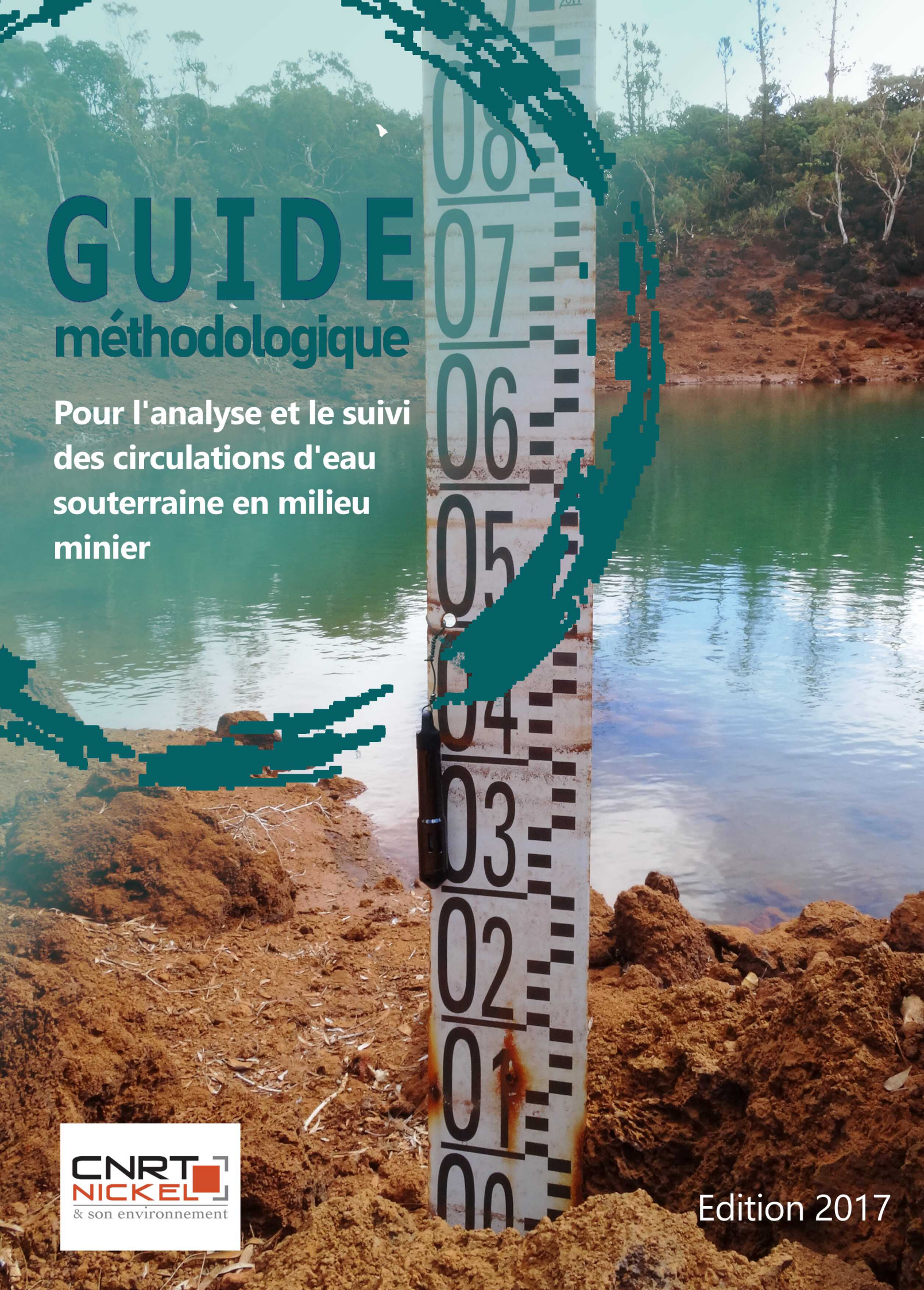


GUIDE méthodologique

Pour l'analyse et le suivi des circulations d'eau souterraine en milieu minier

CNRT NICKEL & son environnement

Edition 2017

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 »

Juillet 2017

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

Projet HYPERK : « HYdrogéologie des PÉRidotites Karstifiées »

Juillet 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

AUTEURS :

Pierre ADLER (UPMC) ; Gaëlle BOUICHET (Golder Associates) ; Benoit DEWANDEL (BRGM) ; Pierre GENTON (IRD) ; Julie JEANPERT (SGNC/DIMENC) ; Jean-Lambert JOIN (Université de la réunion) ; Jean-Christophe MARECHAL (BRGM) ; Pierre MAURIZOT (SGNC/DIMENC) ; Brice SEVIN (SGNC/DIMENC)

RÉVISION DU DOCUMENT

Réf.	**CSF n° 04CNRT.URéunion/HyperK du 18/09/12**			
Version	**Date**	**Rédacteur(s)**	**Qualité du rédacteur(s)**	**Révision pour CNRT**
Vprélim	06/07/2016	Gaëlle Bouichet (Golder Associates)	Coordinateur de la rédaction du guide	F. Bailly CNRT
V1	26/03/2017	Gaëlle Bouichet (Golder Associates)	Coordinateur de la rédaction du guide	F. Bailly CNRT
V2	17/04/2017	Gaëlle Bouichet (Golder Associates)	Coordinateur de la rédaction du guide	F. Bailly CNRT
V3	19/04/2017	Gaëlle Bouichet (Golder Associates)	Coordinateur de la rédaction du guide	F. Bailly CNRT
V4	03/07/2017	Gaëlle Bouichet (Golder Associates)	Coordinateur de la rédaction du guide	F. Bailly CNRT

CITATION DU DOCUMENT

Mots clés : hydrogéologie minière, perméabilité, piézométrie, drainage, faciès épikarstique, état initial, suivi environnemental

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Join JL., Bouichet G., Jeanpert J., Dewandel B., Genton P., Marechal JC., Adler P., Maurizot P., Sevin B., (2017) - Guide pour l'analyse et le suivi des circulations d'eau souterraine en milieu minier. Programme « HyperK ». CNRT « Nickel & son environnement ». 61 pages.

SOMMAIRE

1. **PRÉSENTATION DU GUIDE 9**

2. **PREMIERE PARTIE : L'HYDROSYSTÈME DES MASSIFS DE PÉRIDOTITES 11**

2.1. FICHE N°1 : L'HYDROSYSTÈME MULTICOUCHE DES MASSIFS MINIERS CALÉDONIENS ET TYPOLOGIE 12

2.1.1. Définition et objectifs de la fiche technique 12

2.1.2. Données requises 12

2.1.3. Illustrations 12

2.1.4. Caractérisation de l'hydrosystème 12

2.2. FICHE N°2 : MASSIF TYPE : PLATEAU ETAGÉ OU « PERCHÉ DRAINÉ » 15

2.2.1. Définition et objectifs de la fiche technique 15

2.2.2. Données requises 15

2.2.3. Illustrations 15

2.2.4. Caractérisation d'un massif perche drainé 16

2.3. FICHE N°3 : MASSIF TYPE PLATEAU OU « PERCHÉ MAL DRAINÉ » 18

2.3.1. Définition et objectifs de la fiche technique 18

2.3.2. Données requises 18

2.3.3. Illustrations 18

2.3.4. Caractérisation d'un Massif Plateau 19

2.4. FICHE N°4 : MASSIF TYPE «BASSIN » 21

2.4.1. Définition et objectifs de la fiche technique 21

2.4.2. Données requises 21

2.4.3. Illustrations 21

2.4.4. Caractérisation d'un massif de type bassin 22

3. **DEUXIÈME PARTIE – CARACTÉRISATION DU CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE – ÉTAT INITIAL 24**

3.1. FICHE N°5 : L'HYDROSYSTÈME ; STRUCTURE ET STRATIGRAPHIE 26

3.1.1. Définition et objectifs de la fiche technique 26

3.1.2. Données requises 26

3.1.3. Illustrations 26

3.1.4. MéthodologiE 27

3.2. FICHE N°6 : L'HYDROSYSTÈME ; PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES 28

3.2.1. Définition et objectifs de la fiche technique 28

3.2.2. Données requises 28

3.2.3. Illustration 28

3.2.4. Méthodologie 29

3.3. FICHE N°7 : CONDITIONS AUX LIMITES ; LES FLUX 33

3.3.1. Définition et objectifs de la fiche technique 33

3.3.2. Données requises 33

3.3.3. Illustration 33

3.3.4. Méthodologie 34

3.4. FICHE N°8 : CONDITIONS AUX LIMITES ; LES POTENTIELS 38

3.4.1. Définition et objectifs de la fiche technique 38

3.4.2. Données requises 38

3.4.3. Illustrations 38

3.4.4. Méthodologie 39

3.5. FICHE N°9 : L'ÉTAT INITIAL ; DÉFINITION D'UNE PIÉZOMÉTRIE DE RÉFÉRENCE 40

3.5.1. Définition et objectifs de la fiche technique 40

3.5.2. Données requises 40

3.5.3. Illustrations 40

3.5.4. Méthodologie 41

3.6. FICHE N°10 : LE SUIVI PIEZOMÉTRIQUE 45

3.6.1. Définition et objectifs de la fiche technique 45

3.6.2. Données requises 45

3.6.3. Illustrations *45*
3.6.4. Méthodologie *46*
3.7. FICHE N°11 : L'ÉTAT INITIAL ; LA QUALITÉ DES EAUX 50
3.7.1. Définition et objectifs de la fiche technique *50*
3.7.2. Données requises *50*
3.7.3. Illustrations *50*
3.7.4. Méthodologie *51*
4. **TROISIEME PARTIE : ETUDES DE CAS 54**
4.1. FICHE N°12 : IDENTIFICATION DES ZONES DE DRAINAGE POTENTIEL 55
4.1.1. Définition et objectifs de la fiche technique *55*
4.1.2. Données requises *55*
4.1.3. Illustrations *55*
4.1.4. Méthodologie *56*
4.2. FICHE N°13 : CARACTÉRISATION ET SUIVI DU FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE D'UNE DOLINE 58
4.2.1. Définition et objectifs de la fiche technique *58*
4.2.2. Données requises *58*
4.2.3. Illustrations *58*
4.2.4. Méthodologie *59*
4.3. FICHE N°14 : CARACTÉRISATION ET SUIVI HYDROGÉOLOGIQUE DE BASSINS ENDORÉIQUES 60
4.3.1. Définition et objectifs de la fiche technique *60*
4.3.2. Données requises *60*
4.3.3. Illustrations *60*
4.3.4. Méthodologie *61*
4.4. FICHE N°15 : CARACTÉRISATION DE STRUCTURES D'ÉCOULEMENT KARSTIQUE 62
4.4.1. Définition et objectifs de la fiche technique *62*
4.4.2. Données requises *62*
4.4.3. Illustrations *62*
4.4.4. Méthodologie *63*
4.5. FICHE N°16 : AMENAGEMENTS MINIERS 66
4.5.1. Définition et objectifs de la fiche technique *66*
4.5.2. Exemples d'aménagements miniers *66*
5. **CONCLUSION 69**
6. **BIBLIOGRAPHIE 70**

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Arborescence du guide méthodologique : structure du guide (en vert), structure d'une fiche (en jaune) et contextes d'utilisation selon l'échelle d'étude (en orange) et selon l'objectif (en bleu). 10

Figure 2 : Massif minier *(source J.Jeanpert)* 11

Figure 3 : Aspect multicouche du socle de péridotite et son manteau d'altération *(source JL. Join)* 12

Figure 4 : Log hydrogéologique simplifié de l'hydrosystème multicouche (Kmoy : perméabilité moyenne en m/s) 13

Figure 5 : Dénominations courantes des unités géologiques *(d'après Sevin B. 2014)* 14

Figure 6 : Vue du massif de Koniambo, représentatif d'un massif perché drainé *(source B. Sevin, 2014)* 15

Figure 7 : Topographie caractéristique d'un massif drainé 16

Figure 8 : Simulation du niveau piézométrique d'étiage au sein des péridotites de Koniambo 17

Figure 9 : Vue du massif de Tiébaghi, représentatif d'un massif en plateau mal drainé *(source T. Lamorille)* 18

Figure 10 : Tiébaghi: Topographie caractéristique d'un massif en plateau. 19

Figure 11 : Simulation du niveau piézométrique d'étiage au sein des péridotites de Tiébaghi 20

Figure 12 : Vue du massif de Goro, représentatif d'un massif en bassin, mal drainé *(source J. Jeanpert)* 21

Figure 13 : Topographie caractéristique d'un massif en bassin 22

Figure 14 : Simulation du niveau piézométrique d'étiage au sein des 23

Figure 15 : Exemple d'interprétation hydrogéologique du log d'un forage profond 26

Figure 16: Pompage d'essai sur un piézomètre (Massif de Goro) *(cliché source JL. Join)* 28

Figure 17 : Réponse « classique et fréquente » au slug test 30

Figure 18 : Réponse « oscillatoire» au slug test ; synonyme de forte perméabilité 31

Figure 19 : Station pluviométrique complète sur le site de l'Ancienne Pépinière à Goro, Massif du Sud *(source J. Jeanpert)* 33

Figure 20 : Exemple d'estimation du bilan hydrologique de Tiébaghi (Retour 2005). 34

Figure 21 : Exemples de stations limnimétriques selon l'importance du creek *(source Golder)* 35

Figure 22 : Cartographie de la capacité d'infiltration sur le massif de Poro, selon la méthode PaPRIKA (Dorfliger, 2009), d'après Verdier (2014). 36

Figure 23 : Une doline permanente peut constituer localement une limite à potentiel imposé *(source Alizert)* 38

Figure 24 : Installation d'un ouvrage temporaire (Massif de Poro) *(source JL. Join)* 40

Figure 25 : Schéma d'installation d'un ouvrage temporaire 42

Figure 26 : Carte piézométrique de référence, issue de l'analyse des données terrain, Tiebaghi *(source Golder 2014)* 43

Figure 29 : Diagramme de Piper sur 154 analyses acquises ou compilées dans le cadre du projet HYPERK sur les massifs de Tiébaghi et Goro 50

Figure 30 : Variation des paramètres en fonction de la profondeur du forage (piézomètres localisés sur le secteur de Goro, Massif du Sud) 52

Figure 31 : Droite météorique locale des eaux (GMWL = droite météorique mondiale, et LMWL = droite météorique locale, calédonienne) 52

Figure 32 : A : Estimation de la variation de la transmissivité (T) de l'aquifère à partir de données piézométriques ponctuelles haute densité (en LogT ; Massif de Tiébaghi ; source B. Dewandel). B : Évaluation des zones potentiellement drainantes par analyse des coefficients de tarissement (α) des chroniques piézométriques (Massif de Goro) *(source J. Jeanpert)* 55

Figure 33 : Bassin endoréique sur la presqu'ile de Bogota, Massif de Ouassé *(Source J. Jeanpert)* 60

Figure 34 : Exemple d'un traçage réalisé sur Goro, injection de fluorescéine *(source A2EP, 2008)* 62

Figure 35 : Exemple d'un traçage réalisé sur Goro, injection et plan de restitution *(source A2EP, 2008)* 63

Figure 36 : Fosse Suivante, presqu'ile de Bogota *(source J. Jeanpert)* 66

Figure 37 : Instabilités : formation de fissures sur verse *(source J. Jeanpert)* 68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractérisation des conditions hydrogéologiques – Acquisition de données 25

Tableau 2 : Différents types d'essai de perméabilité 30

Tableau 3 : Fréquence des mesures piézométriques en fonction de l'objectif 46

Tableau 4 : Différents types de piézomètres 47

Tableau 5 : Espacements préconisés de piézomètres 48

Tableau 6 : Paramètres à calculer en fonction du type de traçage *(d'après BRGM ONEMA 2010)* 64

LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière
CNRT	Centre National de Recherche Technologique
DIMENC	Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie de la Nouvelle-Calédonie
HYPERK	« HYdrogéologie des PÉRidotites Karstifiées »
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
SANDRE	Service d'Administration National des Données et Référentiels sur l'Eau
SGNC	Service Géologique de la Nouvelle-Calédonie

1. PRÉSENTATION DU GUIDE

Dans le cadre de la réalisation du projet CNRT « HYPERK », une synthèse des connaissances acquises est présentée sous une forme de guide méthodologique spécifiquement dédié à **l'accompagnement des exploitants pour la gestion des eaux souterraines sur site**.

Ce guide méthodologique propose des 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'étude à mener pour caractériser l'hydrosystème et simuler son comportement dans le respect des règles de l'art des études hydrogéologiques. 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 (Fiches 5 à 11) :

- 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) ;
- la caractérisation des conditions aux limites de l'hydrosystème considéré et la préconisation des moyens de reconnaissance adaptés.

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

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

Le parti pris pour cette présentation est celui de **décrire l'ensemble des éléments nécessaires à la mise en œuvre d'un modèle de simulation hydrogéologique**.

Cette approche est celle qui nécessite effectivement la connaissance la plus aboutie possible du système. Elle convient cependant aussi bien à l'élaboration d'un modèle de simulation numérique à l'échelle d'un massif entier qu'au simple calcul analytique utilisé pour un dimensionnement géotechnique à l'échelle locale.

Les fiches sont conçues pour des géologues non spécialistes de la discipline qui peuvent les utiliser pour programmer rapidement sur site une intervention technique en relation avec une problématique eau souterraine. En revanche, chaque fiche renvoie à des références bibliographiques spécifiques qui permettent aussi à des hydrogéologues d'approfondir des questions relatives à la complexité du milieu. L'utilisation de ce document est présentée dans la Figure 1.

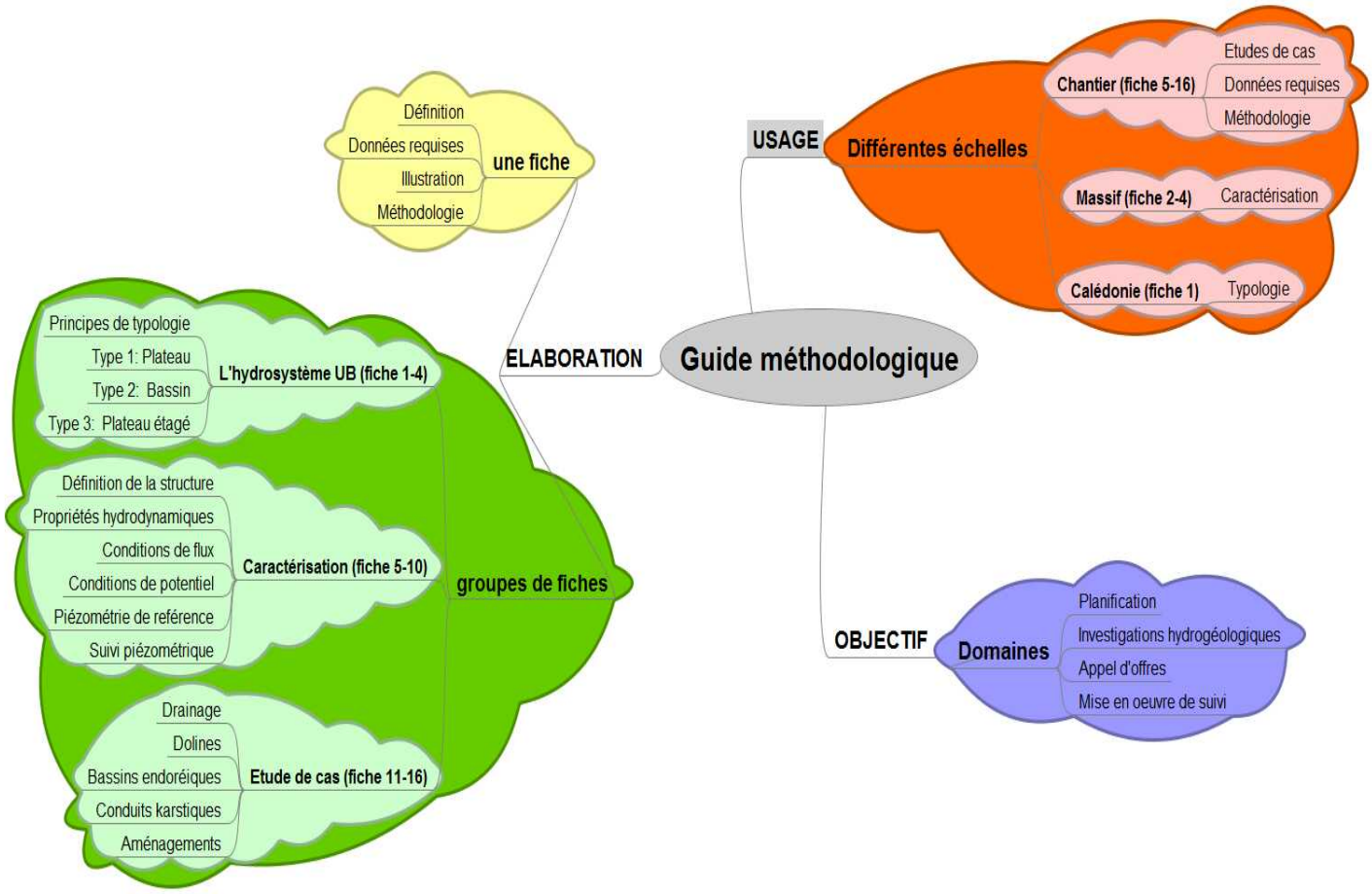


Figure 1 : Arborescence du guide méthodologique : structure du guide (en vert), structure d'une fiche (en jaune) et contextes d'utilisation selon l'échelle d'étude (en orange) et selon l'objectif (en bleu).

2. PREMIERE PARTIE : L'HYDROSYSTÈME DES MASSIFS DE PÉRIDOTITES

Les fiches 1 à 4 qui suivent, présentent les différents types d'hydrosystème rencontrés sur les massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie et s'attachent à présenter les caractéristiques propres à chaque type de massif.

Trois contextes caractéristiques peuvent être distingués sur la base de critères géomorphologiques et hydrogéologiques. Il s'agit des massifs en « plateaux, plateaux étagés et bassins ». Ces distinctions sont proposées à l'échelle d'un massif pour une approche globale de l'hydrosystème minier. Toutefois à l'échelle du site (échelle du « chantier »), un contexte local peut être identifié et rattaché à l'un ou l'autre des trois modèles proposés. Cette approche simplifiée par « hydrosystème type » doit toujours être rapportée à une échelle spatiale bien définie.

Les éléments présentés dans cette première partie seront utilement complétés par la lecture des documents suivants :

- Jeanpert J. 2017. Structure et fonctionnement hydrogéologiques des péridotites de Nouvelle-Calédonie., PhD Thesis, Université de la Réunion.
- 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.
- Join J.L. et coll. 2017. Programme « HyperK » Rapport scientifique final, CNRT « Nickel & son environnement.
- Bailly L. et coll. 2014 – *Nickal – Typologie des latérites de Nouvelle-Calédonie*. Gisements de nickel latéritique, Volume II. CNRT « Nickel & son environnement ». 448 pages.



Figure 2 : Massif minier *(source J.Jeanpert)*

2.1. FICHE N°1 : L'HYDROSYSTÈME MULTICOUCHE DES MASSIFS MINIERS CALÉDONIENS ET TYPOLOGIE

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Caractérisation du type d'hydrosystème	1	Typologie de l'hydrosystème minier calédonien

2.1.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

Définitions

Hydrosystème des massifs miniers: le contexte hydrogéologique des massifs miniers de Nouvelle-Calédonie se développe au sein des roches dures du socle (péridotites) et des matériaux associés à leur altération (saprolite grossière, latérite et cuirasse). Ces différentes formations sont stratifiées, montrant des couches successives aux paramètres hydrodynamiques contrastés. Cette structure particulière conduit à l'identification d'un système hydrogéologique multicouche (Figure 4) dont les caractères déterminent la circulation des eaux souterraines.

Objectifs

Cette fiche a pour objectif de :

- Préciser la typologie des différentes couches de l'hydrosystème des massifs miniers ;
- Définir les éléments qui contribuent à leur caractérisation (épaisseur, perméabilité) à l'échelle d'un massif minier.

2.1.2. DONNÉES REQUISES

- Les données nécessaires à cette caractérisation sont décrites dans les fiches 5 et 6 ;
- Ces données sont issues des travaux d'exploration du site sous la forme de : cartes géologiques détaillées, log de sondages de reconnaissance, cartes en isobathes et isopaques des différentes unités lithologiques.

2.1.3. ILLUSTRATIONS



Figure 3 : Aspect multicouche du socle de péridotite et son manteau d'altération *(source JL. Join)*

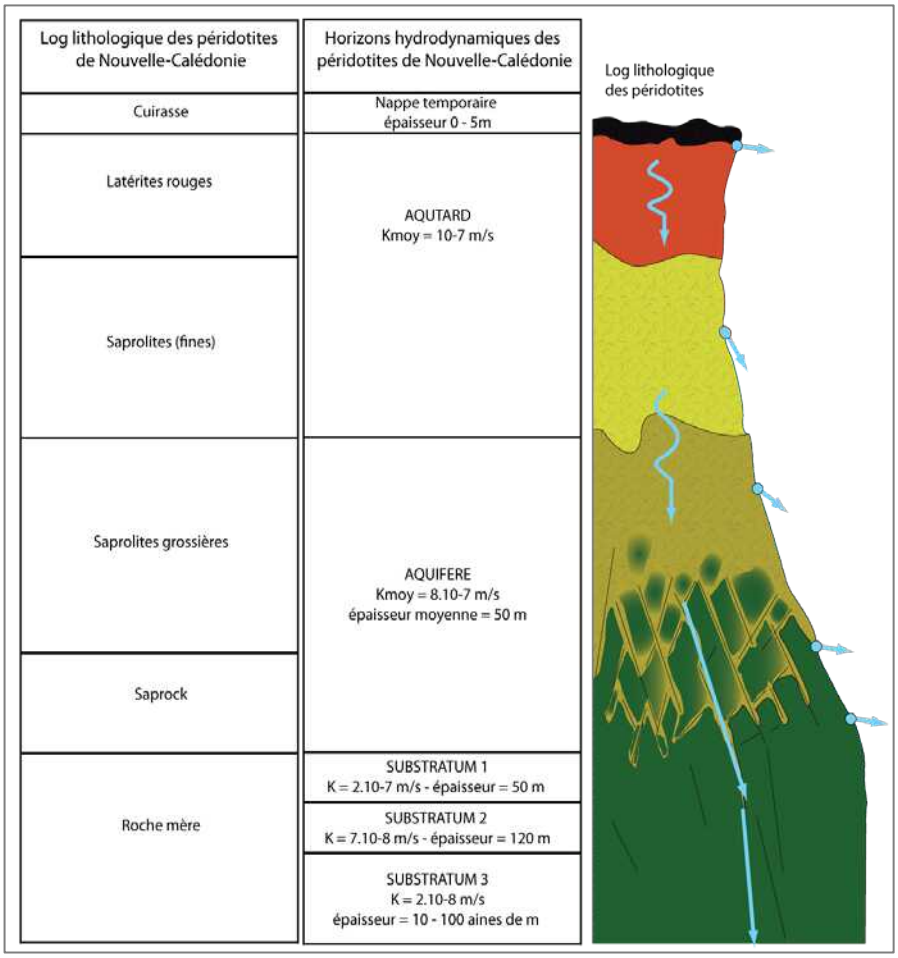
2.1.4. CARACTÉRISATION DE L'HYDROSYSTÈME

Le socle de péridotites soumis à l'altération tropicale forme un **hydrosystème de type multi-couche** constitué de différents niveaux, ou horizons, du manteau d'altération. La roche saine

fût longtemps considérée comme le substratum d'un **aquifère principal saprolitique**. Plus récemment, des observations de terrain ont permis de montrer **la prolongation des écoulements souterrains dans les fractures du socle** (Join et al. 2005 ; Jeanpert, 2017).

La géométrie des différentes couches lithologiques peut varier d'un massif à l'autre. Dans le cadre de la caractérisation de l'hydrosystème, l'hydrogéologue veillera à définir les différentes **unités hydrogéologiques** en se référant au cadre général pouvant servir de guide à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie.

Figure 4 : Log hydrogéologique simplifié de l'hydrosystème multicouche (Kmoy : perméabilité moyenne en m/s)



Utilisation des données

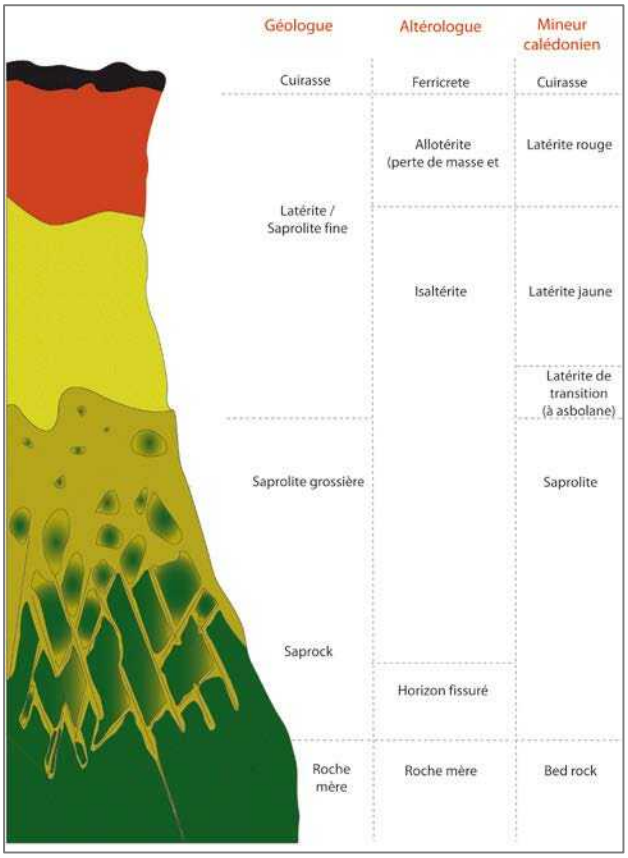
Données géologiques

Les horizons d'altération sont regroupés en fonction de leurs caractéristiques hydrauliques attendues. Ce log simplifié ne représente pas nécessairement la stratification utilisée par le mineur. Il s'agira pour l'hydrogéologue de faire les regroupements nécessaires à partir des horizons lithologiques décrits par le mineur. La désignation de ces horizons peut varier selon les usages. La Figure 5 présente une synthèse des différentes terminologies (Sevin B. 2014).

Le log hydrogéologique simplifié suggère **4 couches hydrogéologiques pour un profil complet**. Selon les massifs étudiés, l'identification et l'association des horizons lithologiques décrits dans les logs et coupes géologiques peut conduire à des troncatures.

Le saprock est défini comme l'horizon situé au toit de la roche mère, comprenant au maximum 20 % de matériaux altérés.

Figure 5 : Dénominations courantes des unités géologiques *(d'après Sevin B. 2014)*



Enjeux propres à l'identification des unités hydrogéologiques

Les enjeux associés à l'identification des couches hydrogéologiques sont fondamentaux car ils déterminent la **géométrie de l'hydrosystème** à modéliser.

Les principales difficultés pour l'hydrogéologue concernent la définition des limites de couches. De ce choix résultera la caractérisation de l'épaisseur des différentes unités hydrogéologiques avec des conséquences importantes sur l'appréciation de l'impact de la couche considérée dans la répartition des flux et des pressions. Ces limites sont essentiellement guidées par l'évaluation des paramètres hydrauliques de chaque horizon (Fiche n°6). Elles peuvent être différentes des limites géologiques définies par le mineur.

Contrôle qualité

La qualité du modèle réalisé est définie par la densité des logs de sondages et des données hydrogéologiques mesurées *in situ*.

Pour en savoir plus

- Jeanpert J. (2017). Structure et fonctionnement hydrogéologiques des péridotites de Nouvelle-Calédonie., PhD Thesis, Université de la Réunion.
- Join, J.L., Robineau, B., Ambrosi, J-P., Costis, C., Colin, F., 2005. Groundwater in ultramafic mined massifs of New Caledonia. C. R. Geoscience 337, 1500–1508
- 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.

2.2. FICHE N°2 : MASSIF TYPE : PLATEAU ETAGÉ OU « PERCHÉ DRAINÉ »

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Massif type « Plateau Etagé »	2	Présentation d'un hydrosystème type (1) des massifs calédoniens : modèle de Koniambo

2.2.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définitions**

Le premier type est défini comme « plateau étagé » (Sevin, 2014) ou « Massif perché drainé » et désigne un massif minier dont la morphologie est caractérisée par des incisions profondes de vallées en « V » définissant des interfluves à crêtes aiguës. Le massif du Koniambo illustre cette catégorie auquel se rattache aussi le massif de Kopéto-Boulinda par exemple.

- **Objectifs**

Cette fiche rassemble les critères permettant de rattacher un site minier au modèle type « massif perché drainé » et d'envisager les principales conséquences hydrogéologiques.

2.2.2. DONNÉES REQUISES

- **La topographie** : des profils en long mettent en évidence la structure du relief et l'importance de l'incision du réseau hydrographique.
- **La piézométrie d'étiage** : l'information d'une désaturation possible de l'aquifère saprolitique à l'étiage constitue l'élément principal pour caractériser l'état de drainage du massif.

2.2.3. ILLUSTRATIONS



Figure 6 : Vue du massif de Koniambo, représentatif d'un massif perché drainé *(source B. Sevin, 2014)*

2.2.4. CARACTÉRISATION D'UN MASSIF PERCHE DRAINÉ

Critères de reconnaissance : le modèle de Koniambo

Les profils en long caractérisent l'incision du massif qui forme des escarpements marqués. Les vallées en « V » sont profondes (plusieurs centaines de mètres). Sur la carte géologique, le substratum affleure majoritairement alors que la cuirasse et les latérites affleurent secondairement sur des lambeaux de plateau plus ou moins étagés dans le massif.

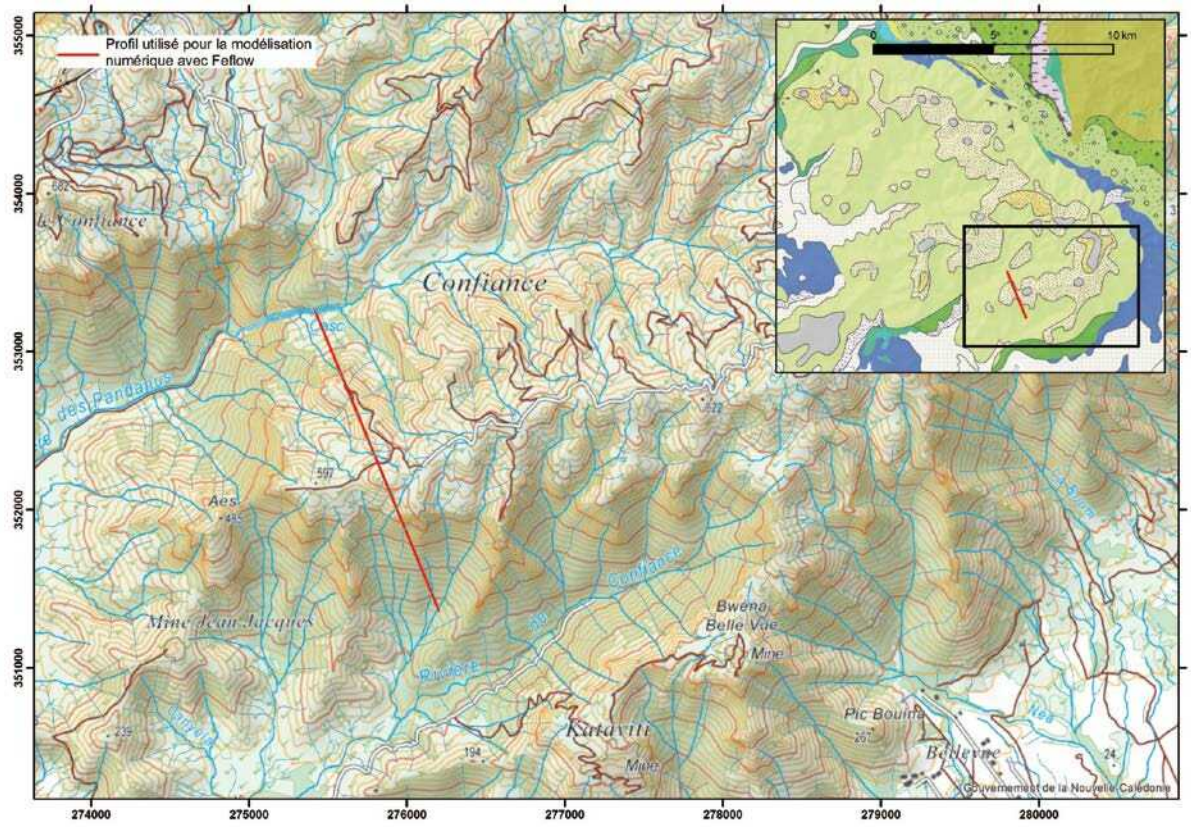


Figure 7 : Topographie caractéristique d'un massif drainé

Le contexte hydrogéologique est clairement défini par des niveaux de nappe à l'étiage qui se situent dans les péridotites saines. Sur le massif de Koniambo des forages profonds ont montré une désaturation du massif jusqu'à 200 m de profondeur.

Les simulations effectuées sur cette géométrie d'aquifère confirment le drainage potentiel complet de l'aquifère du socle au niveau des thalwegs.

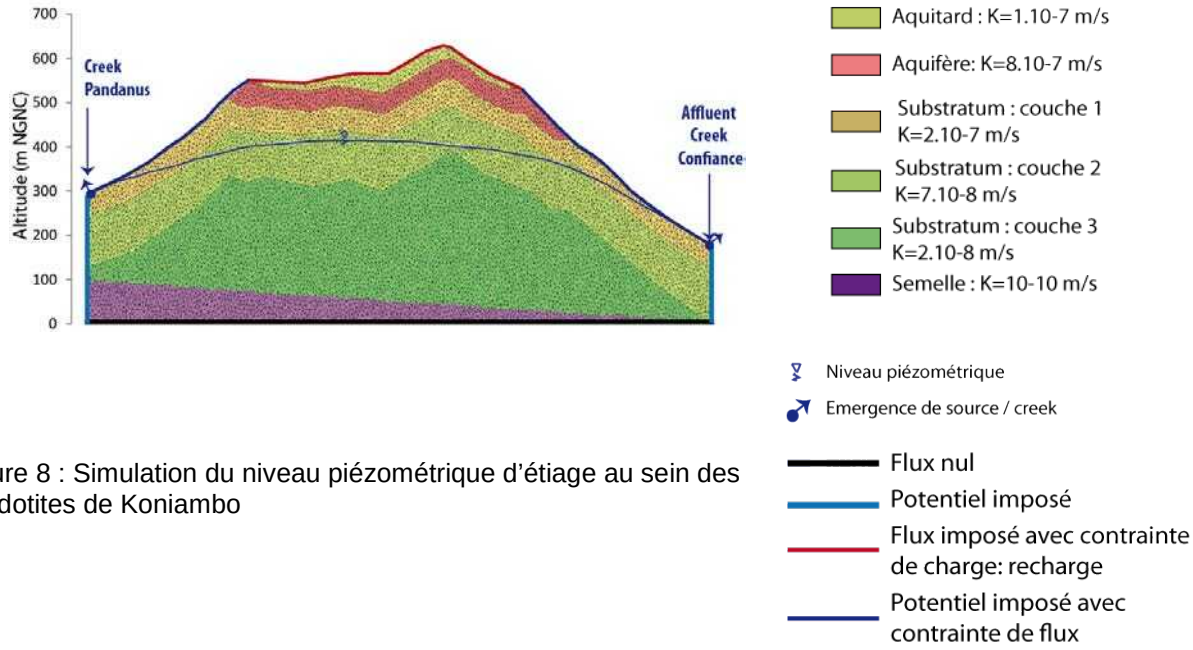


Figure 8 : Simulation du niveau piézométrique d'étiage au sein des péridotites de Koniambo

En revanche, l'aquifère saprolitique est susceptible de former une nappe perchée pendant les épisodes de forte pluviométrie.

Enjeux propres à ce type de système

Pour la gestion des eaux souterraines, les principaux enjeux dépendent directement de l'ampleur des fluctuations des niveaux de nappes à savoir :

- Une forte variabilité de la teneur en eau des formations d'altération en fonction des conditions topographiques locales ;
- Une **profondeur conséquente des niveaux de nappe en saison sèche** avec pour principales conséquences un accès difficile aux eaux souterraines, que ce soit pour la gestion environnementale ou pour l'exploitation éventuelle de la ressource.

Pour les massifs de type perché drainé, des **mesures régulières au cours de l'année de débits des sources principales et des cours d'eau, et de leur localisation** (altitude, horizon géologique), constituent les données les plus accessibles relatives aux variations des régimes hydrogéologiques. L'installation de seuils équipés de sondes de pression sur les sources pérennes est à privilégier, couplée à des mesures ponctuelles de jaugeage (Fiche n°7).

La forte variabilité des teneurs en eau peut constituer une contrainte lors des phases d'exploitation (zones saturées isolées). La mise en place d'une **base de données recensant les zones saturées rencontrées lors des forations pré-exploitation** peut permettre une première identification de ces zones saturées. Le **suivi piézométrique devra tenir compte de la saturation potentielle des horizons supérieurs (latérites et cuirasse). Des piézomètres doubles** ou piézomètres à cordes vibrantes doivent être privilégiés pour l'investigation des flux verticaux. Enfin, la mise en place de piézomètres profonds dans les secteurs clés doit permettre d'affiner la compréhension du système. (Fiche n°9).

2.3. FICHE N°3 : MASSIF TYPE PLATEAU OU « PERCHÉ MAL DRAINÉ »

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Massif type Plateau ou « Perché mal drainé »	3	Présentation d'un hydrosystème type (2) des massifs calédoniens : modèle Tiébaghi

2.3.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définitions**

Cette fiche présente le type de massif dit en « plateau » (Sevin, 2014) ou encore « perché mal drainé » désignant un massif minier dont la morphologie est caractérisée par une surface plane à faible inclinaison occupant une superficie de plusieurs km². Le massif de Tiébaghi est l'archétype de cette catégorie à laquelle se rattachent aussi les massifs de Poum ou Bélep.

- **Objectifs**

Cette fiche présente les critères d'un massif en plateau, perché ou mal drainé ainsi que les principaux enjeux hydrogéologiques liés à ce type de massif.

2.3.2. DONNÉES REQUISES

- **la topographie** : des profils en long mettent en évidence la structure du relief et l'importance relative du plateau.
- **la piézométrie d'étiage** : la profondeur de la nappe à l'étiage souvent faible et à quelques mètres, se situe dans les latérites et est caractéristique d'un faible drainage à l'échelle du massif.

2.3.3. ILLUSTRATIONS



Figure 9 : Vue du massif de Tiébaghi, représentatif d'un massif en plateau mal drainé (source T. Lamorille)

- **Critères de reconnaissance : le modèle de Tiébaghi**

Les profils en long caractérisent l'étendue importante des surfaces faiblement inclinées développées au sommet du massif. Sur la carte géologique, la cuirasse et le manteau d'altération constituent l'essentiel de cette surface structurale portée par des versants abrupts dans les péridotites.

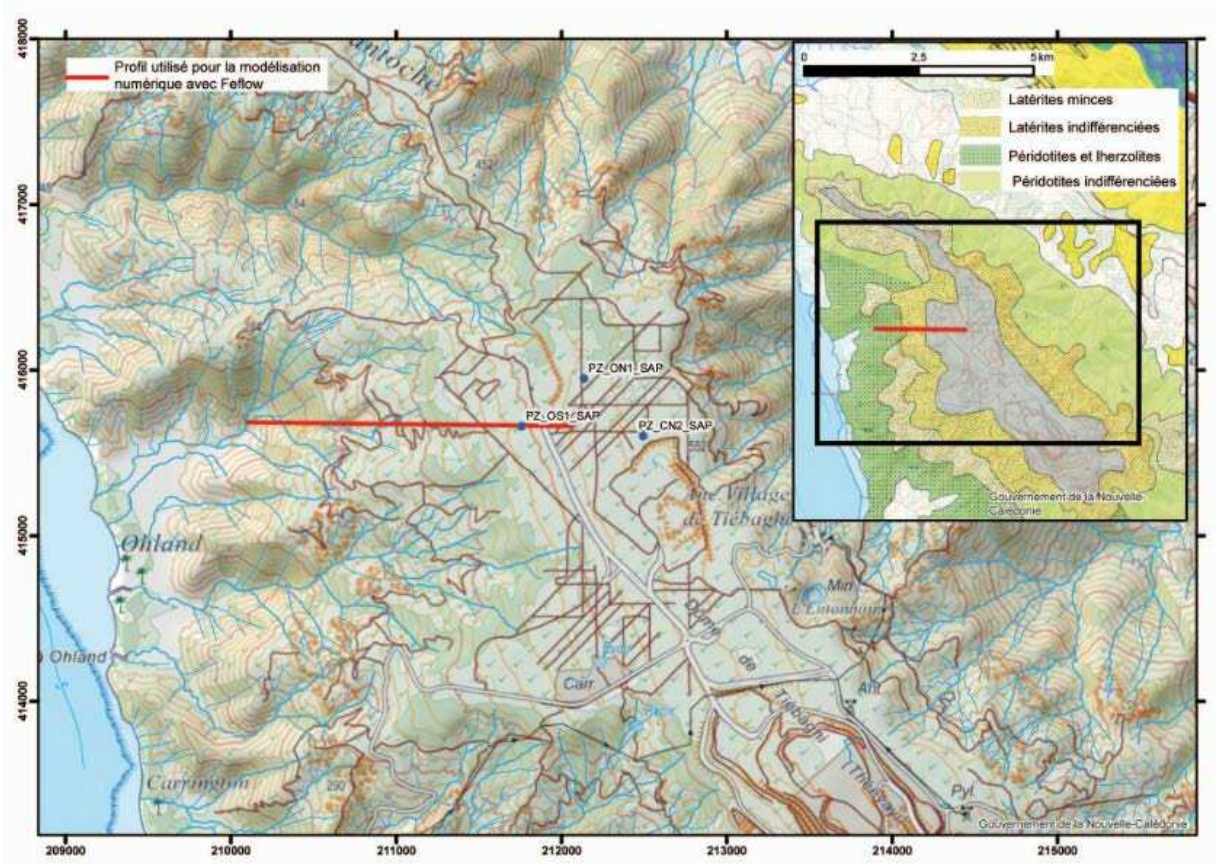


Figure 10 : Tiébaghi: Topographie caractéristique d'un massif en plateau.

Le niveau de la nappe à l'étiage se situe dans l'horizon latéritique à quelques mètres sous la surface.

Les simulations effectuées sur cette géométrie d'aquifère confirment l'absence de drainage suffisant pour désaturer les horizons latéritiques.

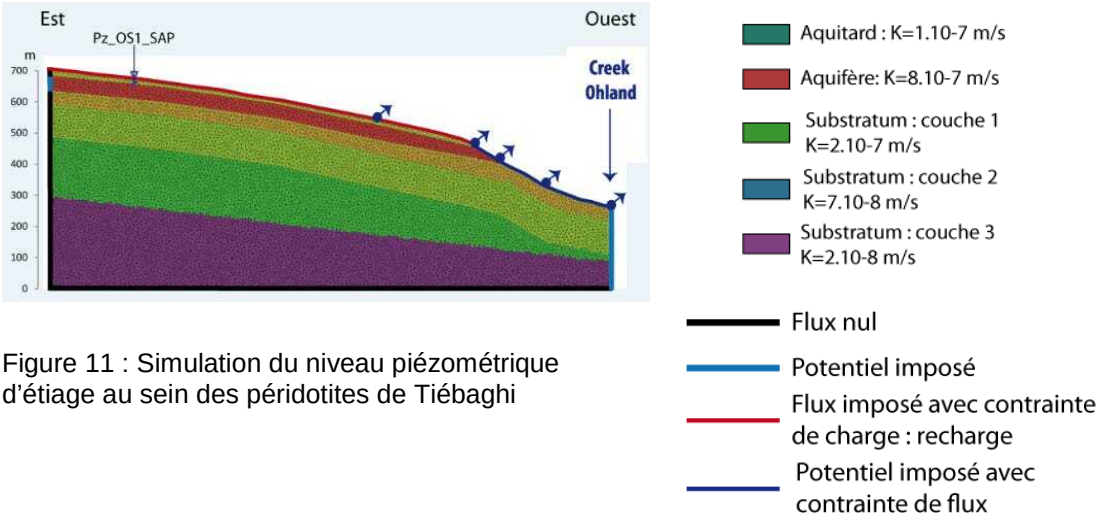


Figure 11 : Simulation du niveau piézométrique d'étiage au sein des péridotites de Tiébaghi

Enjeux propres à ce type de système

Pour la gestion des eaux souterraines, les principaux enjeux dépendent directement de la saturation permanente des niveaux d'altérites avec des contraintes liées à :

- la **présence d'eau dans les latérites** et la mise en eau des fouilles ;
- **l'instabilité potentielle des fronts de taille**, avec des hypothèses de saturation à prendre en compte dans les analyses de stabilité géotechnique ;
- des instabilités potentielles liées au contexte lithologique des massifs et à la nature du substratum, de type lherzolite, et à la **présence potentielle de smectites** qui sont des facteurs de risques supplémentaires ;
- dans le cas d'un phasage minier comprenant une étape en fosse fermée, **une estimation des débits à évacuer** peut être nécessaire afin de dimensionner les systèmes de pompage de façon appropriée.

En revanche, la présence d'un niveau phréatique proche de la surface constitue aussi une opportunité pour la gestion minière :

- la **nappe des saprolites devient une ressource exploitable** par pompage dans un forage dédié ou directement dans les fosses et/ou dolines naturelles ; cette ressource est facilement utilisable pour l'activité minière (base vie, arrosages, process, etc.);
- l'accessibilité aux eaux souterraines à faible profondeur facilite la surveillance et le suivi environnemental de la quantité et de la qualité de la ressource.

Dans le cas des massifs de type plateau, **un suivi piézométrique de l'aquitard des latérites doit être privilégié** (Fiche n°9 et Fiche n°10). Les forages peuvent être équipés en piézomètres temporaires, visant à suivre les fluctuations des niveaux de nappe et à identifier des zones à fonctionnement particulier (zones de drainage : Fiche n°12). La localisation des zones hydromorphes, dolines et sources temporaires, est également primordiale (Fiche n°13).

2.4. FICHE N°4 : MASSIF TYPE «BASSIN »

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Massif type « bassins »	4	Présentation d'un hydrosystème type (3) des massifs calédoniens : modèle de Goro

2.4.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définitions**

Cette fiche présente le type de massif dit en « bassin » (Sevin, 2014) ou encore « mal drainé » désignant un massif minier dont la morphologie est caractérisée par une surface plane à faible inclinaison occupant une superficie de plusieurs km² limitée par des crêtes. Le massif de Goro illustre cette catégorie à laquelle se rattachent aussi la plupart des massifs de l'extrême sud de la grande terre.

- **Objectifs**

Cette fiche présente les critères d'un massif en bassin peu drainé ainsi que les principaux enjeux hydrogéologiques liés à ce type de massif.

2.4.2. DONNÉES REQUISES

Les données requises pour l'identification du contexte hydrogéologique caractéristique des massifs de type « bassin » concernent successivement :

- **la topographie** : des profils en long mettent en évidence la structure du relief et l'importance relative des bassins ;
- **la piézométrie d'étiage** : la profondeur de la nappe à l'étiage se situe dans les latérites et caractérise l'absence de drainage efficace.

2.4.3. ILLUSTRATIONS



Figure 12 : Vue du massif de Goro, représentatif d'un massif en bassin, mal drainé *(source J. Jeanpert)*

2.4.4. CARACTÉRISATION D'UN MASSIF DE TYPE BASSIN

Critères de reconnaissance : le modèle de Goro

Les profils en long caractérisent l'étendue importante des surfaces faiblement inclinées formant des alvéoles entourées par des lignes de crêtes rocheuses. Sur la carte géologique, la cuirasse se développe sur les altérites en place ou sur des sédiments fluvio-lacustres en épandage dans les plaines.

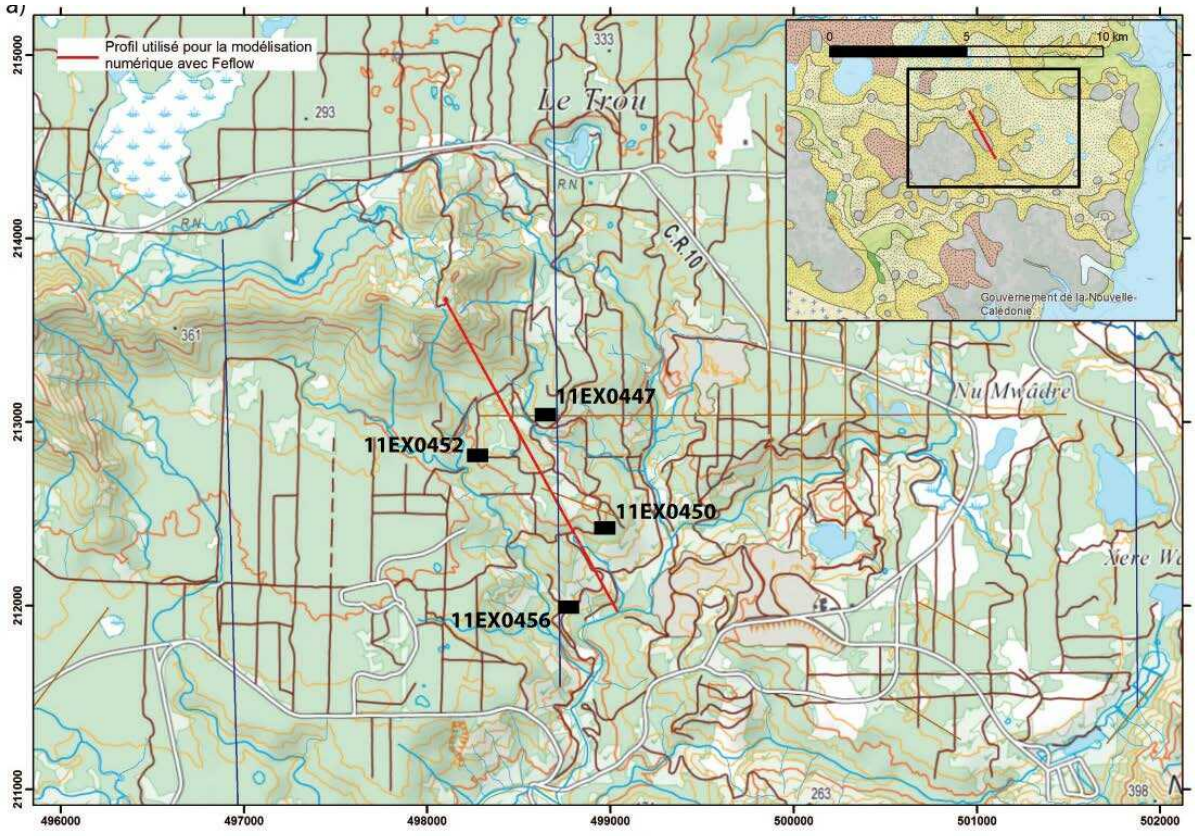


Figure 13 : Topographie caractéristique d'un massif en bassin

L'ensemble est marqué par la présence de dolines et de phénomènes pseudo-karstiques actifs.

Le niveau de la nappe à l'étiage se situe dans l'horizon latéritique à quelques mètres sous la surface.

Les simulations effectuées sur cette géométrie d'aquifère confirment l'absence de drainage suffisant pour dé-saturer les horizons latéritiques.

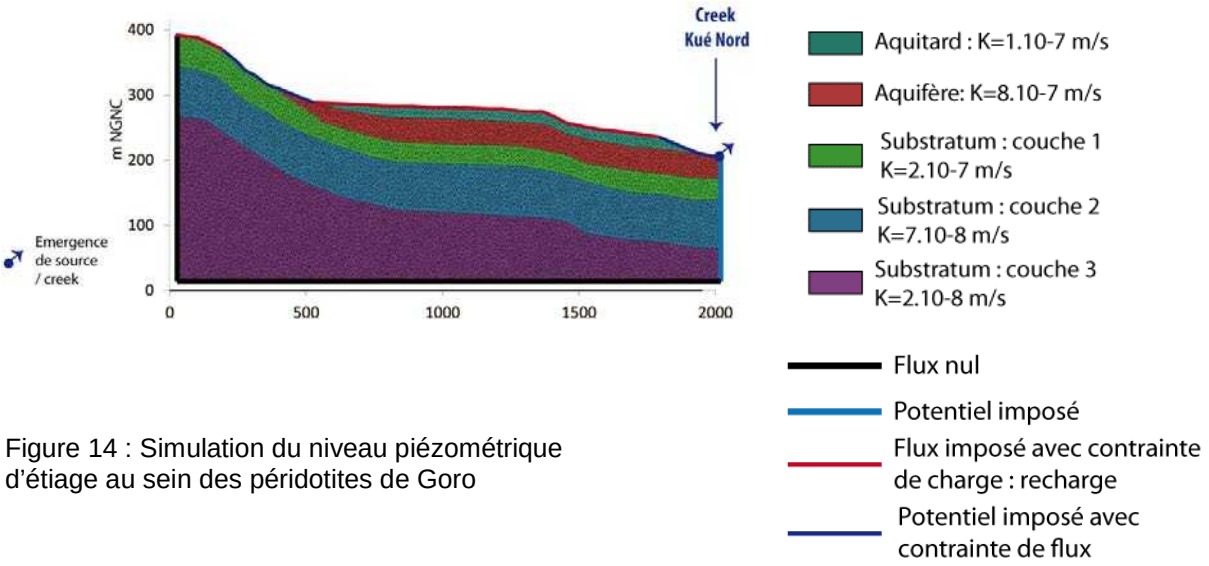


Figure 14 : Simulation du niveau piézométrique d'étiage au sein des péridotites de Goro

- **Enjeux propres à ce type de système**

Pour la gestion des eaux souterraines, à l'image des massifs perchés mal drainés, les principaux enjeux dépendent directement de la **saturation permanente des niveaux d'altérites avec des contraintes liées à la présence d'eau dans les latérites** (Fiche n°3).

La topographie en cuvette induit une hydrologie spécifique marquée par la **concentration des flux superficiels vers des dolines** et/ou bassins endoréiques ayant pour conséquence une **augmentation sensible des flux d'infiltration pouvant favoriser les processus de type pseudo-karstiques** particulièrement actifs dans ces massifs. Les circulations rapides associées à ces circulations constituent un enjeu majeur de la gestion quantitative et qualitative des eaux souterraines sur ce type de massif.
Pour ce type de système, la mise en place d'un suivi piézométrique devra tenir compte de la saturation potentielle des horizons supérieurs (latérites et cuirasse). Des **piézomètres doubles** ou piézomètres à cordes vibrantes doivent être privilégiés pour investigation des flux verticaux. Les forages peuvent être équipés en piézomètres temporaires, visant à suivre les fluctuations des niveaux de nappe et à identifier des zones à fonctionnement particulier (Fiche n°12).

La **localisation des zones hydromorphes, dolines, résurgences, bassins endoréiques** est également primordiale, ainsi que la caractérisation de leur fonctionnement (exemple: essais par traçage, suivi des débits); afin d'identifier et de quantifier précisément l'ensemble des flux de l'hydrosystème (Fiche n°13, Fiche n°14, et Fiche n°15).

3. DEUXIÈME PARTIE – CARACTÉRISATION DU CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE – ÉTAT INITIAL

Sur un massif minier, les problématiques liées à l'eau souterraine sont nombreuses. Elles peuvent être classées en deux grands domaines :

- des **questions visant les ressources en eau sur le plan quantitatif** (disponibilité de la ressource pour l'usage de l'exploitation, impact quantitatif de l'exploitation sur la disponibilité de cette ressource) **ou sur le plan qualitatif** (impact de l'activité sur la qualité de la ressource en eau) ;
- des **questions visant les aménagements miniers** et la nécessaire gestion des eaux souterraines sur le site.

Dans tous les cas, ces questions sont abordées au regard des connaissances acquises relatives au fonctionnement de l'hydrosystème. Toutes les études s'inscrivent donc nécessairement dans le cadre d'un schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique du site et d'une caractérisation des variables qui le définissent. Ce cadre doit pouvoir servir ultérieurement de référence aux travaux de simulations numériques réalisés à différentes échelles selon la problématique abordée.

Pratiquement il s'agit dans un premier temps de renseigner à l'échelle du massif trois types d'informations principales qui caractérisent la circulation des eaux souterraines:

1. **Définir la géométrie et les paramètres hydrodynamiques de l'hydrosystème** : la notion de bassin versant hydrologique doit être étendue au domaine souterrain. Les limites ne sont pas nécessairement concordantes avec les unités de l'écoulement de surface. L'identification des formations constitutives du système s'accompagne de leur caractérisation hydrodynamique. Cette approche conduit à la construction d'un bloc modèle dont les unités sont définies par leur comportement hydrodynamique ;
2. **Caractériser les conditions aux limites du domaine** : il s'agit de documenter les flux entrant (infiltration par les pluies, alimentation par l'écoulement de surface …) et sortant (émergences, limites à flux nuls ou limites à charges constantes) ;
3. **Caractériser les conditions initiales du système** pour une période de référence. Il s'agit de caractériser l'état initial de la ressource sur le plan quantitatif et qualitatif (données piézométriques et physico-chimiques des eaux).

Selon la problématique d'aménagement envisagée, ces informations seront complétées par les données prévisionnelles touchant la géométrie et les conditions aux limites.

L'ensemble des données nécessaires à la caractérisation hydrogéologique est résumé dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractérisation des conditions hydrogéologiques – Acquisition de données

L'HYDROSYSTÈME		CONDITIONS AUX LIMITES		L'ÉTAT INITIAL	
Fiche n°5	**Fiche n°6**	**Fiche n°7**	**Fiche n°8**	**Fiche n°9 et 10**	**Fiche n°11**
Structure et stratigraphie	Estimation de la perméabilité	Les flux	Les potentiels	Piézométrie	Qualité de l'eau
Modèle géologique Structures géologiques clés Données topographiques Données géophysiques	Description générique des horizons géologiques Essais *in situ* Données géophysiques Essais sur échantillons Diagraphies de T° et de conductivité	Suivi des entrées et sorties de l'hydrosystème : - Pluviométrie, - Évapotranspiration - infiltration, - Ruissellement, - Écoulement de base (= débit des creeks à l'étiage)	Suivi des plans d'eau (lac, dolines) Suivi des marais Suivi des marées Topographie des écoulements pérennes	Suivi pendant la foration Installation de piézomètres Ouvrages d'accès à la nappe (forage, puits...) Localisation des sources,	Prélèvements et analyses laboratoire
Données	**Données**	**Données**	**Données**	**Données**	**Données**
Données géologiques et topographiques Données géophysiques	Perméabilité Porosité Transmissivité Piézométrie	Données pluviométriques Coefficients de ruissellement Évapotranspiration Données de débit	Niveau d'eaux (piézométrie limnimétrie)	Niveaux d'eau en forages	Données chimiques

3.1. FICHE N°5 : L'HYDROSYSTÈME ; STRUCTURE ET STRATIGRAPHIE

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Étude hydrogéologique	5	Éléments et critères géologiques conduisant à définir la structure de l'hydrosystème

3.1.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définitions**

Une étude hydrogéologique nécessite au préalable une définition des limites de l'hydrosystème. L'extension verticale est abordée ici, à commencer par le **niveau du substratum imperméable (**Figure 4**),** assimilé au niveau de la **semelle tectonique serpentinisée**.

Au-dessus, six unités hydrogéologiques sont identifiées (Fiche 1) sur la base de mesures de conductivité hydraulique associées aux caractères lithologiques caractéristiques des horizons testés. Sur cette base, **l'épaisseur des unités hydrogéologiques à l'échelle d'un massif peut être abordée par l'analyse des données de sondage**.

- **Objectifs**

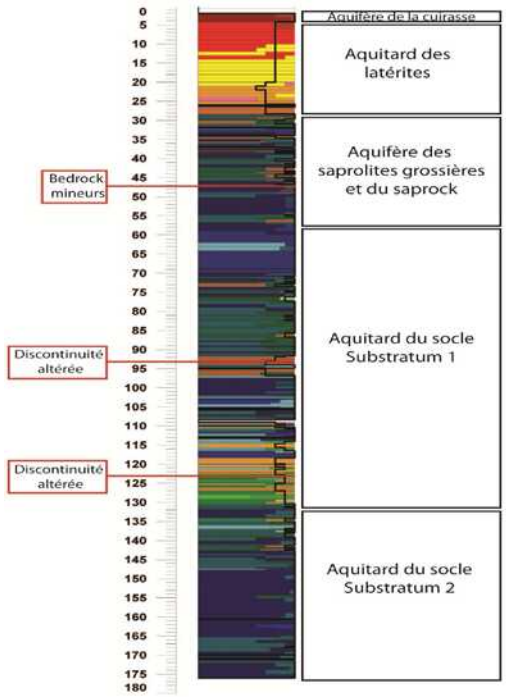
Il s'agit de définir la géométrie de l'hydrosystème minier multicouche.

3.1.2. DONNÉES REQUISES

- Données de sondages pour évaluer les épaisseurs des horizons altérés
- Cartographies des discontinuités lithologiques majeures pouvant complexifier le schéma multicouche (cortège filonien, plans siliceux, conduits karstiques) ;
- Données géophysiques.

3.1.3. ILLUSTRATIONS

Figure 15 : Exemple d'interprétation hydrogéologique du log d'un forage profond



3.1.4. MÉTHODOLOGIE

A l'échelle régionale, c'est-à-dire à l'échelle des massifs, une géométrie tabulaire est utilisée :

- L'épaisseur de l'horizon aquitard : les latérites, est définie à partir des données de sondage ;
- L'épaisseur de l'horizon aquifère : intègre les saprolites grossières et le saprock, voire le toit de la roche-mère définie par les mineurs, son épaisseur moyenne est de 50 m. En l'absence de forages profonds nous suggérons de considérer la base de cet horizon à 35 m sous la limite du bed rock tel que défini dans les sondages de reconnaissance ;
- Les couches inférieures correspondent aux couches de péridotites saines. Les épaisseurs sont constantes.

Utilisation des données

Dans le cas d'une étude locale, les interfaces facilement reconnaissables sont utilisées pour construire le modèle : le niveau de cuirasse d'une part, mais également l'interface saprolites fines et grossières. Si le nombre de sondages est suffisant et si la donnée peut être spatialisée, une interpolation de ce niveau peut être faite. En l'absence de données, la carte géologique au 1/50000ème du SGNC/DIMENC peut être utilisée Il s'agit alors de construire un ensemble de coupes géologiques définissant sur la zone d'étude la géométrie et l'organisation des différentes unités hydrogéologiques. Ces données doivent conduire à la construction d'un bloc modèle des unités hydrogéologiques définies dans la fiche 1.

Enjeux propres à ce type de système

L'enjeu consiste à définir le schéma conceptuel de l'hydrosystème servant de cadre à la simulation des écoulements. En particulier, ce schéma propose la distribution spatiale des épaisseurs des unités hydrogéologiques. Le bloc modèle qui en résulte s'appuie nécessairement sur des hypothèses géologiques et structurales dont la validation est importante au regard du forçage induit par cette géométrie sur la distribution des écoulements.

Contrôle qualité

Cette étape nécessite la participation des géologues de site pour valider les hypothèses géologiques qui conduisent à extrapoler les données de sondages à l'échelle de la zone concernée par l'étude hydrogéologique.

Pour en savoir plus

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

3.2. FICHE N°6 : L'HYDROSYSTÈME ; PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Caractérisation des conditions hydrogéologiques	6	Essais pour l'évaluation des propriétés hydrodynamiques des aquifères

3.2.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

Définitions

Perméabilité : aptitude qu'a l'aquifère à laisser passer l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique ; unité : m/s.

Emmagasinement : volume d'eau que peut produire un prisme d'aquifère carré de côté unitaire de hauteur égale à celle de l'aquifère, sous l'effet d'une variation de charge hydraulique unitaire ; unité : sans dimension. L'estimation de l'emmagasinement ne peut être faite que par le suivi d'un test hydraulique sur des ouvrages voisins non testés (piézomètres d'observation).

Transmissivité : produit de la perméabilité par la puissance aquifère (en milieu isotrope) ; aptitude qu'a le milieu à laisser passer l'eau ; unité : m^2/s.

Objectifs

Lister les différents types d'essais réalisables pour évaluer les propriétés hydrauliques des horizons.

Nota : comme les essais ne se font en général qu'au puits de pompage, on aura essentiellement accès à la transmissivité. Un suivi sur un piézomètre d'observation sera donc nécessaire pour évaluer avec précision l'emmagasinement de l'aquifère.

3.2.2. DONNÉES REQUISES

- **Données géologiques** existantes des forages, données d'enregistrement des conditions de foration, puits ou autres points d'accès à la nappe ;
- **Caractéristiques techniques et géologiques des ouvrages** faisant l'objet d'essais (coupes techniques et géologiques) ;
- **Suivi des niveaux** (ouvrages pompés et non-pompés) et du débit (ouvrage pompé), à l'aide d'enregistreurs, et contrôle par mesures manuelles ;
- Autres données géologiques du secteur d'étude ; localisation des ouvrages exploités pour l'eau souterraine ; localisation des systèmes hydrologiques de surface (sources, cours et plans d'eau artificiels ou non).

3.2.3. ILLUSTRATION

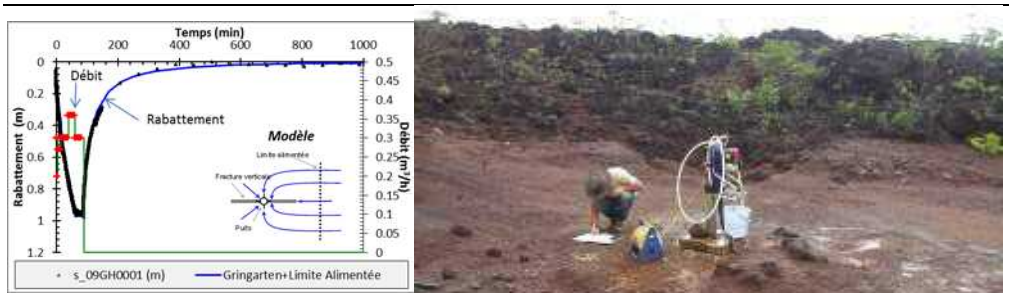


Figure 16: Pompage d'essai sur un piézomètre (Massif de Goro) *(cliché source JL. Join)*

Techniques et équipements

Études préliminaires

Sélection des sites à tester en fonction des caractéristiques géologiques et des projets d'activité ;

En fonction de l'objectif des tests (information sur la perméabilité de l'aquifère, sur sa structure géométrique, ou essais pour évaluer le débit exploitable d'un ouvrage), des essais plus ou moins complexes pourront être menés.

Diagraphies de température et de conductivité électrique, ou autres

Ces mesures sont susceptibles d'apporter des renseignements sur les différents aquifères rencontrés par l'ouvrage, sur les chemins d'eau et la connexion d'un ensemble de fractures, etc. Ces informations pourront aider à interpréter les essais hydrauliques : identification des zones perméables, mise en évidence de fractures importantes, etc..

Essais in-situ

Ces essais permettent d'estimer *a minima* les propriétés du milieu de l'aquifère capté par l'ouvrage.

- Essais de perméabilité réalisés à l'avancement des forages :

Ces essais ont pour objectif d'estimer la perméabilité de l'aquifère en fonction de la profondeur en testant la réaction d'une zone isolée (de quelques de mètres d'épaisseur en général) à l'injection d'eau, ou au pompage. Différents essais peuvent être réalisés :

Tableau 2 : Différents types d'essai de perméabilité

Type d'essai	Objectif
Essai Lefranc, à charge constante	Caractérisation de la perméabilité des zones testées ; évaluation de l'hétérogénéité verticale de la perméabilité, et en fonction des horizons aquifères.
Essai à charge variable	Deux types : soit à niveau montant, soit à niveau descendant ; évaluation de la gamme de perméabilité (ordre de grandeur)
Essai Lugeon	Mise en pression des zones testées : caractérisation des caractéristiques drainantes des fractures lors de mise en pression à des fins géotechniques (barrage…)

Ces essais sont en général assez lourds à mener du fait de la mise en place d'un équipement coûteux. Par contre, ils apportent une information précieuse sur l'évolution locale de la perméabilité en fonction de la profondeur. Si cette opération est reproduite sur plusieurs ouvrages, il est possible de faire des statistiques afin de déduire une éventuelle évolution régionale de la perméabilité en fonction de la profondeur, des perméabilités moyennes des différents horizons perméables, etc.

- Essais de perméabilité réalisés dans des forages équipés (type piézomètres de suivi) et dans des trous nus :

Slug test : **essai très simple à réaliser**, nécessitant peu de matériels et une durée d'essai de quelques minutes à quelques heures. Donne une bonne **estimation de la perméabilité** de l'aquifère dans un rayon de quelques mètres autour du forage. Technique très intéressante pour caractériser un grand nombre d'ouvrages et avoir une distribution statistique de la perméabilité d'un aquifère. Des slugs test simples par immersion puis retrait d'un volume (bouteille par exemple) permettent d'obtenir très simplement des gammes de perméabilité (nécessitant uniquement une sonde d'enregistrement de niveau d'eau et une sonde piézométrique manuelle).

Deux types de réponses ont pu être observés sur les essais réalisés en Nouvelle-Calédonie :

- Réponse « classique et fréquente » au slug test, donnant une valeur de perméabilité (Figure 17).

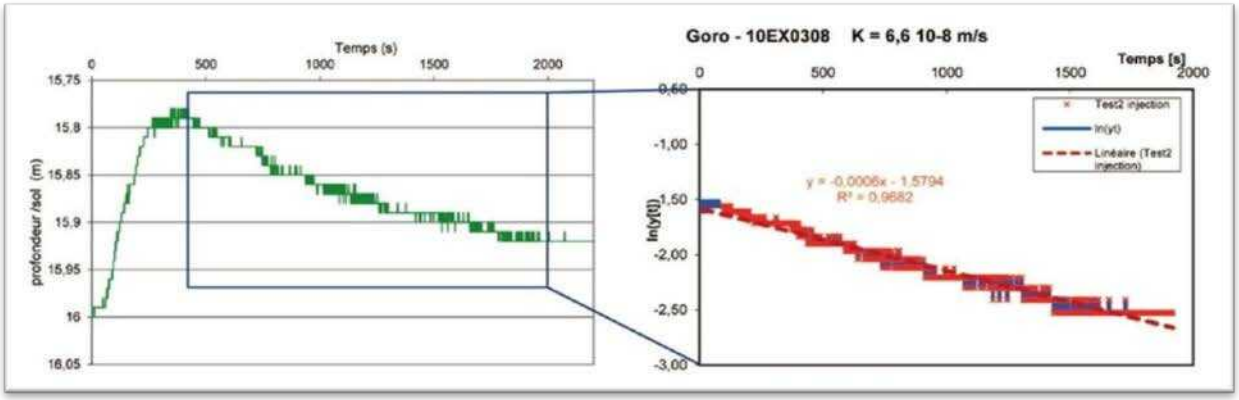


Figure 17 : Réponse « classique et fréquente » au slug test

- Réponse oscillatoire, synonyme de forte perméabilité, pouvant indiquer la présence d'une zone de fracture (Figure 18).

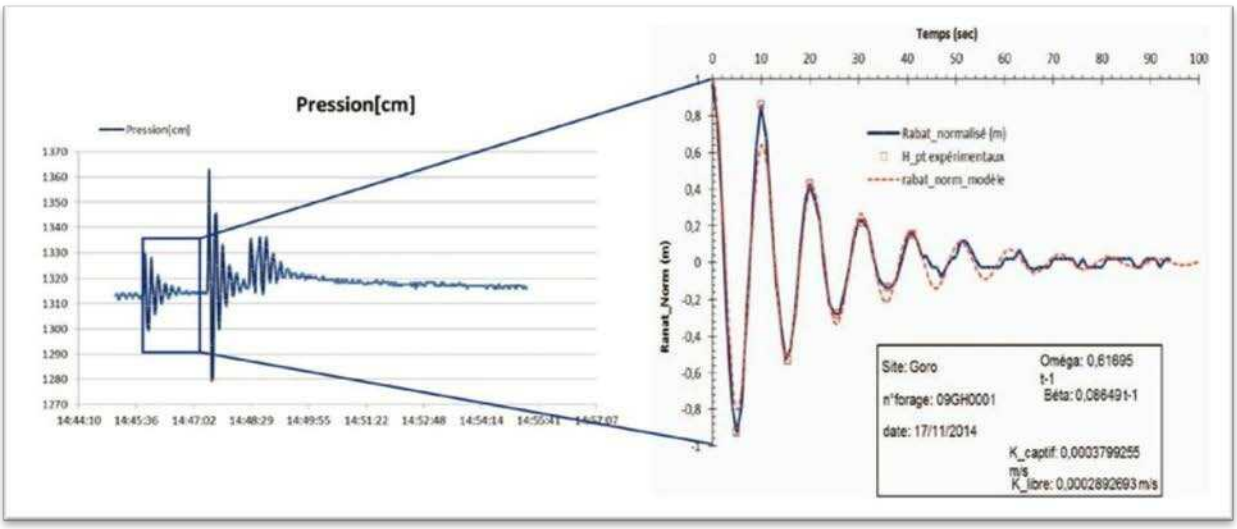


Figure 18 : Réponse « oscillatoire» au slug test ; synonyme de forte perméabilité

Pompage : **essai plus complexe** à mettre en œuvre avec une durée variant de plusieurs heures à plusieurs jours, voire semaines. La durée de l'essai dépendra des objectifs que l'on veut donner à l'essai. Par exemple, s'il s'agit d'une simple **caractérisation de la perméabilité**, des essais de quelques heures seront en général largement suffisants. Par contre si l'objectif est la caractérisation d'échanges entre l'aquifère pompé et d'autres aquifères (par exemple drainance) ou avec les systèmes de surface, et/ou pour obtenir des informations sur la géométrie de l'aquifère, des tests beaucoup plus longs (quelques jours à plusieurs semaines dans certains cas extrêmes) seront nécessaires. Dans les cas où un ou des piézomètres d'observation sont suivis durant ces essais, une estimation fiable de l'emmagasinement pourra être réalisée. En effet, au puits de pompage, les effets liés au puits (capacité de puits, pertes de charges) ne permettent pas une estimation fiable de ce paramètre.

Sur les trous nus ces mesures permettent d'appréhender la perméabilité moyenne de la zone saturée recoupant les latérites et les saprolites grossières, selon la profondeur du sondage. À noter cependant que la perméabilité obtenue sera une donnée moyenne sur la longueur testée. Toutefois, à défaut de la mise en place d'un réseau piézométrique conséquent, ces mesures permettent une première estimation de la variabilité spatiale de la perméabilité.

Utilisation des données

Les données (mesures de niveaux et de débit) doivent être analysées et critiquées, puis les niveaux (rabattements) doivent être modélisés en prenant compte des éventuelles variations de débit, afin d'en déduire les principales caractéristiques hydrodynamiques.

Données complémentaires pouvant aider à l'interprétation des tests :

- qualité des eaux (en cas de pompage): turbidité (nature), odeur, conductivité, température, pH, etc., analyses (prélèvement d'échantillon pour analyse [chimie, bactériologie])
- perturbations potentielles : pluviométrie, eaux de surface, marée, pression atmosphérique, autres pompages, eaux de surface (jaugeages si besoin), etc.

Enjeux propres à ce type de mesure

Identification de la variabilité des propriétés hydrodynamiques au sein d'un même horizon aquifère (étude statistique).

Ces essais peuvent mettre en évidence des structures drainantes (zone faillée, système pseudo-karstique), des échanges entre différents aquifères ou entre aquifères et systèmes de surface (aquifères de surface et/ou sources, cours d'eau, lacs…).

Les informations acquises par ces essais sont indispensables pour pouvoir renseigner en paramètres hydrodynamiques les modèles numériques maillés qui seront réalisés à l'échelle d'un site.

Contrôle qualité des données

- Les équipements doivent être calibrés régulièrement et des mesures manuelles doivent être réalisées pour identifier les éventuels biais des enregistreurs automatiques (pression, débit);
- Vérification des saisies (terrain – bureau) ;
- Correction des données si nécessaire ;

  Rapports de suivi et d'interprétation des essais.

Pour en savoir plus :

Quelques ouvrages de référence :

- De Marsily Gh. (1986). Quantitative Hydrogeology, Academic Press
- Kruseman G.P., De Ridder N.A. (1994). Analysis and evaluation of pumping test data.- IRLI Publication n°47
- Streltsova, T.D. (1988). Well testing in heterogeneous formations.- An Exxon monograph.- John Wiley & sons
- Lauga R. (1990). Pratique du forage d'eau.- Seesam Edition, Paris.

Quelques logiciels d'aide à l'interprétation des essais par pompage :

- AQUTESOLV (HydroSOLVE, Inc.), Aquifer Test (Waterloo Hydrogeologic) , OUAIP (BRGM)

Quelques normes de références:

- NF P 94-157-1 et 2, Sols : Reconnaissance et essais — Mesures piézométriques — Partie 1 : Tube ouvert. Et Partie 2 : Sonde de pression interstitielle.
- NF EN ISO 22282-1, 2 ,3 ,4 et 6, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais géohydrauliques - Partie 1: règles générales ; Partie 2 : essai de perméabilité à l'eau dans un forage en tube ouvert ; Partie 3 : essais de pression d'eau dans des roches ; Partie 4 : essais de pompage et Partie 6 : essai de perméabilité à l'eau dans un forage en tube fermé.

3.3. FICHE N°7 : CONDITIONS AUX LIMITES ; LES FLUX

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Caractérisation des conditions hydrogéologiques	7	Estimation des flux d'infiltration ou de drainage

3.3.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définitions**

Conditions aux limites : Les limites spatiales (lignes ou surfaces) d'un hydrosystème doivent pouvoir être caractérisées par des conditions hydro-dynamiques définies (conditions aux limites). Les limites se subdivisent principalement en **limites à condition de potentiel** et **limites à condition de flux**, mais sont aussi caractérisées en pratique par le **sens des échanges d'eau qu'elles permettent entre le système et l'extérieur** : limites d'alimentation, limites d'émergence.

Les conditions hydrodynamiques sur la limite peuvent être déterminées par des conditions de flux (ou conditions de Neuman) dans le cas de limites étanches ou de limites à flux imposés.

- **Objectifs**

La prise en compte des circulations d'eaux souterraines dans le cadre d'étude sur la ressource ou d'études géotechniques, nécessite la **définition d'un cadre spatial délimité par des frontières aux conditions aux limites connues**. Quelle que soit l'échelle considérée (étude locale ou régionale), le cadre spatial délimité par des **frontières aux conditions aux limites connues** est le seul qui permette la mise en œuvre des calculs analytiques ou numériques pouvant conduire à valider des hypothèses quantitatives sur les circulations souterraines dans la zone étudiée. Les lieux géographiques associés à des conditions de flux ou de potentiel (Fiche n°8) connues sont donc des lieux privilégiés pour définir le cadre spatial d'une analyse hydrogéologique.

3.3.2. DONNÉES REQUISES

L'identification des limites à condition de flux concerne l'acquisition de données structurales (limites étanches géologiques ou artificielles) et de données hydrologiques relatives à la caractérisation de débits d'infiltration (recharge de l'aquifère définie à partir des données météorologiques) et/ou débits d'extraction (pompages, drainage).

3.3.3. ILLUSTRATION



Figure 19 : Station pluviométrique complète sur le site de l'Ancienne Pépinière à Goro, Massif du Sud *(source J. Jeanpert)*

Les limites à flux nul concernent essentiellement **l'identification des limites latérales et de la limite inférieure de l'hydrosystème** (plancher imperméable). Leur identification s'appuie sur la carte géologique en situant dans l'espace la position de formations réputées imperméables (ex : accidents siliceux, semelle serpentineuse). Dans certaines conditions la carte piézométrique permet d'identifier des **limites hydrauliques** (lignes de partage des eaux ou lignes d'écoulement). Il convient alors de démontrer que ces conditions restent stables dans les conditions de l'étude (limites à l'infini non influencées).

Les limites à flux imposées concernent essentiellement les surfaces topographiques et correspondent en général à la **limite supérieure des aquifères soumis à des flux entrants** (infiltration, bassins de rétention, forages d'injection) **ou sortants** (forages d'exploitation).

- **Techniques et équipements**

Nous traiterons ici principalement du cas des **surfaces topographiques soumises à l'infiltration des pluies efficaces**. À partir de la hauteur précipitée, la part de l'infiltration peut être estimée expérimentalement par des mesures lysimétriques délicates à mettre en œuvre. Elle est plus généralement déduite de l'estimation des termes du bilan hydrologique :

Infiltration = Précipitations – Évapotranspiration – Ruissellement

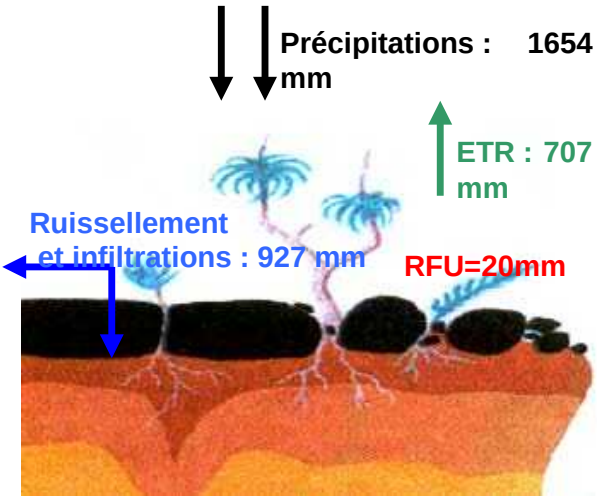


Figure 20 : Exemple d'estimation du bilan hydrologique de Tiébaghi (Retour 2005).

Ces calculs sont effectués **à l'échelle d'un bassin versant hydrographique représentatif de la zone d'étude**. L'équipement de base consiste donc en l'installation d'une **station climatique** (*a minima* pluviométrie, température) représentative du bassin versant et d'une station limnimétrique permettant **l'estimation du débit de ruissellement à l'exutoire** du bassin versant considéré.

La station liminimétrique nécessite l'identification d'un **seuil hydraulique** permettant d'établir une relation univoque entre hauteur d'eau et débit. Selon l'importance et la variabilité des débits attendus ce seuil peut nécessiter des infrastructures de génie civil plus ou moins importantes.



Figure 21 : Exemples de stations limnimétriques selon l'importance du creek *(source Golder)*

L'estimation de **l'évapotranspiration potentielle** reste plus difficile d'accès. Elle peut être approchée par des **formules empiriques** (formule de Turc) dont la validité reste discutable dans le contexte des massifs miniers. Par ailleurs la **notion de réserve facilement utilisable** (RFU) employée pour définir l'évapotranspiration réelle, est également mal connue et de l'ordre de 20-30 mm en moyenne, mais elle est vraisemblablement très variable en fonction de la présence ou de l'absence de cuirasse.

- **Utilisation des données**

Les données obtenues sur les bassins versants de référence sont utilisées pour la **caractérisation des flux d'infiltration** sur le domaine d'étude. Compte tenu des incertitudes liées en particulier à l'évapotranspiration, **les flux calculés sont estimés à 20 %**.

Selon la taille du domaine d'étude, une analyse critique de la représentativité des données obtenues sur un bassin versant de référence doit conduire éventuellement à multiplier les équipements élémentaires à l'échelle du domaine. Cette approche peut aboutir à la production de **carte des flux d'infiltration**.

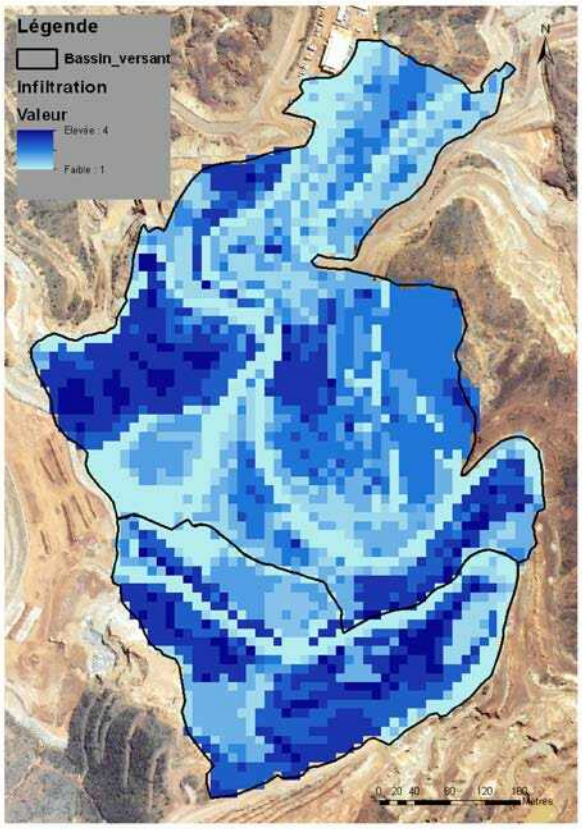


Figure 22 : Cartographie de la capacité d'infiltration sur le massif de Poro, selon la méthode PaPRIKA (Dorfliger, 2009), d'après Verdier (2014).

Les flux d'infiltration évoluent à toutes les échelles de temps. L'intégration des données peut être établie sous la forme de **débit fictif continu pour une année hydrologique, pour une évolution mensuelle ou décadaire selon l'objet d'étude**. La méthode du bilan hydrologique ne se prête pas à des fréquences d'évolution plus importantes.

- **Enjeux propres à ce type de mesure**

Les enjeux liés à la caractérisation des limites à flux d'infiltration sont doubles. Ils permettent:

1. de **contraindre les calculs d'écoulement souterrain par les flux entrant** dans le système ;
2. de **vérifier la cohérence des hypothèses et paramètres de calcul** au regard des débits concernés.

- **Contrôle qualité**

Compte tenu des incertitudes liées à cette mesure, le contrôle de la qualité des données utilisées est généralement établi par la mise en œuvre d'un **bilan global des entrées/sorties du système étudié**. Une analyse critique de ce bilan doit permettre d'évaluer la fiabilité de la méthode utilisée à condition d'avoir clairement identifié et mesuré l'ensemble des sorties du système (débit des creeks, débits pompés). Un excédent trop important peut être le signe de circulations profondes non prises en compte dont la réalité devra être discutée et recherchée par d'autres méthodes.

Pour en savoir plus :

- Domenico P.A., Schwartz W. (1997), Physical and Chemical Hydrogéology, Willey ed. ISBN 0-471.59762-7
- Jeanpert J. (2017). Structure et fonctionnement hydrogéologiques des péridotites de Nouvelle-Calédonie., PhD Thesis, Université de la Réunion.
- Allenbach M. et coll. (2015) – Volume I : Synthèse. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». CNRT « Nickel et son enviironnement »
- Allenbach M. et coll. (2015) – Volume II : Annexes – Rapports thématiques. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». CNRT « Nickel et son enviironnement »
- Mathys N., Caze N., Richard D. (2015) – Suivi hydrosédimentaire des petits bassins versants miniers, guide méthodologique. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». CNRT « Nickel et son environnement ». 66 pages

3.4. FICHE N°8 : CONDITIONS AUX LIMITES ; LES POTENTIELS

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Caractérisation des conditions hydrogéologiques	8	Estimation des surfaces d'eau libre et émergences perchées

3.4.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définition**

Conditions aux limites : les limites spatiales (lignes ou surfaces) d'un hydrosystème doivent pouvoir être caractérisées par des conditions hydro-dynamiques définies (conditions aux limites) (Fiche n°7).

Les conditions hydrodynamiques sur la limite peuvent être déterminées par des **conditions de potentiel déterminées sur la limite** (conditions de Dirichlet). La limite est alors constituée des **points dont la charge hydraulique est définie indépendamment de l'évolution du système** (ex : ligne de rivage, lac, altitude du niveau d'un creek en relation avec la nappe, ligne d'émergence de la nappe, etc.)

- **Objectifs**

La prise en compte des circulations d'eaux souterraines dans le cadre d'étude sur la ressource ou d'études géotechniques, nécessite la définition d'un cadre spatial délimité par des frontières aux conditions aux limites connues (Fiche n°7). Les **lieux géographiques associés à des conditions de potentiel connues sont donc des lieux privilégiés pour définir le cadre spatial d'une analyse hydrogéologique**.

3.4.2. DONNÉES REQUISES

Les données requises concernent essentiellement la **cartographie hydrogéologique** visant à identifier les **zones naturelles à potentiel fixe** telles que la ligne de sources, les plans d'eau permanents, les cours d'eau en relation hydraulique avec la nappe, le rivage marin ou les zones à niveau maintenu constant par des moyens artificiels (dénoyage de fosses, drainage, bassins d'infiltration).

3.4.3. ILLUSTRATIONS



Figure 23 : Une doline permanente peut constituer localement une limite à potentiel imposé *(source Alizert)*

Techniques et équipements

L'identification de limites à conditions de potentiel résulte essentiellement de l'analyse hydrologique du site étudié. Elle s'appuie sur des reconnaissances de terrain visant **à identifier la situation des surfaces d'eau libre** (plans d'eau et rivières) **en lien hydraulique avec la nappe et les lignes de sources** déterminées généralement par l'affleurement du substratum ou du toit de l'aquifère (sources de débordement, de déversement ou de trop-plein).

En l'absence de limites de ce type, **une isopièze peut constituer une limite choisie à potentiel imposé** à la condition de rester dans le cadre d'une situation hydrogéologique **de régime permanent.**

Utilisation des données

Les données cartographiques sont utilisées pour définir les limites latérales du système dans lequel l'étude est menée. L'information sur l'altitude du plan d'eau libre, de la ligne de sources ou la valeur de l'isopièze permettent alors la **résolution des équations de l'écoulement à l'intérieur du domaine**.

Enjeux propres à ce type de mesure

Une **limite à potentiel imposé est le lieu d'échange de flux (entrant ou sortant) avec l'extérieur du système**. Ces échanges et leur évolution peuvent être estimés au regard des hypothèses d'aménagement envisagées à l'intérieur de ces limites. En revanche, ces frontières hydrauliques garantissent l'absence d'influence sur les écoulements souterrains des aquifères voisins. Leur validité et leur constance devient une garantie de l'absence d'impact des modifications de l'hydrosystème étudié sur les aquifères voisins.

Contrôle qualité

Compte tenu des enjeux évoqués, la validation d'une limite à potentiel imposé pour limiter le cadre d'une étude hydrogéologique doit faire l'objet d'une attention particulière pour en garantir son usage. Plusieurs types de contrôle sont envisageables :

Sur le terrain, il convient de **contrôler la continuité hydraulique entre le plan d'eau libre utilisé comme limite de l'hydrosystème et l'aquifère** (piézomètres et traçages). Il convient aussi de s'assurer que les fluctuations du plan d'eau sont soit négligeables, soit mesurées et indépendantes du système étudié.

Dans la conduite des simulations analytiques ou numériques menées dans le cadre d'une étude d'aménagement, il convient de **s'assurer que la modification des flux (entrants ou sortants) sur ces limites n'altère pas le niveau du plan d'eau concerné**.

Pour en savoir plus :

- Domenico P.A., Schwartz W. (1997) - Physical and Chemical Hydrogéology, Willey ed. ISBN 0-471.59762-7
- Jeanpert J. (2017)- Structure et fonctionnement hydrogéologiques des péridotites de Nouvelle-Calédonie., PhD Thesis, Université de la Réunion.

3.5. FICHE N°9 : L'ÉTAT INITIAL ; DÉFINITION D'UNE PIÉZOMÉTRIE DE RÉFÉRENCE

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Caractérisation des conditions hydrogéologiques	9	Position de la surface piézométrique de référence – carte piézométrique initiale

3.5.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définitions**

Carte Piézométrique : carte en courbes de niveau (isopièzes) de la surface de la nappe.

- **Objectifs**

Produire une ou plusieurs cartes piézométriques caractérisant l'hydrosystème à l'étiage et en hautes eaux. Il s'agit d'un document de référence pour toutes les études à venir sur le milieu. C'est aussi le principal élément utilisé pour la validation des modèles de simulation numérique. Cette carte synthétise l'ensemble des informations permettant de situer la nappe. Dans ce cadre, une attention particulière doit être portée à la valorisation hydrogéologique des campagnes de reconnaissance géologique. En particulier, la technique du piézomètre temporaire installé sur les sondages de reconnaissance contribue à l'établissement d'une carte de référence.

3.5.2. DONNÉES REQUISES

- Données d'enregistrement des conditions de foration (présence ou absence de niveau d'eau), puits ou autres points d'accès à la nappe;
- Nivellement et mesures piézométriques sur sondages de reconnaissance (piézométrie temporaire) ;
- Données de niveau d'eau des eaux de surface : rivières, sources, dolines, lacs, zones de marais, marées (si nécessaire).

3.5.3. ILLUSTRATIONS



Figure 24 : Installation d'un ouvrage temporaire (Massif de Poro) *(source JL. Join)*

Techniques et équipements

Afin de caractériser un état initial, il s'agit *a minima* de tracer deux cartes piézométriques : une carte en condition d'étiage et une carte en condition de hautes eaux.

Le tracé des isopièzes nécessite l'acquisition d'un maximum de données de préférence réparties de façon homogène sur la zone d'étude. La qualité de ce document est directement liée à la quantité de points d'accès à l'eau. Pour cela, l'acquisition de données pendant les travaux de foration et l'installation d'ouvrages de suivi temporaires est nécessaire.

Recommandations générales

- La carte de référence principale doit être réalisée en condition d'étiage maximum ; la carte des hautes eaux doit être réalisée si possible hors épisodes pluvieux.
- Sur le terrain, les données peuvent être collectées par rapport à différents repères (sol, PVC, capot de protection…). Le repère de mesure doit toujours être précisé et les niveaux systématiquement recalculés en m NGNC.
- Données piézométriques traduites en élévation, avec, lorsque cela est possible, un haut niveau de précision (+/- 5 mm pour les mesures manuelles). Les données brutes doivent être sauvegardées, puis arrondies en fonction de la précision de l'équipement utilisé (précision de la mesure, possibilité de distension du câble pour les mesures profondes…).
- Les données peuvent être collectées par différents type de sondes (sonde piézométrique manuelle, capteur de pression…).
- D'autres mesures indirectes de niveau des aquifères sont également requises, telles que:
  - Élévation des résurgences et sources, avec leur variation saisonnière ;
  - Élévation des eaux de surface suspectées d'être en contact avec les eaux souterraines: lacs, dolines, rivières…

Acquisition de données pendant les travaux de foration

- Dans le cas de forages *aircore*, utilisés en général pour les travaux de prospection et de pré-exploitation, le **suivi des arrivées d'eau** doit être référencé en plus du *logging*. Un tableau précisant le nom du forage, ses coordonnées, date et heure, profondeur de foration, et une information sur la saturation des matériaux, doit être renseigné. Ces informations seront ensuite traduites en élévation.
- Dans le cas de forage avec injection d'eau, les informations sur la remontée des eaux de forage ou l'infiltration totale des eaux doivent être répertoriées pendant la foration, avec une estimation de la profondeur de foration pour chaque information.
- **Pendant les travaux de foration, des mesures de niveaux d'eau** peuvent être réalisées avant reprise de la foration le matin et à la fin du poste en fin de journée. Ces données permettent d'identifier les différents niveaux des nappes rencontrées.
- La profondeur du forage et du tubage doivent être notées.
- De même tout **phénomène d'artésianisme** doit être référencé, associé à une profondeur de foration.
- Le personnel doit être formé à la mesure de niveaux d'eau. Les données doivent être rapportées en mètre sous la surface, puis en **élévation**.
- Les données de niveau d'eau observé lors de la foration peuvent être présentées sous forme de tableau et de graphique du niveau d'eau en fonction de la profondeur de foration.
- L'absence d'eau dans un forage est une information piézométrique par défaut et doit être consignée.

Acquisition de données par des installations d'ouvrages temporaires

- Des **installations simples peuvent être réalisées sur les forages de pré-exploitation** : des trous nus, préservés pour un suivi de courte durée. Les trous nus doivent être protégés des infiltrations de surface.

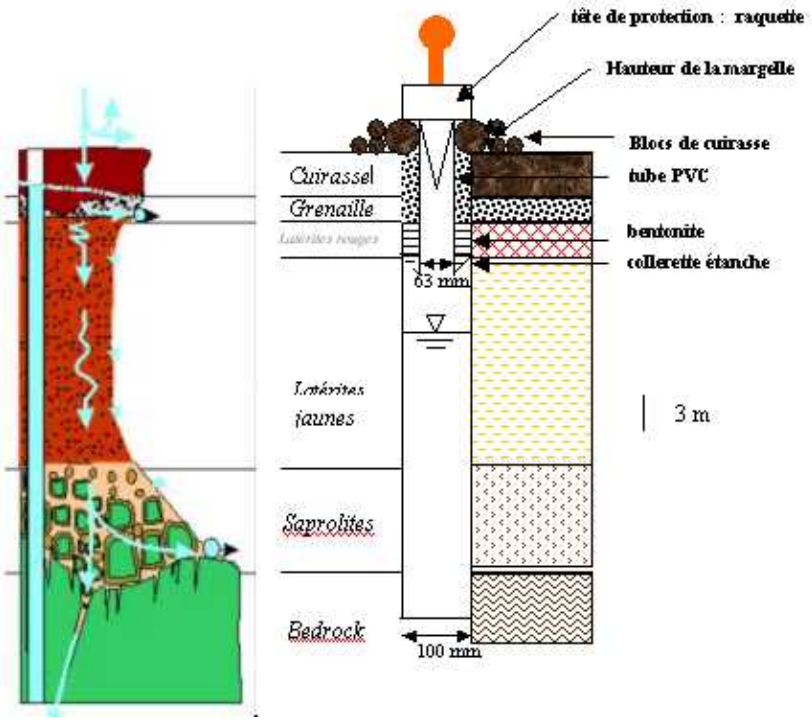


Figure 25 : Schéma d'installation d'un ouvrage temporaire

- Les **données** suivantes doivent être **référencées pour chaque ouvrage** : coupe géologique, matériel utilisé pour la foration, diamètre de foration et de tubage, profondeur d'installation ; position de la collerette étanche (type chambre à air); caractéristiques des matériaux (PVC ; joint étanche ; cimentation ou remblayage ; caractéristiques du mélange utilisé…), profondeur d'installation des sondes...
- Les **données des ouvrages long-terme** (piézomètres, capteurs de pressions…) seront la source de données supplémentaires.
- **Fréquence d'installation des ouvrages** : Il est préconisé d'utiliser l'ensemble des ouvrages permettant un accès à l'eau. L'équipement temporaire des forages de reconnaissance est une bonne solution pour la définition d'une carte de référence sur un réseau de points dense, maintenu pendant au moins une année hydrologique compète, autorisant la production d'une carte d'étiage et de hautes eaux.
- Enregistrement des niveaux d'eau :
  - Les niveaux d'eau doivent être mesurés par rapport à un repère prédéfini, et marqué (tube PVC, capot métallique, margelle…) qui aura été levé au préalable. Les niveaux d'eau seront traduits en m NGNC.
  - La profondeur totale du piézomètre ou du trou nu doit être contrôlée à chaque mesure.

Utilisation des données

Les données doivent être analysées :

- En fonction des données pluviométriques pour sélectionner les données utilisables pour la réalisation de la carte;
- À l'échelle de zones, ou d'un massif (Figure 26), **pour définir une carte piézométrique de référence utilisable pour toute étude hydrogéologique ultérieure** (calibration des modèles numériques ou analytiques, observation et contrôle des impacts d'aménagement…)

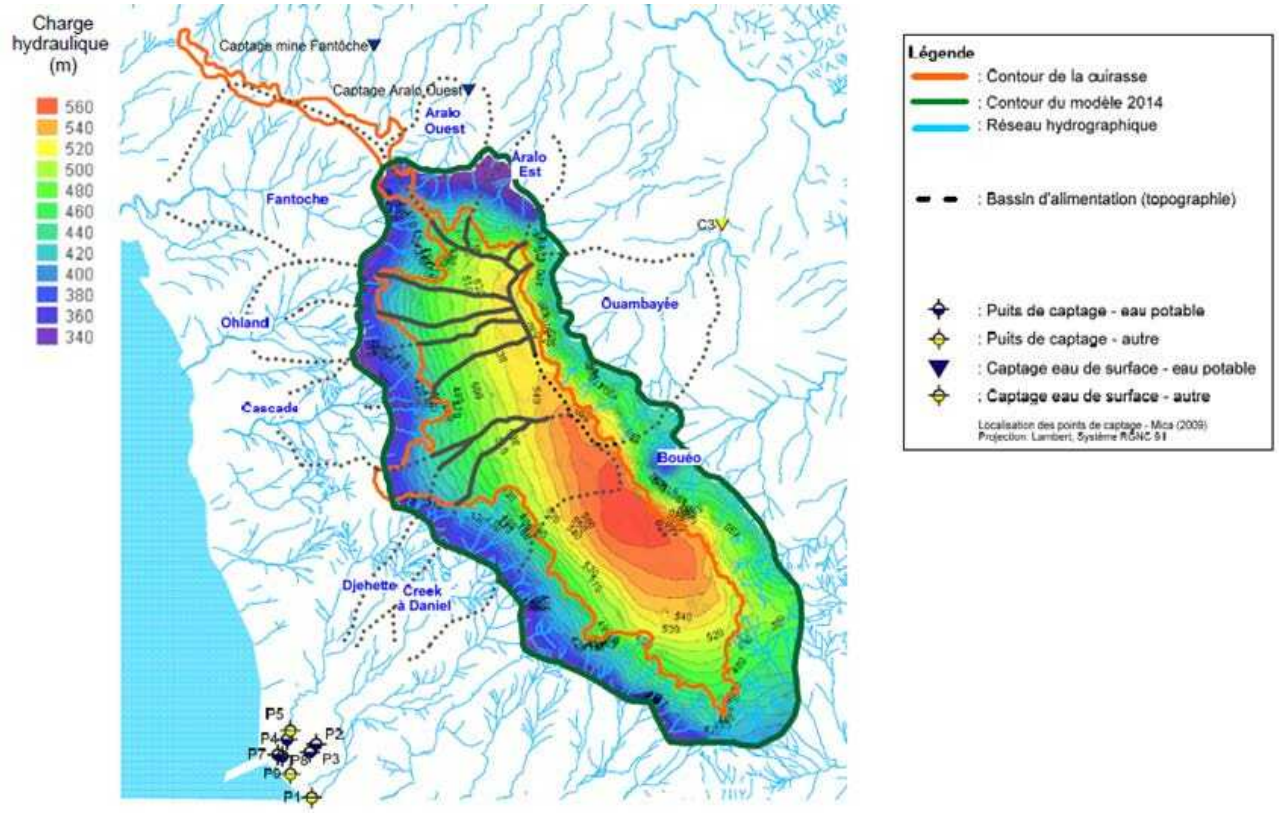


Figure 26 : Carte piézométrique de référence, issue de l'analyse des données terrain, Tiebaghi *(source Golder 2014)*

Enjeux propres à ce type de mesure

- Erreur de lecture ou biais dans les enregistrements ;
- Modification du repère de mesure (déplacement de la sonde, tassement du sol, erreur de choix du repère…) ;
- Répartition spatiale inégale des données.

Contrôle qualité

- Formation du personnel (suivi de forage ; mesures manuelles, nettoyage des sondes…) ;
- Réalisation des campagnes de mesure sur un maximum d'ouvrages ;
- Vérification des saisies (terrain – bureau) et vérification des conversions en élévations ;
- Correction des données si nécessaire ;
- Interprétation des données sous forme de cartes piézométriques.

Pour en savoir plus :

- Lamorille T. (2006) Caractérisation des circulations d'eau souterraine sur le massif ultrabasique de Tiébaghi, rap. Master 2, Université d'Avignon.

3.6. FICHE N°10 : LE SUIVI PIEZOMÉTRIQUE

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Caractérisation des conditions hydrogéologiques	10	Suivi de la position de la surface piézométrique

3.6.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définitions**

Piézométrie : mesure de l'élévation des niveaux d'eaux souterraines

- **Objectifs**

Assurer l'acquisition de données permettant un suivi des conditions d'écoulement au cours du temps et permettant d'évaluer l'évolution de l'hydrosystème au cours de l'exploitation. Cette acquisition de données est effectuée sur la base d'un réseau de piézomètres dont la pérennité au cours du temps est compatible avec le plan d'exploitation de la mine.

Produire un historique de l'évolution des niveaux de nappe utilisable pour la calibration et la validation des modèles de simulation

3.6.2. DONNÉES REQUISES

- Données du suivi temporel (sondes automatiques) des piézomètres, puits ou autres points d'accès pérennes à la nappe ;
- Données du suivi temporel (sondes automatiques) des niveaux des eaux de surface : rivières, sources, dolines, lacs, zones de marais, marées (si nécessaire) ;
- Plans de développement et projet minier (garantir la pérennité des ouvrages piézométriques)
- Suivis des prélèvements (puits ; pompage en fond de fosse…)
- Suivis des précipitations

3.6.3. ILLUSTRATIONS



Figure 27 : Plateforme piézométrique (Massif de Goro) *(source Golder)*



Figure 28 : Développement d'un piézomètre (Massif de Tiébaghi) *(source Golder)*

Techniques et équipements

Recommandations générales

- Identification des zones représentatives du milieu nécessitant des caractérisations piézométriques
- **Données piézométriques traduites en élévation** (Fiche n°9, détails sur les mesures et repères de mesures)
- Les données peuvent être collectées par différents types de sonde (sonde piézométrique manuelle; capteurs de pression…). Des **mesures de pressions atmosphériques** doivent être réalisées si les capteurs de pression ne sont pas reliés à la surface.
- La **fréquence de mesure** doit être adaptée aux variations attendues des niveaux piézométriques et observées lors de la définition de la piézométrie de référence. Quelques ordres de grandeurs sont précisés ci-dessous :

Tableau 3 : Fréquence des mesures piézométriques en fonction de l'objectif

Effet mesuré	**Fréquence usuelle des mesures**
Fluctuation annuelle d'un aquifère	Mensuelle
Effets de pompages	2 s à quotidien, selon les variations des débits pompés
Réaction aux évènements météorologiques	15 min à quotidien
Effets des marées	Horaire
Essais de pompage: - Essai par palier - Essai à charge constante - Slug test	 2 s à 5 min (fin de l'essai) 2 s (début) à horaire (fin de l'essai) 2 s (perméabilité moyenne) à 1 minute ou plus (faible perméabilité)

- Les **mesures automatiques doivent être contrôlées par des mesures manuelles** pour identifier tout disfonctionnement ou biais dans les mesures. De même les mémoires et les niveaux de batterie des capteurs doivent faire l'objet d'un contrôle mensuel pour éviter toute perte de données.
- Les sondes de mesures de pression, doivent être couplées à des mesures de pression atmosphérique.
- Les crépines doivent être ajustées à la zone de contribution de l'aquifère et réduites au maximum, pour éviter la contribution de plusieurs aquifères à la mesure. Une trop grande zone de contribution pouvant inclure plusieurs aquifères captifs intègrerait l'ensemble des niveaux d'eau des différents aquifères et le niveau d'eau enregistré serait essentiellement représentatif de l'aquifère présentant la transmissivité la plus élevée.
- D'autres mesures indirectes de niveau des aquifères sont également requises, telles que :
  - Élévation des résurgences et sources avec leur variation saisonnière ;
  - Élévation des eaux de surface suspectées d'être en contact avec les eaux souterraines : lacs, dolines, rivières…

Acquisition de données par des installations d'ouvrages

Les suivis peuvent être réalisés sur différents type d'ouvrages :

- **L'installation de piézomètres pérennes** (PVC ou métalliques) garantissant l'accès à la nappe (crépinés ou ouverts) :
  - Les tubages utilisés varient en fonction de l'utilisation ultérieure de l'ouvrage et du diamètre initial de foration : PVC basique ou environnemental (suivi chimique ou non) ; diamètre des tubes (25 mm, 32 mm, 50 mm ; 60 mm)…Le diamètre 50 mm permet l'utilisation de la plupart des équipements de mesure et prélèvement (sonde piézométrique, tube de prélèvement type « Bailer », petite pompe immergée…).
  - Les longueurs crépinées doivent être adaptées à l'utilisation de l'ouvrage (réduites au maximum et sous le niveau minimum de la nappe pour les essais hydrauliques ; sur toute la colonne d'eau pour les suivis de pollution potentielle (hydrocarbures…)).
  - La **granulométrie du massif filtrant doit être adaptée** à la granulométrie des horizons captés; pour les piézomètres dans les latérites, une chaussette fine en géotextile peut être ajoutée autour des crépines en l'absence de massif filtrant de granulométrie adaptée.
- **L'installation de sondes dans des trous cimentés** (ce type d'ouvrage est utilisé pour installer des sondes de pressions, type cordes vibrantes ; cellules de pression interstitielles …)
- Les **données suivantes doivent être référencées pour chaque ouvrage** : coupe géologique, matériel utilisé pour la foration, diamètre de foration et de tubage ; longueur de crépine et profondeur d'installation ; présence de bouchon/de décanteur ; caractéristiques des matériaux (PVC ; massif filtrant ; joint étanche ; cimentation ou remblayage ; caractéristiques du mélange utilisé…), profondeur d'installation des sondes...

Le Tableau 4 récapitule les différents types d'ouvrages à installer en fonction de leur utilisation ultérieure :

Tableau 4 : Différents types de piézomètres

Application	**Type de piézomètre à privilégier**
Formations à faible perméabilité	Mise en place de cellules de pressions (tubes cimentés)
Formations à perméabilité moyenne à forte	Tout type
Test hydraulique	Tubes ouverts (piézomètres) pour l'ouvrage testé; les autres types peuvent être utilisés pour les puits d'observation
Échantillonnage pour suivi qualitatif	Piézomètres (= tube ouvert)
Mesure de la pression interstitielle	Cordes vibrantes
Mesure de nappes multiples	Piézomètres

- Fréquence d'installation des ouvrages :
  - Les ouvrages doivent être installés sur toutes les nappes potentiellement impactées par les activités : aquifère directement connecté à une zone qui sera dénoyée ; aquifère connecté à des zones sensibles : sources, puits, zones humides, dolines…
  - Dans le cas d'aquifères multi-couche, les suivis doivent être réalisés dans les différents niveaux, par l'installation de piézomètre multiple, ou de plateforme piézométrique (latérite ; saprolite…) ; afin de déterminer les gradients verticaux ;
  - Les espacements entre les ouvrages dépendent de la complexité et des caractéristiques des aquifères.

Tableau 5 : Espacements préconisés de piézomètres

Situation	Espacement préconisé
Tendance régionale à l'échelle du massif	0,5 à 1 km²
Interaction entre eau souterraine et eau de surface / Dénoyage de zones / Essais de pompage	1 point à quelques mètres et 1 point à quelques dizaines de mètres du point d'intérêt avec un alignement parallèle à la direction attendue des écoulements

- Enregistrement des niveaux d'eau :
  - Les niveaux d'eau doivent être mesurés par rapport à un repère prédéfini et marqué (tube PVC, capot métallique, margelle…) qui aura été levé au préalable. Les niveaux d'eau seront traduits en m NGNC. ;
  - La profondeur totale du piézomètre ou du trou nu doit être contrôlée à chaque mesure.

Utilisation des données

Les données doivent être analysées :

- À l'échelle d'un piézomètre pour caractériser la variation saisonnière ;
- En fonction des données pluviométriques pour identifier les temps de réaction des aquifères ;
- À l'échelle pluriannuelle, pour identifier les impacts potentiels des activités minières.

Enjeux propres à ce type de mesure

- Erreur de lecture ou biais dans les enregistrements ;
- Modification du repère de mesure (déplacement de la sonde, tassement du sol, erreur de choix du repère…) ;
- Connexion entre les nappes, liée à des joints étanches insuffisants ;
- Discontinuité dans les données.

Contrôle qualité

- Formation du personnel (suivi de forage, mesures manuelles, nettoyage des sondes…) ;
- Les équipements doivent être calibrés régulièrement et des mesures manuelles doivent être réalisées pour identifier les biais ;

- Vérification des saisies (terrain – bureau) et vérification des conversions en élévations ;
- Correction des données si nécessaire ;
- Qualification des données (par exemple méthodologie développée par le SANDRE Service d'Administration Nationale des Données et des Référentiels sur l'Eau);
- Rapports *a minima* annuels de suivi et interprétation des données.

Pour en savoir plus :

- NF X10-999 : Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrages de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages
- NF P 94-157-1 et 2, Sols : Reconnaissance et essais — Mesures piézométriques — Partie 1 : Tube ouvert. Et Partie 2 : Sonde de pression interstitielle.

3.7. FICHE N°11 : L'ÉTAT INITIAL ; LA QUALITÉ DES EAUX

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
État initial – la qualité des eaux	11	Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie

3.7.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

Définitions

La qualité des eaux, ou **géochimie des eaux** en référence au lien avec la nature des roches aquifères qui contiennent la nappe, est un outil de diagnostic multiple qui permet : i) d'établir un état qualitatif d'une ressource en eau et d'évaluer un éventuel impact si un état initial existe, mais aussi ii) de caractériser le fonctionnement d'un hydrosystème.

Objectifs

Cette fiche a pour objectifs de :

- Présenter les paramètres physico-chimiques mesurés dans les péridotites de Nouvelle-Calédonie ;
- Préciser les méthodes et fréquences de mesures de la qualité des eaux dans les péridotites.

3.7.2. DONNÉES REQUISES

- Mesures *in situ* des paramètres physico-chimiques ;
- Résultats d'analyses en laboratoire des éléments majeurs et traces ;
- Coupes géologiques et de l'équipement du forage échantillonné, ou de la position de la source ou point de prélèvement dans le creek.

3.7.3. ILLUSTRATIONS

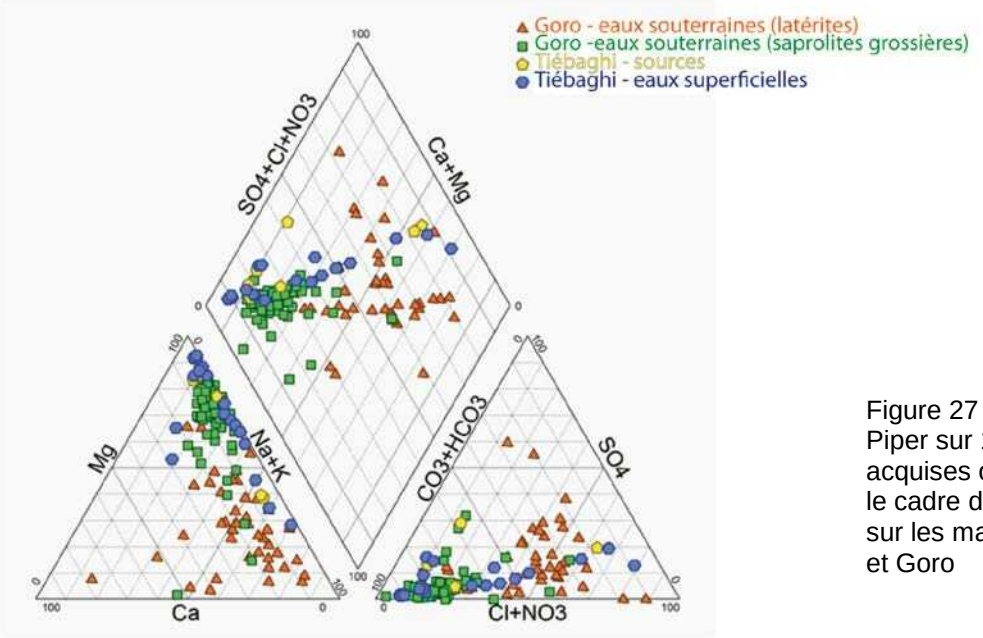


Figure 27 : Diagramme de Piper sur 154 analyses acquises ou compilées dans le cadre du projet HYPERK sur les massifs de Tiébaghi et Goro

3.7.4. MÉTHODOLOGIE

Techniques et équipements

Une caractérisation de la signature géochimique des eaux est indispensable pour identifier les eaux. Les analyses doivent être réalisées sur des **échantillons filtrés** (à l'aide d'une pompe manuelle à 0,45 µm par exemple). Le protocole de **prélèvement et de stockage de l'échantillon** doit être adapté à l'analyse réalisée (acidification pour l'analyse des cations par exemple).

Certains paramètres physico-chimiques sont mesurés *in situ* : pH, conductivité et température. Les paramètres potentiel redox et oxygène dissous peuvent apporter des informations complémentaires dans le cas des eaux souterraines. La concentration en matières en suspension peut être réalisée en laboratoire.

Les diagrammes de type Scholler, Stiff ou Piper (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) permettent de représenter graphiquement les **éléments majeurs** contenus dans les eaux. Pour cela, les cations (Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+) et anions (Cl^-, HCO_3^-, SO_4^{2-}, NO_3^-) doivent être analysés et la balance ionique doit être inférieure à 5 % pour valider les analyses.

Les teneurs en **éléments traces métalliques** doivent être mesurées et notamment les ions Chrome (danger sanitaire du Cr VI).

Les normes et limites de détection varient selon les laboratoires mais doivent faire référence à des méthodes reconnues par les normes françaises ou européennes.

D'autres paramètres peuvent également être analysés : les **isotopes stables de l'eau $\delta^{18}O$ et δ^2H** ou l'isotope de l'hydrogène, le **tritium ^3H**. Ce paramètre permet l'estimation du temps de résidence des eaux.

Utilisation des données

- Données physico-chimiques *in situ*

Les données de pH et conductivité renseignent sur la minéralisation des eaux et sur leur acidité. Les eaux dans le profil de péridotites sont relativement identifiables avec un **pH et une conductivité qui augmentent lorsque l'on s'enfonce dans le profil**. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente la variation des paramètres en fonction de la profondeur du forage. Sur ce graphique, la profondeur de la mi-crépine est utilisée et elle est soustraite à la profondeur du mur des latérites ; ainsi les profondeurs négatives correspondent aux latérites, et les profondeurs positives aux saprolites grossières et péridotites.

Dans les latérites le pH est acide compris entre 4 et 6, localement neutre. Dans les saprolites grossières et dans les péridotites, il est compris entre 7 et 9 et peut atteindre localement des valeurs très élevées pour les eaux dites hyperalcalines et liées à des mécanismes de serpentinisation.

Les conductivités mesurées dans les horizons supérieurs du profil avoisinent les 50 µS/cm (voire moins pour les conductivités proches de celles des précipitations) et les 150 µS/cm en moyennes dans les premières dizaines de mètres dans la saprolite grossière.

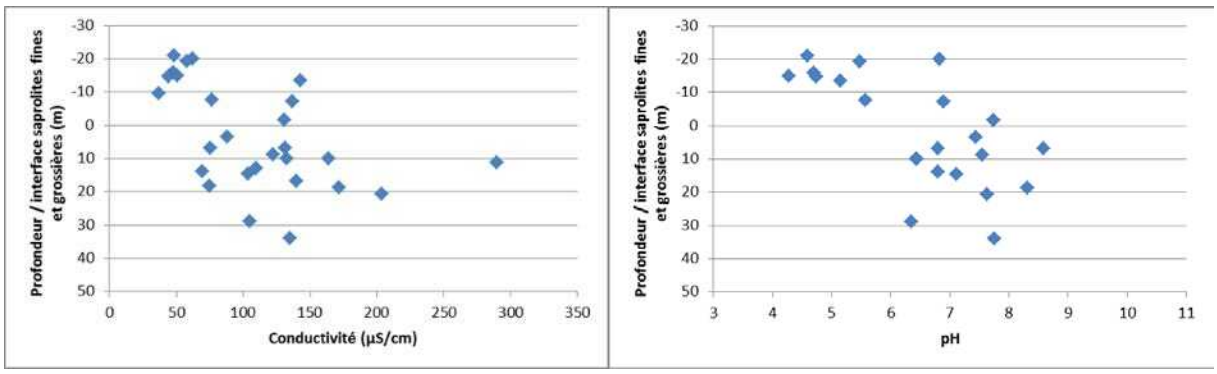


Figure 28 : Variation des paramètres en fonction de la profondeur du forage (piézomètres localisés sur le secteur de Goro, Massif du Sud)

- Analyses des ions majeurs et métaux

Les données des ions majeurs (cations et anions) permettent de caractériser la signature des eaux. Dans le cas des massifs de péridotites, les eaux sont **bicarbonatées magnésiennes**. Les teneurs en calcium restent toujours faibles malgré des variations locales.

- Évaluation de l'origine des eaux, altitude de la recharge

Les mesures des isotopes stables sur trois pluviomètres positionnés dans le massif du Sud d'une part, et sur le massif du Koniambo d'autre part permettent de définir la droite météorique locale des eaux, pour la Nouvelle-Calédonie (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) : $\delta^2H = 8,5\ \delta^{18}O + 15$.

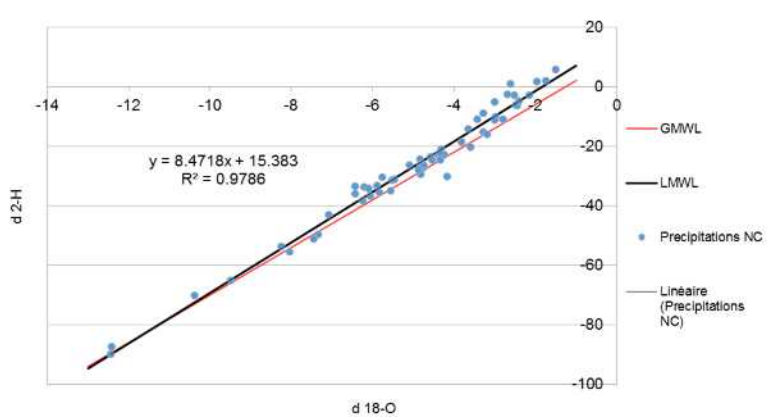


Figure 29 : Droite météorique locale des eaux (GMWL = droite météorique mondiale, et LMWL = droite météorique locale, calédonienne)

La signature des eaux en ^{18}O et ^{2}H permet d'évaluer l'altitude de l'eau qui recharge la nappe, déterminer d'éventuels phénomènes d'évaporation, ou encore d'estimer la recharge et mettre en évidence d'éventuels mélanges entre plusieurs types d'eaux : les eaux de pluie et les eaux souterraines.

- Évaluation des temps de résidence par les isotopes

Enfin, l'analyse de la teneur en tritium dans les eaux permet d'estimer un temps de résidence moyen des eaux dans le système. La chronique de référence pour la Nouvelle-Calédonie a été déterminée à partir de mesures de la **teneur en tritium** sur des échantillons composites de pluie durant les années 2013 et 2014. Pour la Nouvelle-Calédonie, la station de référence est **la station de Kaitoke en Nouvelle-Zélande. Le facteur correctif évalué actuellement entre la teneur en tritium de la pluie de Nouvelle-Calédonie et celle de la station de référence est de 0,42.**

Enjeux propres à ce type de mesure

Les données de qualité des eaux permettent de caractériser ces eaux. Un suivi dans le temps permet de discuter de l'impact d'une modification de l'environnement (naturelle ou anthropique) sur ce compartiment. Ponctuellement une cartographie de la géochimie des eaux peut permettre de caractériser les zones d'infiltration dans le cas des isotopes stables ou les zones plus drainantes dans le cas des teneurs en tritium.

Les prélèvements doivent être réalisés *a minima* en période de basses eaux mais un prélèvement supplémentaire en moyennes et hautes eaux est également intéressant pour évaluer la variabilité saisonnière des caractéristiques physico-chimiques des eaux.

Contrôle qualité

Comme cela est exposé précédemment, le contrôle qualité est réalisé initialement par le laboratoire en charge de l'analyse. La balance ionique permet de valider l'analyse des ions majeurs.

Enfin, le respect du protocole d'échantillonnage, mais aussi de flaconnage et stockage, est indispensable pour avoir une donnée fiable. La mise en place de duplicata (10 %) constitue également un indicateur important pour la qualification de la qualité des données.

Pour en savoir plus :

- Norme FD X31-615 Décembre (2000). Qualité du sol - Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions - Prélèvements et échantillonnage des eaux souterraines dans un forage
- Morgenstern U., Daughney C.J. (2012). Groundwater age for identification of baseline groundwater quality and impacts of land-use intensification–The National Groundwater Monitoring Programme of New Zealand. Journal of hydrology 456: 79-93.

4. TROISIEME PARTIE : ETUDES DE CAS

Les fiches 12 à 16 présentent des études de cas caractéristiques de l'environnement hydrogéologique des massifs miniers.

L'objectif de ces fiches est de préciser les enjeux de l'étude du cas et les particularités du contexte hydrogéologique associé afin de caractériser son fonctionnement et préciser les paramètres à suivre en particulier.

Ainsi**, l'étude de cas s'insère dans une étude hydrogéologique régionale**. Dans le cas de la connaissance régionale, certaines données, présentées précédemment sont requises comme la pluviométrie mesurée, *a minima* en altitude et en pieds de massif.

L'objet considéré est sélectionné au regard du contexte géologique et des projets miniers. À l'échelle locale proche de l'objet considéré, il s'agit **d'acquérir les données nécessaires à la caractérisation de l'état initial**. Pour tout type d'objet, une collecte de données de base est requise, sur ou proche de « l'objet », comme :

- Données des niveaux d'eau observés lors de la foration;
- Installation d'ouvrages de suivi des eaux souterraines;
- Modèles hydrogéologiques existants pour la connaissance de la piézométrie de la zone ;
- Installation de plateformes piézométriques pour évaluer les connexions entre les nappes ;
- Caractérisation d'un état piézométrique de référence ;
- Enregistrement des variations saisonnières et mesures manuelles.

4.1. FICHE N°12 : IDENTIFICATION DES ZONES DE DRAINAGE POTENTIEL

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Études de cas – zones de drainage	12	Techniques permettant de localiser les zones de drainage

4.1.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définitions**

Zone de drainage : zone où les écoulements souterrains sont 'anormalement' rapides Perméabilité et transmissivité (Fiche n°6).

- **Objectifs**

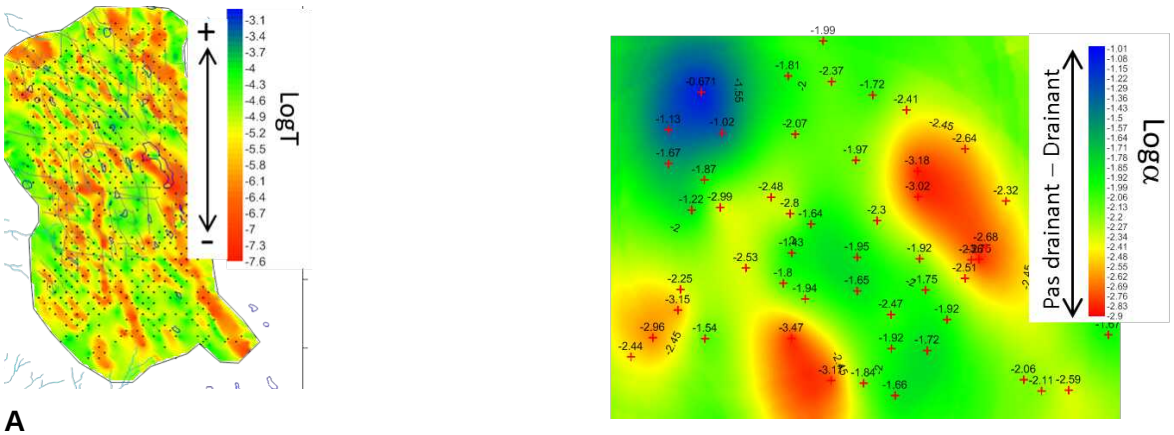
Cette fiche a pour objectif de :

- Caractériser l'état initial (avant exploitation) ;
- Présenter des techniques permettant de localiser les zones de drainage au sien des aquifères saturés selon deux approches : une approche morphologique terrain et une approche statistique (les deux méthodologies statistiques présentées ont été développées dans le cadre du projet HYPERK).

4.1.2. DONNÉES REQUISES

- Cartes piézométriques détaillées (piézomètres et/ou trous nus), tous les 250 à 500 m ou moins ;
- Résultats des essais hydrauliques réalisés dans le secteur ;
- Données des suivis piézométriques ;
- Données géologiques existantes des piézomètres, données d'enregistrement des conditions de foration, puits ou autres points d'accès à la nappe ;
- Caractéristiques des ouvrages faisant l'objet d'essais (coupes techniques et géologiques).

4.1.3. ILLUSTRATIONS



A **B**

Figure 30 : A : Estimation de la variation de la transmissivité (T) de l'aquifère à partir de données piézométriques ponctuelles haute densité (en LogT ; Massif de Tiébaghi ; source B. Dewandel). B : Évaluation des zones potentiellement drainantes par analyse des coefficients de tarissement (α) des chroniques piézométriques (Massif de Goro) *(source J. Jeanpert)*

Approche morphologique

Techniques et équipements

La problématique de l'identification des zones de drainage potentiel est abordée à plusieurs étapes du projet minier et plus particulièrement dans les cas de comblement de fosses. En l'absence de données pouvant conduire à une analyse statistique, **une approche morphologique de terrain** peut permettre de rassembler des indices de fonctionnement.

- **Définition de l'aire d'étude** : bassin versant hydrologique ou hydrogéologique ;
- **Caractérisation des variations temporelles** de l'aire d'étude (échelle projet minier) ;
- **Caractérisation des enjeux** de l'aire d'étude (captages, habitations, stabilité des versants, usage…) ;
- **Historique des dégradations** existantes (photographies aériennes historiques, témoignages…).

Des prospections hydrogéologiques complémentaires peuvent être réalisées à différentes échelles selon l'objectif recherché : échelle du massif (étude d'impact) ou échelle d'un objet tel qu'une fosse (diagnostic de fosse). Le relevé de terrain pourra comprendre :

- Recherche des sorties d'eau dans les versants et creeks et caractérisation de la nature des matériaux en ces points ;
- Identification des appareils drainants et points d'infiltration ;
- Évaluation de la stabilité des terrains et repérage des facteurs d'instabilité en relation potentielle avec le fonctionnement hydrogéologique (plans de faille, argiles, terrains démantelés…).

La réalisation de cartes complètes localisant l'aire d'étude, les enjeux identifiés, les dégradations existantes (et leur état d'activité), de même que les entrées et sorties d'eau dans l'aire d'étude et les différents facteurs d'instabilité, permet d'aboutir à des cartes d'interprétation du fonctionnement hydrogéologique de la zone et des évolutions possibles dans le temps.

Enjeux propres à ce type de données

L'analyse doit être couplée au modèle géologique du site afin d'identifier de possibles connexions entre les structures drainantes identifiées (faille, karst…..).

Cette approche morphologique vise à **identifier les grands axes de drainage**, ainsi qu'à évaluer les phénomènes redoutés lors des différentes étapes du phasage minier. Elle peut être utilisée à différentes échelles.

Cette approche ne permet pas d'évaluer les gammes de perméabilité attendues dans les différents secteurs. Pour cela l'approche statistique est nécessaire, avec l'acquisition de données de piézométrie et de tests hydrauliques.

Approche statistique

Techniques et équipements

Les méthodologies proposées ne peuvent être appliquées que **sur un état initial**, c'est-à-dire non perturbé par l'exploitation de la mine ou par l'exploitation de forages.

- Méthodologie basée sur l'analyse conjointe de données piézométriques ponctuelles haute densité et sur des statistiques de la perméabilité de l'aquifère ;
  - Types de données : cartes piézométriques détaillées ponctuelles (à l'étiage de préférence), statistiques sur la distribution de la perméabilité de l'aquifère testé (utilisation de base de données de tests hydrauliques) ;
  - Principe : comparaison statistique de la pente de la carte piézométrique réduite de l'effet de l'altitude avec les données de transmissivité de l'aquifère correspondant ;
  - La carte de perméabilité peut être calculée à partir de l'épaisseur de l'aquifère ;
  - Résultats : visualisation des secteurs les plus perméables et les moins perméables ;
  - Avantages/inconvénients : nécessité de nombreux points piézométriques (maillage des sondages miniers) ; hypothèse de flux horizontaux dans l'aquifère ; besoin d'un nombre suffisant d'essais hydrauliques (30 à 40). Cette carte permet d'avoir un aperçu rapide des secteurs les plus perméables et des moins perméables. La méthode ne nécessite pas de données de suivi.

- Méthodologie basée sur l'analyse des coefficients de tarissement des chroniques piézométriques d'un même aquifère :
  - Type de donnée : données de suivis piézométriques ;
  - Principe : évaluation des coefficients de tarissement des niveaux piézométriques puis cartographie de ces derniers.
  - Résultats : visualisation des secteurs potentiellement drainant ;
  - Avantages/inconvénients : un nombre suffisant de points de suivis piézométriques est nécessaire (à approximativement 0,5/km^2) ; besoin de plusieurs années de suivi pour faire une bonne estimation des coefficients de tarissement. Attention, l'analyse comparative ne peut être faite que si les piézomètres sont situés dans des secteurs géomorphologiques comparables.

Nota : Quelle que soit la méthodologie employée, la localisation et la géométrie des secteurs perméables et peu perméables, dépendra de la densité de la mesure piézométrique et de la fiabilité des statistiques. Ces estimations doivent être comparées avec l'information géologique (fracturation, zones de failles), les tests par traçage, etc. Si les deux méthodes sont applicables, il est conseillé de comparer les résultats.

Enjeux propres à ce type de données

- Visualisation des secteurs où l'aquifère est le plus drainant, zones de failles, systèmes pseudo-karstiques.
- Ces données pourront être confrontées aux plans de développement et projet minier, aux projets de prélèvements (puits ; pompage en fond de fosse…).
- La régionalisation du champ de perméabilité et des zones drainantes pourra être utilisée comme point de départ dans des modèles hydrogéologiques, en particulier dans le cadre de modélisations numériques.

Pour en savoir plus :

- Dewandel B., Jeanpert J., Ladouche B., Join J.-L., Maréchal J.-C. (2017). Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map, Journal of Hydrology (in press)

4.2. FICHE N°13: CARACTÉRISATION ET SUIVI DU FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE D'UNE DOLINE

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Études de cas – dolines	13	Caractérisation et suivi du fonctionnement hydrogéologique d'une doline

4.2.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

Les **dolines** sont des formes de surface caractéristiques du karst. Ce sont des dépressions topographiques fermées, circulaires ou ovales, dont la profondeur peut atteindre une centaine de mètres dans les calcaires. Ford et Williams (2007) ont largement étudié leurs mécanismes de formation et introduisent les notions de dissolution, subsidence, suffosion et effondrement (Waltham et Fookes, 2003; Gabrovsek et Stepisnik, 2011). Dans le cas des dolines sur roches ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie, ces quatre mécanismes interviennent également dans leur formation et leur évolution.

Les dolines d'effondrement sont également appelées **aven** ou encore **fontis.** Ce dernier terme utilisé en géotechnique désigne les dolines dont les bords sont abrupts ou verticaux avec parfois des surplombs et donnent directement sur le fond de la doline, lequel est assez plat (Jeanpert et al., 2016). D'autres termes sont également utilisés pour qualifier les dolines selon leur morphologie comme les **dolines « à fond plat »** dont la profondeur est faible par rapport à la largeur. Le fond est très souvent remblayé de formations résiduelles et dans certains cas la doline peut abriter une petite étendue d'eau. Sur les péridotites, elles sont en grande majorité de petite taille (diamètre inférieur à 10 m) mais on observe aussi des dolines de grande taille et de formes complexes résultant vraisemblablement de la coalescence de plusieurs objets. Les **dolines « en cuvette »** ou **« en entonnoir »** sont caractérisées par une pente plus importante, comprise entre 15 et 30°.

L'objectif de cette fiche est de définir les paramètres à suivre pour déterminer le fonctionnement hydrogéologique d'une doline et pouvoir l'intégrer au sein du massif auquel la doline appartient. Elle peut être un point d'infiltration direct vers les eaux souterraines, ou à l'inverse, un point d'émergence, une ouverture sur la nappe et donc potentiellement une zone de perte par évaporation.

4.2.2. DONNÉES REQUISES

- Cartographie géologique de la doline : lithologie des parements (suintements d'eau souterraine), du fond de la doline (recherche de points bas, d'affleurement de péridotites) ;
- Données géologiques existantes des piézomètres, trous de sondage ;
- Données de résistivité électrique (par tomographie, sondage électrique ou levé aéroporté);
- Résultats des essais hydrauliques réalisés dans le secteur ;
- Modèles hydrogéologiques existants ;

4.2.3. ILLUSTRATIONS



Figure 29 : Dolines sur massifs miniers: a/ plateau de Tia, b/ Trou du Tahitien à sec, Massif du Sud *(Source J. Jeanpert)*

Caractérisation de l'état initial

Il s'agit d'acquérir les données nécessaires à la caractérisation de l'état initial, en plus des données générales listées en introduction (p 54) ;

- Évaluation de l'évaporation depuis le plan d'eau en fond de doline ;
- Repérage des zones marécageuses ;
- Suivi des niveaux d'eau au niveau des dolines ;
- Diagraphies de températures et de conductivité électrique dans la doline pour détecter d'éventuelles arrivées d'eau souterraine ;
- Enregistrement des variations saisonnières et mesures manuelles ;
- Traçage destiné à l'évaluation de connexions hydrauliques possibles avec des émergences identifiées.
- Prélèvements pour l'analyse en isotopes stables à différentes profondeur pour détecter des zones de mélange et différentes sources.

Suivi hydrométrique

- Suivi de la variation du niveau d'eau dans la doline si elle est au moins temporairement en eau;
- Suivi des niveaux piézométriques dans le niveau aquitard des latérites et le niveau aquifère des saprolites grossières ;
- Suivi des précipitations ;
- Suivi des sources : élévation et débit ;
- Suivi de la chimie des eaux : éléments majeurs, traces et isotopes stables (si la profondeur de la doline en eau le permet, échantillonnage à différentes profondeurs).

Enjeux propres à ce type d'objet

Le fonctionnement de la doline dans le système péridotitique peut être très différent selon le site et la doline : elle peut être une figure d'effondrement lié à un pseudo-karst sous surface cuirassée sans aucune connexion avec l'aquifère souterrain, mais elle peut également correspondre à un point bas, d'infiltration des eaux souterraines et de connexion avec l'aquifère souterrain (voire le système karstique). Elle peut également correspondre à une ouverture sur la nappe et favoriser l'évaporation. La morphologie des dolines est vraisemblablement un indice de fonctionnement, et un suivi particulier sera apporté aux dolines d'effondrement profondes et aux dolines en entonnoir et cuvette qui pourraient être connectées à la nappe et des drains karstiques. **Les dolines à fond plat sont probablement déconnectées de tout système actif**.

La connexion avec un système karstique, ainsi que le caractère transitoire ou permanent constituent une des difficultés dans la modélisation hydrologique des dolines.

Pour en savoir plus :

- Ford D., et Williams P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Whiley & Sons ed. Chichester: John Whiley & Sons.
- 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.
- Humbert et Coll. (2017) Diagnose des dolines, indicateur de qualité du milieu, rap. CNRT in press

4.3. FICHE N°14 : CARACTÉRISATION ET SUIVI HYDROGÉOLOGIQUE DE BASSINS ENDORÉIQUES

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Études de cas – Bassins endoréiques	14	Caractérisation et suivi hydrogéologique de bassins endoréiques

4.3.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définitions**

Un bassin est dit endoréique si aucun écoulement de surface (rivière) n'en sort. Cette notion a été définie dans des zones arides pour lesquelles toute l'eau arrivant (pluie et cours d'eau) repart par évapotranspiration et infiltration. Morphologiquement, ce type de bassin est très proche d'une grande doline à fond plat et sa formation pourrait résulter de la coalescence d'une série de dolines (modèle proposé par Trescases en 1975). Comme pour les dolines, une ou plusieurs ouvertures de taille décimétrique à métrique peuvent être observées sur un point bas du bassin. **Dans une région géologique à composante pseudo-karstique un drainage éventuel du bassin par un écoulement souterrain doit être recherché**.

- **Objectifs**

Effectuer un bilan hydrologique de ce bassin, identifier et quantifier les modes de drainage souterrain. On devra particulièrement rechercher les points d'infiltration, par exemple à la base des dolines ainsi que les écoulements traversant une ligne de crête. Boucler le bilan en eau du bassin permet de s'assurer que tous les modes de drainage ont bien été identifiés.

4.3.2. DONNÉES REQUISES

- Topographie du bassin et des crêtes environnantes;
- Pluviométrie sur le bassin et les crêtes environnantes;
- Géologie du substratum du bassin et du remplissage du bassin;
- Enregistrements piézométriques, cartes piézométriques;
- Modèle hydrogéologique à l'échelle du bassin;

4.3.3. ILLUSTRATIONS



Figure 31 : Bassin endoréique sur la presqu'ile de Bogota, Massif de Ouassé *(Source J. Jeanpert)*

Caractérisation de l'état initial

L'état initial comprend toutes démarches permettant de **préciser le bilan hydrologique** de ce bassin. Les différents termes de ce bilan sont la pluie, l'évapotranspiration, l'infiltration diffuse et l'infiltration localisée (drains karstiques ou écoulements préférentiels).

- Caractérisation du substratum du bassin et de son remplissage : méthodes géophysiques et forages de contrôle.
- Caractérisation de la végétation du bassin.
- Caractérisation de l'évapotranspiration du bassin. Les mesures sont complexes à mettre en œuvre (tour de flux par exemple). Elles peuvent être évitées si l'évapotranspiration de la végétation est connue sous des climats similaires
- Mise en place d'un réseau piézométrique dense. Caractérisation de la piézométrie du bassin. Normalement celle-ci doit suivre la topographie. Des anomalies peuvent faire suspecter des écoulements préférentiels (Fiche n°12). Une partie du réseau piézométrique pourra être abandonnée après cette caractérisation.
- Suivi des niveaux dans les zones en eau
- Recherches des zones de drainage ponctuel. Expériences de traçage au sein de ces zones.
- Construction d'un modèle hydrogéologique du bassin et calibration en hautes et basses eaux.

Mise en place de suivi

La densité du suivi dépendra des résultats de l'étape précédente. **Si le bilan du bassin est bouclé sans infiltration préférentielle ni zone de drainage rapide, un suivi léger sera suffisant**. Ce suivi concernera la pluie ainsi que les niveaux d'eaux superficielles et souterraines.

Les **zones de drainage préférentiel suspectées devront être instrumentées** sur le long terme dans le but de détecter un éventuel fonctionnement transitoire (Fiche n°12 ; Fiche n°15).

Dans le cas d'un drainage souterrain localisé, le suivi ne pourra pas être limité au bassin endoréique lui-même mais devra impliquer les bassins voisins, en particulier les sources et écoulements de surface.

Enjeux propres à ce type d'objet

L'enjeu essentiel provient du fait que le bassin hydrologique pourrait être beaucoup plus important que le bassin topographique si des écoulements souterrains traversent les lignes de crêtes.

L'exutoire du bassin est difficile à appréhender et peut probablement mettre en connexion plusieurs bassins.

Une difficulté provient du fait que les deux termes du bilan évapotranspiration et écoulement souterrain peuvent être difficiles à déterminer.

Pour en savoir plus :

- Ford D., Williams P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Whiley & Sons ed. Chichester: John Whiley & Sons.
- Trescases J.-J. (1975). L'évolution géologique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie. *Mémoire ORSTOM* 78: 1-259.
- Waltham A.C., Fookes P.G. (2003). Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 36: 101-118.

4.4. FICHE N°15 : CARACTÉRISATION DE STRUCTURES D'ÉCOULEMENT KARSTIQUE

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Études de cas – Karst et épikarst	15	Caractérisation des écoulements souterrains rapides dans des conduits karstiques et pseudo-karstiques

4.4.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

- **Définitions**

Sur les massifs miniers, outre les observations caractéristiques de géomorphologies karstiques (Jeanpert et al., 2016), et d'affleurements présentant des formes superficielles de lapiaz (épikarst), certaines conditions et comportements hydrogéologiques correspondent à **un fonctionnement karstique caractérisé par des écoulements souterrains rapides** dans des conduits karstiques hétérogènes développés dans l'épaisseur du massif rocheux. Ce fonctionnement hydraulique particulier s'observe préférentiellement au niveau de bassins endoréiques (Poro…), de dolines, de fosses minières (Bogota...).

Ces écoulements rapides sont associés à des émergences dont le fonctionnement est directement lié à la structure karstique.

- **Objectifs**

Sur un domaine minier, l'identification et la caractérisation de conduits à écoulement karstique doit permettre une évaluation des flux souterrains susceptibles d'impacter fortement l'hydrosystème sur le plan quantitatif et qualitatif au niveau des ressources en eau et/ou d'aménagements géotechniques. **La mise en œuvre de traçages expérimentaux permet d'approcher qualitativement et quantitativement la nature de ces écoulements.**

4.4.2. DONNÉES REQUISES

Le contexte géologique de la zone doit être caractérisé, avec localisation des structures géologiques principales. Il est également nécessaire de **disposer d'une cartographie hydrogéologique** précise permettant de situer l'ensemble des points d'émergences potentiels du système à identifier.

L'analyse de la piézométrie (anomalie par rapport à la tendance linéaire avec la topographie, tarissement ou gradient piézométrique vertical) permet de localiser les zones fortement drainées et potentiellement à composante karstique.

4.4.3. ILLUSTRATIONS

Figure 32 : Exemple d'un traçage réalisé sur Goro, injection de fluorescéine *(source A2EP, 2008)*



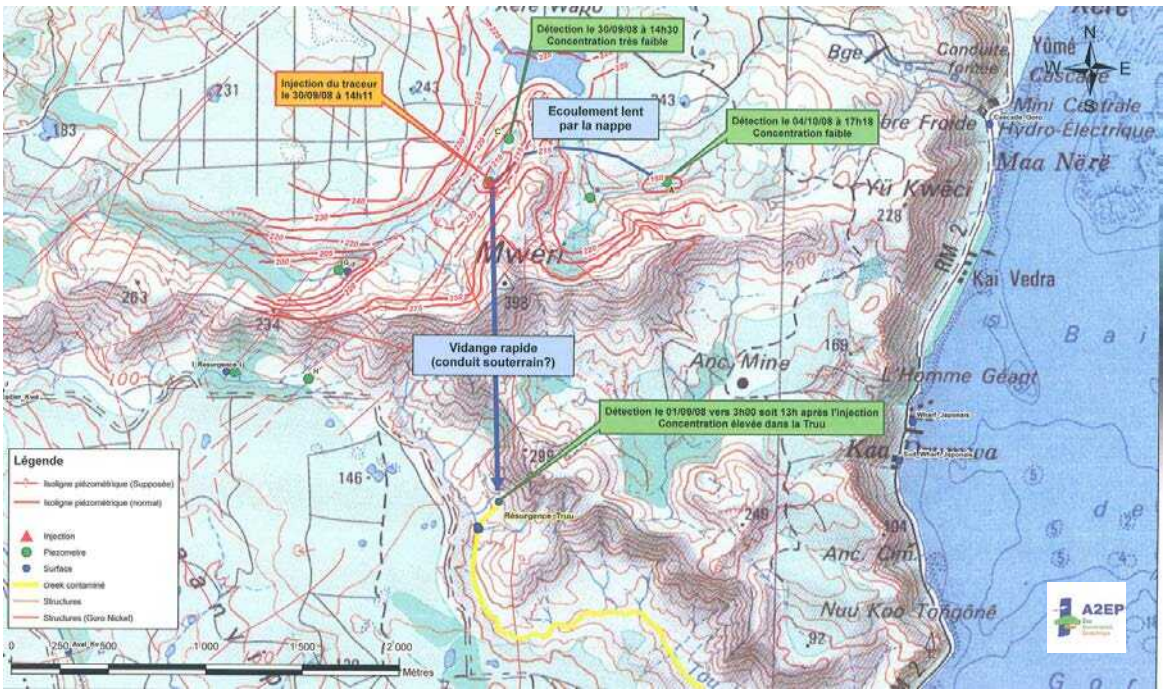


Figure 33 : Exemple d'un traçage réalisé sur Goro, injection et plan de restitution *(source A2EP, 2008)*

L'exemple du traçage effectué sur le site de Goro en 2008 démontre l'importance d'une identification préalable de l'ensemble des émergences potentielles du système.

4.4.4. MÉTHODOLOGIE

- **Caractérisation de l'état initial.**

Le fonctionnement karstique potentiel de l'aquifère est évalué dans un premier temps par **la cartographie hydrogéologique qui doit permettre d'identifier les conditions favorables à l'établissement de structures karstiques** :

- Identification des dolines et bassins endoréiques ;
- Identification des émergences susceptibles de participer aux conditions à l'amont du système karstique ;
- Identification de linéaments et fractures potentiellement utilisables pour l'écoulement
- Identification d'émergences à l'aval du système susceptibles de constituer un exutoire potentiel du réseau karstique ;
- Identification des zones fortement drainées.

- **Mise en place de suivi**

Sur la base des indices cartographiques de structures karstiques potentielles, une investigation hydrodynamique est réalisable par :

- un **suivi piézométrique des zones d'infiltration** (limnigraphie des bassins endoréiques et dolines)
- un **suivi des débits des émergences** potentiellement associées à des structures karstiques.

Le suivi réalisé participe à confirmer le caractère karstique associé au comportement hydrodynamique des exutoires. L'analyse portera essentiellement sur la **relation pluie débit et la caractérisation des coefficients de tarissement**.

Réalisation d'essai de traçages

Les données requises à la caractérisation d'un écoulement karstique par traçage dépendent du niveau d'information recherché qualitatif ou quantitatif. On distinguera ainsi une opération de traçage de reconnaissance (validation d'une connexion karstique) ou un traçage de simulation (caractérisation hydrodynamique du transfert karstique). Le tableau ci-dessous résume les données requises et leur interprétation possible selon le traçage (source BRGM et ONEMA, 2010).

Tableau 6 : Paramètres à calculer en fonction du type de traçage *(d'après BRGM ONEMA 2010)*

Avec T_{min} : Temps de transit minimum , V_{max} :Vitesse max de transit , T_m : Temps modale de transit, V_m : Vitesse modale de transit, C_{max} : >Concentration maximum, C_{umax} : Maximum de concentration normée, V_i : Volume d'injection, V_r : Volume restitué, M_r : Masse restituée, R% : Taux de restitution, $\bar{t}$: Temps moyen de transit, V_{app} : Vitesse apparente, $\bar{v}$: Vitesse moyenne de transit, V_a : Volume de Allen, S_a : Section de Allen

Courbe utilisée	Paramètre calculé	Traçage de reconnaissance	Traçage de simulation
Courbe de restitution	T_{min}-V_{max} et T_m-V_m Durée de restitution C_{max}	Description de la restitution	Modalités de transit d'un éventuel polluant
Courbe de restitution normée	C_{umax}		Approche simple pour estimer la concentration maximale attendue suite à un déversement accidentel d'une quantité connue
Débit	V_i et V_r	Conditions hydrodynamiques régnant durant le traçage	
Flux massique	M_r R%	Fiabilité des résultats obtenus. Présence ou non d'exutoires non surveillés.	Fiabilité des résultats obtenus. Présence ou non d'exutoires non surveillés. Validité des simulations.
Distribution des temps de séjour	$\bar{t}$ v_{app} $\bar{v}$ V_a et S_a	Renseignement sur la structure karstique intéressée par le traçage.	Modalité de transit d'un polluant. Simulation de pollutions par convolution. Renseignement sur la structure karstique intéressée par le traçage.

Enjeux propres à ce type d'objet

Les enjeux liés à l'identification de circulations à caractères karstiques, concernent la gestion des ressources en eau et la protection des captages, mais intéressent aussi les reconnaissances géotechniques préalables à l'aménagement des sites d'exploitation. Si la reconnaissance d'un réseau actif est relativement aisée grâce à l'observation de pertes et résurgences, en revanche la réactivation d'un réseau fossile sous l'effet d'une modification aux limites du système est plus délicate à anticiper. Une étude géologique détaillée visant à identifier l'existence de fractures altérées enracinées profondément dans le substratum constitue le principal indice d'un paléo système. La prospection du substratum par géophysique électrique contribue sensiblement à cette identification.

Pour en savoir plus :

- A2EP(2008) Réalisation d'une opération de traçage au niveau des eaux souterraines de la verse à stérile – Bassin de la kwé Est- Goro Nickel- Commune de Yaté, rapport A2EP 015/08/HG/FJ.
- BRGM, ONEMA (2010), Guide méthodologique : les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource, BRGM/RP-58237-FR

4.5. FICHE N°16: AMENAGEMENTS MINIERS

THÉMATIQUE	N° FICHE	DESCRIPTION
Études de cas – Aménagements miniers	16	Aménagements miniers et impact hydrogéologique potentiel

4.5.1. DÉFINITION ET OBJECTIFS DE LA FICHE TECHNIQUE

Pour le gestionnaire d'exploitation la modification des écoulements souterrains résultant des travaux d'aménagement peut induire des problèmes géotechniques et/ou des problèmes sur la ressource en eau, au regard de la qualité ou de la quantité. Les outils de simulation permettent d'anticiper ces questions et de tester des solutions techniques de mitigation. Dans tous les cas, le cadre spatial de ces travaux est effectué à une échelle locale qui s'inscrit dans un schéma hydrogéologique défini à l'échelle du massif. Ce dernier peut être utilisé pour définir les conditions aux limites du système à l'échelle locale (modèles emboités).

Cette fiche a pour objet de fournir une liste non exhaustive des aménagements miniers et de leur impact potentiel sur les fonctionnements hydrogéologiques.

4.5.2. EXEMPLES D'AMÉNAGEMENTS MINIERS

- **Création de fosse : extraction des horizons supérieurs**

La création de fosse conduit à la suppression de l'aquitard des latérites et de l'aquifère des saprolites grossières, pouvant avoir pour conséquence :

- Risque d'instabilités en tête de fosse (fissures de soutirage…) ;
- Rabattement des niveaux de nappe dans le substratum ;
- Circulations rapides au niveau des fractures du bedrock ;
- Sur le long terme, augmentation possible des variations saisonnières de débits en sortie du système hydrogéologique ;
- Réactivation possible de structures de karstification;



Figure 34 : Fosse Suivante, presqu'ile de Bogota *(source J. Jeanpert)*

Dans le cadre de ce type d'aménagement, les **principales options de mitigation** concernent **le drainage et la dérivation des flux superficiels et souterrains** qui alimentent la fosse. Le design de ces travaux peut être testé par simulation numérique ou analytique. Il s'agit alors de caractériser avec précision le contexte hydrogéologique dans la zone d'influence de la fosse. Cette approche détaillée peut s'appuyer sur la méthodologie générale proposée à l'échelle des massifs :

- Estimation des propriétés hydrauliques des horizons concernés (Fiche n°6);
- Caractérisation des conditions aux limites du sous-système (Fiche n°7; Fiche n°8),
- Définition des piézométries de référence étiage, hautes eaux (Fiche n°9)
- Existence de zones de drainage préférentielles (Fiche n°12 ; Fiche n°15)

Gestion des eaux et modification des bassins versants

Les préconisations visant à **minimiser les interactions entre l'hydrosystème et les aménagements miniers** sont établies par les plans de gestion des eaux souvent limités à la gestion des écoulements superficiels. Cependant, la considération du bassin versant hydrogéologique est également primordiale.

L'existence de structure drainante doit être caractérisée afin d'éviter la connexion des écoulements vers une zone initialement isolée hydrogéologiquement. Ceci peut avoir à terme un impact sur les variations de débits en sortie du système hydrogéologique.

Le schéma de gestion des eaux doit prendre en compte :

- Les bassins versants topographiques ;
- Les structures drainantes, ainsi que les barrières peu perméables ;
- Le phasage de l'exploitation pouvant temporairement induire la connexion de bassins versants via des structures drainantes ;

Dans le cadre de ce type d'aménagement, il s'agit de caractériser avec précision le contexte hydrogéologique dans lequel s'intègre le plan de gestion des eaux, en s'intéressant plus particulièrement :

- Aux zones de drainage préférentiel (Fiche n°12 ; Fiche n°15) ;
- A la présence de dolines (Fiche n°13), et/ou de bassins endoréiques (Fiche n°14) ;
- Au suivi des variations des conditions aux limites du système (Fiche n°7 et Fiche n°10).

Mise en verse des stériles

Les verses, constituées essentiellement de matériaux peu perméables, peuvent être à l'origine de phénomènes d'instabilité liés à la dynamique hydrogéologique des sites, tels qu'une déstabilisation de la verse ou du terrain d'assise par soutirage, par formation d'une nappe dans les remblais, ou mise en charge hydraulique de structures.
La mise en place de réseaux de drains dimensionnés de façon appropriée permet de limiter le risque d'apparition de ces instabilités. La caractérisation du fonctionnement hydrogéologique des zones de mise en verse reste indispensable (Fiche n°12).



Figure 35 : Instabilités : formation de fissures sur verse *(source J. Jeanpert)*

- **Pour en savoir plus :**

Beale G, Read J. (2013) - Guidelines for evaluating water in pit slope stability, CRC Press/Balkema.

5. CONCLUSION

Ce document a été réalisé sur la base des observations, analyses et résultats du programme de recherche Hyperk : HYdrogéologie des PERidotites Karstifiées de Nouvelle-Calédonie soutenu par le CNRT (2013 – 2017).

Au terme des différentes phases de ce programme comprenant une synthèse des connaissances, l'acquisition de données complémentaires et l'analyse hydrodynamique des différentes observations obtenues, des modèles élémentaires particulièrement robustes ont été produits et utilisés comme analogues numériques du fonctionnement hydrogéologique des massifs miniers. Ces outils intègrent l'ensemble des connaissances acquises durant le programme (géométrie, caractères hydrodynamiques, conditions aux limites) permettant de détailler les principaux processus de fonctionnement de l'hydrosystème des péridotites.

En visant la production de fiches pratiques, présentant les différentes étapes de l'analyse hydrogéologique adaptées aux spécificités du milieu, l'équipe mobilisée sur ce projet propose une synthèse didactique de ce projet.

Ce travail, prévu initialement comme un chapitre spécifique (WP4) de la convention de recherche signée avec le CNRT, a pour vocation de mettre à disposition des opérateurs de terrain, un guide méthodologique permettant de sensibiliser les exploitants à la problématique hydrogéologique et sa prise en compte dans la gestion quotidienne des aménagements miniers.

L'ouvrage destiné à des non spécialistes de la discipline présente les enjeux relatifs à la gestion des eaux souterraines et les moyens d'y répondre. Rédigé sous la forme de fiches synthétiques, chaque étape nécessaire à l'analyse du système est décrite en rappelant les concepts de base, les objectifs et les moyens spécifiques pouvant être mis en œuvre.

Des ressources documentaires sont indiquées pour accompagner l'opérateur minier souhaitant aller plus loin dans la prise en charge des investigations nécessaires à une gestion raisonnable des aménagements réalisés au regard de la situation des eaux souterraines.

Nous espérons que ce document puisse ainsi contribuer à une sensibilisation accrue des acteurs locaux aux enjeux de la ressource en eau.

6. BIBLIOGRAPHIE

A2EP (2008) Réalisation d'une opération de traçage au niveau des eaux souterraines de la verse à stérile – Bassin de la kwé Est- Goro Nickel- Commune de Yaté, rapport A2EP 015/08/HG/FJ.

Allenbach M. et coll. (2015) – *Volume I : Synthèse*. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». CNRT « Nickel et son environnement »

Allenbach M. et coll. (2015) – *Volume II : Annexes – Rapports thématiques*. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». CNRT « Nickel et son environnement »

Beale G, Read J. (2013) - Guidelines for evaluating water in pit slope stability, CRC Press/Balkema.

BRGM, ONEMA (2010), Guide méthodologique : les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource, BRGM/RP-58237-FR

Dewandel B., Jeanpert J., Ladouche B., Join J.-L., Maréchal J.-C. (2017). Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map, Journal of Hydrology (in press)

Domenico P.A., Schwartz W. (1997), Physical and Chemical Hydrogéology, Willey ed. ISBN 0-471.59762-7

Dörfliger N. 2010. Guide méthodologique, Les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de Ph. Crochet, R. Guerin, N. Jozja, B. Marsaud, P-H Mondain, Ph. Muet, V. Plagnes. BRGM RP-58237-FR 246 pp., 82 ill., 5 ann.

Ford D., et Williams P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Whiley & Sons ed. Chichester: John Whiley & Sons.

Humbert et Coll. (2017) Diaganose des dolines, indicateur de qualité du milieu, rap. CNRT in press

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

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.

Join, J.L., Robineau, B., Ambrosi, J-P., Costis, C., Colin, F., 2005. Groundwater in ultramafic mined massifs of New Caledonia. C. R. Geoscience 337, 1500–1508

Kruseman G.P., De Ridder N.A. (1994). Analysis and evaluation of pumping test data.- IRLI Publication n°47

Lamorille T. (2006) Caractérisation des circulations d'eau souterraine sur le massif ultrabasique de Tiébaghi, rap. Master 2, Université d'Avignon.

Lauga R. (1990). Pratique du forage d'eau.- Seesam Edition, Paris.

Mathys N., Caze N., Richard D. (2015) – *Suivi hydrosédimentaire des petits bassins versants miniers, guide méthodologique*. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». CNRT « Nickel et son environnement ». 66 pages

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. De Marsily Gh. (1986). Quantitative Hydrogeology, Academic Press

Streltsova, T.D. (1988). Well testing in heterogeneous formations.- An Exxon monograph.- John Wiley & sons

Trescases J.-J. (1975). L'évolution géologique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie. *Mémoire ORSTOM* 78: 1-259.

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.

Waltham A.C., Fookes P.G. (2003). Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 36: 101-118.


08
07
06
05
04
03
02
01