HAL open science

Diagnose des dolines de Nouvelle-Calédonie

Nicolas Bargier, Yannick Dominique, Jean-François Humbert, Jean-François Parpet, Gérard Lacroix, Julie Jeanpert, Pierre Genthon, Aline Fare, Myriam Vendé-Leclerc

To cite this version:

Nicolas Bargier, Yannick Dominique, Jean-François Humbert, Jean-François Parpet, Gérard Lacroix, et al.. Diagnose des dolines de Nouvelle-Calédonie. [Rapport de recherche] Programme Dolines. Tome Nickel et Environnement, CNRT Nickel et son environnement. 2018, 137 p. hal-02152037

HAL Id: hal-02152037

https://hal.science/hal-02152037

Submitted on 11 Jun 2019

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

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

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

CNRT "Nickel et son environnement"

Tome Nickel et Environnement

Rapport scientifique

Edition 2018

DIAGNOSE DES DOLINES DE NOUVELLE-CALEDONIE

Rapport Scientifique
2018

DIAGNOSE DES DOLINES DE NOUVELLE-CALEDONIE

RAPPORT FINAL

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

Etude réalisée pour le compte de :

CNRT Nickel et son Environnement

101 Promenade Roger Laroque

98 857 Nouméa Cedex

Nouvelle Calédonie

Dossier suivi par :

France Bailly

Etude réalisée par :

Responsable de l'exécution

Jean-François HUMBERT

Yannick DOMNIQUE

Rédaction et contribution

Nicolas BARGIER, Expert Hydrosystèmes

Yannick DOMINIQUE, Expert Hydrobiologie

Aline FARE, Expert Macrophytes

Gérard LACROIX, Expert Zooplancton

Jean-François PARPET, Expert Macroinvertébrés benthiques

Jean-François HUMBERT, Expert microflore

Julie JEANPERT, Hydrogéologue, SGNC-DIMENC

Myriam Vendé-Leclerc, SGNC-Géomaticienne

Pierre GENTHON, IRD-HSM

Contrôle qualité

Gérard LACROIX, Expert Hydrobiologie

Référencement :

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

BARGIER N. ,DOMINIQUE Y. HUMBERT JF, PARPET JF, LACROIX G., JEANPERT J, GENTHON P., 2017. Diagnose des dolines de Nouvelle-Calédonie. Rapport scientifique final. CNRT « Nickel et son environnement ».109 p.

SOMMAIRE

Sommaire **3**

Sommaire des illustrations **5**

GLOSSAIRE **9**

LISTE DES ABREVIATIONS **12**

1. Eléments de contexte **13**
- **1.1 Contexte général** **13**
- **1.2 Synthèse bibliographique** **14**
  - 1.2.1 Mécanismes de formation des dolines 14
  - 1.2.2 Fonctionnement biologique 18
- **1.3 Rappel des objectifs de cette étude** **19**

2. Typologie des dolines calédoniennes **21**
- **2.1 Méthode de cartographie des dolines** **21**
- **2.2 Cartographie des dolines du Massif du Sud et proposition d'une typologie des dolines** **21**
  - 2.2.1 Analyse cartographique des dolines du Massif du Sud 23
  - 2.2.2 Vers une typologie de dolines 25
  - 2.2.3 Mécanismes possibles de la formation et de l'évolution des dolines 26

3. Caractérisation du fonctionnement physico-chimique et biologique **28**
- **3.1 Matériels et Méthodes mis en œuvre** **28**
  - 3.1.1 Présentation des dolines « ateliers » 28
  - 3.1.2 Fréquence d'échantillonnage et mesures physico-chimiques 31
  - 3.1.3 Echantillonnage et caractérisation biologique des dolines 32
- **3.2 Caractérisation du climat hydro-physico-chimique des dolines** **36**
  - 3.2.1 Variations hydrologiques 36
  - 3.2.2 Caractérisation physico-chimiques des sédiments 43
  - 3.2.3 Caractérisation physico-chimique de la colonne d'eau 45
  - 3.2.4 Analyses chimiques des masses d'eau 63
- **3.3 Caractérisation des communautés microbiennes des dolines** **66**
  - 3.3.1 Evaluation des biomasses chlorophyliennes 66
  - 3.3.2 Composition et structure des communautés phytoplanctoniques des dolines 67
  - 3.3.3 Caractérisation des communautés microbiennes au sein des biofilms des dolines 71
  - 3.3.4 Caractérisation des communautés zooplanctoniques des dolines 73
  - 3.3.5 Conclusions sur cette partie concernant les communautés microbiennes des dolines 77
- **3.4 Composition des communautés de Macrophytes** **79**
- **3.5 Composition des communautés de Macro-invertébrés** **79**
  - 3.5.1 Analyse générale 79
  - 3.5.2 Espèces remarquables typiques des dolines 80
  - 3.5.3 Analyses statistiques et classification des dolines 83
  - 3.5.4 Conclusions sur les communautés Macro benthiques des dolines. 89

4. Synthèse-Conclusions **90**

5. RECOMMANDATIONS pour un suivi sur le long terme des dolines **92**

6. recommandations POUR un suivi allégé des dolines **93**

7. Références Bibliographiques 96

8. Fiches techniques pour le suivi de la qualité physico-chimique et biologique des dolines 99

8.1 Caractérisation physico-chimique de la doline - *Paramètres mesurés sur le terrain (1)* ... 100

8.2 Caractérisation physico-chimique de la doline - *Paramètres mesurés sur le terrain (2)* ... 101

8.3 Caractérisation des communautés planctoniques (1) - Biomasse phyto-planctonique : Concentration en chlorophylle-a 102

***8.4* Caractérisation des communautés planctoniques *(2) - Diversité phyto-planctonique* 103**

***8.5* Caractérisation des communautés planctoniques *(3)* - Diversité zoo-planctonique 104**

***8.6* Caractérisation des communautés benthiques *(1) - Diversité des biofilms* 105**

8.7 Caractérisation des communautés benthiques (1) - Diversité des communautés d'invertébrés benthique 107

9. ANNEXES 108

SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 1. Evolution du modelé des péridotites (Trescases, 1975) 15

Figure 2. Schéma d'une doline d'effondrement (Genna, *et al.*, 2005) 15

Figure 3. Mécanismes de formation des dolines en milieu calcaire, et observations dans les péridotites de Nouvelle-Calédonie 17

Figure 4. Logigramme des traitements réalisés pour la cartographie semi-automatique des dolines (extrait de Jeanpert et al., 2016) 21

Figure 5. Cartes de a) La Grande Terre de la Nouvelle-Calédonie avec les massifs de péridotites en vert; b) Dolines et formations géologiques (Sevin *et al.*, 2012), morphologiques et hydrologiques principales sur le Massif du Sud; c) Linéaments principaux sur fond de carte topographique de levé LiDAR 22

Figure 6. Distribution des paramètres morphologiques : Représentation en histogrammes de fréquence et courbes du nombre cumulé d'objets. a) Rayon équivalent (m). Les dolines les plus grandes pour lesquelle Req > 180 m ne sont pas représentées ; b) Profondeur (m); c) pente moyenne ; d) Coefficient de compacité (Gravélius) ; e) Direction du plus grand axe pour les 5511 dolines de plus de 10 m² ; e) Direction du vecteur reliant le centroïde et le point bas pour les 5511 dolines de plus de 10 m² 23

Figure 7. Densité de dolines calculée par la convolution d'un noyau gaussien de rayon L : a) L= 50 m; b) L= 250 m; c) L = 1000 m. Les principales crêtes topographiques et les principaux creeks sont représentés 24

Figure 8. Alignement de dolines (nombre de dolines sur une bande de 1 km x 20 m) pour le jeu de données réel et synthétique. 24

Figure 9. Cartographie des dolines selon la typologie morphologique : a) zone d'étude. Les dolines d'effondrement et dolines en entonnoir sont légèrement exagérées (tampon de 20 m et 10 m respectivement) pour une meilleure visibilité; b) et c) grossissements autour de la zone du Trou du Tahitien. Extrait de Jeanpert *et al.* (2016) 27

Figure 10. Photographies des principales dolines étudiées en 2013/2014 et 2016 29

Figure 11. Photographie de la doline Pilote prélevée uniquement en Juillet 2016 30

Figure 12. Unités hydrogéologiques présentes dans le profil d'altération du massif du Grand sud (source : Jeanpert, 2010) 36

Figure 13. Localisation des zones de résurgence et d'émergence au niveau du Trou du Tahitien 38

Figure 14. Evolution de la hauteur d'eau au droit du Trou du Tahitien et des cumuls de précipitations estimés dans la zone 39

Figure 15. Evolution de la hauteur d'eau au droit des dolines petite, lac et marécage et des cumuls de précipitations estimés dans la zone 40

Figure 16. Evolution de la hauteur d'eau au droit de la doline croissant et des cumuls mensuels de précipitations estimés dans la zone 41

Figure 17. Evolution de la hauteur d'eau au droit de la doline bleue et des cumuls de précipitations estimés dans la zone 42

Figure 18. Part moyenne des éléments majoritaires constituant les sédiments prélevés dans les dolines Marécage, Petite, Lac et Croissant 43

Figure 19. Profil d'altération des péridotites et composition chimique (pourcentage massique) des horizons de latérite (source : Trescases, 1979, Pelletier *et al*., 2003) 44

Figure 20. Evolution de la température moyenne mensuelle de la colonne d'eau dans les six dolines ayant fait l'objet d'un suivi 45

Figure 21. Evolution des températures moyennes de l'air et de la colonne d'eau dans les six dolines ayant fait l'objet d'un suivi 45

Figure 22. Profils de température mensuels (en °C) 46

Figure 23. Evolution des valeurs moyennes de pH sur toute la colonne d'eau 48

Figure 24. Evolutions des valeurs moyennes mensuelles de pH et des cumuls de précipitations estimés dans la zone d'étude 49

Figure 25. Profils mensuels des valeurs de pH (en unité pH) 50

Figure 26. Evolution des valeurs moyennes de conductivité sur toute la colonne d'eau au droit des dolines bleue, croissant, marécage et Tahitien 51

Figure 27. Evolution des valeurs moyennes de conductivité sur toute la colonne d'eau au droit des dolines petite et lac 51

Figure 28. Profils des valeurs mensuelles de conductivité (en µS/cm) 52

Figure 29. Evolutions des valeurs moyennes de concentration et de saturation en oxygène dissous 54

Figure 30. Profils des valeurs mensuelles de concentration en oxygène dissous (en mg/l) .. 55

Figure 31. Profils des valeurs mensuelles de saturation en oxygène dissous (en %) 56

Figure 32. Evolution des valeurs moyennes de turbidité au droit des dolines bleue, marécage, Tahitien et lac 57

Figure 33. Evolution des valeurs moyennes de turbidité au droit des dolines croissant et petite 57

Figure 34. Profils des valeurs mensuelles de turbidité (en NTU) 58

Figure 35. Evolution des valeurs moyennes du potentiel redox 59

Figure 36. Profils des valeurs mensuelles de potentiel redox (en mV) 60

Figure 37. Teneurs en isotopes stables (‰) mesurées dans les eaux du Massif du Sud (pluie = Station Ancienne Pépinière, Doline du Trou du Tahitien, et eau souterraine = piézomètres) 61

Figure 38. Teneurs en isotopes stables en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau de la doline du Tahitien, en avril et octobre 2013 62

Figure 39. Non-Metric MultiDimentional Analysis réalisée sur l'ensemble des paramètres chimiques mesurés au cours des deux campagnes d'échantillonnage (T= Trou du Tahitien ; B = doline bleue ; P = Petite doline ; M = Doline marécage ; C = Doline croissant ; L = Doline Lac ; -O = Prélèvement d'Octobre ; -J = Prélèvement de Juillet) 66

Figure 40. Variations saisonnières des concentrations en chlorophylle-*a* dans les six sites d'étude 67

Figure 41. Photographies des espèces phytoplanctoniques dominantes dans les dolines de Nouvelle-Calédonie (a et b : Chlorophycées ; c et d : Cyanobactéries filamenteuses ; e et f : Dinoflagellés) 68

Figure 42. Variations temporelles de la composition des communautés phytoplanctoniques des six dolines ayant fait l'objet d'un suivi. 69

Figure 43. Non-Metric Multidimensional Scaling Analysis (NMDS) réalisée sur une matrice de corrélations de Pearson calculée sur les données d'abondances relatives des grands groupes composant les communautés phytoplanctoniques des six dolines étudiées (DM = Doline Marécage ; TT = Trou du Tahitien ; DC = Doline croissant ; toutes les autres dolines se regroupant au centre de la figure ; CX numéro de campagne) 70

Figure 44. Assignation taxonomique au niveau des embranchements et des classes (pour les protéobactéries) des séquences obtenues à partir des ADN extraits des biofilms récoltés dans les dolines de Nouvelle-Calédonie (les pourcentages égaux à zéro correspondent à des groupes renfermant moins de 1 % des séquences obtenues) 71

Figure 45. Analyse en Composante Principale réalisée sur tous les échantillons de biofilms récoltés et séquencés (DL = Doline Lac ; DM = Doline Marécage ; DB = Doline Bleue ; DP = Petite Doline ; DC = Doline croissant ; CX = Numéro de campagne) 73

Figure 46. Photographies des organismes zooplanctoniques les plus couramment observés dans les dolines de Nouvelle-Calédonie (a : Rotifère (Polyarthra sp.) ; b : Chydoridé ; c : Nauplius de copépode ; d et e : Calanoïdes ; f : Cyclopoïde) 74

Figure 47. Variations spatiales et temporelles dans la composition des communautés zooplanctoniques des dolines de Nouvelle-Calédonie 76

Figure 48. Non-Metric Multidimensional Scaling Analysis réalisée sur les données des communautés zooplanctoniques obtenues dans les dolines étudiées (DM : Doline marécage ; DC : Doline croissant ; TT : Trou du tahitien ; DB : Doline bleue : DL : Doline lac ; DP : Petite Doline ; CX : Numéro de campagne ; C16 = campagne de 2016) 77

Figure 49. Composition des principaux groupes du peuplement benthique total récolté au cours des douze campagnes de prélèvements 80

Figure 50. Deux espèces d'Hydroporinae endémiques, adultes (à gauche) et larves (à droite) 81

Figure 51. *Haliplus oberthuri*, un Haliplidae remarquable de Nouvelle Calédonie 82

Figure 52. Photographies de deux genres de Leptoceridae inconnus 83

Figure 53. Résultats de l'AFC conduite à partir des résultats faunistiques d'abondance (transformation log(n+1)) obtenus lors des 12 campagnes d'échantillonnage (n=73 échantillons) 85

Figure 54. Composition moyenne des communautés pour chacune des dolines (a) composition en terme d'abondance relative des grands groupes taxonomiques (%) ; b) composition moyenne en terme de richesse taxonomique (n=12 échantillons pour chacune des dolines à l'exception de Pilote où n=1 échantillon) 87

Figure 55. Distributions des valeurs de la proportion dans le peuplement (a, b) et de la richesse (c, d) des Copépodes (a, c) et en Trichoptères+Diptères+Coléoptères (b, d) 88

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques générales des dolines étudiées 30

Tableau 2. Calendrier du suivi physico-chimique et biologique des six dolines au cours de Février 2013 à Janvier 2014 puis en 2016. (Rappel, une doline supplémentaire, Pilote, a été suivi en 2016) 32

Tableau 3. Résultats des analyses physico-chimiques menées sur les sédiments (valeurs exprimées en ppm) 43

Tableau 4. Teneurs en ions majeurs dans l'eau au droit des six dolines lors des campagnes de Juillet et Octobre 2013 63

Tableau 5. Teneurs en éléments azotés et phosphorés dans l'eau au droit des six dolines lors des campagnes de Juillet et Octobre 2013 64

Tableau 6. Teneurs des éléments métalliques exprimées en mg/l dans l'eau des six dolines lors des campagnes de Juillet et Octobre 2013 65

Tableau 7. Abondances moyennes des différents groupes zooplanctoniques dans chacune des dolines de Nouvelle-Calédonie étudiées 74

Liste des annexes

ANNEXE 1 : Cartographie de la zone d'étude 109

ANNEXE 2 : Résultats des analyses d'eau 111

ANNEXE 3 : Listes faunistiques 116

GLOSSAIRE

Amplicon : Les *amplicons* sont des fragments d'ADN amplifiés par la technique de PCR (Polymerase Chain Reaction) qui permet de faire un grand nombre de copies d'un fragment choisi.

Aquifère : Un *aquifère* désigne une couche de roches perméables suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantité d'eau appréciables. Un aquifère comporte une zone saturée et il peut contenir également une zone non saturée.

Aquitard : Le terme d'*aquitard* s'applique aux formations de faible perméabilité dans lesquelles ne peuvent être soutirées des quantités d'eau importantes par des ouvrages de captage classiques. Les aquitards présentent une forte porosité et ils contiennent donc une réserve en eau importante. Ils sont capables d'assurer la recharge d'un aquifère sous-jacent. Au sein du manteau d'altération des péridotites de Nouvelle Calédonie, les latérites rouges et les saprolites fines (latérites jaunes) sont concernées.

Biofilm : Un *biofilm* est une communauté de microorganismes qui forme généralement une mince couche visqueuse sur une surface naturelle (rocher, plante…) ou artificielle, notamment dans les milieux aquatiques.

Biomasse : La *biomasse* est la masse totale des microorganismes et/ou des organismes vivants dans un écosystème donné. La biomasse peut se référer à la biomasse d'une ou de plusieurs espèces ou à la biomasse de toutes les espèces d'une même communauté. Elle peut être exprimée par unité de surface ou de volume.

Chemocline : La *chemocline* est une zone limite à l'intérieur gradient vertical de concentration chimique d'une masse d'eau qui sépare deux couches d'eau présentant des caractéristiques chimiques différentes.

Chlorophycée : Les *chlorophycées (chlorophyceae)* sont une classe d'algues vertes de la division des *Chlorophyta*. Elles se distinguent des autres microalgues principalement sur la base de leur morphologie.

Cyanobactérie : Les *cyanobactéries* sont des procaryotes de coloration verte, bleue ou rouge capables de faire de la photosynthèse oxygénique. Elles sont également désignées sous les vocables de cyanophytes, cyanophycées ou encore algues bleues. Certaines espèces produisent des toxines dangereuses pour les animaux et l'homme.

Diatomée : Les *diatomées* sont des microalgues monocellulaires brunes du groupe des Chrysophycophytes. Elles se caractérisent par un exosquelette en silice aussi appelé frustule.

Doline : Les dolines sont de petites cuvettes à fond plus ou moins plat. Ce terme de géologie désigne une excavation circulaire pouvant mesurer de dix à plusieurs centaines de mètres de diamètre. Les dolines sont souvent situées dans des régions de relief karstique.

Fourreau : Un *fourreau* désigne et identifie l'enveloppe protéique dont s'entourent certains invertébrés pour leur protection.

Hydrosystème : Un *hydrosystème* est l'ensemble des éléments d'eau courante, d'eau stagnante, semi-aquatiques, terrestres, tant superficiels que souterrains, en relation avec les cours d'eau et connectés entre eux. Le mot hydrosystème est souvent accompagné d'adjectifs qui caractérisent l'espace étudié (ex: hydrosystème fluvial, hydrosystème anthropisé...).

Lapiaz : Le *lapiaz* est une formation superficielle caractéristique du karst, comportant des rainures plus ou moins profondes résultant de la dissolution du calcaire en surface et se présentant en groupements denses

Lavaka : Le terme *lavaka* signifie littéralement trou et est utilisé pour décrire de profondes excavations grossièrement ovoïdes aux parois très abruptes, façonnées dans les altérites de roches cristallines et métamorphiques par des eaux de ruissellement et des sous-écoulements.

Macrobenthos : Le *macrobenthos* est la partie de la faune et de la flore aquatique benthique (zoobenthos et phytobenthos) qui est visible à l'œil nu, s'opposant en cela au microbenthos.

Macroinvertébrés : Les *macroinvertébrés* sont des animaux invertébrés dont la taille est supérieure à 1 mm, à l'exemple des moules, des escargots, des crevettes…

Maxille : Le *maxille* est l'équivalent chez les insectes du maxillaire des vertébrés. Il désigne donc une pièce buccale paire qui est souvent utilisée pour la taxonomie de ce groupe.

Méthode de clustering : Les *méthodes de clustering* sont des approches mathématiques qui permettent de partitionner un ensemble de données en sous-classes (clusters) partageant des caractéristiques communes.

Milieux lentiques et lotiques : Les *milieux lentiques*, aussi nommés écosystèmes lentiques, sont des écosystèmes d'eau douce de surface à circulations nulle ou lente, et dans ce dernier cas souvent multidirectionnelle. Ils comprennent les étangs, les mares, les fossés, les zones humides… Ils s'opposent aux *milieux lotiques* qui se caractérisent par une circulation rapide et unidirectionnelle de l'eau à l'exemple des rivières.

Mixotrophe : Un comportement alimentaire *mixotrophe* traduit la capacité d'un microorganisme de se nourrir aussi bien par autotrophie (production par un organisme de matière organique, par exemple par photosynthèse) que par hétérotrophie (organismes utilisant pour se nourrir des constituants organiques préexistants). Les organismes mixotrophes peuvent être soit des eucaryotes (par ex. des petits flagellés), soit des procaryotes (par ex. des bactéries).

Oligotrophe/Mesotrophe/Eutrophe : Les écosystèmes aquatiques *oligotrophes* sont des écosystèmes pauvres en nutriments minéraux (notamment en phosphore et azote) et en humus. Ils se caractérisent par une production primaire limitée. Ces systèmes s'opposent aux écosystèmes eutrophes qui sont riches en nutriments, alors que les systèmes mésotrophes présentent des concentrations intermédiaires.

Oxycline : L'*oxycline* est une zone limite à l'intérieur gradient vertical de concentration en oxygène d'une masse d'eau qui sépare deux couches d'eau présentant des concentrations différentes

Phytoplancton : Le *phytoplancton* est la partie du plancton (organismes vivant en suspension dans la colonne d'eau) composée d'organismes photosynthétiques ou mixotrophes.

Poljé : Un *poljé* est une dépression karstique ou pseudokarstique fermée de dimension kilométrique ou myriamétrique, à fond plat, rocheux ou remblayé, et à versants raides, généralement parcourue par un cours d'eau.

Résilience : La *résilience écologique* d'un ecosystème et de ses communautés est sa capacité à retrouver un fonctionnement normal après avoir subi une perturbation importante de son environnement.

Spectophotométrie : La *spectrophotométrie* est une technique de détection qui consiste à mesurer l'absorption de la lumière à l'aide un composé chimique présent dans une solution.

L'intensité de l'absorption de la lumière est directement proportionnelle à la concentration du composé et permet de déterminer sa quantité.

Suffosion : La *suffosion* est un processus d'ntraînement hydraulique de matériaux fins pouvant générer des cavités ou conduits souterrains

Système karstique : Un *système karstique* est une région de formation calcaire caractérisée par la prépondérance du drainage souterrain et par le développement d'une topographie originale due à la corrosion de la roche (grottes, gouffres, résurgences, etc.).

Système pseudokarstique : Un *système pseudokarstique* est un système que présente une morphologie/topographie comparable à un système karstique mais dont l'origine est différente de la dissolution d'une roche calcaire par les eaux météoriques. Les péridotites de Nouvelle Calédonie sont considérées comme un système pseudo-karstique.

Zooplancton : Le *zooplancton* est la fraction du plancton (organismes vivant en suspension dans la colonne d'eau) composée d'organismes non photosynthétiques et/ou de nature animale. La plupart de ces organismes sont de taille microscopique, certains pouvant être des larves d'animaux de taille plus importante.

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

ADN : Acide désoxyribonucléique

AFC : Analyse Factorielle des Correspondances

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique

ETM : Elément-trace Métallique

HER : HydroEco Region

NMDS : Non-Metric Multidimensional Scaling Analysis

OTUs : Unité Taxonomique Opérationnelle qui renferme des séquences partageant au moins 96 % d'identité de séquence

PCR : Polymerase Chain Reaction, réaction de polymérisation en chaîne.

1. ELEMENTS DE CONTEXTE

1.1 CONTEXTE GENERAL

La nappe de péridotites qui sont des roches dont on extrait le nickel, occupe un tiers de la surface de la Grande-Terre en Nouvelle Calédonie. Lorsqu'elles sont altérées, les péridotites forment de la latérite successivement jaune puis rouge (L'Huillier *et al*., 2010) qui est riche en oxyde de fer. L'altération de la latérite aboutit parfois à la formation d'une cuirasse sombre, représentative de beaucoup de sols en milieu tropical humide. Les formations de péridotites ont donc donné des sols ferralitiques ferritiques, riches en Fer et Magnésium ; ils sont facilement lessivés par les pluies et sont carencés en éléments tels que le Calcium, le Potassium et le Phosphore (ORSTOM, 1989). Les caractéristiques de ces sols influencent fortement la composition chimique des eaux de surface, qui sont qualifiées dans le Sud de la Nouvelle Calédonie, d'oligotrophes (Marquet *et al*., 2003), mais aussi la végétation qui se développe dans cette région et que l'on appelle le maquis minier.

L'activité minière en Nouvelle Calédonie est une composante essentielle de l'économie locale. Son développement depuis plusieurs siècles et la création récente de nouvelles usines de traitement du minerai posent des problèmes environnementaux. C'est ainsi que la dégradation de la végétation dans les zones exploitées provoque une érosion accrue, la perte d'habitat pour de nombreuses espèces avec comme conséquence la disparition d'espèces endémiques, (L'Huillier *et al*., 2010). L'exploitation du nickel peut par ailleurs entrainer de façon générale une altération de la qualité des eaux de surface par l'augmentation de la charge de matières en suspension et de particules métalliques (Lupankwa *et al.,* 2006). En raison de leur importance patrimoniale et économique, plusieurs études ont été entreprises pour évaluer les effets de cette industrie sur les cours d'eau et la zone lagunaire mais très peu de données sont en revanche disponibles sur l'impact de cette activité sur les écosystèmes aquatiques lentiques : plans d'eau et lacs. Si le Grand-Sud calédonien, inscrit dernièrement sous la convention de Ramsar, concentre l'essentiel des écosystèmes lentiques de l'archipel, les dolines qui sont des plans d'eau de taille modeste, se répartissent sur l'ensemble des massifs ultramafiques du territoire.

Ces dolines sont des dépressions plus ou moins circulaires considérées comme des structures caractéristiques d'un système karstique. Dans le cas classique du karst sur roches calcaire, l'origine des dolines est la dissolution quasi-complète de la roche calcaire initiale. Bien que les massifs ultramafiques calédoniens ne soient pas des formations carbonatées, les conditions d'humidités liées au climat tropical et le degré élevé de fracturation du socle rocheux, sont à l'origine de circulations d'eau souterraines entrainant la mise en place de processus d'altération analogues à ceux observés en milieu karstique. Cependant, l'altération des péridotites produit un résidu représentant 10 à 30% du matériau initial (Fritsch, 2012). Ce matériau caractérisé par son grain fin peut être évacué par l'écoulement pour produire un vide. On parle de soutirage ou de suffosion (Ford & Williams, 2007). Il est à noter que ce mécanisme est aussi connu dans le karst calcaire. Le terme de pseudokarst a été retenu pour décrire ces formations (Trescases, 1975). Le fonctionnement hydrologique au sein des pseudokarsts calédoniens est encore peu connu. En conséquence, le fonctionnement hydrologique des dolines est également peu connu mais il semble que le niveau d'eau de la plupart d'entre-elles subit de fortes variations qui vont jusqu'à l'assèchement temporaire avec des qui cycles restent à déterminer. A priori, l'eau remplissant les dolines semble provenir de la nappe superficielle et des précipitations.

Le fonctionnement biologique de ces milieux est encore moins connu que leur fonctionnement hydrologique, puisque seuls quelques rapports portant sur les invertébrés sont disponibles à ce jour. C'est pourquoi, dans le cadre d'un contrat de recherche financé par le Centre National de Recherche Technologique (CNRT) sur le "Nickel et son

environnement", l'UMR BIOEMCO, désormais *i*EES Paris, associée à une Unité de l'IRD, au Service Géologique de la Nouvelle-Calédonie et aux bureaux d'études Bio eKo Consultants et ASCONIT CONSULTANTS ont pour tâche (i) : de caractériser le fonctionnement hydrogéologique, physico-chimique et biologique de ces plans d'eau et (ii) : de proposer un premier outil de suivi de la qualité de ces milieux.

1.2 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.2.1 MECANISMES DE FORMATION DES DOLINES

Un karst est un ensemble morphologique façonné par la dissolution de roches carbonatées ou sulfatées en contact de l'eau chargée en acide carbonique qui dérive du CO_2 atmosphérique et de l'activité microbienne des sols. Ce processus appelé karstification conduit à la formation de modelés typiques comme les dolines, les cavités, les grottes, les poljés, les lapiaz, les vallées sèches… Il a fait l'objet de nombreuses recherches. Le terme de pseudokarst désigne quant à lui des paysages ou des morphologies similaires aux karsts mais dans des roches peu solubles (granite, gneiss…) et avec des processus de formation différents la dissolution par les eaux météoriques. C'est la présence d'un climat « agressif » comme les climats tropicaux ou équatoriaux, qui accélère les cinétiques d'altération et induit une morphologie pseudokarstique. Les études sur les pseudokarsts sont beaucoup moins abondantes que celles sur les karsts car ces formations sont moins nombreuses que les karsts.

Des pseudokarsts sur roches non calcaires sont cependant observés à travers le monde comme au Venezuela dans des granites (Blancaneaux & Pouyllau, 1977), au Congo dans des grès (Guillot & Peyrot, 1979), au Cameroun dans des micaschistes et des gneiss non carbonatés (Vicat *et al.*, 2002). De même, Willems (2000) a étudié au cours de sa thèse les phénomènes pseudokarstiques en Afrique sahélienne et équatoriale (grès, micaschistes, gneiss et granites) (Willems, 2000). En 2010, Bondu-Crozel & Rey ont réalisé une synthèse des données existantes sur la karstification en zone non sédimentaire, plus précisément sur les péridotites et les granites (Bondu-Crozel & Rey, 2010). D'autres exemples de karsts sur péridotite sont observés en Nouvelle-Calédonie, en Grèce, en Australie, en République dominicaine et à Cuba (Genna *et al.,* 2005). Dans ce cas particulier des péridotites, c'est l'hydrolyse des silicates qui est à la base du processus d'altération, hydrolyse qui s'accompagne d'une part de résidus insolubles qui forment une couverture sur le pseudokarst (Trescases, 1975). Cette couverture est donc d'origine autochtone.

Les dolines intriguent depuis longtemps les chercheurs travaillant sur les karsts et les pseudokarsts et les travaux les concernant sont nombreux. Plusieurs auteurs ont proposé des définitions et des typologies différentes qui se recoupent plus ou moins. C'est ainsi que les dolines peuvent être définies comme des dépressions fermées plus ou moins circulaires pouvant faire quelques mètres à plus d'un kilomètre de diamètre et quelques mètres à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Les dolines vont généralement former un lien entre les réseaux d'eau de surface et d'eau souterraine rendant par la même occasion l'aquifère karstique particulièrement vulnérable (pollutions…).

En Nouvelle-Calédonie, Trescases (1975) explique la morphologie actuelle du Massif du Sud et propose un schéma traduisant l'évolution du modelé des péridotites (Figure 1). Lors de la phase de karstification, il suppose dans un premier temps que l'apparition des dolines est guidée par la fracturation profonde, puis que leurs coalescences se traduit par la formation de dépressions plus vastes. Selon lui, « des circulations souterraines se créent au contact roche saine-roche altérée et le long des failles.». Cette circulation d'eau souterraine dans des fractures entraine un phénomène de soutirage (ou suffosion) des particules fines

du manteau d'altération et engendre des effondrements circulaires en surface comparables aux dolines des karsts calcaires.

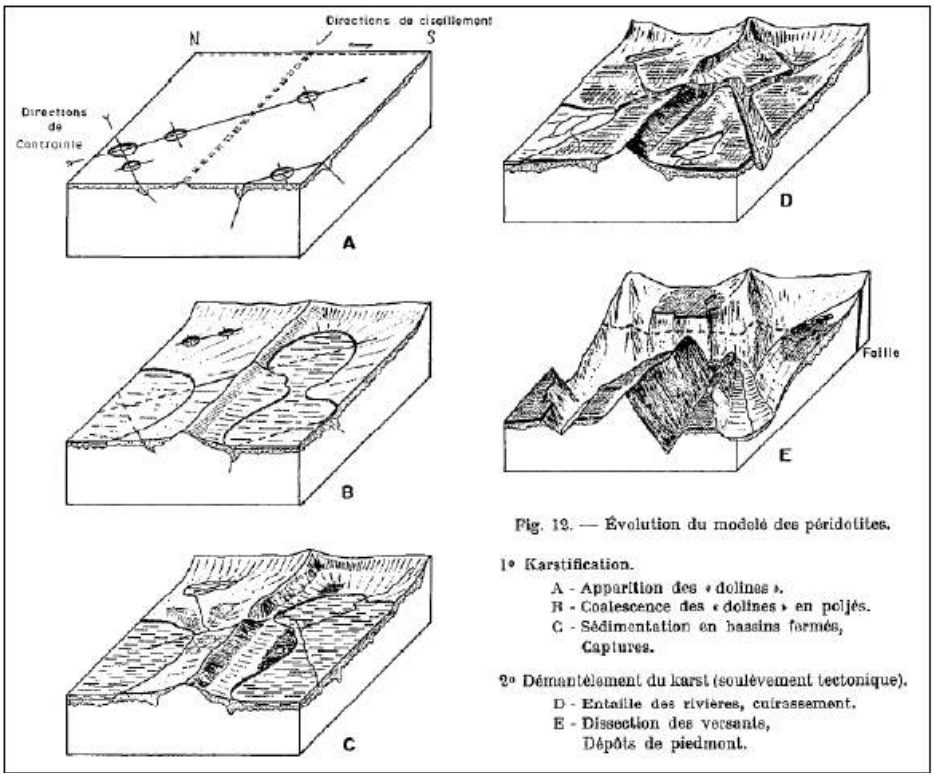


Figure 1. Evolution du modelé des péridotites (Trescases, 1975)

A partir de l'étude de la mine de Thio (Plateau et camp des sapins), Genna *et al.* (2005) proposent un schéma de ces « dolines d'effondrement » (Figure 2). Cependant, aucune mécanismes explicatif d'ensemble n'est proposé (où s'effondre le ploc jaune de la base de la figure 2).

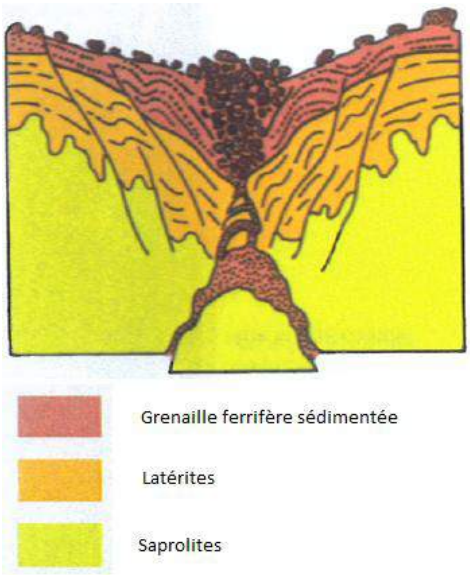


Figure 2. Schéma d'une doline d'effondrement (Genna, *et al.*, 2005)

Plusieurs mécanismes interagissent et sont à l'origine de la formation de cavités et des formes en surface dont les plus répandues sont les dolines (Figure 3).

- La dissolution (solution) résulte de la constitution du milieu en minéraux solubles et est à l'origine de la formation de vides et l'ouverture de joints pré-structurant la roche. La solubilité de la silice dans l'eau est très faible et il faut donc des conditions hydrochimiques particulières mais aussi beaucoup de temps pour la dissoudre (Salomon, 2000). La Figure 3a présente la formation d'une doline de dissolution en milieu calcaire et des indices de dissolution sur les péridotites de Nouvelle-Calédonie. L'ouverture des joints est à l'origine de la formation de conduits karstiques et de cavités karstiques.
- L'effondrement (collapse) de la roche est le mécanisme à l'origine des dolines lorsque la cavité est sub-affleurante. La Figure 3b présente la formation d'une doline en milieu calcaire. Les dolines d'effondrement peuvent également être observées en milieu non calcaire, comme dans un karst sous couverture, dès lors qu'un niveau induré solide recouvre le milieu karstique ou pseudo-karstique contenant des cavités d'une certaine taille. Cependant, si les dolines d'effondrement ont été communément définies comme des objets résultant de l'effondrement d'une cavité, différents processus de perte de matière par les eaux souterraines contribuent à leur développement de même que l'existence d'une zone faillée ou broyée est également un prérequis pour la formation de ces objets. Les dolines d'effondrement sont également appelées aven ou encore fontis, même si ce dernier terme est plutôt réservé au domaine de la géotechnique et peut être utilisé dans le cas où la cavité à l'origine de l'effondrement est d'origine non naturelle.
- La subsidence (subsidence) est un mécanisme beaucoup plus progressif que ne l'est l'effondrement et il concerne principalement des formations de type évaporites (Ford & Williams, 2007). Il correspond à un tassement lent des formations, observé lorsque l'altération est accompagnée d'une perte de volume. Dans le cas des péridotites de Nouvelle-Calédonie, ce tassement peut être lié à la perte de volume associée au phénomène d'altération dont la perte de volume a été estimée entre 10 et 60% (Fritsch *et al*., 2014). La Figure 3c illustre le mécanisme et les effets du tassement lent sur les latérites (Sevin, 2014).
- Enfin, la suffosion correspond à l'entrainement hydraulique des particules fines à l'intérieur des joints pré-structurant la roche. C'est un mécanisme qui dépend de mécanismes chimiques (dissolution des joints) et mécanique (emportement des fines et abrasion de la roche qui favorise l'ouverture de ces joints) et qui est associé à la formation des dolines lorsque le milieu karstique est recouvert d'un niveau de matériaux fins (Mendonça *et al*., 1994). La Figure 3d illustre ce phénomène. Le terme de soutirage est également utilisé pour désigner ce mécanisme. Laganier (1994) évoque par ailleurs ce mécanisme pour expliquer les risques d'instabilité sur les profils de péridotites de la Nouvelle-Calédonie. Il évoque également les formes d'érosion hydrique observées sur les zones de piedmont à l'image des lavakas de Madagascar. La suffosion est d'ailleurs un mécanisme mieux documenté lorsqu'il concerne la formation de ces lavakas (gullies) (Voarintsoa *et al*., 2012 ; Wells & Andriamihaja, 1993).

Dans le contexte calédonien, les mécanismes présentés existent et se combinent mais aujourd'hui bien que les dolines soient nombreuses et observées partout, la connexion avec un réseau karstique souterrain n'est pas démontrée, ce qui explique d'ailleurs que le terme de pseudo-karst est préféré à celui de karst.

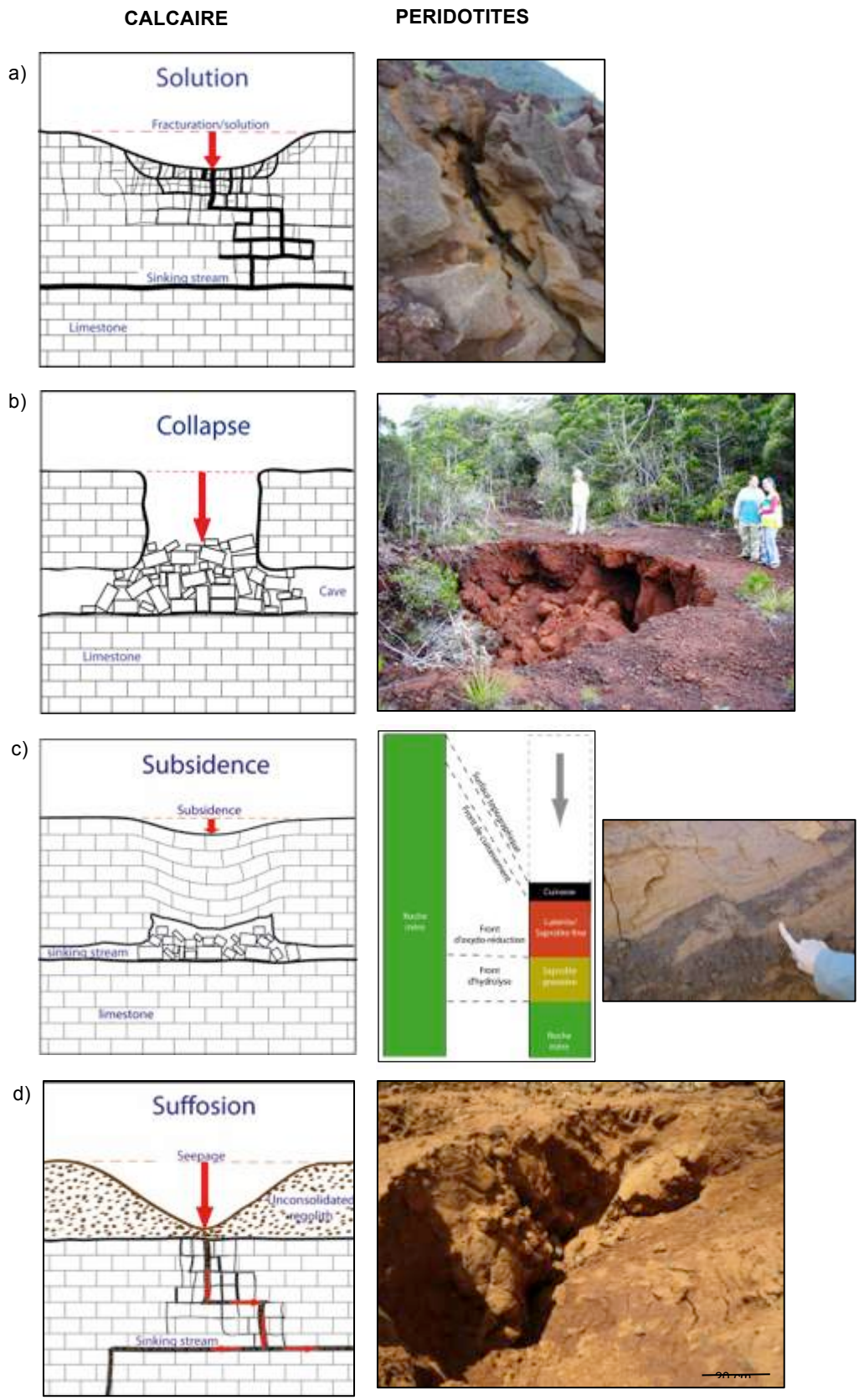


Figure 3. Mécanismes de formation des dolines en milieu calcaire, et observations dans les péridotites de Nouvelle-Calédonie

Il faut souligner en conclusion de cet état de l'art sur la formation des dolines en milieu karstique et pseudokarstique, que lorsque le projet « Diagnose Dolines » a démarré, aucune typologie précise des dolines calédoniennes n'existait.

1.2.2 FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE

Comme nous venons de le voir les processus hydrogéologiques à l'origine de la formation des dolines sont encore mal caractérisés en Nouvelle-Calédonie. Les connaissances ne sont guère plus avancées en ce qui concerne le climat physico-chimique régnant dans ces masses d'eau puisque peu ou pas de données sont disponibles aujourd'hui dans la littérature scientifique. Les dolines pouvant tout aussi bien être le point de recharge des réseaux karstiques souterrains que leur point de décharge, la composition physico-chimique de la masse d'eau est donc lors de la phase de remplissage susceptible d'être influencée à la fois par :

- La chimie des horizons de surface et de sub-surface couvrant le bassin versant de cette dernière,
- La chimie des horizons plus profonds au travers desquels circulent les eaux souterraines qui viennent se décharger dans celle-ci.

Une des interrogations qui se posent encore est de déterminer dans quelles proportions et comment les eaux météoritiques et souterraines influencent la composition physico-chimique de la masse d'eau et donc *in-fine* l'organisation des communautés biologiques se développant au sein de celle-ci.

Concernant les communautés biologiques se développant dans ces milieux humides particuliers, seules les communautés zooplanctoniques et macroinvertébrés ont fait l'objet à ce jour d'inventaires. Ces études faunistiques menées dans les dolines de la région du Grand Sud calédonien (Erbio, 2005; Biotop 2009 et 2010), ont montré que ces milieux humides permanents ou temporaires étaient principalement peuplés par :

- Des macro-invertébrés benthiques :
  - Larves d'insectes volants (Odonates (« libellules »), Coléoptères, Diptères et Trichoptères)
  - Larves de Coléoptères aquatiques ;
  - Vers (nématodes, oligochètes) ;
  - Mollusques gastéropodes ;
- Des macro-invertébrés pélagiques ou de surface :
  - Hétéroptères (punaises aquatiques)
  - Coléoptères aquatiques adultes ;
- Des micro-invertébrés pélagiques :
  - Cladocères (Daphnie) ;
  - Copépodes ;
  - Ostracodes ;
  - Conchostracés

Pour ce qui est des autres composantes biologiques. Les inventaires ichthyologiques menés par Marquet *et al*. (2003), au sein des différents lacs permanents accueillis par les dépressions endoréiques de grande taille formant la Plaine des Lacs dans la région du Grand Sud, ont révélé la présence de plusieurs espèces *d'Anguillidae* de Tilapia et une population de *Galaxias neocaledonicus*, espèce endémique au territoire. En dehors de ces lacs, il apparaît aujourd'hui peu probable que les dolines, dénuées de connexion de surface avec le réseau hydrographique proche, accueillent des communautés ichthyennes.

Comme tous les écosystèmes aquatiques, notamment en conditions oligotrophes, il est probable que la production primaire soit réalisée en partie dans la colonne d'eau par le phytoplancton (microalgues et cyanobactéries) et pour une autre partie à la surface des

sédiments par les microorganismes phytobenthiques au sein de biofilms complexes. Comme dans tous les milieux aquatiques, un recyclage de la matière organique est réalisé par les bactéries et sans doute par des microorganismes mixotrophes.

1.3 RAPPEL DES OBJECTIFS DE CETTE ETUDE

Le programme de recherche avait pour principal objectif d'améliorer les connaissances existantes sur le fonctionnement général de l'écosystème « doline » afin d'identifier les différentes métriques tant physico-chimiques, biologiques mais aussi hydrogéologiques, qui sont susceptibles de fournir des indices simples de l'état de qualité écologique des dolines. Une fois ces métriques identifiées, il s'agissait d'élaborer un premier outil de diagnose afin de proposer aux gestionnaires de la ressources en eau et aux industriels un outil de suivi opérationnel de la qualité écologique de ces milieux. Initialement le projet proposé était donc axé sur :

- Une première étape d'acquisition de connaissances sur le fonctionnement des dolines tant d'un point de vue hydrogéologique, physico-chimique que biologique,
- Une étape d'identification des relations « pressions-réponses » des différentes métriques afin de dégager celles qui répondent le mieux aux objectifs de l'outil de suivi,
- Une étape d'élaboration de l'outil et de test de ce dernier.

En l'absence de gradient de perturbation des dolines, quasiment aucune doline ne subissant aujourd'hui d'altération anthropique marquée sur le territoire calédonien, il n'a donc pas été possible de conduire l'étape 2 telle qu'elle avait été prévue initialement. L'équipe s'est donc attaché à la caractérisation d'un état de référence pour les différents paramètres physico-chimiques et biologiques des dolines afin de fournir un état référentiel qui sera utile pour les futurs suivis de dolines qui seront réalisés en périphérie d'exploitation minière ou pour tout autre aménagement anthropique.

Une première campagne d'échantillonnage réalisée sur quelques dolines au début du programme en novembre 2012 avait révélé que ces milieux semblaient très pauvres en phytoplancton et en zooplancton. En revanche, de nombreuses dolines étaient colonisées par des tapis microbiens très épais, appelés aussi mattes, qui avaient souvent un aspect gélatineux, brun à verdâtre. Les mattes microbiennes sont présentes dans de très nombreux environnements aquatiques et elles peuvent être définies comme des systèmes organo-sédimentaires, disposés en couches (Van Generden, 1993). La diversité bactérienne est souvent très importante en leur sein mais on peut aussi y trouver une communauté complexe d'algues, de champignons et de microfaune (Graba *et al.,* 2013).

Suite à ces premiers résultats, le programme d'échantillonnage suivant a donc été retenu :

- Année 1 (2013/2014) : Surveillance haute fréquence (mensuelle) de six dolines localisées dans le Grand Sud calédonien afin de rechercher s'il existe des fluctuations saisonnières tant physico-chimiques que biologiques dans ces écosystèmes et de déterminer l'ampleur de ces fluctuations.
- Année 2 : Réduction de la fréquence de suivi des six dolines (autant que possible trimestrielle) et extension des suivis aux autres HER si possible (le déroulement a finalement eu lieu en 2016, la fin de l'année 2014 et l'année 2015 ayant été marquées par un épisode de sécheresse important ayant entrainé un maintien à sec des différents objets, notamment ceux identifié sur les massifs du Nord et de la côte Est).

Enfin, la dernière année a été consacrée aux derniers échantillonnages et à l'analyse et traitement des données collectées.

2. TYPOLOGIE DES DOLINES CALEDONIENNES

2.1 METHODE DE CARTOGRAPHIE DES DOLINES

La donnée Lidar transmise par Vale sur le secteur de Goro correspond à un modèle de terrain de pas 1 m x 1 m. La cartographie est réalisée à l'aide du logiciel ArcGis®. La Figure 4 présente les étapes de traitement de la donnée dont le résultat est la détection et la cartographie de 8 601 objets sur la zone d'étude.

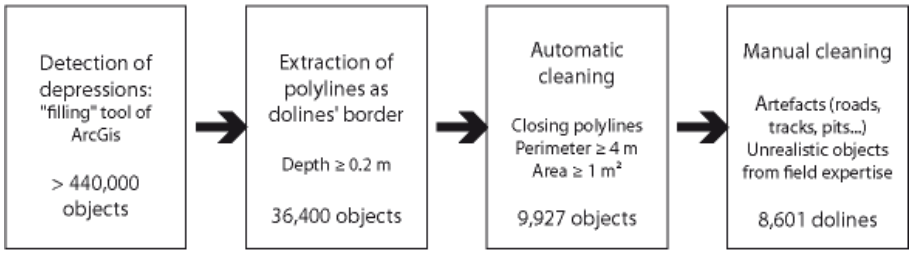


Figure 4. Logigramme des traitements réalisés pour la cartographie semi-automatique des dolines (extrait de Jeanpert et al., 2016)

2.2 CARTOGRAPHIE DES DOLINES DU MASSIF DU SUD ET PROPOSITION D'UNE TYPOLOGIE DES DOLINES

Sur le Massif du Sud, une couverture LiDAR (Light Detection And Ranging) réalisée en 2006 par un contractant pour Vale NC sur un secteur de 11 x 13 km a permis la cartographie semi-automatique de 8601 dolines sur ce secteur. Sont présentés ici les principaux résultats de l'étude qui ont fait l'objet d'une publication dans un journal de rang A (Jeanpert et al., 2016). La Figure 5 présente la zone d'étude, la donnée LIDAR, et les objets cartographiés.

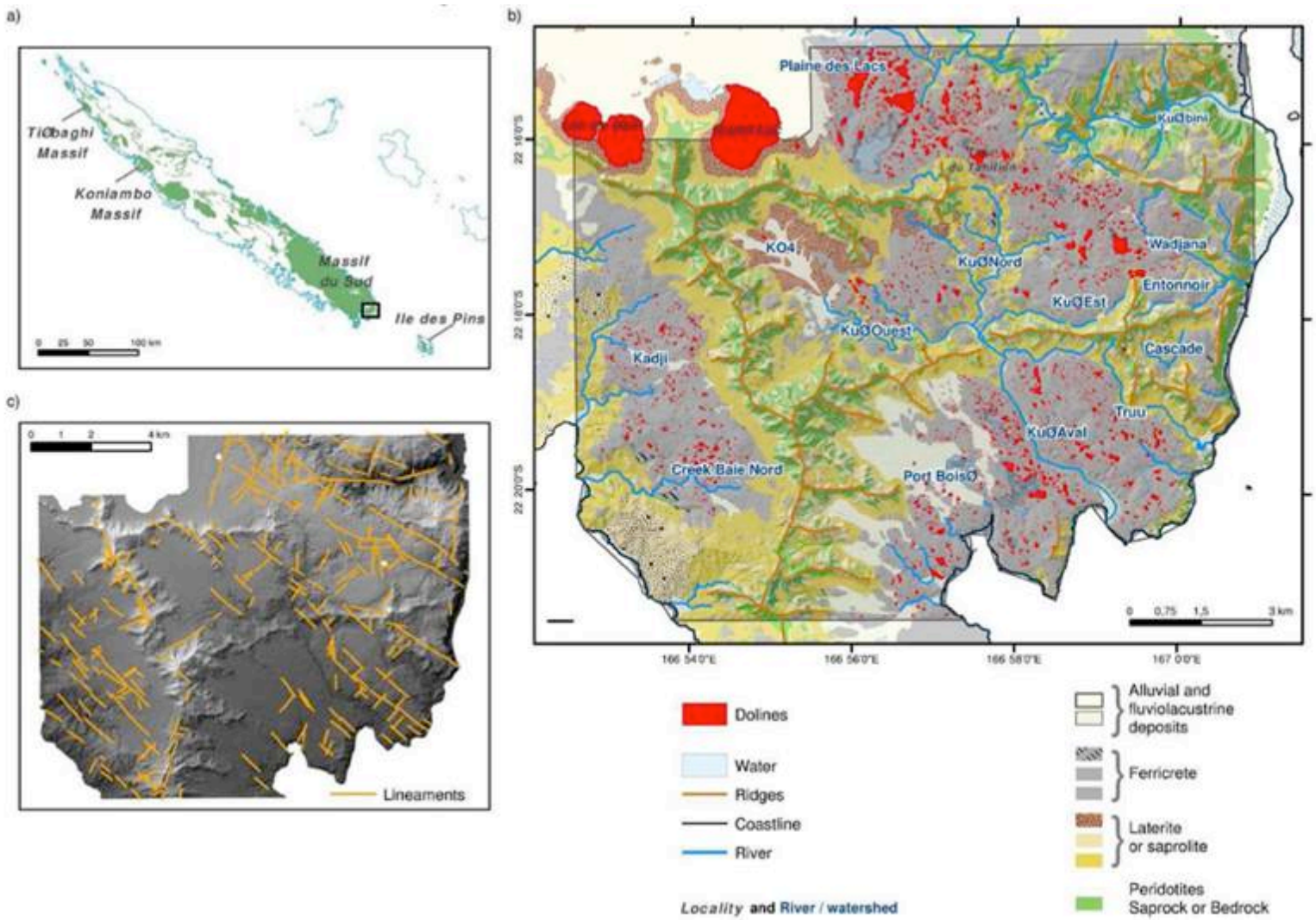


Figure 5. Cartes de a) La Grande Terre de la Nouvelle-Calédonie avec les massifs de péridotites en vert; b) Dolines et formations géologiques (Sevin *et al.*, 2012), morphologiques et hydrologiques principales sur le Massif du Sud; c) Linéaments principaux sur fond de carte topographique de levé LiDAR

2.2.1 ANALYSE CARTOGRAPHIQUE DES DOLINES DU MASSIF DU SUD

La distribution des paramètres morphologiques est présentée sur la Figure 6. L'analyse montre que les objets cartographiés sont principalement de petite taille : pour 80% d'entre eux, Req < 8 m, et la surface de 15% des objets est inférieure à 4 m². La profondeur des objets est inférieure à 4 m pour 97% des dolines cartographiées. Une doline particulière appelée « Trou du Tahitien » s'enfonce sur plus de 25 m.

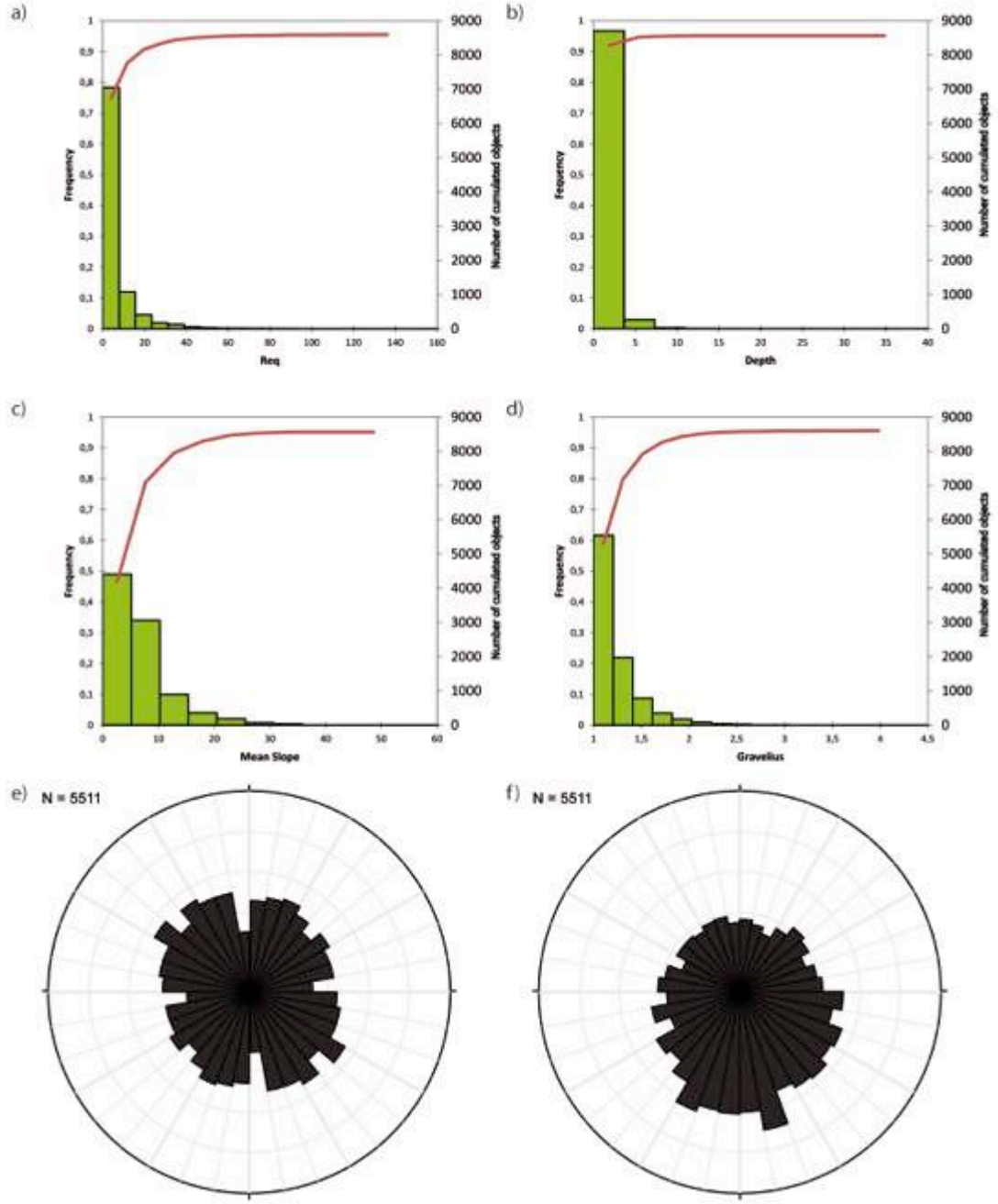


Figure 6. Distribution des paramètres morphologiques : Représentation en histogrammes de fréquence et courbes du nombre cumulé d'objets. a) Rayon équivalent (m). Les dolines les plus grandes pour lesquelle Req > 180 m ne sont pas représentées ; b) Profondeur (m); c) pente moyenne ; d) Coefficient de compacité (Gravélius) ; e) Direction du plus grand axe pour les 5511 dolines de plus de 10 m² ; e) Direction du vecteur reliant le centroïde et le point bas pour les 5511 dolines de plus de 10 m²

Les modèles de densités sont obtenus à plusieurs échelles. A l'échelle de 50 m (Figure 7), la densité maximale atteint 2500 dolines / km². Lorsque le rayon L augmente, des bandes de forte densité sont mises en évidence sur les secteurs de la Plaine des Lacs et Kué aval (se reporter à la Figure 5b pour les localisations).

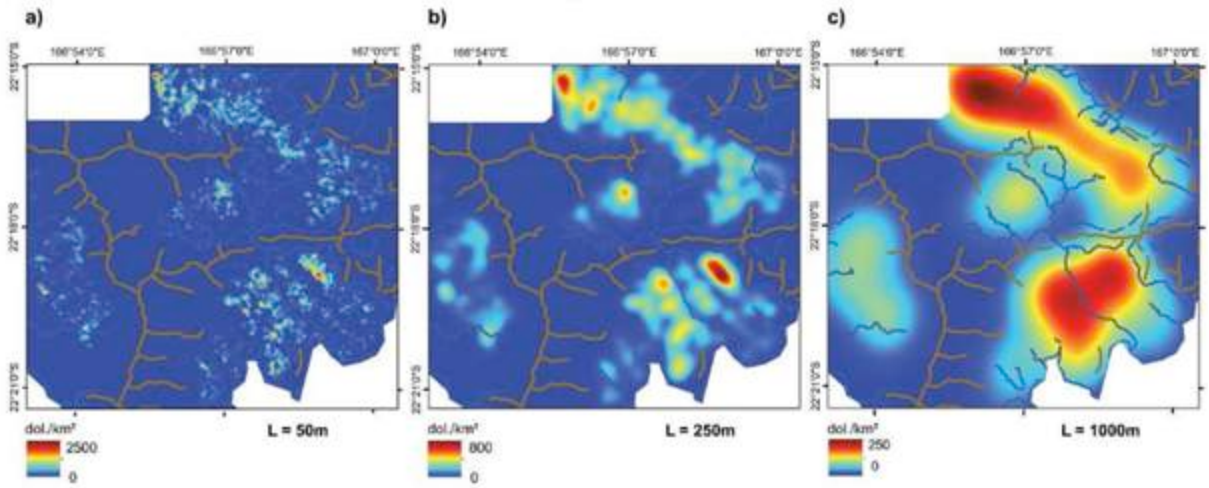


Figure 7. Densité de dolines calculée par la convolution d'un noyau gaussien de rayon L : a) L= 50 m; b) L= 250 m; c) L = 1000 m. Les principales crêtes topographiques et les principaux creeks sont représentés

L'analyse de l'alignement des dolines est réalisée en calculant le nombre d'objets alignés le long de bandes de 20 m de large et de 1 km de long et en le comparant avec le nombre d'objets alignés dans le cas d'un jeu de données synthétiques distribuées aléatoirement mais à partir du modèle de densité réel. La Figure 8 présente les résultats avec un nombre maximum d'objets qui s'alignent selon la direction N 135°.

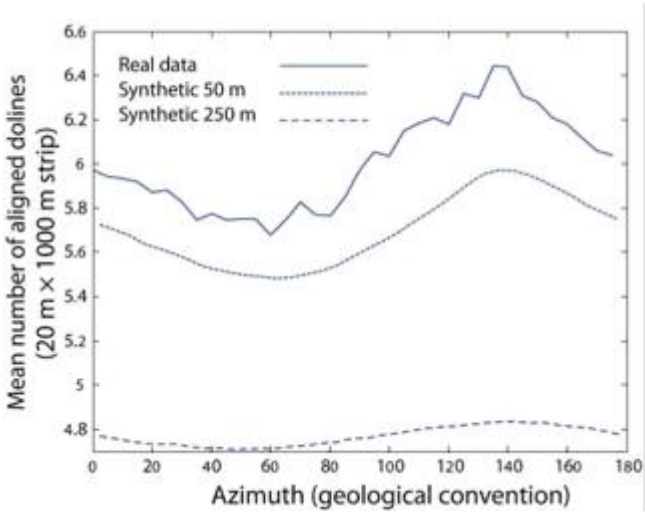


Figure 8. Alignement de dolines (nombre de dolines sur une bande de 1 km x 20 m) pour le jeu de données réel et synthétique.

2.2.1.1 DEPRESSIONS DE PETITE TAILLE

Les objets de taille inférieure à 1 m² ont été automatiquement supprimés lors de la cartographie alors que tous les autres objets ont été inclus dans le jeu de données, y compris les dépressions de taille inférieure à 4 m² (15 % des objets) ou inférieure à 10 m² (35% des objets). L'ACP et les observations de terrain ont confirmé l'existence de ces

dépressions sur blocs de cuirasse. Il est clair que ces objets peuvent être considérés comme des dolines résultant au moins d'un des mécanismes présentés précédemment (Figure 3).

Ces dolines de petite taille, peu profondes et rencontrées exclusivement sur les terrains cuirassés semblent résulter indirectement de la dissolution de la péridotite plus profonde et se former par l'effondrement de la cuirasse suite au tassement des matériaux latéritiques et saprolitiques altérés.

2.2.1.2 DENSITE DE DOLINES

L'étude de la distribution de la taille des dolines a mis en évidence l'existence d'un seuil dans le jeu de données. En effet, les objets de taille supérieure à 20 000 m² s'apparentent aux lacs. Leur forme est complexe et elle résulte de la coalescence de plusieurs objets. L'évolution de leur ligne de côte est également guidée par les mécanismes d'érosion et de sédimentation.

La distribution spatiale des dolines est guidée par l'état d'altération, les dolines n'étant observées que sur la cuirasse. A proximité des creeks, la densité de dolines diminue car les mécanismes d'érosion ont pour effet d'emporter le matériel altéré. L'altitude et la pluviosité (qui sont corrélés) sont également des paramètres important, les plus fortes densités de dolines étant observées aux plus hautes altitudes où les quantités d'eau de pluie infiltrées sont les plus importantes.

2.2.1.3 RELATION ENTRE DOLINES ET FRACTURES

L'analyse de l'alignement des dolines montre une relation claire avec la direction structurale majeure N 130 – 140° observée à l'échelle de la Grande Terre. De plus, la taille de la bande utilisée pour les statistiques permet d'affirmer que les dolines se forment sur 50 m autour des zones de fractures. Les discontinuités existantes dans la péridotite permettent ainsi l'écoulement, l'altération et l'érosion mécanique à l'origine de la formation des dolines.

2.2.2 VERS UNE TYPOLOGIE DE DOLINES

Les observations faites sur le terrain ont permis de définir une typologie des dolines basée sur leur morphologie :

- Les petits objets entourés de parois raides résultent de l'effondrement brutal de la cuirasse et peuvent recouper des pistes qui datent d'une dizaine d'années voire moins. Elles sont appelées **dolines d'effondrement** (*collapse*).
- **Les dolines en cuvette, ou entonnoir** (*bowl-shaped*) présentent une morphologie proche et elles se caractérisent par une plus grande taille et des parois avec des pentes plus douces. On les distingue par leur profondeur qui est faible par rapport à leur largeur.
- **Les dolines à fond plat** (*flat bottom dolines*) sont caractérisées comme indiqué par leur non, par un fond plat et elles sont très souvent remblayées de formations résiduelles. Dans certains cas, la doline peut abriter une petite étendue d'eau.

La coalescence de plusieurs de ces dolines peut former des grands objets de formes complexes. Par ailleurs, Le Trou du Tahitien qui est une doline en cuvette est l'unique objet profond de 25 m dont le fond est ouvert sur la péridotite lapiazée. Cette doline présente des variations piézométriques très rapides.

A partir de ces observations une cartographie des objets est réalisée selon la typologie morphométrique définie (Figure 9).

2.2.3 MECANISMES POSSIBLES DE LA FORMATION ET DE L'EVOLUTION DES DOLINES

La formation des dolines requiert l'effondrement de la cuirasse en surface. Sous l'effet du tassement ou de l'emportement des fines les mécanismes peuvent se combiner pour former des dépressions fermées, les dolines. Les mécanismes liés à l'agrandissement des dolines sont encore confus puisque l'érosion mécanique accompagnant la suffosion est en compétition avec le colmatage liée aux matériaux fins et peu perméables. Les dolines en cuvette ou les dolines dites d'effondrement peuvent, selon leur profondeur, être connectées à l'hydrosystème actuel. Au contraire les dolines à fond plat de grande taille sont clairement déconnectées de l'hydrosystème profond et se comportent plutôt comme des lacs. L'évolution des petits objets à fond plat est quant à elle difficile à prévoir, puisqu'il peut être envisagé qu'ils s'approfondissent sous l'effet de drainage ou qu'ils se comblent par sédimentation. L'unique exemple hydrodynamiquement actif connu est le Trou du Tahitien. Sa morphologie et sa position révèle l'intersection de deux structures majeures orientées NS et EO à l'origine du drainage sous la doline.

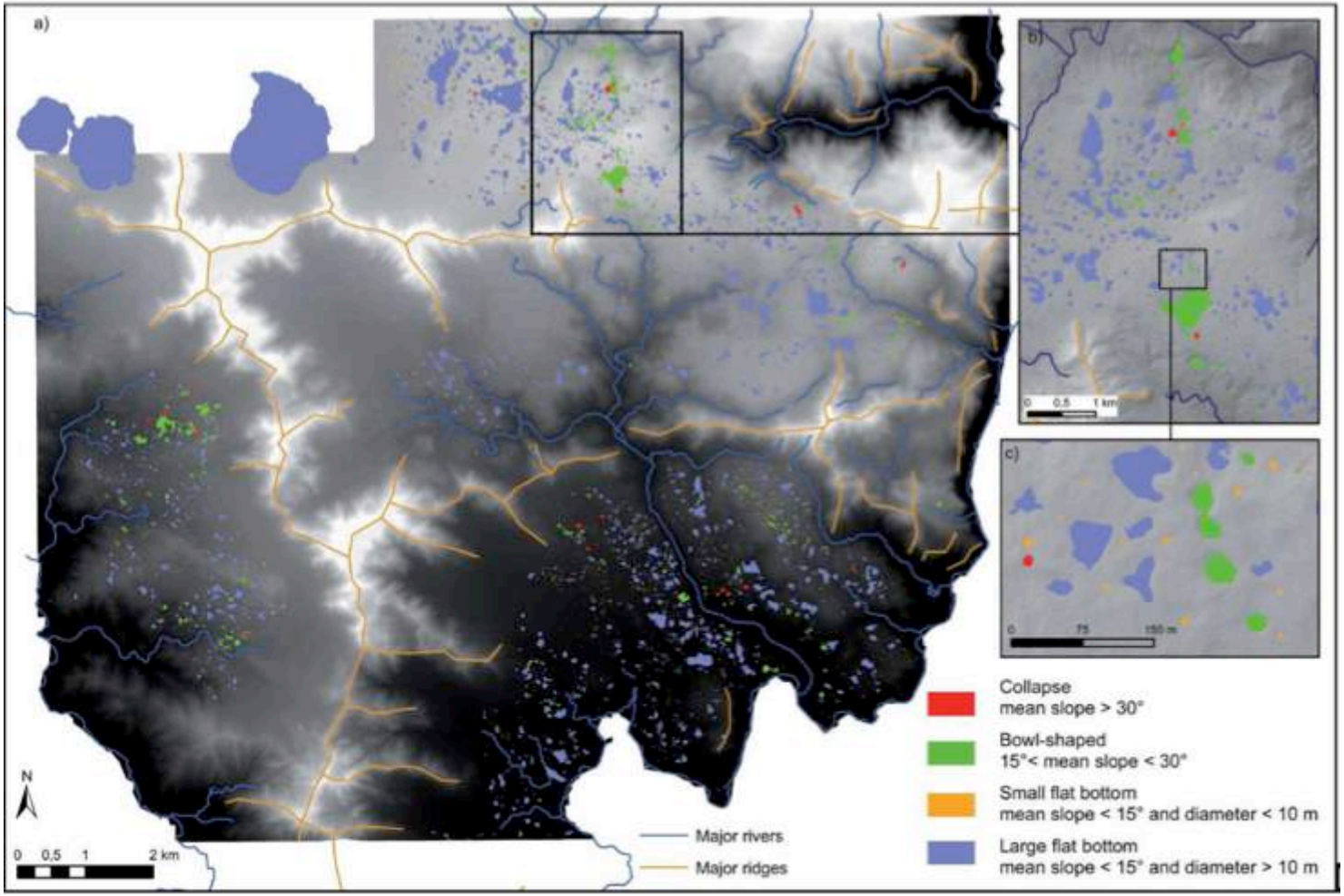


Figure 9. Cartographie des dolines selon la typologie morphologique : a) zone d'étude. Les dolines d'effondrement et dolines en entonnoir sont légèrement exagérées (tampon de 20 m et 10 m respectivement) pour une meilleure visibilité; b) et c) grossissements autour de la zone du Trou du Tahitien. Extrait de Jeanpert *et al.* (2016)

3. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT PHYSICO-CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE

3.1 MATERIELS ET METHODES MIS EN ŒUVRE

3.1.1 PRESENTATION DES DOLINES « ATELIERS »

Six dolines du Grand-Sud ont été échantillonnées dans une zone qui s'étend sur environ 50 km² dans la Plaine des Lacs, sur la pointe sud de la Nouvelle-Calédonie (cartes de localisation en Annexe 1). Ces six dolines ont été étudiées lors de 11 campagnes de prélèvements réalisées de Février 2013 à Janvier 2014. Parmi ces dolines, quatre étaient de type « Fond Plat», une de type « cuvette » et une de type « effondrement» :

- Le « Trou du tahitien » qui est la plus profonde des six dolines, présente une connexion avec le socle rocheux sous-jacent (Figure 7a.) Il s'agit d'une doline en cuvette.
- La doline bleue, située à quelques centaines de mètres est la plus petite (Figure 7b.). C'est une doline de type effondrement.
- La doline croissant (Figure 7d.) qui est située plus au nord, le long d'une piste minière est une doline de type fond plat. De même, les dolines marécage (Figure 7c.), lac (Figure. 7e.) et petite doline (Figure. 7f.) sont aussi des dolines de type fond plat.

Une septième doline, la doline Pilote a été étudiée uniquement en juillet 2016 (Figure 8) (voir partie 2.3.2. ci-après). Il s'agit d'une doline à fond plat.

Figure 10. Photographies des principales dolines étudiées en 2013/2014 et 2016
a. Trou du Tahitien, b. Doline bleue, c. Doline marécage, d. Doline croissant, e. Doline lac, f. Petite doline.

Figure 11. Photographie de la doline Pilote prélevée uniquement en Juillet 2016

Les principales caractéristiques typologiques de ces dolines sont résumées dans le Tableau 1 ainsi que leur proximité des sites d'extraction et de traitement du minerai.

Tableau 1. Caractéristiques générales des dolines étudiées

	Trou du Tahitien	**Doline Bleue**	**Doline Lac**	**Petite Doline**	**Doline Marécage**	**Doline Croissant**	**Doline Pilote**
Typologie actuelle	Doline en cuvette	Doline effondrement	Doline à fond plat	Doline à fond plat	Doline à fond plat	Doline à fond plat	Doline en à fond plat
Coordonnées (WGS84)	166.95909/ -22.26952	166.95950/ -22.27306	166.98792/ -22.28642	166.99170/ -22.28742	166.94937/ -22.26116	166.95402/ -22.26307	166,90487/ -22,33681
Surface (m²)	12888	250	81900	4872	1050	1650	1418
Profondeur max.(m)	35	6	1,5	1,5	1.1	6	6,2
Proximité actuelle de la zone minière (km)	2,4	2	1,5	1,4	3,8	3,5	7,5
Proximité de l'usine de traitement (km)	7,6	7,2	8,5	8,6	7,9	7,8	0,3
Temporalité	temporaire	temporaire	permanente	temporaire	permanente	temporaire	permanente
Substrat dominant	latérite fine	blocs de cuirasse	latérite fine et graviers de latérite	latérite fine et graviers de latérite	graviers de latérite	latérite fine et graviers de latérite	NC
Présence de biofilms	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Hydrophytes (% de recouvrement du fond)	-	20	5	5	5	60	NC
Hélophytes (% de recouvrement du fond)	0	5	15	10	20	10	NC

3.1.2 FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE ET MESURES PHYSICO-CHIMIQUES

Au total, 11 campagnes d'échantillonnage ont été réalisées sur les six dolines suivies, à raisons de dix au cours de l'année 2013 et une en début d'année 2014 ce qui permettait de couvrir une année complète. Au cours de chacune d'elles, des mesures physico-chimiques ont été réalisées *in situ*, à l'endroit estimé le plus profond de la doline. Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés à différentes profondeurs à l'aide d'une sonde multi-paramètres (QUANTA) qui fournit des estimations pour la température, le pH, la conductivité, le potentiel d'oxydoréduction, la turbidité, la concentration en oxygène dissous et la saturation en oxygène. Une dernière campagne de prélèvements, numérotée 12, a eu lieu en 2016 entre Mai et Juillet lorsque les conditions climatiques les permettaient. Il est important de noter que l'ile de Nouvelle Calédonie a subi six mois consécutifs de sécheresse qui ont précédé ces prélèvements jusqu'en Février 2016 (Bulletin Climatique Mensuel de Nouvelle-Calédonie, Février 2016, Météo France). Par ailleurs, deux séries de prélèvements supplémentaires ont été réalisées à plusieurs profondeurs en avril et octobre 2013 sur le Trou du Tahitien. Ces campagnes ont eu lieu en hautes et basses eaux, respectivement et elles avaient pour but de mesurer les isotopes stables de l'eau, oxygène-18 (^{18}O) et deutérium (^{2}H).

A ces prélèvements réalisés sur les six dolines a été ajouté en 2016 un échantillonnage supplémentaire sur la doline Pilote qui est située à quelques centaines de mètres à l'ouest de l'usine « Pilote » de Vale NC, usine dont elle tire le nom (voir carte en annexe). Cette usine a déversé les surnageants des bassins de sédimentation (effluents de l'extraction du nickel en milieu acide) dans cette doline de Février 2000 à juin 2002 et une étude d'impact avait été menée jusqu'en 2004 (Bargier & Pöllabauer, 2004). L'ajout de cette doline dans notre programme de suivi avait pour but de pouvoir disposer d'un site connu pour être impacté par l'activité minière. Cette doline qui a une profondeur équivalente aux dolines Bleue et Croissant, possède la particularité d'être en eau en permanence que ce soit durant l'été austral ou la période sèche. En raison d'une panne de la sonde multiparamètres lors des prélèvements, il n'existe aucune mesure physico-chimique pour cette dernière doline.

Enfin, plusieurs campagnes de prospection ont été réalisées en 2016 et 2017. C'est ainsi que la doline située sur le plateau de Tia, entre Pouembout et Népoui a également été prospectée en juin 2016. La doline était à sec lors de la prospection et aucun prélèvement n'a pu être réalisé (cf. annexe 4). De même, huit dolines du plateau de Thiebaghi ont été prospectées en octobre 2017. Sur ces 8 dolines, deux n'étaient pas accessibles en raison de l'exploitation minière et les six autres étaient à sec (cf. annexe 4) ; aucun prélèvement n'a pu donc être réalisé.

Le tableau ci-dessous détaille les dates de campagnes, ainsi que les mesures et prélèvements réalisés tout au long de l'étude.

Tableau 2. Calendrier du suivi physico-chimique et biologique des six dolines au cours de Février 2013 à Janvier 2014 puis en 2016. (Rappel, une doline supplémentaire, Pilote, a été suivi en 2016)

Numéro campagne	Date	Mesures physico-chimiques *in situ*	Prélèvements biologiques	Prélèvement eau	Prélèvement sédiment
1	Février 2013	X	X		
2	Mars	X	X		
3	Avril/Mai	X	X		
4	Juin	X	X		
5	Juillet	X	X	X	X
6	Août	X	X		
7	Septembre	X	X		
8	Octobre	X	X	X	
9	Novembre	X	X		
10	Décembre	X	X		
11	Janvier 2014	X	X		
12	Mai/Jul 2016	X	X		

3.1.3 ECHANTILLONNAGE ET CARACTERISATION BIOLOGIQUE DES DOLINES

3.1.3.1 ESTIMATION DES CONCENTRATIONS EN CHLOROPHYLLE-A

La biomasse de phytoplancton a été estimée par dosage de la chlorophylle-*a* après filtration et extraction des pigments.

- *PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS ET FILTRATION*

Trois échantillons de 10 litres d'eau ont été prélevés à 50 cm de profondeur en trois endroits de la doline. Après mélange de ces trois prélèvements, les microorganismes ont été concentrés sur un filtre Whatman (catégorie GF/C-1.2 µm) à l'aide d'une pompe à air manuelle (NALGENE). Le volume filtré variait en fonction du colmatage du filtre lors de la filtration. Le filtre était ensuite placé dans un tube de 15ml puis conservé au congélateur jusqu'à l'extraction de la chlorophylle-*a*.

- *DOSAGE DES PIGMENTS CHLOROPHYLLIENS*

Dix millilitres de méthanol 90% ont été ajoutés dans chaque tube contenant les filtres congelés. Après agitation, les échantillons ont été placés 24 h au réfrigérateur à 4°C pour permettre l'extraction des pigments. Les tubes ont ensuite été centrifugés (10min, 4000 rpm) pour concentrer les particules et la chlorophylle-*a* a été estimée dans le surnageant à l'aide d'un spectrophotomètre (Specord 205, Analytik Jena). Les mesures ont été effectuées aux longueurs d'ondes de 665 nm et 750 nm.

La concentration des différents pigments chlorophylliens a ensuite été calculée selon cette équation : Chlorophylle-*a* (µg/l) = [(DO665nm – DO750nm) x Ve/Vf x 1] x 13,9.

- *ECHANTILLONNAGE ET ETUDE DE LA FRACTION PLANCTONIQUE*

Le phytoplancton a été récupéré à l'aide d'un trait de filet réalisé à la surface du plan d'eau. Les échantillons récoltés ont été fixés au formol avec une concentration finale de 4%. Un examen au microscope a permis ensuite de décrire les communautés phytoplanctoniques.

Le **zooplancton** a été prélevé à l'aide d'une trappe, dite trappe de Schindler, de 12 L de volume. Le fond et la partie supérieure de cette trappe de forme cubique s'ouvrent largement au moment de la descente de l'engin dans la colonne d'eau et se referment au moment de la remontée, emprisonnant 12 litres d'eau à la profondeur souhaitée. Lorsque la trappe est sortie de l'eau, l'eau et les microorganismes présents dans l'eau échantillonnée s'écoulent dans un manchon latéral en filet de 50 µm de vide de maille. Ce manchon, terminé par un petit collecteur avec un robinet, permet de concentrer et de récupérer l'ensemble des particules (dont le zooplancton) retenues sur la soie de 50 µm. La trappe a été descendue en trois points dans chaque doline. Entre chaque prélèvement, le zooplancton a été concentré sur un filtre de 50 µm de vide de maille. Les organismes zooplanctoniques présents dans les 36 litres d'eau ont été regroupés en un seul échantillon global puis fixés avec du formol (concentration finale 4%). Au laboratoire, ils ont été dénombrés à la loupe binoculaire par grands groupes taxonomiques (Microcrustacés Copépodes et Cladocères) ou par genres (Rotifères), et isolés en vue de déterminations ultérieures au niveau spécifique avec des spécialistes de la taxonomie du zooplancton.

- *ECHANTILLONNAGE DES BIOFILMS*

Dans un premier temps, des mesures de biomasse ont été effectuées sur trois biofilms par doline à l'aide d'une Benthotorch© (bbe Moldaenke GmbH). La BenthoTorch permet de quantifier les algues vertes, les cyanobactéries et les diatomées en donnant pour chaque classe une valeur de biomasse exprimée en µg-chl-*a* cm^{-2}.

Juste après la mesure de biomasse, deux échantillons de biofilms ont été prélevés à quelques centimètres de l'endroit où celle-ci était réalisée. Le premier servira au séquençage d'un fragment du gène codant l'ARN ribosomique 16S et le second à une éventuelle observation au microscope. L'échantillon destiné au séquençage est placé à -20°C jusqu'à son extraction alors que celui pour l'examen microscopique est formolé à 4%.

- *ECHANTILLONNAGE DE LA FAUNE DES MACRO-INVERTEBREE BENTHIQUE*

Les macro-invertébrés ont également été prélevés le long de trois transects, avec deux points par transect, à l'aide d'un filet surber couvrant une surface unitaire de 1/20 de m^2.

Le principe de l'échantillonnage consiste à prélever la macrofaune benthique dont les dimensions sont supérieures à 250 µm. Ce sont donc six prélèvements qui ont été réalisés par doline et transférés dans des pots PEHD de 250 ml ou 500 ml. Chacun d'entre eux a été ensuite fixé à l'alcool dénaturé à 95%.

Chaque bocal après son identification (n° unique pour la traçabilité) est délicatement vidé dans un tamis de maille 250 µm afin d'être rincé et débarrassé de l'alcool qu'il contient ; une attention particulière est portée afin que tous les organismes présents dans le bocal soient transférés sans dommage sur le tamis. Cette opération se déroule dans une pièce prévue à cet effet, sous une Sorbonne afin de garantir le confort des opérateurs et la conformité avec les règles élémentaires de la Médecine du travail relatives à la manipulation des produits chimiques dangereux. Les produits du rinçage (eaux de rinçage, alcool

résiduel,…) font l'objet d'une récupération et d'une évacuation spécifique par un organisme spécialisé.

Si de gros débris sont encore présents, le contenu du tamis est déposé sur un banc de tamis (5 mm, 2mm, 1mm, 500 µm) et rincé avec précautions. Chaque tamis est observé sous une loupe éclairante afin que les gros débris puissent être évacués sans risque de perte des organismes. Les plus gros spécimens de macro-invertébrés visibles à ce stade sont transférés dans un verre de montre identifié (n° ID unique) pour leur détermination taxinomique future.

En l'absence de gros débris, le contenu du tamis est transféré directement vers un bac de tri avec toutes les précautions nécessaires afin d'éviter toute perte ou tout dommage des organismes.

Un "pré-tri" est ensuite effectué sous la loupe binoculaire jusqu'à un niveau de détermination où aucun risque de confusion n'est possible (famille, phylum, classe selon les *taxa* considérés). Les différents organismes ainsi identifiés sont comptabilisés et conservés dans un tube plastique avec une solution d'alcool à 70 %. Une étiquette est introduite dans chaque tube sur laquelle figureront le n° ID unique, la famille (ou phylum ou classe) et le nombre d'organismes présents.

En cas de doute ou de difficultés d'indentification taxinomique, des experts universitaires ont été sollicités, notamment :

Christer Nilsson, Landscape Ecology Group, Department of Ecology and Environmental Science, Umeå University, Umeå, Sweden.

Mickael Blake, Zoological State Collection, Munich, Germany.

Lars Hendrich, Department of Entomology, Zoologische Staatssammlung München Munich, Germany.

- *APPROCHES MOLECULAIRES POUR CARACTERISER LES COMMUNAUTES MICROBIENNES DES BIOFILMS*

Après une étude initiale sur quelques prélèvements réalisée par une approche de clonage-séquençage (Haouet, 2013), nous avons mis en place une approche de séquençage à haut débit (Illumina) sur l'ensemble des prélèvements de biofilms après amplification d'un fragment du gène de l'ARN 16S.

- *EXTRACTION DES ACIDES NUCLEIQUES ET QUANTIFICATION*

Le processus d'extraction combine des méthodes physiques, chimiques et enzymatiques afin de lyser les parois microbiennes et de libérer le contenu cellulaire dans le but d'obtenir de l'ADN pur. L'extraction a été réalisée en utilisant le « Fast DNA spin kit for soil » (MP Biomedicals). Pour chaque biofilm, 0,50 à 0,70 g ont été introduits dans des tubes avec 1,1 ml de tampon de lyse (40 mM EDTA, 50 mM Tris –HCL, 0.75 M sucrose).

Ces tubes ont ensuite été placés dans un FastPrep (MP Biomedicals, FastPrep®-24 Instrument) qui, par agitation mécanique, va améliorer la lyse des parois cellulaires (30 secondes à 6,5 m.s-1 répété une fois). Suite à cette première étape, 47 µl de lysozyme ont été ajoutés à chaque tube. Après 45 minutes dans une étuve thermostatée à 37°C, une déprotéinisation a été réalisée en rajoutant du SDS 10% (75µl) et de la protéinase K (10 µl, ThermoScientific). Après une heure et demie de bain marie à 55°C et 5 minutes de

centrifugation (13200 tours/min, 4°C), une étape de purification au Phénol-Chloroforme a été réalisée.

Le surnageant a été traité par ajout d'un volume égal de chloroforme-isoamyl alcool (25:24:1, pH 8) puis par centrifugation (13200 tours/min, 4°C, 5 minutes). Un volume égal de chloroforme (24 :1) est alors ajouté au surnageant recueilli avant une nouvelle centrifugation. Les acides nucléiques ainsi purifiés vont être précipités par l'ajout d'acétate de sodium (3M, pH 5.2) à un volume égal à 10% du volume récupéré et par l'ajout d'isopropanol froid à un volume égal à 60% du surnageant.

Les échantillons sont ensuite entreposés une nuit à -20°C puis centrifugés à 15 000g pendant 30 minutes à 4°C. Le culot est rincé avec de l'éthanol 80% et suite à une dernière centrifugation, il est mis à sécher 10 minutes au CentriVap Concentrator (Labconco). Ce culot est ensuite repris dans 100 µl d'eau ultra-pure puis conservés à -20°C.

Les concentrations en ADN total ont été mesurées par spectophotométrie (Nanodrop 1000, Thermo Fisher Scientific Inc, EU) en déterminant l'absorbance à 260 nm.

- *AMPLIFICATION PAR PCR DU GENE CODANT L'ARNR 16S*

À partir des échantillons dilués contenant l'ADN extrait, le gène codant l'ARN ribosomique 16S a été amplifié par PCR (*Polymerase Chain Reaction*). Les amorces utilisées pour cette PCR sont la 357F (CCTACGGGAGGCAGCAG) et la 907R (CCGTCAATTCCTTTRAGTTT) qui sont des amorces universelles pouvant permettre, en théorie, l'amplification de ce gène chez toutes les bactéries (Schauer *et al.,* 2003)

Les amplifications PCR ont été effectuées dans des volumes de 50 µl, contenant 2 µl d'ADN (30 ng/µl), 5 µl de tampon de la *Taq* polymérase (Dream Taq Buffer Thermo Scientific), 1 µl de BSA (sérum bovin d'albumine, Sigma, 0.5 mg/ml), 1 µl de $MgCl_2$ (50 mM), 1 µl de dNTP (10 mM), 1 µl pour chacune des amorces (10µM), 0.5 µl de *Taq* polymérase (Dream Taq DNA Polymerase Thermo Scientific). La réaction PCR a été réalisée dans un thermocycleur DNA Engine Biorad, selon ces conditions : 10 min. à 95°C ; 30 cycles de 30 sec. à 95°C, 30 sec. à 55°C et 1 min. à 72°C ; 10 min. à 72°C. La taille attendue des amplicons a été vérifiée par une électrophorèse sur gel d'agarose 1%.

- *APPROCHE DE SEQUENÇAGE A HAUT-DEBIT (ILLUMINA MISEQ)*

Les amplicons obtenus par PCR ont été directement séquencés par une approche de séquençage à haut-débit qui a été réalisé par la société Research and Testing Laboratory aux USA. Brièvement, les séquences amplifiées pour chaque échantillon ont été taguées (un tag différent par échantillon de biofilm) avant de réaliser un mélange équimolaire de tous les amplicons. Après séquençage de ce mélange, les séquences obtenues pour chaque échantillon sont triées grâce à leur tag puis elles passent ensuite dans un pipeline de traitement des séquences qui comportent plusieurs étapes. Brièvement, dans un premier temps, les séquences font l'objet d'une analyse de qualité destinée à éliminer celles qui ne répondent pas aux critères standards de qualité. Dans un second temps, les séquences sont regroupées par Unité Taxonomique Opérationnelle (OTU) et une analyse de chimères est pratiquée sur ces OTUs afin d'éliminer les séquences artéfactuelles que la PCR génère parfois. Enfin, une assignation taxonomique est obtenue pour chacune de ces OTUs.

3.2 CARACTERISATION DU CLIMAT HYDRO-PHYSICO-CHIMIQUE DES DOLINES

3.2.1 VARIATIONS HYDROLOGIQUES

Le fonctionnement hydrologique des dolines est à l'heure actuelle peu connu. L'une des interrogations qui se pose est de savoir dans quelle proportion et comment les eaux météoritiques et souterraines influencent la physico-chimie de ces masses d'eau.

Les études de terrain menées par Golder Associates (2008) ainsi que celle effectuée au sein du projet CNRT HyperK, récemment synthétisées dans la thèse de Julie Jeanpert (Jeanpert, 2017), ont permis de mettre en évidence trois unités hydrogéologiques au sein du massif du Sud (c.f. Figure 12) : un aquifère superficiel, un aquitard peu perméable et un aquifère profond semi-captif.

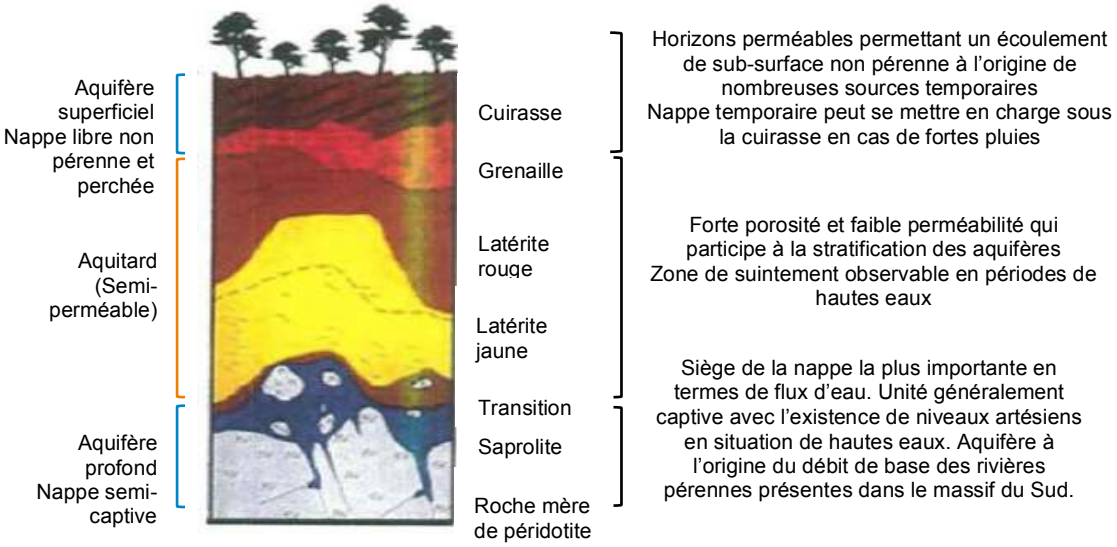


Figure 12. Unités hydrogéologiques présentes dans le profil d'altération du massif du Grand sud (source : Jeanpert, 2010)

De plus, les observations de terrains ont permis de définir deux types de dolines :

- Les dolines superficielles liées à l'entrainement de matériaux sous la cuirasse,
- Les dolines profondes, associées à des failles mettant en relation la doline avec l'aquifére profond

Au vu de ces résultats, on peut supposer qu'il existe deux types de fonctionnement hydraulique de ces dépressions :

- Un fonctionnement qui est uniquement sous l'influence des eaux météoriques au niveau des dolines superficielles. Ces dernières, à priori peu profondes, seraient déconnectées de l'aquitard ainsi que de l'aquifère profond et des écoulements d'eaux souterrains complexes. Cela semble principalement concerner les dolines les moins profondes présentant une accumulation de sédiments fins peu perméables, avec ou non la présence d'un écosystème marécageux,

- Un fonctionnement qui est sous influence des eaux météoriques et souterraines. Cela concernerait toutes les dolines s'ancrant dans les latérites et les saprolites. Comme l'eau de l'aquifère profond est plus minéralisée, sa signature peut être observée au sein de la doline.

L'étude de la variation des niveaux d'eau en fonction des précipitations peut apporter un élément de validation des hypothèses énoncées ci-dessus, à savoir :

- Les dolines déconnectées des écoulements souterrains sont-elles uniquement sous l'influence des eaux de pluie ?
- Les eaux souterraines influencent-elles le fonctionnement hydrologique des dolines possédant une émergence souterraine ou seulement des dolines profondes ?

A noter que cette analyse a été réalisée sur la base d'une évaluation des précipitations dans le secteur à partir des modèles de Météo France (bilans mensuels). Aucune mesure de précipitations n'a en effet été menée au cours du suivi 2013/2014. Les valeurs annoncées sont donc à analyser de manière comparative d'un mois sur l'autre et non de manière purement numérique. De plus, il faut souligner que la relève des hauteurs d'eau s'est avérée hasardeuse à certaines périodes et sur certain site. Cela est notamment vrai au niveau du Trou du Tahitien en période de fort vent (difficulté de stabilisation de l'embarcation, eau trouble) ou dans les dolines dont le fond est recouvert de matte meuble (doline marécage et petite doline notamment).

Nous avons choisi de regrouper les dolines en fonction de la typologie existante (entonnoir, cuvette, effondrement).

3.2.1.1 DOLINE EN CUVETTE

Le Trou du Tahitien est un cas particulier de doline sur la Plaine des Lacs. Cette dépression en forme de « croix » est bien plus vaste et plus profonde que les autres dolines présentes. L'amplitude de variation de son niveau d'eau est aussi beaucoup plus importante, allant d'un assèchement total (enregistré notamment en 2012 lors de la reconnaissance de terrain) à une hauteur d'eau d'au moins 20 m (enregistrée au cours du suivi 2013).

Les observations de terrain mettent en évidence une grande partie du profil d'altération, avec l'apparition de saprolites fines (latérite jaune) et un émissaire colmaté en bordure du fond de la doline. Ceci indique des épisodes d'échanges rapides entre la doline et les eaux souterraines. Un émissaire, beaucoup moins profond, a été observé dans le sous bassin ouest de la doline (*cf.* Figure 13).

De plus, au moins trois émergences de sub-surface ont été identifiées au droit de cette dépression. Les caractéristiques hydrogéologiques des couches supérieures du profil d'altération latéritique permettent, en effet, un écoulement de sub-surface non pérenne, à l'origine de sources temporaires observables au niveau des dépressions sous la cuirasse. L'eau de surface s'infiltre au travers de la cuirasse, composée de nombreuses fissures ouvertes, et circule ensuite au travers de l'horizon nodulaire (« grenaille ») parallèlement à la topographie, créant un aquifère supérieur (nappe libre non pérenne et perchée). L'eau infiltrée est canalisée à l'interface avec les latérites moins perméables et vient produire les sources observées sur les flancs de la doline. En période de pluie, les eaux d'émergence peuvent donc participer à la mise en charge de la dépression.

Figure 13. Localisation des zones de résurgence et d'émergence au niveau du Trou du Tahitien

Les variations de la hauteur d'eau au droit du Trou du Tahitien par rapport à l'estimation des précipitations cumulées mensuelles dans la zone sont présentées dans la Figure 14. Au cours du suivi 2013/2014, aucun à sec de la dépression n'a été observé. Le remplissage maximal a été enregistré en Juillet 2013 (20 m), en accord avec les fortes pluies enregistrées à cette période. Le reste de l'année est caractérisée ensuite par une vidange progressive de la doline, jusqu'à atteindre la hauteur minimale de 6,7 m en Janvier 2015. Ce dernier résultat apparait surprenant car les relevés de terrain ont été réalisés quelques jours après le passage de la dépression June (17/18 Janvier – mesures de terrain le 21 Janvier). En effet, considérant le remplissage rapide de la doline à la suite des épisodes pluvieux de Juillet 2013, il apparait étonnant qu'aucune augmentation de la hauteur d'eau n'ait été enregistrée en Janvier 2014.

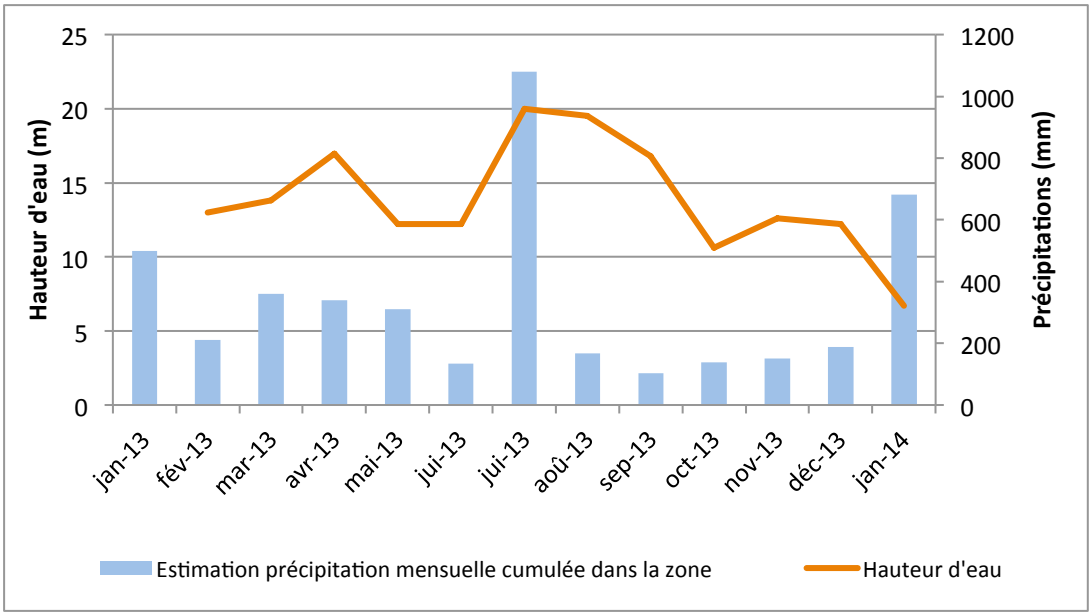


Figure 14. Evolution de la hauteur d'eau au droit du Trou du Tahitien et des cumuls de précipitations estimés dans la zone

3.2.1.2 DOLINES A FOND PLAT

Les variations de la hauteur d'eau au droit des dolines petite, lac, marécage et croissant en regard de l'estimation des précipitations cumulées mensuelles dans la zone sont présentées dans la Figure 15 pour la trois premières et en Figure 16 pour la dernière (doline croissant).

Rappelons que le fond de ces quatre dolines est recouvert d'une couche de sédiments fins qui en s'accumulant, leur ont donné une forme de cuvette à fond plat. La présence de cette couche généralement peu perméable a permis l'implantation de marécages dans certaines zones. De plus, le fond de ces dolines est entièrement recouvert d'un biofilm plus ou moins épais.

En période de fortes pluies, un écoulement d'eau superficiel apparait en amont de la doline marécage et alimente cette dernière. De plus, un point de résurgence d'eau souterraine a été identifié au droit de cette doline. Aucun écoulement de surface ou de sub-surface n'a été observé au droit des autres dolines.

Le remplissage minimal de ces quatre dolines a été enregistré au cours de la saison sèche 2013, entre les mois d'Octobre et Décembre. Ce résultat apparait cohérent avec le régime pluviométrique de la période.

Le remplissage maximal a quant à lui été relevé au mois de Juillet 2013 pour les dolines petite, lac et croissant, ce qui indique que ces dolines ont réagi aux conditions climatiques particulièrement pluvieuses de ce mois. De plus, au cours du suivi, l'évolution de la hauteur d'eau pour les dolines petite et lac, suit globalement la tendance du régime pluviométrique, avec une stagnation des hauteurs d'eau lors de la première partie de l'année et une diminution progressive de ces dernières à la suite des épisodes pluvieux de Juillet. Les eaux de pluie semblent influencer directement et majoritairement le fonctionnement hydrologique de ces dolines, qui ne semblent pas avoir de connexion avec les eaux souterraines.

Concernant la doline marécage, la hauteur d'eau la plus élevée a été enregistrée au mois d'Avril 2013. Bien que ce mois ai été anormalement pluvieux dans le Grand Sud (dépassement des normales pluviométriques avec des cumuls mensuels légèrement excédentaires de l'ordre de 15 à 30%, source : MétéoFrance), aucun apport d'eau de pluie significatif ne pouvait justifier une augmentation de la hauteur aussi marquée. De même,

aucun ruissellement superficiel n'avait été observé lors de la campagne de terrain. Notons aussi qu'en Juillet 2013, la hauteur d'eau de la doline marécage est restée constante alors que le remplissage était maximal dans les deux autres dolines. Ce constat amène à l'hypothèse que la doline marécage ne semble pas réagir prioritairement aux apports en eau de pluie. Toutefois, il reste à considérer avec prudence en raison des faibles variations de profondeur et des difficultés de mise en œuvre des relevés de terrain sur ce site (fond meuble recouvert de matte).

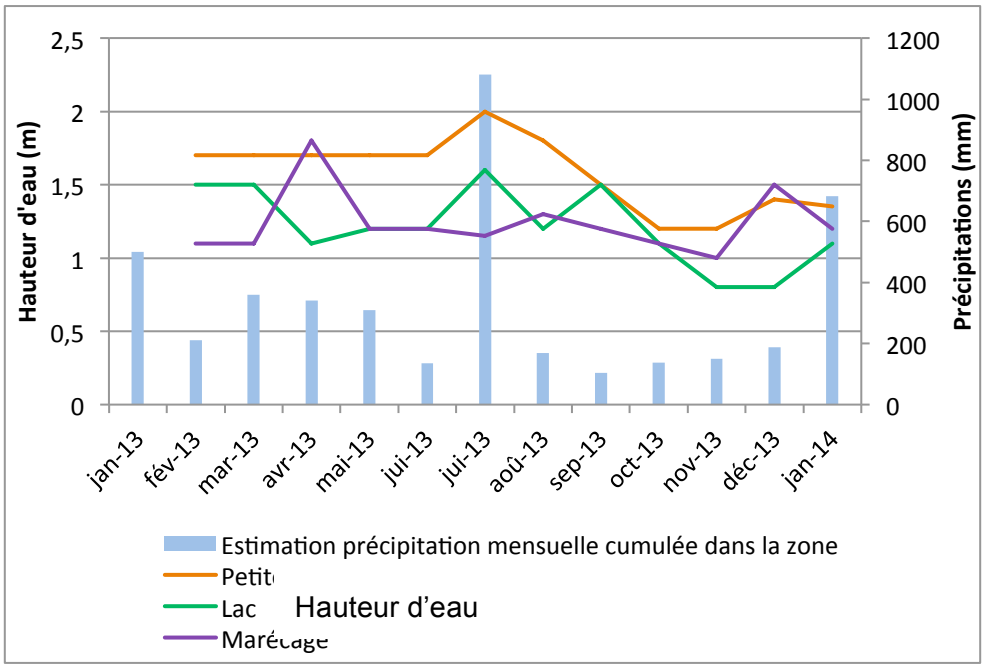


Figure 15. Evolution de la hauteur d'eau au droit des dolines petite, lac et marécage et des cumuls de précipitations estimés dans la zone

Enfin, pour la doline croissant, les mesures de terrain au cours de la seconde moitié de l'année 2013 indiquent sa vidange progressive jusqu'au mois de Novembre, au cours duquel la plus faible hauteur d'eau est enregistrée (4 m). Ce constat correspond à la tendance du régime des pluies, les précipitations étant faibles au cours de cette saison (saison sèche). L'analyse des données de terrain indique que les eaux météoriques ne semblent que partiellement participer au remplissage et à la vidange de cette doline. En effet, la signature des eaux météoritiques apparaît lissée lorsque l'on regarde les hauteurs d'eau, suggérant la présence d'un compartiment souterrain qui participe également à l'approvisionnement de la doline (Figure 16).

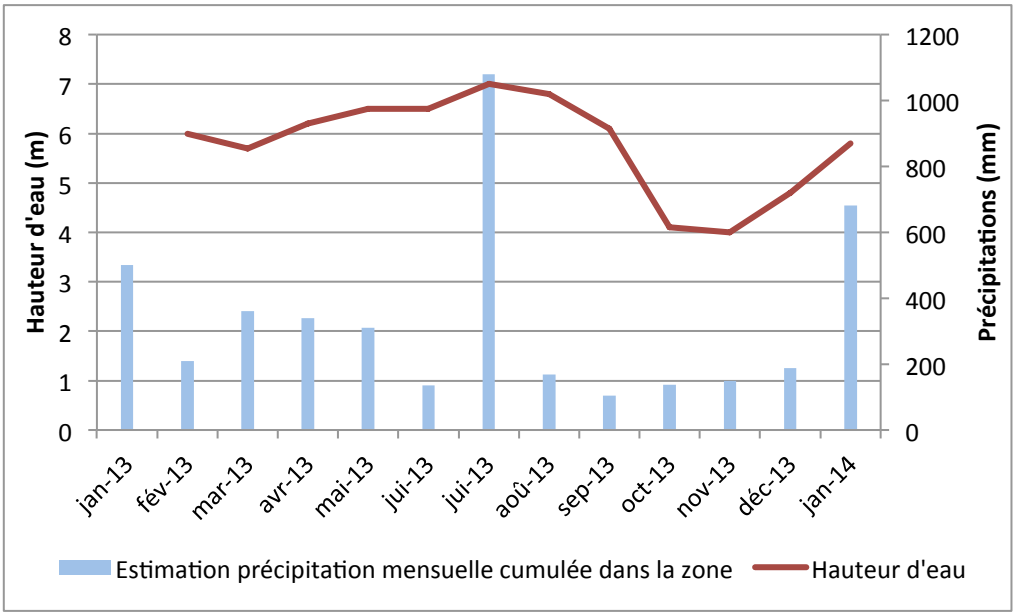


Figure 16. Evolution de la hauteur d'eau au droit de la doline croissant et des cumuls mensuels de précipitations estimés dans la zone

3.2.1.3 DOLINE D'EFFONDREMENT

La variation de la hauteur d'eau au droit de la doline bleue par rapport à l'estimation des précipitations cumulées mensuelles dans la zone est présentée dans la Figure 17.

Le remplissage minimal de la doline a été enregistré au mois de Novembre 2013 (2,5 m), en fin de saison sèche. Le remplissage maximal a quant à lui été relevé au mois d'Août 2013. Cette constatation semble mettre en évidence un temps de latence entre les fortes pluies du mois de Juillet (deux épisodes pluvieux marqués, un en début de mois et un en fin de mois) et la mise en charge de la dépression. Un constat identique peut être extrapolé en début d'année 2014. Les mesures de terrain ont, en effet, été réalisées à la suite du passage de la dépression June, et aucune augmentation de la hauteur d'eau par rapport au mois précédent n'a été identifiée.

Outre cette observation, l'évolution des hauteurs de la doline bleue semble suivre le régime pluviométrique estimé dans la zone d'étude. On note ainsi une stagnation du remplissage de la doline au cours de la première moitié de l'année et une diminution progressive des niveaux d'eau à la suite du pic d'Août 2013, soit au cours de la saison sèche.

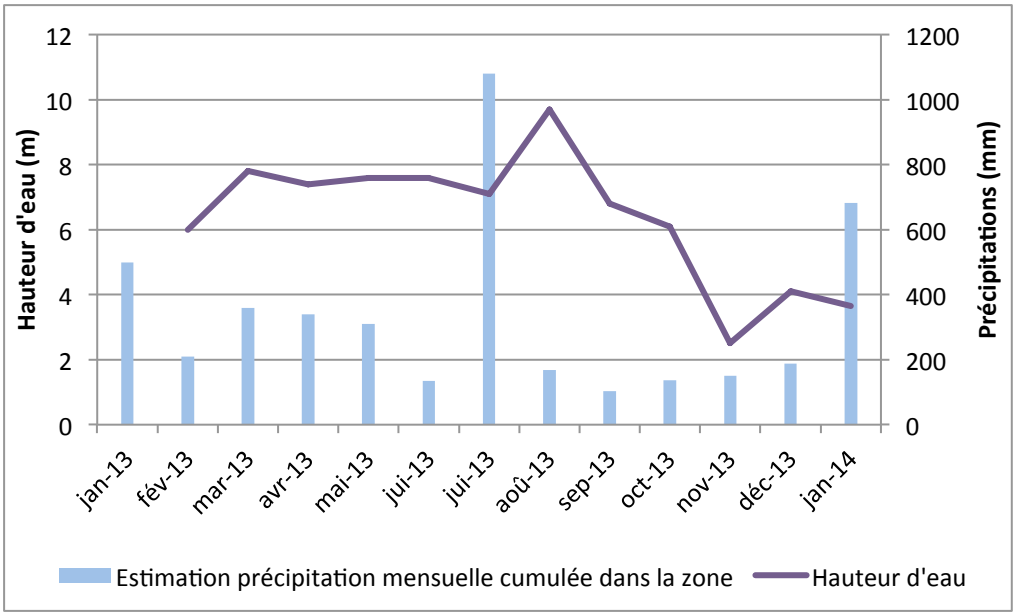


Figure 17. Evolution de la hauteur d'eau au droit de la doline bleue et des cumuls de précipitations estimés dans la zone

La mise en évidence d'un temps de latence entre le passage de fortes précipitations et la mise en charge de la doline semble indiquer que la doline bleue n'est pas uniquement sous l'influence des apports d'eau météoritique. Il semblerait, en effet, qu'une partie de la charge de la doline transite en profondeur dans le profil, du fait d'une mise en charge éventuelle de failles de l'aquitard lors d'épisodes pluvieux importants.

3.2.1.4 CONCLUSION

L'analyse de l'évolution de la hauteur d'eau et des cumuls de précipitations semble mettre en évidence deux types de fonctionnement hydraulique des dolines :

- Un fonctionnement largement sous influence des apports d'eau météoriques. Cela concerne ***les dolines à fond plat*** qui semblent être isolées des connections hydrauliques souterraines présentes au sein du profil d'altération des latérites (aquitard) ou des saprolites. Ce constat a été réalisé pour les dolines Petite et Lac, dont le fond est recouvert d'une couche de sédiments fins et de biofilms, rendant les dépressions peu perméables.
- Un fonctionnement sous influence météoritiques, mais avec une contribution des écoulements souterrains soit de l'aquitard, soit de l'aquifère principal pour les objets les plus profonds.

Un suivi pluriannuel serait nécessaire pour approfondir les connaissances et *in fine* confirmer ou infirmer les hypothèses proposées. Il permettrait, en effet, de prendre en compte les spécificités pluviométriques inter-annuelles.

L'analyse de la composition chimique des eaux des dolines pourra éventuellement apporter des éléments complémentaires de réponse quant à l'influence des eaux souterraines dans le fonctionnement hydraulique des dolines. La composition physico-chimique des eaux constitutives de l'aquifère superficiel, de l'aquitard et de l'aquifère principal diffère, en raison notamment de la composition des horizons traversés.

3.2.2 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUES DES SEDIMENTS

Un seul prélèvement de sédiments a été réalisé en Juillet 2013 dans les dolines lac, marécage, petite et croissant, la granulométrie trop grossière présente dans la doline bleue et dans le Trou du Tahitien ne permettant pas de réaliser des prélèvements exploitables en laboratoire. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3 et la Figure 18.

Tableau 3. Résultats des analyses physico-chimiques menées sur les sédiments (valeurs exprimées en ppm)

Paramètre	Lac	Petite	Croissant	Marécage	Paramètre	Lac	Petite	Croissant	Marécage
Fe	332700	77650	436800	450300	Ni	368	223	756	111
Al	54704	29496	77453	56181	Mn	202	167	509	140
Cr	25795	12494	45281	36338	Cu	88	83	45	46
Si	34202	44497	3956	6217	Co	15	11	55	26
Mg	2684	1297	1523	4202	Zn	<100	<100	118	188
S	3478	6292	2259	1813	AS	<50	<50	<50	<50
K	754	561	114	117	Pb	<50	<50	<50	<50
P	480	408	210	87	Cd	<25	<25	<25	<25

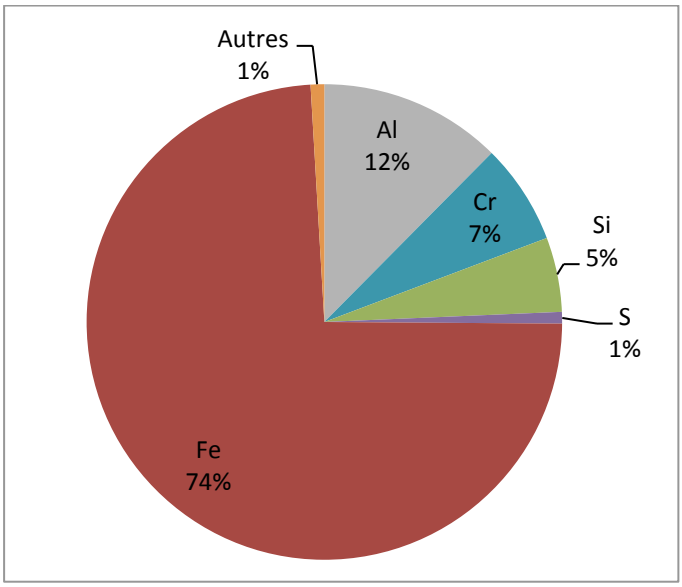


Figure 18. Part moyenne des éléments majoritaires constituant les sédiments prélevés dans les dolines Marécage, Petite, Lac et Croissant

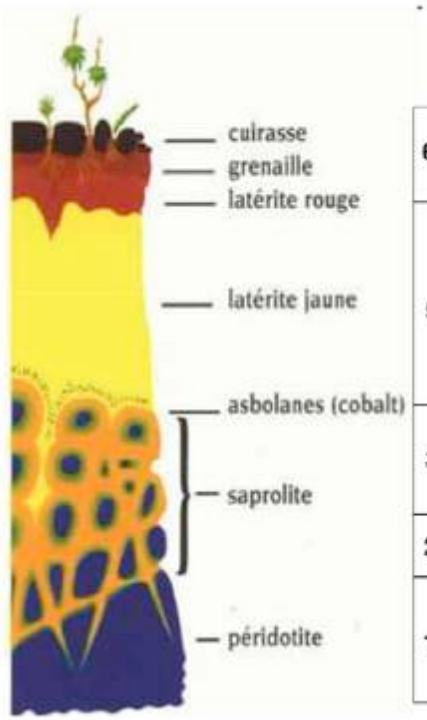
L'altération chimique des péridotites consiste en l'hydrolyse des silicates constitutifs de la roche (olivine et pyroxènes). Cette dernière s'apparente à une simple dissolution, avec évacuation des éléments les plus solubles (cations alcalins et alcalinoterreux Ca, Mg, K, Na et silicium) et immobilisation sur place, sous forme de composés amorphes, du résidu ferrugineux insoluble.

Dans le profil d'altération au-dessus de la péridotite saine, la teneur en magnésium (plus soluble en milieu oxydant) diminue nettement par lixiviation. Le fer, au même titre que le manganèse, insolubilisés et précipités rapidement en oxyde, demeure *in situ*, avec un

cortège d'éléments traces spécifiques aux péridotites tels que nickel, cobalt, chrome et l'aluminium. L'accumulation des résidus conduit à la formation d'un manteau latéritique couronné par une cuirasse ferrugineuse, composée principalement de goethite (variété d'oxyde de fer FeO(OH)). Les études menées par Trescases (1975) ont permis d'établir l'échelle de mobilité relative des éléments au cours de l'altération des massifs ultramafiques de Nouvelle Calédonie : Mg>Si>Ni>Mn>Co>Al>Fe>Cr. La Figure 19 présente un résumé de la composition chimique des différents horizons d'altération de la latérite :

- Niveau 1 : Roche mère composée d'olivine (Mg,Fe)Si et de pyroxène (minerais constitué de magnésium, de fer et de silice),
- Niveau 2 : Matériau faiblement altéré (saprolite) ayant conservé la structure de la roche mère mais qui est fortement appauvri en Mg et Si et enrichi principalement en Fe et Ni,
- Niveaux 3-4 : Matériau fortement altéré ne possédant plus de trace de la structure initiale de la roche mère et enrichi en Fer,
- Niveau 5 : Latérite jaune très appauvris en silice et magnésium, ainsi qu'une partie du nickel, par lixiviation,
- Niveaux 6-7 : Cuirasse et horizon nodulaire principalement composée d'oxydes de fer et pouvant présenter d'importante teneurs en chrome (Cr2O3),

Au vu de ces connaissances, les résultats obtenus lors de l'analyse de la composition chimique des sédiments des dolines apparaissent cohérents. Rappelons, en effet, que les dolines sont des dépressions principalement de la cuirasse (qui peuvent atteindre pour les plus profondes les horizons latéritiques). Les sédiments des dolines sont principalement constitués de Fer et, dans une moindre mesure d'aluminium de chrome. Le magnésium, le nickel, le manganèse, le cobalt et tous les autres éléments sont présents à l'état de trace.



	SiO2	MgO	FeO+ Fe_2O_3	Al_2O_3	Cr_2O_3	NiO
6 - 7	0,1–2,8	0,1-1,6	72-75	4-8	2-6,2	0,1-1,2
5	3-8	0,5-2	60-74	4-6,4	1-4	0,4-2,5
3 - 4	26-41	3-29	20-50	0,7-4,6	0,6-2	0,4-4
2	34-43	30-33	10-13	0,5-1,3	0,4-0,7	0,3-3,8
1	37-44	36-45	8-12	0,4-1,2	0,4-0,6	0,25-0,4

Figure 19. Profil d'altération des péridotites et composition chimique (pourcentage massique) des horizons de latérite (source : Trescases, 1979, Pelletier *et al.*, 2003)

3.2.3 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DE LA COLONNE D'EAU

Lors de chaque relevé de terrain, à l'exception du dernier relevé de 2016 où une panne de la sonde n'a pas permis de faire des mesures, un profil physico-chimique de la colonne d'eau a été réalisé au droit des six dolines suivies. Les paramètres *in situ* mesurés étaient : la température, la conductivité, le pH, la concentration et la saturation en oxygène dissous, la turbidité et le potentiel rédox.

3.2.3.1 TEMPERATURE

Les résultats globaux du suivi de la température sont présentés dans la Figure 20 et la Figure 21. Les profils de température au droit de chaque doline sont présentés dans la Figure 22.

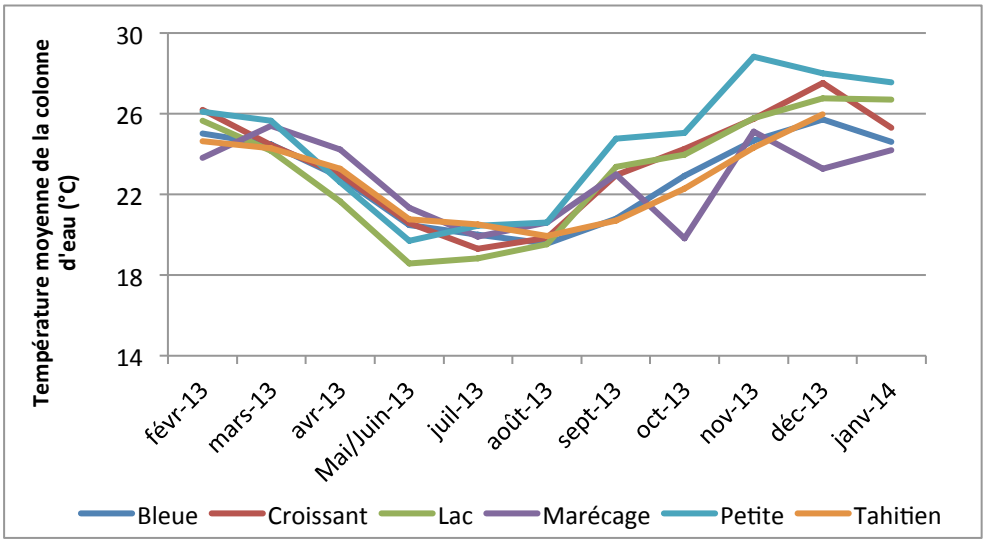


Figure 20. Evolution de la température moyenne mensuelle de la colonne d'eau dans les six dolines ayant fait l'objet d'un suivi

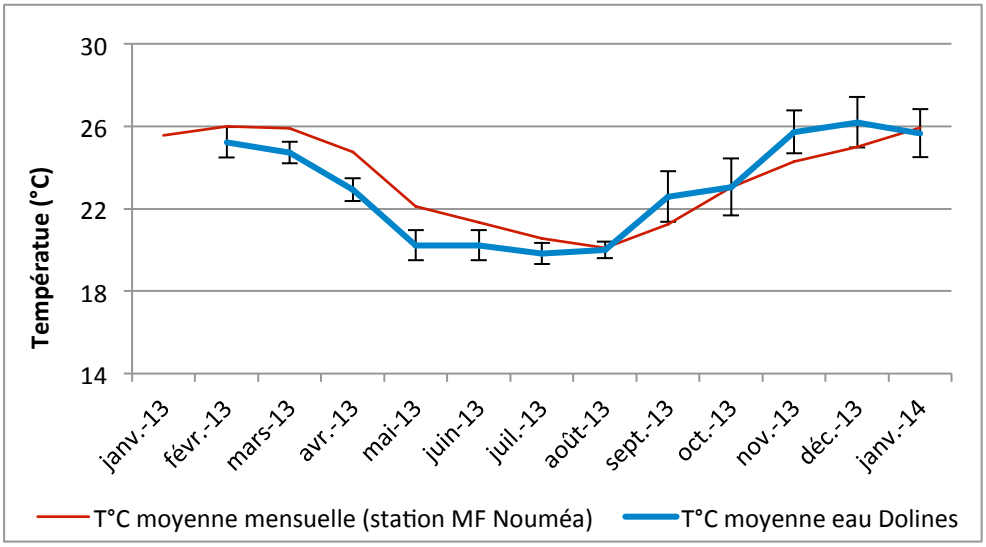
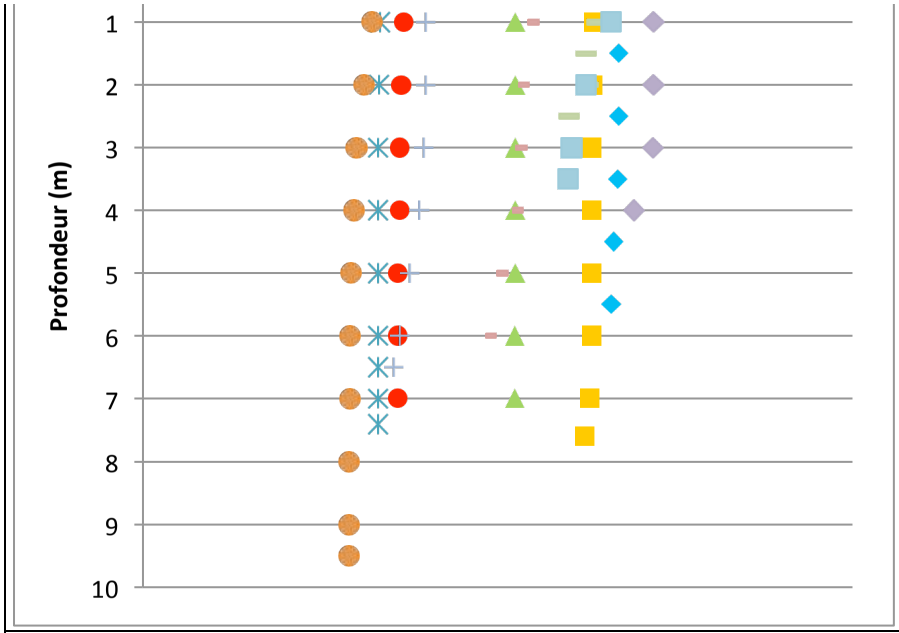
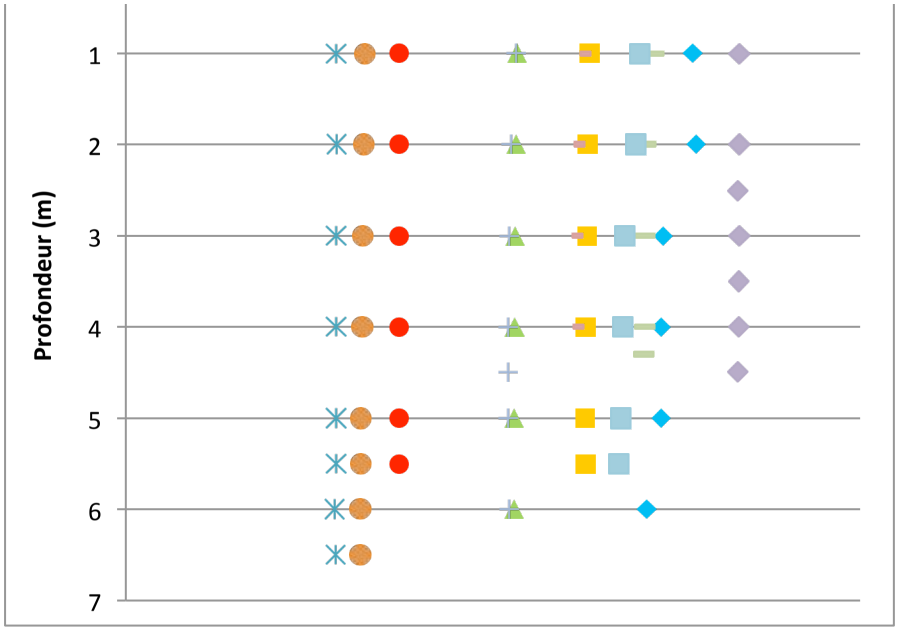
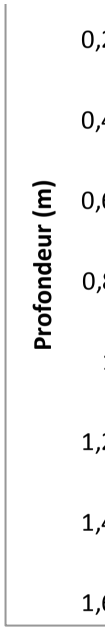
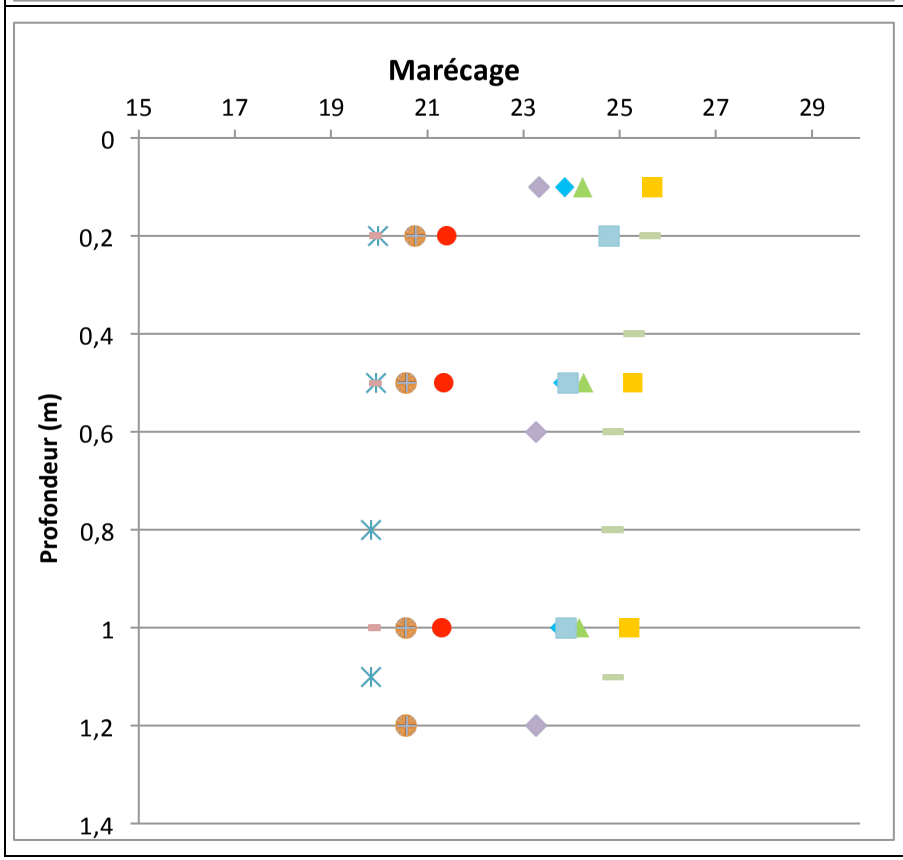


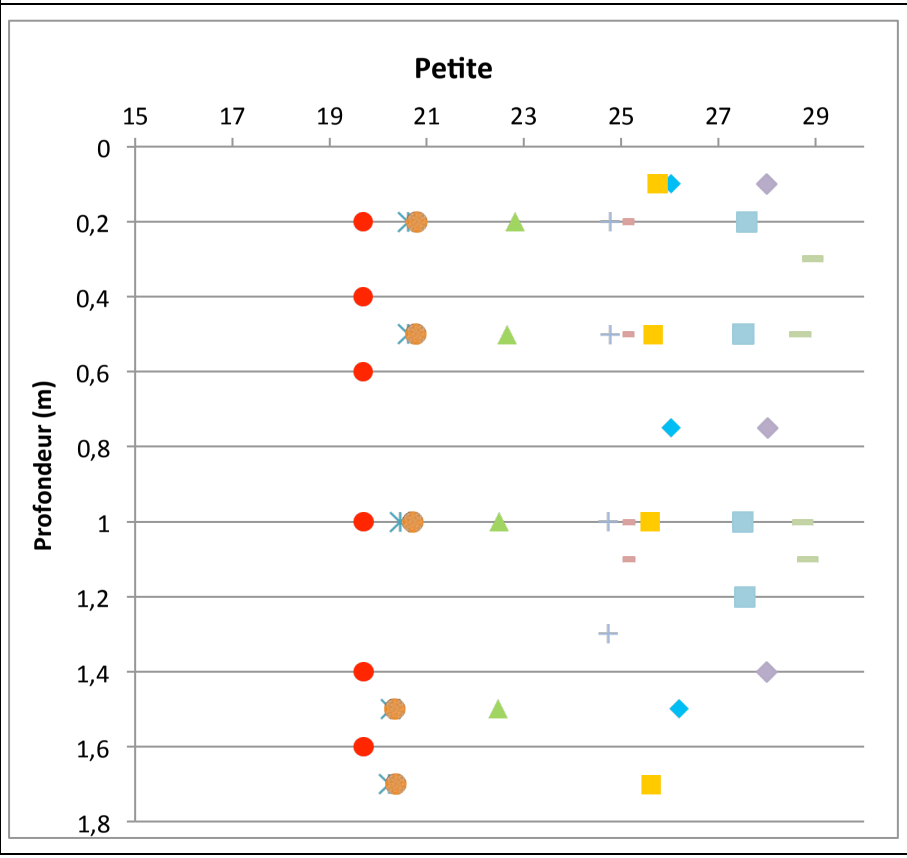
Figure 21. Evolution des températures moyennes de l'air et de la colonne d'eau dans les six dolines ayant fait l'objet d'un suivi

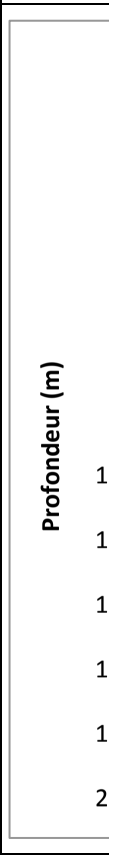

Profondeur (m)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10


Profondeur (m)
1
2
3
4
5
6
7


Profondeur (m)


Marécage
15
17
19
21
23
25
27
29
Profondeur (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4


Petite
15
17
19
21
23
25
27
29
Profondeur (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8


Profondeur (m)

Les températures moyennes mensuelles de la colonne d'eau varient entre 19 et 29°C, les températures moyennes les plus fraiches étant enregistrées entre les mois de Mai et Août (saison froide) et les températures les plus élevées entre les mois de Novembre et Février (saison chaude). Ces résultats sont cohérents avec les conditions climatiques relevées au cours de l'année.

Aucune doline ne se différencie des autres vis-à-vis de ce paramètre. Les températures varient similairement à 3°C près en moyenne. Les plus forts écarts ont toutefois été relevés au cours de la seconde partie de l'année, au cours de laquelle la doline petite se distingue des autres par des températures légèrement plus élevées.

Aucune stratification thermique de la colonne d'eau avec une thermocline marquée n'a été enregistrée au cours du suivi, excepté dans la doline la plus profonde, le trou du Tahitien, pendant la saison chaude (Octobre 2013 et Janvier 2014). On note, effet, un décrochement d'environ 2°C respectivement entre 6 et 10m et 8 et 10m de profondeur.

3.2.3.2 LE pH

Les résultats généraux sont présentés (valeurs moyennes de pH sur la colonne d'eau) dans la Figure 23 et les profils de pH des dolines sont présentés dans la Figure 24.

Les données obtenus au cours des douze mois de suivi indiquent que :

- Les dolines sont des milieux particulièrement acides, avec des valeurs de pH (moyenne mensuelle de la colonne d'eau) comprises entre 4 (Tahitien en Août) et 5,6 (petite en Février),
- Les variations de pH moyen de la colonne d'eau au cours de l'année apparaissent relativement faibles, avec un écart entre les valeurs maximales et minimales d'une unité en moyenne (variation de 0,9 unité pour la doline marécage et de 1,4 pour la doline croissant),
- Les variations des valeurs moyennes de pH évoluent globalement de la même manière dans les six dolines étudiées. Les valeurs moyennes maximales ont été enregistrées en Février. Entre les mois de Mars et Mai/Juin, les valeurs moyennes de pH restent globalement stables puis chutent pour atteindre un minimum au mois d'Août. Ensuite, elles augmentent à nouveau faiblement en Septembre et restent globalement stables jusqu'à la fin du suivi,
- Une acidification maximale des dolines est observée au cours des périodes de plus hautes eaux (Juillet/Août),
- Le trou du Tahitien se distingue des autres dolines par des valeurs de pH les plus faibles alors qu'à l'inverse la doline marécage a souvent des valeurs plus élevées
- Le pH reste globalement stable sur toute la colonne d'eau.

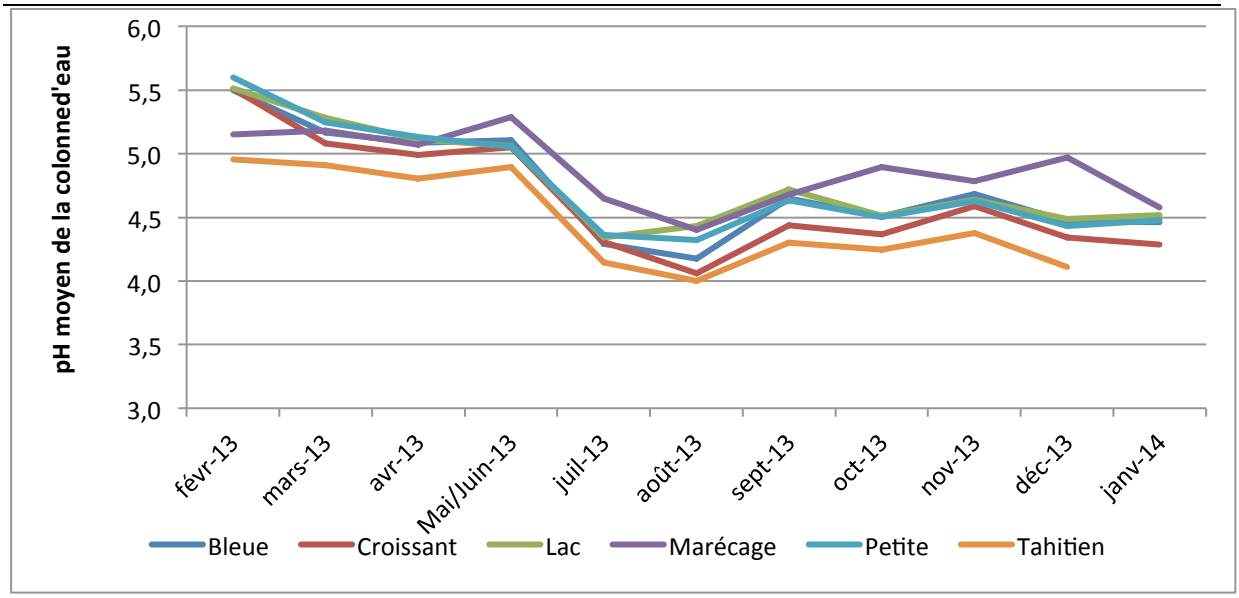


Figure 23. **Evolution des valeurs moyennes de pH sur toute la colonne d'eau**

Les faibles valeurs de pH observées sous tendent l'origine météoritique des eaux alimentant les dolines, ou du moins de leur faible temps de séjour au sein des sols et sous-sols (les eaux de pluies ont un pH acide voisin de 4 unité de pH en moyenne sur la zone (source Vale-NC)). Les faibles fluctuations observées semblent en effet suivre en partie le cumul des précipitations. Les fortes précipitations de juillet 2013 influencent à la baisse le pH, ainsi que celles de janvier 2014 (*c.f.* Figure 24). Il semble toutefois y avoir d'autres mécanismes en jeu dans l'évolution observée du pH au sein des différentes dolines. Nous pouvons en effet constater que les valeurs de la saison sèche 2013 demeurent légèrement inférieures à celles du début de l'année 2013. La balance entre l'activité photosynthétique et l'activité respiratoire des microorganismes benthiques et pélagiques pourrait également influencer les valeurs de pH.

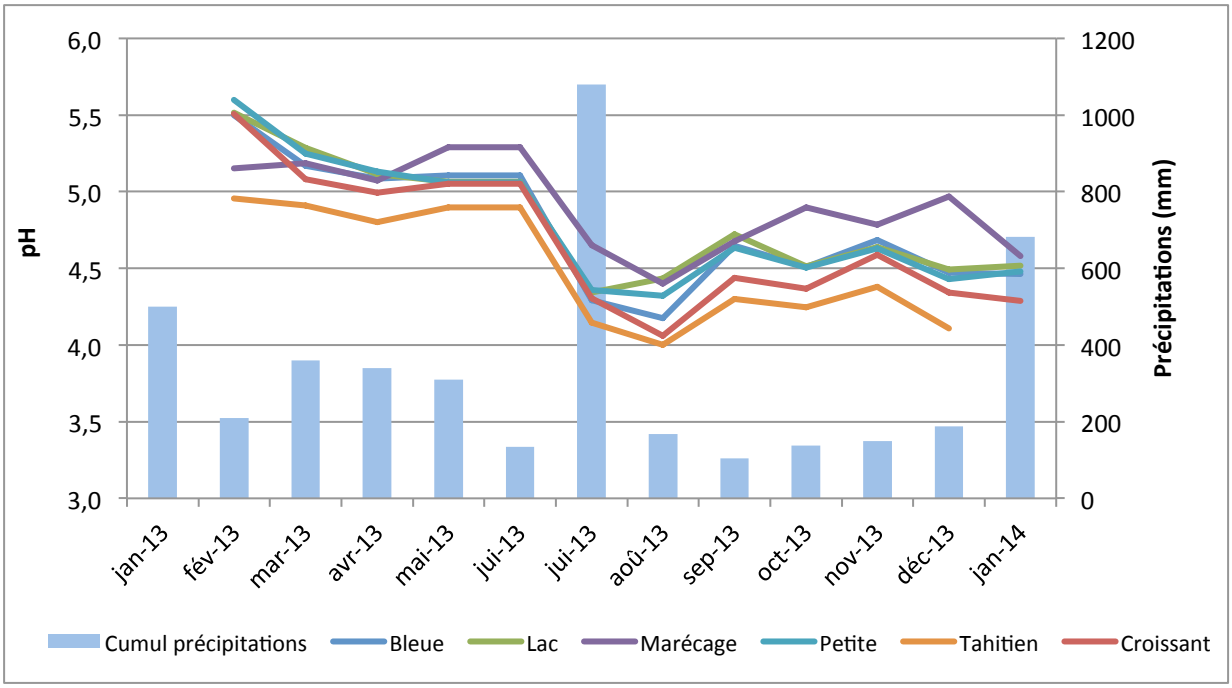
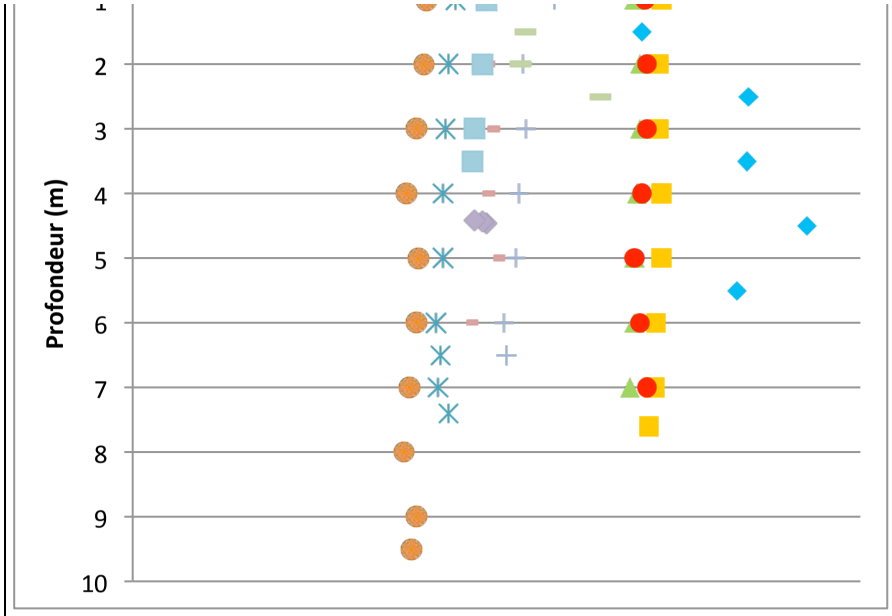
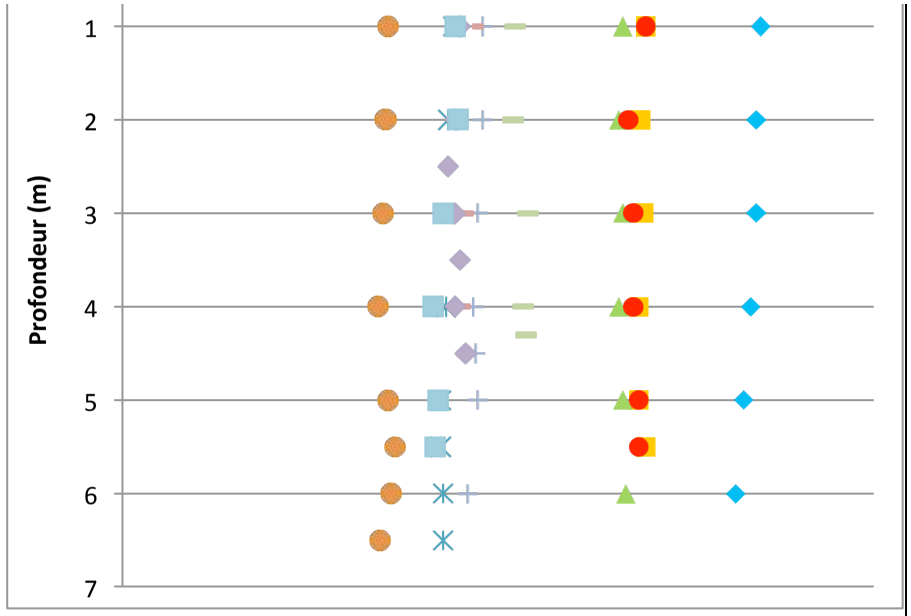
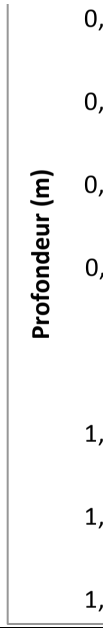
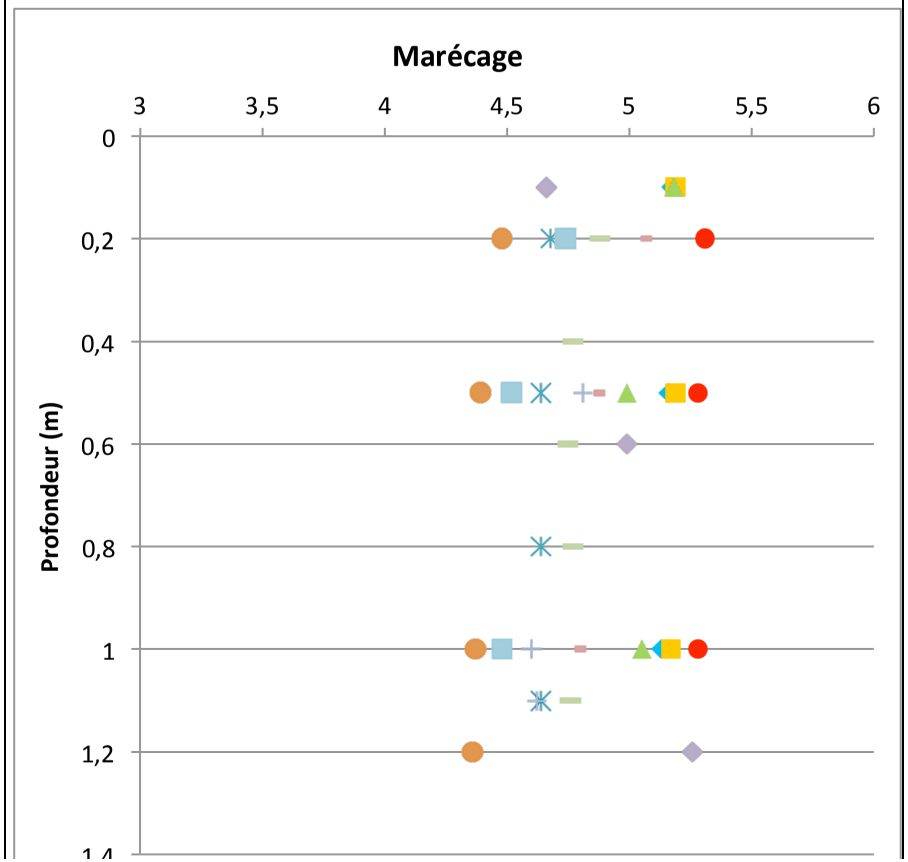


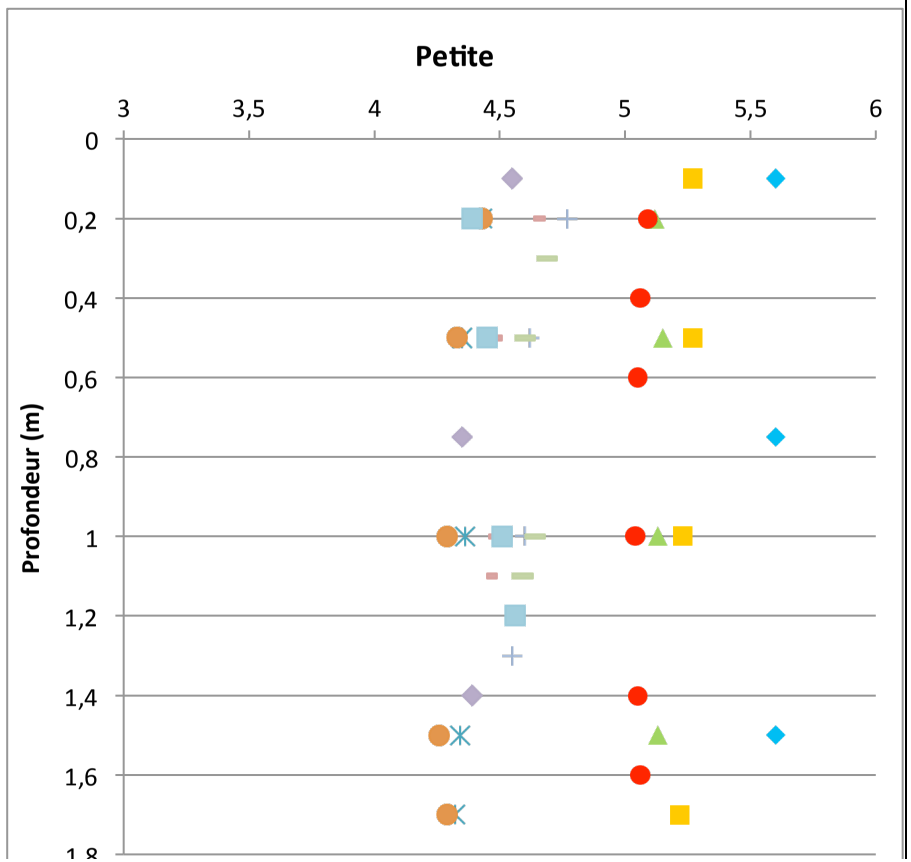
Figure 24. Evolutions des valeurs moyennes mensuelles de pH et des cumuls de précipitations estimés dans la zone d'étude


Profondeur (m)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10


Profondeur (m)
1
2
3
4
5
6
7


Profondeur (m)
0,
0,
0,
0,
1,
1,
1,


Marécage
3
3,5
4
4,5
5
5,5
6
Profondeur (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4


Petite
3
3,5
4
4,5
5
5,5
6
Profondeur (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8

Profondeur (m)
1
1
1
1
1
1
2

3.2.3.3 *LA CONDUCTIVITE ET MINERALISATION*

Les résultats du suivi in situ de la conductivité sont présentés (valeurs moyennes de conductivité sur la colonne d'eau) dans la Figure 26 et la Figure 27 et les profils de conductivité des dolines sont présentés dans la Figure 28.

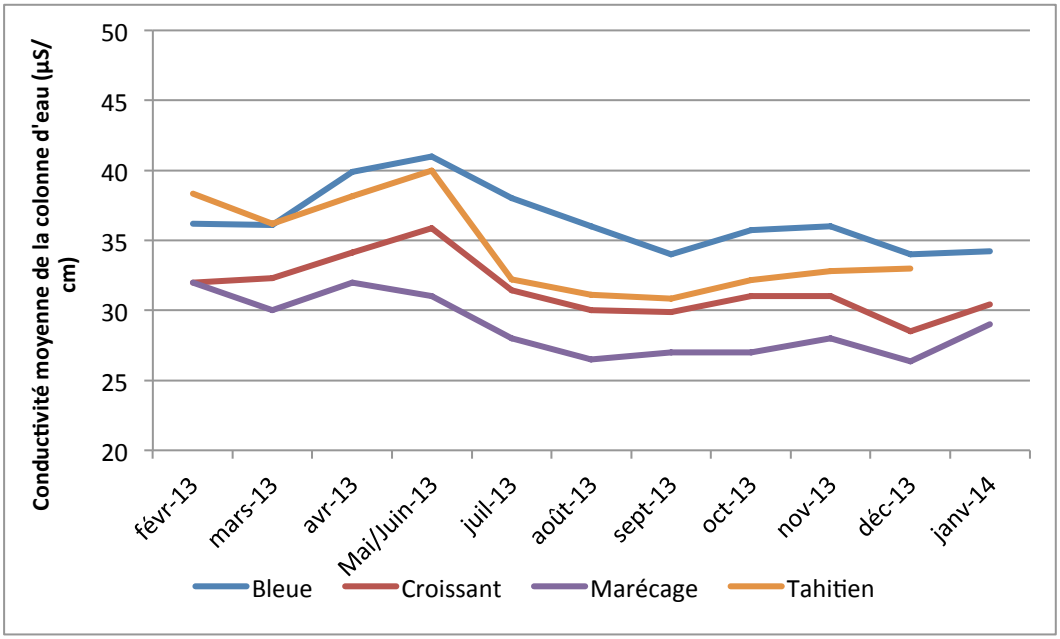


Figure 26. Evolution des valeurs moyennes de conductivité sur toute la colonne d'eau au droit des dolines bleue, croissant, marécage et Tahitien

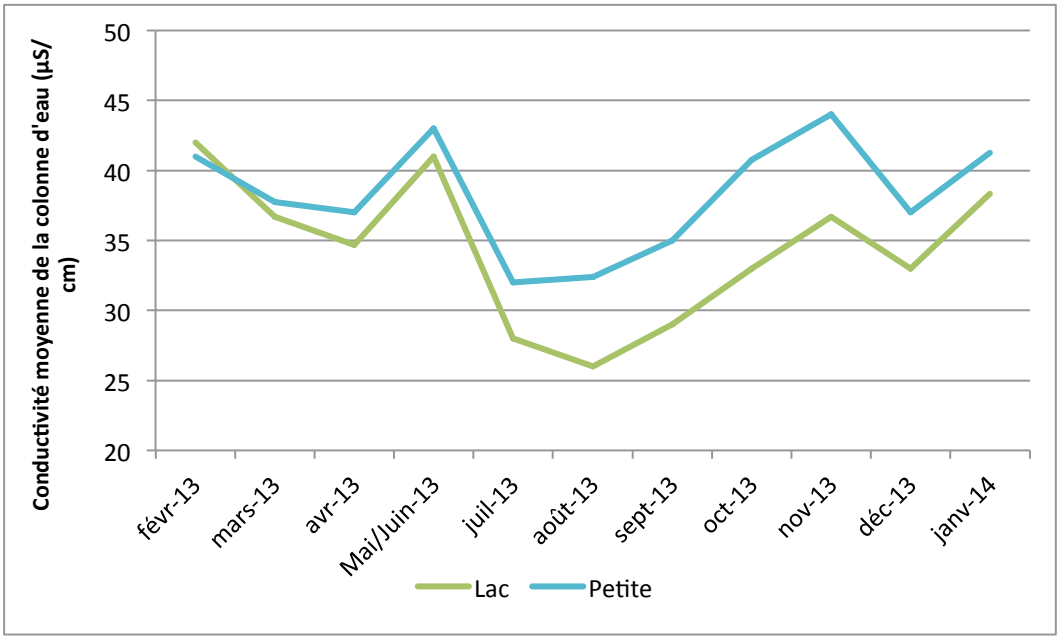
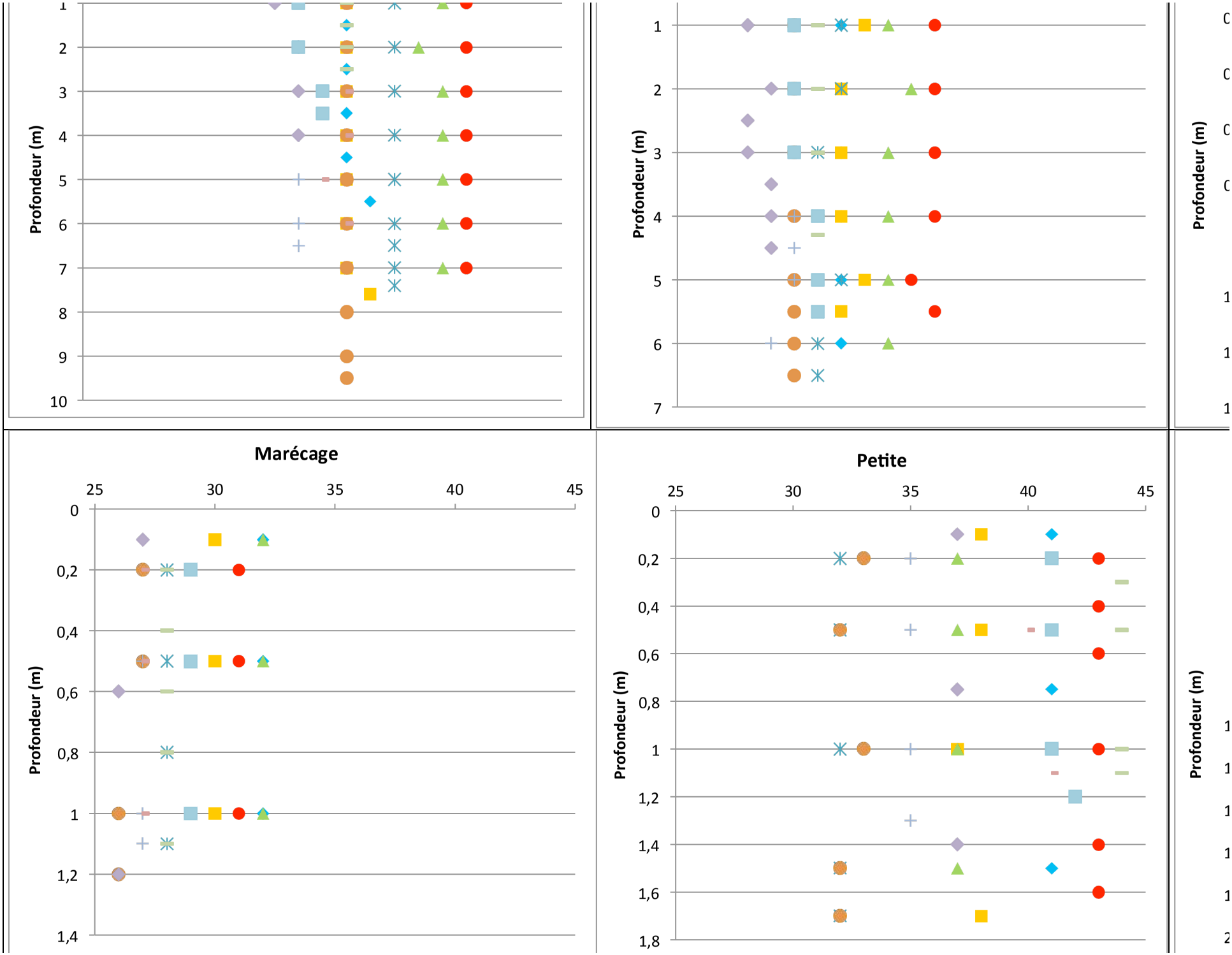


Figure 27. Evolution des valeurs moyennes de conductivité sur toute la colonne d'eau au droit des dolines petite et lac


Profondeur (m)
Marécage
Petite

Les résultats montrent :

- que les dolines sont des milieux très peu minéralisés, avec des conductivités moyennes de la colonne d'eau relativement stables, comprises entre 26 et 44 µS/cm.
- que les plus fortes variations de conductivité ont été enregistrées au droit des deux dolines à priori déconnectées des écoulements souterrains (petite et lac). Les deux dépressions présentent des variations de conductivité moyenne similaires au cours du temps avec un écart de 12 µS/cm pour la petite doline et de 16 µS/cm pour la doline lac entre les valeurs maximales et minimales. Deux pics de conductivité moyenne ont été enregistrés : un en Mai/Juin et un en Novembre. Les plus faibles valeurs ont quant à elles été relevées au cours de la saison froide (Juillet pour la petite doline et Août pour la doline lac). La conductivité semble réagir fortement aux précipitations et donc hauteurs d'eau pour ces deux objets. Les eaux de pluies plus abondantes en mars/avril, ainsi qu'en juillet, sont à l'origine de la chute de conductivité observée.
- l'absence de chemocline, la conductivité restant stable sur toute la colonne d'eau.

3.2.3.4 LA CONCENTRATION ET SATURATION EN OXYGENE DISSOUS

Les résultats généraux sont présentés (valeurs moyennes de concentration et de saturation en oxygène dissous sur la colonne d'eau) dans la Figure 29 et les profils de concentration et de saturation en oxygène dissous des dolines sont présentés dans la Figure 30 et la Figure 31.

Les résultats indiquent que les dolines sont des milieux bien oxygénés avec des saturations en oxygène moyennes globalement supérieures à 85%. Les dolines Bleue et Marécage se distinguent toutefois des autres dolines par une oxygénation plus faible de l'eau. La saturation de ces deux dépressions est, en effet, comprise entre 60 et 80% une bonne moitié de l'année de suivi. Ces plus faibles valeurs pourraient traduire une plus grande activité respiratoire au sein de ces dolines. Il est d'ailleurs intéressant de constater que dans la doline bleue et dans le trou du Tahitien, une diminution des concentrations et de la saturation en oxygène est observée entre la surface et le fond, ce qui traduit une activité respiratoire plus forte dans la zone benthique.

L'oxygénation est généralement à son minimum en Août et Septembre, excepté pour la doline lac, qui présente les plus faibles oxygénations en début d'année 2014. Les plus fortes oxygénations ont quant à elles été enregistrées globalement au cours de la saison pluvieuse de 2013 et 2014 (Février/Mars 2013 – Décembre 2013/Janvier 2014).

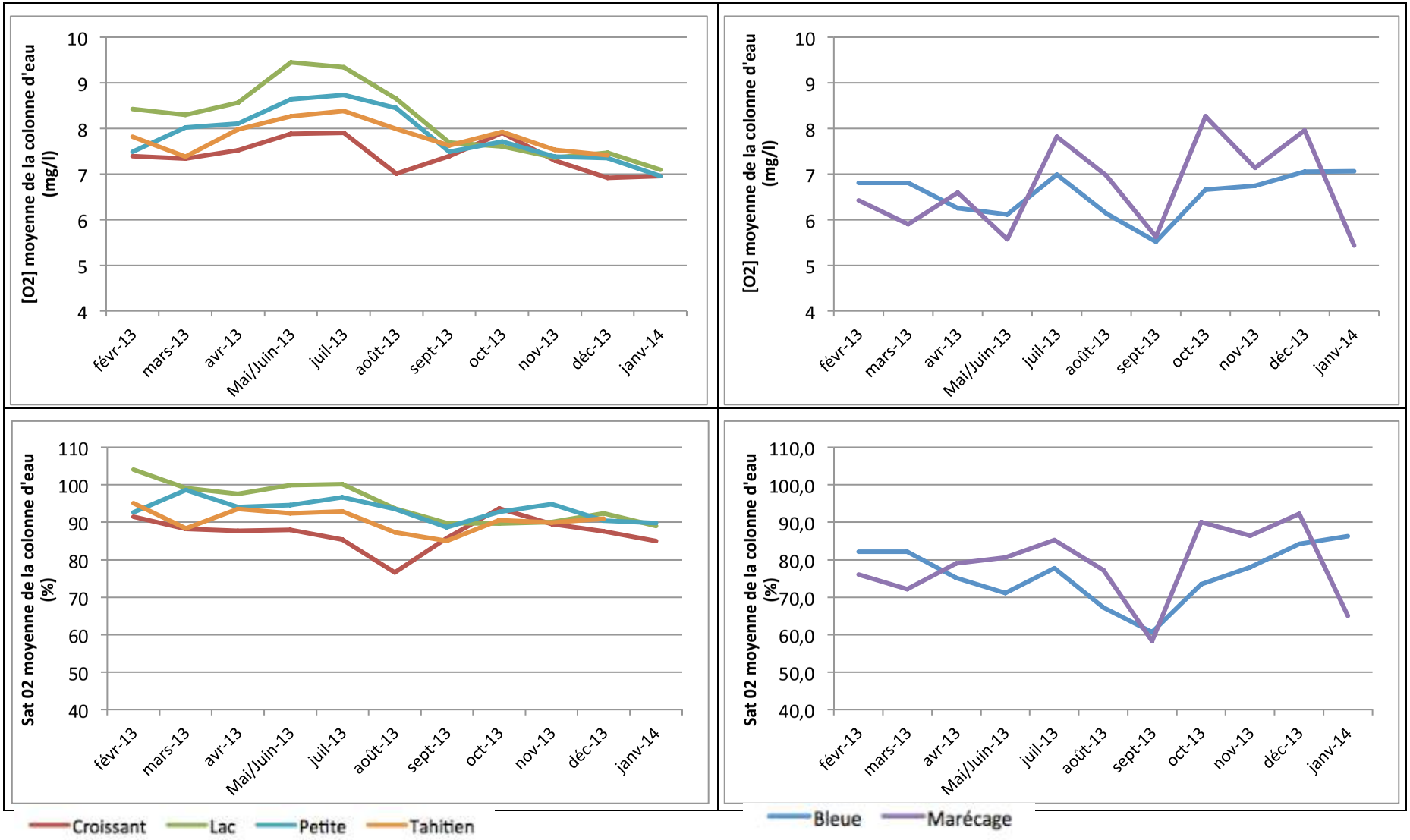
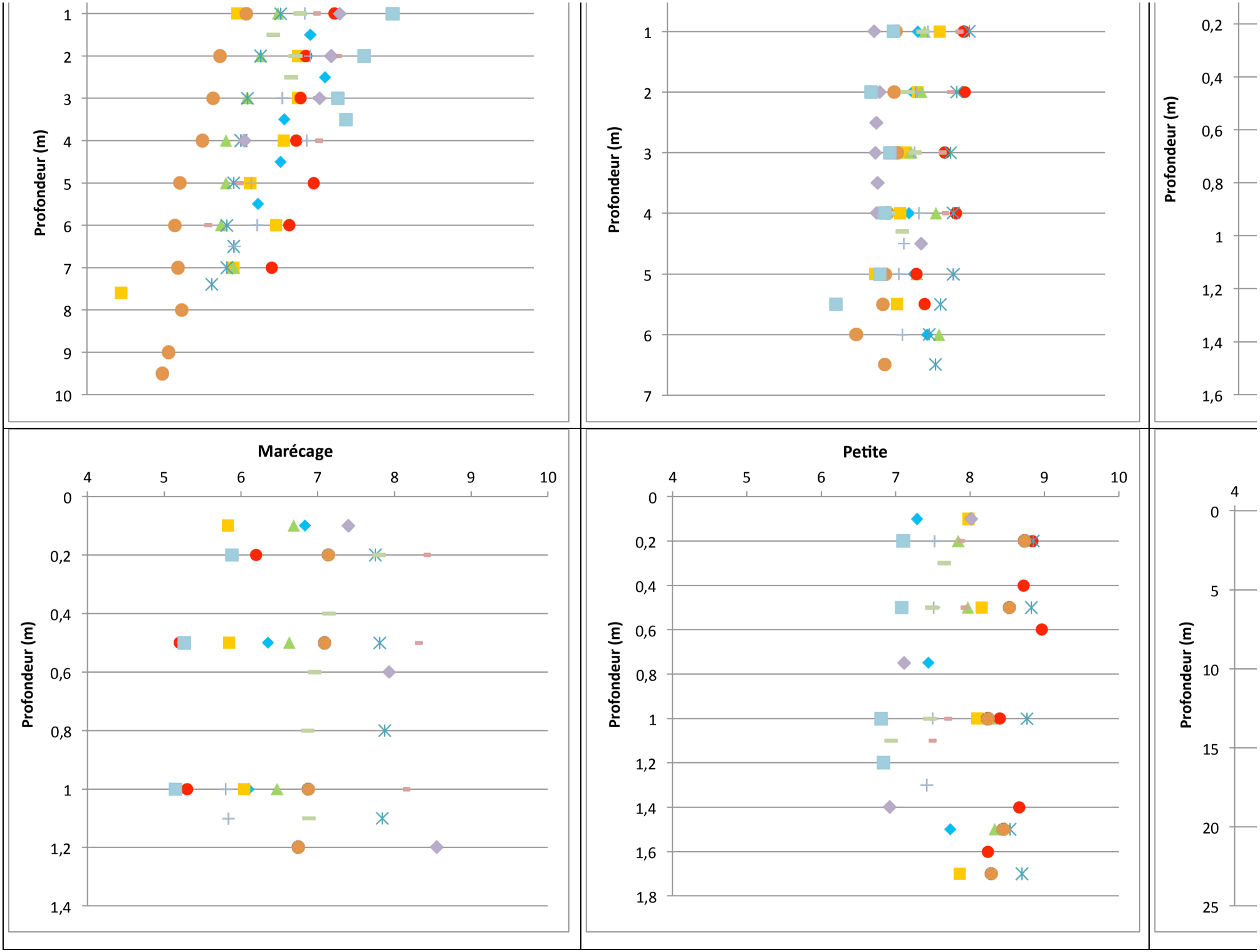
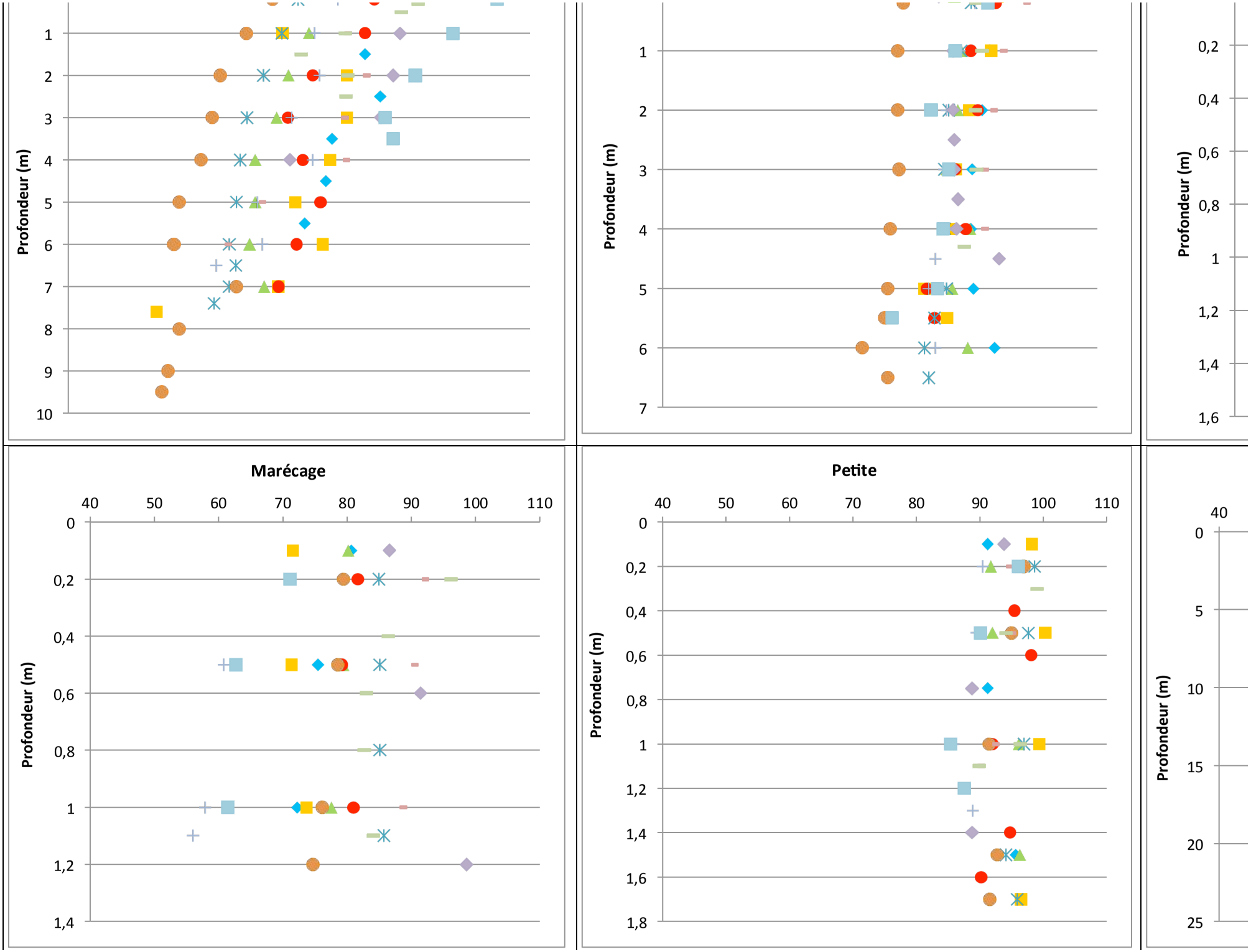


Figure 29. Evolutions des valeurs moyennes de concentration et de saturation en oxygène dissous


Profondeur (m)
Marécage
Petite


Profondeur (m)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Profondeur (m)
1
2
3
4
5
6
7
Profondeur (m)
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
Marécage
40
50
60
70
80
90
100
110
Profondeur (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
Petite
40
50
60
70
80
90
100
110
Profondeur (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8
40
Profondeur (m)
0
5
10
15
20
25

3.2.3.5 *LA TURBIDITE*

Les résultats généraux sont présentés (valeurs moyennes de turbidité de la colonne d'eau) dans la Figure 32 et la Figure 33 et les profils de turbidité des dolines sont présentés dans la Figure 34.

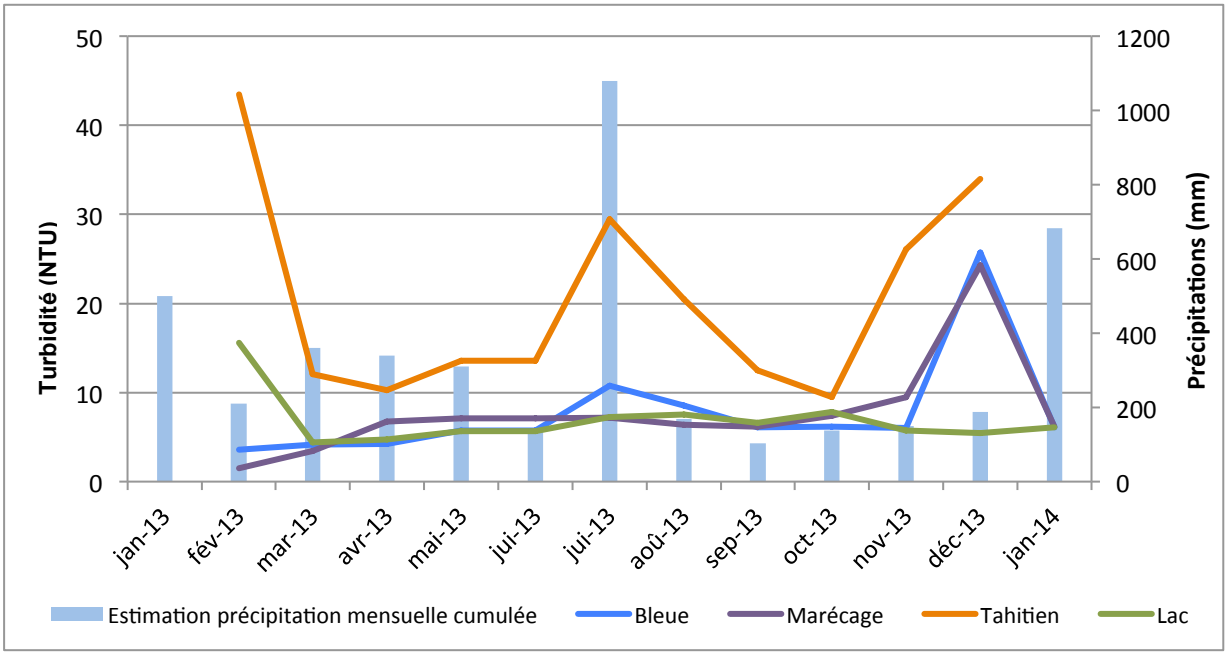


Figure 32. Evolution des valeurs moyennes de turbidité au droit des dolines bleue, marécage, Tahitien et lac

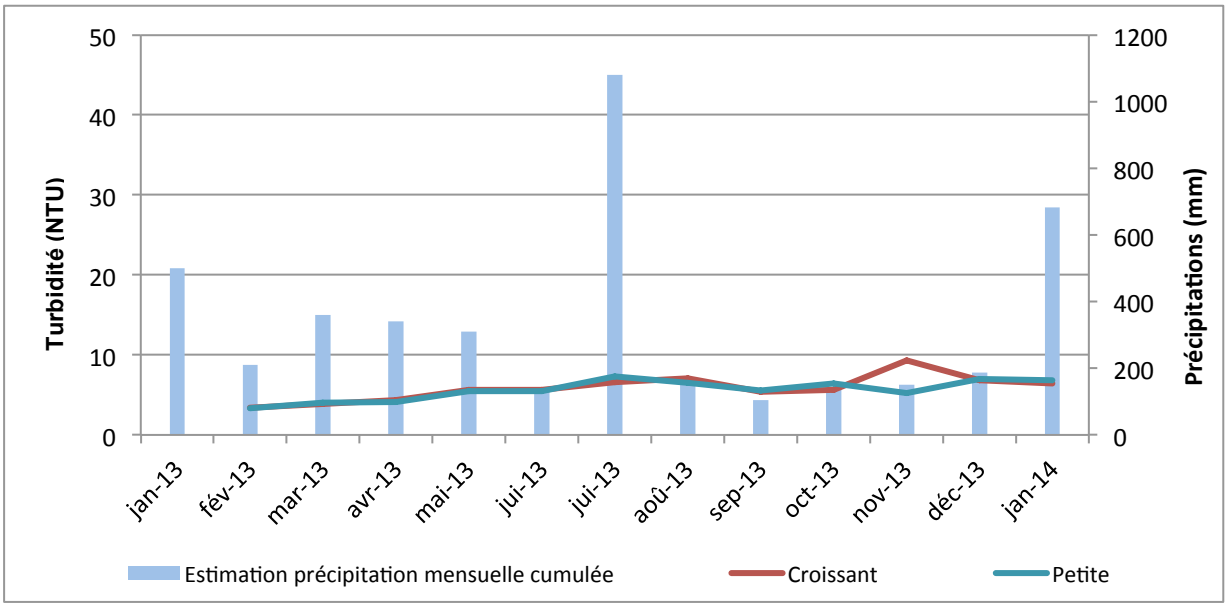
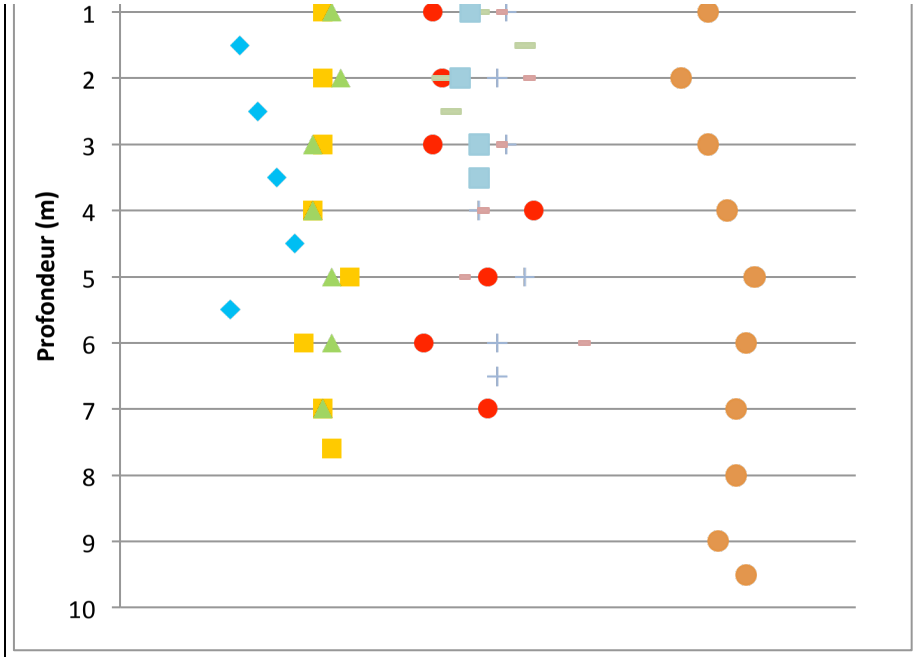
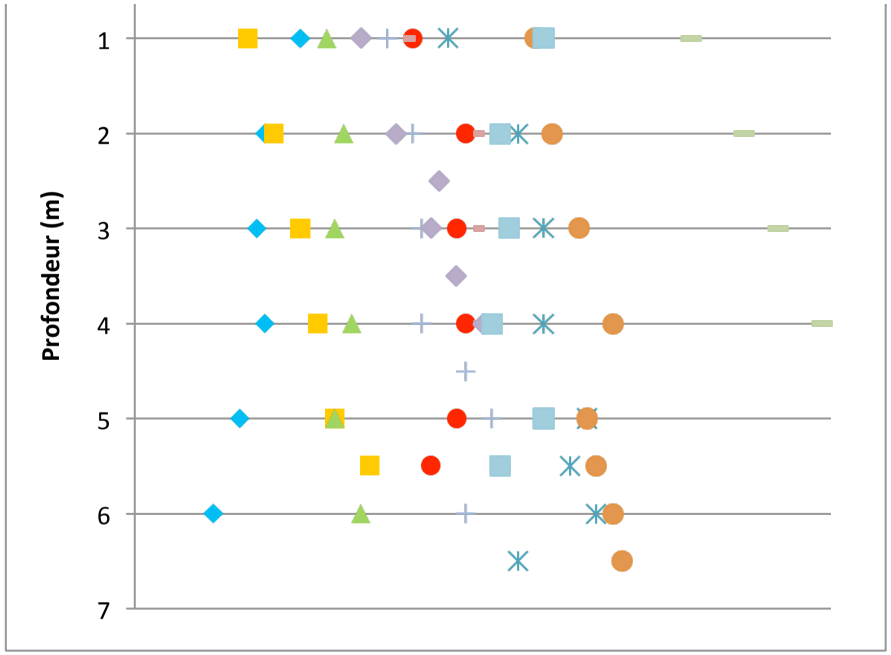
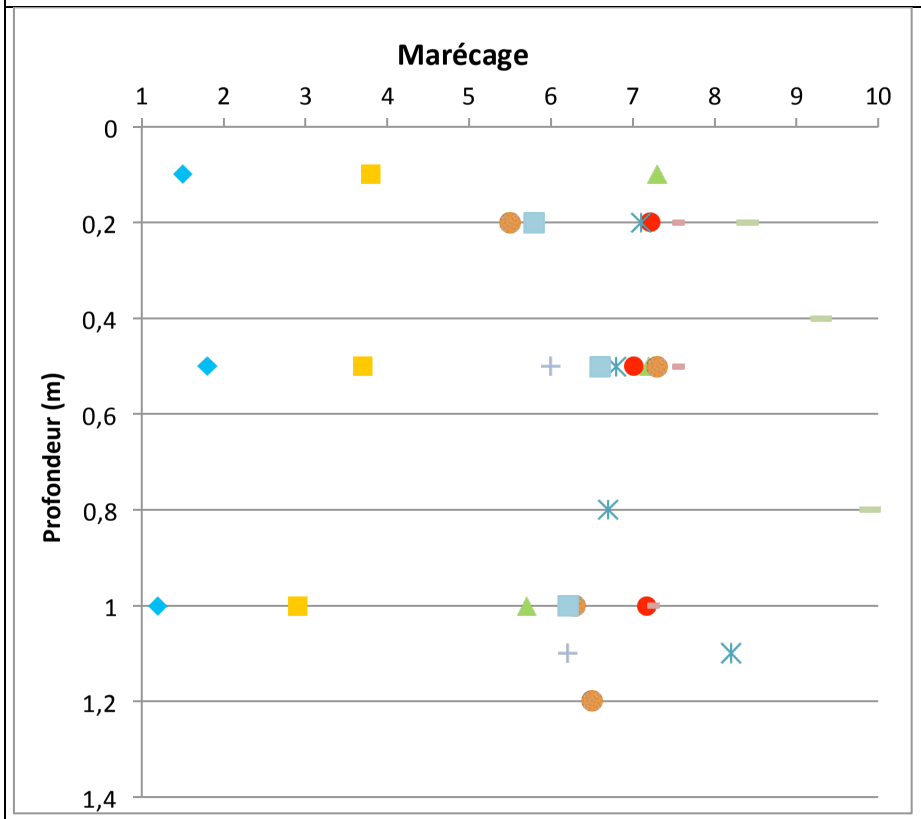


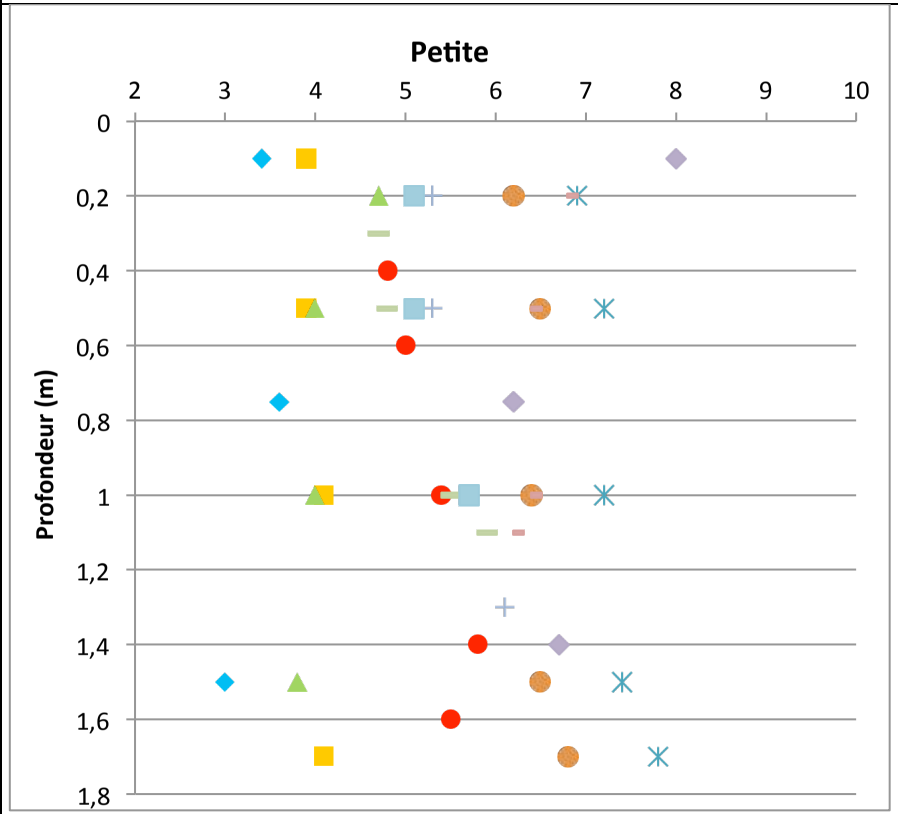
Figure 33. Evolution des valeurs moyennes de turbidité au droit des dolines croissant et petite

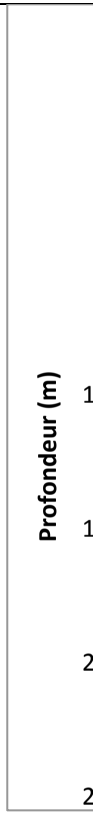

Profondeur (m)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10


Profondeur (m)
1
2
3
4
5
6
7

Profondeur (m)


Marécage
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Profondeur (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4


Petite
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Profondeur (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8


Profondeur (m)

L'eau des dolines est toujours apparue limpide et transparente lors des campagnes de terrain, résultat d'une turbidité faible, généralement inférieure à 7 NTU, excepté dans le Trou du Tahitien. Cette dépression se distingue en effet par des valeurs de turbidité plus élevées (comprises entre 10 et 43,5 NTU) et une eau trouble et verte.

L'étude de l'évolution de la turbidité moyenne de la colonne d'eau des six dolines suivies a permis de mettre en évidence, chez certaines d'entre elles, trois pics de turbidité :

- Un pic en Février 2013, qui peut s'expliquer par les fortes précipitations enregistrées au mois de Janvier à la suite du passage de la tempête Freda ;
- Un pic en Juillet 2013, mois particulièrement pluvieux ;
- Un pic en Décembre 2013 qui ne peut être associé à des événements de précipitations.

Le Trou du Tahitien est la seule doline dans laquelle les trois pics de turbidité sont observés. La doline Lac présente un pic de turbidité en Février 2013 alors que les dolines Bleue et Marécage présentent un pic de turbidité en décembre 2013, ainsi qu'un petit pic en juillet 2013 pour la doline bleue). Enfin, la turbidité des dolines Croissant et Petite est restée très stable tout au long du suivi.

La turbidité présente de très faibles variations avec la profondeur.

3.2.3.6 LE POTENTIEL REDOX

Les résultats généraux sont présentés dans la Figure 35 et les profils verticaux du potentiel Redox des dolines sont présentés dans la Figure 36.

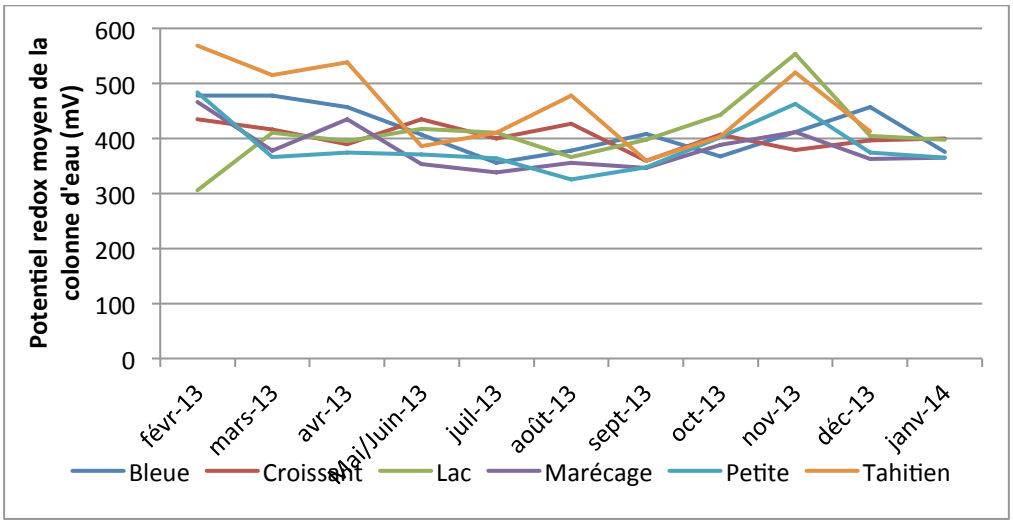
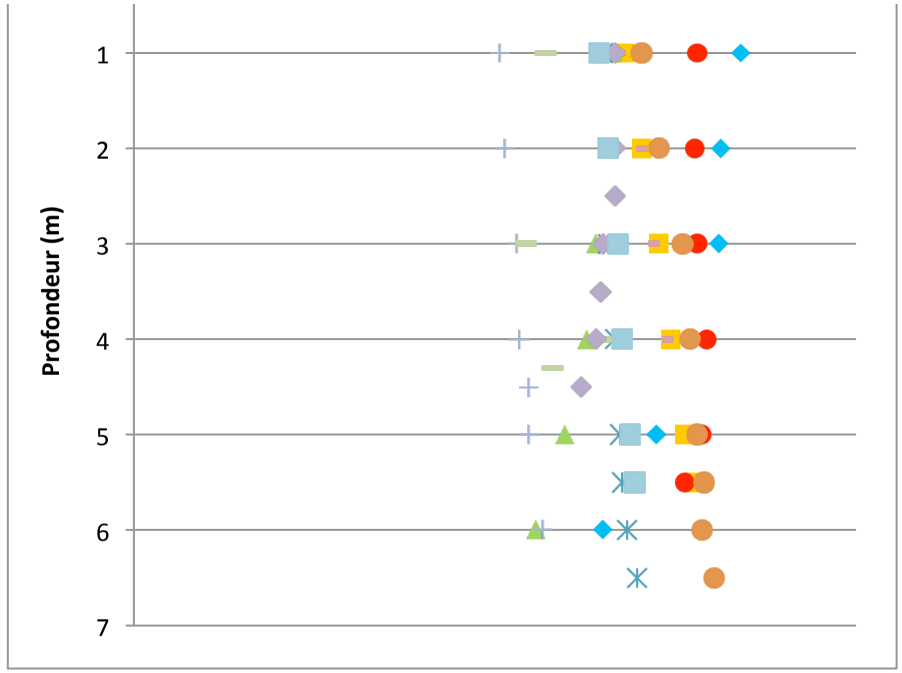


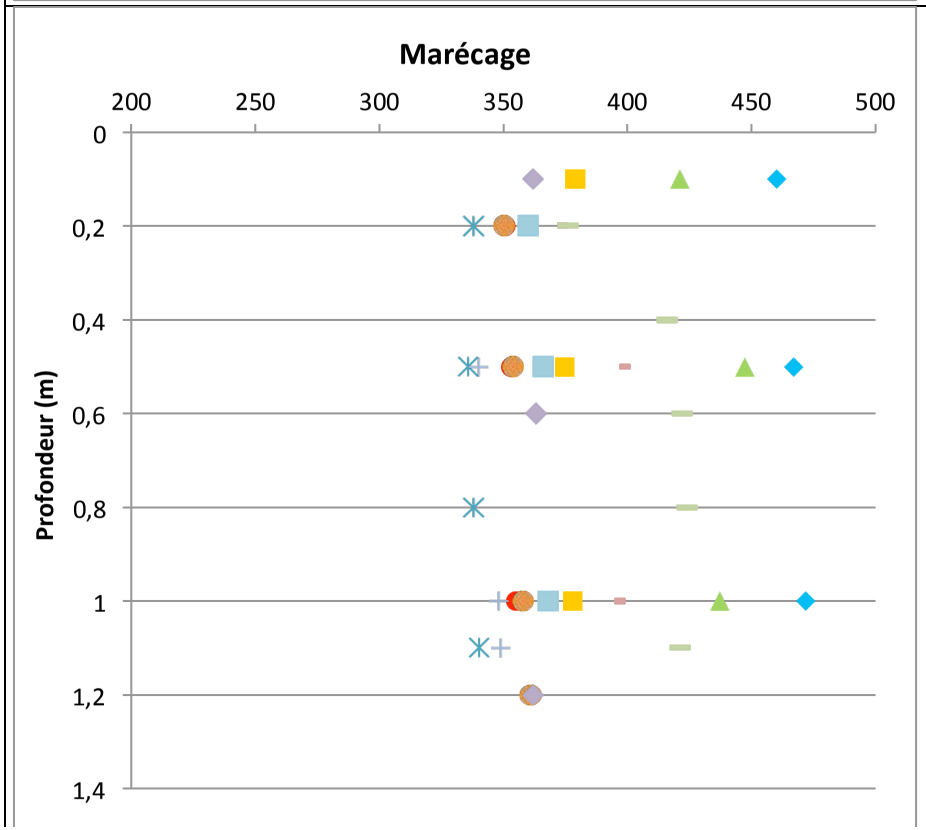
Figure 35. Evolution des valeurs moyennes du potentiel redox

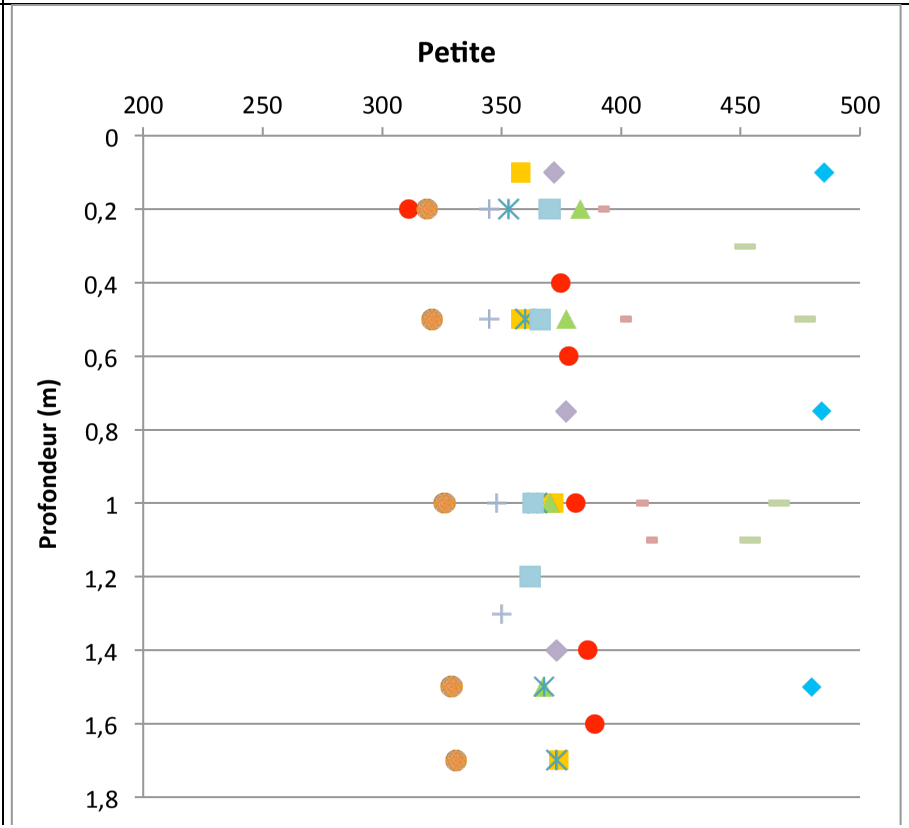
Le potentiel Redox apparait relativement élevé (de 300 à 570 mV) et peu variable d'un mois sur l'autre. L'évolution au cours du temps de ce paramètre varie en fonction des dolines, mais le Trou du Tahitien présente globalement les valeurs les plus élevées alors que les dolines petite et marécage présentent les valeurs les plus faibles.

Au niveau de la colonne d'eau, le potentiel redox apparait stable ou en légère augmentation avec la profondeur.

Profondeur (m)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10


Profondeur (m)
1
2
3
4
5
6
7


Marécage
200
250
300
350
400
450
500
Profondeur (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4


Petite
200
250
300
350
400
450
500
Profondeur (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8

3.2.3.7 *LES ISOTOPES STABLES DE L'EAU*

Les teneurs en ^{18}O et ^{2}H ont été mesurées dans les eaux de pluie (station Ancienne Pépinière), dans plusieurs piézomètres du secteur de Goro et dans le Trou du Tahitien. La Figure 37 présente les teneurs mesurées dans les différents compartiments de l'hydrosystème, en commençant par les précipitations (en rouge, station de l'Ancienne pépinière), la doline du Tahitien (en violet) et les eaux souterraines (triangles jaune pour les latérites, et vert pour les piézomètres captant les saprolites grossières et roche saine fracturée, les ronds bleus correspondent aux sources).

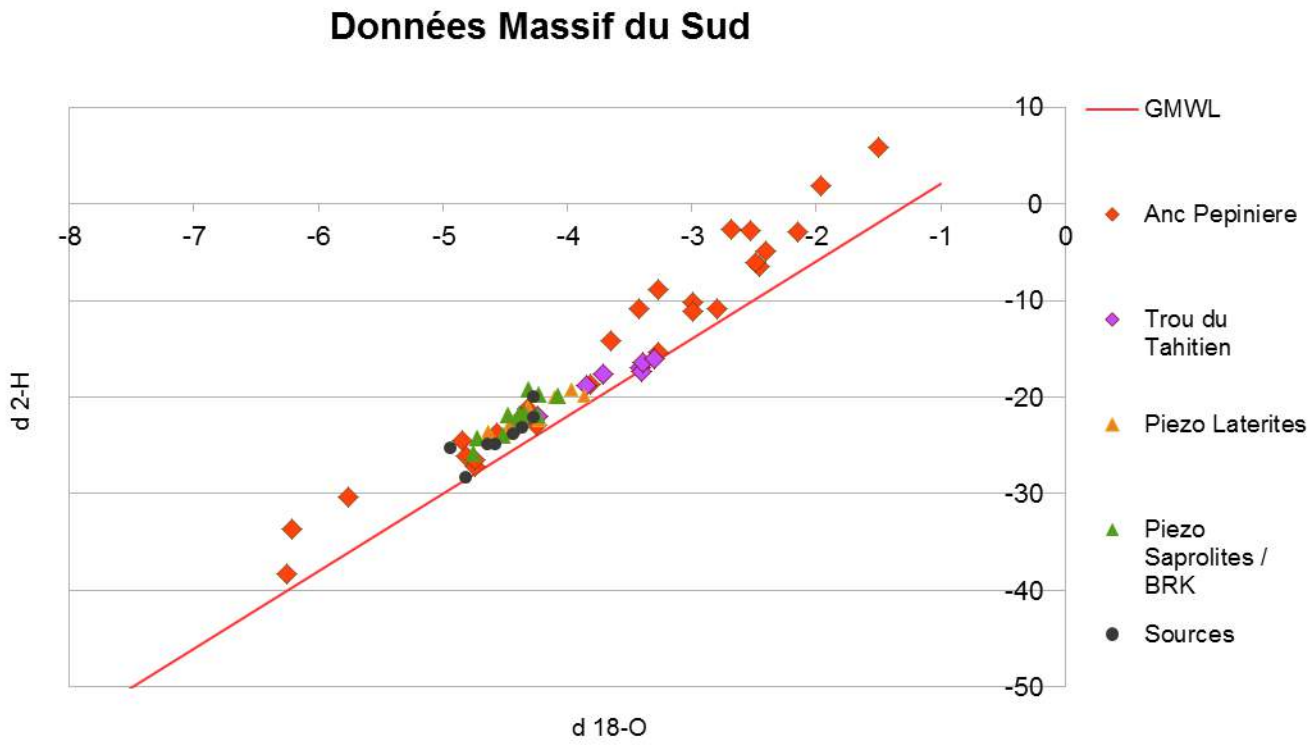


Figure 37. Teneurs en isotopes stables (‰) mesurées dans les eaux du Massif du Sud (pluie = Station Ancienne Pépinière, Doline du Trou du Tahitien, et eau souterraine = piézomètres)

Tous les points s'alignent globalement sur une même droite (Figure 37), les teneurs mesurées dans la doline et les piézomètres étant encadrées par les mesures réalisées dans les pluies. Pour ces dernières, les teneurs les plus basses (appauvries) correspondent aux eaux souterraines (triangles et ronds), la doline présentant des valeurs plus élevées.

Pour le Trou du Tahitien, lorsque l'on regarde la distribution des points en fonction de la profondeur sur la Figure 38, on observe des teneurs particulièrement homogènes dans l'ensemble de la doline. Ces teneurs se situent au milieu de l'ensemble des teneurs observées pour la pluie et sont proches de celles observées dans les eau souterraines. La proximité entre les teneurs observées dans la doline et celles de la pluie du mois pourrait cependant indiquer une alimentation rapide par la pluie. Comme pour la température, on observe un léger décrochement de la teneur isotopique à la base de la doline et en octobre. Ceci pourrait indiquer une alimentation partielle par de l'eau souterraine mais plus de données seraient nécessaires pour valider cette hypothèse.

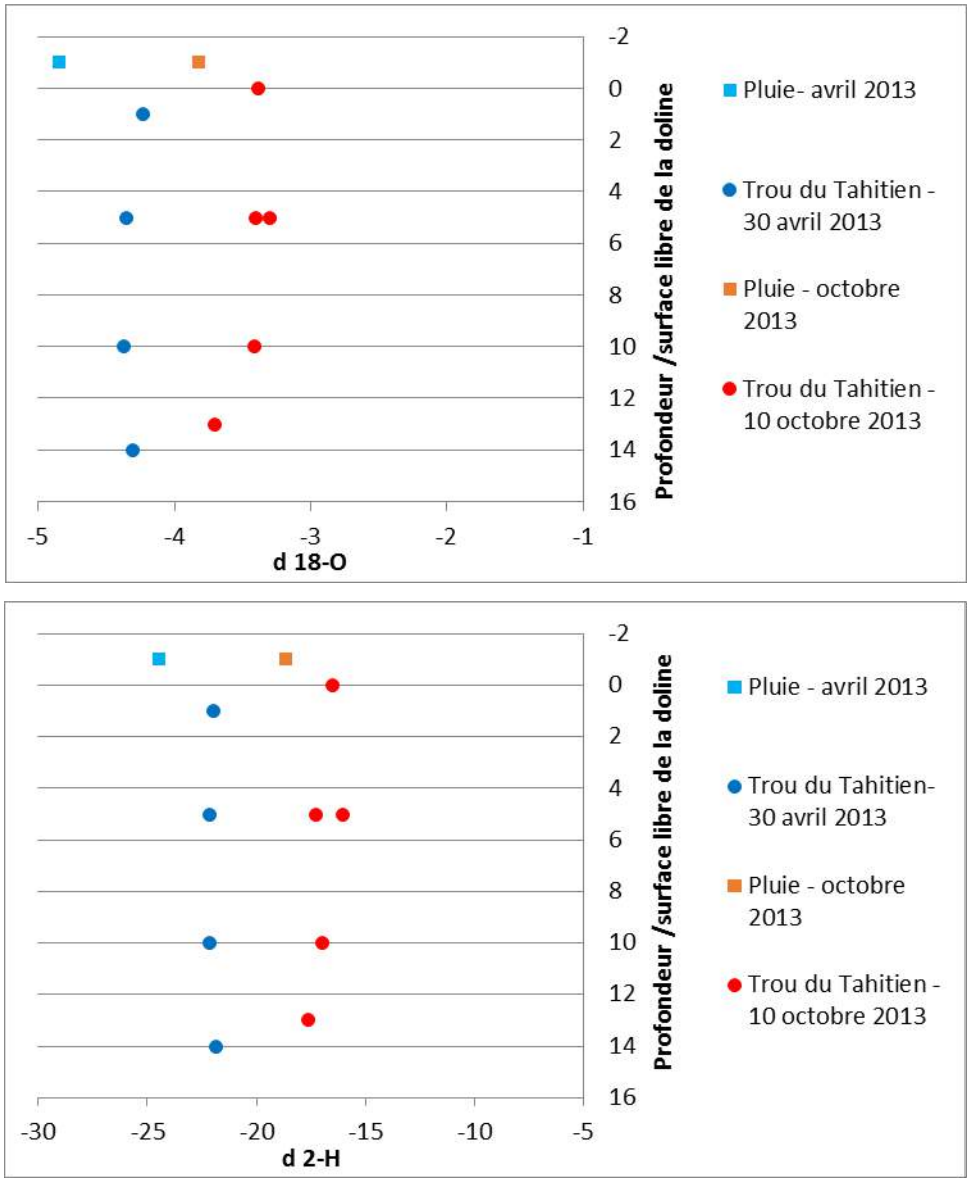


Figure 38. Teneurs en isotopes stables en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau de la doline du Tahitien, en avril et octobre 2013

3.2.3.8 CONCLUSIONS

Le suivi des paramètres *in situ* a permis de caractériser plus en détail la physico-chimique des dolines du Grand Sud qui sont des milieux :

- acides et peu minéralisés,
- généralement très peu turbides, excepté le Trou du Tahitien à certains prélèvements,
- naturellement oxydants,
- globalement homogènes sur toute la colonne d'eau, excepté le trou du Tahitien qui peut présenter une stratification thermique à certaines dates.

Si ces caractéristiques sont globalement partagées par toutes les dolines, il existe cependant des différences sensibles entre certaines d'entre elles concernant des paramètres telle que la saturation en oxygène. Ces différences demeurent toutefois mineures.

3.2.4 ANALYSES CHIMIQUES DES MASSES D'EAU

3.2.4.1 IONS MAJEURS

Deux campagnes de prélèvements d'eau ont été réalisées en Juillet et en Octobre 2013 lors du suivi 2013/2014 des dolines. La mesure des teneurs en ions majeurs (chlorure, sodium, potassium, calcium, magnésium, silice, sulfate) a été réalisée sur chacun des échantillons et les résultats sont présentés dans le Tableau 4 (Les résultats bruts des analyses menées en laboratoire sur l'eau sont présentés en annexe).

Tableau 4. Teneurs en ions majeurs dans l'eau au droit des six dolines lors des campagnes de Juillet et Octobre 2013

Doline	Campagne	Cl	SO_4	Si	Ca	Na	K	Mg
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Lac	juil-13	6,56	1,79	0,03	0,15	2,85	0,18	0,41
	oct-13	7,35	1,76	0,02	0,92	3,73	0,15	0,62
Petite	juil-13	7,17	1,53	0,04	0,16	3,78	0,17	0,48
	oct-13	10,22	2,05	0,03	0,11	4,71	0,18	0,67
Bleue	juil-13	8,27	1,81	0,06	0,21	3,92	0,17	0,73
	oct-13	8,40	1,25	0,04	0,16	3,73	0,13	0,75
Tahitien	juil-13	6,53	1,76	0,05	0,11	3,14	0,13	0,44
	oct-13	7,12	1,25	0,04	0,08	3,07	0,10	0,48
Croissant	juil-13	6,85	1,68	0,05	0,07	3,19	0,11	0,46
	oct-13	6,99	0,98	0,03	0,03	3,14	0,09	0,48
Marécage	juil-13	6,51	1,00	0,05	0,08	3,11	0,11	0,50
	oct-13	7,01	1,04	0,04	0,03	3,23	0,10	0,54
Moyenne	Juillet	6,98	1,59	0,05	0,13	3,33	0,15	0,50
	Octobre	7,85	1,39	0,03	0,22	3,60	0,13	0,59

Dans les eaux exemptes de pollution, les teneurs en ions majeurs dépendent pour beaucoup de la nature géologique du sol. Rappelons que les premiers stades de l'altération des roches ultramafiques se caractérisent par une libération totale des cations alcalins et alcalinoterreux (Ca, Mg, K et Na) et le lessivage du silicium et du magnésium.

Les relevés mensuels *in situ* ont montrés que les dolines sont des milieux peu minéralisés (conductivité faible). Cela se vérifie pour les ions majeurs lors des deux campagnes de prélèvements d'eau (Juillet et Octobre) qui présentent tous des concentrations faibles :

- Les teneurs en chlorure et sulfate sont respectivement inférieures à 8 mg/l et 2 mg/l,
- Les concentrations en silice sont comprises entre 0,02 mg/l et 0,06 mg/l. A noter que les horizons superficiels et les horizons latéritiques sont des couches géologiques appauvries en silice, du fait des processus d'altération qui engendrent la migration du silicium, relativement soluble, en profondeur. A l'inverse, la saprolite et les péridotites, composés principalement d'olivine ((Mg, Fe)2SiO4) et de pyroxène ((Mg, Fe)SiO3), forment des horizons riches en silice.

- Les teneurs en calcium, sodium, potassium et magnésium sont respectivement inférieures à 1mg/l, 5mg/l, 0.2mg/l et 0.8 mg/l. Les sols latéritiques sont, en effet, appauvris en éléments nutritifs fertilisants. De plus, au même titre que le silicium, lors de ce processus d'altération, le magnésium contenu dans les horizons superficiels et latéritiques est rapidement mis en solution et en grande partie évacué. A l'inverse, la saprolite et la péridotite présente des teneurs en magnésium relativement élevées.

Les dolines présentent des teneurs en ions majeurs similaires, qui varient peu au cours du temps. Les faibles teneurs en magnésium et en silice semblent indiquer une origine superficielle des eaux constituant les dolines.

3.2.4.2 ELEMENTS AZOTES ET PHOSPHORES

Les résultats des mesures des paramètres azotés et phosphorés obtenus à la suite des deux campagnes de prélèvements d'eau sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5. Teneurs en éléments azotés et phosphorés dans l'eau au droit des six dolines lors des campagnes de Juillet et Octobre 2013

Doline	Campagne	NH_4 mg/l	NO_x µmol/l	NO_2 µmol/l	PO_4 µmol/l	Ptot mg/l
Lac	juil-13	0,089	1,402	0,061	0,000	0,010
	oct-13	0,068	0,021	0,016	0,037	0,010
Petite	juil-13	0,334	0,866	0,033	0,287	0,001
	oct-13	0,208	0,000	0,000	0,017	0,001
Bleue	juil-13	0,234	18,204	0,089	0,145	0,005
	oct-13	0,392	12,544	0,030	0,016	0,004
Tahitien	juil-13	0,135	10,913	0,146	0,391	0,006
	oct-13	0,181	8,682	0,021	0,065	0,004
Croissant	juil-13	0,160	3,417	0,060	0,119	0,004
	oct-13	0,615	1,122	0,004	0,006	0,006
Marécage	juil-13	0,107	2,919	0,040	0,108	0,009
	oct-13	0,095	0,930	0,039	0,000	0,008

Les concentrations en éléments azotés et phosphorés sont assez faibles ce qui s'explique principalement par la géologie des sols. Cependant, des concentrations non négligeables en PO_4 peuvent cependant être observées dans certaines dolines à l'exemple du trou du Tahitien en juillet 2013, sachant que ces concentrations pourraient s'avérer potentiellement suffisantes pour soutenir un niveau significatif de production primaire.

3.2.4.3 ELEMENTS METALLIQUES

Les teneurs en éléments métalliques ont également été analysées et les résultats sont présentés dans le Tableau 6. A noter que les éléments suivants n'ont pas été indiqués dans le tableau car les valeurs obtenues lors des deux campagnes étaient nulles : cobalt, cuivre, cadmium, plomb, strontium et vanadium.

Tableau 6. Teneurs des éléments métalliques exprimées en mg/l dans l'eau des six dolines lors des campagnes de Juillet et Octobre 2013

Doline	Campagne	Métaux lourds								
		Fe	Mn	Ni	Al	Cr	Zn	As	Ba	B
Lac	juil-13	0,07	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	-	-
	oct-13	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02
Petite	juil-13	0,06	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	-	-
	oct-13	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
Bleue	juil-13	0,10	0,01	0,02	0,03	0,01	0,04	0,01	-	-
	oct-13	0,01	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Tahitien	juil-13	0,14	0,00	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00	-	-
	oct-13	0,07	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Croissant	juil-13	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	-	-
	oct-13	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Marécage	juil-13	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	-	-
	oct-13	0,05	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01

Au même titre que les ions majeurs, les eaux des dolines sont pauvres en éléments minéraux. Le point le plus notable de ces résultats demeurent les relativement faibles concentrations en ETM (Fe, Ni, Cr, Mn), dont la plus grande partie des concentrations mesurées dans la colonne d'eau appartiennent à la phase dissoute (< 0,45 µm). Cela semble indiquer que les oxyhydroxydes de fer qui composent la cuirasse et la grenaille, et auxquels sont généralement liés les autres ETM, sont relativement insolubles.

3.2.4.4 CONCLUSIONS

La chimie des eaux des dolines soutient l'hypothèse d'une origine principalement météoritique des eaux des dolines. En effet, il est constaté un faible degré de minéralisation, avec notamment de faibles concentrations en Mg et Si, deux éléments marquant le passage des eaux au sein des horizons profonds. Il est également intéressant de constater la présence de faibles concentrations en ETM dissous, marquant le caractère relativement insoluble des horizons traversés par les eaux (cuirasse et grenaille). Ces analyses mettent également en évidence le caractère oligotrophe voire ultraoligotrophe de ces milieux aquatiques.

D'un point de vue global, la comparaison des dolines sur l'ensemble de ces paramètres chimiques par une Non-Metric Multidimensional Scaling Analysis (NMDS), montre que deux dolines, le trou du Tahitien et la doline bleue, présentent des profils qui les distinguent des autres et qu'il n'y a pas de différenciation marquée en fonction du mois de prélèvement (Figure 39).

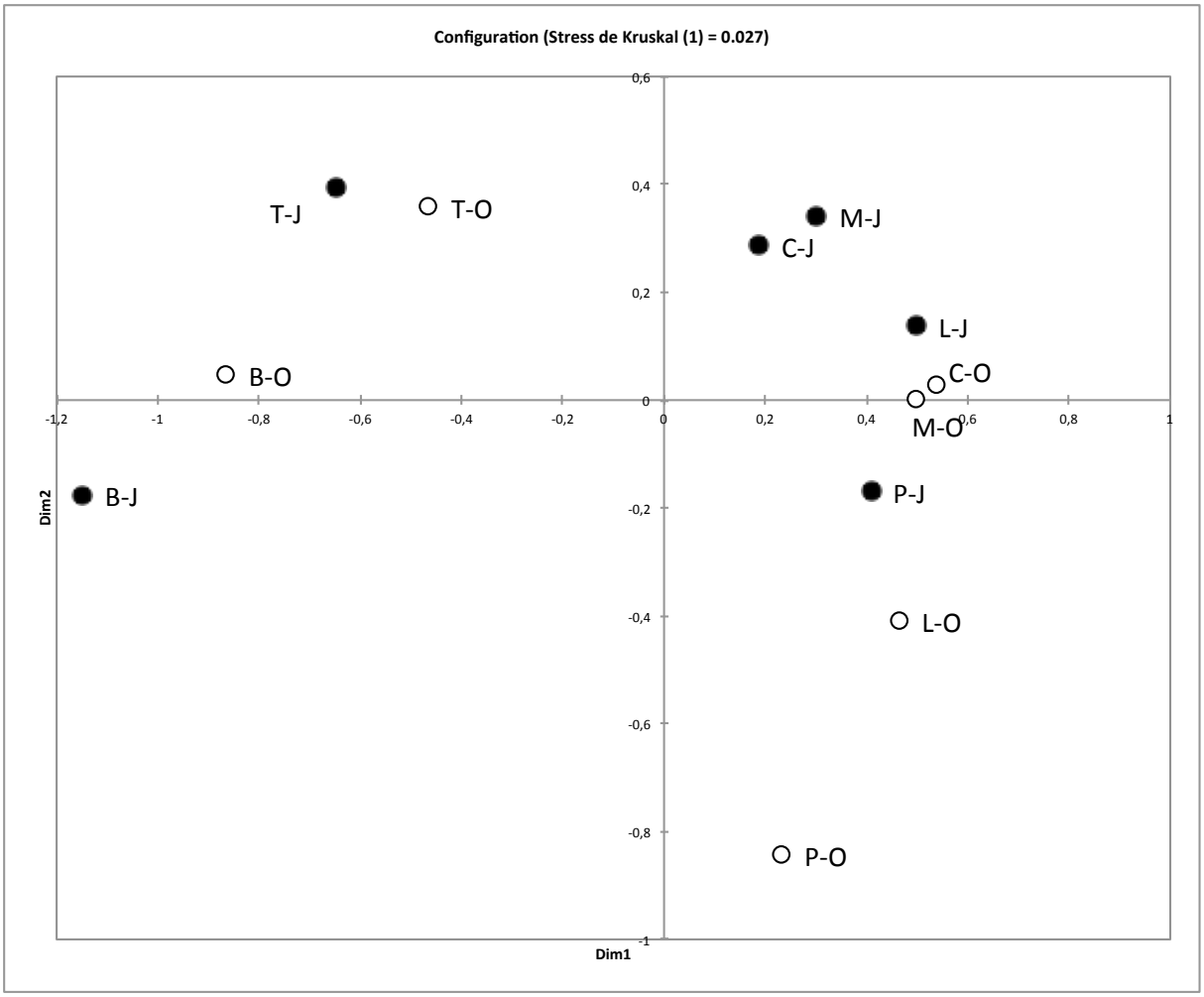


Figure 39. Non-Metric MultiDimentional Analysis réalisée sur l'ensemble des paramètres chimiques mesurés au cours des deux campagnes d'échantillonnage (T= Trou du Tahitien ; B = doline bleue ; P = Petite doline ; M = Doline marécage ; C = Doline croissant ; L = Doline Lac ; -O = Prélèvement d'Octobre ; -J = Prélèvement de Juillet)

3.3 CARACTERISATION DES COMMUNAUTES MICROBIENNES DES DOLINES

3.3.1 EVALUATION DES BIOMASSES CHLOROPHYLIENNES

Les dosages de chlorophylle-*a* qui permettent d'estimer la biomasse des communautés phytoplanctoniques révèlent que ces biomasses sont majoritairement inférieures à 1 µg/l (Figure 40). S'il existe des variations parfois significatives en fonction des lieux et des dates de campagne d'échantillonnage, la plus forte valeur de 4,3 µg/l ayant été observée lors de la Campagne 3 (Avril 2013) d'échantillonnage dans le trou de Tahitien, toutes les valeurs de biomasses chlorophylliennes sont cependant très faibles et elles correspondent à celles observées dans des milieux oligotrophes, voir ultraoligotrophes, où la production primaire microbienne est extrêmement limitée.

Plusieurs processus peuvent potentiellement expliquer ce faible développement des communautés phytoplanctoniques à l'exemple d'une disponibilité très limitée en nutriments (notamment en phosphore et en azote comme l'ont montré les mesures réalisées), de

conditions hydrologiques marquées par des assèchements temporaires qui sont peu favorables aux communautés phytoplanctoniques, d'un pH acide qui est défavorable à de nombreuses espèces ou encore de la présence en concentrations élevées de métaux qui peuvent inhiber la croissance des microorganismes photosynthétiques planctoniques.

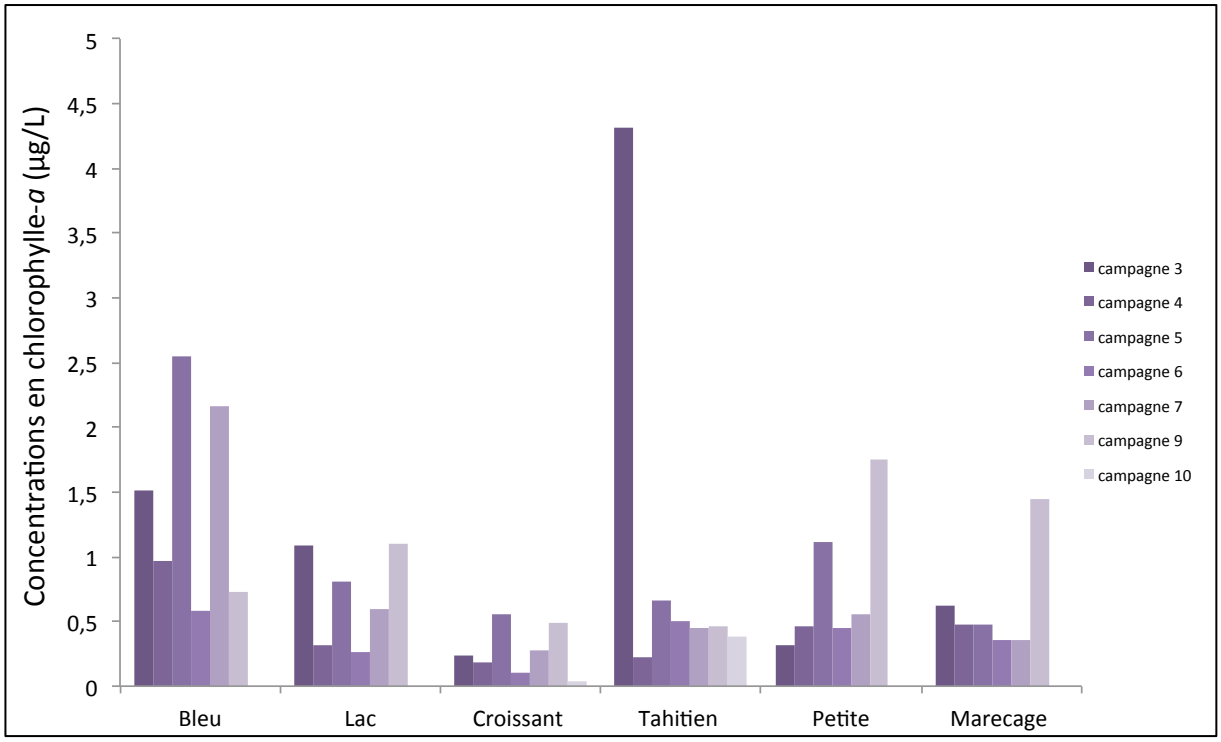


Figure 40. Variations saisonnières des concentrations en chlorophylle-*a* dans les six sites d'étude

3.3.2 COMPOSITION ET STRUCTURE DES COMMUNAUTES PHYTOPLANCTONIQUES DES DOLINES

La richesse des communautés phytoplanctoniques des dolines de Nouvelle-Calédonie s'est révélée très limitée sur la base de l'examen microscopique des échantillons. Les formes les plus couramment observées étaient soit des cellules isolées appartenant au phylum des Dinoflagellés sans qu'il soit possible de déterminer par simple examen au microscope si une ou plusieurs espèces étaient présentes, soit des cellules organisées en filaments qui appartenaient aux phyla des cyanobactéries et des chlorophycées. Contrairement à ce que l'on trouve couramment dans les milieux lentiques continentaux, très peu de diatomées ont été observées (Figure 41).

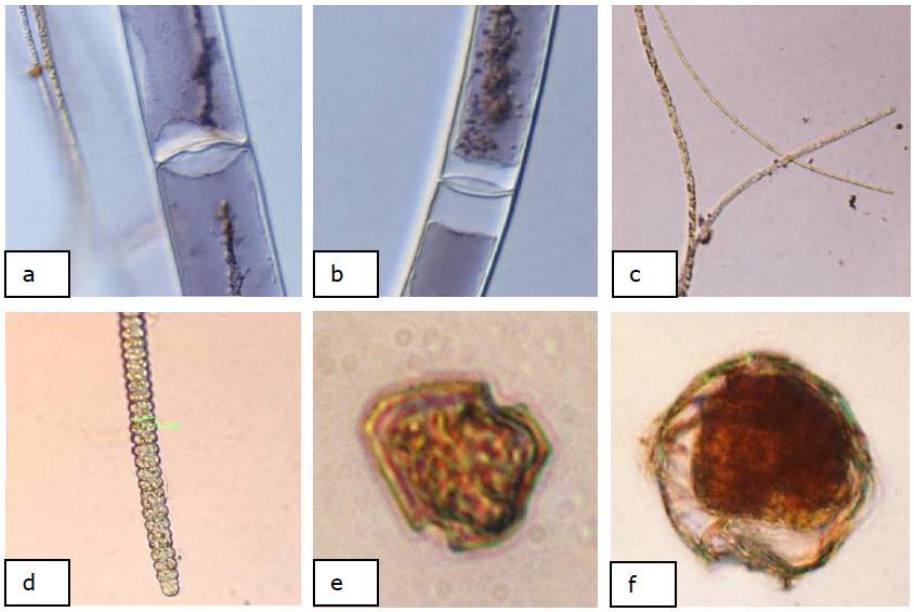


Figure 41. Photographies des espèces phytoplanctoniques dominantes dans les dolines de Nouvelle-Calédonie (a et b : Chlorophycées ; c et d : Cyanobactéries filamenteuses ; e et f : Dinoflagellés)

Comme le révèle la Figure 42, il apparaît qu'au sein des communautés phytoplanctoniques, les Dinoflagellés sont largement dominants dans tous les sites étudiés et à toutes les dates, à l'exception de deux campagnes d'échantillonnage (Campagne 3, Avril-Mai 2013, dans la Doline croissant et Campagne 11, janvier 2014, dans la Doline marécage). Cette classe des Dinoflagellés regroupe en moyenne entre 83 et 99 % des cellules phytoplanctoniques, ce qui est très inhabituel dans les écosystèmes d'eau douce. Une deuxième classe de microorganismes est apparue ponctuellement à de fortes abondances dans la Doline croissant et dans le Trou du Tahitien ; il s'agit de la classe des Chrysophycées qui est représentée par le genre Dinobryon. Enfin, les cyanobactéries filamenteuses des genres *Planktothrix* et *Oscillatoria* et les Desmidiaceae représentées par le genre *Cosmarium* ont pu regrouper ponctuellement jusqu'à 50% des cellules phytoplanctoniques dans la Doline marécage.

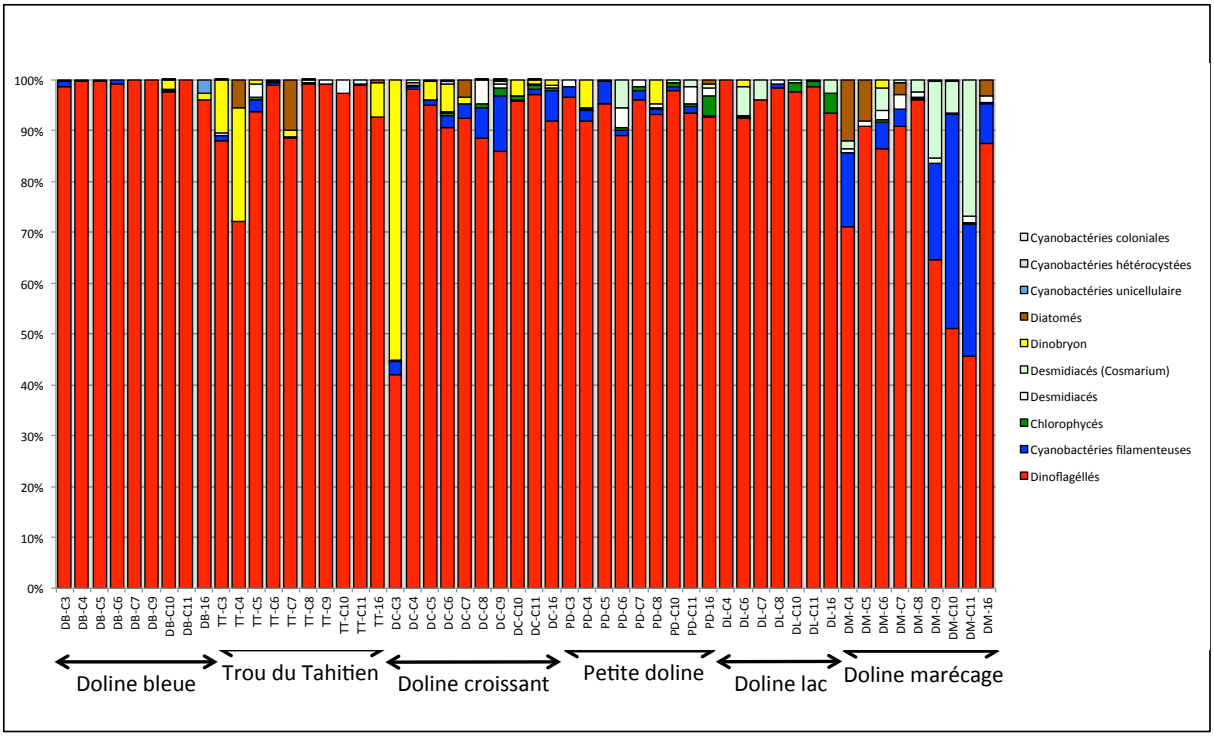


Figure 42. Variations temporelles de la composition des communautés phytoplanctoniques des six dolines ayant fait l'objet d'un suivi.

Cette composition très inhabituelle des communautés phytoplanctoniques pour des écosystèmes aquatiques continentaux est indicatrice des fortes contraintes environnementales qui s'exercent sur elles au sein des dolines. En effet, les Dinoflagellés ainsi que les Chrysophycées du genre *Dinobryon* sont deux classes de microorganismes phytoplanctoniques qui se caractérisent par leur capacité (i) à former des kystes qui leur permettent de survivre plusieurs mois dans des conditions environnementales très défavorables, à l'exemple des périodes d'assèchement, et (ii) par un comportement alimentaire de type mixotrophe pour de nombreuses espèces, qui leur confère la capacité de consommer des bactéries ou de la matière organique en complément de leur activité photosynthétique. Ce caractère mixotrophe est particulièrement intéressant dans les milieux où les ressources nutritives minérales (N et P) sont limitantes, ce qui semble être le cas des dolines.

Il est intéressant de considérer avec attention la Doline marécage car elle présente des abondances cellulaires en cyanobactéries beaucoup plus importantes que celles relevées dans les autres dolines étudiées. En effet, les cyanobactéries qui sont des bactéries photosynthétiques concurrençant les microalgues au sein des communautés phytoplanctoniques, sont généralement des espèces indicatrices de milieux riches en nutriments, notamment en phosphore. Même si les biomasses atteintes dans la doline marécage ne sont pas très élevées, ce qui traduit probablement une limitation des nutriments, leur plus forte abondance semble cependant marquer un fonctionnement biologique un peu différent dans cette doline. Enfin, il faut relever que les cyanobactéries qui se développent dans la communauté phytoplanctonique de cette Doline marécage ne sont pas, à priori, des espèces fixatrices d'azote ce qui aurait pu être attendu pour des milieux limités en azote minéral.

Finalement, afin de disposer d'une vision plus globale des évolutions des communautés phytoplanctoniques dans les six dolines étudiées, nous avons réalisé une Non-Metric Multidimensional Scaling Analysis (NMDS) sur la distribution des groupes

phytoplanctoniques dans tous les échantillons. Cette analyse confirme la très grande homogénéité des résultats obtenus pour les communautés phytoplanctoniques, l'essentiel des stations se regroupant en effet au centre de la figure, ainsi que la distinction de la Doline Marécage et dans une moindre mesure de la doline croissant et du Trou du Tahitien (Figure 39). Cette homogénéité concerne aussi bien l'échelle temporelle (évolution des communautés au cours des campagnes de prélèvements) que l'échelle spatiale (comparaison des communautés dans les six dolines). Elle est intéressante à considérer car généralement, les communautés phytoplanctoniques des petits écosystèmes aquatiques continentaux présentent des différences importantes dans leurs trajectoires saisonnières, même lorsque ces systèmes sont géographiquement très proches les uns des autres. La très grande homogénéité générale des résultats obtenus semble donc confirmer l'existence de très fortes contraintes environnementales qui s'exercent sur ces communautés et qui contraignent fortement leur développement. Parmi celles-ci et comme signalé précédemment, les périodes d'assèchement, les faibles pH, les fortes concentrations en ions métalliques et les faibles disponibilités en nutriments jouent probablement un rôle important dans ce processus.

L'exemple de la Doline marécage montre cependant que ces systèmes peuvent subir une évolution significative de leur fonctionnement au niveau du compartiment phytoplanctonique, ce qui est intéressant à considérer en regard de la question de la vulnérabilité de ces écosystèmes si des pressions liées aux activités minières s'exercent sur elles. En effet, un enrichissement des dolines en phosphore et en azote pourrait se traduire par le développement de biomasses plus importantes de phytoplancton, notamment de cyanobactéries puisque certaines de ces espèces semblent avoir le potentiel pour se développer dans ces écosystèmes.

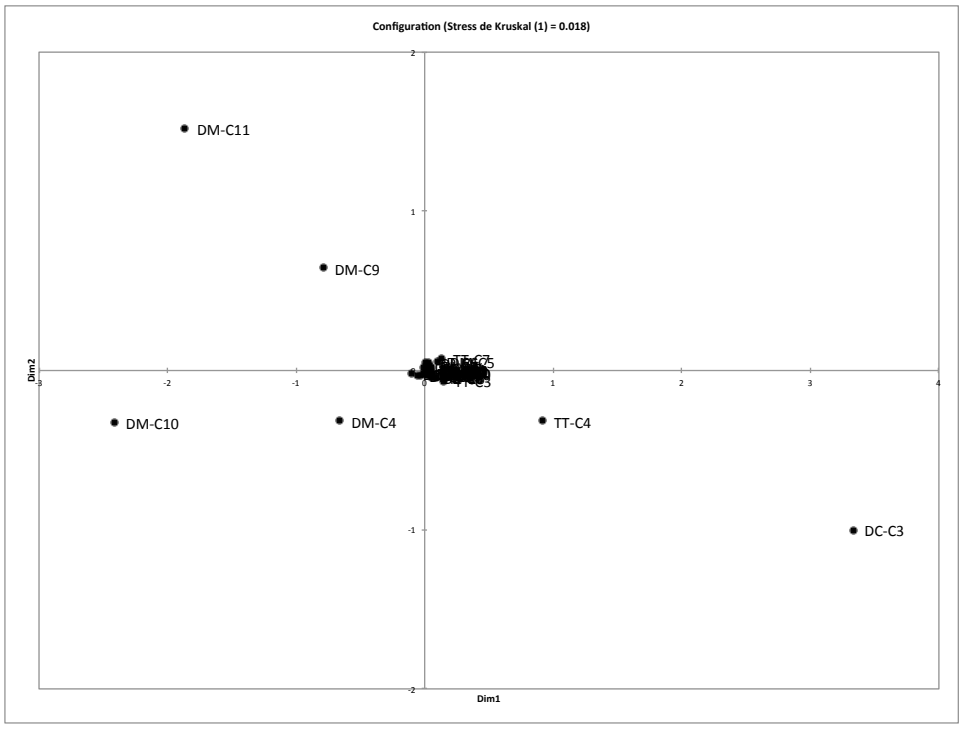


Figure 43. Non-Metric Multidimensional Scaling Analysis (NMDS) réalisée sur une matrice de corrélations de Pearson calculée sur les données d'abondances relatives des grands groupes composant les communautés phytoplanctoniques des six dolines étudiées (DM = Doline Marécage ; TT = Trou du Tahitien ; DC = Doline croissant ; toutes les autres dolines se regroupant au centre de la figure ; CX numéro de campagne)

3.3.3 CARACTERISATION DES COMMUNAUTES MICROBIENNES AU SEIN DES BIOFILMS DES DOLINES

Une évaluation des biomasses chlorophylliennes des biofilms a été réalisée lors des deux premières campagnes d'échantillonnage en utilisant une BenthoTorch, qui est un outil permettant d'estimer in situ la biomasse des trois groupes phytobenthiques dominant généralement les biofilms : les chlorophycées, les diatomées et les cyanobactéries. Les biomasses totales mesurées variaient entre 0,15 et 2,58 µg Chl-*a*/cm^2, ce qui correspond à des biomasses assez faibles, compte tenu de l'épaisseur constatée des biofilms. Cependant, il est établi que la Benthotorch a tendance à sous-estimer les biomasses pour les biofilms épais (Echenique et al. 2016), ce qui semble donc être également le cas ici. Les résultats de la sonde montrent qu'au sein de la communauté phytobenthiques, les cyanobactéries sont en général très largement dominantes, devant les chlorophycées, les diatomées n'étant en général détectée qu'en très faibles quantités, comme nous l'avions également observé pour la communauté phytoplanctonique.

Une approche de séquençage haut-débit (Illumina MySeq) a permis ensuite de décrire avec une grande profondeur de séquences, les communautés bactériennes des biofilms récoltés dans les dolines. Comme le montre la Figure 44, ces communautés se caractérisent tout d'abord par la présence d'une grande diversité d'embranchements et de classes bactériennes représentés au sein des biofilms.

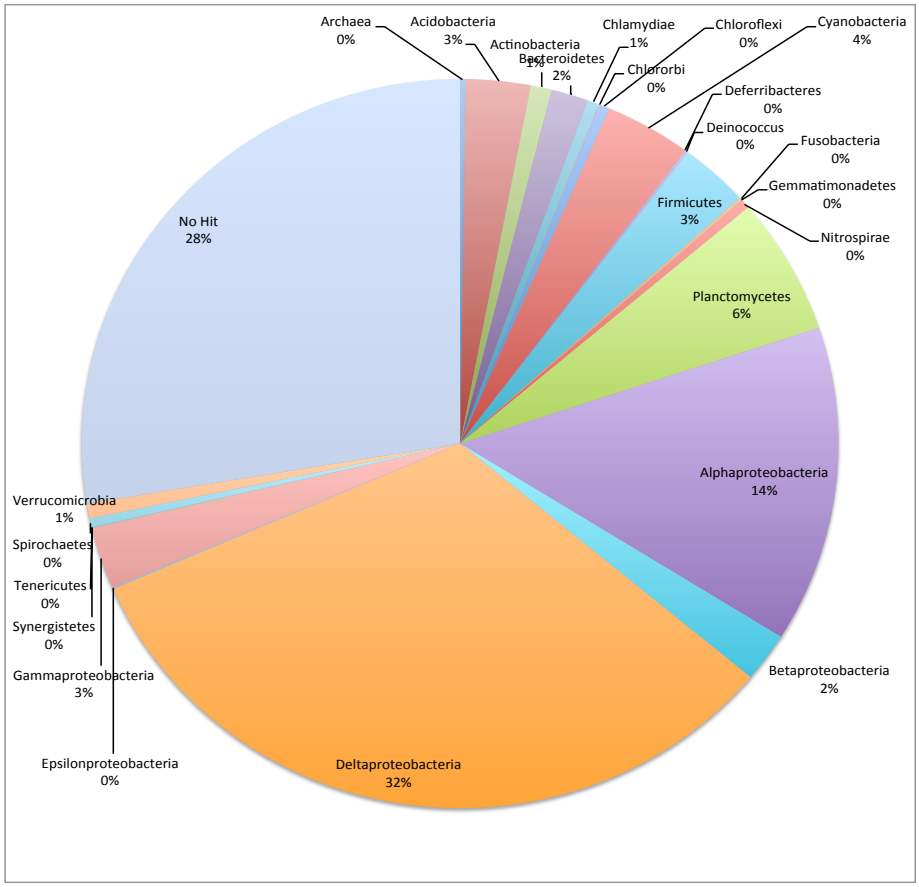


Figure 44. Assignation taxonomique au niveau des embranchements et des classes (pour les protéobactéries) des séquences obtenues à partir des ADN extraits des biofilms récoltés dans les dolines de Nouvelle-Calédonie (les pourcentages égaux à zéro correspondent à des groupes renfermant moins de 1 % des séquences obtenues)

Le second point remarquable de ces assemblages bactériens au sein des biofilms est la proportion exceptionnellement élevée de séquences appartenant à la classe des Deltaproteobactéries et notamment aux ordres (i) des Myxococcales qui sont connues pour leur capacité à former des myxospores qui sont des formes de résistance dans des conditions environnementales difficiles et (ii) des Desulfovibrionales et des Desulfuromonadales qui sont des bactéries anaérobies capables d'oxyder des métaux. Par comparaison, les deltaproteobactéries ne représentent toujours qu'une très faible proportion de séquences dans les biofilms des rivières ou des lacs sur le territoire métropolitain français.

Le troisième point qui doit être souligné est la présence de nombreuses bactéries appartenant à des embranchements (*Acidobacteria*) ou à des genres tels que *Acidisphaera, Acidocella* ou encore *Rhodopila* (*Alphaproteobacteria*) connus pour leurs capacités à se développer dans des milieux caractérisés par un pH acide et à tolérer la présence de métaux ce qui est le cas des eaux des dolines.

Enfin, le dernier remarquable de ces assemblages est la présence de 28% des séquences n'ayant pas d'assignation taxonomique (No Hit). Ces séquences ne peuvent être affiliées à aucun groupe décrit de bactéries et elles correspondent sans doute, pour une part importante d'entre elles, à des espèces, des genres et même des ordres nouveaux. Parmi ces séquences sans affiliation, on trouve des OTUs (une OTU est une Unité Taxonomique Opérationnelle qui renferme des séquences partageant au moins 96 % d'identité de séquence) renfermant un nombre important de séquences, ce qui traduit une forte abondance au sein des biofilms et donc un rôle fonctionnel potentiellement important. Il est donc probable que les biofilms des dolines de Nouvelle-Calédonie renferment de nombreuses espèces qui restent à décrire et qui pourraient posséder un potentiel biotechnologique important en raison de leurs capacités à se développer dans ces environnements très particuliers que sont ces dolines.

L'étude de la distribution des différentes OTUs identifiées dans les biofilms échantillonnés montre ensuite que ces biofilms ne semblent pas montrer d'évolution saisonnière dans leur composition (pas de groupement des échantillons en fonction des campagnes d'échantillonnage) et qu'ils présentent une faible différence en fonction de leur origine géographique (Figure 45). En effet, les échantillons récoltés dans la Doline Lac se situent presque exclusivement du côté négatif du second axe de l'analyse alors que les échantillons issus des autres dolines sont très majoritairement localisés du côté positif. Cependant, la faible valeur d'inertie de cet axe (<10%) révèle dans le même temps que cette structuration spatiale est limitée. L'examen de la structure de la communauté bactérienne révèle que ce qui différencie la doline Lac des autres dolines est la forte abondance de séquences affiliées à des cyanobactéries hétérocystées du genre *Dolichospermum* (ex *Anabaena*) sachant que ces cyanobactéries sont potentiellement capables de fixer l'azote atmosphérique (N_2). Ce résultat conjugué à la présence de nombreuses séquences affiliées à d'autres bactéries potentiellement fixatrices d'azote au sein des biofilms (par exemple au sein de l'ordre des Rhizobiales qui est très représenté dans les biofilms) suggère qu'une des sources importantes d'azote dans les dolines pourrait résulter de la fixation de l'azote atmosphérique par les microorganismes benthiques.

Un autre trait fonctionnel bien représenté au sein des groupes bactériens présents dans les biofilms des dolines est la capacité photosynthétique. En effet, les OTUs les plus abondantes au sein des communautés microbiennes des biofilms se répartissent pour la plupart d'entre elles entre les cyanobactéries qui réalisent une photosynthèse oxygénique et les bactéries pourpres (Rhodobactéries) qui réalisent une photosynthèse anoxygénique. Ces bactéries très abondantes assurent donc une partie de la production primaire au sein des biofilms et elles jouent sans doute un rôle essentiel dans le fonctionnement de l'ensemble

des réseaux trophiques au sein des dolines compte tenu du fait que les biomasses phytoplanctoniques sont très faibles.

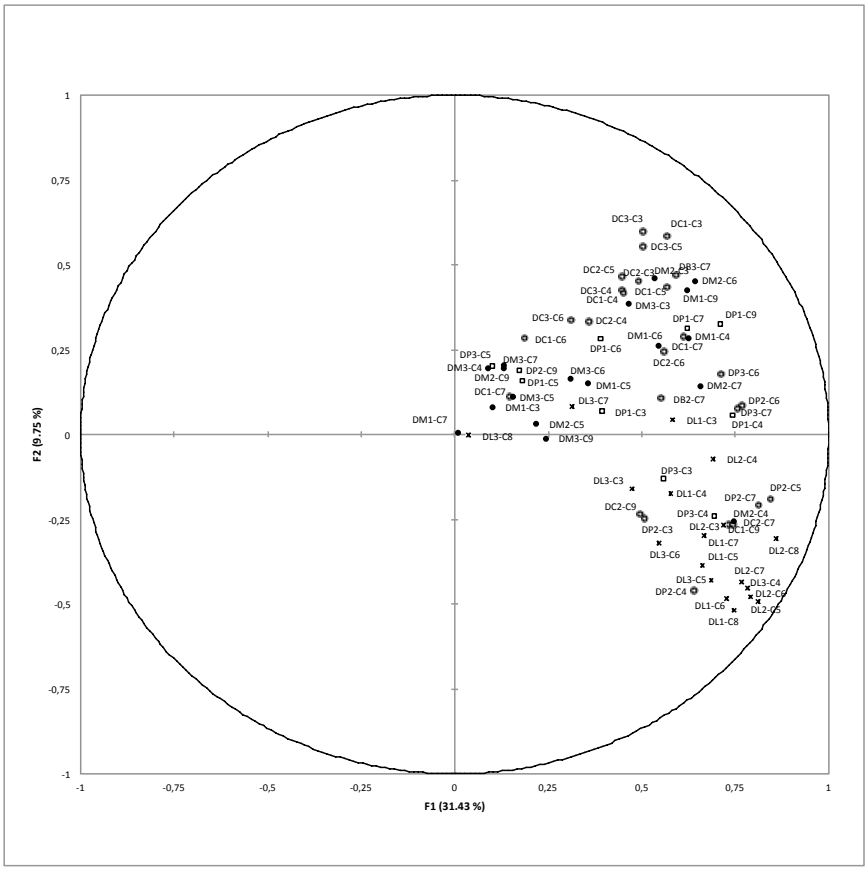


Figure 45. Analyse en Composante Principale réalisée sur tous les échantillons de biofilms récoltés et séquencés (DL = Doline Lac ; DM = Doline Marécage ; DB = Doline Bleue ; DP = Petite Doline ; DC = Doline croissant ; CX = Numéro de campagne)

3.3.4 CARACTERISATION DES COMMUNAUTES ZOOPLANCTONIQUES DES DOLINES

Une analyse de la structure globale des communautés zooplanctoniques des dolines a été réalisée sur la base des dénombrements réalisés à la loupe binoculaire (Figure 46). En l'absence de détermination au niveau spécifique réalisée au microscope par des spécialistes des différents groupes taxonomiques, il n'est pas possible de juger précisément de la diversité du zooplancton mais sur la base de ces observations réalisées à la loupe binoculaire, la diversité de la communauté zooplanctonique semble faible, comme cela avait été déjà observé pour la communauté phytoplanctonique.

Les résultats des comptages réalisés sur le zooplancton sont présentés dans le Tableau 7. Il a été choisi de ne montrer dans ce tableau que les moyennes des abondances observées sur l'ensemble des dates d'échantillonnage.

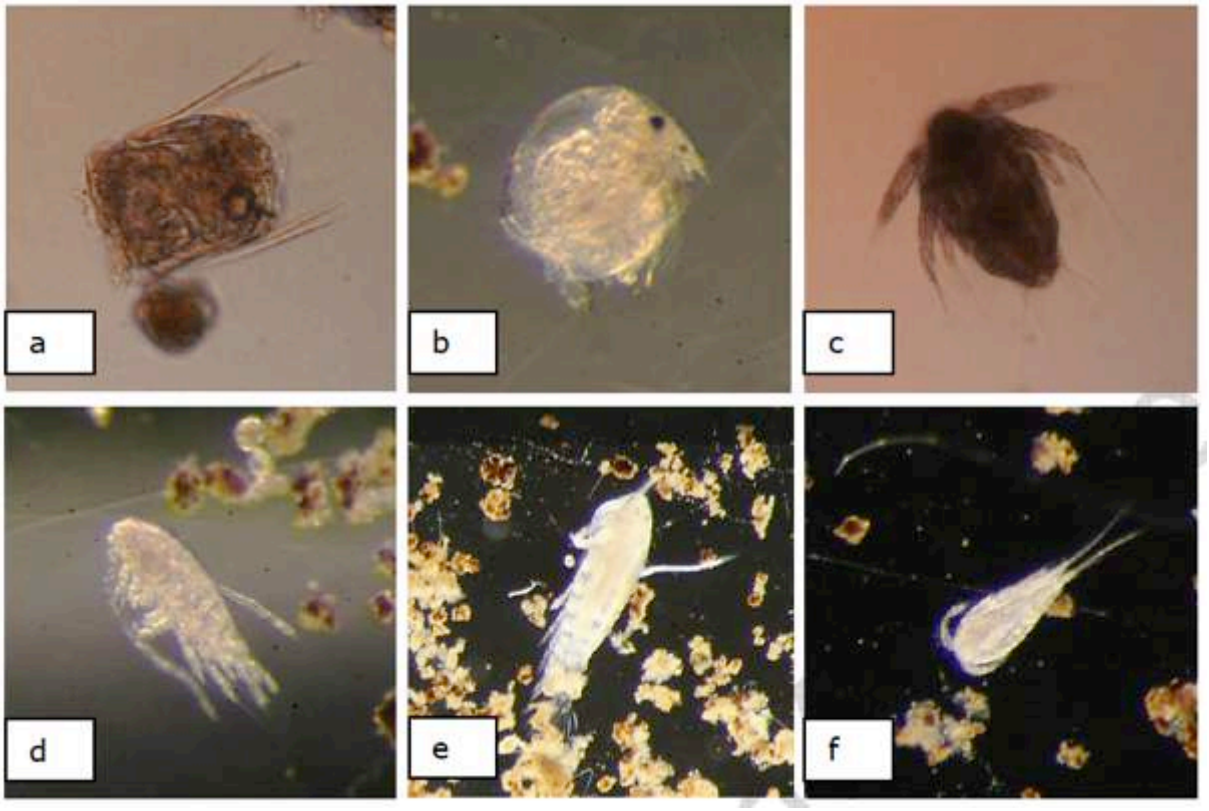


Figure 46. Photographies des organismes zooplanctoniques les plus couramment observés dans les dolines de Nouvelle-Calédonie (a : Rotifère (Polyarthra sp.) ; b : Chydoridé ; c : Nauplius de copépode ; d et e : Calanoïdes ; f : Cyclopoïde)

Tableau 7. Abondances moyennes des différents groupes zooplanctoniques dans chacune des dolines de Nouvelle-Calédonie étudiées

Doline	Petite doline	Doline Bleue	Doline croissant	Trou du tahitien	Doline marécage	Doline lac
Total Rotifera Ind.L-1	**0,22 (7,27%)**	**0,213 (3,81%)**	**0,303 (14,55%)**	**0,163 (7,83%)**	**0,23 (18,07%)**	**0,163 (1,64%)**
Trichocerca sp.	0,07	0,1	0,13	0,03	0,04	0,03
Macrchaetus sp.	0	0,003	0	0	0	0,01
Keratella sp.	0,12	0,08	0,15	0,08	0,12	0,09
Lecane sp.	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03
Polyarthra sp.	0	0,01	0,01	0,003	0,02	0
Synchaeta sp.	0	0	0	0,02	0,01	0,003
Brachionus sp.	0	0	0,003	0	0,01	0
Rotifères indéterminés	0	0	0	0	0	0
Total Cladocera Ind.L-1	**0,06 (1,98%)**	**0,12 (2,15%)**	**0,03 (1,44%)**	**0,07 (3,36%)**	**0,19 (14,93%)**	**0,04 (0,40%)**
Chydoridae	0,06	0,12	0,03	0,07	0,19	0,04
Total Copepoda Ind.L-1	**2,743 (90,73%)**	**5,243 (94,03%)**	**1,75 (84,01%)**	**1,85 (88,81%)**	**0,853 (67,01%)**	**9,72 (97,95%)**
Cyclopoida	0,03	0,35	0,13	0,06	0,11	0,17
Calanoida	0,05	2,48	0,76	1,5	0,13	0,06
Harpacticoida	0,003	0,003	0	0	0,003	0
Nauplii	2,66	2,41	0,86	0,29	0,61	9,49
Total zooplancton Ind.L-1	**3,023**	**5,576**	**2,083**	**2,083**	**1,273**	**9,923**

Le premier résultat frappant est la très faible abondance du zooplancton dans toutes les dolines (< 10 ind./l) qui peut sans doute être rapprochée des très faibles biomasses phytoplanctoniques estimées dans ces écosystèmes.

Les Rotifères, qui forment habituellement un embranchement largement représenté dans la microfaune des eaux continentales, ont une abondance moyenne inférieure à 0,5 ind./l, ce qui est extrêmement faible pour ces organismes de très petite taille. Par ailleurs, seules de très petites espèces algivores ou détritivores (taille voisine de 100 µm) ont été observées dans les dolines et aucune espèce carnivore n'a été recensée.

Au niveau des microcrustacés, on peut constater l'absence totale de Cladocères réellement pélagiques qui sont pourtant essentiels dans de nombreux milieux lacustres. Les organismes typiquement filtreurs comme les Cladocères de la famille des Sididae (genre *Diaphanosoma*) et des Daphniidae (genres *Daphnia*, *Ceriodaphnia*, et *Simocephalus*), fortement dépendants du nanophytoplancton (< 30 µm), qui avaient été recensés dans d'autres écosystèmes d'eau douce de Nouvelle-Calédonie, n'ont pas été observés sur la période d'échantillonnage, ce qui est en accord avec la quasi absence de ces ressources nano-phytoplanctoniqes. Les seuls microcrustacés appartenant au Sous-ordre des Cladocères, sont des Chydoridés de petite taille (environ 300 µm), en particulier des Chydoridés appartenant probablement au genre *Chydorus*. Ce genre regroupe des organismes benthiques détritivores, parfois observés associés à des débris organiques dans la colonne d'eau.

Les Copépodes (moins de 1 mm à 2 mm aux stades adultes), qui forment une sous-classe importante de microcrustacés pélagiques omnivores (souvent algivores aux stades juvéniles et de plus en plus carnivores avec l'âge) sont également très peu abondants. Ces Copépodes sont divisés en trois ordres majeurs : Les Calanoïdes (typiquement pélagiques), les Cyclopoïdes (potentiellement pélagiques mais aussi souvent proches du sédiment), et les Harpacticoïdes (benthiques et intersticiels). Le seul développement non négligeable en milieu pélagique a été noté au niveau des Calanoïdes, avec cependant des abondances moyennes inférieures à 3 ind./l. Ces organismes consomment préférentiellement des algues de taille moyenne et des petits organismes hétérotrophes comme des rotifères (Brandl, 2005). Même si aucune identification à l'espèce n'a été réalisée, il est probable comme décrit par Dussart (1984), que plusieurs des espèces présentes sont endémiques de l'île.

L'examen de l'évolution temporelle et spatiale de la composition de la communauté zooplanctonique des dolines étudiées (Figure 47) montre que :

1. La Doline bleue et le Trou du Tahitien sont caractérisés par des communautés zooplantoniques largement dominées par des calanoïdes (Crustacés copépodes), sauf lors des dernières campagnes d'échantillonnage (C11 et campagne de 2016) où ces communautés sont plus diversifiées.
2. La Doline Lac et la Petite Doline ont des communautés zooplanctoniques dominées par des Nauplius (larves de crustacés), sauf à la campagne C11 et en 2016 où les communautés sont beaucoup plus diversifiées.
3. La doline croissant présente une communauté équilibrée entre les nauplius et les calanoïdes, intermédiaire entre celles décrites précédemment.
4. La Doline marécage présente une communauté zooplanctonique qui subit de fortes variations dans sa composition d'une date d'échantillonnage à une autre, tout en restant toujours très diversifiée.

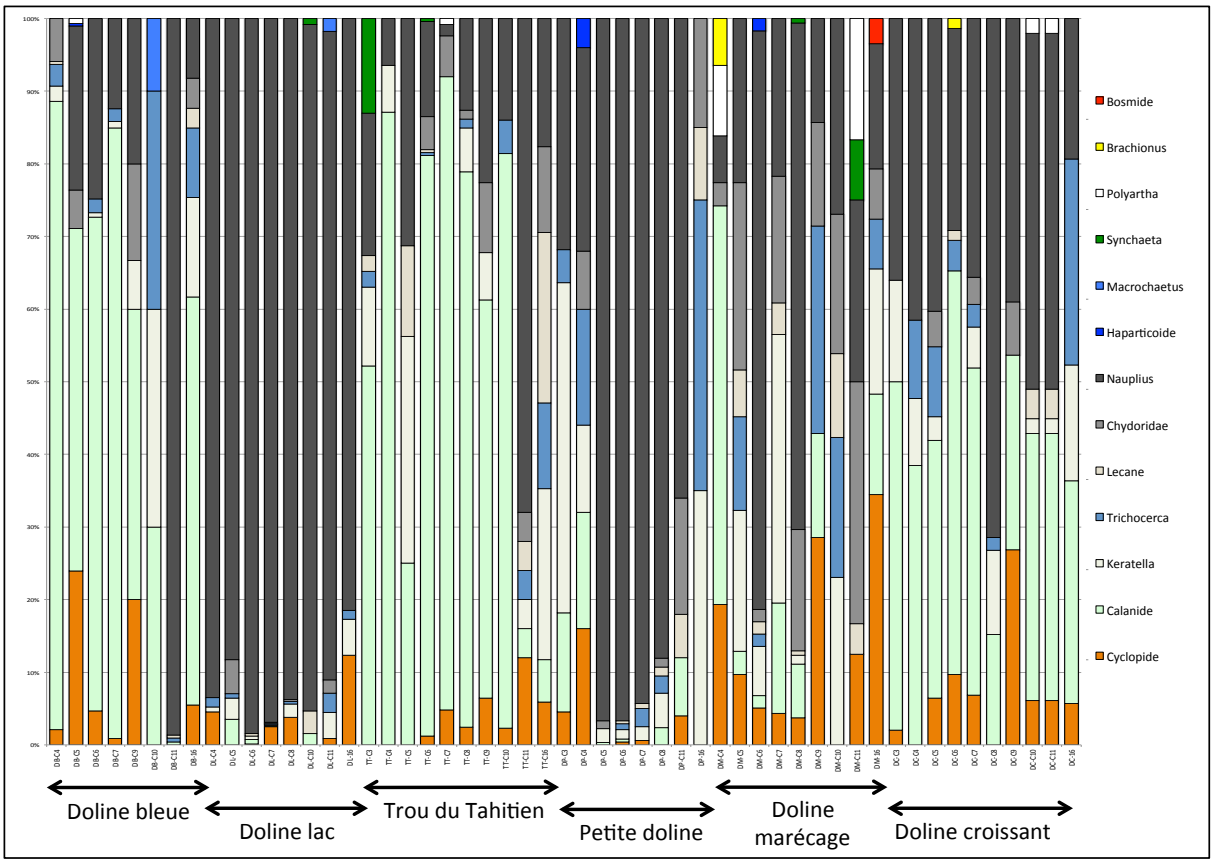


Figure 47. Variations spatiales et temporelles dans la composition des communautés zooplanctoniques des dolines de Nouvelle-Calédonie

En appui à cette analyse qualitative et afin de disposer d'une vision plus globale de ces évolutions spatio-temporelles, nous avons réalisé une NMDS sur une matrice de corrélation de Pearson calculée sur l'ensemble des échantillons disponibles (Figure 48). Cette analyse confirme les résultats visuels de la Figure 47, à savoir (i) que les communautés zooplanctoniques du Trou du Tahitien et de la Doline Bleue présentent une composition et une évolution temporelle assez similaire qui se traduit par le regroupement des points du côté négatif de l'axe des abscisses et positif de l'axe des ordonnées (Groupe 1), (ii) qu'il en est de même pour les communautés zooplanctoniques de la Doline Lac et de la Petite Doline qui se regroupent du côté positif de l'axe des abscisses et négatif de l'axe des ordonnées (Groupe 3), (iii) que la Doline croissant se situe à mi-chemin entre ces deux groupes de dolines (Groupe 2), (iv) que la Doline Marécage présente une très grande dispersion de ses points qui se répartissent sur tout le graphique, ce qui traduit des évolutions temporelles importantes dans sa communauté zooplanctonique, et enfin (v) que les prélèvements réalisés en 2016 dans ces dolines sont en général assez différents de ceux obtenus lors des campagnes antérieures.

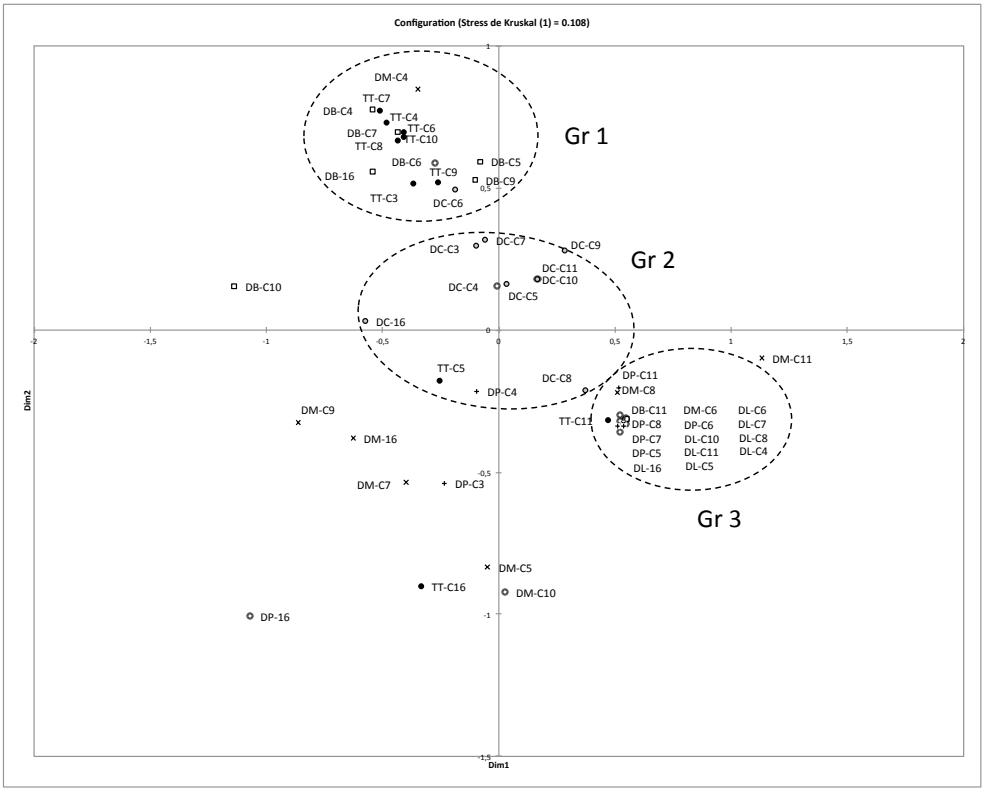


Figure 48. Non-Metric Multidimensional Scaling Analysis réalisée sur les données des communautés zooplanctoniques obtenues dans les dolines étudiées (DM : Doline marécage ; DC : Doline croissant ; TT : Trou du tahitien ; DB : Doline bleue : DL : Doline lac ; DP : Petite Doline ; CX : Numéro de campagne ; C16 = campagne de 2016)

Certaines des différences observées, à l'exemple de la plus grande diversité constatée lors des dernières campagnes d'échantillonnage (C11 et 2016) suggèrent que d'autres éléments (météorologie, cycle hydrologique…) ont également un impact sur la composition des communautés zooplanctoniques, même si ces variations n'altèrent pas le schéma général décrit pour ces communautés décrit lors des suivis 2013-2014.

3.3.5 CONCLUSIONS SUR CETTE PARTIE CONCERNANT LES COMMUNAUTES MICROBIENNES DES DOLINES

L'étude des communautés microbiennes des dolines a permis de mettre en évidence que ces écosystèmes aquatiques se caractérisent par des communautés microbiennes planctoniques (phyto- et zooplancton) particulièrement peu diversifiées et présentant des biomasses/abondances très faibles dans la colonne d'eau. Ces faibles biomasses s'expliquent sans doute, pour une part importante, par une faible disponibilité en nutriments (phosphore et azote) qui limite en premier lieu la production primaire dans la colonne d'eau puis, par un effet de cascade, l'abondance du zooplancton qui est sensée se nourrir sur ces producteurs primaires. Concernant la faible diversité observée dans ces communautés, il est probable qu'elle est liée aux caractéristiques hydrologiques et chimiques de ces dolines. Tout d'abord, les valeurs de pH variant entre 4 et 5,5 suivant les dates et les lieux d'échantillonnage sont un facteur fortement limitant pour le développement d'un certain nombre d'espèces phytoplanctoniques et zooplanctoniques comme cela a déjà été montré

dans la bibliographie. A l'inverse, il est connu que certains groupes, à l'exemple de celui des Dinoflagellés, sont capables de se développer dans de tels environnements. De même, les fortes concentrations en éléments métalliques qui caractérisent ces milieux peuvent être également un facteur limitant la production primaire sachant que de nombreux travaux montrent que la présence de Cuivre et/ou de Nickel en concentrations élevées sont des inhibiteurs de la photosynthèse. Enfin, les périodes d'assèchement de certaines des dolines étudiées peuvent aussi avoir un impact sur la diversité des communautés en favorisant, au sein les communautés phytoplanctoniques, les groupes capables de former des formes de résistance tels que les Dinoflagellés et Dynobrion.

Les biofilms observés sur le substrat de plusieurs dolines contribuent sans doute à une part non négligeable de la production primaire dans ces écosystèmes. Les communautés microbiennes de ces biofilms renferment en effet de nombreuses bactéries photosynthétiques. Par ailleurs, nous avons également observé que parmi les cyanobactéries et d'autres groupes bactériens, de nombreuses espèces étaient potentiellement fixatrice d'azote atmosphérique (N_2), ce qui suggère que cette voie métabolique pourrait être une source d'azote importante pour le fonctionnement des biofilms et plus généralement de ces écosystèmes.

Enfin, pour les communautés zooplanctoniques, la dominance d'organismes détritivores ou omnivores et l'absence de filtreurs suggèrent que le fonctionnement des réseaux trophiques est probablement fortement basé sur les détritus et sur les biofilms, en accord avec nos observations précédentes sur la faible production primaire dans la colonne d'eau de ces écosystèmes.

En regard de la question initiale de la vulnérabilité de ces systèmes, nos études apportent trois informations intéressantes :

- La première est que la faible diversité des communautés microbiennes qui jouent un rôle clé dans le fonctionnement global des dolines de Nouvelle-Calédonie constitue un point de vulnérabilité pour ces écosystèmes car il est bien connu en écologie que la biodiversité confère en général aux écosystèmes des capacités plus importantes de résistance aux perturbations puis de résilience. Des changements rapides dans les conditions environnementales des dolines pourraient donc conduire à de graves dysfonctionnement de ces écosystèmes et s'accompagner d'une faible capacité de résilience.

En relation avec ce premier constat, deux points de vulnérabilité peuvent être identifiés. Le premier est que ces écosystèmes aquatiques sont oligotrophes et donc que tout enrichissement en nutriments, notamment en phosphore et en azote, pourrait se traduire par des modifications importantes de leur fonctionnement. La présence de cyanobactéries dans certaines dolines, même si elles sont pour l'instant en faible abondance, supporte cette hypothèse.

- Le second point de vulnérabilité concerne les modifications qui pourraient intervenir dans les régimes hydrologiques, que ce soit en liaison avec les activités minières ou avec les changements climatiques. En effet, compte tenu de la fragilité intrinsèque de ces systèmes, un allongement des périodes d'assèchement pourrait fortement perturber les communautés biotiques des dolines.

3.4 COMPOSITION DES COMMUNAUTES DE MACROPHYTES

Les macrophytes constituent l'ensemble des végétaux aquatiques ou amphibies visibles à l'œil nu, ou vivant habituellement en colonies visibles à l'œil nu (ex. : algues filamenteuses). Ils comprennent des phanérogames, des ptéridophytes, des bryophytes, des lichens, des macro-algues et par extension, des colonies de cyanobactéries ainsi que des colonies hétérotrophes de bactéries et champignons (également visibles à l'œil nu).

L'abondance sur chaque site a été évaluée par estimation de leur pourcentage de recouvrement pour chaque doline. Sur la quinzaine d'espèces de macrophytes inventoriées lors de la première prospection, neuf d'entre elles étaient régulièrement présentes sur les six dolines choisies pour le suivi :

- *Eriocaulon neocaledonicum lié aux* Mattes (biofilms microbiens).
- *Gahnia cf.sinuosa,*
- *Chorizandra cf.cymbaria,*
- *Drosera cf. neocaledonica*
- *Utricularia sp.*
- *Chorizandra cf. cymbaria,*
- *Juncus sp.*
- *Juncus* aquatique

Eriocaulon neocaledonicum

Drosera cf. neocaledonica

Les taux de recouvrement par les macrophytes s'échelonnent selon les dolines entre 0% (pour le trou Tahitien) et 85%. A l'exception du Trou Tahitien, toutes les dolines sont donc colonisées par les macrophytes.

L'espèce la plus abondante et la plus fréquemment rencontrée est *Eriocaulon neocaledonicum* (photo ci-dessus) qui semblent être particulièrement abondante au fond des dolines qui contiennent des mattes, sur lesquelles *Eriocaulon* semble se développer préférentiellement.

3.5 COMPOSITION DES COMMUNAUTES DE MACRO-INVERTEBRES

3.5.1 ANALYSE GENERALE

Au cours des onze campagnes de prélèvements, ce sont près de 23 000 individus qui ont été collectés, appartenant à 55 *taxa* différents. Si l'on ajoute la campagne 12 de 2016, la richesse taxinomique monte à 58 taxons en incluant la 7ème doline (Pilote) échantillonnée. La diversité biologique présente dans les dolines apparait donc bien plus limitée qu'en milieu courant, avec notamment l'absence totale de représentants des Ordres des Ephéméroptères et des Décapodes ou encore des Mollusques mais aussi de différentes familles appartenant aux Ordres des Odonates (notamment les *Lestidae*, *Isostictidae*, *Synthemistidae*, etc.) et des

Trichoptères (*Helicopsychidae*, *Philopotamidae*, *Polycentropodiae*, etc.). Les listes faunistiques sont présentées en annexes 3. Il a été impossible de retrouver des Crustacés Conchostracés, comme cela a déjà été le cas au début des années 2000 sur la doline Pilote (Bargier & Pöllabauer, 2004). Cependant, la présence d'autres crustacés, les Niphargidae, typiques des eaux souterraines, sur les dolines Croissant, Lac, Marécage et Petite, suggère des échanges importants avec la nappe phréatique sous-jacente.

De manière globale, les Crustacés Copépodes et les Diptères dominent largement le peuplement benthique récolté d'un point de vue densité au cours des onze campagnes, à hauteur respectivement de 47% et 26% (Figure 49). Les Ordres des Trichoptères et des Coléoptères sont ensuite bien représentés (respectivement 11% et 4% des individus déterminés). Les Hétéroptères et les Odonates représentent quant à eux moins de 2% des captures. Si on ajoute à cette année complète de prélèvements mensuels entre Février 2013 et Janvier 2014, les résultats de la campagne de 2016, et ce malgré les très faibles densités de cette dernière campagne, aucun changement n'est à relever.

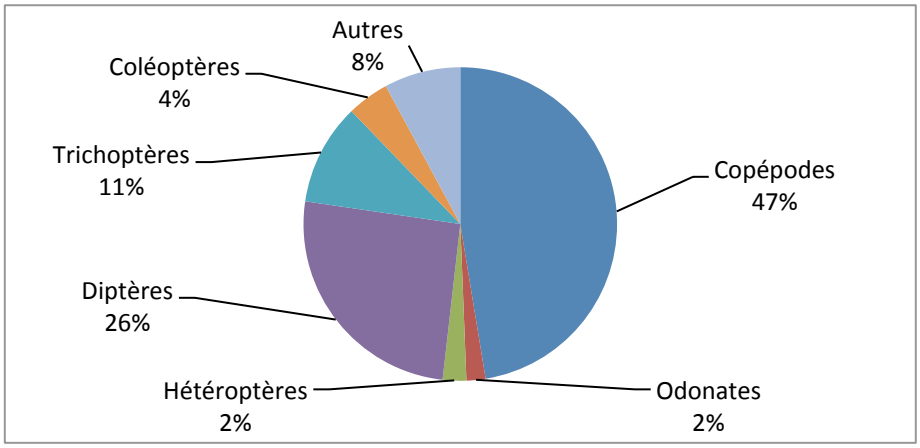


Figure 49. Composition des principaux groupes du peuplement benthique total récolté au cours des douze campagnes de prélèvements

3.5.2 ESPECES REMARQUABLES TYPIQUES DES DOLINES

Coléoptères : Sur la totalité des campagnes, plusieurs coléoptères intéressants sont présents dans les prélèvements. On retrouve ainsi deux *Hydroporinae* (*Coleoptera* ; *Dytiscidae*) endémiques typiques des dolines, décrits ou redécrits en 2010 par l'équipe Allemande du Dr. Balke (Jäch & Balke, 2010).

Il a été possible d'identifier grâce à des échanges avec le professeur Nilsson (Suède) et les docteurs Balke et Hendrich (Allemagne) l'espèce *Megaporus feryi* (Hendrich et al. 2010a) initialement découverte sur la doline Pilote en 1999 (Bargier & Pöllabauer, 2004 ; Hendrich *et al*., 2010a). Non seulement cette espèce (Figure 50, clichés du haut), que l'on considérait comme rare, est présente dans cette doline en 2016, mais aussi dans les six autres dolines étudiées, aussi bien sous la forme larvaire qu'imaginale tout au long de l'année lors des campagnes mensuelles de 2013/2014, avec une présence marquée sur les dolines Croissant et Lac.

D'autre part une seconde espèce *Limbodessus cheesmanae* (Balfour-Browne, 1939) connue de l'Australie à l'archipel de Vanuatu n'est présente que sur les dolines du Trou Tahitien et Bleue, géographiquement très proches l'une de l'autre. Cette espèce (Figure 50, cliché du bas) semble donc moins fréquente et avoir des préférences écologiques plus

strictes que la précédente. Elle n'a pas été retrouvée sur la douzième campagne de prélèvements en Juillet 2016, ce qui ne veut pas dire qu'elle a disparu du secteur considéré puisqu'elle était déjà absente des relevés de Juillet 2013.

Les imagos de ces deux espèces de coléoptères sont connus et parfaitement décrits dans la Littérature, en revanche, aucune description des différents stades larvaires n'existe à ce jour (Nilsson, Hendrich & Balke, *Comm. Pers*).

Figure 50. Deux espèces d'Hydroporinae endémiques, adultes (à gauche) et larves (à droite)

A ces deux espèces remarquables, il est important de signaler la présence d'un autre *Dytiscidae*, quant à lui exotique (originaire de l'Est et du Sud de l'Australie), le *Dytiscinae Onychohydrus scutellaris* (Germar, 1848). Avec des préférences pour un milieu lentique et bien planté (Miller & Bergsten, 2016), il est aussi bien présent au stade larvaire qu'au stade imaginal et découvert sur les dolines Petite et Croissant.

Enfin la découverte la plus intéressante reste la présence d'une espèce très rare d'*Haliplidae*, *Haliplus (Phalilus) oberthuri* (Guignot, 1935), dans les prélèvements de la doline Pilote en Juillet 2016 (Figure 51). Un spécimen adulte mâle a été récolté sur l'hydrophyte *Eriocaulon neocaledonicum*. Ce coléoptère n'avait jamais été retrouvé depuis sa description en 1935. Il avait originalement été découvert en 1883 dans la baie Vata aux « marais de l'anse Vata près de Nouméa » (Fig. 13. p. 241, Hendrich & Vondel, 2010b). Cette zone marécageuse n'existe plus aujourd'hui puisqu'elle a été remplacée par l'extension de la ville de Nouméa qui s'est poursuivie vers le sud. *H. oberthuri* est connu dans le Territoire du Nord

et dans le Queensland, deux Etats du Nord et du Nord-Est de l'Australie où il a été récemment découvert (Hendrich & Vondel, 2010b). Cette espèce n'avait paradoxalement plus été signalée depuis près d'un siècle en Nouvelle Calédonie ce qui pourrait s'expliquer de deux façons. La première est qu'elle n'aurait pas été observée en raison de ses faibles effectifs et la seconde est qu'elle aurait pu être confondue avec une autre espèce, *Haliplus bistriatus*, qui est citée dans un rapport de l'IRD en 2006 comme une espèce exotique envahissante de l'archipel néo-calédonien (Jourdan & Mille, 2006). Ces deux espèces sont en effet très difficile à distinguer (Hendrich & Vondel, 2010). Adepte des milieux lentiques, parfois marécageux, acides et riches en végétation, il peut néanmoins se satisfaire de pelouses inondées en bordure de ruisseau temporaire. Il s'agit, pour la doline Pilote, du tout premier enregistrement de cette espèce dans ce secteur du Grand Sud Calédonien sachant qu'elle n'avait pas été détectée dans cette doline au début des années 2000 (Bargier & Pöllabauer, 2004) et qu'elle ne figure pas non plus dans le guide d'identification des Macroinvertébrés Benthiques de Nouvelle Calédonie (Mary, 2000).

Il s'agit donc d'une redécouverte majeure de cette espèce endémique jusque-là considérée comme présent dans la Littérature mais présumée disparue de l'archipel Néo-Calédonien.

Figure 51. *Haliplus oberthuri*, un Haliplidae remarquable de Nouvelle Calédonie

Trichoptères :

Parmi les quelques familles de Trichoptères présentes dans les dolines, l'une d'elles se caractérise par une diversité plus importante en terme d'espèces. En effet, si la famille des *Ecnomidae* ne semble représentée que par une seule espèce (non identifiée), que la famille des *Hydroptilidae* ne semble représentée que par une seule espèce du genre *Oxyethira* sp., la famille des *Leptoceridae* est quant à elle plus diversifiée. En plus des genres largement rencontrés, quelques nouveaux genres semblent faire leur apparition. Ces nouveaux genres n'ont pu être identifiés ni avec la clé de Nathalie Mary (Mary, 2000) ni avec aucune publication récente ou ancienne abordable de la littérature (que ce soit de Nouvelle Calédonie ou plus largement de la région Australienne).

Le premier « N. gen. fourreau tube arqué en sable », pour nouveau genre à fourreau arqué, a la particularité d'avoir dans la partie postérieure inférieure de la « gena » (les deux demies parties, gauche et droite, qui composent l'essentiel de la tête chez une larve de

Trichoptères), une tache bien marquée (Figure 52, flèche sur le cliché de gauche) et des caractéristiques qui ne correspondent à aucun genre y compris *N. gen. D* (Mary, 2000). Il est présent dans les dolines Lac, Marécage et Petite. Son fourreau est constitué de matériel minéral fin qui ressemble de par sa forme à celui d'un *Helicophidae*.

Le second « N. gen. PIII 4 articles » comporte au niveau de ses pattes III un tibia en deux parties mais ne correspond ni au genre *Triplectides* sp. ni à *Symphitoneuria* sp. L'apotome ventrale de cette espèce est en forme typique d'écus héraldique espagnole (en « U », Figure 52, cliché de droite, en haut à droite). Il tisse un fourreau tubulaire cylindrique de soies très solide et recouvert par une gangue orangée et épaisse de poudre de latérite mêlée d'algues et de soie. Lui aussi ne semble être présent que sur trois dolines, Croissant, Lac et Petite.

Enfin un troisième ressemblant beaucoup au précédent présente un apotome ventral triangulaire presque équilatérale mais ne présente pas de tibia divisé en deux. Le labre est échancré à la façon d'un *Oecetis* dont il présente aussi le caractère typique suivant : les maxilles sont longues et dépassent le labre en longueur. Aucun fourreau n'a été retrouvé. Cette espèce est essentiellement présente sur les dolines Croissant et Petite. Elle est placée en « *Oecetis* ».

Figure 52. Photographies de deux genres de Leptoceridae inconnus

Odonates :

Enfin en terme d'espèces remarquables rencontrées au cours des diverses campagnes de prélèvements, on retiendra la présence de l'espèce de *Libellulidae* dont l'aire de répartition est très étendue (de l'Australie jusqu'à Wallis-et-Futuna). Si elle reste très ubiquiste en Nouvelle Calédonie *Orthetrum caledonicum* (Brauer, 1865), une seule larve a été capturée sur *Eriocaulon neocaledonicum* uniquement sur la doline Bleue en Novembre 2013.

3.5.3 ANALYSES STATISTIQUES ET CLASSIFICATION DES DOLINES

Diverses approches statistiques ont utilisées pour analyser les résultats reposant à la fois sur la faune inventoriée, les dolines considérées et les analyses physicochimiques (métrologiques, sédiments, métaux lourds). Les plus classiquement retenues ici seront l'AFC (Analyse Factorielle des Correspondances) et la CAH (Classification Ascendante Hiérarchique, cluster) pour l'analyse de la matrice de donnée « faune » et l'ACP (Analyse en Composantes Principales) pour l'analyse de la matrice des variables environnementales.

Deux logiciels ont été utilisés pour réaliser tous ces tests, « R » avec le package ADE4 et xlstat.

La première question était de savoir s'il existe des variabilités temporelles des communautés du macrobenthos et si oui sur quelle(s) doline(s) en particulier. Une matrice de données « faune » est créée, elle contient l'ensemble des résultats faunistiques obtenus (résultats des 12 campagnes de prélèvement pour 6 dolines + un prélèvement pour la doline Pilote, soit n=73 échantillons au total, 58 taxons au total).

Après avoir retiré les taxons rares (moins de 5% du peuplement en termes d'abondance s'ils ne sont pas présents sur au moins 3 échantillons ; par exemple le Coléoptère Haliplidae (*Haliplus oberthuri*) et de l'Odonate (*Orthetrum caledonicum*) qui peuvent influencer les résultats des analyses statistiques, une transformation logarithmique des données (log (n+1)) a été réalisée de façon à « lisser » les données.

Le Tableau ci-dessous regroupe les taxons retenus pour l'analyse (codifiés de X1 à X48).

Taxons	**code AFC**	**Taxons**	**code AFC**
Némathelminthes	X1	Chironomini *Harrisius* spp.	X25
Némertiens	/	Orthocladiinae *Corynoneura* spp.	X26
Naididae	X2	Orthocladiinae spp.	X27
Crustacés Cladocères	X3	Tanypodinae spp.	X28
Calanoida	X4	Tanytarsini	X29
Cyclopoida	X5	Culicidae	X30
Crustacés Ostracodes	X6	Dolichopodidae	X31
Niphargidae	X7	Empididae	/
Arachnides Hydracariens	X8	Ephydridae	X32
Collemboles	X9	Limoniidae	X33
Aeshnidae	X10	Tabanidae	/
Aeshna sp.	X11	Ecnomidae	X34
Coenagrionidae	X12	*Oxyethira* sp.	X35
Ishnura sp.	X13	N. gen. fourreau tube arqué en sable	X36
Hemicordulia sp.	/	N. gen. PIII 4 articles	X37
Libellulidae	X14	*Symphitoneuria* sp.	X38
Orthetrum caledonicum	/	*Oecetis* sp.	X39
Tramea sp.	X15	Curculionidae	X40
Corixidae	X16	Colymbetinae	X41
Sigara sp.	/	Dytiscinae spp.	/
Gerridae	X17	*Onychohydrus scutellaris*	X42
Notonectidae	X18	*Megaporus feryi*	X43
Anisops sp.	X19	*Limbodessus cheesmanae*	X44
Cecidomyiidae	/	*Gyrinus* sp.	X45
Ceratopogonidae	X20	*Haliplus oberthuri*	X46
Ceratopogoninae spp.	X21	Hydrophylidae	/
Dasyheilinae spp.	X22	Larve longue	X46
Chironomidae	X23	Larve large	X47
Chironomini indéterminés	X24	Lépidoptères	X48

La Figure 53 présente les résultats sous deux représentations : groupement des données selon (a) le facteur « campagne de prélèvement » et (b) le groupement des données par le facteur « Doline ».

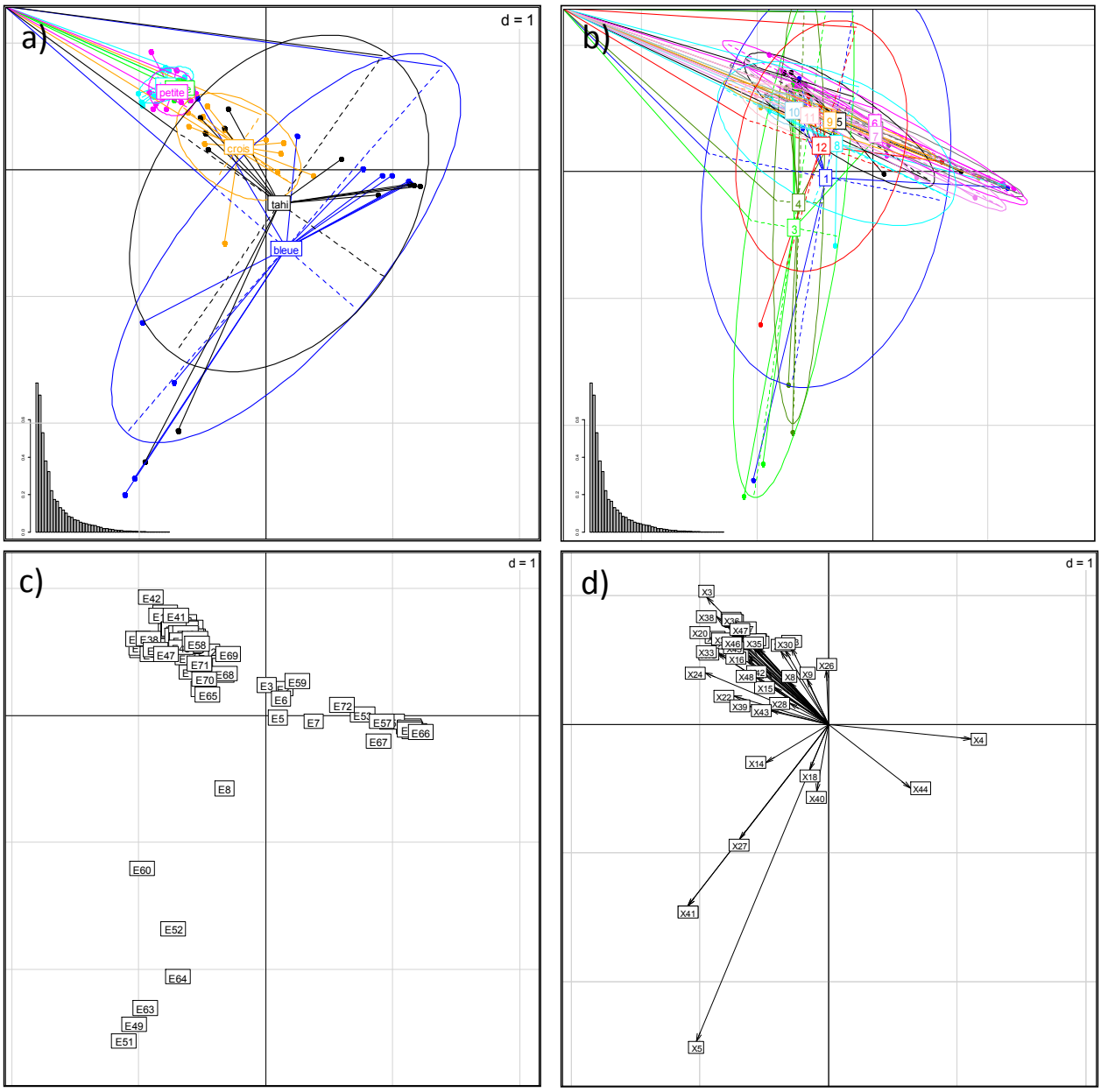


Figure 53. Résultats de l'AFC conduite à partir des résultats faunistiques d'abondance (transformation log(n+1)) obtenus lors des 12 campagnes d'échantillonnage (n=73 échantillons)

Axe 1 : 18.1% ; Axe 2 : 16.6% ; Total de la variance expliquée : 34.7%. a) groupement des échantillons selon le facteur « Doline » (bleue=Doline Bleue, tahi=Trou du Tahitien, crois=Doline Croissant, petite=Petite Doline, Mare=Doline Marécage et Lac=Doline Lac) ; b) groupement des échantillons selon le facteur « campagne d'échantillonnage » (facteur temporel, campagnes numérotées de 1 à 12) ; c) positionnement des échantillons selon les facteurs F1-F2 (codes présentés en fin d'annexe 3) ; d) positionnement des taxons selon les facteurs F1-F2 (voir codification plus haut).

Les axes 1 et 2 de l'AFC expliquent respectivement 18.1% et 16.6% de la variance des données faunistiques, soit au total 34.7% de la variance. Cette valeur assez faible signifie que des facteurs environnementaux non pris en compte dans l'analyse (ex. pH de l'eau, oxygénation de l'eau, etc..) participent probablement à la structuration des communautés du macrobenthos peuplant les dolines ou qu'il n'existe pas de structuration marquée des échantillons.

Le groupement des échantillons par le facteur « doline » (Figure 53a) met en évidence deux groupements de dolines sur la base de leur composition: l'un assez homogène composé des dolines Petite Doline, Lac et Marécage, et un second groupe plus hétérogène composé de la Doline Bleue et du Trou du Tahitien. Les échantillons de la doline Croissant se répartissent à l'interface de ces deux groupements traduisant le fait que la composition de la communauté de la doline Croissant présente des caractéristiques communes avec l'ensemble des autres dolines. La distribution des échantillons relatifs aux dolines Bleue et Trou du Tahitien forme des « patatoïdes » très étalés, ce qui suggère une grande variabilité temporelle des communautés peuplant ces dolines. A l'inverse, les échantillons des dolines Lac, Marécage et Petite Doline sont très regroupés, ce qui traduit une plus grande stabilité temporelle de leur composition.

Le groupement des échantillons par le facteur « campagne d'échantillonnage » (Figure 53b) permet de confirmer qu'il existe une variabilité temporelle (inter-années) dans les données faunistiques. On constate la présence d'un groupe très ramassé comportant la plupart des campagnes de prélèvements, et d'un second groupe beaucoup plus étalé ne comportants que les campagnes 1, 3, 4 et 12. Cette structuration est liée essentiellement à la grande variabilité observée dans la composition des communautés macrobenthiques des dolines Bleue et Trou Tahitien (mois de Février, Avril/Mai, Juin 2013 et Mai 2016).

En comparant la distribition des dolines et des dates déchantillonnages et celles des taxons dans les Figures 53, il ressort que :

- Les Crustacés Copépodes Calanoïdes (code X4 sur la figure) et Cyclopoïdes (code X5) sont plus abondants sur les dolines Bleue et Trou du Tahitien que sur les autres dolines. Le Coléoptère Hydroporinae *Limbodessus cheesmanae* (X44), évoqué dans la partie « espèces remarquables » est caractéristique de ces deux dolines où il est uniquement retrouvé.
- A l'opposé, les Insectes Trichoptères Leptoceridae (les deux nouveaux genres évoqués et *Symphitoneuria sp.*, respectivements X36 à X38), les Crustacés Cladocères (X3) ou encore les Diptères Ceratopogonidae (X20) sont caractéristiques des dolines Lac, Marécage et Petite Doline. Ils sont soient présents seulement sur ces dolines, soient plus abondants dans ces dolines que dans les autres (l'AFC ne donne pas cette information).
- Entre ces extrêmes, on trouve les taxons les plus ubisquites (ex. Hydroporinae *Megaporus feryi* (X43), les lépidoptères (X48), l'Odonate *Tramea sp.* (X15), les Crustacés Amphipodes Niphargidae (X7), etc.

Pour confirmer l'existence de ces groupes de dolines mis en évidence par l'AFC en fonction de la composition de leurs communautés macrobenthiques, la Figure 54 présente les données d'abondance et de richesse moyenne estimées sur ces dolines

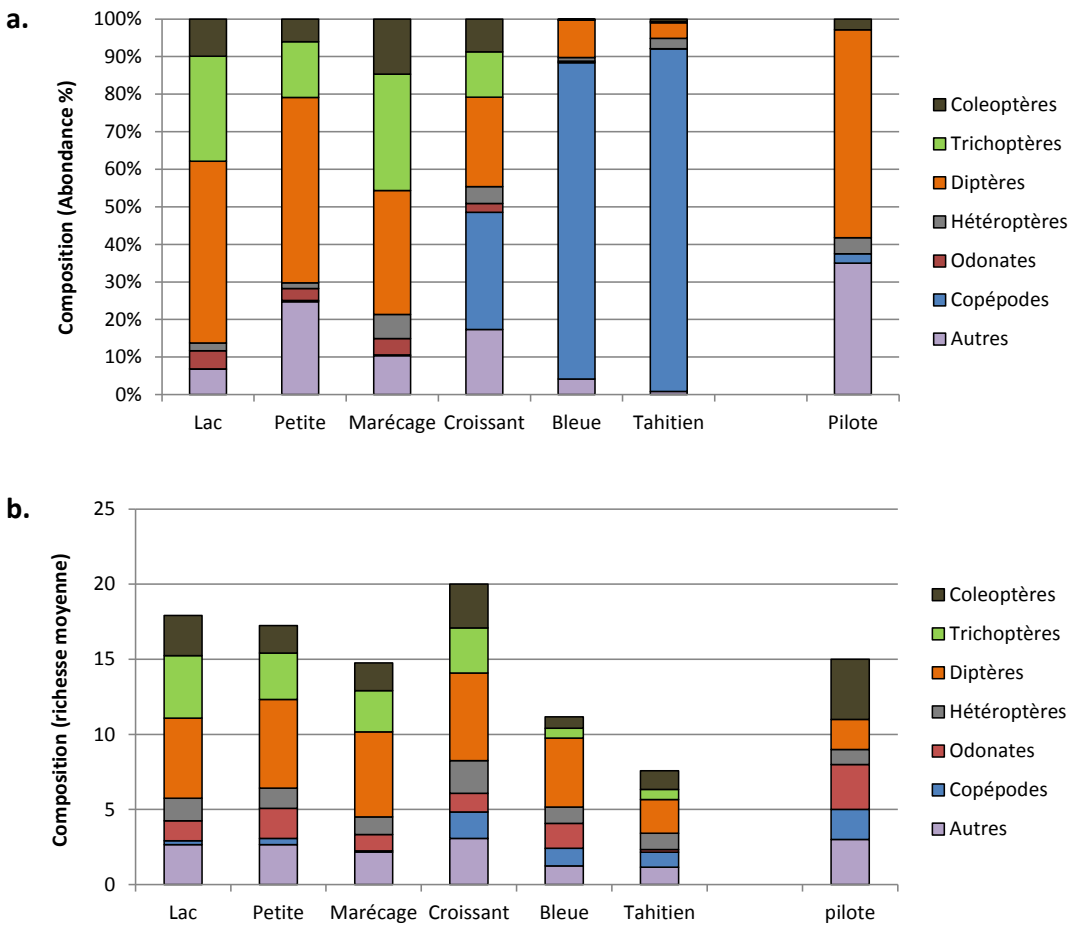


Figure 54. Composition moyenne des communautés pour chacune des dolines (a) composition en terme d'abondance relative des grands groupes taxonomiques (%) ; b) composition moyenne en terme de richesse taxonomique (n=12 échantillons pour chacune des dolines à l'exception de Pilote où n=1 échantillon).

La Figure 54a montre bien que les profils d'abondance des dolines Lac, Petite Doline et Marécage se ressemblent fortement (proportion importante d'insectes Coléoptères, Trichoptères et Diptères et peu de Copépodes). Ces dolines diffèrent des dolines Bleue et Trou du Tahitien qui présentent une faible part d'insectes Coléoptères, Trichoptères et Diptères, mais une large part de Copépodes. Le profil de la Doline Croissant est intermédiaire aux deux groupes décrits précdemment et celui de la Doline Pilote est très différent mais il ne repose que sur une seule campagne d'échantillonnage. En ce qui concerne la richesse taxonomique (Figure 54b), les dolines Lac, Petite Doline et Doline Marécage présentent une richesse totale plus élevée, notamment pour les Coléoptères, Trichoptères et Diptères, que celle des dolines Bleue et du Trou du Tahitien.

Des tests statistiques non paramétriques (tests de Kruskal-Wallis puis tests de Mann-Whitney pour les comparaisons deux à deux ; α=0.05) ont permis de montrer que ces différences dans la composition des communautés sont significatives (Figure 55).

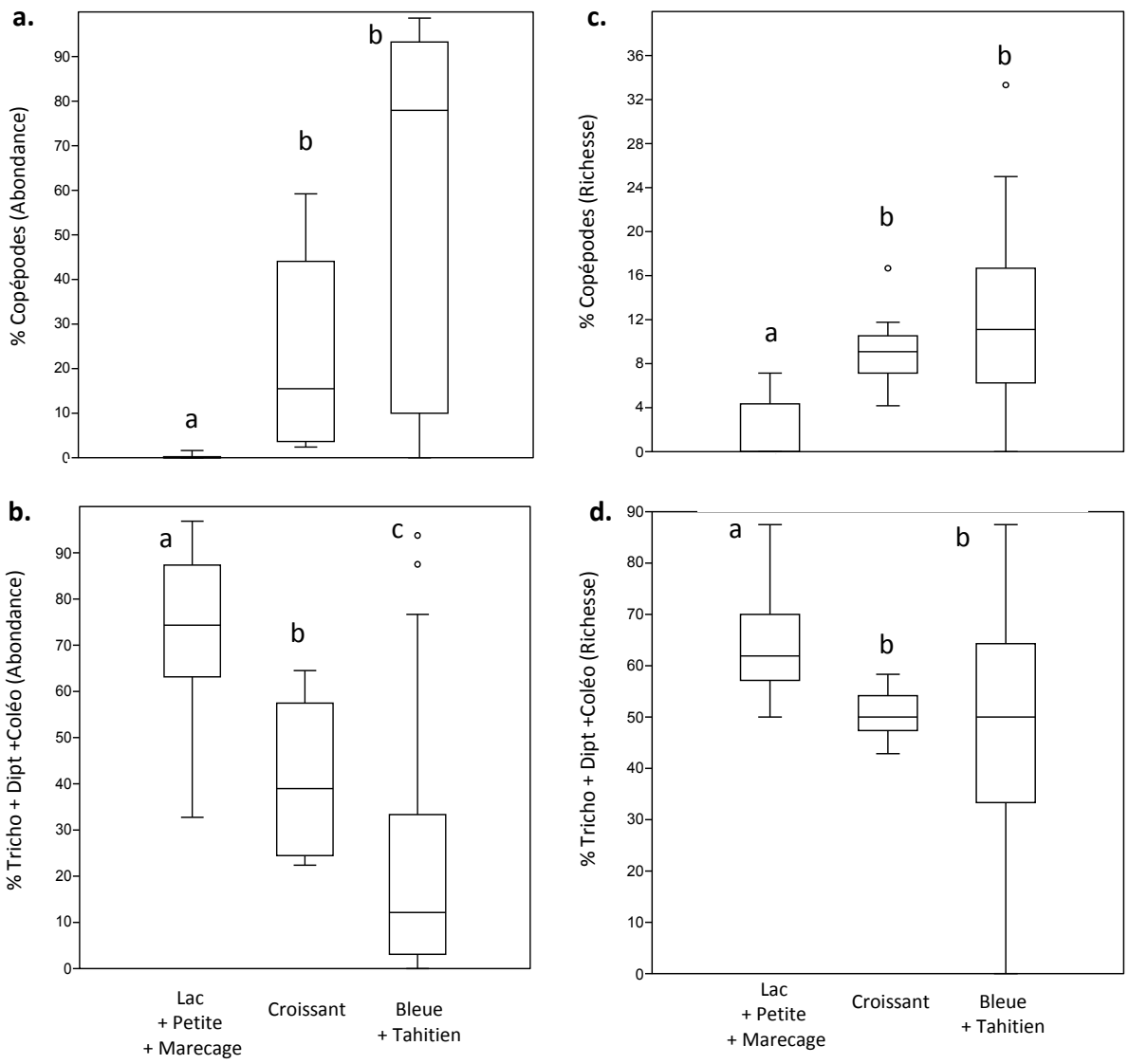


Figure 55. Distributions des valeurs de la proportion dans le peuplement (a, b) et de la richesse (c, d) des Copépodes (a, c) et en Trichoptères+Diptères+Coléoptères (b, d)

Les lettres sur les boîtes à moustaches indiquent les différences statistiquement significatives (test de Kruskal-Wallis, P<0.05).

En conclusion, deux groupes de dolines sont donc clairement identifiés sur la base de leur composition des peuplements faunistiques. Il s'agit du :

- Cluster « Lac + PetiteDoline + Marécage » : dolines à fond plat abritant des peuplements comprenant une part importante (en termes d'abondance et de richesse) d'insectes Trichoptères, Diptères et Coléoptères et une faible part de Crustacés Copépodes ;
- Cluster « Doline Bleue + Trou du Tahitien » : dolines d'éffondrement et en cuvette/entonnoir abritant des peuplements compremant une faible part (en termes d'abondance et de richesse) d'insectes Trichoptères, Diptères et Coléoptères mais une part importante de Crustacés Copépodes .

La Doline Croissant présente un peuplement intermédiaire entre ces deux groupes.

3.5.4 CONCLUSIONS SUR LES COMMUNAUTES MACRO BENTHIQUES DES DOLINES.

Il ressort de l'étude des communautés des invertébrés benthiques que ces milieux lentiques oligo à ultra-oligotrophes sont bien plus pauvres en diversité que les milieux courants. Un grand nombre d'Embranchements est tout de même représenté même si un grand absent doit être signalé, l'Embranchement des Mollusques qui sont des organismes connus pour être filtreurs, détritivores ou herbivores. Cette absence pourrait s'expliquer par la très faible teneur en calcium qui est un élément majeur pour la synthèse de la coquille. Il ressort également que dans ce contexte de diversité faible des communautés macrobenthiques, plusieurs espèces « rares » ont été observées ce qui confère à ces milieux une importance patrimoniale qu'il convient de surveiller et de conserver.

La faible biodiversité des communautés et la présence concomitante d'espèces rares, suggère que les contraintes environnementales de ces dolines exercent une forte pression sur ces communautés. Parmi ces pressions, la disponibilité en nutriments organiques, la composition chimique des eaux (exemple du calcium cité ci-dessus) et les périodes d'assèchement récurrentes de certaines des dolines jouent probablement un rôle important. Parmi les espèces présentes, différentes stratégies sont utilisées pour résister aux périodes d'assèchement. Ainsi, les crustacés passent les périodes sèches sous la forme d'œufs capables de résister à de fortes dessiccations sur de longues périodes et d'autres organismes tels que les oligochètes s'enfouissent en profondeur dans les sédiments. Les capacités à se déplacer des insectes volants peuvent leur permettre de recoloniser rapidement les milieux dès que les conditions sont favorables.

4. SYNTHESE-CONCLUSIONS

Ce travail a permis de préciser la distribution spatiale des dolines dans la zone Sud Goro. Au total, près de 8601 objets ont été considérées comme des dolines grâce à la précision des données du LIDAR aéroportées fournies par Vale-NC. Les dolines ont pu être classées en fonction de la pente de leur flancs, soit par ordre décroissant : doline d'effondrement, en cuvette/entonnoir et à fond plat. Les dolines d'effondrement et en cuvette/entonnoir indiquent un système pseudokarstique actif alors que les dolines à fond plat sont sédimentées et pourraient être isolées de tout système pseudokarstique actif.

Concernant le fonctionnement hydrologique des dolines, les différentes mesures effectuées ont permis de mettre en évidence que l'alimentation en eau des dolines se fait pour une grande partie par l'eau de pluie, ainsi qu'en témoigne la faible conductivité électrique des eaux et le pH acide de ces dernières. Cependant les résultats obtenus (en particulier la relation entre le niveau d'eau et la pluie) suggèrent une alimentation retardée pour plusieurs des dolines étudiées, ce qui pourrait s'expliquer par une alimentation partielle par la nappe superficielle, en accord avec la faible minéralisation observée. Dans le cas de la doline du Tahitien où la connexion avec l'aquifère est reconnue géologiquement, les mesures en isotopes stables de l'eau sont compatibles avec un mélange entre les eaux superficielles et la nappe souterraine des saprolites grossières. Concernant plus spécifiquement les échanges dolines aquifère, leur quantification nécessite des données de nature piézométrique et de nivellement. Des piézomètres nivelés existent au niveau de la doline du Tahitien ainsi qu'un enregistrement de son niveau mais nous n'avons pas eu accès aux données. Cependant, suite aux nombreuses discussions avec J.F. Folio (Vale NC), il apparaît que cette doline est en équilibre hydrostatique avec les aquifères des saprolites. Pour l'ensemble des autres dolines l'établissement d'un réseau piézomètrique nivelé dépassait largement les possibilités du projet "Dolines". La composition des eaux des dolines qui est proche de celle de l'eau de pluie et la typologie des dolines nous permettent tout de même de proposer les deux hypothèses suivantes :

- Les dolines à fond plat sont alimentées par les pluies et en général en équilibre avec l'aquitard des latérites même si, compte tenu de la faible perméabilité du fond des dolines et des latérites, des déséquilibres transitoires sont possibles, par exemple après une forte pluie (eau dans la doline au-dessus de la nappe des latérites) ou en cas de forte évaporation (doline à sec).
- Les dolines de type cuvette/entonnoir dont le fond est peu sédimenté et atteint les saprolites, sont en équilibre hydrostatique avec la nappe des saprolites mais les eaux de ces dolines se mélangent lentement avec celle de l'aquifère et leur composition reste proche de celle de l'eau de pluie.

Concernant la physico-chimie des dolines, les résultats obtenus dans le cadre de ce programme ont permis de montrer que ces écosystèmes se caractérisent par le caractère acide de leur pH qui varie entre 4,0 et 5,5, leur très faible minéralisation (les valeurs de conductivité variant de 26 et 44 µS/cm et les concentrations en ions majeurs sont très faibles, <0,5 mg/l pour le calcium par exemple), leur très faible turbidité inférieure à 10 NTU en dehors de certains événements de pluie, et globalement faiblement chargés en nutriments même si des valeurs ponctuelles d'orthophosphates atteignant 35 µg/l ont été observées. De façon plus étonnante, les concentrations en ETM dans la colonne d'eau se sont avérées assez faibles, les plus fortes concentrations concernant le Fer puis dans une moindre mesure l'Aluminium, en accord avec les résultats obtenus sur les sédiments qui montrent qu'ils sont principalement constitués de Fer et, dans une moindre mesure d'Aluminium de Chrome.

Concernant la biodiversité et le fonctionnement biologique des dolines, ces écosystèmes se caractérisent en premier lieu par leur très faible biodiversité en comparaison de celles observées habituellement dans les milieux lentiques, que ce soit pour les

communautés phytoplanctoniques, zooplanctoniques ou macrobenthiques. Cependant, il faut noter que si la richesse spécifique de ces communautés est limitée, ces écosystèmes hébergent un certain nombre d'espèces rares, en particulier au sein de leur macrofaune benthique. Par ailleurs, il faut également souligner qu'un seul compartiment biologique présente une richesse et diversité élevée, celui des biofilms benthiques qui se développent dans toutes les dolines à l'exception du Trou du Tahitien. Ces biofilms sont en effet constitués d'un assemblage de bactéries présentant une grande diversité taxonomique et fonctionnelle, dont une part importante d'entre elles n'a pas pu être taxonomiquement assignée à une espèce, un genre ou une famille connus.

En second lieu, ces écosystèmes se caractérisent par une très faible production primaire dans la colonne d'eau comme en attestent les faibles biomasses mesurées du phytoplancton. Cette production primaire très limitée a, par un effet de cascade, des conséquences sur la communauté zooplanctonique qui présente des abondances très faibles en regard de ce qui est habituellement observé dans de tels écosystèmes. La limitation en nutriments minéraux et les conditions extrêmes de vie dans ces dolines (pH acide et périodes répétées d'assèchement) expliquent sans doute ce phénomène. Finalement, il apparaît que le compartiment benthique est celui qui joue probablement le rôle fonctionnel le plus important pour la plupart de ces dolines, que ce soit par sa contribution dans la production primaire, par son rôle de « support » pour le développement de macrophytes, ou encore comme source de nourriture pour la communauté macrobenthique.

L'ensemble des caractéristiques biologiques de ces dolines suggère que ces écosystèmes présentent une vulnérabilité potentielle importante en raison notamment de leur très faible diversité. Il est en effet bien établi en écologie que la biodiversité des communautés permet à celles-ci (i) d'être plus résistantes aux modifications qui peuvent survenir dans leur environnement, et (ii) de présenter une meilleure résilience lorsque ces environnements sont perturbés.

Même s'il serait nécessaire de disposer de plus de dolines pour étayer nos observations, il semble exister deux groupes distincts de dolines si l'on prend en compte l'ensemble des résultats obtenus lors de cette étude.

Le premier groupe est celui du Trou du Tahitien et de la doline bleue qui présentent des caractéristiques très similaires que ce soit au niveau de la chimie, du zooplancton, du macrobenthos et dans une moindre mesure du phytoplancton.

Le second groupe est celui des dolines à fond plat qui se distinguent des deux autres dolines, notamment sur la base des analyses chimiques, des communautés zooplanctoniques et macrobenthiques, mais qui présentent dans le même temps plus d'hétérogénéité entre elles. Ceci pourrait s'expliquer par leur nombre plus important (4), mais aussi par le fait que deux d'entre elles sont en eau de façon permanente alors que les deux autres le sont temporairement, ou encore que la doline croissant présente un profondeur plus importante que les trois autres.

Ainsi, ces premiers résultats acquis sur les six dolines ayant fait l'objet d'un suivi annuel, révèlent que ces écosystèmes présentent des caractéristiques partagées qui sont une grande importance en terme de conséquences sur leur fonctionnement, à l'exemple du pH acide de leurs eaux, de leur caractère oligotrophe et de la faible biodiversité des communautés qu'elles hébergent. Cependant, ces écosystèmes montrent dans le même temps des différences sensibles aussi bien dans leur fonctionnement physico-chimique que biologique. Ces différences mériteraient d'être mieux documentées (plus de dolines faisant l'objet de suivis sur de plus longues périodes), notamment dans la perspective de la mise en place d'une protection de ces écosystèmes si particuliers et finalement si peu connus.

5. RECOMMANDATIONS POUR UN SUIVI SUR LE LONG TERME DES DOLINES

Nos travaux ont permis de montrer que les dolines de Nouvelle Calédonie constituent des écosystèmes extrêmement originaux, tant du point de vue de leur fonctionnement hydrologique, physico-chimique et biologique, ce qui les rend probablement uniques au niveau national. **Par ailleurs, les résultats obtenus sur les communautés biologiques qui révèlent une faible biodiversité concomitante à la présence d'espèces rares et peut-être même endémiques à ces milieux, confirme le fait que la Nouvelle-Calédonie constitue bien un hot spot de biodiversité qu'il convient de préserver.**

Si notre étude a apporté de nombreuses informations nouvelles, il n'en demeure pas moins que de multiples questions se posent encore concernant par exemple, les processus à l'origine de la formation de ces dolines ou leur fonctionnement hydrologique et biologique. Pour apporter des réponses à ces questions, il serait nécessaire de mobiliser des moyens importants, que ce soit pour réaliser des travaux ponctuels, par exemple dans le but de préciser la genèse des dolines, mais aussi pour mettre en place des suivis sur le long terme afin de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique et biologique de ces écosystèmes.

Outre l'amélioration des connaissances « fondamentales » sur ces écosystèmes, ces suivis permettraient aussi de disposer de données de surveillance pour suivre leur évolution temporelle. En effet, en plus de l'impact potentiel de l'activité minière qui génère des pressions que s'exercent localement sur ces systèmes, les dolines sont, comme l'ensemble des écosystèmes terrestres, soumis aux changements globaux dont les effets commencent à être bien documentés partout dans le monde et qu'il conviendrait donc également de connaître sur les dolines. En particulier, les changements climatiques peuvent considérablement modifier l'hydrologie de ce type d'écosystèmes avec des conséquences plus ou moins dramatiques sur les communautés biotiques. **Ainsi, si des changements surviennent dans les dolines dans les années futures, la grande difficulté sera de déterminer quel est l'impact relatif des activités minières et des changements globaux dans ces modifications. C'est la raison pour laquelle, il nous semble absolument nécessaire de mettre en place un suivi pérenne de quelques dolines.**

Une telle démarche nécessite une réflexion globale qui pourrait s'inscrire par exemple dans le cadre de la création d'un observatoire des dolines de Nouvelle Calédonie. Une telle structure permettrait en effet (i) d'assurer une continuité dans le temps des suivis réalisés, par exemple en terme de protocoles de collecte et d'analyse des données, (ii) de bancariser les données obtenues et de les rendre disponibles à l'ensemble des acteurs potentiellement concernés et (iii) de réaliser des synthèses annuelles pour alimenter les réflexions et actions des décideurs et gestionnaires. Pour qu'un Observatoire soit véritablement opérationnel, il demande d'associer des scientifiques, des gestionnaires et décideurs et des usagers, afin de prendre en compte l'ensemble des préoccupations exprimées. Divers modèles d'observatoires existent déjà sur les milieux aquatiques sur lesquels il serait possible de s'appuyer. Cet Observatoire des dolines calédoniennes pourrait également prendre la forme d'un Observatoire plus global du pseudo-karst calédoniens si la nécessité s'en faisait sentir.

6. RECOMMANDATIONS POUR UN SUIVI ALLEGE DES DOLINES

Nous ne disposions pas lors de cette étude de dolines présentant différents degrés de perturbations, seule la doline pilote localisée à proximité du site industriel de Vale-NC étant connue pour avoir subi des rejets chimiques. De ce fait, il ne nous a pas été permis de dimensionner un véritable outil de diagnose de la qualité écologique des dolines, basé par exemple sur la présence ou l'absence d'espèces présentant des sensibilités diverses à des polluants.

En revanche, nos résultats permettent de dresser un premier référentiel de qualité correspondant à un « état naturel » du climat physico-chimique et biologique de ces plans d'eau.

Le tableau ci-dessous synthétise les gammes de valeurs de références pour les différents paramètres suivis :

Paramètre	Gamme de valeurs de référence	Paramètre	Gamme de valeurs de référence
Température (°C)	Min. : 18,5	**Turbidité (NTU)**	Min. : 1,5
	Moyenne : 23,5		Moyenne : 7
	Max. : 32,6		Max. : 25
Conductivité (µS/cm)	Min. : 26	**Redox (mV)**	Min. : 304
	Moyenne : 34		Moyenne : 396
	Max. : 44		Max. : 552
pH	Min. : 4,06	**Concentration Chl-*a* (µg/l)**	Min. : 0,1
	Moyenne : 4,75		Max. : 4,5
	Max. : 5,6	**Concentration en zooplancton (ind./l)**	Min. : 2
Concentration en oxygène (mg/l)	Min. : 5,0		Max. : 10
	Moyenne : 7,35	**NH4 (mg/l)**	Min. : 0,06
	Max. : 9,5		Moyenne : 0,2
Saturation en oxygène (%)	Min. : 58		Max. : 0,7
	Moyenne : 85	**PO4 (mg/l)**	Min. : 0,001
	Max. : 104		Moyenne : 0,099
Cl (m/l)	Min. : 6,5		Max. : 0,5
	Moyenne : 7,5	**Mg (mg/l)**	Min. : 0,4
	Max. : 10,5		Moyenne : 0,55
Ca (mg/l)	Min. : 0,03		Max. : 0,75
	Moyenne : 0,17		
	Max. : 1		
K (mg/l)	Min. : 0,09	**Na (mg/l)**	Min. : 2,5
	Moyenne : 1,4		Moyenne : 3,5
	Max. : 2		Max. : 5

Fe (mg/l)	Min. : 0,09	**Mn (mg/l)**	Min. : 0,001
	Moyenne : 1,4		Moyenne : 0,003
	Max. : 2		Max. : 0,01
Ni (mg/l)	Min. : 0,003	**Al (mg/l)**	Min. : 0,003
	Moyenne : 0,01		Moyenne : 0,016
	Max. : 0,029		Max. : 0,026
Cr (mg/l)	Min. : 0,001	**Co (mg/l)**	Min. : 0,001
	Moyenne : 0,005		Moyenne : 0,001
	Max. : 0,012		Max. : 0,001
Si (mg/l)	Min. : 0,023	**Zn (mg/l)**	Min. : 0,003
	Moyenne : 0,039		Moyenne : 0,009
	Max. : 0,064		Max. : 0,035
As (mg/l)	Min. : 0,001	**S (mg/l)**	Min. : 0,283
	Moyenne : 0,004		Moyenne : 0,616
	Max. : 0,009		Max. : 1,05
SO4 (mg/l)	Min. : 1	**P (mg/l)**	Min. : 0,001
	Moyenne : 1,5		Moyenne : 0,006
	Max. : 2		Max. : 0,01

Les résultats obtenus au cours de l'étude montrent que dans le cadre d'un suivi routinier de dolines pouvant être potentiellement impactées par les activités minières, le choix de quelques paramètres pourrait être suffisant pour détecter des changements significatifs dans le fonctionnement de ces dolines.

C'est ainsi qu'au niveau des **paramètres physico-chimiques**, nous avons retenu trois paramètres qui pourraient faire l'objet de mesures in situ :

- **Température**
- **pH**
- **Conductivité**

Ces trois paramètres nous renseignent en effet sur différents processus dont la charge ionique de l'eau qui pourrait être potentiellement modifiée par les rejets miniers. C'est ainsi que les résultats des suivis effectués par Vale-NC dans la doline Pilote impactée par des rejets avaient montré des valeurs de conductivité trois fois supérieures à celles usuellement mesurées dans les autres dolines de la région (conductivité voisine de 200 µS/cm), en accord avec des concentrations en sulfates bien supérieures (40< SO_4<60 mg/l en 2014). La température est quant à elle un indicateur important de l'influence potentielle des changements climatiques.

Pour les **paramètres biologiques**, nous avons fait le choix de préconiser un suivi des concentrations en **chlorophylle-*a***.

En effet, il est apparu que les dolines étaient des écosystèmes oligotrophes où la production primaire est fortement limitée par les disponibilités en nutriments. Une augmentation des valeurs de chlorophylle-*a* qui est un indicateur de la biomasse phytoplanctonique permettrait donc de suivre l'évolution de l'état trophique de ces milieux, sans avoir recours à des dosages de nutriments plus lourds et plus coûteux.

Enfin, il nous semble important d'avoir aussi, dans les dolines sélectionnées pour le suivi routinier, une **mesure des hauteurs d'eau** qu'il faudrait à ramener à la pluviométrie de la zone afin de détecter s'il existe des tendances significatives dans les variations de ces hauteurs et d'en rechercher leur origine (perturbations liées aux activités minières ou changements climatiques).

Si pour les paramètres sélectionnés, des valeurs situées en dehors des gammes de valeurs décrites dans le tableau étaient détectées, il serait alors nécessaire de procéder à des analyses chimiques complémentaires en laboratoires afin de détecter l'origine de la perturbation. De même, il serait également nécessaire de rechercher, par des analyses biologiques complémentaires, si ces modifications du climat physico-chimique se répercutent sur la diversité et le fonctionnement écologique du plan d'eau.

En aucun cas, un suivi allégé tel que préconisé ci-dessus, ne pourra se substituer à un vrai suivi pérenne des dolines sur une gamme de paramètres beaucoup plus large tel que recommandé dans le chapitre précédent. En effet, un tel suivi fondé sur la mesure d'un nombre restreint de paramètres ne permettra de mettre en évidence que des changements conséquents liés par exemple à des événements de pollution. Un suivi plus ambitieux à réaliser dans le cadre d'un observatoire pourrait quant à lui permettre par exemple de détecter, par l'étude des communautés biotiques, des évolutions beaucoup plus fines des écosystèmes liées aux changements climatiques qui ne pourraient être perçues par ce suivi allégé.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bargier N. & Pöllabauer C., 2004. Rapport d'Etude de suivi de l'impact d'un site pilote d'extraction minière sur la faune aquatique de la doline de l'usine pilote, du Creek de la Baie Nord et du Déversoir. Bureau d'étude Erbio, 66p.

Biotop, 2009. Etude des communautés benthiques du creek de la Baie Nord. Rapport de fin d'étude.

Biotop, 2010. Suivi de la qualité biologique des eaux de surface du site de Vale NC-Année 2010. Rapport de fin d'étude.

Bondu-Crozel R. & Rey N., 2010. La karstification en zone non sédimentaire, Montpellier: Maison des Sciences et de l'Eau, Projet tutoré, Université Montpellier II.

Brandl Z., 2005. Freshwater copepods and rotifers: predators and their prey. Hydrobiologia, 546, 475-489.

Dussart, B.H. 1984. Sur quelques Crustacés Copépodes de Nouvelle-Calédonie. Rev. Hydrobiol. trop. 17 (4), 301-308.

Echenique-Subiabre, I., Dalle, C., Duval, C., Heath, M.W., Couré, A., Wood, S.A., Humbert, J.J. & Quiblier, C. 2016. Application of a spectrofluorimetric tool (bbe benthotorch) for monitoring potentially toxic benthic cyanobacteria in rivers. Water Research 101, 341-350.

ERBIO, 2005. Rapport de synthèse d'Erbio sur les écosystèmes d'eau douce.

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

Fritsch, E. 2012. Planche 15: Les sols/Chapitre II: Les milieux. In Atlas de la Nouvelle-Calédonie, Bonvallot J, J-C G, Habert E (eds). IRD-Congrès de la Nouvelle-Calédonie: New Caledonia.

Fritsch E., Juillot E., Dublet G., Fandeur D., Fonteneau L., Martin E., Auzente A.L. et al. 2014. Analyse fine de minerais latéritiques (approches pétrographique, minéralogique, géochimique et isotopique). Rapport final 2014.

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

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

Graba M. & Sauvage S. 2013. Interaction between local hydrodynamics and algal community in epilithic biofilm, Water research 47, 2153-2163.

Guillot B. & Peyrot B. 1979. Etude du fonctionnement des vallées sèches du plateau de Mbé (Congo) : problèmes hydrologiques et morphologiques. Cahiers ORSTOM. Série Sciences Humaines, 16 (3), 205-231

Haouet S. 2013. Biodiversité et fonctionnement des dolines de Nouvelle-Calédonie. Rapport de stage de Master II, Encadrants : G. Lacroix, JF Humbert & Bioemco-Bio eKo Consultants.

Hendrich L., Balke M. & Wewalka, 2010a. DYTISCIDAE: Hydroporini (Coleoptera). In : Jäch & Balke (eds.): Water beetles of New Caledonia, 149-162.

Hendrich L. & Vondel B.J., 2010b. HALIPLIDAE (Coleoptera). In : Jäch & Balke (eds.): Water beetles of New Caledonia, 237-242.

Jäch M., & Balke M., 2010. Water Beetles of New Caledonia, Jäch & Balke (eds.), 449p

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

Jeanpert J., Genthon P., Maurizot P., Folio J.L., Vendé L., Leclerc M., Serino J., Join J.L. & 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.

Jeanpert, J. 2017. Structure et fonctionnement hydrogéologiques des massifs de péridotites de Nouvelle Calédonie, Thèse Univ. La Réunion, 225p.

Jourdan H. & Mille C. 2006. Les invertébrés introduits dans l'archipel néo-calédonien : espèces envahissantes et potentiellement envahissantes. Première évaluation et recommandations pour leur gestion. IRD : Espèces envahissantes dans l'archipel néo-calédonien, Question 1.163-214.

Laganier R. 1994. Contribution à l'étude des processus d'érosion et des risques naturels dans les îles du Sud-Ouest Pacifique (Nouvelle-Calédonie et Iles Salomon), Géographie, Université des Sciences et Technologies de Lille-Flandres-Artois.

L'Huillier L., Jaffre T. & Wulff A. 2010. Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration. Païta : IAC Editions, 412p.

Lupankwa K., Love D., Mapani B., Mseka S. & Meck M. 2006. Influence of the Trojan Nickel Mine on surface water quality, Mazowe valley, Zimbabwe: Runoff chemistry and acid generation potential of waste rock. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 31, 789-796.

Marquet G., Keith P. & Vigneux E. 2003. Atlas des poissons et des crustacés d'eau douce de Nouvelle-Calédonie. Paris : Publication du Muséum d'Histoire Naturelle, 283p.

Mary N. 2000. Evaluation de la qualité des Eaux des rivières de Nouvelle-Calédonie. Guide d'identification des Macro-invertébrés Benthiques des cours d'eau en vue de l'application de l'Indice Biotique de la Nouvelle-Calédonie, 100p.

Mendonça A., Pires A. & Barros J. 1994. Pseudosinkhole occurrences in Brasilia, Brazil. Environmental Geology 23, 36-40.

Miller K. B. & Bergsten J. 2016. Diving Beetles of the World. Systematics and Biology of the Dytiscidae, Johns Hopkins University Press, 320 p

ORSTOM. 1989. Atlas de la Nouvelle Calédonie et dépendances. Nouméa : Edition du Cagou, 91 p.

Pelletier B. 2003. Les minerais de nickel de Nouvelle-Calédonie. GEOLOGUES-PARIS 30-37.

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

Sevin B., Maurizot P. & Vendé-Leclerc M. 2012. Carte géologique du Grand Sud de Nouvelle-Calédonie au 1/50 000. Service Géologique de la Nouvelle-Calédonie - Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

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.

Trescases J.J. 1975. L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale, Paris: ORSTOM, Thèse de doctorat, Université Louis-Pasteur de Strasbourg.

Van Gemerden H. 1993. Microbial Mats : A Joint Venture, Marine Geology, 113, 3-25.

Vicat J.P., Mvondo H., Willems L. & Pouclet A. 2002. Phénomènes karstiques fossiles et actuels au sein des formations métamorphiques silico-alumineuses de la nappe pan-africaine de Yaoundé (Sud-Cameroun). Fossil and present-time karstic phenomena in silico-aluminous metamorphic formations of the Pan-African nappe of Yaoundé (South-Cameroon). Comptes Rendus Géoscience 334, 545-550.

Voarintsoa N.R.G., Cox R., Razanatseheno M.O.M. & Rakotondrazafy A.F.M. 2012. Relation between bedrock geology, topography and lavaka distribution in Madagascar. South African Journal of Geology 115, 225-250.

Wells N. & Andriamihaja B. 1993. The initiation and growth of gullies in Madagascar: are humans to blame? Geomorphology 8, 1-46.

Willems L. 2000. Phénomènes karstiques en roches silicatées non carbonatées. Cas des grès, des micaschistes, des gneiss et des granites en Afrique sahélienne et équatoriale. Thèse de l'Université de Liège.

8. FICHES TECHNIQUES POUR LE SUIVI DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE DES DOLINES

Caractérisation physico-chimique de la doline
Paramètres mesurés sur le terrain (1)

Un certain nombre de données concernant la nature physique et chimique de l'eau ne peuvent être acquises que sur le terrain car leurs valeurs peuvent évoluer très rapidement dans les échantillons prélevés. Les principales mesures de terrain à réaliser selon les normes en vigueur sur les dolines sont passées en revue dans cette fiche.

NB. : *Les appareilles utilisés pour ces mesures devront avoir fait l'objet d'un étalonnage (ou calibration) au laboratoire avant la mission de terrain. Il est recommandé de tracer sur une fiche de vie de l'appareil toute opération de maintenance, étalonnage ou calibrage.*

Localisation du point de mesure

Se placer au droit du point le plus profond de la doline afin de réaliser un profil vertical des différents paramètres physico-chimiques.

Mode opératoire

Si la sonde multi-paramètres permet de réaliser des mesures ***in situ*** en continu, adapter sa vitesse de descente en fonction de la fréquence d'acquisition des mesures pour avoir une description précise de la colonne d'eau. Pour chaque campagne d'échantillonnage, la sonde devra faire l'objet, en fonction des paramètres, de calibrations au laboratoire et de calibrations sur le terrain.

Si l'appareillage utilisé ne permet pas de réaliser un profil vertical (câble de la sonde non adapté), des prélèvements d'eau peuvent alors être réalisés à différentes profondeurs puis placés dans un seau de 5 à 10 L. Les mesures ***ex situ*** des paramètres seront alors réalisées rapidement avec la sonde.

La température de l'eau

La mesure de la température, lors d'un suivi de la qualité d'une eau, a plusieurs objectifs :

- Contrôler la validité des mesures d'oxygène dissous (la saturation de l'eau en oxygène dépend de la pression atmosphérique et de la température)
- Evaluer la dissociation gazeuse de l'azote ammoniacal en ammoniac toxique, sachant que cet équilibre est conditionné à la fois par le pH et la température
- Rechercher s'il existe une stratification thermique de la colonne d'eau

Mode opératoire *ex situ* : la température de l'eau sera prise au même moment que les prélèvements d'eau si ces derniers doivent être réalisés. La durée d'immersion de la sonde à chacune des profondeurs doit être suffisamment longue pour permettre la stabilisation de la valeur affichée.

Valeurs usuelles des dolines calédoniennes

Les températures observées fluctuent entre **19°C** en saison fraiche et **29°C** en saison chaude.

L'oxygène dissous

L'oxygène dissous est un des paramètres essentiels à suivre dans le cadre de l'étude de la chimie des eaux. Il conditionne en effet la vie de la flore microbienne et faune aquatique, et peut également donner des indications sur l'activité photosynthétique qui produit de l'oxygène et la respiration des microorganismes et organismes aquatiques qui en consomme. La teneur en oxygène dissous d'une masse d'eau dépend de sa température. Cette mesure doit impérativement être réalisée sur site.

Mode opératoire *ex situ* : la mesure est habituellement réalisée à l'aide d'une cellule électrochimique qui est isolée de l'échantillon par une membrane sélective perméable aux gaz. Il est essentiel que l'échantillon d'eau soit renouvelé de manière continue au niveau de la membrane pour exclure l'éventualité d'une mesure erronée qui serait due à la consommation de l'oxygène au niveau de la l'électrode. Il est donc utile d'agiter la sonde à chaque point de mesure. Cette agitation se fait selon un mouvement circulaire régulier à vitesse lente.

La mesure d'oxygène dissous ne doit être effectuée qu'après stabilisation de la température.

Valeurs usuelles des dolines calédoniennes

Les concentrations en oxygènes dissous fluctuent entre **5,5 mg/L et 9,5 mg/L**

Caractérisation physico-chimique de la doline
Paramètres mesurés sur le terrain (2)

La conductivité La conductivité permet d'avoir une image de la charge de l'eau en sels ionisés présents dans la masse d'eau. C'est également un moyen de détecter certaines pollutions très importantes par des éléments non analysés en routine tels que les sulfates, Mg ou nutriments. La conductivité est généralement exprimée en microsiemens par cm (µS/cm). **Mode opératoire *ex situ* :** avant d'effectuer la mesure la sonde (propre) doit être rincée deux fois au moins avec de l'eau déminéralisée, puis deux fois avec l'eau à échantillonner. Positionner la sonde à la profondeur désirée et agiter légèrement.	**Valeurs usuelles des dolines calédoniennes** Les dolines sont des milieux très peu minéralisés. La conductivité oscille entre **25** et **45 µS/cm**
Le pH Le pH est une relation étroite avec la concentration des ions hydrogène H+ présents dans les masses d'eau. Sa mesure permet d'évaluer le caractère acide ou basique d'une eau et elle renseigne sur : • Les équilibres chimiques d'une solution • L'activité biologique et plus particulièrement l'activité photosynthétique dans le milieu. Mode opératoire *ex situ* : le pH se mesure à l'aide d'une électrode de verre (norme en vigueur). L'étalonnage étant réalisé, l'électrode est plongée à la profondeur souhaitée. Laisser le pHmètre se stabiliser, ce qui peut prendre plusieurs minutes. La lecture est alors effectuée.	**Valeurs usuelles des dolines calédoniennes** Les dolines sont des milieux acides. Le pH varie entre **4 et 6 unités** de pH.
Le potentiel redox (Eh) Le potentiel d'oxydo-réduction ou potentiel redox correspond à la différence de potentiel existant entre une électrode de platine poli et une électrode de référence à potentiel constant. Le redox varie en fonction de la température, de la concentration en éléments présents et du pH. Cette mesure n'a de sens physique que si elle est accompagnée de la température et de la valeur de pH. La mesure du potentiel redox a pour objectif de : • l'importance du pouvoir réducteur ou oxydant du milieu prospecté • le degré d'oxydation de certains ions tels que : C, N, S, P, Fe, Mn **Mode opératoire *ex situ* :** La mesure du Eh est réalisé à l'aide d'une sonde permettant de mesurer également la température et le pH.	**Valeurs usuelles des dolines calédoniennes** Le potentiel redox des dolines est élevé, témoignant d'un milieu réducteur. Il est généralement compris entre **320 et 500 mV.**

Caractérisation des communautés planctoniques *(1)*

Les communautés pélagiques sont composées de l'ensemble des organismes vivant dans la colonne d'eau.

Dans les dolines calédoniennes, ces communautés s'organisent autour du phyto-plancton qui est à la base des réseaux trophiques pélagiques. Le phytoplancton est consommé par les microorganismes brouteurs de la communauté zoo-planctonique qui peuvent eux-mêmes être consommés par des micro-organismes carnivores de cette même communauté zoo-planctonique.

Dans les dolines de Nouvelle-Calédonie il n'existe pas d'organismes pélagiques supérieurs (poissons par exemple).

Biomasse phyto-planctonique : Concentration en chlorophylle-*a*

La mesure de la concentration en chlorophylle-a (pigment de la photosynthèse) est utilisée pour estimer la biomasse de la communauté phytoplanctonique. Elle est exprimée en µg de chl-*a* par litre d'eau

Localisation du point de prélèvement

Prélever trois échantillons de 5 litres d'eau en trois points différents de la doline. Sélectionner des points présentant des caractéristiques morphométriques différentes (profondeur, substrat) ou répartis autour de la doline. Si un bateau est disponible pour les prélèvements, les réaliser de préférence le long d'un transect.

Mode opératoire

Sur le terrain

Les prélèvements sont effectués sous la surface à l'aide d'une bassine à 50 cm. Les trois prélèvements sont ensuite mélangés dans un seau.

Sur le terrain, filtrer une partie de l'eau (le volume filtré dépend du degré de colmatage du filtre, en général 1 à 1,5 litres sont filtrés). La filtration est effectuée à l'aide d'un appareil de filtration et une pompe à air manuelle (NALGENE). Placer un filtre GF/C de vide de maille 1,2 µm sur l'appareil.

Le filtre est ensuite placé dans un tube propre de 15 ml, puis conservé à l'obscurité et au frais jusqu'au laboratoire où il sera congelé jusqu'à extraction de la chl-*a*.

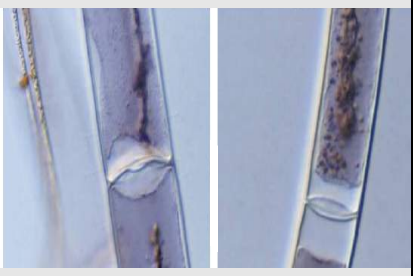
Important : ne pas oublier de noter le volume filtré.

Au laboratoire

Dans chaque tube contenant les filtres congelés, ajouter 10 ml de méthanol 90%. Après agitation, placez les échantillons 24 h au réfrigérateur à 4°C afin de permettre l'extraction des pigments. Centrifuger (10 min à 4000 rpm) ensuite pour concentrer les particules au fond du tube. La chlorophylle-*a* est estimée dans le surnageant à l'aide d'un spectrophotomètres aux longueurs d'ondes de 665 nm et 750 nm.

La concentration des différents pigments chlorophylliens est ensuite calculée à l'aide de l'équation :

$$\text{Chl a } (\mu g/L) = [(DO665nm - DO750nm) \times Ve/Vf \times 1] \times 13{,}9.$$



Valeurs usuelles des dolines calédoniennes

Les concentrations en **chlorophylle-*a*** des dolines calédoniennes sont habituellement comprises entre **0,1 et 5 µg/L,** ce qui est très faible en comparaison de nombreux autres écosystèmes d'eau douce.

Caractérisation des communautés planctoniques *(2)*

Diversité phyto-planctonique

Localisation du point de prélèvement

Au niveau du point le plus profond de la doline.

Mode opératoire

Sur le terrain

A l'aide d'un filet à phytoplancton (vide de maille 20 µm) effectué un trait de filet en sub-surface. Pour cela lancer le filet à une distance d'au moins 10 m. Notez la distance à laquelle le filet a été lancé. Ramenez le filet sans que ce dernier ne touche le fond. Le contenu du filet est entièrement versé dans un pot de 125 ml propre. Formolez à 4% puis conservation à l'obscurité et à température ambiante.

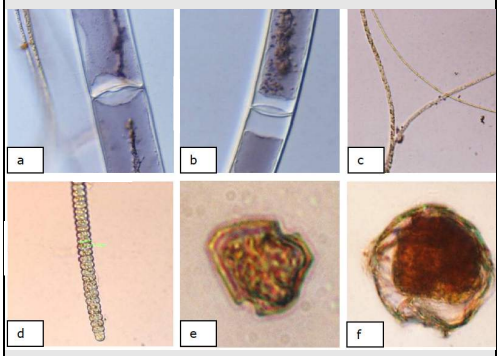
Au laboratoire

Les déterminations des microorganismes présents dans les communautés phyto-planctoniques ont été réalisées au niveau des classes et pour certaines d'entre elles des genres.

Différentes approches existent pour réaliser les comptages. Le choix de ces approches dépend notamment du matériel disponible (microscope inversé ou non par exemple)

Par exemple, la méthode suivante a été utilisée dans le cadre de l'étude sur les dolines : A partir des échantillons homogénéisés, 25 ml ont été placés dans une cuve à sédimentation pendant 24 heures. Le comptage est ensuite réalisé sous microscope inversé. Pour chaque échantillon 500 individus (cellules uniques, filaments ou colonies) étaient comptés.

Il est à noter que la détermination des espèces demande des connaissances en taxonomie spécifiques.



a et b : Chlorophycées ; c et d : Cyanobactéries filamenteuses ; e et f : Dinoflagellés

Valeurs usuelles des dolines calédoniennes

Les communautés phyto-planctoniques des dolines calédoniennes sont dominées par la **classe des Dinoflagellés** qui représente généralement plus de **80%** des cellules phytoplanctoniques.

Ponctuellement, il peut être observé une plus forte abondance des classes des **Chrysophycées** (genre *Dinobryon*) et des **Desmidées**, ainsi que des **cyanobactéries filamenteuses** des genres *Planktothrix* et *Oscillatoria*.

Caractérisation des communautés planctoniques *(3)*

Les communautés zoo-planctoniques représentent le premier maillon des consommateurs pélagiques des réseaux trophiques aquatiques.

Dans les systèmes limités par les conditions abiotiques (nutriments), cette population est limitée par le niveau de production primaire.

Diversité zoo-planctonique

Localisation du point de prélèvement

Prélever 3 échantillons à l'aide de la trappe à zooplancton au niveau de 3 points différents de la doline. Sélectionner des points présentant une profondeur assez importante.

Mode opératoire

Sur le terrain

A l'aide d'une trappe à zooplancton, effectuer les 3 prélèvements de la façon suivante :

- Descendre la trappe à bonne profondeur, sans être trop près du fond
- A chaque remontée, verser le contenu sur un filtre en soie de 50 µm (Veiller à conserver le filtre humide, mais avec un minimum d'eau)
- Après avoir cumulé les 3 échantillons sur le filtre, le décrocher et le retourner au dessus de l'ouverture d'un pot propre de 125 ml. Le nettoyer à l'aide d'une pissette remplie d'eau de la doline
- Remplir le tube avec assez d'eau (environ 100 ml) et formoler à 4% et conserver à température ambiante

Important : ne pas oublier de noter le volume filtré.

Au laboratoire

Comme pour le phytoplancton, il existe plusieurs méthodes pour réaliser les comptages.

Dans l'étude doline, la méthode suivante a été utilisée. Le contenu des piluliers était tout d'abord concentré sur un filtre 20 µm. Le filtre était ensuite lavé dans un volume de 5 ml d'eau qui était recueilli dans une coupelle pour le comptage de tous les individus présents dans les 5 ml à la loupe binoculaire.

Valeurs usuelles des dolines calédoniennes

L'abondance des communautés zoo-planctoniques est généralement faible **(<10 ind./L)**.

Ces communautés se composent de rotifères de petite taille (environ 100 µm) algivores ou détritivores, aucune espèce prédatrice n'a été observée.

Contrairement aux plans d'eau d'autres territoires, les rotifères présentent de très faibles abondances (0,5 ind./L).

On retrouve à leurs côtés des Copépodes Calanoides à des abondances de l'ordre de 3 ind./L.

Les Cladocères sont peu représentés puisque seuls des représentants des Chydoridés ont été observés.

Caractérisation des communautés benthiques *(1)*

Les communautés benthiques sont composées par les organismes qui vivent sur le fond des dolines. Les biofilms qui recouvrent le fond des dolines constituent le premier maillon du réseau trophique benthique.

Ce biofilms se compose d'algues et d'une communauté microbienne entrelacée dans une matrice organique.

Les invertébrés benthiques composés par les larves aquatiques d'insectes aériens et certains insectes aquatiques adultes composent les consommateurs primaires et secondaires de ces réseaux.

Parmi ces derniers on va trouver des organismes détritivores (Diptères, Trichoptères), mais également des prédateurs (Odonates et Coléoptères aquatiques).

Diversité des biofilms

Localisation du point de prélèvement

Repérer des biofilms à 3 endroits différents de la doline, si possible des biofilms d'aspects différents.

Mode opératoire

Sur le terrain

Au niveau de chaque biofilm prélever deux échantillons à l'aide d'un emporte pièce de diamètre de 3 à 5 cm de diamètre et les placer dans des tubes propres de 15 ml.

Ajouté de l'eau et formolez à 4% un des tubes, qui est destiné aux observations microscopiques.

Congeler l'autre échantillon sans ajouter d'eau le second échantillon qui servira aux analyses ADN.

Au laboratoire

L'extraction des acides nucléiques combine des méthodes physiques, chimiques et enzymatiques afin de lyser les parois microbiennes et de libérer le contenu cellulaire afin d'obtenir de l'ADN pur. L'extraction est réalisée à l'aide d'un kit « Fast DNA kit for soil » (MP Biomedicals).

Pour chaque biofilm, 0,50 à 0,70 g sont introduits dans des tubes avec 1,1 ml de tampon de lyse (40 mM EDTA, 50 mM Tris-HCL, 0,75 M sucrose). Les tubes sont placés dans un FastPrep (MP Biomedical, FastPrep® - 24 Instrument) pendant 30s à 6,5 m.S-1, répété une fois).

Ensuite 47 µl de lysozyme sony ajoutés à chaque tube, qui a été placé dans une étuve à 37°C pendant 45 mn. En suivant une déprotéinisation est réalisée en rajoutant du SDS 10% (75µl) et de la protéinase K (10 µl, ThermoScientific).

Après 1h30 de bain marie à 55°C et 5 minutes de centrifugation (13200 tours/mn, 4°C), une étape de purification au Phénol-Chloroforme est réalisée.

Le surnageant est traité par ajout d'un volume égal de chloroform-isoamyl alcool (25:24:1, pH 8) puis par centrifugation (13200 tours/min, 4°C, 5 minutes).

Un volume égal de chloroforme (24 :1) est alors ajouté au surnageant recueilli avant une nouvelle centrifugation. Les acides nucléiques ainsi purifiés vont être précipités par l'ajout d'acétate de sodium (3M, pH 5.2) à un volume égal à 10% du volume récupéré et par l'ajout d'isopropanol froid à un volume égal à 60% du surnageant.

Les échantillons sont ensuite entreposés une nuit à -20°C puis centrifugés à 15 000g pendant 30 minutes à 4°C.

Le culot est rincé avec de l'éthanol 80% et suite à une dernière centrifugation, il est mis à sécher 10 minutes au CentriVap Concentrator (Labconco). Ce culot est ensuite repris dans 100 µl d'eau ultra-pure puis conservés à -20°C.

Les concentrations en ADN total sont mesurées par specto-photométrie (Nanodrop 1000, Thermo Fisher Scientific Inc, EU) en déterminant l'absorbance à 260 nm.

L'amplification par PCR du gène codant l'ARNr 16S :

À partir des échantillons dilués contenant l'ADN extrait, le gène codant l'ARN ribosomique 16S est amplifié par PCR (Polymerase Chain Reaction). Les amorces utilisées pour cette PCR sont la 357F (CCTACGGGAGGCAGCAG) et la 907R (CCGTCAATTCCTTTRAGTTT) qui sont des amorces universelles pouvant permettre l'amplification de ce gène chez toutes les bactéries (Schauer et al., 2003).

Les amplifications PCR sont effectuées dans des volumes de 50 µl, contenant 2 µl d'ADN (30 ng µl-1), 5 µl de tampon de la Taq polymérase (Dream Taq Buffer Thermo Scientific), 1 µl de BSA (sérum bovin d'albumine, Sigma, 0.5 mg ml-1), 1 µl de MgCl2 (50 mM), 1 µl de dNTP (10 mM), 1 µl pour chacune des amorces (10µM), 0.5 µl de Taq polymérase (Dream Taq DNA Polymerase Thermo Scientific).

La réaction PCR est réalisée dans un thermocycleur DNA Engine Biorad, selon ces conditions : 10 min. à 95°C ; 30 cycles de 30 sec. à 95°C, 30 sec. à 55°C et 1 min. à 72°C ; 10 min. à 72°C. La taille attendue des amplicons est vérifiée par une électrophorèse sur gel d'agarose 1%.

Les amplicons obtenus par PCR sont directement séquencés par une approche de séquençage à haut-débit. Les séquences amplifiées pour chaque échantillon sont taguées (un tag différent par échantillon de biofilm) avant de réaliser un mélange équimolaire de tous les amplicons.

Après séquençage de ce mélange, les séquences obtenues pour chaque échantillon sont triées grâce à leur tag puis elles passent ensuite dans un pipeline de traitement des séquences qui comportent plusieurs étapes.

Dans un premier temps, les séquences font l'objet d'une analyse de qualité destinée à éliminer celles qui ne répondent pas aux critères standards de qualité. Dans un second temps, les séquences sont regroupées par Unité Taxonomique Opérationnelle (OTU) et une analyse de chimères est pratiquée sur ces OTUs afin d'éliminer les séquences artéfactuelles que la PCR génère parfois. Enfin, une assignation taxonomique est obtenue pour chacune de ces OTUs.

Ces approches demandent un savoir-faire avancé et leur coût est important puisqu'il peut être estimé à une centaine d'euros par échantillon

Caractérisation des communautés benthiques *(2)*

Les communautés benthiques sont composées par les organismes qui vivent sur le fond des dolines. Les biofilms qui recouvrent le fond des dolines constituent le premier maillon du réseau trophique benthique. Ce biofilms se compose d'algues et d'une communauté microbienne entrelacée dans une matrice organique. Les invertébrés benthiques composés par les larves aquatiques d'insectes aériens et certains insectes aquatiques adultes composent les consommateurs primaires et secondaires de ces réseaux. Parmi ces derniers on va trouver des organismes détritivores (Diptères, Trichoptères), mais également des prédateurs (Odonates et coléoptères aquatiques).

Diversité des communautés d'invertébrés benthique

Localisation du point de prélèvement

Repérer cinq micro-habitats différents au sein de la doline (substrat différents).

Mode opératoire

Sur le terrain

Au niveau de chaque micro-habitat à l'aide d'un filet troubleau (vide de maille 500 µm) positionné en position perpendiculaire sur le fond, collecter les invertébrés en créant un courant vers l'ouverture du filet, tout en frottant le substrat.

Au niveau des héliophytes effectuer des mouvements en forme de huit dans les héliophytes afin de capter les différents invertébrés fixés sur ces derniers.

Chaque prélèvement est stocké dans un flacon propre de 250 à 500 ml et alcoolisé (éthanol 95%), directement sur le terrain.

Au laboratoire

Le contenu de chaque flacon est versé sur des tamis de 500 µm, puis trié sous loupe binoculaire. Chaque invertébré est sorti, identifié et mis en tube par taxon.

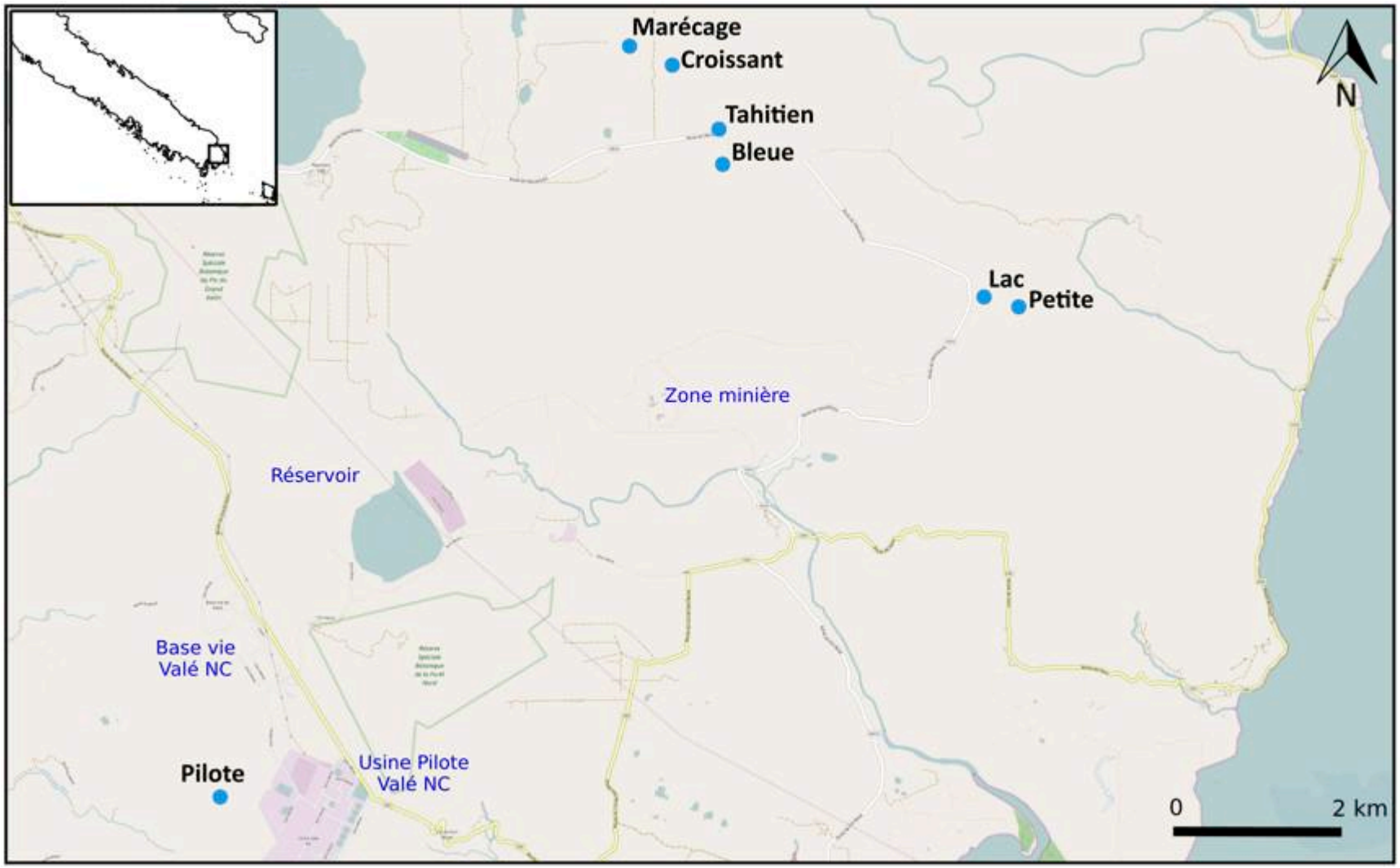
Valeurs usuelles des dolines calédoniennes

Faible diversité des communautés et présence d'espèces rares. Absence de Mollusques.

Selon les dolines : Part variable de Trichoptères, Diptères et Coléoptères vs Crustacés Copépodes

9. ANNEXES

ANNEXE 1 : Cartographie de la zone d'étude



Situation des 7 dolines (figurées par des cercles bleus) et des infrastructures industrielles (légendées en noir) situées dans le Grand Sud de l'ile de Nouvelle-Calédonie (encart en haut à gauche). Fond de carte OpenStreetMap.

ANNEXE 2 : Résultats des analyses d'eau

	Echantillons											
	N°	Références	Filtration	NH_4	NO_x	NO_2	PO_4	Anions ClA (mg/l)			
	Labo	demandeur		mg/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	Cl	SO_4		
1	1	Pt 2: Doline Lac 10/07/2013 10h		0,089	1,402	0,061	0,000	6,56	1,79		
2	2	Pt 5: Petite Doline 10/07/2013 14h		0,334	0,866	0,033	0,287	7,17	1,53		
3	3	Pt 6 Doline Bleue 12/07/2013 11h		0,234	18,204	0,089	0,145	8,27	1,81		
4	4	Pt 7 Tahitien 12/07/2013 13h00		0,135	10,913	0,146	0,391	6,53	1,76		
5	5	Pt 3 Doline croissant 16/07/2013 10h00		0,160	3,417	0,060	0,119	6,85	1,68		
6	6	Pt 8 Doline marécage 16/07/2013 12h00		0,107	2,919	0,040	0,108	6,51	1,00		
7		Pt 2: Doline Lac 10/07/2013 10h	x					5,70	1,68		
8		Pt 5: Petite Doline 10/07/2013 14h	x					6,99	1,37		
9		Pt 6 Doline Bleue 12/07/2013 11h	x					8,24	1,68		
10		Pt 7 Tahitien 12/07/2013 13h00	x					6,98	1,51		
11		Pt 3 Doline croissant 16/07/2013 10h00	x					7,04	1,49		
12		Pt 8 Doline marécage 16/07/2013 12h00	x					7,43	0,94		

ICP 4 éléments (mg/l)				ICP autres éléments (mg/l)															
Ca	Mg	Na	K	Fe	Mn	Ni	Al	Cr	Co	Si	Cu	Zn	P	S	Cd	Pb	As		
0,15	0,41	2,85	0,18	0,07	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,03	0,00	0,01	0,01	1,05	0,00	0,00	0,00		
0,16	0,48	3,78	0,17	0,06	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,04	0,00	0,02	0,00	0,81	0,00	0,00	0,01		
0,21	0,73	3,92	0,17	0,10	0,01	0,02	0,03	0,01	0,00	0,06	0,00	0,04	0,00	0,86	0,00	0,00	0,01		
0,11	0,44	3,14	0,13	0,14	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,05	0,00	0,01	0,01	0,66	0,00	0,00	0,00		
0,07	0,46	3,19	0,11	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,05	0,00	0,01	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00		
0,08	0,50	3,11	0,11	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,05	0,00	0,00	0,01	0,53	0,00	0,00	0,00	Non filtré	
0,12	0,41	2,91	0,12	0,06	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,71	0,00	0,00	0,01		
0,14	0,48	3,57	0,17	0,06	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,03	0,00	0,01	0,01	0,88	0,00	0,00	0,00		
0,19	0,72	3,83	0,15	0,12	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,05	0,00	0,02	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00		
0,10	0,46	3,11	0,19	0,33	0,01	0,01	0,04	0,02	0,00	0,05	0,00	0,02	0,00	1,18	0,00	0,00	0,00		
0,04	0,45	3,16	0,11	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,05	0,00	0,01	0,00	0,66	0,00	0,00	0,00		
0,07	0,52	3,20	0,12	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,05	0,00	0,01	0,01	0,50	0,00	0,00	0,00	Filtré	

	Echantillons										
	N°	Références	Filtration	NH_4	NO_x	NO_2	PO_4	Anions ClA (mg/l)			
	Labo	demandeur		mg/l	µmol/l	µmol/l	µmol/l	Cl	SO_4		
1	2068 / 7	Pt 3 Lac 09/10/13		0,068	0,02	0,016	0,037	7,35	1,76		
2	2068 / 8	Pt 4 Petite 09/10/13		0,208	0,00	0,000	0,017	10,22	2,05		
3	2068 / 9	Pt 6 Bleue 09/10/13		0,392	12,54	0,030	0,016	8,40	1,25		
4	2068 / 10	Pt 1 Tahitien 10/10/13		0,181	8,68	0,021	0,065	7,12	1,25		
5	2068 / 11	Pt 16 Croissant 10/10/13		0,615	1,12	0,004	0,006	6,99	0,98		
6	2068 / 12	Pt 5 Marécage 10/10/13		0,095	0,93	0,039	0,000	7,01	1,04		
7	2068 / 7	Pt 3 Lac 09/10/13	x					7,53	2,04		
8	2068 / 8	Pt 4 Petite 09/10/13	x					9,91	1,71		
9	2068 / 9	Pt 6 Bleue 09/10/13	x					7,92	1,23		
10	2068 / 10	Pt 1 Tahitien 10/10/13	x					6,63	1,24		
11	2068 / 11	Pt 16 Croissant 10/10/13	x					6,78	1,15		
12	2068 / 12	Pt 5 Marécage 10/10/13	x					6,70	0,68		

ICP 4 éléments (mg/l)				ICP autres éléments (mg/l)																	
Ca	Mg	Na	K	Fe	Mn	Ni	Al	Cr	Co	Cu	Zn	Ba	B	P	S	Sr	V	Pb	Si	Cd	As
0,92	0,62	3,73	0,15	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01	0,58	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
0,11	0,67	4,71	0,18	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,68	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
0,16	0,75	3,73	0,13	0,01	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,44	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
0,08	0,48	3,07	0,10	0,07	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
0,03	0,48	3,14	0,09	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,40	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01
0,03	0,54	3,23	0,10	0,05	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,28	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01
0,76	0,51	3,80	0,15	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,69	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
0,10	0,63	4,90	0,19	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,70	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01
0,15	0,69	3,92	0,14	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
0,07	0,43	3,21	0,11	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01
0,03	0,44	3,38	0,10	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,44	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
0,02	0,47	3,31	0,09	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00

Mesures isotopiques dans les pluies de la station de l'Ancienne Pépinière à Goro.

Annee	Mois	P (mm/mois)	d 18O	dD	d exc
2013	janvier	55,6	-2,99	-10,2	13,7
2013	février	192	-3	-11,2	12,8
2013	mars	408,1	-4,32	-21,1	13,4
2013	avril	341,4	-4,84	-24,5	14,3
2013	mai	238,5	-3,43	-10,9	16,6
2013	juin	155,3	-3,65	-14,2	15
2013	juillet	1146,6	-4,57	-23,7	12,9
2013	août	155,4	-3,28	-8,9	17,3
2013	septembre	122,3	-2,45	-6,5	13,1
2013	octobre	148,3	-3,81	-18,6	11,9
2013	novembre	212,4	-6,26	-38,2	11,8
2013	décembre	234,8	-2,8	-10,9	11,5
2014	janvier	707,8	-4,81	-26,1	12,4
2014	février	389,8	-4,81	-26,1	12,4
2014	mars	264	-2,14	-2,9	14,3
2014	avril	98	-2,14	-2,9	14,3
2014	mai	242,2	-2,53	-2,8	17,4
2014	juin	149,7	-2,53	-2,8	17,4
2014	juillet	81,4	-6,22	-33,7	16
2014	août	113	-2,4	-4,8	14,4
2014	septembre	208	-4,4	-22,9	12,3
2014	octobre	117,3	-4,4	-22,9	12,3
2014	novembre	73	-4,74	-27,2	10,8
2014	décembre	470,7	-4,74	-27,2	10,8
2015	janvier	283,9	-4,74	-27,2	10,8
2015	février	396,7	-3,27	-15,3	10,9
2015	mars	185,3	-4,25	-22,9	11
2015	avril	268,7	-5,76	-30,4	15,7
2015	mai	208,3	-2,49	-6,1	13,8
2015	juin	226	-2,68	-2,7	18,8
2015	août	136,9	-1,96	1,8	17,5
2015	septembre	35,3	-1,5	5,8	17,8
2015	octobre	237,2	-4,74	-26,5	11,4
2015	novembre	54,4	-2,51	-10,6	9,5
2015	décembre	147,6	-2,69	-9,3	12,2
2016	janvier	133,5	-4,25	-21,7	12,3
2016	février	354,2	-2,64	-10,1	11
2016	mars	491,2	-5,69	-35,1	10,4

2016	avril	176,3	-2	-0,9	15,1
2016	mai	77,1	-4,2	-19,2	14,5
2016	juin	428,2	-5,33	-25,9	16,7
2016	juillet	143,4	-1,89	0,9	16
2016	août	267,7	-3,08	-9,2	15,5

Mesures isotopiques dans la doline 'Trou du Tahitien' à Goro, Massif du Sud.

Date echantillonnage	Nom echantillon	d 18O	dD	d exc	Prof. Echantillon (m/surface)
30/04/2013	04-Tahitien-SW-20130430-14m	**-4,31**	**-21,9**	**12,6**	14
30/04/2013	04-Tahitien-SW-20130430-10m	**-4,37**	**-22,1**	**12,8**	10
30/04/2013	04-Tahitien-SW-20130430-5m	**-4,36**	**-22,2**	**12,7**	5
30/04/2013	04-Tahitien-SW-20130430-1m	**-4,23**	**-22,0**	**11,9**	1
25/06/2013	04-Tahitien-SW-20130625	**-3,85**	**-18,8**	**12,0**	0
10/10/2013	04-Tahitien-SW-20131010-13m	**-3,71**	**-17,6**	**12,0**	13
10/10/2013	04-Tahitien-SW-20131010-10m	**-3,42**	**-17,0**	**10,3**	10
10/10/2013	04-Tahitien-SW-20131010-5m	**-3,41**	**-17,3**	**10,0**	5
10/10/2013	04-Tahitien-SW-20131010-0m	**-3,39**	**-16,5**	**10,6**	0
10/10/2013	04-Tahitien-SW-20131010-5mBis	**-3,31**	**-16,1**	**10,4**	5

ANNEXE 3 : Listes faunistiques

& codes utilisés pour les statistiques

A noter que dans les tableaux qui suivent, la colonne « Total » n'inclue pas l'année 2016 (campagne 12, matérialisée par un bleu plus soutenu en en-tête et dont le total se lit uniquement en bas de colonne) du fait de son éloignement temporel avec les 11 autres campagnes (de Février 2013 à Janvier 2014).

Doline Bleue

Embranchement	Classe / Sous-classe	Ordre	Famille	Sous-famille, Tribu, Genre ou Espèce	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL sans 2016
Némathelminthes	Nématodes*						1										1
Némertiens																	0
Annélides	Oligochètes*		Naididae		1	5		4			1	1	6		1		19
Arthropodes	Crustacés Cladocères																0
	Crustacés			Calanoida	2	240		40	154	831	1023	2299	1093		1		5683
	Copépodes			Cyclopoida	308		1025	197					14			15	1544
	Crustacés Ostracodes																0
	Crustacés Malacostracés	Amphipodes*	Niphargidae														0
	Arachnides Hydracariens				1							1	4				6
	Insectes Amétaboles	Collemboles							1		1	1	4				7
	Insectes Hétérométaboles	Odonatoptères	Aeshnidae														0
				Aeshna sp.													0
			Coenagrionidae					1	1	2	1		9				14
				Ishnura sp.								2		1			3
			Corduliidae	*Hemicordulia* sp.											1		1
			Libellulidae		1		3	2					4				10
				Orthetrum caledonicum									1				1
				Tramea sp.			1	1	2	1		1	2	1			9
		Hétéroptères	Corixidae		2						1	1					4
				Sigara sp.													0
			Gerridae														0
			Notonectidae		2	2	3	11	20	2	20	14	3				77
				Anisops sp.										1			1
	Insectes Holométaboles	Diptères	Cecidomyiidae					2									2
			Ceratopogonidae														0
				Ceratopogoninae* spp.			3		1		18	8	10	3			43
				Dasyheilinae spp.	7												7
			Chironomidae								11						11
				Chironomini* indéterminés			61	36				2	1			5	100
				Chironomini *Harrisius* * spp.	1		4	2	2	7		1	1	2			20
				Orthocladiinae *Corynoneura* * spp.						1	5						6
				Orthocladiinae* spp.	1		24	1				5	2				33
				Tanypodinae* spp.	33	8	16	22		11	49	32	52	4		3	227
				Tanytarsini			1	6	35	35	13	86	129	2			307
			Culicidae						4		59		3	2			68
			Dolichopodidae					1									1
			Empididae		1												1
			Ephydridae													2	0
			Limoniidae*				2										2
			Tabanidae														0
		Trichoptères	Ecnomidae*								1	1	4				6
			Hydroptilidae*	*Oxyethira* sp.							4	1	7				12
			Leptoceridae	N. gen. fourreau tube arqué en sable													0
				N. gen. PIII 4 articles													0
				Symphitoneuria * sp.													0
				Oecetis sp.			1	1									2
		Coléoptères	Curculionidae														0
			Dytiscidae*	Colymbetinae												2	0
				Dytiscinae spp.			1										1
				Onychohydrus scutellaris													0
				Megaporus feryi	2			1		1						2	4
				Limbodessus cheesmanae			1										1
			Gyrinidae	*Gyrinus* sp.													0
			Haliplidae	*Haliplus oberthuri*													0
			Hydrophylidae														0
			Scirtidae/Helodidae	Larve longue			1									6	1
				Larve large													0
		Lépidoptères															0
TOTAL					362	255	1148	328	220	891	1207	2456	1349	16	3	35	8235
NOMBRE DE TAXA					13	4	16	16	9	9	14	16	19	8	3	7	36

Doline Croissant

Embranchement	Classe / Sous-classe	Ordre	Famille	Sous-famille, Tribu, Genre ou Espèce	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL sans 2016
Némathelminthes	Nématodes*					5							1	3	4		13
Némertiens																	0
Annélides	Oligochètes*		Naididae		8	17	4	1					16	107	11	7	164
Arthropodes	Crustacés Cladocères									1		12					13
	Crustacés			Calanoida		137	68	11	103	111	149	144	8	3	23	3	757
	Copépodes			Cyclopoida	12		3	1	23	12	15	135	5	3	23		232
	Crustacés Ostracodes				1	3	1			4	1					2	10
	Crustacés Malacostracés	Amphipodes*	Niphargidae		1										14		15
	Arachnides Hydracariens				72	74	37	10	61	20	11		23	11	59		378
	Insectes Amétaboles	Collemboles							1				25				26
	Insectes Hétérométaboles	Odonatoptères	Aeshnidae														0
				Aeshna sp.													0
			Coenagrionidae		2	1	7		6	2	7	7	26				58
				Ishnura sp.		1	1	1						6	8		17
			Corduliidae	*Hemicordulia* sp.													0
			Libellulidae										5				5
				Orthetrum caledonicum													0
				Tramea sp.										2			2
		Hétéroptères	Corixidae		2	4	1		2	4	2	13	6	5	8		47
				Sigara sp.											4		4
			Gerridae			2		1						1			4
			Notonectidae		4	9	7		1	6	18	21	19	10	4	1	99
				Anisops sp.											2		2
	Insectes Holométaboles	Diptères	Cecidomyiidae		11												11
			Ceratopogonidae		2									2			4
				Ceratopogoninae* spp.	4				4	2	1	2	12		4		29
				Dasyheilinae spp.	1			13					2		2	1	18
			Chironomidae				1	2									3
				Chironomini* indéterminés	36	17	6					50	19	8	1	2	137
				Chironomini *Harrisius* * spp.	8				1	29	6						44
				Orthocladiinae *Corynoneura* * spp.													0
				Orthocladiinae* spp.	3		1						1		3		8
				Tanypodinae* spp.	74	49	19	20	22	33	2	3	44	37	28	7	331
				Tanytarsini	7		4		20	9	3		67	9	12	12	131
			Culicidae			8	5	5	1	2			10	1	7		39
			Dolichopodidae					2	7	4	7				3		23
			Empididae					2									2
			Ephydridae														0
			Limoniidae*										1		1		2
			Tabanidae														0
		Trichoptères	Ecnomidae*		2	3	2	4	1	2		17	17	5	54	2	107
			Hydroptilidae*	*Oxyethira* sp.	6	5	32	1	3	8	24	12	20	11	3	4	125
			Leptoceridae	N. gen. fourreau tube arqué en sable													0
				N. gen. PIII 4 articles					1	3	2		1				7
				Symphitoneuria * sp.													0
				Oecetis sp.	6	6	3		1	1	10	139	4	16			186
		Coléoptères	Curculionidae						2		1		1				4
			Dytiscidae*	Colymbetinae													0
				Dytiscinae spp.													0
				Onychohydrus scutellaris				1			1			1	1	1	4
				Megaporus feryi	1		1	2	4	2			2	1		1	13
				Limbodessus cheesmanae													0
			Gyrinidae	*Gyrinus* sp.	1	4	1			1						1	7
			Haliplidae	*Haliplus oberthuri*													0
			Hydrophylidae														0
			Scirtidae/Helodidae	Larve longue	85	23	16	10	18	21	14		20	7	17	2	231
				Larve large					3	4	3						10
		Lépidoptères			4				1						1		6
TOTAL					353	368	220	87	286	281	277	555	355	249	297	46	3328
NOMBRE DE TAXA					24	18	21	17	22	22	19	12	25	21	25	14	43

Doline Lac

Embranchement	Classe / Sous-classe	Ordre	Famille	Sous-famille, Tribu, Genre ou Espèce	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL sans 2016
Némathelminthes	Nématodes*						1	7									8
Némertiens																	0
Annélides	Oligochètes*		Naididae		9	3	10	18		3	2			1	2	22	48
Arthropodes	Crustacés Cladocères																0
	Crustacés Copépodes			Calanoida		1						1					2
				Cyclopoida							4						4
	Crustacés Ostracodes				7	6		1	20	8	2	3		1	5		53
	Crustacés Malacostracés	Amphipodes*	Niphargidae			3			1								4
	Arachnides Hydracariens				2	8	2	4	6	14	1	4	2				43
	Insectes Amétaboles	Collemboles								1							1
	Insectes Hétérométaboles	Odonatoptères	Aeshnidae														0
				Aeshna sp.		1											1
			Coenagrionidae					2	16	50	12	31	9	1			121
				Ishnura sp.	4	3	3	8						2	9		29
			Corduliidae	*Hemicordulia* sp.													0
			Libellulidae														0
				Orthetrum caledonicum													0
				Tramea sp.		2										1	2
		Hétéroptères	Corixidae		10	9	2	3	1	4	1	4	6		2		42
				Sigara sp.													0
			Gerridae														0
			Notonectidae		5	1	1		3	4	1	3					18
				Anisops sp.											3		3
	Insectes Holométaboles	Diptères	Cecidomyiidae														0
			Ceratopogonidae			12											12
				Ceratopogoninae* spp.	3	9	10	7	21	10	10	3	1	3	3	2	80
				Dasyheilinae spp.					1				4	1		1	6
			Chironomidae		4	2			5	2							13
				Chironomini* indéterminés				58				141	162	138	300		799
				Chironomini *Harrisius* * spp.					23	131	93						247
				Orthocladiinae *Corynoneura* * spp.													0
				Orthocladiinae* spp.													0
				Tanypodinae* spp.	12	20	12	1	8	1		20	2	8	3	15	87
				Tanytarsini	191	217	52	71	5	29	9	3	2	2		37	581
			Culicidae				1	1	6	8	1						17
			Dolichopodidae						8	1							9
			Empididae														0
			Ephydridae														0
			Limoniidae*		1				1		1			1	4		8
			Tabanidae		1												1
		Trichoptères	Ecnomidae*		33	32	29	33	2	14	13	12	10	5	12	10	195
			Hydroptilidae*	*Oxyethira* sp.	3	6		1	1	3		3	9	5	2		33
			Leptoceridae	N. gen. fourreau tube arqué en sable	3						2						5
				N. gen. PIII 4 articles	14				1	1	8			3			27
				Symphitoneuria * sp.	109	68	41	22	83	141	55	39	10	15	92	7	675
				Oecetis sp.	2	7	6	8	1	15	2	7	11		3		62
		Coléoptères	Curculionidae														0
			Dytiscidae*	Colymbetinae													0
				Dytiscinae spp.													0
				Onychohydrus scutellaris													0
				Megaporus feryi	1	2	1		2	2		1	1	1	1		12
				Limbodessus cheesmanae													0
			Gyrinidae	*Gyrinus* sp.	2		2	1			1			1	1		8
			Haliplidae	*Haliplus oberthuri*													0
			Hydrophylidae														0
			Scirtidae/Helodidae	Larve longue	11	22	55	24	37	18	24	28	2	2	23		246
				Larve large				24	6	5	2	6	1				44
		Lépidoptères															0
TOTAL					427	434	228	294	258	465	244	309	232	190	465	95	3546
NOMBRE DE TAXA					21	21	16	19	23	22	20	17	15	17	16	8	37

Doline Marécage

Embranchement	Classe / Sous-classe	Ordre	Famille	Sous-famille, Tribu, Genre ou Espèce	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL sans 2016
Némathelminthes	Nématodes*					2											2
Némertiens																	0
Annélides	Oligochètes*		Naididae		57	6	5	5		2		4	11	7	32	7	129
Arthropodes	Crustacés Cladocères																0
	Crustacés Copépodes			Calanoida													0
				Cyclopoida								2					2
	Crustacés Ostracodes				7					2	1				3		13
	Crustacés Malacostracés	Amphipodes*	Niphargidae						1	1	5			1			8
	Arachnides Hydracariens				2				2	6	5	1			1		17
	Insectes Amétaboles	Collemboles															0
	Insectes Hétérométaboles	Odonatoptères	Aeshnidae						1				1				2
				Aeshna sp.	2												2
			Coenagrionidae			5		1	10	2	2	12	8			2	40
				Ishnura sp.	8			1									9
			Corduliidae	*Hemicordulia* sp.													0
			Libellulidae														0
				Orthetrum caledonicum													0
				Tramea sp.													0
		Hétéroptères	Corixidae		35	6			2			17	6		18		84
				Sigara sp.										1			1
			Gerridae		3		1										4
			Notonectidae			1			1			5	1	3			11
				Anisops sp.													0
	Insectes Holométaboles	Diptères	Cecidomyiidae														0
			Ceratopogonidae			12								2			14
				Ceratopogoninae* spp.	10			1	13	6	1	19	5	2	6		63
				Dasyheilinae spp.	12		4		1				3				20
			Chironomidae						4		4						8
				Chironomini* indéterminés		2		1				5	23			2	31
				Chironomini *Harrisius* * spp.		1			3								4
				Orthocladiinae *Corynoneura* * spp.	3		5									1	8
				Orthocladiinae* spp.									6				6
				Tanypodinae* spp.	3	5	2	2	1	2		1	4	2	2	1	24
				Tanytarsini	5	28		1	1		9	19	14	5		1	82
			Culicidae		9				25	3	3	77	11	2	5		135
			Dolichopodidae		3					1	12	1					17
			Empididae														0
			Ephydridae														0
			Limoniidae*		3	2	2		2	2	1		2			1	14
			Tabanidae														0
		Trichoptères	Ecnomidae*		47	39	17	6	16	2	3	30	14	3	25		202
			Hydroptilidae*	*Oxyethira* sp.	22	39	1	4	27	44	8	20	13		11	4	189
			Leptoceridae	N. gen. fourreau tube arqué en sable	1								1				2
				N. gen. PIII 4 articles													0
				Symphitoneuria * sp.						3							3
				Oecetis sp.	5		1	1			1	4	5	1	2		20
		Coléoptères	Curculionidae			1											1
			Dytiscidae*	Colymbetinae													0
				Dytiscinae spp.				1									1
				Onychohydrus scutellaris													0
				Megaporus feryi	2	1			2								5
				Limbodessus cheesmanae													0
			Gyrinidae	*Gyrinus* sp.	1	1											2
			Haliplidae	*Haliplus oberthuri*													0
			Hydrophylidae														0
			Scirtidae/Helodidae	Larve longue	21	20	4	12	33	14	22	17	18	3	12		176
				Larve large					3	1	3		2				9
		Lépidoptères				1											1
TOTAL					261	172	42	36	148	91	80	234	148	32	117	19	1361
NOMBRE DE TAXA					22	18	10	12	19	15	15	16	19	12	11	8	39

Doline Petite

Embranchement	Classe / Sous-classe	Ordre	Famille	Sous-famille, Tribu, Genre ou Espèce	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL sans 2016
Némathelminthes	Nématodes*						4	13									17
Némertiens																	0
Annélides	Oligochètes*		Naididae		12	9	84	82		1	29	25	27	7	21	16	297
Arthropodes	Crustacés Cladocères						9	16	52	351	4		2				434
	Crustacés Copépodes			Calanoida				2									2
				Cyclopoida					1	6	1		1				9
	Crustacés Ostracodes				5	6			2	1	1						15
	Crustacés Malacostracés	Amphipodes*	Niphargidae						2	1							3
	Arachnides Hydracariens				18				1	3	2		3				27
	Insectes Amétaboles	Collemboles										1					1
	Insectes Hétérométaboles	Odonatoptères	Aeshnidae		1			2				2					5
				Aeshna sp.			1										1
			Coenagrionidae		1	8		2	17	8	13	17					66
				Ishnura sp.			7	7						3	8		25
			Corduliidae	*Hemicordulia* sp.													0
			Libellulidae		1	5		2				1					9
				Orthetrum caledonicum													0
				Tramea sp.				1	2				2		8	1	13
		Hétéroptères	Corixidae		1	1	1	2	1	3	2	1					12
				Sigara sp.													0
			Gerridae				3										3
			Notonectidae			2		2	1		22	1	2				30
				Anisops sp.											1		1
	Insectes Holométaboles	Diptères	Cecidomyiidae														0
			Ceratopogonidae		16	91											107
				Ceratopogoninae* spp.			10	29	10	9	4	6	2	6	16	3	92
				Dasyheilinae spp.	7		2					1	1				11
			Chironomidae		1				3	2	5						11
				Chironomini* indéterminés	18	154		21				239	35	44	118		629
				Chironomini *Harrisius* * spp.	2	1			34	49	35						121
				Orthocladiinae *Corynoneura* * spp.													0
				Orthocladiinae* spp.	18							1					19
				Tanypodinae* spp.	19	24	21	7	1	22		15	14	6	54	10	183
				Tanytarsini	164	1	45	124	47	18		25	50	1	2	23	477
			Culicidae				2	11	33	19	19	2					86
			Dolichopodidae						2	17	7						26
			Empididae								1						1
			Ephydridae														0
			Limoniidae*						2	4	1				1		8
			Tabanidae		8												8
		Trichoptères	Ecnomidae*		35	62	18	25	26	10	24	14	11	14	17	8	256
			Hydroptilidae*	*Oxyethira* sp.	6	15	6	32	19	20	15	13	5	4	18	1	153
			Leptoceridae	N. gen. fourreau tube arqué en sable	4												4
				N. gen. PIII 4 articles							1						1
				Symphitoneuria * sp.							1						1
				Oecetis sp.	2		11	19	1	9	13	38	4	10	7		114
		Coléoptères	Curculionidae														0
			Dytiscidae*	Colymbetinae													0
				Dytiscinae spp.													0
				Onychohydrus scutellaris	1							1					2
				Megaporus feryi											2		2
				Limbodessus cheesmanae													0
			Gyrinidae	*Gyrinus* sp.		2	1		2	1		2			12		20
			Haliplidae	*Haliplus oberthuri*													0
			Hydrophylidae														0
			Scirtidae/Helodidae	Larve longue	16	16	40	14	29	12	15			1			143
				Larve large	12			2	1	5	6						26
		Lépidoptères															0
TOTAL					368	397	265	415	289	571	221	405	159	96	285	62	3471
NOMBRE DE TAXA					23	15	17	21	23	22	22	19	14	10	14	7	44

Doline du Trou Tahitien

Embranchement	Classe / Sous-classe	Ordre	Famille	Sous-famille, Tribu, Genre ou Espèce	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL sans 2016
Némathelminthes	Nématodes*														1		1
Némertiens														1			1
Annélides	Oligochètes*		Naididae		2	5	4	6						1		2	18
Arthropodes	Crustacés Cladocères							1									1
	Crustacés			Calanoida	310	240		25		1667	86	1	8			12	2337
	Copépodes			Cyclopoida			173	116			3			1			293
	Crustacés Ostracodes																0
	Crustacés Malacostracés	Amphipodes*	Niphargidae														0
	Arachnides Hydracariens							2		1							3
	Insectes Amétaboles	Collemboles								1	1	1					3
	Insectes Hétérométaboles	Odonatoptères	Aeshnidae														0
				Aeshna sp.													0
			Coenagrionidae														0
				Ishnura sp.													0
			Corduliidae	*Hemicordulia* sp.													0
			Libellulidae		1												1
				Orthetrum caledonicum													0
				Tramea sp.										4			4
		Hétéroptères	Corixidae								1		1	22			24
				Sigara sp.													0
			Gerridae														0
			Notonectidae		2	2	39	9	1	7	11	5	1	9			86
				Anisops sp.													0
	Insectes Holométaboles	Diptères	Cecidomyiidae														0
			Ceratopogonidae														0
				Ceratopogoninae* spp.										2			2
				Dasyheilinae spp.													0
			Chironomidae														0
				Chironomini* indéterminés	1			1					7	4		1	13
				Chironomini *Harrisius* * spp.								1		1		1	2
				Orthocladiinae *Corynoneura* * spp.													0
				Orthocladiinae* spp.													0
				Tanypodinae* spp.	4	8	1			6	1	6	12	35	1	2	74
				Tanytarsini				2			2	13	51	9			77
			Culicidae							1	1	1					3
			Dolichopodidae														0
			Empididae														0
			Ephydridae														0
			Limoniidae*														0
			Tabanidae														0
		Trichoptères	Ecnomidae*							1				1			2
			Hydroptilidae*	*Oxyethira* sp.			1			5				1			7
			Leptoceridae	N. gen. fourreau tube arqué en sable													0
				N. gen. PIII 4 articles													0
				Symphitoneuria * sp.													0
				Oecetis sp.			1					2		1			4
		Coléoptères	Curculionidae				2				2						4
			Dytiscidae*	Colymbetinae													0
				Dytiscinae spp.													0
				Onychohydrus scutellaris													0
				Megaporus feryi	2	1	1				1			1			6
				Limbodessus cheesmanae	2	1				1	1			1			6
			Gyrinidae	*Gyrinus* sp.	1												1
			Haliplidae	*Haliplus oberthuri*													0
			Hydrophylidae														0
			Scirtidae/Helodidae	Larve longue					1								1
				Larve large							1						1
		Lépidoptères															0
TOTAL					325	257	222	162	2	1690	111	30	80	94	2	18	2975
NOMBRE DE TAXA					9	6	8	8	2	9	12	8	6	16	2	5	27

Doline Pilote

(année 2016 uniquement)

Embranchement	Classe / Sous-classe	Ordre	Famille	Sous-famille, Tribu, Genre ou Espèce	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Némathelminthes	Nématodes*															
Némertiens																
Annélides	Oligochètes*		Naididae													
Arthropodes	Crustacés Cladocères															13
	Crustacés Copépodes			Calanoida												6
				Cyclopoida												1
	Crustacés Ostracodes															81
	Crustacés Malacostracés	Amphipodes*	Niphargidae													
	Arachnides Hydracariens															4
	Insectes Amétaboles	Collemboles														
	Insectes Hétérométaboles	Odonatoptères	Aeshnidae													1
				Aeshna sp.												
			Coenagrionidae													
				Ishnura sp.												2
			Corduliidae	*Hemicordulia* sp.												
			Libellulidae													
				Orthetrum caledonicum												
				Tramea sp.												11
		Hétéroptères	Corixidae													
				Sigara sp.												
			Gerridae													
			Notonectidae													12
				Anisops sp.												
	Insectes Holométaboles	Diptères	Cecidomyiidae													
			Ceratopogonidae													
				Ceratopogoninae* spp.												
				Dasyheilinae spp.												
			Chironomidae													
				Chironomini* indéterminés												
				Chironomini *Harrisius* * spp.												
				Orthocladiinae *Corynoneura* * spp.												
				Orthocladiinae* spp.												
				Tanypodinae* spp.												108
				Tanytarsini												47
			Culicidae													
			Dolichopodidae													
			Empididae													
			Ephydridae													
			Limoniidae*													
			Tabanidae													
		Trichoptères	Ecnomidae*													
			Hydroptilidae*	*Oxyethira* sp.												
			Leptoceridae	N. gen. fourreau tube arqué en sable												
				N. gen. PIII 4 articles												
				Symphitoneuria * sp.												
				Oecetis sp.												
		Coléoptères	Curculionidae													
			Dytiscidae*	Colymbetinae												
				Dytiscinae spp.												
				Onychohydrus scutellaris												
				Megaporus feryi												3
				Limbodessus cheesmanae												
			Gyrinidae	*Gyrinus* sp.												
			Haliplidae	*Haliplus oberthuri*												1
			Hydrophylidae													2
			Scirtidae/Helodidae	Larve longue												2
				Larve large												
		Lépidoptères														
TOTAL					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	294
NOMBRE DE TAXA					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15

Codification des échantillons utilisée pour les analyses statistiques.

Echantillon	Doline	Campagne de terrain
E1	Croissant	1
E2	Croissant	2
E3	Croissant	3
E4	Croissant	4
E5	Croissant	5
E6	Croissant	6
E7	Croissant	7
E8	Croissant	8
E9	Croissant	9
E10	Croissant	10
E11	Croissant	11
E12	Croissant	12
E13	Lac	1
E14	Lac	2
E15	Lac	3
E16	Lac	4
E17	Lac	5
E18	Lac	6
E19	Lac	7
E20	Lac	8
E21	Lac	9
E22	Lac	10
E23	Lac	11
E24	Lac	12
E25	Marécage	1
E26	Marécage	2
E27	Marécage	3
E28	Marécage	4
E29	Marécage	5
E30	Marécage	6
E31	Marécage	7
E32	Marécage	8
E33	Marécage	9
E34	Marécage	10
E35	Marécage	11
E36	Marécage	12
E37	Petite	1

Echantillon	Doline	Campagne de terrain
E38	Petite	2
E39	Petite	3
E40	Petite	4
E41	Petite	5
E42	Petite	6
E43	Petite	7
E44	Petite	8
E45	Petite	9
E46	Petite	10
E47	Petite	11
E48	Petite	12
E49	Bleue	1
E50	Bleue	2
E51	Bleue	3
E52	Bleue	4
E53	Bleue	5
E54	Bleue	6
E55	Bleue	7
E56	Bleue	8
E57	Bleue	9
E58	Bleue	10
E59	Bleue	11
E60	Bleue	12
E61	Tahitien	1
E62	Tahitien	2
E63	Tahitien	3
E64	Tahitien	4
E65	Tahitien	5
E66	Tahitien	6
E67	Tahitien	7
E68	Tahitien	8
E69	Tahitien	9
E70	Tahitien	10
E71	Tahitien	11
E72	Tahitien	12
E73	Pilote	12

ANNEXE 4 : Dolines à sec lors des missions terrain de 2016 et 2017

Diagnose des dolines :
Lac du plateau de Tia

Compte rendu de terrain
Juin 2016

biokeko CONSULTANTS

ETUDE N°2185 - VERSION V0 - juin 2016

Sommaire

1. localisation de la doline 3
2. Visite de terrain 4

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la doline sur le plateau de Tia (source Georep) 3
Figure 2 : Photographies de la doline à sec 4

Liste des tableaux

Tableau 1 : Coordonnées GPS de la doline 3

1. LOCALISATION DE LA DOLINE

La doline se situe sur le plateau de Tia, l'accès peut se faire en 4x4 par temps sec depuis la RT1 entre Pouembout et Népoui. Une fois sur le plateau la piste menant à la doline est en grenaille assez épaisse, avec un risque de s'enlisée. Le tableau 1 et la figure 1 présente la localisation de la doline.

Tableau 1 : Coordonnées GPS de la doline

	X (RGNC)	Y (RGNC)
Lac (plateau de Tia)	285829	335541

Figure 1 : Localisation de la doline sur le plateau de Tia (source Georep)

2. VISITE DE TERRAIN

La prospection de cette doline a été réalisée le 22 juin 2016. Au moment de notre passage, la doline était à sec comme on peut le constater sur la figure 2. Nous n'avons donc pas pu effectuer de prélèvements.

Figure 2 : Photographies de la doline à sec

Diagnose des dolines : Plateau de Tiébaghi

Compte rendu de terrain
Octobre 2017

biOeko CONSULTANTS

ETUDE N°2185 – VERSION V0 – Octobre 2017

Sommaire

1. Localisation deS dolines....3
2. Visite de terrain....4

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des dolines sur le plateau de Tiébaghi (source DIMENC)....3
Figure 2 : Photographies des dolines de Tiébaghi....7

Liste des tableaux

Tableau 1 : Coordonnées GPS des dolines....3

1. LOCALISATION DES DOLINES

Les dolines se situent sur le plateau de Tiébaghi, l'accès peut se faire en 4x4 en passant par le centre minier de la SLN. Les dolines 4 et 7 ne sont pas accessibles car elles se trouvent au niveau des pits en exploitation. Le tableau 1 et la figure 1 présente la localisation des dolines. A noter que le fond de carte géorep date de 2012.

Tableau 1 : Coordonnées GPS des dolines

Identification Bioeko	Condition d'accès	X	Y
1	4x4	212543	416466
2	4x4	212465	416413
3	4x4	212517	416008
4	Non accessible (zone de chantier)	212352	415708
5	4x4	213254	414740
6	4x4	212687	415878
7	Non accessible (zone de chantier)	212619	415338
8	4x4	212187	416268

Massif de Tiébaghi - Dolines

Figure 1 : Localisation des dolines sur le plateau de Tiébaghi (source DIMENC).

2. VISITE DE TERRAIN

La prospection des dolines a été réalisée entre le 9 et le 13 octobre 2017. Au moment de notre passage, les dolines étaient à sec comme on peut le constater avec les photographies en figure 3. Nous n'avons donc pas pu effectuer de prélèvements. Ces photographies ont été réalisées par Bio eKo à l'aide d'un drone Phantom 4 (scénario S1). Il semble que ces dolines ne soient pas fréquemment en eau même en saison humide.

Doline 1 & 2	

Doline 3	
Doline 4 & 7 Non prospectées (zone d'exploitation)	

Doline 5	
Doline 6	
Doline 8	

Figure 2 : Photographies des dolines de Tiébaghi

CNRT "Nickel et son environnement"

Tome Nickel et Environnement