

Synthèse des travaux sur les Îles Loyauté (Nouvelle Calédonie). Problèmes de la gestion de la ressource en eau

François Orange^{(1) (5)}, Michel Allenbach⁽²⁾, Michel Lepiller^{†(3)}, Didier Lille⁽⁴⁾, Alexandre Hoesz⁽³⁾, Dorota Jaromin⁽³⁾, Aziz Atiyeh⁽³⁾, Vincent Cadoret⁽³⁾, Savinien Navarre⁽³⁾

⁽¹⁾ Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - Bâtiment Géosciences, Université d'Orléans, BP 6759 - 45067 Orléans cedex 2 - orange@cnrs-orleans.fr

⁽²⁾ LGPMC-EA 3325, Université de la Nouvelle Calédonie - BP R4 - 98851 Nouméa cedex, Nouvelle Calédonie - allenbach@univ-nc.nc

⁽³⁾ Polytech'Orléans, Université d'Orléans - 8 rue Léonard de Vinci - 45072 Orléans cedex 2

⁽⁴⁾ US Espace, Institut de Recherche pour le Développement, Nouméa - BP A5 - 98848 Nouméa cedex, Nouvelle Calédonie - didier.lille@noumea.ird.fr

⁽⁵⁾ Centre de Biophysique Moléculaire CNRS - 45071 Orléans cedex 2

I. INTRODUCTION

Avant sa disparition en 2006, Michel Lepiller était fortement impliqué dans l'étude hydrogéologique des Îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie), au sein d'un programme de recherche pluridisciplinaire concernant la compréhension et la gestion de la ressource en eau sur ces îles, impliquant de nombreux partenaires en Nouvelle-Calédonie ainsi qu'en France.

Cet article a pour but de présenter l'originalité des formations karstiques des Îles Loyauté, et de montrer comment Michel Lepiller, accompagnés de nombreux étudiants, a pu y transposer ses connaissances des systèmes karstiques, pour y mettre en œuvre une série d'études qui a permis de faire avancer notre conception des aquifères de ces îles.

II. PRÉSENTATION DES ÎLES LOYAUTÉ

II.1 Histoire géologique

L'archipel de la Nouvelle-Calédonie (Fig. 1) s'est formé à la suite de plissements de la croûte océanique à l'est de la plaque australienne. L'un de ces plissements a donné la Grande Terre, tandis qu'un autre, parallèle au premier, a formé la ride des Loyauté. C'est sur cette ride que se sont formées les Îles Loyauté (du nord-ouest au sud-est : Ouvéa, Lifou, Tiga, Maré), des îles hautes carbonatées qui, malgré leurs tailles et aspects différents, ont la même origine et la même structure géologique.

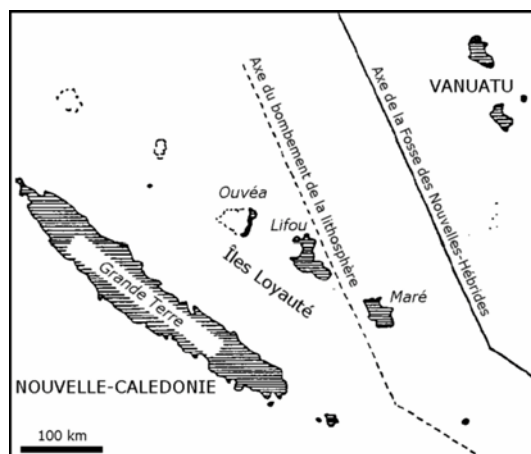


Figure 1 : Carte de la Nouvelle-Calédonie montrant la position des Îles Loyauté par rapport à la Fosse des Nouvelles-Hébrides et au bombement de la lithosphère (1), adapté de (2).

Sur un soubassement basaltique (Miocène), seul reste d'anciens volcans, s'est ainsi développé, entre 11 Ma (Miocène supérieur) et 3 Ma (Pliocène), une formation calcaire sous l'action des rhodolithes (algues rouges) qui constitue aujourd'hui 95% du calcaire des Loyauté. Ce calcaire à rhodolithes se présente sous forme de formations alguaires sphériques (quelques centimètres de diamètres) cimentées entre elles, donnant un aspect boursoufflé aux affleurements. Par la suite, une formation récifale, d'origine principalement corallienne, s'est développée au Pliocène sur cette formation à rhodolithes tout autour des îles, et a formé le bourrelet périphérique (large de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres) qui ceinture les Loyauté et surplombe d'une cinquantaine de mètres le plateau central des îles (Fig. 5a). L'érosion de ce bourrelet a donné lieu à une sédimentation de matériau biodétritique au centre de l'île, qui a recouvert le calcaire à rhodolithes (Fig. 2) (2, 3, 4).

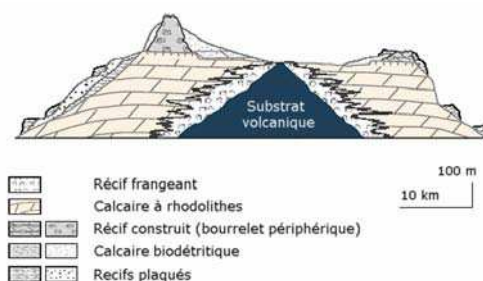


Figure 2 : Coupe lithologique synthétique de l'île de Maré (4), adapté de (2).

La présence de formations coralliennes jusqu'à une centaine de mètres d'altitude, ainsi que la différence d'aspect des îles s'expliquent par la proximité d'une zone de subduction (fosse des Nouvelles-Hébrides) où la plaque australienne plonge sous la plaque Pacifique. Cette subduction entraîne un bombement de la plaque océanique qui est le socle des Îles Loyauté (Fig. 3). Au fur et à mesure de l'avancée de la plaque australienne, les Îles Loyauté, Maré la première, ont atteint depuis le Pléistocène ce bombement et ont progressivement émergé (Fig. 3) (1). Maré semble avoir déjà basculé de l'autre côté du bombement et entamé son plongeon vers la fosse de subduction, tandis que Lifou est encore en phase d'ascension. Ouvéa ferme la marche et se trouve dans la position qu'occupait Lifou et Maré il y a quelques centaines de milliers d'années. Elle a ainsi à peine entamé sa phase d'ascension, ce qui explique qu'elle ne présente qu'une faible surface émergée, et un plateau central encore submergé. C'est au cours de cette émergence

que des récifs coralliens ont recouvert le calcaire à rhodolithes au niveau du littoral, donnant naissance à un certain nombre de terrasses et de falaises tout autour des îles (Fig. 2).

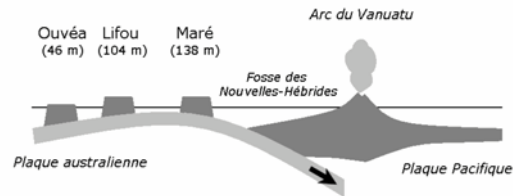


Figure 3 : Profil de la zone de subduction à proximité des Îles Loyauté.

II.2. Organisation du réseau karstique et structure de la nappe d'eau douce

II.2.1. Développement du karst

Depuis le début de l'émergence des îles, un important réseau karstique s'est formé dans le plateau calcaire, sous l'effet de l'infiltration des eaux météoritiques et de l'eau de mer par les nombreuses fractures qui parcourent les massifs calcaires. Cette fracturation a été accentuée par les déformations provoquées par le parcours des îles sur le bombement de la lithosphère. Les formations karstiques se sont développées dans le calcaire à rhodolithes, qui est beaucoup plus sensible à l'érosion que le calcaire corallien. Le sous-sol de toutes les Îles Loyauté comporte ainsi de nombreux vides (cavités, trous d'effondrements, fractures élargies) qui peuvent atteindre des tailles impressionnantes (jusqu'à une centaine de mètres de diamètre à Maré et Lifou, Fig. 5b). Ces formations karstiques atteignent parfois la surface (exokarst) dans les zones où la couche de calcaire corallien est peu épaisse et s'est effondrée. De ce fait, les formations exokarstiques sont essentiellement présentes en périphérie des îles, au pied du bourrelet périphérique.

II.2.2. Une lentille d'eau douce

L'une des caractéristiques principales des quatre principales Îles Loyauté (Lifou, Maré, Ouvéa et Tiga) est leur absence de réseau hydrographique superficiel : on n'y trouve en effet aucun cours d'eau. Du fait de la grande porosité du socle calcaire, de l'importance de la fracturation et du réseau karstique, la totalité des importantes précipitations (1600 mm/an en moyenne) s'infiltré en effet directement dans le sol.

Ces îles sont véritablement des cailloux posés au milieu de l'océan Pacifique. De ce fait, l'existence d'une nappe d'eau douce apparaît comme un petit miracle géologique. Les Îles Loyauté disposent pourtant toutes d'une nappe d'eau douce ou saumâtre qui « flotte » sur l'eau salée, grâce à sa plus faible densité, et la faible miscibilité des deux liquides. Vue de profil cette nappe prend la forme d'une lentille dite de Ghyben-Herzberg, d'après les auteurs qui ont décrit ce modèle (Fig. 4).

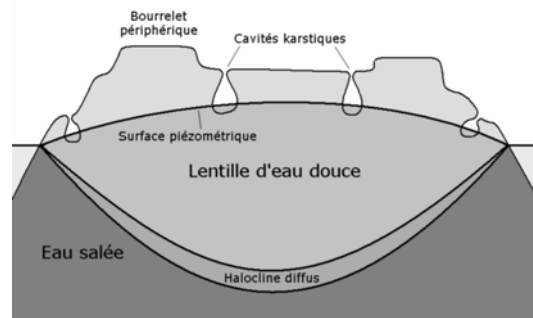


Figure 4 : Représentation schématique de la lentille d'eau douce des Îles Loyauté, adapté de (2).

Ce modèle est assez simpliste, mais permet de bien décrire la morphologie générale des nappes d'eau douces des Îles Loyautés. La taille et la salinité de cette lentille d'eau dépendent de la taille de l'île. Ainsi on trouve une nappe d'eau douce importante à Lifou et Maré, tandis que seule une petite nappe d'eau contaminée par l'eau de mer est présente à Ouvéa et Tiga. Les niveaux piézométriques suivent la même tendance : la nappe d'eau douce à Lifou et Maré atteint respectivement 3,5 et 2,5 mètres au dessus du niveau de la mer, tandis qu'elle atteint à peine quelques dizaines de centimètres à Ouvéa (5, 6). La limite inférieure de cette nappe se situe à approximativement 40 fois le niveau piézométrique.

L'équilibre qui maintient la lentille d'eau douce est fragile, et dépend d'une alimentation régulière de la nappe, et de variations limitées de son niveau et du niveau marin, afin de limiter la contamination par l'eau salée (5).

II.3. Conséquences pour la gestion de la ressource en eau. Programmes de recherches (ADAGE, SAGE)

L'accès à l'eau douce et la gestion de cette ressource est un problème de longue date aux Îles Loyauté. Hormis les citernes, la nappe d'eau douce représente ainsi la seule source d'eau potable pour les populations de Lifou et Maré. A Ouvéa, l'absence d'une vraie nappe d'eau douce a conduit à la construction récente d'une usine de dessalement.

II.3.1 Vulnérabilité de la nappe d'eau douce

Comme nous l'avons déjà mentionné, la présence d'une nappe d'eau douce sur ces îles repose sur un équilibre précaire. L'eau potable est exposée à une pollution par l'eau salée et à la pollution humaine.

Si, en théorie, la limite entre la nappe d'eau et l'eau salée (ou halocline) sur laquelle elle repose est nette, les études ont montré que cet halocline est plutôt diffus (Fig. 4), moins profond que la valeur théorique, et qu'il se déplace en fonction des variations du niveau piézométrique, comme celles entraînées par les pompages. Une légère variation du niveau piézométrique suffit à faire remonter fortement l'halocline. Ainsi un pompage intensif entraînerait une baisse significative du niveau piézométrique, et inversement, une remontée de l'halocline, ce qui peut aboutir dans le cas extrême au pompage d'eau salée.

La nature très perméable des terrains calcaires rongés par la karstification fait que les substances polluantes peuvent être entraînées par les eaux météoriques jusque dans la nappe, et sont donc une menace permanente vis à vis de la potabilité des eaux de pompage.

Confronté à la croissance démographique et au développement agricole, artisanal et touristique, le développement économique durable des Îles Loyauté est donc lié à la capacité des populations (20000 habitants au total) à préserver la qualité des eaux souterraines, et donc

à savoir exploiter raisonnablement cette ressource, tout en limitant et en maîtrisant les activités pouvant entraîner une pollution. Dans cette optique, différents programmes de recherches pluridisciplinaires ont été mis en œuvre.

II.3.2. Programmes d'étude de la ressource en eau

Dans un premier temps, le programme ADAGE (Aide à la Décision en Aménagement et Gestion de l'Environnement) a d'abord été mis en œuvre à Lifou, et a mobilisé plusieurs partenaires des Îles Loyauté et de Nouvelle-Calédonie (IRD, Province des Îles Loyauté, Mairie de Lifou, autorités coutumières, ALCATEL-Space-Industrie et UNC) avec l'objectif de rassembler les connaissances relatives à la ressource en eau de cette île. Il en est ressorti que le volume de la nappe d'eau douce de Lifou était nettement suffisant pour subvenir aux habitants et aux activités de l'île, à condition de pomper l'eau de manière répartie et modérée (7). Ces conclusions sont également valables pour Maré. En ce qui concerne Ouvéa et Tiga, si la nappe d'eau est insuffisante ou inutilisable en l'état, elle demeure tout de même vulnérable à une pollution humaine.

Ce programme a aussi mis en avant notre manque de connaissances concernant les risques de pollution aux Îles Loyauté, les zones les plus sensibles, et la conciliation du développement social et économique (agriculture, tourisme, élevage, urbanisation) de ces îles avec une gestion équilibrée des ressources en eau.

C'est avec l'objectif de répondre à ces problématiques que le programme SAGE – Îles Loyauté (Système d'Aide à la Gestion de l'Environnement - Gestion Durable de la Ressource en Eau) a été entrepris, partenariat pluridisciplinaire (géosciences, géomatique, géographie, droit, communication) entre l'IRD, les Universités de Nouvelle-Calédonie et d'Orléans, et la Province des Îles Loyauté. Les objectifs étaient d'améliorer la connaissance des mécanismes de circulation de l'eau dans les nappes des Îles Loyautés pour permettre la compréhension en matière de risque des conséquences d'une pollution des nappes d'eau douce, d'établir des cartes de vulnérabilité et d'aider à la localisation des activités à risque.

Cela passait par la réalisation d'un programme de recherche fondamentale sur la compréhension du karst des Îles Loyauté. La partie géologique de ce programme a ainsi été abordée sous deux facettes complémentaires, avec une approche d'hydrogéologie karstique d'une part, et une approche structurale (étude de la fracturation), d'autre part. Les recherches en hydrogéologie karstique avaient pour objectif précis de mieux caractériser l'aquifère et de préciser le rôle de la karstification dans son fonctionnement, l'objectif final étant l'élaboration d'un modèle le plus fidèle possible à la réalité, constituant un outil de gestion de l'aménagement et du développement.

Ce fut ainsi l'opportunité pour Michel Lepiller de mettre en application son expérience des réseaux karstiques, et d'impliquer plusieurs élèves ingénieurs qui l'ont accompagné lors des travaux en laboratoire ou sur place.

III. ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DES ÎLES LOYAUTÉ

Les études hydrogéologiques ont surtout concerné Lifou, et dans une moindre mesure Maré, qui sont les deux seules îles à posséder une nappe d'eau importante.

Cette série de travaux a été conçue par Michel Lepiller en collaboration avec les partenaires locaux. Pour leur mise en œuvre, il fut aidé par de nombreux élèves ingénieurs de Polytech'Orléans (Alexandre Hoetz, François Orange, Aziz Atiyeh, Vincent Cadoret, Dorota Jaromin et Savinien Navarre), lors des trois années qu'ont duré le programme SAGE (jusqu'en 2004) et les années suivantes.

Le déroulement de l'étude hydrogéologique des Îles Loyauté a suivi une démarche progressive, commençant par le recensement, la prospection et l'exploration spéléologique des formations karstiques à Lifou et Maré, suivis par l'identification d'axes de drainages préférentiels par des traçages fluorimétriques, et un recueil de chroniques de piézométrie le long de ces drains karstiques. Ces données et résultats furent la base d'une étude sur l'influence des précipitations et de la marée sur la nappe d'eau douce par analyses corrélatoires et spectrales (ACS), et d'une modélisation informatique de l'aquifère. Ces moyens d'analyses précis ont surtout été utilisés dans la zone de la Baie de Châteaubriand à Lifou, qui est la zone la plus peuplée de l'île, et qui présente également une grande concentration de formations karstiques (Fig. 6). L'objectif était d'obtenir une connaissance très poussée de cette zone test, pour pouvoir ensuite appliquer et généraliser les conclusions au reste de l'île et à Maré.

III.1. Repérage des cavités karstiques et des zones d'exhaure

Avant que soit entreprise l'étude hydrogéologique des Îles Loyauté, on considérait que l'exhaure était diffus et réparti sur tout le littoral, suivant le modèle de la lentille de Ghyben-Herzberg. Les zones importantes d'exhaure n'avaient jusque là pas été repérées, ou n'étaient connues que des habitants de l'île.

Une partie importante du temps passé aux Îles Loyauté par Michel Lepiller et ses étudiants a été consacrée au recensement des zones d'exhaure littorales, pour repérer de possibles zones préférentielles de drainage, par prospection du littoral à marée basse. D'importantes émergences ont ainsi été identifiées en différents points du littoral de Lifou et de Maré (Figs. 5c et d). L'eau qui y jaillit est toujours saumâtre (mélangée à l'eau de mer) et peut être détectée visuellement (aspect huileux des eaux saumâtres), ou par conductimétrie. De manière systématique, leur position a été relevée et des prélèvements d'eau ont été faits pour analyse.

En parallèle, un recensement des formations karstiques de Lifou et de leur localisation a été effectué par Alexandre Hoesz, à partir de la bibliographie existante, des informations données par les habitants de l'île, et complété par des observations aériennes ou satellite (8, 9). Cet inventaire a ensuite été suivi de l'exploration spéléologique de ces grottes, afin de voir dans quelles conditions elles permettaient l'accès à la nappe d'eau douce, de juger de leur taille, de leur morphologie et de leur orientation. Ce recensement a également été effectué à Maré.

Ce repérage des zones d'exhaures et la spéléologie dans les cavités karstiques constituaient le travail de base à l'étude hydrogéologique des Îles Loyauté. Il a été mené de manière régulière et soutenue au cours de toutes les missions de terrains par l'ensemble des élèves ingénieurs sous la responsabilité de Michel Lepiller, que ce soit à Lifou ou Maré.

Si le repérage des zones d'exhaure est loin d'être complet, il a toutefois permis de montrer que l'exhaure s'effectuait de manière localisée et non diffuse, et le plus souvent dans des parties concaves du trait de côte (comme au niveau de la baie de Châteaubriand à Lifou). Cette observation s'avère également cohérente avec les zones de drainage de l'aquifère mises en évidence par la piézométrie, qui montre une partition de l'aquifère en systèmes hydrogéologiques individualisés.

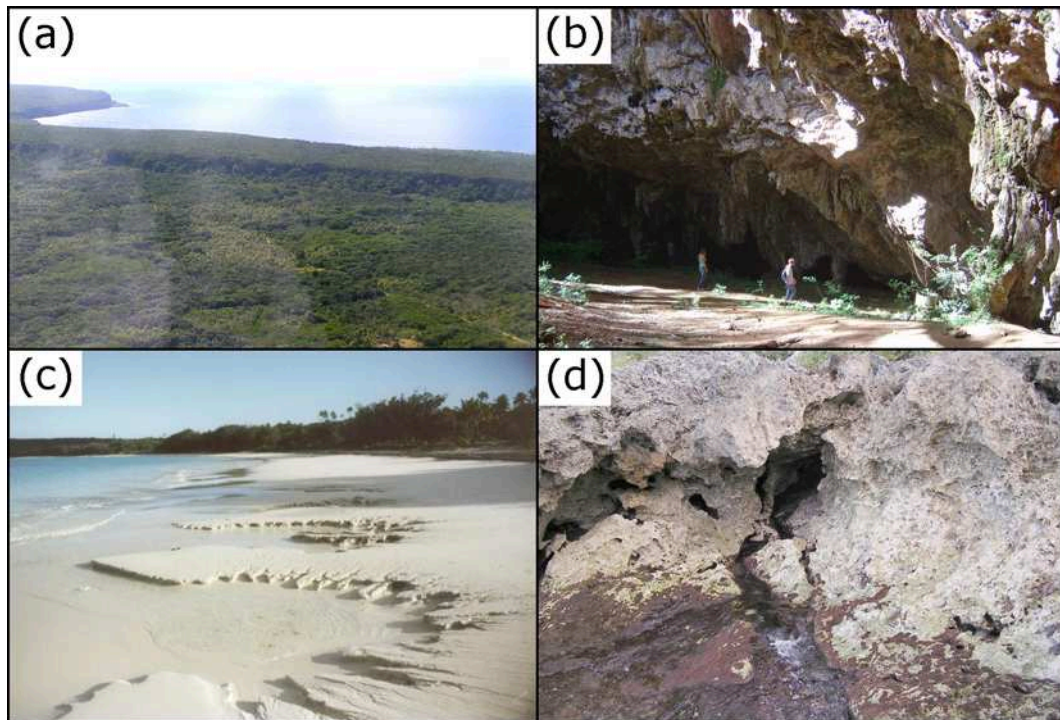


Figure 5 : Différents aspects géologiques et hydrogéologiques des Îles Loyauté. (a) Vue aérienne du bourrelet périphérique de Lifou (b) Exemple de formation karstique de grande taille à Maré. (c) Émergences visibles à marée basse sur la plage de Luecilla (Lifou) (d) Émergence visible à marée basse au niveau d'une fracture dans le calcaire corallien (Lifou).

III.2. Traçages

Le repérage d'alignements de formations exokarstiques à proximité de zones d'exhaures, ainsi que la variabilité probable de la perméabilité du massif calcaire de l'île ont conduit à la réalisation de traçages fluorimétriques dans divers sites à Lifou, afin de mettre en évidence l'existence de drains karstiques souterrains et d'évaluer les paramètres du transit à partir de la distribution des temps de séjour (temps moyen de séjour, vitesse apparente).

Ces traçages ont été réalisés en injectant de la fluorescéine ou de la rhodamine au fond de certaines formations karstiques où la nappe d'eau est accessible. En aval, des mesures par spectrofluorimétrie en laboratoire ou fluorimétrie *in situ* ont été effectuées sur l'eau prélevée aux points de sortie supposés.

C'est ainsi que des liaisons karstiques de grandes dimensions ont pu être mises en évidence, notamment entre les grottes de Thoubotr et Manet (Lifou) et la zone d'exhaure située plus en aval (Figs. 6 et 5d). Injecté au niveau du bourrelet périphérique, le traceur a atteint la mer, située à 2 km de là, en quelques jours. Ce traçage a ainsi permis de démontrer que la succession des manifestations exokarstiques était bien le témoignage en surface d'un drain karstique souterrain (9).

D'autre part, un traçage lancé dans une grotte proche de la mer à Luengoni (Lifou) a également montré un lien avec les émergences voisines, et a permis, par la même, de constater l'influence de la marée sur le fonctionnement de l'exhaure. A marée montante, la pression de l'eau de mer bloque l'exhaure, qui n'est alors fonctionnelle qu'à marée descendante (10).

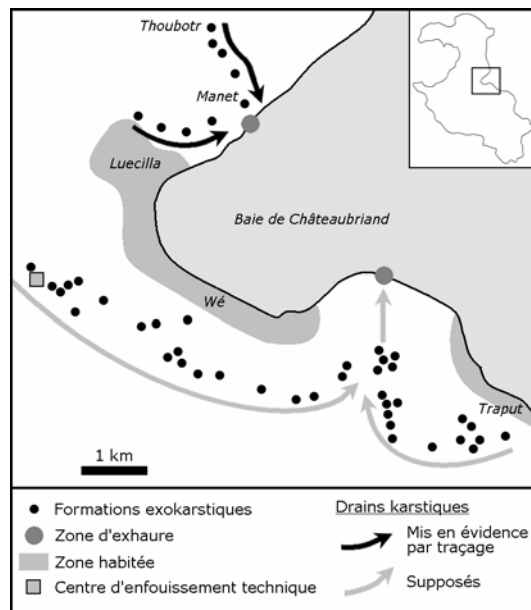


Figure 6 : Carte de la Baie de Châteaubriand (Lifou), avec la localisation des formations exokarstiques et le trajet des drains karstiques, mis en évidence par traçage fluorimétriques ou supposés.

III.4. Analyses Corrélatoires et Spectrales (ACS)

Dans la continuité de la réalisation de traçage, une étude approfondie de ce drain karstique (allant du haut du bourrelet périphérique (grotte de Thoubotr) jusqu'à la mer) a été menée pour appréhender la dynamique de la nappe au voisinage de la côte, et sa réaction aux variations de marée et aux événements pluvieux. Des appareils de mesures ont ainsi été installés au fond des grottes de Thoubotr et de Manet et ont enregistré, en continu et sur plusieurs mois, les niveaux piézométriques.

En parallèle, les données relatives à la pluviométrie et aux hauteurs de marées ont également été compilées. Le traitement de toutes ces chroniques par analyse corrélatoire et spectrale (ACS), effectué par Dorota Jaromin (11), a permis de préciser le fonctionnement de ce drain karstique. Tout d'abord, l'étude par ACS de la relation entre les précipitations et le niveau piézométrique a confirmé la rapidité de l'infiltration des eaux de pluie dans le sous-sol, en montrant une répercussion quasi-immédiate des précipitations sur la piézométrie. Ensuite, il a été montré que les variations du niveau de la nappe au sein d'un drain karstique sont très vite transmises, et qu'il n'y a qu'une dizaine de minutes de déphasage entre les niveaux piézométriques des grottes de Thoubotr et Manet, pourtant éloignées de 1400 mètres. En revanche, les variations de hauteur de marée tardent à se faire sentir sur la piézométrie de la nappe, même si l'onde de marée peut se faire ressentir jusqu'à plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. Malgré la faible distance entre la grotte de Manet et la mer, un déphasage important a été constaté. Les variations dues à la marée ne se font sentir qu'une heure plus tard sur la piézométrie de la grotte. Ceci suggère que les massifs calcaires du littoral ont une perméabilité bien plus faible que le reste du drain karstique, et forment ainsi un bouchon qui retarde les effets de la marée sur la piézométrie.

III.4. Modélisation de l'aquifère

Une modélisation informatique a été réalisée par François Orange (10) et utilisée pour étudier le fonctionnement de la nappe d'eau douce à l'échelle de l'île de Lifou, puis à l'échelle de la

Baie de Châteaubriand, afin de simuler le comportement hydrodynamique de l'aquifère, le transit de l'eau et d'éventuelles substances polluantes, en intégrant les dernières connaissances acquises. Ces modèles ont été établis avec le logiciel ASMWIN (Aquifer Simulation Model) (12).

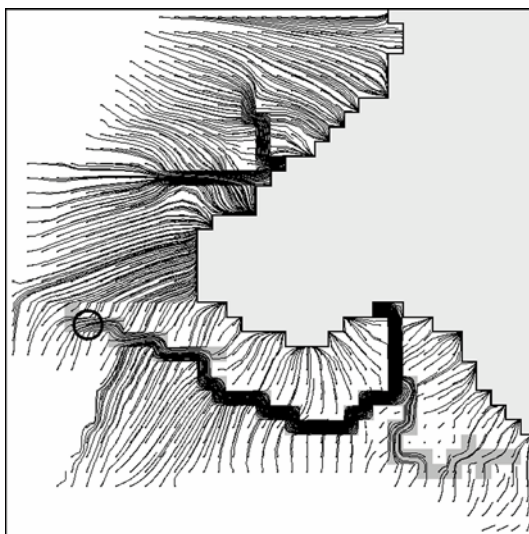


Figure 7 : Calcul par ASMWIN des trajectoires d'écoulement à la surface de la nappe d'eau douce sur une période d'un mois au niveau de la Baie de Châteaubriand (Lifou, cf. Fig. 6). Les mailles grisées correspondent aux formations karstiques qui ont été prises en compte dans la modélisation. La localisation du centre d'enfouissement technique est précisée (rond noir).

Il a ainsi été possible de simuler les trajectoires des écoulements d'eau autour de la Baie de Châteaubriand (Lifou), en prenant en compte la présence de drains karstiques avérés par traçages, ou supposés, qui suivent les alignements de formations exokarstiques, pour aboutir aux zones d'exhaure reconnues. La modélisation a ainsi permis de représenter de manière significative et spectaculaire l'influence de tels réseaux karstiques sur la piézométrie locale. Les écoulements d'eau apparaissent être capturés par les drains karstiques, et atteignent préférentiellement la mer au niveau des zones d'exhaure localisées (Fig. 7). Cette modélisation a enfin eu une application concrète en montrant que l'ensemble du drain karstique supposé au sud de la baie pourrait être exposé à une pollution provenant d'un centre d'enfouissement technique installé à proximité de formations exokarstiques (Fig. 6 et 7).

IV. CONCLUSION : APPORTS À LA COMPRÉHENSION DE CES AQUIFÈRES

Sur le plan scientifique, les recherches en hydrogéologie entreprises dans le cadre du programme SAGE ont permis de faire évoluer de manière significative notre représentation des aquifères des Îles Loyauté, pour aboutir à une modélisation dynamique de la circulation de l'eau. Auparavant vus comme des milieux avec une porosité interstitielle primaire, où la porosité et la perméabilité varient de manière homogène et continue, ces aquifères sont désormais considérés comme des milieux à porosité interstitielle primaire à laquelle se juxtapose une porosité secondaire résultat de la karstification, où la porosité et la perméabilité présentent des variations spatiales très fortes et brutales. La simulation du transit de l'eau et d'un éventuel polluant s'en trouve considérablement améliorée, et les modèles qui en découlent représentent un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire et de gestion de la ressource en eau.

Sur le plan humain, Michel Lepiller a permis à plusieurs élèves ingénieurs d'acquérir une expérience qui s'intègre parfaitement dans leur formation, en les impliquant dans l'étude d'aquifères avec un réel problème de la gestion de la ressource en eau. Les travaux en hydrogéologie planifiés par Michel Lepiller et les résultats qu'ils ont amenés ont également permis la création de liens professionnels et humains forts entre les personnels des Universités d'Orléans et de Nouvelle-Calédonie, comme en témoigne la poursuite des recherches en hydrogéologie aux Îles Loyauté qui se prolongent encore actuellement, impliquant chaque année de nouveaux élèves ingénieurs.

Références bibliographiques

- (1) **Dubois J., Launay J., Récy J.**, 1974 – Uplift movements in New Caledonia, Loyalty islands area and their plate tectonics interpretation. *Tectonophysics*, 24 : 133-150.
- (2) **Maurizot P., Lafoy Y.**, 2003 – Carte géologique de la Nouvelle-Calédonie (1 / 50 000), feuille Maré, Îles Loyauté. Nouméa : Service des Mines et de l'Energie, Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Notice explicative par P. Maurizot *et al.* (2003).
- (3) **Maurizot P., Lafoy Y.**, 2004 – Carte géologique de la Nouvelle-Calédonie (1 / 50 000), feuille Lifou, Îles Loyauté. Nouméa : Service des Mines et de l'Energie, Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Notice explicative par P. Maurizot *et al.* (2004).
- (4) **Carrière D.**, 1987 – Sédimentation, diagenèse et cadre géodynamique de l'atoll soulevé de Maré, Nouvelle-Calédonie, thèse de Docteur ès sciences, Université de Paris-Sud, centre d'Orsay.
- (5) **Koch P.**, 1958 - Hydrogéologie des îles Loyautés. *Bulletin géologique de la Nouvelle-Calédonie, France*, 1 : 135-188.
- (6) **A2EP**, 1993 – Modélisation de la ressource en eau (Rapport I - Chapitre 2) : Elaboration d'un schéma d'exploitation et de protection de la ressource en eau sur Maré et Lifou, Rapport NOUMEA NCH 93/03 02, mars 1993. A2EP, Province des Îles, 65pp.
- (7) **Allenbach M., Taladoire G., Lille D.**, 2000 – The ADAGE concept. Freshwater resources in Loyalty islands (New-Caledonia). In Abst. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brésil, Août 2000.
- (8) **Dupin L.**, 2002 – Cartographie géologique et géomorphologique pour le suivi des nappes d'eau douce à Lifou et Maré, rapport de stage, mém. DESS Géomatique, Université d'Orléans, 51 pp.
- (9) **Hoez A.**, 2003 – Etude hydrogéologique des Îles Loyauté, rapport de stage, mém. technicien, ESEM, Université d'Orléans, 68pp.
- (10) **Orange F.**, 2003 – Etude hydrogéologique des Îles Loyauté. Rapport de stage, mém. technicien, ESEM, Université d'Orléans, 58 pp.
- (11) **Jaromin D.**, 2007 – Gestion de la ressource en eau sur l'île de Lifou, rapport de stage, mém. ingénieur, Polytech' Orléans, 76 pp.
- (12) **Chiang W.H., Kinzelbach W., Rausch R.**, 1998 - Aquifer Simulation Model for WINDOWS - Groundwater flow and transport modeling, an integrated program. Berlin, Stuttgart (Borntraeger), 137 pp. <http://www.pmwin.net/asmwin6.htm>