

Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Système hydrogéologique d'un massif minier ultrabasique de Nouvelle-Calédonie

Jean-Lambert Join^{a,*}, Bernard Robineau^b, Jean-Paul Ambrosi^b, Claire Costis^{a,b},
Fabrice Colin^b

^a LSTUR, université de la Réunion, BP 7151, 97715 Saint-Denis messag cedex 9, France

^b UMR 161, IRD, Centre de Nouméa, BP A5, 98848 Nouméa, Nouvelle-Calédonie

Reçu le 24 février 2005 ; accepté après révision le 29 août 2005

Disponible sur Internet le 26 septembre 2005

Présenté par Ghislain de Marsily

Résumé

Sur plus d'un tiers de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie affleurent des roches ultrabasiques. Ces roches ont subi une intense altération géochimique à l'origine d'un manteau latéritique riche en nickel, épais de plusieurs dizaines de mètres. Sur les massifs ultrabasiques, les eaux souterraines, partout présentes, constituent une ressource et aussi une contrainte pour l'exploitation minière. Le contexte hydrogéologique de ces massifs n'est pas clairement défini ; il est souvent assimilé à une superposition de nappes localisées dans les différents horizons du manteau d'altération. Avec l'exemple du système aquifère du plateau de Tiébaghi, nous montrons la continuité hydraulique des horizons d'altération jusqu'au socle. *Pour citer cet article : J.-L. Join et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Groundwater in ultramafic mined massifs of New Caledonia. Ultramafic rocks outcrop over more than one third of New Caledonia's main island. Under tropical conditions, thick lateritic mantles with nickel concentrations developed on these rocks by geochemical weathering. Groundwater in ultramafic mined massifs represents a valuable resource, but also a severe constrain for mining engineering. Previous works describe several water tables in the various layers of the weathering mantle. From a hydrologic study of the Tiébaghi massif, the hydraulic continuity across the weathering layers down to the bedrock is proposed. *To cite this article: J.-L. Join et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Aquifère ; Roche ultrabasique ; Mine ; Manteau d'altération ; Nouvelle-Calédonie

Keywords : Aquifer ; Ultramafic rock ; Mine ; Regolith ; New Caledonia

Abridged English version

1. Introduction

Percolating tropical waters, the main impetus of supergene weathering processes, dissolve ultramafic

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : join@univ-reunion.fr (J.-L. Join).

(UM) rocks and distribute new minerals in the weathering mantle, concentrating nickel in the saprolite layers. Then, groundwater storage and flow are keys to the genesis of nickel ores of New Caledonia [26]. Unfortunately, the hydrogeological setting of UM massifs is poorly known. Espirat [7] only considered groundwater resources in the fractured UM bedrock, but noticed sporadic and pseudo-karstic flows in the ferricrete. Later, two water tables are distinguished [1,8,26]: the upper just below the ferricrete and the lower in the coarse saprolite. The studied Tiebaghi mine site (North of New Caledonia) is located on a well surveyed UM massif, whose regolith was intensively drilled. The hydrogeologic study of the site includes a monitoring of springs (geological settings, discharge measurements, chemical analysis) and a piezometric survey of some drilled holes. The results lead to new hypotheses on aquifer systems in the weathering mantle upon UM bedrocks.

2. Environmental setting and methods

A giant ophiolitic nappe of peridotite covers one third of the main island of New Caledonia [21]. UM rocks are distributed in many massifs: the large southeastern massif and smaller ones along the western coast. They are overlain by a thick regolith due to a deep geochemical weathering under a tropical environment. Post-obduction uplift and erosion have fractured [14] and isolated UM massifs at various altitudes. The Tiebaghi massif (Fig. 1), 600 m high, is a klippe of peridotite resting on sedimentary formations [21]. It is prospected and mined for 'silicate type' of Ni ore found in the coarse saprolite layer [15,18]. A thick (up to 80 m) weathering mantle covers the massif, with a ferricrete flat surface giving the morphology of a SE–NW elongated plateau, gently dipping westward. The oceanic tropical climate is characterized by a December to April hot and humid cyclonic season followed by a cooler and drier season. The mean annual rainfall on Tiebaghi is estimated around 1500 mm and groundwater is found everywhere at a shallow depth. Many springs occur along the edges of the plateau, feeding perennial waterfalls and streams on the bedrock.

A typical weathering profile on UM rocks comprises the following layers [13,19,26]: a ferricrete at the top, an upper ferruginous nodular layer in a red alloterite zone, a fine yellow saprolite and a coarse saprolite on the unweathered bedrock. Their distribution in a SW–NE section reveals successive weathering troughs and bedrock ridges (Fig. 2), confirmed by numerous logs and imaged by Electrical Resistivity Tomography sections [24]. Re-

golith structures are obviously fracture-oriented, confirming the structural control on the weathering process [14,22,25,26].

Hydraulic tests for water resources [1] or engineering purposes [10], estimated the hydrodynamic parameters of the weathering layers. Away from mining disturbances, springs on the flanks and drillings holes on the plateau have been surveyed and monitored in order to investigate groundwater flows. The geological setting has been examined to document a spring typology with sampling, in situ monitoring of physicochemical parameter and flow measurement of springs and rivers draining the plateau. A reference piezometric network was set up, including a type section, to characterize the groundwater flow. In order to illustrate the groundwater patterns of the massif, the steady-state velocities distribution has been simulated on a vertical section [6].

3. Results

Tiebaghi plateau represents a clearly bounded hydrogeologic system offering a simplified approach to the water balance. The steep flanks represent the drainage hydraulic conditions. In a small monitored watershed, infiltration rate is estimated around 2.5 l s^{-1} , while the river discharge measured on the bedrock is 2 l s^{-1} . In the inner part of the plateau, the groundwater level follows the general west dipping of the topographic surface. On the flanks, springs are distributed in three principal levels (Fig. 2): a surface level under the ferricrete, an intermediate level in the red alloterite and fine saprolite and a lower level in the coarse saprolite.

The red alloterite and the fine saprolite correspond together to a semi-permeable layer taking part in the aquifer stratification. The interpretation of pumping tests is carried out on the basis of Hantush–Jacob model. In the coarse saprolite, the transmissivity is about $T = 1$ to $4 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and the storage coefficient is $S = 2$ to 4×10^{-4} . Slug and Lefranc tests data lead to evaluate the average hydraulic conductivity (K) in the fine saprolite and red alloterite horizon ($K = 1.3$ to $3.1 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$) and in the coarse saprolite ($K = 1.7$ to $4.3 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$) [10,17]. The piezometric surface, defined with more than 30 boreholes, matches the top of the red alloterite and characterizes a planar flow, parallel to the topographic surface. On the other hand, the implementation of a multiple piezometer screened in the various layers highlights a vertical flow gradient attributed to the seepage in the bedrock fractures.

In situ measurements of water physical and chemical parameters indicate dissolved oxygen saturation and temperature ranging from 23 to 28 °C. Under-ferricrete

waters have near neutral pH values (6.2–7.5) and conductivities below $100 \mu\text{S cm}^{-1}$, in contrast with waters coming from saprolite with basic pH values (8.3–9.2) and higher conductivities, up to $630 \mu\text{S cm}^{-1}$ for waters emerging from UM rocks.

Major ions chemistry confirms two water types. The first type is superficial, low-mineralised water: mainly Na and Cl with little Mg, and hydrogen carbonate. The second one is Mg–HCO₃ water type, representative of springs appearing in UM rocks. The Schoeller diagram (Fig. 3) distinguishes also intermediate waters with increasing Mg and HCO₃ contents.

4. Discussion and conclusion

Investigations implemented on Tiébaghi massif show a hydraulic continuity between the various horizons of the weathering mantle and the fractured UM bedrock. A single hydrogeologic system is defined, illustrated by a vertical plane model with three layers, and simulated in permanent mode (Table 1). The simulated total heads and velocities distribution is presented in Fig. 4. The flow model illustrates the importance of the UM bedrock morphology and variations of thickness of the weathering mantle, that mainly control the velocities distribution and the flow direction. The deepest troughs correspond to low-velocity zones with a vertical component resulting from the drainage assigned to fractures. On the other hand, UM ridges, with a reduced regolith, induce a *per ascensum* surface of seepage at the top of the red alloterite (Fig. 4). This model puts forward the interdependence of the weathering horizons [9,11,12] and the hydrogeologic system behaves according to the general concept of ‘regolith-fracture aquifer’ (rfa) defined by Owoade [20].

Tiébaghi studied case leads to propose a model of hydrogeologic system within a weathering mantle on UM bedrocks. The hydraulic behaviour of this system results from the interdependence of the regolith lithological units. The structural context seems dominating and the described relations between groundwater flows and fracturing of the bedrock can lead to a better understanding of the dynamics of supergene weathering and its consequences on the genesis and the distribution of nickel ores.

1. Introduction

Agent principal de l’altération supergène des massifs ultrabasiques (UB), les eaux de percolation mettent en solution et redistribuent les substances minérales de la roche mère. Elles participent ainsi à la for-

mation de concentrations métallifères d’intérêt économique. En Nouvelle-Calédonie, Trescases [26] montre que les conditions de stockage et de circulation des eaux souterraines sur les massifs UB contribuent à la formation des gisements nickélifères. Pourtant, le contexte hydrogéologique reste mal défini. Certaines qualités hydrodynamiques ou géochimiques semblent propres aux formations UB. Sur les séries ophiolitiques, les perméabilités mesurées dans les massifs de l’Oman [5] ou encore le faciès hyperalcalin des eaux de différents massifs de péridotites [3,4] sont des caractères que l’on retrouve dans le soubassement cristallin des massifs UB de Nouvelle-Calédonie. En revanche, l’épaisseur du manteau d’altération lié au contexte tropical de la Nouvelle-Calédonie tend à définir localement des systèmes hydrogéologiques originaux dont la structure générale se rapproche de celle des systèmes décrits sur les grands socles cristallins soumis à l’altération tropicale [16]. Pourtant, cette correspondance n’est pas clairement établie. Espirat [7] décrit les ressources en eau des massifs de Nouvelle-Calédonie comme restreintes aux circulations dans les fractures du socle. Toutefois, il note, dans la cuirasse, l’existence de chenaux à écoulements éphémères, de type « pseudo-karstique ». Trescases [26] distingue : une nappe sous cuirasse et une nappe de base de profil d’altération ; ce schéma est repris dans les études techniques réalisées pour l’industrie minière [1,8]. Le site de Tiébaghi, dans le Nord de la Nouvelle-Calédonie, est un massif bien délimité et identifié par plusieurs campagnes de prospection minière. L’analyse hydrogéologique de ce massif minier typique a porté sur les points d’eau et émergences, replacés dans leur contexte géostructural. Cette approche, complétée par des mesures piézométriques réalisées sur les forages de reconnaissance, permet d’esquisser un modèle de système hydrogéologique dans les manteaux d’altération sur massif UB de Nouvelle-Calédonie.

2. Objet, matériel et méthodes

2.1. Contexte géologique et morphoclimatique

La Grande Terre de Nouvelle-Calédonie est une île pour un tiers recouverte par une nappe ophiolitique, représentée par un grand massif au sud et plusieurs petits massifs isolés jusqu’à son extrémité nord [21]. Ces massifs ont été soumis à un climat tropical humide favorisant une intense altération géochimique et la formation d’un épais manteau latéritique. L’héritage tectonique et des mouvements verticaux postérieurs à leur mise en place ont engendré une importante fracturation [14]. Le massif UB de Tiébaghi, situé au nord-ouest de l’île

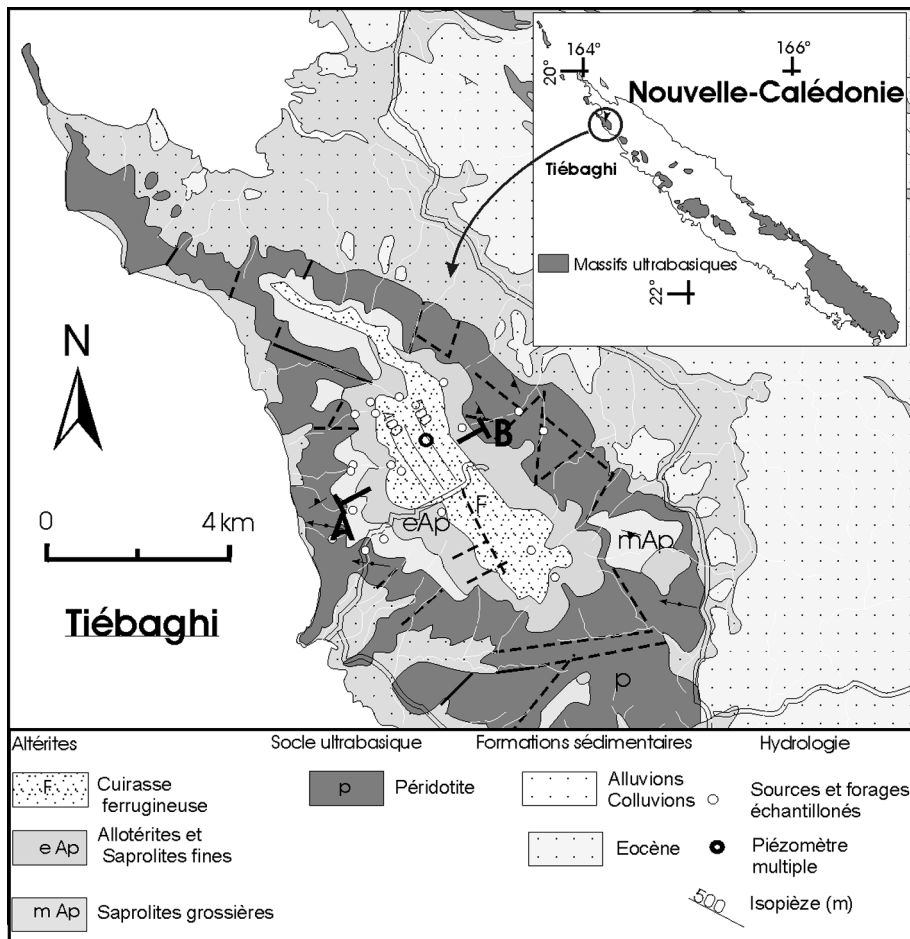


Fig. 1. Cadre géologique du secteur étudié, d'après Paris [21].

Fig. 1. Geological setting of the study area, after Paris [21].

(Fig. 1), correspond à une klippe de péridotite posée sur un soubassement sédimentaire [21]. Connu pour ses mines de chrome et de cobalt [15,18], il est aujourd'hui exploité pour ses gisements de nickel silicaté contenus dans la saprolite grossière.

Le manteau d'altération, atteignant 80 m d'épaisseur, se termine par une cuirasse ferrugineuse conférant au massif un aspect tabulaire, avec un léger pendage vers l'ouest. Ce plateau, bien délimité, s'étend sur 20 km de longueur et 8 km de largeur, avec une altitude moyenne de 600 m. Le climat « tropical océanique », est caractérisé par une saison chaude et humide de décembre à avril, suivie d'une saison plus fraîche et plus sèche. Les précipitations moyennes annuelles sont de 1500 mm sur le plateau de Tiébaghi. L'eau souterraine y est partout présente à faible profondeur et de nombreuses émergences apparaissent sur son pourtour. Elles alimentent plusieurs cascades sur le socle cristallin. Ces

cours d'eau pérennes attestent la présence d'un système aquifère développé en amont sur le plateau.

2.2. Description des formations

Le profil type de l'altération se développant sur les roches UB de Nouvelle-Calédonie distingue, de haut en bas, plusieurs horizons [13,19,26] : la cuirasse ferrugineuse, un horizon nodulaire développé au sommet d'une zone d'allotérite rouge, la saprolite fine et la saprolite grossière surmontant la roche mère. Sur Tiébaghi, l'organisation spatiale de ces horizons est présentée sur une coupe SW–NE (Fig. 2). La géométrie, en seuils et fossés, est connue grâce à plus de 140 forages décrits en termes minéralogiques et géochimiques. Elle est précisée par des profils de tomographie de résistivité électrique [24]. Cette géométrie traduit la part prépondérante du contrôle de la fracturation sur le développement

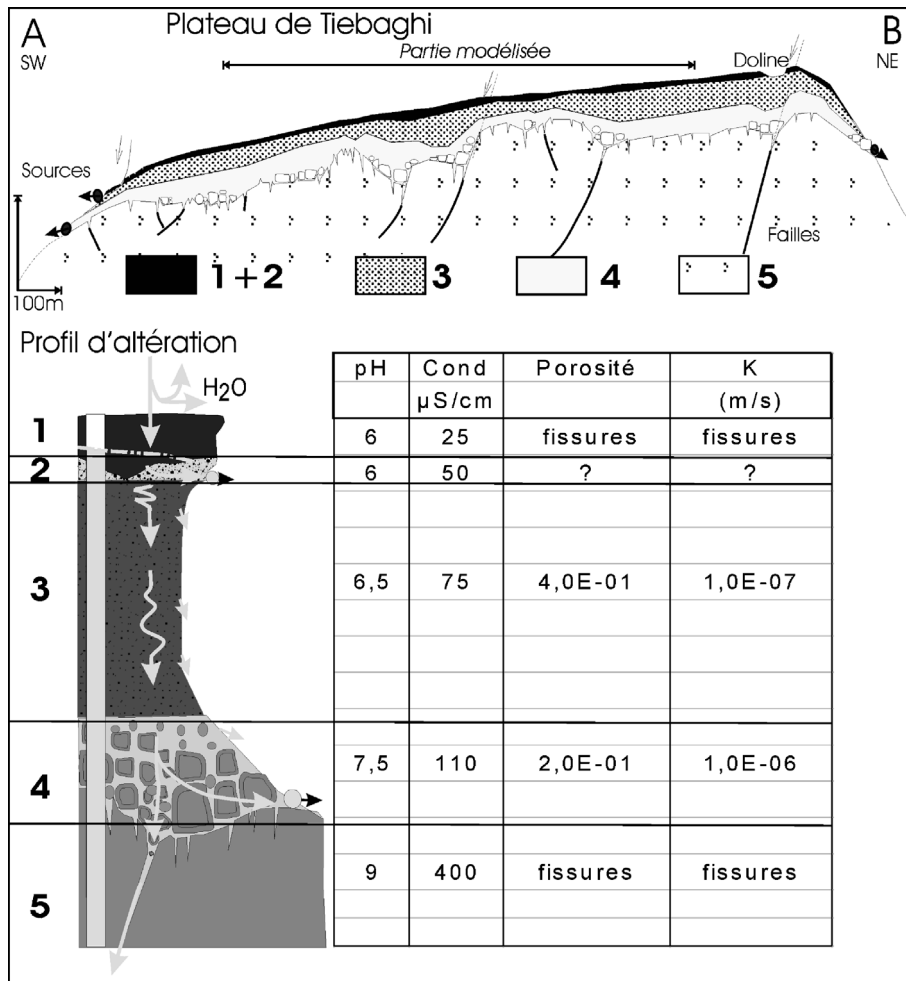


Fig. 2. Caractères hydrogéologiques des horizons d'altération. **1** : Cuirasse, **2** : horizon nodulaire, **3** : allotérite rouge et saprolite fine, **4** : saprolite grossière, **5** : socle UB.

Fig. 2. Hydrogeological characters of weathering horizons. **1**: Ferricrete, **2**: nodular layer, **3**: alloterite and fine saprolite, **4**: coarse saprolite, **5**: UM bedrock.

de l'altération [14,22,25,26]. L'épaisseur de l'altération augmente au niveau des fractures ouvertes (sillons dans le socle) et diminue au-dessus des secteurs moins fracturés (seuil de socle).

2.3. Investigations hydrogéologiques sur le massif de Tiébaghi

Sur le massif de Tiébaghi, les études antérieures concernent des travaux ponctuels d'alimentation en eau [1], ou des investigations géotechniques [10]. Ces résultats permettent une estimation, par essais hydrauliques, des paramètres hydrodynamiques des différentes formations du profil d'altération. À l'extrémité nord du plateau, hors exploitation, de nouvelles investigations ont été menées pour établir une typologie des émergences

et préciser les conditions de gisement des eaux souterraines. Sur les flancs, ces investigations consistent en une reconnaissance du contexte géostructural, un échantillonnage, la mesure des paramètres physicochimiques, et l'estimation des débits d'étiage des émergences et des ruisseaux drainant le massif. Sur le plateau, l'instrumentation des forages a permis la mise en place d'un réseau piézométrique de référence, dont un profil type sert à caractériser l'écoulement souterrain.

Pour illustrer le fonctionnement hydrogéologique de l'ensemble du massif, une représentation du champ de vitesse est établie dans un plan vertical, par simulation de l'écoulement en régime permanent. La solution numérique de l'écoulement répondant à l'équation de Laplace est obtenue en utilisant le code de calcul SEEP2D intégré au logiciel GMS [6].

3. Résultats

3.1. Caractères hydrogéologiques

Le plateau de Tiébaghi isole un système hydrogéologique bien délimité, permettant une approche simplifiée du bilan hydrologique. Les flancs raides définissent des conditions hydrauliques de drainage. Sur un bassin versant élémentaire de 0,06 km², l'infiltration est estimée à 2,5 l s⁻¹, pour une restitution de 2 l s⁻¹ dans la rivière au niveau du socle. Au centre, les conditions hydrogéologiques de l'écoulement souterrain restent homogènes et les relevés piézométriques traduisent un gradient d'écoulement identique au pendage général de la structure vers l'ouest. D'ailleurs, les émergences sont observées en majorité sur le versant ouest du plateau, entre 60 et 500 m d'altitude. Elles sont réparties préférentiellement au sommet et à la base du profil d'altération (Fig. 2).

Trois niveaux hydrogéologiques sont distingués :

- à la base de la cuirasse, l'horizon nodulaire présente de nombreux vides et permet un écoulement de subsurface, à l'origine de nombreuses sources temporaires en bordure de plateau. En saison de hautes eaux, cet écoulement peut se mettre en charge sous la cuirasse et des émergences apparaissent à travers les fissures de la cuirasse. Les débits d'étiage des rares sources pérennes sont inférieurs à 0,5 l s⁻¹ ;
- les horizons d'allotérite rouge et de saprolite fine forment un niveau homogène semi-perméable caractérisé par de rares zones de suintement, observables uniquement en hautes eaux ;
- les saprolites grossières, au toit de la roche mère, forment un niveau de base avec les sources les plus importantes (2 à 5 l s⁻¹). Plus profondément, des suintements dans la roche mère attestent l'extension de l'écoulement souterrain dans les fractures du socle.

Le peu d'écoulement dans l'allotérite rouge et la saprolite fine correspond à une diminution de la granulométrie et à une fraction fine (< 50 µm) estimée à 45% [26]. Ainsi, ces formations nommées par les miniers « latérites rouges ou jaunes », définissent une couche semi-perméable qui participe à la stratification de l'aquifère.

Des essais par pompage, effectués au toit des périclites [1], permettent de proposer un modèle de type Hantush–Jacob pour l'interprétation des courbes de rabattement. Des valeurs de transmissivité ($T = 1$ à 4×10^{-5} m² s⁻¹) et de coefficient d'emmagasinement

($S = 2$ à 4×10^{-4}) sont proposées pour la saprolite grossière et la partie supérieure du socle fracturé. Ces données sont précisées par douze essais d'injection Lefranc et Slug tests, réalisés dans les différents horizons du manteau d'altération [10]. L'encadrement de la perméabilité se situe entre la moyenne arithmétique et harmonique des valeurs déduites de ces essais [17], soit $K = 1,3$ à $3,1 \times 10^{-7}$ m s⁻¹ dans l'allotérite rouge ou la saprolite fine et $K = 1,7$ à $4,3 \times 10^{-6}$ m s⁻¹ dans la saprolite grossière. La valeur du facteur de drainage dans le modèle de Hantush $B = \sqrt{(Te'/k')}$ permet d'estimer une perméabilité du milieu semi-perméable de 1×10^{-8} m s⁻¹ pour 30 m d'épaisseur. Cette valeur, très inférieure aux perméabilités mesurées dans l'allotérite rouge et/ou la saprolite fine, traduit probablement l'existence d'une anisotropie verticale ($K_v < K_h$) liée à la présence de discontinuités horizontales à très faible perméabilité (10^{-9} m s⁻¹). Ces discontinuités ont été observées au sein des altérites (traces d'anciens accidents serpentins horizontaux) ou plus souvent au toit des saprolites grossières (horizon des « saprolites terreuses »). L'implantation d'un réseau piézométrique utilisant 30 sondages en trou nu permet de définir une surface piézométrique d'étiage. Les isopièzes sont parallèles aux courbes de niveau rectilignes du plateau, et traduisent un écoulement plan selon le pendage général du plateau vers l'ouest (Fig. 1). La surface piézométrique se situe dans l'horizon nodulaire, entre la cuirasse et le toit de l'allotérite rouge (Fig. 2). En revanche, l'installation d'un piézomètre multiple (Fig. 1), crépiné dans les trois niveaux hydrogéologiques, permet de montrer un gradient d'écoulement vertical de 0,01 à 0,07, qui prouve le drainage du système par les fractures du socle.

3.2. Caractères physico-chimiques des eaux

Les différents échantillonnages effectués sur le plateau et sur ses flancs est et ouest (Fig. 1) montrent la variabilité de certains paramètres physico-chimiques et des compositions chimiques variables selon la nature des horizons où se situe l'émergence des eaux. Toutes les eaux sont saturées en oxygène dissous pour des températures entre 23 et 28 °C. Cependant, les écoulements sous cuirasse présentent des pH compris entre 6,2 et 7,5 et des conductivités inférieures à 100 µS cm⁻¹, tandis que les eaux de la base du profil ont des pH compris entre 8,3 et 9,2 et des conductivités supérieures à 100 µS cm⁻¹ et atteignant 630 µS cm⁻¹ pour les émergences dans le socle UB.

Ces variations sont confirmées par les profils de conductivité, réalisés dans les piézomètres crépinés à différentes profondeurs. Ces mesures permettent de pré-

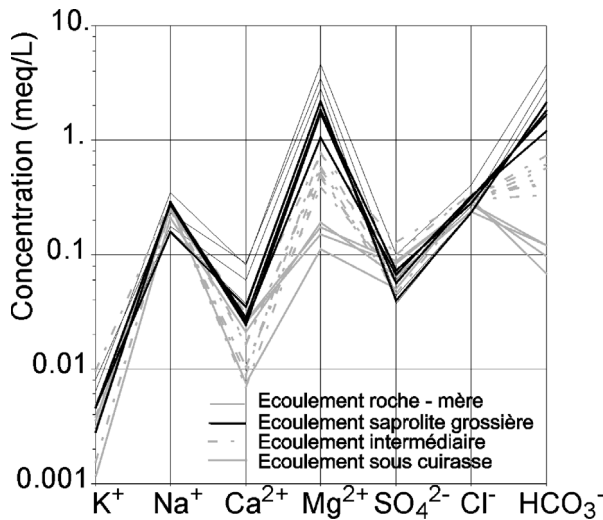


Fig. 3. Évolution verticale du faciès hydrochimique.

Fig. 3. Depth evolution of hydrochemical characters.

ciser les gammes de variation de la conductivité dans la nappe : de 15 à 25 $\mu\text{S cm}^{-1}$ dans l'horizon nodulaire, de 25 à 50 $\mu\text{S cm}^{-1}$ dans l'allotérite rouge et la saprolite fine et de 40 à 110 $\mu\text{S cm}^{-1}$ dans la saprolite grossière.

Les analyses chimiques des ions majeurs sont représentées dans un diagramme de Schoeller–Berkaloff permettant de préciser la typologie de ces eaux (Fig. 3). Deux signatures géochimiques se distinguent clairement : d'une part, des eaux très peu minéralisées, essentiellement sodiques et chlorurées, très légèrement magnésiennes et bicarbonatées, marquées vraisemblablement par l'influence marine toute proche (ce sont les eaux d'écoulement sous cuirasse) ; d'autre part, des eaux fortement minéralisées, magnésiennes et bicarbonatées, caractéristiques des écoulements dans la roche mère UB. Entre ces deux signatures, les eaux des niveaux intermédiaires montrent une composition chimique qui devient de plus en plus magnésienne et bicarbonatée. On peut noter que le calcium, bien qu'élément

mineur, suit l'évolution croissante du magnésium depuis les eaux de surface vers les eaux sortant du socle.

4. Discussion et conclusion

Les observations et mesures effectuées sur le site de Tiébaghi démontrent la continuité hydraulique entre le manteau d'altération et le socle fracturé. Le fonctionnement du système hydrogéologique peut être illustré selon un modèle plan vertical à trois couches : (i) l'allotérite rouge et la saprolite fine, (ii) la saprolite grossière (socle altéré fracturé), (iii) un socle sain fracturé au droit des sillons d'altération. Dans ce modèle, la cuirasse et l'horizon nodulaire sont réduits à une limite à potentiel imposé au toit de l'allotérite rouge. Cette condition hydraulique traduit le rôle hydrogéologique d'une surface de suintement dans l'horizon nodulaire. Sur le massif de Tiébaghi, cette hypothèse simplificatrice est possible, compte tenu de la quasi-permanence d'un écoulement d'inféro-flux sous la cuirasse. Il résulte d'une pluviométrie excédentaire au regard de la capacité d'infiltration de l'allotérite rouge et de la saprolite fine. Le rôle des fractures du socle, au droit des sillons, est simulé par une condition de flux exprimant le débit de chaque fracture. Le système est simulé en régime permanent. Les perméabilités sont considérées comme homogènes pour chaque horizon, avec des valeurs respectant l'encadrement des mesures effectuées sur le site. Ces paramètres sont ajustés pour respecter le bilan hydrologique évalué à 0,02 l s^{-1} sur une section de 1 m (Tableau 1).

La distribution des charges et des vitesses de circulation simulées, est présentée sur la Fig. 4. Ce modèle illustre l'importance de la géométrie du socle et des variations d'épaisseur du manteau d'altération qui contrôlent en grande partie les vitesses et les directions d'écoulement. Les sillons correspondent à des zones de faible vitesse dont la composante verticale résulte du drainage imposé par la fracturation. Les seuils de roches saines, à faible recouvrement d'altérite, favorisent l'ali-

Tableau 1
Paramètres de la simulation

Table 1
Simulation parameters

Conditions aux limites	<ul style="list-style-type: none"> – potentiels imposés à l'altitude du toit de l'allotérite – flux imposés dans l'axe des sillons d'altération (3×10^{-3}) l s^{-1} – limites aval et amont en condition de potentiel
Perméabilités des couches	<ul style="list-style-type: none"> – allotérite et saprolite fine $K = 5 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ – saprolite grossière $K = 2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ – socle massif $K = 1 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$
Bilan des flux	0,019 l s^{-1} pour une surface de 1000 m^2

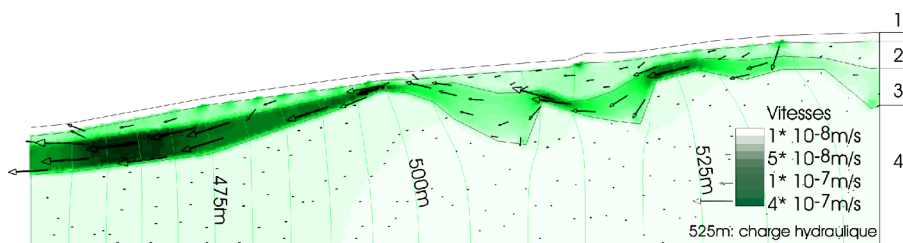


Fig. 4. Simulation de l'écoulement souterrain. 1 : Horizon nodulaire, 2 : allotrite rouge et saprolite fine, 3 : saprolite grossière, 4 : socle UB.

Fig. 4. Simulated groundwater flow. 1: Nodular layer, 2: allotrite and fine saprolite, 3: coarse saprolite, 4: UM bedrock.

mentation *per ascensum* de la surface de suintement au toit de l'allotrite rouge. Enfin, la limite aval en condition de potentiel rend compte du drainage sur les flancs du massif, et induit des vitesses importantes et des émergences concentrées à la base de la saprolite grossière.

Ce modèle met en exergue l'interdépendance des horizons du profil d'altération au regard du fonctionnement du système hydrologique des massifs de péridotite. Ceci rejoint les conclusions des travaux réalisés sur les aquifères de socle en milieu tropical [9,11,12], conduisant au concept de *regolith-fractures aquifer* (rfa) [20]. Chaque horizon contribue de manière originale à l'écoulement souterrain et présente une fonction intrinsèque remarquable.

1. La cuirasse située en zone vadose constitue un milieu de « roches dures », à fissures ouvertes, dont les caractères hydrodynamiques sont difficiles à appréhender. Très perméable, cette couche de surface favorise l'infiltration. Elle est associée à une végétation originale de type maquis minier [23] dont le rôle évapotranspirant reste à quantifier.
2. L'horizon nodulaire constitue une strate conductrice dans le haut du profil. Il crée une surface de suintement au toit de l'allotrite rouge et forme une surface piézométrique parallèle à la topographie. Il participe ainsi au maintien d'écoulements vers les dépressions de la cuirasse (dolines) et les sources de bordure de plateau. Lors de forts événements pluvieux, l'écoulement peut se mettre en charge sous la cuirasse et modifier le coefficient de ruissellement initial.
3. L'allotrite rouge et la saprolite fine, forment une couche épaisse de faible perméabilité, mais de porosité supérieure à 40% [26] et contribuent au caractère capacitif du système. Cette couche réservoir tamponne l'alimentation des horizons sous-jacents.
4. La saprolite grossière représente une nouvelle couche conductrice permettant une circulation souterraine latérale au toit du socle de roches saines et l'alimentation des principales émergences des ver-

sants. Sur le plan géochimique, cet horizon est le lieu principal de la minéralisation des eaux d'infiltration [2]. La granulométrie croissante vers le socle joue le rôle d'un massif filtrant et contribue au contrôle du lessivage de particules fines par les fractures du socle. À l'image du modèle d'altération des socles granitiques [16], ces fractures présentent une double origine, liée à la tectonique et à l'altération ; toutefois, contrairement au modèle granitique, cette fracturation ne présente pas d'anisotropie marquée dans le plan horizontal.

Dans le socle de roches saines, seules les fractures ouvertes d'origine tectonique participent au transfert des eaux drainées dans les horizons supérieurs.

L'exemple de Tiébaghi permet de proposer un modèle général de système hydrogéologique des manteaux d'altération des massifs UB de Nouvelle-Calédonie. Nos résultats montrent que le fonctionnement de ce système résulte de l'interdépendance des horizons d'altération et de leur socle. Dans ce système, l'équilibre des nappes dépend autant des conditions d'alimentation en eau, que de la structure et de la texture du système latéritique. Ce modèle conceptuel fournit un cadre pour l'interprétation des conditions de gisement des eaux souterraines dans les différents massifs miniers de l'île.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les sociétés Le Nickel (SLN) et Geophysical Expertise pour leur collaboration, ainsi que l'US122 du centre IRD de Nouméa pour les analyses chimiques.

Références

- [1] A2EP, Étude de l'hydrogéologie du massif de Tiébaghi, A2EP, NCH 96/09 02, 1996, 26 p.
- [2] J. Bruni, M. Canepa, G. Chiodini, R. Cioni, F. Cipolli, A. Longinelli, L. Marini, G. Ottonello, M. Vetuschi Zuccolini, Irreversible water-rock mass transfer accompanying the generation of the

- neutral, Mg–HCO₃ and high-pH, Ca–OH spring waters of the Genova province, Italy, *Appl. Geochem.* 17 (2002) 455–474.
- [3] F. Cipolli, B. Gambardella, L. Marini, G. Ottonello, M. Vetuschi Zuccolini, Geochemistry of high-pH waters from serpentinites of the Gruppo di Voltri (Genova, Italy) and reaction path modeling of CO₂ sequestration in serpentinite aquifers, *Appl. Geochem.* 19 (2004) 787–802.
- [4] I.D. Clark, J.-C. Fontes, Palaeoclimatic reconstruction in northern Oman based on carbonates from hyperalkaline groundwaters, *Quat. Res.* 33 (1990) 320–336.
- [5] B. Dewandel, P. Lachassagne, A. Qatan, Spatial measurements of stream baseflow, a relevant method for aquifer characterization and permeability evaluation. Application to a hard rock aquifer, the Oman ophiolite, *Hydrol. Processes* 18 (2004) 3391–3400.
- [6] DoD, Groundwater Modeling System (GMS), Version 2.1, U.S. Department of Defense, 1998.
- [7] J.-J. Espirat, Étude hydrogéologique de la côte ouest de la Nouvelle-Calédonie, BRGM, 1967, 177 p.
- [8] Golder-associates, Cartographie hydrogéologique et essai au traceur. Aires de stockage des résidus et de morts terrains de la Kwé Est, Golder-associates, B-295, 2002, 30 p.
- [9] J.-C. Grillot, M. Raunet, L. Ferry, Comportement piézométrique des nappes d'altérites en zone intertropicale humide d'altitude (Hauts Plateaux de Madagascar), *J. Hydrol.* 120 (1990) 271–282.
- [10] J.-M. Guzik, Premiers résultats des relevés effectués sur les nouvelles installations de Tiébaghi, S.L.N., 1996, 17 p.
- [11] K.W.F. Howard, J. Karundu, Constraints on the exploitation of basement aquifers in East Africa – Water balance implications and the role of the regolith, *J. Hydrol.* 139 (1992) 183–196.
- [12] J.S. Kuma, P.L. Younger, R.J. Howell, Expanding the hydrogeological base in mining EIA studies: A focus on Ghana, *Environ. Impact Assessment Rev.* 22 (2002) 273–287.
- [13] M. Latham, Altération et pédogenèse sur roches ultrabasiqes en Nouvelle-Calédonie : genèse et évolution des accumulations de fer et de silice en relation avec la formation du modelé, *Études et Thèses, Orstom*, 1986, 331 p.
- [14] J. Leguéré, Des corrélations entre la tectonique cassante et l'altération supergène des péridotites de Nouvelle-Calédonie, thèse de 3^e cycle, université des sciences et techniques du Languedoc, 1976, 80 p.
- [15] S. Llorca, Metallogeny of supergene cobalt mineralization, New Caledonia, *Aust. J. Earth Sci.* 40 (1993) 377–385.
- [16] J.-C. Maréchal, R. Wyns, P. Lachassagne, K. Subrahmanyam, F. Touchard, Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 451–460.
- [17] G. Matheron, *Éléments pour une théorie des milieux*, Masson et C^{ie}, Paris, 1967.
- [18] J. Moutte, Chromite deposits of the Tiébaghi ultramafic massif, New Caledonia, *Econ. Geol.* 77 (1982) 576–591.
- [19] M. Ouangrawa, J.-J. Trescases, J.-P. Ambrosi, Évolution des oxydes de fer au cours de l'altération supergène de roches ultrabasiqes de Nouvelle-Calédonie, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 323 (1996) 243–249.
- [20] A. Owoade, The potential for minimizing drawdowns in groundwater wells in tropical aquifers, *J. Afr. Earth Sci.* 20 (1995) 289–293.
- [21] J.-P. Paris, Géologie de la Nouvelle-Calédonie : un essai de synthèse, BRGM, 1981, 278 p.
- [22] B. Pelletier, Localisation du nickel dans les minerais « garniériques » de Nouvelle-Calédonie, in : *Pétrologie des altérations et des sols*, *Sci. Géol. Mém.*, Strasbourg 73 (1983) 173–183.
- [23] N. Perrier, F. Colin, T. Jaffre, J.-P. Ambrosi, J. Rose, J.-Y. Bottero, Nickel speciation in *Sebertia acuminata*, a plant growing on a lateritic soil of New Caledonia, *C. R. Geoscience* 336 (2004) 567–577.
- [24] C. Savin, B. Robineau, G. Monteil, A. Beauvais, J.-C. Parisot, M. Ritz, Electrical imaging of peridotite weathering mantles as a complementary tool for a nickel ore exploration in New Caledonia, in : *ASEG 16th Geophysical conference*, Adelaide, Australia, 2002, p. 5.
- [25] R.G. Taylor, K.W.F. Howard, Groundwater recharge in the Victoria Nile basin of East Africa: support for the soil moisture balance approach using stable isotope tracers and flow modeling, *J. Hydrol.* 180 (1996) 31–53.
- [26] J.-J. Trescases, L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiqes en zone tropicale : formation des gisements nickelifères de Nouvelle-Calédonie, *Mém. Orstom*, 78, 1975, 259 p.