

Gestion intégrée de l'aquifère d'une île haute carbonatée : Lifou (Archipel des Loyauté, Pacifique Sud-ouest)

ALLENBACH Michel⁽¹⁾, LILLE Didier⁽²⁾, ORANGE François⁽³⁾, JAROMIN Dorota⁽⁴⁾,
et al. (Programme SAGE Loyauté)

- (1) LGPMC-EA 3325, Université de la Nouvelle-Calédonie, BP R4, 98851, Nouméa Cedex Nouvelle-Calédonie, tél : (687) 26 58 27, courriel : allenbach@univ-nc.nc
- (2) US Espace, Institut de Recherche pour le Développement, Nouméa, BP A5 98848 Nouméa Cedex Nouvelle-Calédonie, tél : (687) 26 08 35, courriel : didier.lille@noumea.ird.fr
- (3) CNRS Orléans, Université d'Orléans, courriel : orange@cnrs-orleans.fr
- (4) POLYTECH'Orléans, Université d'Orléans, courriel : jaromin@univ-nc.nc

Préambule : Les anciens élèves de l'ESEM (Ecole Supérieure de l'Energie et des Matériaux) et Polytech' Orléans : Alexandre Hoesz, François Orange, Vincent Cadoret, Aziz Atiyet, Dorota Jaromin et Savinien Navarre, stagiaires du programme SAGE Loyauté, le coordonnateur du programme et le responsable scientifique du volet géosciences, co-signataires de la communication, souhaitent à travers cette contribution rendre hommage à Michel Lepiller (Université d'Orléans), tragiquement décédé en 2006. Il était le leader scientifique naturel de l'équipe d'hydrogéologie karstique qui travaille depuis 1999 sur la compréhension du fonctionnement de la lentille d'eau douce de Lifou (Archipel des Loyauté).

I. Contexte géographique et géologique général.

Orienté au NO-SE, selon une direction sensiblement parallèle à l'allongement de la « Grande Terre » néo-calédonienne, l'archipel des Îles Loyauté s'étend sur plus de 500 km de long entre 19°45' et 22°30' de latitude sud et 165°30' et 168°50' de longitude est, dans le sud-ouest Pacifique. Lifou (1150 km²) est la plus grande en superficie des quatre îles carbonatées qui constituent les sommets émergés d'une chaîne sous-marine d'origine volcanique encore mal connue : la ride des Loyauté. Celle-ci est soumise à la dynamique de la plaque australienne, qui se déplace régionalement à une vitesse d'une dizaine de cm/an vers l'est, où elle plonge sous la plaque Pacifique au niveau du plan de subduction associé à la fosse des Nouvelles-Hébrides. Le passage des Îles Loyauté sur la zone de voissure pré-subduction entraîne leur surrection, selon un mécanisme bien décrit régionalement depuis les travaux de DUBOIS (1973, 1975). Compte tenu de l'obliquité de l'axe de l'archipel par rapport au plan de subduction, les îles se présentent les unes après les autres sur le sommet de la voissure. De ce fait, du sud-est vers le nord-ouest de l'Archipel, l'altitude maximale des îles décroît. Elle est de 148 m à Maré, de 108 m à Lifou et de 46 m à Ouvéa. On considère aujourd'hui que Maré a atteint son altitude maximale de surrection et amorce la phase de redescente, tandis que Lifou et Ouvéa la poursuivent.

La couverture sédimentaire des Îles Loyauté (AISSAOUI D.M., 1986, AISSAOUI D.M., PURSSER B.H., 1986) est pour l'essentiel constituée d'un plateau carbonaté construit à rhodolithes, qui s'est développé au cours de la longue période qui a précédé l'émersion actuelle, datée de la fin du pléistocène (CARRIERE, 1987). Sur l'île principale de l'archipel, Lifou, affleurent trois types de faciès calcaires : les calcaires construits de la couronne récifale, présents à la périphérie de l'île, les biomicrites calcaires et les biomicrites dolomitiques qui forment l'essentiel de l'intérieur de l'île (BOURROUILH F.G., 1972). Depuis le début de l'émersion liée à la surrection tectonique et en surimposition à celle-ci, les oscillations glacio-eustatiques du quaternaire, ont permis que jouent les mécanismes de l'altération superficielle, à différents niveaux des corps sédimentaires carbonatés, et que se forment des réseaux karstiques bien développés et complexes à méga et micro porosités. Comme dans tout système karstique, les discontinuités d'origines diverses (diaclasses, failles, etc.) jouent un rôle majeur dans le drainage des eaux de surface et souterraines et dans la formation des cavités. A l'exception de l'interface inférieure du plateau carbonaté, dont la localisation précise est inconnue, les discontinuités d'origine sédimentaire sont peu marquées sur les Îles Loyauté et l'importance des fractures est sans doute prépondérante dans le développement de la karstification. A la fracturation "atectonique" typique des ensembles sédimentaires récents, se superpose dans le cas de

la ride des Loyauté l'effet des déformations liées à la dynamique lithosphérique. Ces déformations ont deux causes possibles : l'effet de distorsion, lié à la voûture d'avant-arc et la collision commençante de la ride et de l'arc des Nouvelles-Hébrides. En raison de l'obliquité de la ride des Loyauté par rapport à la fosse, l'effet de voûte d'avant-arc se produit de façon diachrone, dans une zone située à 100 km environ de la fosse, ce qui se traduit par une distorsion de la ride et, vraisemblablement, par le développement d'un premier épisode de fracturation. Le second événement est lié à la collision commençante de la ride des Loyauté et de l'arc des Nouvelles-Hébrides. Cette collision qui est déjà sensible à l'est de Maré, où se développe un prisme d'accrétion, se traduit par une sismicité faible mais significative de la zone.

II. Les problèmes posés par la gestion de l'eau aux Îles Loyauté

En l'absence de réseau hydrologique de surface, les ressources en eau des îles Loyauté, objet principal de la présente communication, sont contenues dans la partie noyée du karst, sous forme de lentilles d'eau douce. Ce schéma s'entend essentiellement pour Lifou et Maré, les deux grandes îles de l'archipel. La troisième, Ouvéa, ne possède, en effet, qu'une lentille très réduite. La population de cette île trouve les ressources en eau nécessaires, d'une part, dans l'exploitation de citernes collectant les eaux de pluies (procédure quasiment abandonnée sur Lifou et Maré) et d'autre part, dans la production d'une unité de dessalement de l'eau de mer. Les lentilles d'eau douce des îles Loyauté sont des milieux vulnérables, complexes et mal appréhendés, dans un contexte de mutation rapide des sociétés océaniques et de changement climatique global. La fragilité naturelle de la ressource est, en effet, aujourd'hui accentuée du fait de la croissance démographique et du développement agricole, artisanal et touristique de la Province. La gestion durable de la ressource passe, d'une part, par une approche SHS (sciences humaines et sociales) des populations consommatrices, afin de tenter de cerner leur perception et leur comportement vis-à-vis de l'eau et d'autre part, par une meilleure compréhension hydrogéologique des mécanismes de circulation de l'eau dans le karst. La démarche portée par le programme SAGE s'est inscrite dans un continuum d'opérations et d'études, engagées par la Province des Îles Loyauté (Agence de l'eau) depuis 1990 visant à répondre aux questionnements de tous les acteurs du développement sur les îles.

Le point de départ du programme Sage a été (ALLENBACH *et al.*, 2000) le projet ADAGE-Lifou : « Stratégie de gestion concertée de la ressource en eau ». Basé sur les méthodologies issues du projet européen ADAGE (Aide à la Décision en Aménagement et Gestion de l'Environnement, projet EUREKA 1299), ce premier programme a permis de faire l'état des lieux et l'analyse des connaissances ayant trait à la ressource (bases de données existantes, expertises pluridisciplinaires réalisées, bibliographie, ..), de comprendre les besoins des responsables et les attentes de la population, de sensibiliser et former les acteurs du développement. A la suite des conclusions apportées par cette étude, le programme SAGE Loyauté a été mis en œuvre afin de répondre aux questions soulevées par cet état des lieux : quels sont les risques réellement encourus aujourd'hui par les lentilles d'eau douce et comment rendre les filières de développement économique compatibles avec la gestion durable de la ressource en eau ? Les enjeux étaient de trois ordres :

- Préserver la santé des populations consommatrices ;
- Conjuguer le développement économique et la préservation de la ressource en eau ;
- Protéger et gérer un patrimoine environnemental de niveau mondial par sa biodiversité et son caractère endémique.

III. Vue d'ensemble du programme SAGE Loyauté

Pour répondre à ces questions, un groupement de compétences pluridisciplinaires dans les domaines scientifiques, technologiques, juridiques et de communication a été mis en place, dans le cadre d'une convention de recherche et sur financement du contrat de développement Etat/intercollectivités de Nouvelle-Calédonie. Les partenaires du programme SAGE ont été l'Institut pour la Recherche et le Développement, centre de Nouméa, les universités de la Nouvelle-Calédonie et d'Orléans et les

services techniques de la Province des Îles Loyauté. Le projet pluridisciplinaire a été organisé en axes thématiques, ayant bien évidemment de fortes interactions entre eux.

- L'axe SAGEOL "Géosciences" : Les objectifs assignés à cet axe thématique seront détaillés au paragraphe IV. Ils visent à répondre très concrètement aux questions posées par les loyaltiens sur la gestion des ressources en eau de leurs îles.

- L'axe SAGEOM : "Géomatique" : L'objectif de l'axe « géomatique » était de constituer une base de données géographiques homogène et actualisée sur l'ensemble des Îles. L'évolution des problèmes environnementaux, des normes juridiques et l'émergence de la notion de «développement durable» induisent, en effet, la nécessité de disposer d'informations environnementales actualisées et validées. L'industrie spatiale fournit les moyens d'obtenir une information exhaustive et actualisée de l'état de surface de la terre, l'expertise scientifique pluridisciplinaire permet de la valider.

L'évolution de l'occupation du sol durant ces dix dernières années a été étudiée par télédétection. Cette étude a permis, en particulier, de cartographier les zones d'évolution et les types de formations végétales concernées par ces modifications. L'analyse diachronique a permis de mettre en évidence les tendances évolutives, par exemple, de déterminer quelles zones se sont végétalisées ou au contraire quelles zones ont connu un défrichement important, au cours de la période observée. Cette étude a ainsi permis de localiser des zones où l'action de l'homme est importante. Ces zones d'activité, induisant des risques de pollution potentiellement plus importants qu'ailleurs, ont été prioritairement étudiées. L'analyse de l'évolution de l'occupation du sol participe donc à l'identification des risques de pollution de la nappe, à partir des données de télédétection. La gestion de l'environnement est moins une question de rapports entre l'homme et la nature qu'une question de points de vue humains sur la nature. Outre les études géologiques et l'observation de la terre par satellite, qui toutes deux génèrent des données objectives sur le milieu et l'occupation du sol, il convenait d'aborder également la question de la gestion durable de l'eau dans les îles Loyauté, sous l'angle des perceptions, savoirs et stratégies des acteurs impliqués dans cette gestion, qu'il s'agisse des usagers ou des planificateurs du développement. Ces perceptions constituent en effet un filtre à travers lequel les données objectives, issues des connaissances sur l'environnement, sont interprétées, puis confrontées à la stratégie des acteurs en vue de toute action individuelle ou collective se rapportant de près ou de loin à l'eau. Les nouvelles données et informations concernant les domaines des géosciences et des sciences sociales (enquêtes de perception des populations) acquises sur Lifou, Maré, Ouvéa et Tiga durant le programme ont été intégrées par l'axe SAGEOM.

- L'axe SAGED "Droit" : Afin d'assurer la pérennité de la ressource, la gestion des lentilles d'eau doit nécessairement s'inscrire dans une politique de développement durable. La gestion durable de cette ressource posait un certain nombre de problèmes juridiques. L'unité juridique du programme avait donc pour objectif de réaliser un inventaire des lois françaises relatives à l'eau et de proposer une adaptation de ces normes au contexte particulier des Îles Loyauté (MASSENAVETTE C., 2002). In fine, il s'agissait de proposer une délibération provinciale, appuyée sur la compétence environnementale de la Province, prenant la forme d'un code de l'eau. Dans ce domaine de l'eau, la Province des îles Loyauté se trouve, en effet, soumise à la réglementation applicable à l'ensemble du territoire calédonien. Cette Province n'étant pas encore intervenue pour réglementer les diverses activités intéressant la gestion de sa ressource, l'étude juridique réalisée a permis de déterminer les conditions d'une possible évolution du droit en la matière. Elle a examiné aussi de manière exhaustive, les compétences institutionnelles et recensé les textes applicables en matière de gestion des ressources en eau. Cette étude visait à mieux appréhender le contexte juridique du programme SAGE.

- L'axe SAGEIS "Systèmes d'Information en Environnement" : Pour répondre à la nécessité de disposer des données scientifiques et techniques actualisées pour la mise en place d'un système d'informations cohérent et facile à gérer, a été mis en place l'axe thématique SAGEIS, un axe informatique, ayant pour objectif le développement d'un système informatique opérationnel permettant :

- d'intégrer l'ensemble des connaissances scientifiques et techniques relatives à la gestion de la ressource en eau ;
- d'utiliser les techniques innovantes des TIC pour permettre la consultation et l'actualisation des informations relatives à cette gestion ;
- de définir des interfaces homme-machine adaptés aux besoins des utilisateurs.

La contribution de cet axe thématique a été l'intégration des données spatialisées pour les besoins des politiques de gestion environnementale, dans le courant actuel des technologies de l'information, avec une utilisation large des systèmes interopérables au sein de l'infrastructure globale de l'information (ALLENBACH M., LILLE D., TOURAIVANE, (2003). Ce projet a eu pour ambition de créer, à terme, un véritable réseau d'échanges et d'utilisations des données à destination des acteurs de la Province des îles Loyauté (Province, Communes, etc.). Par sa configuration géographique (quatre îles) et par la disparité des outils utilisés par les divers services provinciaux et les bureaux d'études intéressés par la gestion de la ressource en eau, la Province des îles Loyauté était un cas exemplaire où les systèmes d'information répartis et interopérables trouvent une raison d'être très concrète. La démarche suivie a été articulée autour des standards internationaux. Devant la complexité des phénomènes à appréhender en matière de gestion de l'environnement, les systèmes d'informations et de connaissances deviennent incontournables mais posent des défis en termes de recherche méthodologique et appliquée dans les domaines suivants :

- l'accès aux données réparties, hétérogènes, multi sources ;
- la gestion de données incomplètes, imprécises ;
- l'intégration des données satellitaires et des capteurs temps réels ;
- la gestion des données temporelles et multi-échelle ;
- la représentation de connaissances pluridisciplinaires et leur traitement pour l'aide à la décision en vue de l'établissement d'applications multi acteurs.

L'axe s'est donné pour objectif de pallier ces manques sur le cas concret des îles Loyauté en définissant des nouveaux outils, qui intègrent la problématique des systèmes d'informations sémantiques en environnement. A l'instar du «Web Sémantique», les Systèmes d'Informations Sémantiques font référence à la vision du Web de demain comme un vaste espace d'échange de ressources permettant une exploitation d'informations et de services variés. Dans ce schéma conceptuel, les utilisateurs seront déchargés d'une bonne partie de leurs tâches de recherche, de construction et de combinaison des résultats, grâce aux agents logiciels capables d'accéder aux contenus des ressources et d'effectuer des raisonnements sur ceux-ci. Le concept des Systèmes d'Informations Sémantiques est avant tout une infrastructure devant permettre d'abord de localiser, d'identifier et de transformer des ressources à destination d'un vaste public. Différents langages sont proposés, afin de mieux exploiter, combiner et raisonner sur les contenus de ces ressources. Les connaissances utilisées, par exemple sous forme de marqueurs sémantiques, doivent s'appuyer sur des ontologies unanimement reconnues et assurer l'interopérabilité et les transformations entre les différents formalismes et les différentes ontologies. La notion de méta-données est au cœur de la démarche, avec une grande diversité dans l'interprétation et l'utilisation de cette notion. L'intégration automatique d'informations provenant de sources hétérogènes est cruciale, particulièrement pour des applications opérationnelles. Enfin la problématique des services Web s'enrichit d'une nouvelle dimension : la perspective des systèmes d'informations sémantiques en environnement. Le produit principal est un système intégré de connaissances et de données, baptisé EAUNET Système (http://sage.espace.ird.nc/lifou/lifou_f.html), à l'attention des acteurs du développement des îles Loyauté. Il permet de disposer à tout instant et en tout lieu, via Internet, d'une information sélectionnée, actualisée et scientifiquement validée, à des fins d'aide à la décision.

L'axe SAGEFOR " Formation " : Dans un souci d'appropriation des résultats du programme par les acteurs des Îles Loyauté, le programme SAGE a mis en place un axe SAGEFOR dédié à la formation et la pédagogie. Deux directions distinctes ont été suivies :

- la formation des acteurs locaux (utilisateurs, techniciens, gestionnaires). L'objectif du volet formation était l'appropriation du programme SAGE par les acteurs des Îles Loyauté, afin de poursuivre l'exploitation des résultats à la fin du projet. Tout au long du programme, des rencontres ont été animées périodiquement avec les acteurs locaux du développement et ces interactions ont été complétées par l'organisation de deux séminaires de formation. Ces actions ont permis de sensibiliser et former environ 20 personnes des Îles Loyauté aux notions et au système utilisé dans le programme SAGE, avec en particulier la compréhension du fonctionnement de la ressource, la notion de Système d'information géographique et de télédétection, l'utilisation pratique du système EAUNET et des interfaces « métiers ».

- la formation en milieu scolaire. Outre ses aspects scientifiques et techniques, le programme SAGE s'est voulu être un lieu où s'élaborerait une vision commune sur les aspects relatifs à la préservation et la protection de la ressource en eau des Îles Loyauté. Plutôt que de proposer des supports pédagogiques réalisés par les scientifiques, souvent éloignés du quotidien des élèves concernés, il a paru intéressant de mettre en valeur le regard des enfants des Îles Loyauté et l'expression de leur propre perception sur la problématique de la protection de l'eau. C'est ainsi qu'a été proposé aux enseignants de définir des projets pédagogiques sur la gestion durable de la ressource en eau, projets réalisés par les élèves eux-mêmes. L'ensemble de l'équipe SAGE s'est proposée d'apporter son concours à la réalisation de ces projets : soutien scientifique, matériel et administratif. Ces projets pédagogiques ont débouché sur des supports pédagogiques sous des formes diverses : posters, plaquettes, écrits (contes, légendes). Le site SAGE contient une rubrique réservée aux résultats de ces projets et l'axe SAGEFOR a apporté une aide technique à la publication de ces projets sur ce site. Les équipes scientifiques du programme SAGE, lors de leurs passages aux Îles Loyauté dans le cadre de leurs études, ont réalisé des interventions pédagogiques auprès des élèves des établissements scolaires qui en ont fait la demande.

IV. L'apport de l'axe SAGEOL

IV.1. Les questions posées aux géologues.

Les objectifs assignés à SAGEOL au sein du programme pluridisciplinaire SAGE Loyauté découlent des conclusions du programme ADAGE – Lifou 1999. Ce programme avait fait ressortir 2 faits majeurs concernant la connaissance hydrogéologique de Lifou :

- Les ressources en eau de l'île de Lifou sont importantes et suffisantes dans le présent, mais également à moyen et long terme, quels que soient les schémas de développement qui pourraient être choisis pour l'île. Le problème des ressources en eau ne se pose pas en termes quantitatifs mais en termes de gestion de la nappe et de potentiel d'exploitation des forages. En effet, compte tenu des risques de remontée de sel dans les ouvrages, les débits d'exploitation doivent être impérativement bridés, ce qui oblige à multiplier les installations techniques, dès lors que l'on souhaite localement de forts débits ;

- Il existe un fort déficit d'information sur les risques de contamination de la nappe par les pollutions recensées ou à venir. La vulnérabilité de la nappe vis à vis des remontées potentielles de sel dans les ouvrages est connue, mais les données sur le transit vertical et longitudinal d'une pollution anthropique originaire de la surface sont absentes. On ne sait rien ou presque des vitesses de transit de l'eau et des temps de résidence dans les zones dénoyées et noyées du karst de Lifou.

C'est à partir de ce constat qu'a été conçu le programme d'études confié à l'axe SAGEOL, afin de répondre aux questions que posaient les Loyaltiens : Quels sont les risques de pollution des lentilles d'eau douce des Loyauté ? Comment concilier le développement social et économique (agriculture, tourisme, élevage, urbanisation) de nos îles avec une gestion équilibrée des ressources en eau qui constituent une richesse fondamentale du patrimoine loyaltien ? Quelles sont les zones les plus sensibles et comment faut-il faire pour protéger nos sites de la pollution ? Toutes ces questions sont à la base du programme réalisé en géosciences. Si la généralisation de l'analyse de l'existant (effectuée

sur Lifou dans le cadre du programme ADAGE Lifou 1999) aux autres îles de l'archipel des Loyauté était classique et bénéficiait de l'expérience acquise, la collecte de nouvelles informations sur la compréhension des mécanismes de circulation de l'eau et sur l'évaluation des risques de pollution des lentilles d'eau douce constituait indéniablement un « challenge » au plan scientifique, dans la mesure où la connaissance sur le sujet était très fragmentaire. Apporter des réponses passait par la réalisation d'un programme de recherche fondamentale sur la compréhension de la karstologie des îles hautes carbonatées loyaltiennes, un domaine scientifique très peu abordé jusqu'au démarrage du programme SAGE Loyauté.

La communication se propose de présenter quelques résultats obtenus par l'axe géosciences du programme mené. Trois approches complémentaires, définies par Michel LEPILLER et mises en œuvre sur le terrain par ses élèves de l'ESEM d'Orléans et de Polytech'Orléans, seront successivement abordées : 1) l'apport de l'exploration spéléologique, du repérage des désordres géomorphologiques de surface et des exhaures, couplés à l'utilisation des traçages, dans la caractérisation des axes de drainage préférentiels de la nappe, 2) l'étude du transfert de charge (intensité et modalité) de l'impulsion pluie à travers la zone non saturée jusqu'à la zone saturée de l'aquifère, menée sur la base d'ACS de la relation pluie/hauteur piézométrique, 3) la modélisation des écoulements souterrains sur la zone pilote instrumentée de la baie de Chateaubriand. Les résultats présentés ne se veulent absolument pas exhaustifs. Ils ont pour finalité de mettre en exergue les grandes orientations de l'ambitieux programme mis en place par son concepteur, dont de nombreux travaux restent à publier (LEPILLER M., 2000-2006, inédits) et d'apporter quelques éclairages sur les données acquises. Ils intègrent les résultats de la cartographie géologique récemment réalisée (MAURIZOT et al, 2003, 2004).

IV.2. L'apport de l'exploration spéléologique, du repérage des désordres géomorphologiques de surface et des exhaures, couplés à l'utilisation des traçages, dans la caractérisation des axes de drainage préférentiels de la nappe

Sur la base des données hydroclimatiques compilées dans le programme Adage Lifou, le volume de recharge annuel moyen sur l'île de Lifou est de 216.10^6 m³ d'eau. Le volume théorique de la lentille d'eau est de 419.10^6 m³ d'eau. Le temps de séjour moyen de l'eau dans la lentille est donc de $419/216 = \sim 2$ ans. Cette évaluation n'était réaliste que si le mélange entre la recharge et l'eau de la lentille était homogène, hypothèse a priori peu probable. On pouvait donc raisonnablement présumer qu'il existait des eaux à temps de séjour nettement plus faible que le résultat de cette évaluation et que des eaux à temps de séjour relativement plus court se situaient dans la partie supérieure de la lentille et transitaient selon des voies de circulation plus rapides. Dans un aquifère carbonaté, de telles voies de circulation rapide se développent habituellement sous l'effet de la karstification. Ce processus génère un réseau de vides interconnectés selon une organisation hiérarchisée, comparable à celle des réseaux hydrographiques superficiels. Dans le cas des îles carbonatées loyaltiennes, il semblait probable que le drainage souterrain soit de plus en plus organisé vers l'aval, avec développement de drains de plus en plus volumineux en périphérie des « dômes piézométriques » centraux, au fur et à mesure que l'on s'approche de la mer. Si cette évolution spatiale du drainage existait, elle devait se manifester par l'existence, dans la zone saturée actuelle, de cours d'eau souterrains aboutissant à des exutoires situés sur la côte, qui seraient à rechercher dans le cadre du programme SAGE Loyauté.

Un important travail de recensement des zones d'exhaures littorales a donc été entrepris pour repérer ces indices de zones préférentielles de drainage. Les îles Loyauté étant dépourvues de tout réseau hydrographique superficiel fonctionnel, le transit de l'eau douce infiltrée est uniquement souterrain et l'exhaure s'effectue au pied des paléo-récifs frangeants exondés par le soulèvement des îles ou l'abaissement du niveau de la mer ou au pied des falaises, quand ces derniers n'existent pas. L'étude des caractéristiques de l'exhaure a été réalisée à partir de prospections du rivage effectuées à marée basse. Quand la configuration des exutoires le permettait, une estimation visuelle du débit était réalisée. L'eau douce ressortant toujours mélangée à de l'eau de mer pour constituer des émergences d'eau saumâtre, les proportions du mélange ont pu être déterminées à partir des mesures de conductivité électrique réalisées à l'aide d'un conductimètre WTW. Reportée sur les fonds

cartographiques réalisés par le Service Topographique de la Province des Îles, la situation des émergences était précisée par GPS recourant à la technologie WASS (Wide Area Augmentation System). Enfin, des prélèvements d'eau destinés à l'analyse des éléments majeurs étaient systématiquement réalisés.

Par ailleurs, comme la création de vides souterrains importants résulte de la dissolution, elle est très sensible à la disponibilité en eau, c'est-à-dire aux éventuelles concentrations locales d'eau pouvant pénétrer dans le massif carbonaté. Ces débits vont, en effet, pouvoir transporter et évacuer les ions résultant de la dissolution. Habituellement, la présence des manifestations exo et endokarstiques accompagnant les pertes témoignent des axes de drainage qui se développent dans les aquifères carbonatés et vont entraîner la partition de ces derniers en systèmes hydrologiques karstiques indépendants. Pour cette raison, l'étude du type d'organisation des vides karstiques et de la densité de ces derniers semblait essentielle à la compréhension de la circulation des eaux souterraines et la première phase des travaux de terrain réalisés dans le cadre de SAGEOL a été consacrée à ce type d'études, par le biais de plusieurs campagnes d'observations géomorphologiques, de mesures piézométriques fines, accompagnées de la réinterprétation des données existantes.

Une première cartographie des manifestations exokarstiques de l'île de Lifou a été réalisée (A. HOEZ, 2002) dans le cadre d'un stage de deuxième année l'ESEM d'Orléans, sous la direction de M. LEPILLER. Les manifestations exokarstiques repérées sur les cartes topographiques de l'I.G.N. à l'échelle du 1/50 000 Lifou-nord (n° 4840) et Lifou-sud (n° 4842) ont fait l'objet d'une campagne de vérité-terrain, visant à valider la pertinence de l'identification de ces objets comme manifestations exokarstiques sur un certain nombre de sites au cours de la mission Hoesz-Lepiller de 2002. Ce travail a été complété l'année suivante (DUPIN L., 2003) dans le cadre d'un stage effectué à Nouméa (stage de D.E.S.S. Géomatique de l'Université d'Orléans. Cette stagiaire a réalisé une cartographie des « dolines et cuvettes » de Lifou à une échelle réduite, qui présente l'avantage d'offrir une représentation très synthétique de la répartition géographique des objets étudiés. Les objets représentés sur cette carte ont été repérés sur les cartes I.G.N. au 1/50 000, sur l'image Spot 4 et sur les photographies aériennes en couleurs à l'échelle du 1/20 000. Sa carte présente une très grande similitude avec celle établie par A. HOEZ, ce qui a conduit aux conclusions suivantes : la quasi totalité des manifestations exokarstiques décelables sur l'image Spot et sur les photos aériennes sont représentées sur les cartes I.G.N à 1/50 000 et sont repérées par les vérités-terrain réalisées. L'exploitation des documents sources, la cartographie des manifestations exokarstiques par deux opérateurs différents et le contrôle sur le terrain de la pertinence de l'identification des objets représentés confèrent aux documents produits des garanties de fiabilité et de fidélité par rapport à la réalité. Ces repérages, vérités terrains et recherche d'exhaures littorales, ont été poursuivis et systématiquement menés sur Lifou et Maré par les stagiaires qui se sont succédés d'année en année sur le chantier « Îles Loyauté » : François ORANGE, Vincent CADORET, Aziz ATIYET, Dorota JAROMIN et Savinien NAVARRE, tous stagiaires du programme SAGE Loyauté », placés sous la direction scientifique de Michel LEPILLER.

Les travaux de C. THOMAS (1995, 1999), consacrés aux karsts tropicaux insulaires (Nouvelle Calédonie, Lifou, Cuba) ou péninsulaires (Yucatan), ont apporté de précieuses informations sur l'organisation des écoulements et sur le développement de la karstification dans ce type d'aquifère. Le modèle d'organisation de la karstification proposé par cet auteur, fondé sur des critères fonctionnels, ne diffère pas fondamentalement d'un modèle général d'organisation des systèmes karstiques d'une aire carbonatée essentiellement alimentée par l'infiltration diffuse : les zones proches des apex piézométriques (dômes piézométriques) seraient dépourvues d'organisation des écoulements dans la zone saturée. La dissolution, active en raison de la température et de la lame d'eau infiltrée (plusieurs centaines de mm/an), s'exercerait dans la zone non saturée, pour produire des vides à développement essentiellement vertical (si l'on excepte les vides constituant d'anciens réseaux de drainage qui peuvent se situer actuellement dans la zone non saturée, suite à la surrection de l'île, mais qui sont alors non fonctionnels), l'infiltration mettant largement à profit les discontinuités d'origine tectonique d'attitudes essentiellement verticales ou approachantes. L'organisation des écoulements présenterait un développement centrifuge, pour atteindre son maximum au voisinage de la côte où débouchent des

réseaux de drainage karstique très fonctionnels et explorables en spéléologie pour certains d'entre eux. A cette zonalité de la perméabilité, qui doit se traduire par l'existence d'une gamme étendue de valeurs de cette dernière, s'ajoute l'hétérogénéité présente dans tout aquifère carbonaté, liée à ses caractéristiques intrinsèques, comme les variations de faciès et la fracturation.

La variabilité probable de la perméabilité a conduit l'équipe SAGEOL à réaliser des traçages dans des sites diversifiés propices à l'évaluation des valeurs extrêmes de ce paramètre, en vue d'évaluer les paramètres du transit à partir de la distribution des temps de séjour (temps moyen de séjour, vitesse apparente, etc.). Les mesures ont été réalisées à l'aide de traceurs fluorescents (uranine, fluorescéine disodique, $C_{20}H_{10}O_5Na_2$, Color Index 45 350), dosés par spectrofluorimétrie au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Orléans (E.S.E.M., I.S.T.O.) et *in situ*, par fluorimétrie. De tous les traceurs fluorescents, l'uranine est, en effet, celui qui présente les meilleures caractéristiques : faible adsorbabilité limitant l'altération du signal de restitution due au processus d'adsorption-désorption, absence d'éco- et de géo-toxicité (BEHRENS ET al., 2001). De plus, elle offre le meilleur rendement quantique de fluorescence, ce qui permet de réduire la masse de traceur à injecter et assure des conditions de détection optimales. La surveillance de la restitution du traceur a été assurée à l'aide d'un fluorimètre de terrain GGUN-FL02 (SCHNEGG P.-A., DOERFLIGER N. (1997), SCHNEGG P.-A., KENNEDY K. (1998) permettant une scrutation quasi continue (fréquence d'analyse : 4 minutes). L'absence de matières en suspension dans les eaux des systèmes traçages concernés par les opérations réalisées a constitué un facteur très favorable à l'utilisation de ce type de matériel. Compte tenu du fait que ce dernier ne permet néanmoins pas une identification sans équivoque de la substance responsable des signaux enregistrés, ces derniers ont été confirmés au laboratoire par la réalisation de spectres d'excitation et d'émission, à l'aide d'un spectrofluorimètre Hitachi F2000.

Le calcul des paramètres du transit et l'interprétation des résultats des traçages ont été réalisés à partir de la fonction distribution des temps de séjour, désignée par le sigle D.T.S. (LEPILLER M., MONDAIN P.-H., 1986). Cette fonction fournit le pourcentage de la masse totale de traceur restituée sortant par unité de temps de l'exutoire surveillé, en fonction du temps de séjour dans le système traçage. Soient $C(t)$ et $Q(t)$ la concentration et le débit au temps t , la D.T.S. correspond donc à la fonction débit massique de traceur normée par rapport à la masse restituée :

$$h(t) = \frac{Q(t)C(t)}{\int_{t=0}^{t=t_f} Q(t)C(t)dt}$$

avec $t = 0$ à l'instant de l'injection
et $t = t_f$ à la fin de la restitution

Toutes les D.T.S. engendrent des surfaces égales à 1, ce qui les rend directement comparables. Il en découle également que la forme de la D.T.S. peut être, en première approximation, simplement caractérisée par sa valeur maximale. L'étalement de la D.T.S. étant lié aux pertes de charge subies par le volume d'eau tracé en déplacement, cette valeur renseigne sur la plus ou moins grande facilité du transit du traceur dans le système traçage. Les relations étroites existant entre la valeur maximale de la D.T.S. et d'autres paramètres (débit, temps moyen de séjour, etc..) confèrent à cette dernière un très grand intérêt. Le calcul de la fonction D.T.S. nécessite la connaissance du débit de l'exutoire (ou des exutoires) où s'effectue la restitution, depuis l'injection jusqu'à la fin de cette dernière. Cela suppose, dans la grande majorité des cas de traçage, l'installation préalable à l'opération d'un équipement hydrométrique, dans tous les points où cette restitution est envisageable. Pour des raisons pratiques et économiques, la mise en place d'un tel dispositif est le plus souvent impossible à réaliser, ce qui pourrait laisser penser que la connaissance de la D.T.S. et des paramètres qui en découlent est en général inaccessible. En fait, il faut observer que lorsque le débit de l'exutoire du système traçage est constant, la forme de la D.T.S. est identique à celle de la courbe de concentration normée et qu'elle peut alors s'écrire :

$$h(t) = \frac{C(t)}{\int_{t=0}^{t=t_f} C(t) dt}$$

Si le débit de l'exutoire n'a pas présenté, pendant la restitution du traceur, de variations importantes (supérieures à 20% par exemple), il est possible de réaliser une estimation tout-à-fait acceptable de la fonction D.T.S. et des paramètres qui en découlent. En raison, d'une part, de la quasi stabilité du niveau moyen de la mer (qui constitue la limite inférieure de charge hydraulique de l'aquifère de la formation à rhodolithes) sur une durée identique à celle de la restitution observée à la suite du traçage de la grotte de Thoubotr, d'autre part, de la faible variation de charge induite sur l'aquifère par la composante saisonnière mise en évidence sur les chroniques piézométriques enregistrées dans la grotte de Thoubotr et le cénote de Manet, et enfin de l'absence d'épisode pluvieux d'une intensité suffisante pour entraîner une variation piézométrique à court terme significative, l'hypothèse d'une faible variation du débit moyen journalier du système traçage a été acceptée à l'occasion du traçage réalisé à partir de la grotte de Thoubotr et les paramètres du transit ont ainsi pu être calculés. Il en a été de même pour le traçage de la grotte de Luengoni, mais, dans ce cas, les paramètres calculés ont une valeur nettement plus indicative, en raison de la situation de l'exutoire surveillé, au pied même du récif surélevé, qui soumettait le système traçage aux inversions de sens d'écoulement induites par la marée.

A titre d'exemple des résultats obtenus, sur le traçage de Thoubotr, réalisé sur l'aire coutumière de la tribu de Lucilla (district du Wetc), l'uranine est apparue dans le plan d'eau nord-est du cénote de Manet, cinq jours après l'injection. La courbe de concentration montre des oscillations secondaires particulièrement marquées au niveau du pic, qui témoignent d'une modulation de la restitution par la marée. Sur l'hypothèse d'un débit estimé à 100 l/s, sur la base des observations réalisées dans la grotte d'injection (Thoubotr), de celles réalisées dans le cénote où était installé le fluorimètre et à l'exutoire en baie d'Onia, les calculs conduisent à une estimation de la masse restituée égale à 92 % de la masse injectée. La valeur maximale de la distribution des temps de séjour ($5,42 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$) traduit un étalement de la restitution cohérent avec le temps moyen de séjour de 26 jours. En confirmant l'existence d'une relation hydraulique fonctionnelle entre la grotte de Thoubotr, le cénote de Manet et les exutoires de la baie d'Onia, ce traçage a permis de démontrer que la succession des manifestations exokarstiques jalonnait bien un endokarst continu, dont la répartition géographique coïncide avec le contour topographique d'un gradin correspondant à un ancien trait de côte.

IV.3. L'étude du transfert de charge (intensité et modalité) de l'impulsion pluie à travers la zone non saturée jusqu'à la zone saturée de l'aquifère, menée sur la base d'ACS de la relation pluie/hauteur piézométrique

Les chroniques de piézométrie acquises lors du programme SAGE ont permis d'utiliser les ACS, afin d'évaluer les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère côtier de l'île de Lifou. L'ACS de la relation pluie à Wé / hauteur piézométrique à Manet permet, par exemple, la détermination de l'intensité du transfert de l'impulsion pluie à travers la zone non saturée jusqu'à la zone saturée de l'aquifère carbonaté de l'île de Lifou, ainsi que celle des modalités de ce transfert de charge (immédiat ou différé). Par ailleurs, afin de déterminer comment se propagent les impulsions produites par la marée à travers le calcaire construit du récif surélevé et les formations récifales détritiques constituant le noyau miocène de l'île, des chroniques piézométriques ont été acquises à Manet et Thoubotr. Ces dernières ont permis de réaliser des ACS entre la marée à Chepenehe et la cote piézométrique à Manet d'une part, et des ACS entre les cotes piézométriques de Manet et Thoubotr d'autre part. Il a, par ailleurs, été possible d'en extraire une information en terme de diffusivité hydraulique pour les deux formations aquifères citées, en appliquant la solution de l'équation de diffusivité proposée par Ingersoll, Zobel et Ingersoll (1948) :

$$D = T/S = (t_0 x^2)/(4PQ^2)$$

Ce travail a été mené par Dorota JAROMIN (2007) au cours de son stage ingénieur (Polytech'Orléans, 2007). Un seul exemple tiré de son mémoire sera évoqué dans cette communication, celui des ACS entre chroniques de précipitations et hauteur piézométrique. Les chroniques de pluie à Wé n'étant disponibles qu'au pas journalier, il convenait d'utiliser une chronique piézométrique au même pas. Pour ce faire, une moyenne mobile d'amplitude 24h a été réalisée sur la hauteur piézométrique. La valeur à 12h de la moyenne mobile a été retenue. On réalise ainsi un filtrage des composantes de périodes égales ou inférieures à 24h induites par la marée. L'analyse du corrélogramme croisé (*Fig1*) entre la pluie à Wé et la hauteur piézométrique à Manet met clairement en évidence l'existence d'une relation hydraulique (transfert de charge) quasi immédiate entre la pluie et la hauteur piézométrique : le déphasage est de quelques jours.

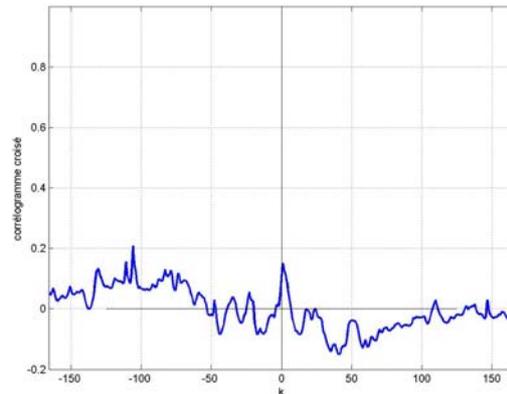


Fig1 : Corrélogramme croisé entre la pluie à Wé et la hauteur piézométrique à Manet

Une analyse effectuée sur des données horaires de précipitations aurait pu permettre de préciser les caractéristiques du transfert de l'impulsion pluie vers la zone saturée de l'aquifère, mais le pas horaire n'est pas actuellement disponible en matière de précipitations sur Lifou. L'ACS réalisée ne permet pas de conclure sur le caractère immédiat ou différé du transit de l'eau responsable du transfert de l'impulsion jusqu'à la zone saturée. Seule une étude de la géochimie de l'eau parvenant jusqu'à cette dernière permet d'obtenir des informations sur l'âge de l'eau assurant le transfert de l'impulsion. Cette étude également entreprise sous la direction scientifique de Michel LEPILLER ne sera pas présentée dans cette communication.. Le spectre de densité de variance de la hauteur piézométrique moyenne journalière à Manet (*Fig2*) montre l'existence de variations à moyen terme.

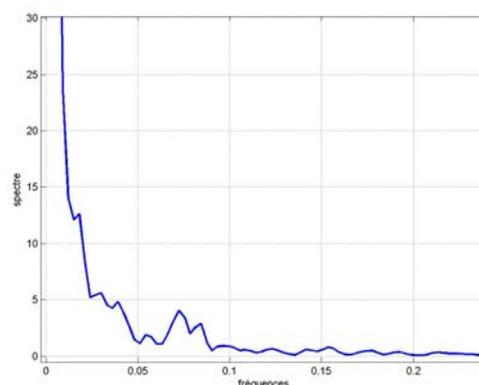


Fig2 : Spectre de hauteur piézométrique à Manet

Afin de mieux analyser la relation à court terme mise en évidence entre la pluie et la hauteur piézométrique, les ACS ont été réalisés en filtrant les composantes par différenciation d'ordre 1. Cependant ce filtrage n'apporte pas d'amélioration significative : d'une part les variations à moyen

terme ne sont pas d'une grande amplitude et elles ne gênent pas vraiment l'analyse du corrélogramme croisé réalisé sur les chroniques qui les contiennent ; d'autre part, les variations à court terme, de période supérieure à la journée (notamment 14 jours), non négligeables dans la chronique de moyenne mobile de hauteur piézométrique, se trouvent amplifiées et masquent quelque peu la réponse à court terme, néanmoins bien décelable sur le corrélogramme croisé.

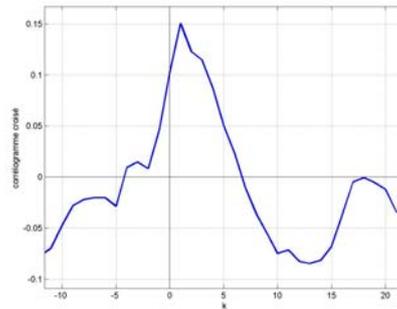


Fig3 : Pic à l'origine du corrélogramme croisé

Le corrélogramme croisé (Fig3) montre un pic très net à $t = 1$ jour de valeur $R_{k-1} = 0,151$. L'abscisse du centre de gravité de ce pic est située à 4 jours environ, ce qui correspond au temps moyen de transfert de l'impulsion, depuis la surface de l'île jusqu'à la surface piézométrique de la grotte de Thoubotr (karst noyé), dans les conditions climatiques et hydrologiques de la période analysée. La décroissance rapide du corrélogramme simple des hauteurs des précipitations permet de considérer la pluie comme un processus aléatoire, c'est pourquoi ce pic donne une image moyenne de la réponse impulsionnelle du système à la pluie. La valeur maximale assez faible de ce pic (0,151) correspond à une lame d'eau infiltrée plutôt modeste, ce qui est cohérent avec les conditions climatiques moyennes de Lifou.

IV.3. La modélisation des écoulements souterrains sur la zone pilote instrumentée de la baie de Chateaubriand.

Dans le cadre du programme SAGE, une modélisation informatique a été réalisée par ORANGE F. (2002), sous la direction scientifique de M. LEPILLER, 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, qui est la zone la plus peuplée de l'île, et qui présente également une grande concentration de formations karstiques. Pour cette modélisation, a été utilisé le logiciel ASMWIN (Aquifer Simulation Model), un logiciel distribué gratuitement, simple d'utilisation, employé fréquemment pour la modélisation des écoulements d'eaux souterraines (CHIANG *et al.*, 1998 ; LASNE, 1992). Il permet de simuler le comportement hydrodynamique d'un aquifère, ainsi que de calculer les trajectoires des transits d'eau et d'éventuelles substances polluantes.

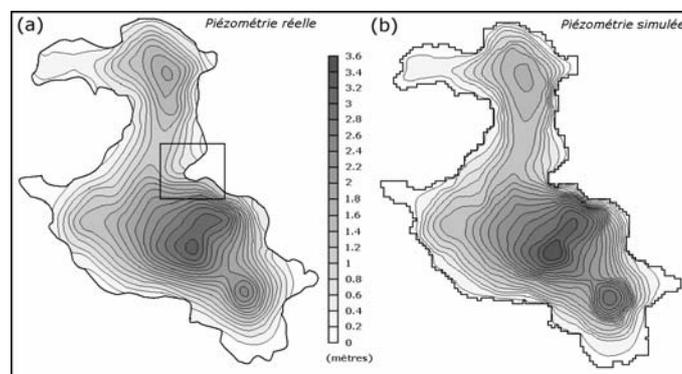


Fig. 4 : Niveaux piézométriques de l'aquifère de Lifou : **(a)** réels (A2EP, 1993), **(b)** obtenus par modélisation avec ASMWIN. La zone modélisée autour de la Baie de Châteaubriand est indiquée.

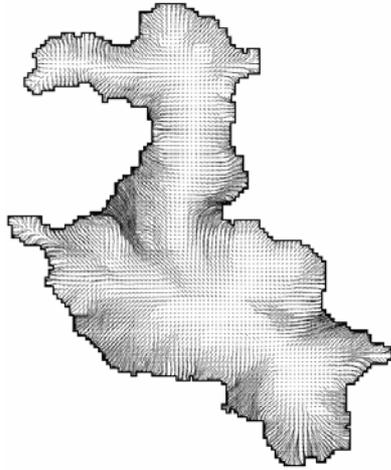


Fig. 5 : Trajectoires des écoulements à la surface de la nappe d'eau simulée, sur une période d'un mois, calculés par ASMWIN.

Des études précédentes (A2EP, 1993) avaient déjà simulé l'aquifère de Lifou, dans le but de quantifier la ressource en eau potable. La première étape de la modélisation consistait donc à transposer ces précédents résultats à ASMWIN, pour obtenir une piézométrie proche de la piézométrie réelle.

L'île a été découpée en mailles de 500 mètres de côté. La limite inférieure du modèle a été placée au niveau de la limite inférieure de la lentille d'eau douce (déterminée par l'équation : *Limite inférieure de la lentille* = $- 37 \times \text{Niveau piézométrique}$, obtenue à partir des densités respectives de l'eau douce et de l'eau salée). Les valeurs de perméabilité et de recharge (368 mm/an) utilisées sont celles qu'A2EP (1993) a calculées pour sa modélisation. La porosité a été fixée à 30 % pour toute l'île, pour correspondre au développement important du réseau karstique. L'océan a été représenté en attribuant à la zone correspondante une piézométrie fixe de 0 mètre. Le calage du modèle a été effectué par une succession de simulations en régime transitoire, en remplaçant à chaque fois la piézométrie initiale (la piézométrie réelle pour la première itération) par celle obtenue lors de la simulation précédente, ainsi que la limite inférieure du modèle qui en dépend. Le calage du modèle a ainsi été obtenu après une dizaine d'itérations. Si le modèle montre de légers écarts entre la piézométrie simulée et la piézométrie réelle, la morphologie générale de la nappe simulée est en tous endroits satisfaisante et similaire à celle établie à partir des mesures piézométriques (Fig. 4). Le calcul des trajectoires d'écoulement permet de montrer le partitionnement de cet aquifère en systèmes hydrologiques (Fig. 5).

Application de la modélisation à la Baie de Châteaubriand

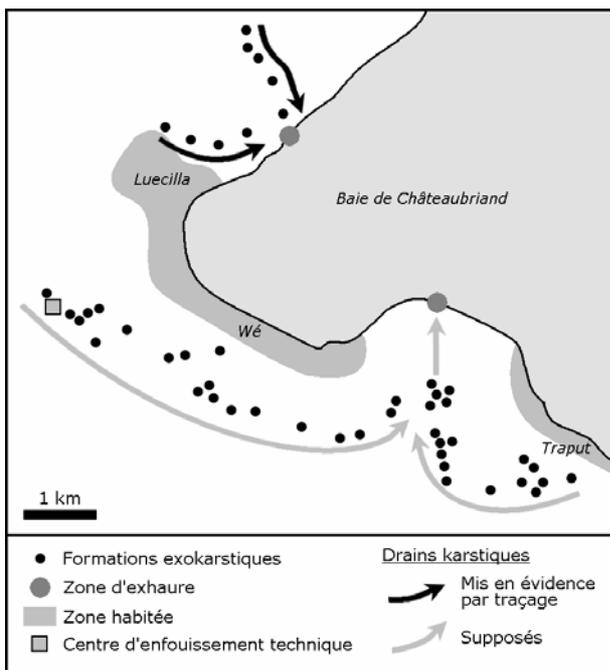


Fig. 6 : Carte de la Baie de Châteaubriand, avec les formations exokarstiques et les drains karstiques intégrés à la modélisation.

Les résultats obtenus à l'échelle de l'île ont ensuite été transposés au niveau de la Baie de Châteaubriand, qui est la zone la plus peuplée de l'île, et qui présente également une forte concentration de formations exokarstiques, formant un chapelet parallèle au trait de côte (Fig. 6). Une grande partie des travaux de terrain menés dans le cadre du programme SAGE ont concerné cette zone, notamment par la réalisation de traçages dans le groupement de formations exokarstiques au nord de la baie et le repérage des zones d'exhaire sur l'ensemble du littoral de cette baie.

Le modèle de cette zone a été établi à partir des données utilisées pour la modélisation de l'aquifère de l'île entière, et de la piézométrie simulée obtenue en résultat. Grâce à une meilleure résolution (mailles de 250 mètres de côté), il a été possible d'intégrer au modèle les formations exokarstiques, dont les localisations ont été obtenues à partir des données de l'IGN (cartes au 1/50 000^{ème}) et

complétées par des repérages sur le terrain. Les manifestations karstiques ont été représentées sur ASMWIN par des valeurs spécifiques de perméabilité et de porosité, nettement supérieures aux valeurs utilisées pour le reste du modèle.

Dans un premier temps, il n'a été entré dans le modèle que l'exokarst (grottes ouvertes sur la surface), qui sont les seules parties du karst dont nous connaissons la localisation exacte. Le calcul des trajectoires d'écoulement montre que la présence de ces formations exokarstiques a peu d'influence : les écoulements se font de manière similaire au modèle global (Fig. 7a). Ont été ensuite intégrés les réseaux karstiques souterrains pouvant relier entre elles les formations exokarstiques, et les zones d'exhaures reconnues. Ainsi, au nord de la Baie, des structures de drainage fonctionnelles ont été mises en évidence par traçages fluorimétriques. La présence de ces drainages nous a amené à formuler des hypothèses sur l'existence d'un drain karstique au sud de la baie, où l'on trouve une succession de formations exokarstiques (Fig. 6). De plus, la présence d'une zone d'exhaure importante à l'est de la baie suggère l'existence d'un autre drain entre ces émergences et les formations exokarstiques situées en amont. La modélisation a permis de représenter de manière significative et spectaculaire l'influence de tels réseaux karstiques sur la piézométrie locale, et sur les trajectoires d'écoulement. Au lieu de se diriger droit vers la mer (Fig. 7a), les écoulements sont capturés par le drain karstique, et atteignent préférentiellement la mer au niveau des zones d'exhaure localisées (Fig. 7b). Les trajectoires des écoulements au nord de la baie sont en accord avec les résultats des traçages fluorimétriques, ce qui permet de valider la démarche et les méthodes utilisées pour la modélisation.

Au final, la modélisation illustre la complexité de la structure de l'aquifère, a priori simple lorsque l'on considère l'île entière, mais qui modifie la piézométrie à l'échelle locale, et crée des directions d'écoulement privilégiées. En mettant en évidence l'importance des drains karstiques supposés ou dont l'existence a été établie autour de la Baie de Châteaubriand, les résultats de cette étude montrent que la modélisation avec ASMWIN peut être très utile pour orienter au mieux les travaux de terrain et pour apporter des premiers éléments de réponses à de possibles cas de pollution.

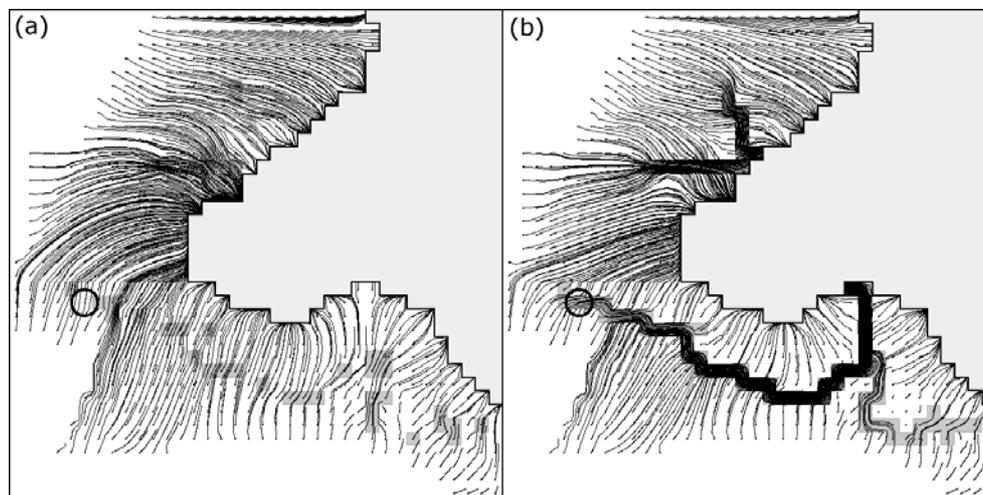


Fig. 7 : Calcul par ASMWIN des trajectoires des écoulements à la surface de la nappe d'eau douce sur une période d'un mois au niveau de la Baie de Châteaubriand. Les mailles grisées correspondent aux formations karstiques qui ont été prises en compte dans la simulation. La localisation du Centre d'Enfouissement Technique (CET) est précisée (rond noir). **(a)** Seuls les formations exokarstiques sont intégrées à la modélisation. Noter leur faible influence sur les écoulements. **(b)** Prise en compte des drains karstiques réels et supposés. Noter les écoulements préférentiels le long de ces drains, en direction des zones d'exhaure.

Ces résultats ont été appliqués concrètement au cas du Centre d'enfouissement technique (CET), installé quelques kilomètres en amont de Wé et à proximité de formations exokarstiques (Fig. 3). Les trajectoires calculées montrent que certains des écoulements d'eau passant à proximité de ce CET se

dirigent droit vers la mer, tandis que d'autres rejoignent le drain karstique, le traversent sur toute sa longueur et ressortent au niveau des zones d'exhaure situées entre Wé et Traput (Fig. 4b). Par conséquent, la modélisation montre que l'ensemble de ce drain karstique supposé pourrait être exposé à une éventuelle pollution issue du CET, et suggère une vérification de l'existence de ce drain par des traçages fluorimétriques.

Références bibliographiques

- 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.
- AISSAOUI D.M., PURSSER B.H., (1986) - La cimentation dans les récifs; principe de cimentation maximale. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre. 303; 4, Pages 301-303.
- AISSAOUI D.M., (1988) - Diagenèse et géodynamique dans la formation des atolls; îles Loyauté, Nouvelle-Calédonie. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre. 306; 17, Pages 1241-1246.
- 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.
- BOURROUILH F.G., 1972, Diagenèse récifale. Calcitisation et dolomitisation. Leur répartition dans un atoll soulevé. Île Lifou. Ter. de Nouvelle-Calédonie. Cah. ORSTOM, sér. Géol., vol. IV, n°2, pp. 121-148, 11 pl.
- CHIANG WH, 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.pmw.inet/asmwin6.htm>
- CARRIERE D., (1987) Sédimentation, diagenèse et cadre géodynamique de l'atoll soulevé de Maré, Nouvelle-Calédonie, thèse de Docteur es sciences, Université de Paris-Sud, centre d'Orsay
- DUBOIS J., LAUNAY J., RECY J., 1973 - Les mouvements verticaux en Nouvelle-Calédonie et aux Iles Loyauté, et l'interprétation de certains d'entre eux dans l'optique de la tectonique des plaques. Cahiers - ORSTOM, Serie Géologie. 5; 1, Pages 3-24.
- DUBOIS J., LAUNAY J. ET RÉCY J., 1975 - Some new evidence on lithospheric bulges close island arcs - Tectonophysics, 26, p. 189-196.
- 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 p.

- EAUNET Système, http://sage.espace.ird.nc/lifou/lifou_f.html ;
- HOEZ A. (2003), Etude hydrogéologique des îles Loyauté, rapport de stage, mém. technicien, ESEM, Université d'Orléans, 68p.
- JAROMIN D., (2007), Gestion de la ressource en eau sur l'île de Lifou, rapport de stage, mém. Ingénieur, Polytech Orléans, 76 p.
- LASNE E. (1992), Étude de la structure et du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique d'un système hydrologique karstique en milieux crayeux. Conceptualisation et modélisation de ce milieu à triple porosité. Exemple du système des Trois Fontaines, Saint-Loup-de Genois, Loiret. Thèse Université d'Orléans, 437 pp.
- LEPILLER M. (2000-2006) . Travaux non publiés sur l'hydrogéologie des Îles Loyauté.
- LEPILLER M., MONDAIN P.-H. (1986) - Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. Mise en oeuvre et interprétation. Hydrogéologie, 1, pp. 33-52.
- 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).
- 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).
- MASSENAVETTE C., (2002), La gestion durable de la ressource en eau des Îles Loyauté en Nouvelle-Calédonie, Mémoire de DEA en Droit de l'Environnement et de l'Urbanisme, Université de Limoges,
- ORANGE F. (2003), Etude hydrogéologique des îles Loyauté. Rapport de stage, mém. technicien, ESEM, Université d'Orléans, 58 p.
- SCHNEGG P.-A., DOERFLIGER N. (1997), An inexpensive flow-through field fluorometer. Proc. 6th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, la Chaux-de-Fonds, 10-17 August 1997, Vol. 2, 47-50.
- SCHNEGG P.-A., KENNEDY K. (1998), A new borehole fluorometer for double tracer tests. **In** : Mass Transport in Fractured Aquifers and Aquitards, Geosciences Center, Copenhagen, 14-16 may 1998, 60-63.
- THOMAS C., THOMAS Y., BRUNET P., LIPS B., LIPS J., (1995), Expédition en Nouvelle-Calédonie – Lifou 1995.
- THOMAS C. (1999) Aspects hydrogéologiques du Yucatan (Mexique), Karstologia, N° 34