractures est plus faible et l'altération météorique marque les fractures (b), alors qu'en profondeur l'espacement augmente et l'altération supergène n'est pas visible macroscopiquement (c). Enfin une gamme de valeurs de perméabilité est proposée pour chaque élément de la structure du socle.

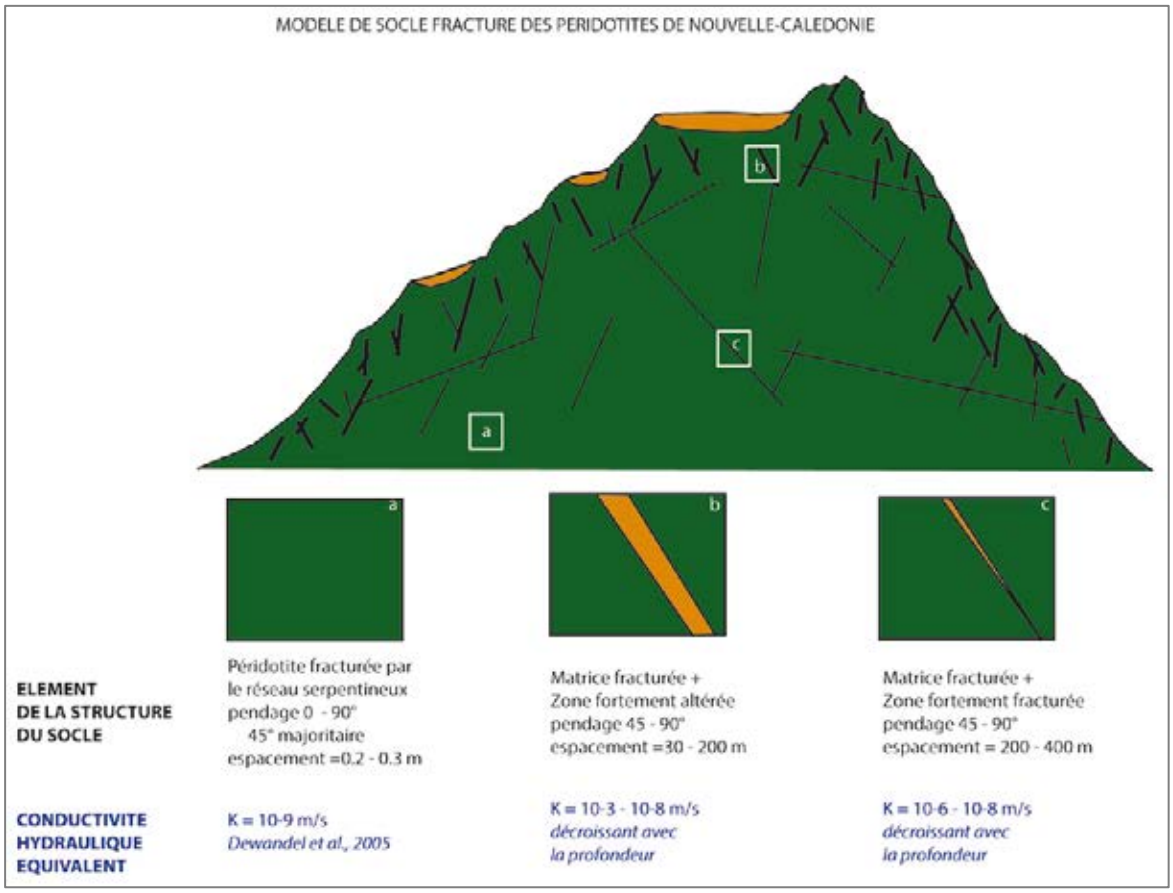


Figure 29 : **Modèle de socle fracturé des péridotites de Nouvelle-Calédonie.**

2.5. APPLICATION À LA GESTION MINIÈRE (WP4)

2.5.1. ELABORATION DE MODÈLES NUMÉRIQUES À L'ÉCHELLE DU MASSIF

Trois modèles numériques ont été construits à l'échelle du massif. Il s'agit de tester la capacité d'un modèle hydrodynamique unifié à générer la diversité des contextes hydrogéologiques observés sur les différents types de massif sur la base d'une conductivité hydraulique homogène. Des modèles à deux dimensions sont construits sur trois massifs représentatifs des morphologies caractéristiques des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie : plateau non drainé, plateau disséqué drainé et bassin. Les paramètres les plus représentatifs mais également les plus intégrateurs sont choisis, dans le but d'évaluer l'influence de la géomorphologie sur l'hydrogéologie du système. La validité des modèles sera évaluée à partir des caractéristiques hydrogéologiques du massif étudié : son état de saturation ou encore la localisation des zones d'émergence. L'outil utilisé est le code d'éléments finis Feflow® développé par DHI-WASY (Diersh, 2014). Ainsi, il est proposé de modéliser les massifs par un plan parallèle au sens régional d'écoulement et défini par des conditions aux limites bien identifiées.

2.5.1.1. Géométries 2D et conditions aux limites

Le principe de structuration multicouche de l'hydrosystème est identique pour les trois modèles. Le milieu modélisé est un milieu multicouche dont les conductivités hydrauliques sont homogènes. Ces paramètres intégrateurs doivent permettre de modéliser l'hydrosystème péridotitique à l'échelle du massif, c'est également ce qui est testé dans ce travail de modélisation.

La longueur des profils simulés est de 2000 m ; cette longueur permet d'établir sur les trois massifs une coupe représentative de la géomorphologie du massif. La recharge appliquée à tous les modèles correspond à une recharge moyenne évaluée à 400 mm/an. En prenant une recharge identique pour les trois massifs, les paramètres d'entrée des modèles sont identiques et seule l'influence de la géomorphologie est évaluée.

Les conditions aux limites des modèles sont identiques pour les trois modèles et consistent en :

- Une limite amont à potentiel imposé dans la couche aquifère, lorsque ce potentiel peut être défini à partir d'une carte piézométrique existante sur le secteur modélisé (cas de Tiébaghi). En l'absence de cette information, la limite amont du modèle est choisie comme une limite à flux nul au niveau d'une crête topographique. Cette limite est considérée comme une ligne de partage des eaux souterraines (cas de Goro);
- Un potentiel imposé sur la limite verticale à l'aval du modèle qui est choisie pour correspondre à un creek drainant la nappe.

Enfin, les critères morphologiques utilisés pour construire la géométrie du modèle sont appliqués aux zones de recharge. Sur les zones de replat où les latérites sont conservées et affleurent, la recharge est appliquée. Sur les zones de pente, le modèle ne rentre aucun flux. Cette hypothèse est d'une part cohérente avec les choix habituels des modélisateurs (Golder Associates, 2014; Vale Nouvelle-Calédonie, 2015), mais se justifie également dans le cadre du bilan hydrologique et de la capacité d'infiltration d'un aquifère (Dörfliger et Plagnes, 2009; Verdier, 2014). Les zones de pente sont à l'inverse des lignes de résurgence potentielle de la nappe.

Une contrainte de potentiel est également ajoutée à la recharge. Si la charge hydraulique dépasse le niveau topographique, la condition aux limites est modifiée et devient une condition de type potentiel avec h = z. Ce choix permet de limiter la recharge sur les zones

où la charge piézométrique ne permet plus d'infiltrer et permet même de faire sortir de l'eau du système.

Sur la zone de pente, où le profil d'altération est érodé et la recharge nulle, une condition de potentiel est imposée avec condition de flux maximum. Ainsi, la charge imposée correspond à l'altitude et si cette valeur est dépassée, le modèle sort de l'eau du système. Aucun flux entrant ne peut avoir lieu. Ce choix se justifie par le fait que la zone de pente correspond au niveau d'émergence de lignes de sources.

Les Figures 30, 31 et 32 présentent pour chacun des trois modèles :

- la localisation de la coupe topographique sur fond de carte topographique d'une part et géologique d'autre part (Figures a) ;
- les données de sondages ou autres, utilisées pour construire la couche des latérites et obtenir les données piézométriques (Figures b) ;
- et enfin le modèle numérique Feflow® avec les conditions aux limites utilisées, la géométrie et les informations hydrogéologiques disponibles (Figures c).

2.5.1.2. Résultats

La Figure 33 présente les résultats en termes de vitesse d'écoulement et bilan de flux dans le système. La surface piézométrique (Pression nulle) et les isopièzes sont également représentées.

Ces résultats permettent de discuter l'influence de la géomorphologie d'un massif pour expliquer son état de saturation. Ces modèles montrent que ce paramètre explique à lui seul les piézométries affleurantes et sub-affleurantes sur les massifs de type bassin et plateau, et une piézométrie très basse, à 150 m sous la topographie, sur le massif de type plateau disséqué.

L'utilisation d'une valeur de recharge plus proche de celle estimée sur les massifs modélisés ne modifiera pas les résultats et la démonstration. En effet, une recharge plus forte sur Goro confortera les résultats obtenus c'est-à-dire une nappe sub-affleurante, et une recharge plus faible sur le massif du Koniambo confirmera la désaturation du massif. La valeur moyenne de 400 mm/an permet ainsi de modéliser une géomorphologie plutôt qu'un massif en particulier.

Enfin, ces modèles numériques valident à l'échelle du massif, les hypothèses d'un modèle multi-couches dont les conductivités hydrauliques peuvent être en première approximation affectées de manière homogène à la valeur moyenne calculée sur l'ensemble des massifs.

Cette approche globale nécessite d'être précisée à l'échelle du site par la prise en compte des variations des épaisseurs des couches et des conductivités hydrauliques. Les épaisseurs sont généralement disponibles à l'échelle du site grâce aux logs de forages en revanche les mesures de conductivités hydrauliques nécessitent des investigations spécifiques.

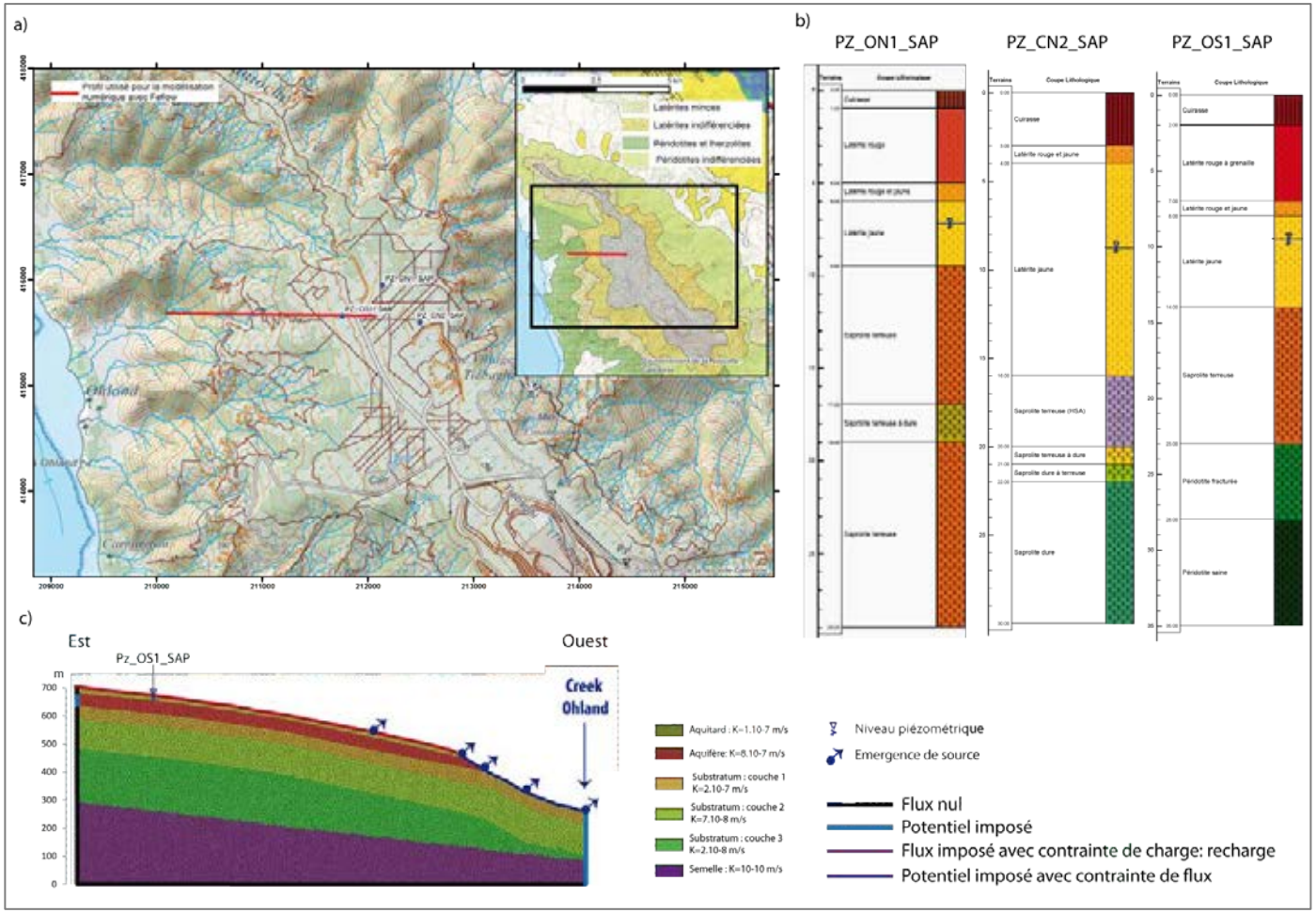


Figure 30 : **Modèle 2D d'un massif type "plateau" : a) localisation de la coupe topographique sur le Massif de Tiébaghi sur fond de carte topographique et carte géologique, b) Logs lithologiques de trois forages du plateau, et c) coupe et modèle numérique du massif de Tiébaghi.**

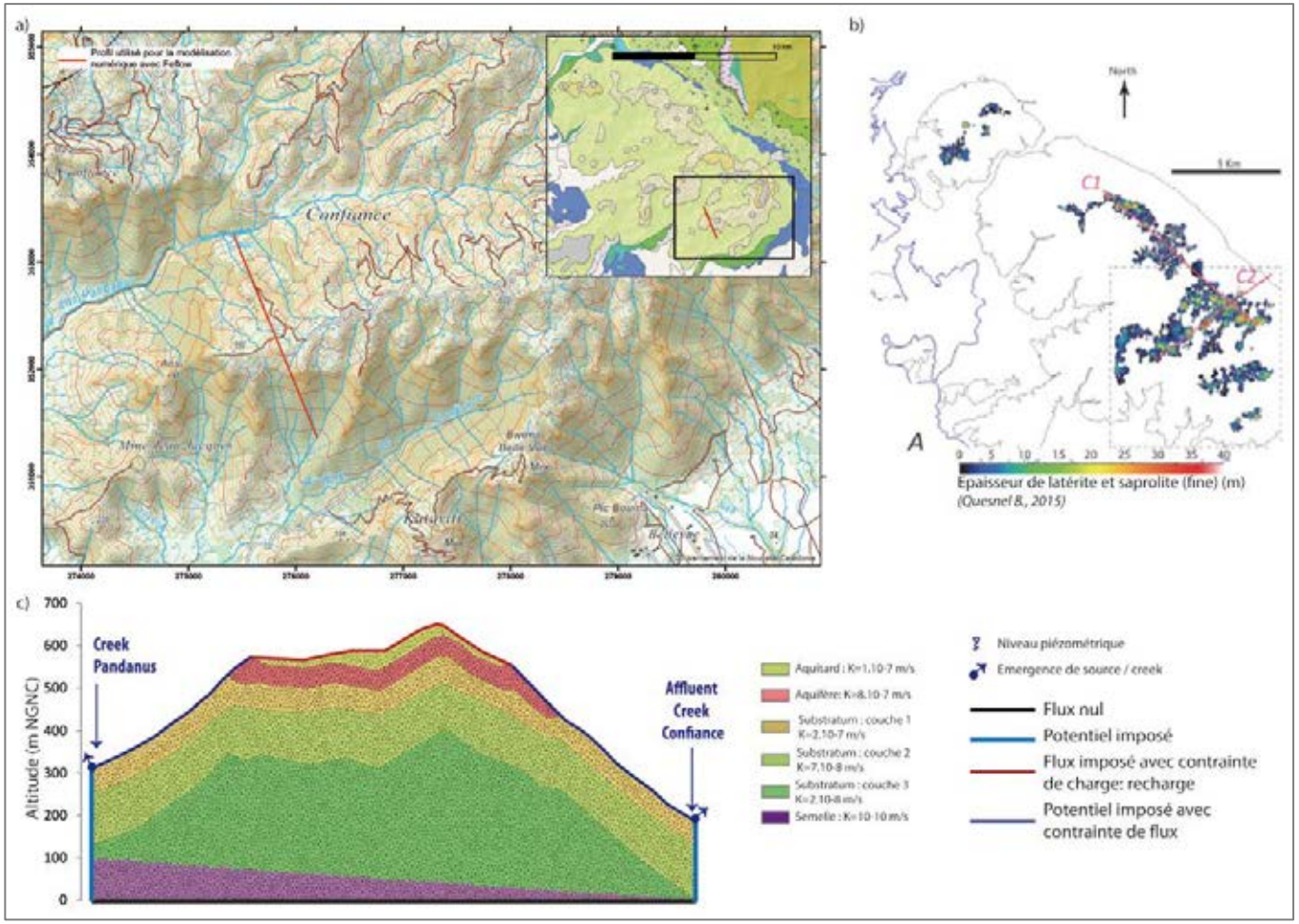


Figure 31 : **Modèle 2D d'un massif type "plateau disséqué" : a) localisation de la coupe topographique sur le Massif de Koniambo, b) Epaisseur de l'aquitard, d'après Quesnel (2015), et c) coupe et modèle géologique du massif de type plateau disséqué, drainé de part et d'autre du plateau cuirassé.**

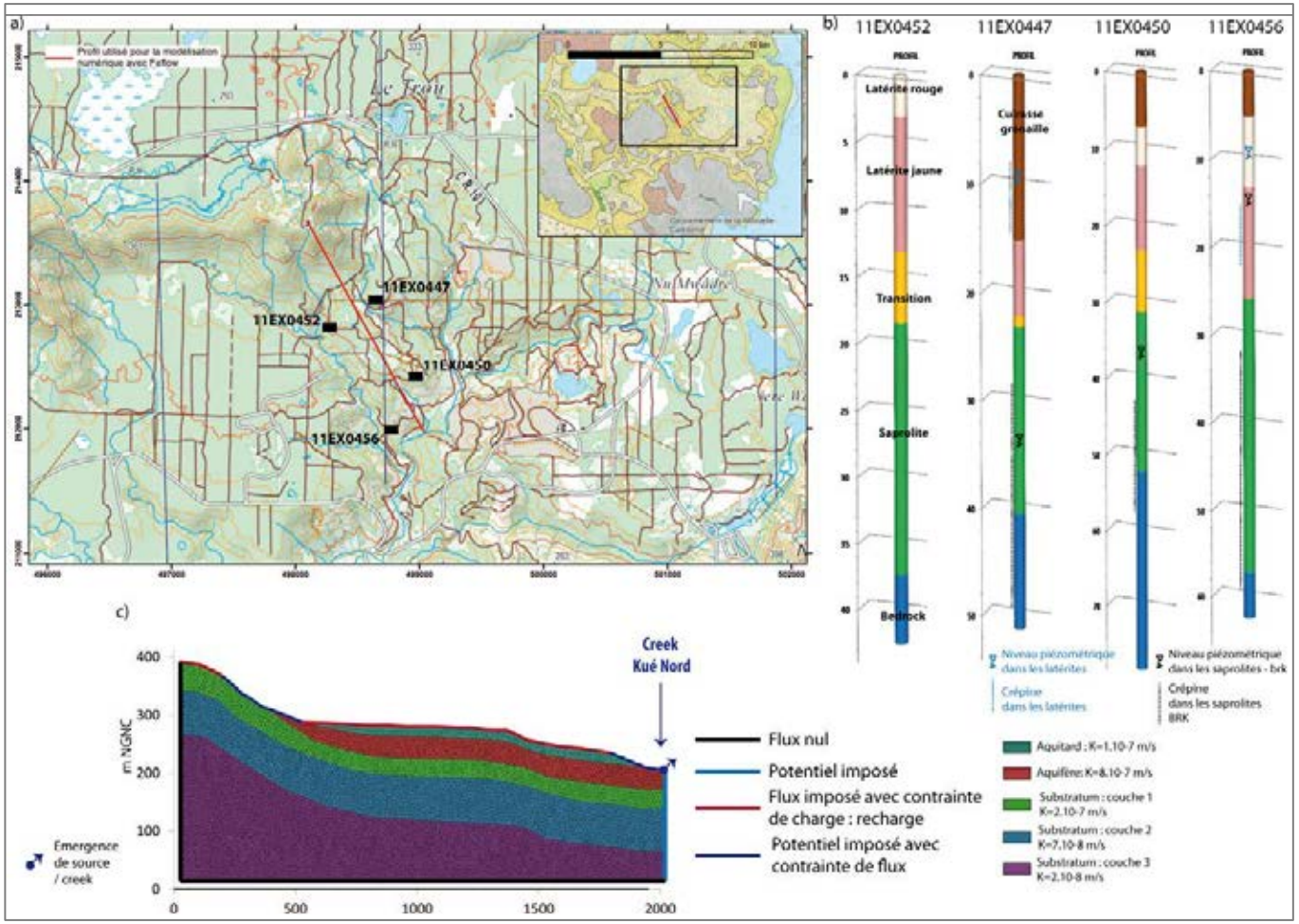


Figure 32 : **Modèle 2D d'un massif type « bassin » : a) localisation de la coupe topographique sur le Massif du Sud, secteur de Goro, b) coupes lithologiques de quatre piézomètres et niveaux piézométriques mesurés dans l'aquitard (en bleu) et l'aquifère (en noir), c) modèle Feflow et conditions aux limites.**

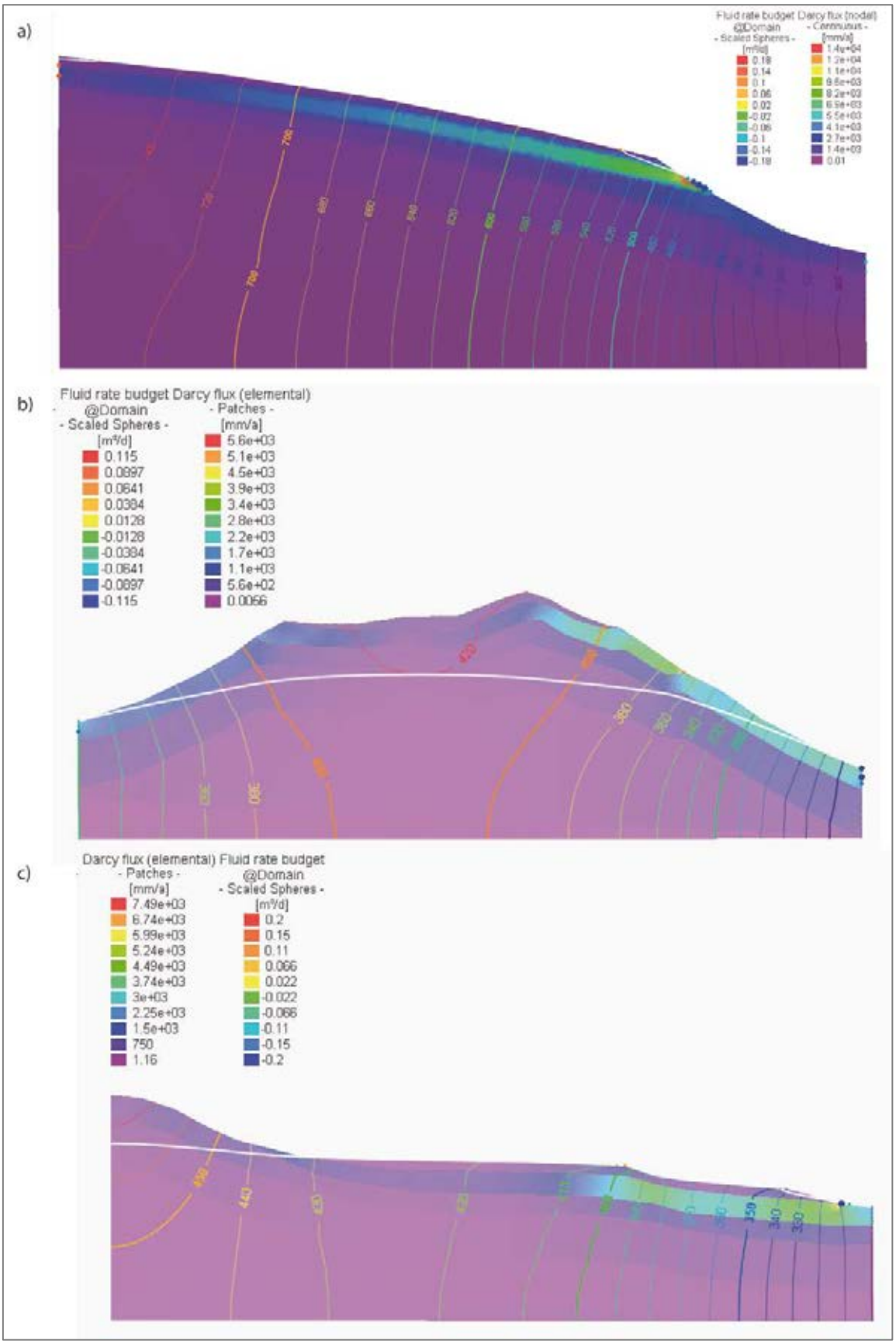


Figure 33 : **Résultats des modèles 2D pour évaluer l'influence de la topographie sur l'état de saturation du système : a) massif de Tiébaghi, b) massif du Koniambo, c) secteur de Goro, Massif du Sud. La ligne blanche correspond à la surface piézométrique modélisée.**

2.5.2. ELABORATION D'UN GUIDE APPLIQUÉ AUX PROBLÉMATIQUES MINIÈRES

L'action prévue au WP4 consiste en une synthèse des connaissances acquises et est présentée sous une forme spécifiquement dédiée à l'accompagnement des exploitants pour la gestion des eaux souterraines sur site.

Ce travail a conduit à l'élaboration d'un **Guide pour l'analyse et le suivi des circulations d'eau souterraine en milieu minier méthodologique** d'aide à la gestion de l'eau souterraine en milieu minier. Ce document (Annexe 2) est présenté sous forme de fiches d'actions potentielles à mettre en œuvre pour une meilleure gestion des eaux souterraines dans les secteurs exploités.

La première partie de ce document présente les différents types de massifs observés en Nouvelle-Calédonie et les critères de caractérisation (Fiches 1 à 4).

La deuxième partie présente les grands axes d'études à mener pour caractériser l'hydrosystème et simuler son comportement dans le respect des règles de l'art des études hydrogéologiques (Fiches 5 à 11). À l'échelle des massifs et sur la base d'une classification hydrogéologique des environnements miniers, sont détaillés dans la mesure du possible les points suivants :

• les contraintes spécifiques à un type de massif et les particularités à prendre en compte pour la mise en œuvre de son suivi environnemental ;

• les protocoles techniques utilisables pour la réalisation d'une cartographie de l'état de la ressource et de son évolution (carte piézométrique et suivi piézométrique) ;

• la caractérisation des conditions aux limites de l'hydrosystème considéré et la préconisation des moyens de reconnaissances adaptés.

La troisième partie présente le travail de synthèse réalisé à l'échelle des objets hydrogéologiques (ha) ; sur la base d'une classification hydrogéologique d'objets naturels ou anthropiques (Fiches 12 à 16):

- les zones de drainages potentiels ;
- le cas des dolines ;
- le cas des bassins endoréiques ;
- le cas des contextes karstiques : faciès épikarstique et conduits pseudo-karstiques ;
- les principaux aménagements miniers.

3. CONCLUSION DU RAPPORT

Le programme HyperK visait à répondre aux questions de gestion des eaux souterraines des massifs miniers de Nouvelle-Calédonie. Il a été construit en abordant le système aquifère multi-couche que constitue le socle de péridotite surmonté des différents niveaux d'altération. A travers plusieurs thèmes pilotés par les différents partenaires du projet, il a permis d'étudier le manteau d'altération et son rôle hydrogéologique, la fracturation des massifs liée aux mécanismes de l'altération et aux contraintes tectoniques, et finalement d'en déduire les conditions de circulation des eaux souterraines au sein de l'hydrosystème des péridotites.

Il a été montré que les péridotites présentent les caractéristiques d'un milieu complexe avec :

- Des figures de surface caractéristiques d'un milieu pseudo-karstique,
- Des conductivités hydrauliques dont la distribution unimodale est caractéristique des milieux homogènes, mais qui varient sur plusieurs ordres de grandeur et à plusieurs échelles, typiques des milieux fracturés.

L'analyse structurale du milieu a été considérée à différentes échelles, ainsi que les propriétés du socle, socle qui structure l'hydrosystème dans sa globalité. En particulier, l'analyse de la distribution de fracturation et de la conductivité hydraulique en profondeur a montré une forte densité de fractures caractérisée par plusieurs niveaux de fracturation.

- Un premier niveau de fracturation (primaire) est représenté avec un espacement moyen entre deux fractures de 0.3 m sur une ligne verticale ;
- Un niveau secondaire de fracturation est caractérisé par un espacement d'une trentaine de mètres, et un espacement qui augmente en s'enfonçant dans le massif.

Les estimations de conductivité hydrauliques à partir d'essais hydrauliques ont également montré une variabilité importante associée à ce paramètre notamment dans l'horizon des saprolites grossières et dans la péridotite sous-jacente. Il en est conclu que la pré-structuration primaire des péridotites et les fractures majeures (associées à la fracturation secondaire) plus espacées sont à l'origine des hétérogénéités latérales observées sur le terrain.

Cette analyse conduit à proposer un schéma général de la structure hydrogéologique d'un massif minier, dont la simulation hydrodynamique est testée à l'échelle régionale. Cette approche permet de caractériser l'impact prépondérant de la géomorphologie des massifs au regard de la saturation en eau des niveaux d'altérites. Les principales applications de ce programme sont déclinées sous la forme d'un guide méthodologique à l'usage des mineurs.

4. PERSPECTIVES ET OPPORTUNITÉS

Un programme de trois ans sur l'hydrogéologie des péridotites altérées permet de répondre aux questions pratiques posées dans l'appel d'offre. Cependant, sur un sujet aussi vaste, il ne peut prétendre clore le sujet. Par exemple les études concernant les aquifères de socles de type granitique, les premiers résultats datent de 20 ans, les travaux de synthèse ont entre 5 et 10 ans et le sujet est toujours actif. Il ne fait donc pas de doutes que de nouveaux travaux viendront enrichir notre compréhension de l'hydrogéologie des péridotites altérées et que ces travaux auront été rendu possibles par les résultats de référence obtenus au cours du programme HyperK.

Trois domaines au moins devraient faire l'objet d'investigations complémentaires:

1) préciser le bilan en eau à l'échelle d'un bassin versant et d'un massif de péridotites ;

2) comment ce bilan en eau va-t-il se modifier en cas de changement climatique et quelles vont être les conséquences de l'activité humaine sur ce bilan ;

3) comment se transportent les matières dissoutes et en suspension au sein des aquifères de péridotites ?

Les perspectives semblent donc vastes et elles seront nourries par les réflexions et résultats du programme HyperK.

5. BILAN DE LA PRODUCTION SCIENTIFIQUE ASSOCIÉE AU PROGRAMME

Ce chapitre présente la bibliographie document produit par le programme HyperK, l'ensemble des documents cités sont fournis en pdf et consultables sur le site du CNRT

5.1. PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DE RANG A

Dewandel B., Jeanpert J., Ladouche B., Join J.-L., et Maréchal J.-C. in press. Inferring the heterogeneity of crystalline aquifers and evaluating transmissivity or hydraulic conductivity fields, an attempt from a detailed water table map. *Journal of Hydrology*.

Genthon P., Join J.-L., et Jeanpert J. In press . Differential weathering in ultramafic rocks of New Caledonia, the role of infiltration instability *Journal of Hydrology*.

Jeanpert J., Genthon P., Maurizot P., Folio J.L., Vendé-Leclerc M., Serino J., Join J.L., et Iseppi M. 2016. Morphology and distribution of dolines on ultramafic rocks from airborne LIDAR data: the case of southern Grande Terre in New Caledonia (SW Pacific). *Earth Surface Processes and Landforms* 41: 1854-1868.

5.2. COLLOQUES ET CONFÉRENCES

Dewandel B., Jeanpert J., Ladouche B., Marechal J.-C., Join J.-L. « Une méthodologie pour régionaliser la perméabilité d'un aquifère fracturé à partir de cartes piézométriques détaillées : exemple d'un aquifère péridotitique en Nouvelle-Calédonie. » In : Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles» La Roche-s/Yon. Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. La Roche-s/Yon : AIH, 2015.

Poster « Hyperk » présenté au colloque : Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles» La Roche-s/Yon. Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. La Roche-s/Yon : AIH, 2015.

Jeanpert J., Adler P.M., Genthon P., Pérotin L., Sevin B., Dewandel B., Robineau B., Maurizot P., et Join J.-L. 2016a. From boreholes structural hydraulic conductivity data to fracture system modelling. In *43rd IAH congress*. Montpellier.

Jeanpert J., Dewandel B., Maréchal J.C., Ladouche B., et Join J.-L. 2016b. Measurements and characterization of hydraulic conductivity of the peridotites of New Caledonia : the case of Massif du Sud. In *43th IAH congress*. Montpellier, France.

Jeanpert J., Join J.-L., Maréchal J.C., Genthon P., Sevin B., Iseppi M., et Robineau B. 2016c. Structure of weathered and fractured peridotites of New Caledonia: from field data to groundwater modelling. In *35th IGC*. Cape Town, South Africa.

Join J.-L., Jeanpert J., Banton O., Folio J.-L., Genthon P., Maréchal J.-C., Noël A., et Robineau B. 2016. Modelling the peridotites aquifer in New Caledonia massifs, the question of the saprock thickness. In *43rd IAH congress*. Montpellier.

Jeanpert, J., Genthon, P., Maurizot, P. Folio, J.L., Sevin B., 2013. Sinkholes as a marker of karstic activity in the peridotites of New Caledonia (SW Pacific), Karstflow 2013, Budapest, Hungary, 09/2013.

Jeanpert, J., Genthon, P., Join, J.L., Vnedé Leclerc, M., Sérino, J., Maurizot, P., 2014. Dolines on ultramafic rocks : the case of Southern Grande Terre of New Caledonia (SW Pacific), AGU, San Francisco.

Serino, J., Jeanpert, J., Vendé-Leclerc,M., Maurizot, P., Genthon, P., 2012. Peridotitic sinkholes of New Caledonia: detection and preliminary classification, STAR Conference, Nouméa, 11/2012.

5.3. MÉMOIRES ET THÈSE UNIVERSITAIRES

Courtot L. 2016. Caractérisation géochimique des eaux des massifs de péridotites de Nouvelle-Caléodonie. Rapport M1 Univ. Monptellier-SGNC/DIMENC - 24 pp.

Fuenzalida J.L. 2015. Effets d'échelle dans les propriétés de transport des péridotites fracturées de Nouvelle-Calédonie - Rapport de stage de Master 2. IRD - Université HydroSciences Montpellier 47 p.

Gallois J. 2015. Caractérisation de la perméabilité des péridotites du site de Goro – Massif du Sud de Nouvelle-Calédonie - Stage L3 Univ. Avignon / SGNC-DIMENC 51 p.

Grossiord S. 2012. Hydrogéologie minière - Création d'une base de données hydrodynamiques et analyse exploratoire de l'hydrogéologie des péridotites de Nouvelle-Calédonie. AgroParisTech-ENGREF 57p.

Jeanpert J. 2017. Structure et fonctionnement hydrogéologiques des péridotites de Nouvelle-Calédonie., PhD Thesis, Université de la Réunion.

Perotin L. 2014. Caractérisation de la fracturation des péridotites à partir de l'étude des carottes de trois forages profonds du massif du Koniambo. Rapport de stage L3 UNC - SGNC/DIMENC Université de la Nouvelle-Calédonie 43 p.

Schuite J. 2013. Modélisation des propriétés de transport des péridotites fracturées de Nouvelle-Calédonie (Sud-Ouest Pacifique). Université Montpellier 2 53 p.

Verdier M. 2014. Structure hydrogéologique du bassin versant du site minier de Poro et impact sur le ruissellement. Rapport de stage de Master 1 - Polytechnique Montréal - SGNC/DIMENC 46 p.

5.4. RAPPORTS TECHNIQUES

Jeanpert J., Lesimple S., Sevin B., Maurizot P., Robineau B., Maréchal J.-C., et Dewandel B. 2015. Exploration des galeries Chromical - Massif de Tiébaghi. Observations géologiques et hydrogéologiques à l'intérieur d'un massif de péridotites. SGNC/DIMENC 35 p.

DiagraphiesNakety_Nov2014.pdf : Document décrivant les diagraphies réalisées sur Nakety (DiagraphiesNakety_Nov2014.pdf)

SlugTestTieb_Nov201-1.pdf : Document décrivant les essais slug tests réalisés sur Tiébaghi (Dôme) (SlugTestTieb_Nov2014.pdf ; DiagraphiesTieb_Nov2014.pdf)

DiagraphiesTieb_Nov2014.pdf : Document décrivant les essais de diagraphies réalisés sur Tiébaghi (Dôme) (SlugTestTieb_Nov2014.pdf ; DiagraphiesTieb_Nov2014.pdf)

2014-997-D3E-NRE - CR mission.pdf : Compte rendu de mission BRGM / J.Jeanpert (2014-997-D3E-NRE - CR mission.pdf)

6. BIBLIOGRAPHIE

Bouwer H., et Rice R.C. 1976. A Slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Res.* 12 no. 3: 423-428.

Camus H., Leveneur D., et Bart F. 2015. Structuration karstique des aquifères dans les massifs ophiolitiques de Nouvelle-Calédonie. In *Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles.* . La Roche-sur-Yon.

Dewandel B., Lachassagne P., et Qattan A. 2004. Spatial measurements of stream baseflow, a relevant methodology for aquifer characterisation and permeability evaluation. Application to a Hard-rock aquifer, the Oman ophiolite. *Hydrological Processes* 18: 3391-3400.

Dewandel B., Lachassagne P., Bourdier F., Al-Hattali S., Ladouche B., Pinault J.-L., et Al-Suleimani Z. 2005. A conceptual hydrogeological model of ophiolite hard-rock aquifers in Oman based on a multiscale and a multidisciplinary approach. *Hydrogeology journal* 13: 708-726.

Diersh H.-J.G. 2014. *FEFLOW - Finite Element modeling of Flow, mass and heat transport in porous and fractured media.* : Springer.

Dörfliger N., et Plagnes V. 2009. Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. Avec la collaboration de K. Kavouri et J. Gouin. 105 p.

Gallois J. 2015. Caractérisation de la perméabilité des péridotites du site de Goro – Massif du Sud de Nouvelle-Calédonie - Stage L3 Univ. Avignon / SGNC-DIMENC 51 p.

Genna A., Bailly L., Lafoy Y., et Augé T. 2005a. Les karsts latéritiques de Nouvelle-Calédonie. *Karstologia* 45-46: 19-28.

Genna A., Maurizot P., Lafoy Y., et Augé T. 2005b. Contrôle karstique de minéralisations nickélifères de Nouvelle-Calédonie. *Comptes-Rendus Géoscience* 337: 367-374.

Geophysical. 2013. Seconde campagne de tomographie électrique 2D sur le massif de Koniambo: applications hydrogéologiques. KNS 56 p.

Golder Associates. 2002a. Factual Information - East Kwe Tailings Area - Geotechnical Investigations - Goro Nickel Project - New Caledonia - Doc B-357 510 p.

Golder Associates. 2002b. Factual Information East Overburden Dump Area Geotechnical Investigations - Doc B-535 - v4. Goro Nickel Project.

Golder Associates. 2005. Geotechnical and Hydrogeological Studies of the West Kwe Residue Storage Facility - 474-03639030-Rev0 - Goro Nickel Project New Caledonia.

Golder Associates. 2008. Long term pumping test West Kwe Residue Storage Facility - 1326-03639030-Rev0- Goro Nickel Project - New Caledonia 21 p.

Golder Associates. 2014. Effets du développement de la mine de Tiébaghi sur la ressource en eau souterraine - 137306007-001-R-Rev0 - SLN

Jeanpert J. 2010. Hydrogéologie des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie. Bilan des connaissances et hypothèses de travail. SGNC/DIMENC 49p.

Jeanpert J., et Dewandel B. 2013. Analyse préliminaire des données hydrogéologiques du massif du Koniambo, Nouvelle-Calédonie - SGNC/DIMENC. BRGM/RP-61765-FR 95 p., 38 fig., 7 tabl., 2 ann.

Join J.-L., Robineau B., Ambrosi J.-P., Costis C., et Colin F. 2005. Système hydrogéologique d'un massif minier ultrabasique de Nouvelle-Calédonie. *Comptes-Rendus Géoscience* 337: 9.

MICA Environnement NC. 2009. Déclaration d'ouverture de travaux miniers : état initial - Etude hydrogéologique - Société Le Nickel-SLN - Centre minier de Tiébaghi, Site Dôme.

Nicod J. 1994. Plateaux karstiques sous couverture en France. *Annales de Géographie* t. 103 no. n°576: p 170-194.

Orloff O. 1968. Etude géologique et géomorphologique des massifs d'ultrabasites compris entre Houailou et Canala (Nouvelle-Caledonie). Universite de Montpellier.

Robineau B., Join J.-L., Beauvais A., Parisot J.-C., et Savin C. 2007. Geoelectrical imaging of a thick regolith developed on ultramafic rocks: groundwater influence. *Australian Journal of Earth Sciences,* 54: 773-781.

Roche A.E. 2013. Secteur du Camp de la Géologie - Investigations hydrogéologiques par réalisation d'un forage profond et de tests par pompage - Document 0884/13/O/HG. Vale NC.

Roche A.E. 2014. Synthèse hydrogéologique 2011 - 2013. Rapport intermédiaire. Site de Goro - Vale NC 118 p

Rovey C.W., et Cherkauer D.S. 1995. Scale dependency of hydraulic conductivity measurements. *Ground Water* 33 no. 5: 769-780.

Salomon J.-N. 2000. *Précis de karstologie*: Presses universitaires de Bordeaux.

Savin C., Robineau B., Monteil G., Beauvais A., Parisot J., et Ritz M. 2003. Electrical imaging of peridotite weathering mantles as a complementary tool for nickel ore exploration in New Caledonia. *ASEG Extended Abstracts* 2003 no. 2: 1-5.

Schulze-Makuch D., Carlson D.A., Cherkauer D.S., et Malik P. 1999. Scale dependency of hydraulic conductivity in heterogeneous media. *Ground Water* 37 no. 6: 904-919.

Sevin B. 2014. Cartographie du régolithe sur formation ultrabasique de Nouvelle-Calédonie : localisation dans l'espace et le temps des gisements nickélifères., PhD Thesis, Université de Nouvelle-Calédonie.

SLN. 2009. Dossier de déclaration d'ouverture de travaux miniers, Site du Dôme. Commune de Koumac (Province Nord). Partie 1 : Introduction, caractéristiques du site et de son environnement à l'état actuel.

Vale Nouvelle-Calédonie. 2015. DAEM 2015 - Evaluation des impacts hydrologiques et hydrogéologiques - Comparaison des outils de modélisation utilisés et des principaux résultats obtenus Vale NC.

Verdier M. 2014. Structure hydrogéologique du bassin versant du site minier de Poro et impact sur le ruissellement. Rapport de stage de Master 1 - Polytechnique Montréal - SGNC/DIMENC 46 p.

Wirthmann A. 1966. Géomorphologie des péridotites de Nouvelle-Calédonie. *Traduction G. Grandin avril 2003*.

7. ANNEXES

ANNEXE 1 : MÉMOIRE DE THÈSE

SGNC
Service de la Géologie
de NOUVELLE-CALÉDONIE

UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION
S'ouvrir aux mondes

STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUES DES MASSIFS DE PÉRIDOTITES DE NOUVELLE-CALÉDONIE

PAR JULIE JEANPERT

SOUTENUE LE 26 AVRIL 2017 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

pour obtenir le titre de Docteur en Sciences de la Terre

de l'Université de La Réunion

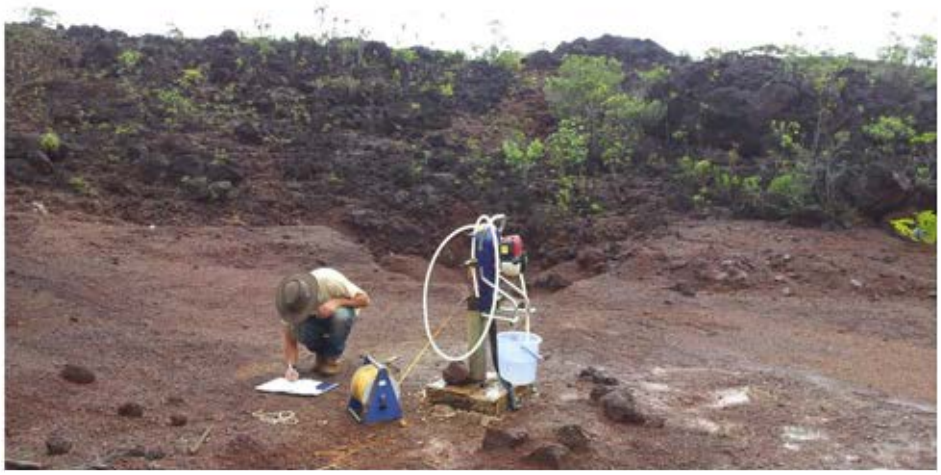
Olivier BANTON
Professeur des Universités, Université d'Avignon / Rapporteur
Hélène CELLE-JEANTON
Professeur des Universités, Université de Franche-Comté / Rapporteur
Jean-Luc FOLIO
Ingénieur-chercheur, Docteur en hydrogéologie, Vale NC / Examinateur
Pierre GENTHON
Directeur de recherches, IRD / Examinateur

Benoît DEWANDEL
Chercheur – Docteur en hydrogéologie, BRGM / Co-directeur de thèse
Jean-Lambert JOIN
Professeur des Universités, Université de La Réunion / Directeur de thèse

ANNEXE 2 : GUIDE POUR L'ANALYSE ET LE SUIVI DES CIRCULATIONS D'EAU SOUTERRAINE EN MILIEU MINIER

Guide méthodologique 2017

GUIDE POUR L'ANALYSE ET LE SUIVI DES CIRCULATIONS D'EAU SOUTERRAINE EN MILIEU MINIER



Document réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par le CNRT « Nickel & son environnement »

CNRT NICKEL & son environnement

Golder Associates · Université de la Réunion · SGNC Service Géologique de NOUVELLE-CALÉDONIE · IRD · brgm · UPMC · HSM

ANNEXE 3 : FICHES DE MÉTA DONNÉES ACQUISES DANS LE PROGRAMME

Type de donnée	Titre	Quantité	Format	Volume en poids	Date de la donnée	Source	Description
Données tableur	EssaisHydrauliques	3	excel			HYPERK/ SGNC	Résultats des essais slug test et pompages d'essais
Données géographiques	CartoT Goro	1	raster			HYPERK/ SGNC	Carte de la transmissivité sur le site de Goro
Données tableur	Analyses géochimiques	3	excel			HYPERK/ SGNC	Mesures physico-chimiques in situ, isotopes stables et UT
Données fracture	Relevés de fractures	4	ESRI			HYPERK	Mesures de fractures sur photo dans la zone de Goro
Modèles fem	Modèles numériques 2D	3	Fem (Feflow)	3 x 750 ko		HYPERK / SGNC	Géométrie et caractéristiques hydrosynamiques des modèles 2D représentant les massifs de Tiébaghi, Goro et Koniambo.

CNRT "Nickel et son environnement"

Edition 2016

Tome Nickel et Environnement