Contrôle karstique de minéralisations nickélifères de Nouvelle-Calédonie

Antonin Genna, Pierre Maurizot, Yves Lafoy, Thierry Augé

▶ **To cite this version:**

Antonin Genna, Pierre Maurizot, Yves Lafoy, Thierry Augé. Contrôle karstique de minéralisations nickélifères de Nouvelle-Calédonie. Comptes Rendus. Géoscience, 2005, 337 (3), pp.367 - 374. 10.1016/j.crte.2004.09.013 . hal-03763107

HAL Id: hal-03763107
https://brgm.hal.science/hal-03763107

Submitted on 29 Aug 2022

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

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

Available online at www.sciencedirect.com
SCIENCE DIRECT®
C. R. Geoscience 337 (2005) 367–374
COMPTES RENDUS GEOSCIENCE
http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/

Géomatériaux (Métallogénie)

Contrôle karstique de minéralisations nickélifères de Nouvelle-Calédonie

Antonin Genna [a,*], Pierre Maurizot [b], Yves Lafoy [c], Thierry Augé [a]

[a] *BRGM, REM/MESY, 3, av. Claude-Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2, France*
[b] *BRGM, 1ter, rue E.-Unger, Vallée du Tir, BP 56, 98845 Nouméa cedex, Nouvelle-Calédonie*
[c] *Direction de l'industrie, des mines et de l'énergie de Nouvelle-Calédonie (Dimenc), 1ter, rue E.-Unger, Vallée du Tir, BP 465, 98845 Nouméa cedex, Nouvelle-Calédonie*

Reçu le 7 décembre 2003 ; accepté après révision le 21 décembre 2004

Disponible sur Internet le 22 janvier 2005

Résumé

La fracturation associée aux minéralisations nickélifères de Nouvelle-Calédonie a successivement été considérée comme antérieure, puis postérieure, au processus métallogénique. À la suite d'une étude des processus dynamiques du karst contemporain de la latéritisation, nous proposons un nouveau modèle de mise en place des minéralisations. Dans ce modèle, la minéralisation se met en place par l'intermédiaire d'un réseau de fractures hydrauliques de type *crack-seal*, associé à un réseau de failles normales qui guident l'enfoncement et l'évacuation des produits du karst. ***Pour citer cet article : A. Genna et al., C. R. Geoscience 337 (2005).***
© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Role of karst in the nickeliferous mineralisations of New Caledonia. Fracturing associated with the nickeliferous mineralisations of New Caledonia has been successively considered as pre-dating and then post-dating the metallogenic processes. On the basis of a study of the dynamics of karst contemporaneous with lateritisation, a new emplacement model is proposed for the mineralisation: a network of hydraulic fractures of the crack-seal type governs the emplacement of mineralisation, associated with a network of normal faults that controls the sinking and evacuation of the karst products. ***To cite this article: A. Genna et al., C. R. Geoscience 337 (2005).***
© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Karst ; Minéralisation nickélifère ; *Crack-seal* ; Fracturation hydraulique ; Nouvelle-Calédonie

Keywords: Karst; Nickeliferous mineralisation; Crack-seal; Hydraulic fracturing; New Caledonia

* Auteur correspondant.
Adresses e-mail : a.genna@brgm.fr (A. Genna), maurizot@canl.nc (P. Maurizot), yves.lafoy@gouv.nc (Y. Lafoy), t.auge@brgm.fr (T. Augé).

1631-0713/$ – see front matter © 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.
doi:10.1016/j.crte.2004.09.013

Abridged English version

The nickeliferous mineralisation of New Caledonia was developed on ophiolitic peridotite [17] that was obducted at the end of the Eocene (Fig. 1) [1,2]. According to the historical synthesis of Avias [4], when mining commenced in the late 19th century, mineralisation was considered to be hydrothermal and vein related [9]. As a result of Glasser's work [10], the deposits were subsequently considered as supergene. After a weathering origin of the mineralisation [6] had gained widespread acceptance, various authors [15,16,18,20,25] concentrated their efforts on the structural controls of deposit emplacement. More recently, the mineralisation-related fracturing has been attributed to regional tectonism contemporaneous with the weathering phase [26].

In parallel to the work on structural geology, weathering studies [5,14,24,27] suggested that lateritic processes were responsible for widespread karstification. The role played by hydrology and hydrogeology in the weathering has been highlighted by Avias [3]. Although no references were found concerning the typology of the deposits, the vocabulary adopted by miners for situating the various orebodies within their mountainous setting was commonly influenced by geomorphology, giving rise to terms such as 'plateau deposits' or 'slope deposits'.

The relationships between landforms and the processes of ancient weathering and headward erosion of the present drainage network were analysed by studying aerial photographs. A visit to the southern part of the island (Plaine des Lacs, Fig. 1) has permitted to study little-eroded areas where weathering is still active. Fieldwork in the Tontouta valley, the Thio, Kouaoua, and Nakéty regions, and along the fringe of the western massifs has led to a better understanding of the weathered and eroded zones in terms of metallogenic processes.

The geometry and the mechanical behaviour of the material forming the lateritic profile are shown in Fig. 2. The main marker minerals of syn-weathering deformation are silica (quartz, chalcedony, opal) and 'garnierite' (a mixture of Ni-bearing phyllosilicates). The dominant deformation mechanism is of the crack-seal type [21]. Fig. 3 shows an example of this type of deformation from the Camp des Sapins workings at Thio.

The absence of a drainage network at the start of the lateritisation process has been stressed by Latham [14]. However, both precipitation and climate play essential roles in the karstification (lateritisation) process. Lateritic weathering causes a considerable decrease in the volume of peridotites in the laterite horizon. Fluids percolate down to the bottom of the weathering profile, where they induce not only oriented fracturing (assisted by both fluids and crack-sealing), but also isotropic fracturing (hydraulic brecciation).

Listric faults are associated with fluid concentration and the development of different types of fracturing. Such faults commonly form a barrier for the weathering fluids and constitute the lower boundary of the underlying mineralised zones.

Fig. 2 summarizes the result of the geometric study of structural elements. A listric fault cuts the weathering profile (Fig. 2a) straddling the zone of ancient landforms and that of active headward erosion, as observed in several deposits. A geometric reconstruction of the weathering system is proposed on the basis of the observed structures. Two levels in the karst system have been defined: the upper karst system corresponding to the weathering profile, and a lower karst system corresponding to the conduits that help in evacuating the fluids through unweathered peridotite (Fig. 2h). Fig. 2c and d shows the two most common cases of observed weathering-system associations.

Fig. 4a summarizes the overall geometry and functioning of the weathering system. It comprises a weathering or 'resorption' cell (upper karst). The hydrodynamics of this cell (Fig. 4b) are characterized by rainwater percolating downward and weathering of the peridotite formation, before penetrating into the lower karst system. During periodic recharge of the karst, the groundwater rises via normal faults forming the lower boundary of the weathered zone. Such fluid circulation causes major hydraulic fracturing. Part of the water is evacuated directly by the lower karst system, whereas another part rises into the weathering cell along preferential flow paths, i.e. the basal faults, and may contribute to the filling of temporary lakes.

Fig. 4c shows the kinematics of the materials making up the resorption cell. Global resorption of the peridotite occurs during the weathering process in the laterite horizon. The hydraulic fracturing concentrated at the bottom of the profile evolves into a listric fault

that helps in transferring the weathered material towards the main outlets.

Lateritic weathering began in the Miocene [23] and continued during the large-radius upwarping that accompanied uplift of the island [8]. Contemporaneous with this vertical movement, the weathering system gradually sank into the massif in successive steps (Fig. 5).

Post-obduction structures within the peridotite seem to play only a minor role in the development of resorption cells (upper karst). In the lower system, however, these structures played a major role in the initiation of dissolution processes that will determine the karst geometry. In this manner, the faults controlling emplacement of the mineralisation are probably not inherited from basement structures, but are rather a direct consequence of the weathering process reflected by changes in the rheology of the materials, and of major variations in the hydraulic pressure of the karst system. The considerable decrease in volume of the peridotite during weathering also contributes to the formation of gravitational slides. Analysis of present deformation and oceanic dynamics around New Caledonia [7,11–13] suggests that neotectonism plays only a minor role, which is further reflected by low seismicity [22].

We consider the structures associated with the mineralisation to be a consequence of weathering. We propose a karstic origin for this mineralisation, where fluids represent a driving force for the dynamics of the environment. This is the case not only for weathering, but also for brecciation and faulting. The fractures and faults govern the gravitational collapse of weathering products, the sinking of the karst system, and the evacuation of material derived from the peridotite massif.

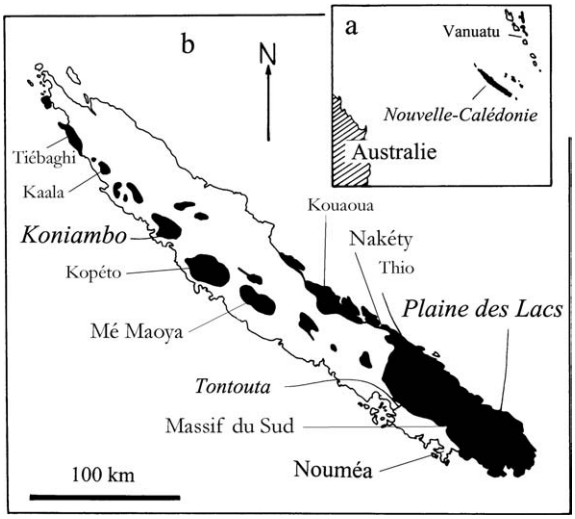

Fig. 1. Carte de localisation : (**a**) localisation générale de la Nouvelle-Calédonie, (**b**) localisation des sites étudiés ; en noir : péridotites.

Fig. 1. (**a**) General location of New Caledonia; (**b**) location of the study sites, with peridotites marked in black.

1. Introduction

En Nouvelle-Calédonie (Fig. 1), les minéralisations nickélifères [17] se sont formées sur les péridotites ophiolitiques [1,2] obductées à la fin de l'Éocène. Selon l'historique réalisé par Avias [4], elles ont été considérées comme hydrothermales au début de leur exploitation, à la fin du XIX^{e} siècle. On considérait que la minéralisation était piégée dans un réseau filonien [9]. La partie supérieure de ces gisements a ensuite été considérée comme supergène, résultant de la latéritisation des péridotites [10]. Il est maintenant admis que la totalité de l'épaisseur des gisements est supergène [6], le rôle de l'hydrologie et de l'hydrogéologie étant fondamental dans le phénomène altéritique [3].

Les travaux de la société Le Nickel [6,14–16,18–20,24,25] ont mis l'accent sur le contrôle structural des fortes concentrations nickélifères. Ces auteurs considèrent que la préstructuration du bâti ophiolitique est à l'origine du guidage vertical de l'altération et de la répartition actuelle de la minéralisation nickélifère. Plus récemment, Vigier [26] propose une tectonique régionale distensive, contemporaine du processus d'altération. La fracturation tectonique piège alors la minéralisation. Il établit ainsi une succession de phases tectoniques régionales contemporaines du processus métallogénique, jusqu'à l'heure actuelle.

Parallèlement à ces travaux de géologie structurale, des études altérologiques [5,14,24,27] considèrent l'altération latéritique comme étant à l'origine d'un processus de karstification à grande échelle, sans en spécifier les modalités mécaniques ni les relations avec la fracturation des gisements. Il est toutefois fait

mention, à la base du profil altéritique de phénomènes de silicification.

Deux types principaux de minerais de nickel sont exploités en Nouvelle-Calédonie : les minerais saprolitiques (ou garniéritiques ou encore minerais silicatés), avec des teneurs supérieures à 2 %, et les minerais latéritiques, avec des teneurs inférieures. Il n'y a pas de références sur la typologie des gisements, mais le vocabulaire des mineurs emprunte celui de la géomorphologie : gisements de plateau, de croupe, de versant. Ces appellations soulignent bien l'étroite dépendance entre altération, morphogenèse et métallogenèse.

Les gisements correspondant aux deux types de minerai ont été étudiés et font l'objet du modèle proposé ci-dessous. La chronologie des déformations à diverses échelles, ainsi que les effets volumiques et dynamiques du processus d'altération, ont été établis par une étude morpho-structurale. Trois types d'observations ont été réalisés. L'étude des photos aériennes a permis l'analyse du modelé, en rapport avec les phénomènes d'altération anciens et d'érosion régressive du réseau hydrographique actuel. La visite de la région sud de l'île (plaine des Lacs) a permis l'observation des zones les moins érodées, où les processus d'altération sont encore actifs. La visite de la vallée de la Tontouta, des régions de Thio, Kouaoua, Nakéty et du chapelet de massifs de la côte ouest (Mé Maoya, Kopéto, Koniambo, Kaala, Tiébaghi) a permis l'étude des zones altérées et érodées de l'île et des processus de métallogenèse.

2. Comportement mécanique des matériaux et hydrodynamique

2.1. Les marqueurs de la déformation antérieure à la latéritisation

La déformation liée à la mise en place de la nappe de péridotites s'effectue principalement par cisaillement et schistosité, dans un contexte de déformation ductile. Ces déformations sont additives ou soustractives, selon leur localisation dans les édifices structuraux. Elles sont clairement différenciées des déformations postérieures à l'obduction, qui se développent en milieu superficiel et sont liées au processus d'altération.

2.2. La rhéologie des matériaux du profil latéritique lors de l'altération

Dans le profil latéritique (Fig. 2), la cuirasse subit des fracturations et des éboulements (qui s'observent dans les dolines). La latérite a un comportement plastique (Fig. 2e) ; elle présente des failles hydroplastiques, traduisant des tassements différentiels. La saprolite a un comportement cassant. La déformation y est généralement diffuse. Il s'agit d'effondrements, de cisaillements, de bréchifications (Fig. 2f). La base de la saprolite présente, par endroits, des figures de *crack-seal* au sens de Ramsay [21], dans des failles qui séparent la zone altérée de l'encaissant sain (Fig. 2g).

Ces réseaux de fractures et ces brèches (Fig. 2f et g) piègent les minéraux néoformés qui résultent de l'altération latéritique. Ces minéraux (quartz, calcédoine, opale, chrysotile – anciennement dénommé « deweylite » –, « garniérite »[1]...), qui constituent également le ciment de brèches de faille (Fig. 2b–d), sont de bons marqueurs de la cinématique et soulignent la structuration des profils et la géométrie des failles.

Pour faciliter la description et la compréhension des édifices karstiques, nous définissons (Fig. 2h) un karst supérieur, correspondant à la zone d'altération et un karst inférieur creusé dans la péridotite saine.

Dans les zones de cisaillement, le processus de déformation dominant est la fracturation de type *crack-seal*. Il combine fracturation hydraulique et cisaillement. La Fig. 3 est un exemple de déformation de ce type observé sur la mine du Camp des Sapins à Thio (Fig. 1). Sur ce même exemple, on constate un maximum de fracturation à la base du profil, lorsqu'il est observable en totalité. Les figures de *crack-seal* s'organisent alors en failles normales listriques. Ces failles, constituées de plusieurs plans anastomosés, présentent un flux de stries qui traduisent un mouvement s'effectuant dans le sens de la plus grande pente. Au mur de cette faille, la péridotite n'est pas fracturée ou ne présente que des fractures liées à la mise en place de l'ophiolite (Fig. 3a et b).

[1] Le terme garniérite est utilisé ici pour désigner divers phyllosilicates nickélifères et magnésiens néoformés, dépourvus de fer. Il s'agit de mélanges principalement constitués de népouite et de lizardites nickélifères. Au sens calédonien du terme, il correspond au « minerai silicaté », par opposition au « minerai latéritique », constitué d'oxy-hydroxydes de fer nickélifères [20].

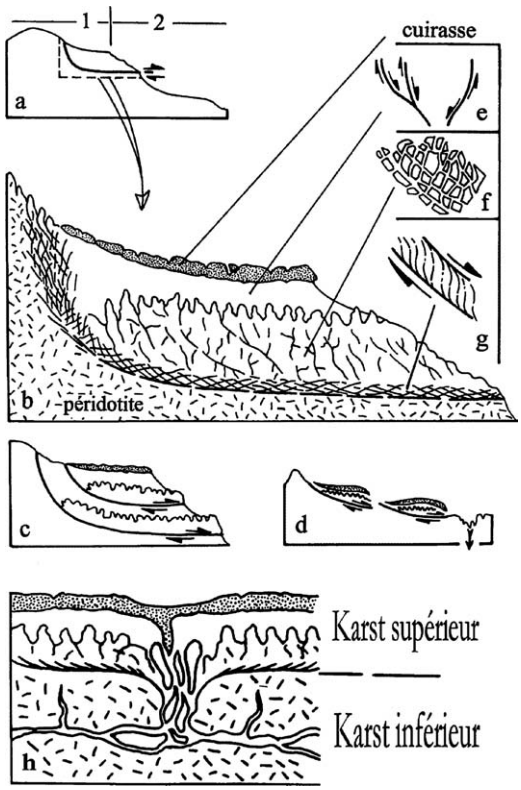

Fig. 2. Synthèse géométrique des éléments structuraux et comportement mécanique des différentes lithologies d'un profil latéritique : (**a**) localisation de la faille listrique sur le profil des modelés, (**1**) modelé latéritique ancien, (**2**) modelé de l'érosion actuelle, (**b**) structuration du profil, (**c**) superposition d'unités glissées, (**d**) association horizontale d'unités glissées, (**e**) failles hydroplastiques dans les latérites, (**f**) fracturation hydraulique dans les saprolites, (**g**) failles listriques et *crack-seal* à la base des saprolites, (**h**) localisation du karst supérieur et du karst inférieur dans l'édifice altéritique.

Fig. 2. Geometry and mechanical behaviour of the various lithologies making up the lateritic profile: (**a**) location of the listric fault within the landform profile, (**1**) former lateritic landform, (**2**) present-day eroded landform, (**b**) detailed view of the profile, (**c**) superposition of the gravitational units, (**d**) lateral relationship of the gravitational units, (**e**) plastic faulting in laterite below the 'cuirasse' (duricrust), (**f**) hydraulic fracturing in saprolite, (**g**) listric faulting and crack-seal brecciation at the saprolite base, (**h**) position of the lower and upper karst in the weathering system.

3. Rôle des fluides

L'absence de réseau hydrographique à l'initiation du processus d'altération est soulignée par Latham [14]. En revanche, le rôle des précipitations et du climat est essentiel dans le processus de latéritisation.

Fig. 3. Exemple de bréchification de type *crack-seal* observé au Camp des Sapins, région de Thio : (**a**) brèche à la base du profil d'altération, (**b**) détail de (**a**) (silice en noir).

Fig. 3. An example of crack-seal brecciation from the Camp des Sapins workings in the Thio region: (**a**) breccia at the base of the weathering profile, (**b**) detailed view of (**a**), with silica shown in black.

Une importante diminution de volume s'opère dans l'horizon latéritique lors de la latéritisation [14,24]. Selon les travaux anciens [24], les fluides descendent jusqu'au bas du profil altéritique. Mais leur rôle ne se limite pas à l'altération des péridotites et à la néoformation de minéraux (silice, « garniérite »). À l'échelle métrique, nous montrons qu'ils induisent des fracturations orientées (fracturation assistée et *crack-seal*) mais également de la fracturation isotrope (brèche hydraulique) et la formation de cargneules. Les minéraux néoformés sont des indicateurs de l'évolution de la pression hydrostatique. À l'échelle plurihectométrique, ces fracturations s'organisent en failles listriques, qui canalisent les fluides. Ces mêmes failles font souvent écran aux fluides minéralisés par l'altération et limitent vers le bas les zones minéralisées. L'importance de ces discontinuités à l'interface roche saine–altérite a été largement sous-estimée et est au centre du modèle proposé ci-dessous.

4. Modèle

La synthèse géométrique des éléments structuraux permet de proposer la Fig. 2, qui résume les principaux cas rencontrés. La Fig. 2a localise la faille listrique dans le profil, entre le modelé ancien et l'érosion

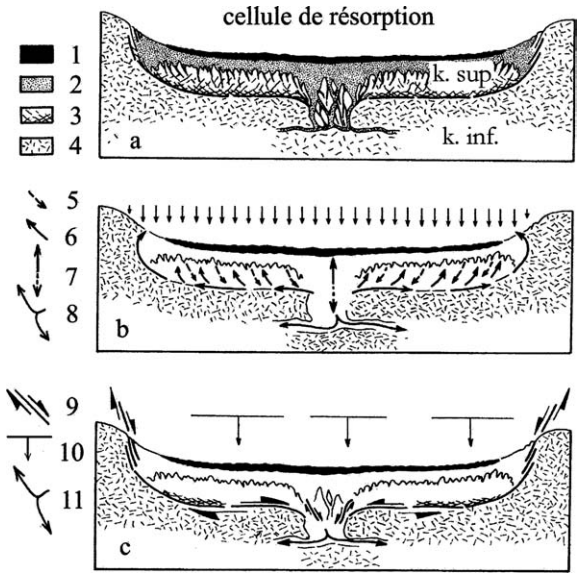

Fig. 4. Modèle. (**a**) Coupe interprétative d'une cellule de résorption : (**1**) cuirasse, (**2**) latérite, (**3**) saprolite, (**4**) péridotite. (**b**) Dynamique des fluides : (**5**) mouvement *per descensum*, (**6**) mouvement *per ascensum*, (**7**) battement de nappe, (**8**) évacuation des fluides par le karst inférieur, souterrain. (**c**) Cinématique des matériaux : (**9**) faille normale listrique, (**10**) résorption globale des péridotites, (**11**) évacuation des matériaux par le karst inférieur.

Fig. 4. Proposed model. (**a**) Interpretative section of a resorption (or weathering) cell: (**1**) duricrust, (**2**) laterite, (**3**) saprolite, (**4**) peridotite. (**b**) Fluid dynamics: (**5**) downward flow, (**6**) upward flow, (**7**) variation in groundwater level, (**8**) fluid evacuation via the lower karst system. (**c**) Kinematics of the component materials: (**9**) listric normal fault, (**10**) overall resorption of the peridotites, (**11**) underground evacuation of material via the karst system.

régressive actuelle, tel qu'observé dans plusieurs gisements. La Fig. 2b est la reconstitution géométrique de l'édifice altéritique unitaire à partir des éléments structuraux observés. Les Figs. 2c et 2d représentent les deux casles plus fréquents d'association de ces unités élémentaires, sur l'ensemble des massifs. La Fig. 2h précise la terminologie du karst dans son contexte altéritique.

La Fig. 4a résume la géométrie globale et le fonctionnement de l'édifice altéritique unitaire. Il s'agit d'une cellule d'altération, que nous appelons « cellule de résorption ». La Fig. 4b résume l'hydrodynamique de cette cellule. L'eau de pluie percole la formation des péridotites. Le fluide pénètre ensuite jusqu'au karst inférieur, souterrain. Au cours des remises en eau périodiques du karst, les fluides remontent par les failles normales, qui limitent par le bas la zone altérée. Les pulsations périodiques de ce circuit de fluide sont à l'origine d'une importante fracturation hydraulique et fracturation assistée. Une partie de l'eau est directement évacuée par le karst inférieur. Une autre partie de l'eau remonte dans la cellule de résorption par les conduits préférentiels que représentent les failles de base et participe éventuellement au remplissage d'un lac temporaire. Lors de la vidange, partielle ou totale du karst, l'eau redescend dans le profil altéritique, et rejoint la faille de base qui la conduit vers les exutoires du karst inférieur.

La Fig. 4c résume la cinématique des matériaux à travers l'ensemble de la cellule de résorption. Une résorption globale de la péridotite s'opère au cours du processus d'altération. La fracturation concentrée en base de profil évolue en faille normale listrique qui guide les matériaux vers les exutoires principaux. Des phénomènes d'effondrement affectent les sédiments accumulés au centre du dispositif dans la cellule de résorption.

Le niveau des eaux varie de manière saisonnière ou irrégulière dans le karst. On peut observer à l'heure actuelle ce processus de remplissage et de vidange des dolines. L'amplitude des mouvements peut atteindre 25 m en quelques jours (INCO, communication personnelle). Ce processus implique un ennoiement du karst inférieur et une migration temporaire du fluide *per ascensum*.

5. Discussion

En Nouvelle-Calédonie, les processus d'altération latéritique débutent dès le Miocène [23] et se prolongent pendant le bombement à grand rayon de courbure qui accompagne la surrection de l'île [8]. C'est au cours de ces mouvements verticaux, que le système altéritique s'enfonce dans le massif par paliers successifs (Fig. 5a–c).

La pré-structuration du bâti péridotitique semble avoir un rôle modéré au niveau des cellules de résorption elles-mêmes (karst supérieur). En revanche, elle joue un rôle déterminant dans l'initiation par dissolution des structures du karst inférieur, qui s'orientent selon des alignements dont les principales directions sont N 135 et N 40. L'analyse des photos aériennes met en évidence une capture progressive du réseau hy-

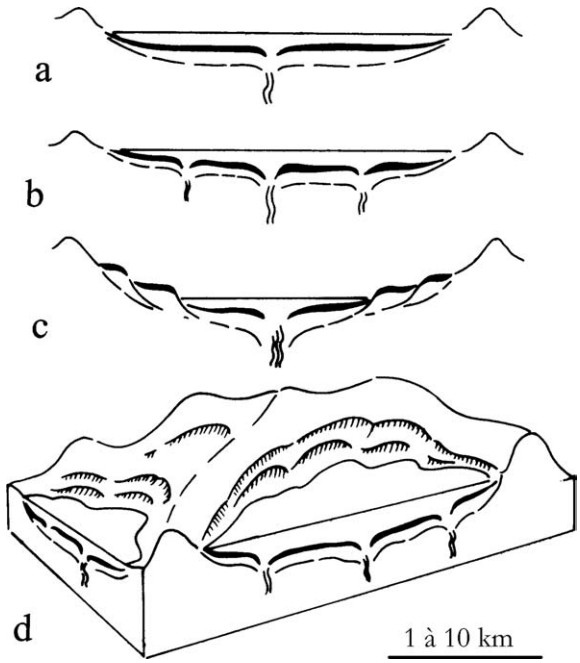

Fig. 5. Évolution dans le temps du système karstique : (**a**) stade initial à un seul exutoire, (**b**) stade initial à plusieurs exutoires, (**c**) stade évolué à trois paliers, (**d**) relations géométriques entre différents poljés.

Fig. 5. Evolution with time of the karst system: (**a**) initial stage with a single outlet, (**b**) initial stage with several outlets, (**c**) mature case with three stages, (**d**) geometrical relationship between the various poljes.

drographique actuel par le karst inférieur, au cours de son enfoncement dans le massif de péridotite.

Ainsi, les failles qui guident la mise en place des minéralisations ne semblent pas être un héritage de la structuration du socle, mais une conséquence directe du processus d'altération par le changement rhéologique des matériaux et les variations importantes de la pression hydraulique du karst. La diminution de volume considérable que subit l'horizon latéritique au cours de l'altération contribue également à la formation des failles de glissement gravitaire.

À plus petite échelle, l'enfoncement irrégulier du karst guide les minéralisations en nickel. D'autres déformations, postérieures à la latéritisation, mais en nombre réduit, sont marquées par les décalages du profil. Les analyses des mouvements actuels et de la dynamique océanique autour de la Nouvelle-Calédonie [7,11–13] mettent en évidence le rôle modéré de la néotectonique, qui est souligné par une faible sismicité [22].

6. Conclusions

À la structuration héritée de l'ophiolite se superpose une structuration conséquente au phénomène altéritique, qui a été jusqu'à présent largement sous-estimée, voire ignorée. Nous proposons, pour la minéralisation, une origine karstique dans laquelle les fluides jouent un rôle moteur dans la dynamique du milieu. Les fluides interviennent, aussi bien dans les processus d'altération, que dans les phénomènes de bréchification et de fonctionnement des failles. Ces accidents guident l'effondrement gravitaire des produits d'altération, l'enfoncement du karst, et assurent l'évacuation des produits soustraits au massif de péridotite. La prise en compte de cette dimension karstique est à combiner à l'analyse de la répartition géométrique de la minéralisation pour aboutir à une meilleure approche gîtologique.

Remerciements

Cette étude (contribution BRGM n° 3243) a été réalisée dans le cadre du projet PROMET (Processus de métallogenèse) du Bureau de recherches géologiques et minières. Nous remercions la direction de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie de Nouvelle-Calédonie, la société Le Nickel, la Société minière du Sud-Pacifique, les compagnies Falconbridge et INCO, la société minière Georges-Montagnat et la compagnie Ingémines pour leur aide. Ce travail a bénéficié de discussions fructueuses avec D. Cluzel, ainsi que de la relecture de B. Pelletier, d'un relecteur anonyme, et des commentaires de Z. Johan.

Références

[1] J. Aubouin, M. Mattauer, C. Allègre, La couronne ophiolitique péri-australienne : un charriage océanique représentatif des stades précoces de l'évolution alpine, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D 285 (1977) 953–956.

[2] J. Avias, Overthrust structure of the main ultrabasic New Caledonian massives, Tectonophysics 4 (4–6) (1967) 531–541.

[3] J. Avias, Note sur les facteurs contrôlant la genèse et la destruction des gîtes de nickel de la Nouvelle-Calédonie. Importance des facteurs hydrologiques et hydrogéologiques, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D 268 (1969) 244–246.
[4] J. Avias, L'évolution des idées et des connaissances sur la genèse et sur la nature des minerais de nickel, en particulier latéritiques, de leur découverte à nos jours, Bull. BRGM, 2e série, Section II 3 (1978) 165–172.
[5] F. Baltzer, J.-J. Trescases, Première estimation du bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation, sur péridotites, sous le climat tropical de la Nouvelle-Calédonie, C. R. Acad. Sci., Ser. D 273 (22) (1971) 2034–2037.
[6] E. de Chételat, La genèse et l'évolution des gisements de nickel de la Nouvelle-Calédonie, Bull. Soc. géol. France XVII (5) (1947) 105–160.
[7] J. Coudray, Recherches sur le Néogène et le Quaternaire marins de la Nouvelle-Calédonie. Contribution de l'étude sédimentologique à la connaissance de l'histoire géologique post-Eocène de la Nouvelle-Calédonie, in : Expéd. fr. sur les récifs coralliens de la Nouvelle-Calédonie, Paris, Fond. Singer-Polignac, vol. 8, 1976, pp. 1–276.
[8] J. Dubois, J. Launay, J. Récy, Uplift movements in New Caledonia-Loyalty islands area and their plate tectonics interpretation, Tectonophysics 24 (1–2) (1974) 133–150.
[9] J. Garnier, Essai sur la géologie et les ressources minérales de la Nouvelle-Calédonie, Ann. Mines, 6e série XII (1867) 1–92.
[10] E. Glasser, Richesses minérales de la Nouvelle-Calédonie, Dunod, Paris, 1904, 560 p.
[11] H. Gonord, Recherches sur la géologie de la Nouvelle-Calédonie : sa place dans l'ensemble structural du Pacifique Sud-Ouest, thèse, université de Montpellier, 1977, 341 p.
[12] Y. Lafoy, J.-M. Auzende, R. Smith, C. Labails, Évolution géologique post-Pléistocène moyen du domaine lagonaire Néo-Calédonien méridional, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa 330 (2000) 265–272.
[13] Y. Lagabrielle, P. Maurizot, Y. Lafoy, G. Cabioch, B. Pelletier, M. Régnier, D. Chardon, I. Wabete, S. Calmant, Neogene and Quaternary extensional tectonics in southern New Caledonia: insights from onshore fault analysis and offshore seismic data (in press).
[14] M. Latham, Altération et pédogenèse sur roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie, Genèse et évolution des accumulations du fer et de silice en relation avec la formation du modelé, thèse d'État, université de Dijon, Coll. Études et thèse, Orstom, 1985, 331 p.
[15] J. Legueré, Des corrélations entre la tectonique cassante et l'altération supergène des péridotites de Nouvelle-Calédonie, thèse de 3e cycle, université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 1976, 80 p.
[16] O. Orloff, Étude géologique et géomorphologique des massifs d'ultrabasites compris entre Houailou et Canala (Nouvelle-Calédonie), thèse de 3e cycle, Montpellier, 1968, 189 p.
[17] J.-P. Paris, Géologie de la Nouvelle-Calédonie, Mém. BRGM, n° 113, 1981, 278 p.
[18] B. Pelletier, Localisation du nickel dans les minerais garniéritiques de Nouvelle-Calédonie, in : Pétrologie des altérations et des sols ; colloque international du CNRS, Sciences géologiques, Mém. n° 73, 1983, pp. 173–183.
[19] B. Pelletier, Serpentines in nickel silicate ore from New Caledonia, in : E.J. Grimsey, I. Neuss (Eds.), Nickel 96; Mineral to Market, Publication Series, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1996, pp. 197–206.
[20] B. Pelletier, Les minerais de nickel de Nouvelle-Calédonie, Géologues 138 (2003) 30–38.
[21] J.G. Ramsay, The crack-seal mechanism of rock deformation, Nature 284 (1980) 135–139.
[22] M. Regnier, S. Van De Beuque, C. Baldassari, G. Tribot Laspiere, La sismicité du Sud de la Nouvelle-Calédonie : implications structurales, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa 329 (1999) 143–148.
[23] P. Routhier, Étude géologique du versant occidental de la Nouvelle-Calédonie entre le col de Boghen et la pointe d'Arama, Mém. Soc. géol. France, Nouvelle Série 32 (67) (1953) 1–127.
[24] J.-J. Trescases, L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale : formations des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie, Mém. Orstom n° 78, 1975, 259 p.
[25] G. Troly, M. Esterle, B.G. Pelletier, W. Reibell, Nickel oxide deposits in New Caledonia: some factors influencing their formation, in : International Laterite, Symposium AIME, New Orleans, USA, 1978, pp. 85–119.
[26] B. Vigier, Caractère syntectonique des minéralisations nickélifères supergènes de Nouvelle-Calédonie. DEA « Géosystèmes, fonctionnements et ressources », Écoles doctorales « Sciences et Technologie » d'Orléans et « Sciences » de Tours, 2001, 38 p.
[27] A. Wirthmann, Die Reliefentwicklung von Neukaledonien, Deutscher Geographentag. Tagungsbericht und Wiss. Abh., Bochum 8 (1965) 323–335.