

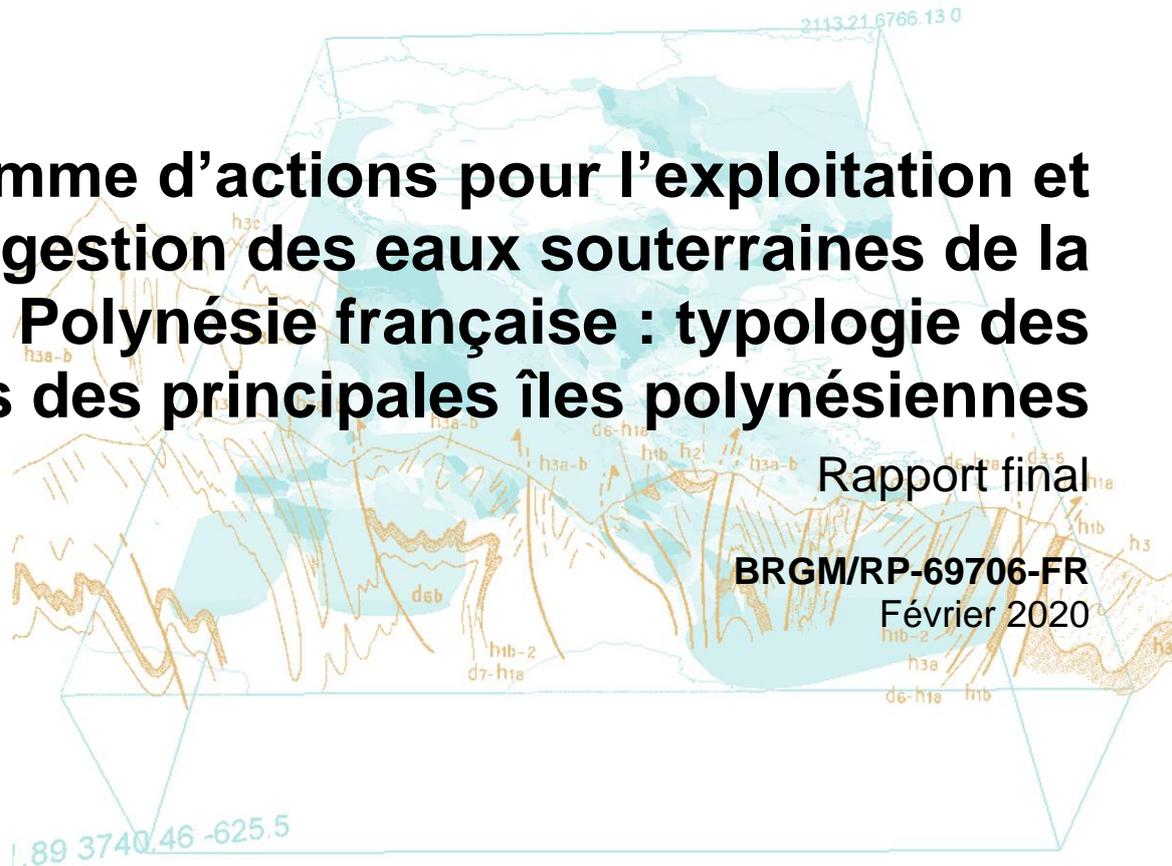
Document public

Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française : typologie des aquifères des principales îles polynésiennes

Rapport final

BRGM/RP-69706-FR

Février 2020



Polynésie Française



Contrat
de Projets
POLYNÉSIE
FRANÇAISE | ETAT
2008-2013



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française : typologie des aquifères des principales îles polynésiennes

Rapport final

BRGM/RP-69706-FR

Février 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM AP16POL001

C. Bertin, M. Laurencelle, E. Malcuit

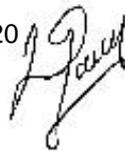
Vérificateur :

Nom : Laurence Gourcy

Fonction : Responsable DEPA/EVE

Date : 26/02/2020

Signature :



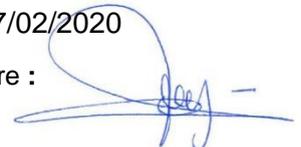
Approbateur :

Nom : JM Mompelat

Fonction : Directeur adjoint DAT

Date : 27/02/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Polynésie Française



**Contrat
de Projets**
POLYNÉSIE
FRANÇAISE ETAT
2008-2013



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Géologie, Hydrogéologie, Hydrodynamique, Hydrogéochimie, Statistique, Polynésie française

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

Bertin C., Laurencelle M. et Malcuit E. (2020) – Programme d’actions pour l’exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française : typologie des aquifères des principales îles polynésiennes. Rapport final. BRGM/RP-69706-FR, 40 p., 8 ill., 1 ann.

Synthèse

Le programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française, intitulé VAITEA, a été initié suite à la signature le 3 mars 2016 de la convention MCE n° 1366 entre le BRGM et le Ministère de la Culture et de l'Environnement polynésien.

Ce programme d'une durée initialement fixée à 36 mois puis étendue à 48 mois par le biais d'un avenant s'inscrit dans le cadre des « Opérations diverses venant en appui des axes AEP, déchets et assainissement » du volet « Environnement » du Contrat de Projets 2008-2013 et vise à doter la Polynésie française d'outils de gestion et d'exploitation des ressources en eaux souterraines performants.

Le travail présenté ici fait suite à plusieurs études réalisées dans le cadre du programme d'actions sur les îles de Tahiti, Rangiroa, Ua Pou et Moorea, qui comportaient des investigations géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et hydrochimiques.

Il a pour objectif initial, de mettre en évidence des typologie d'eaux souterraines dans les différents archipels de Polynésie française à partir de traitements statistiques de données hydrochimiques et hydrodynamiques disponibles.

Les données qui ont été prises en compte ont pour origine a) la base de données du Centre d'Hygiène et de Salubrité Publique de la Polynésie française b) les études récentes du BRGM citées plus haut et c) une étude BRGM sur Tahiti de 2011-2012.

Dans un premier temps, les principaux éléments de contexte climatique, géologique et hydrogéologique ont été définis et les données hydrochimiques et hydrodynamiques ont été examinées afin d'écarter les valeurs non exploitables. Ces données ont ensuite été mises en forme en vue de leur traitement statistique.

Les analyses en composantes principales (ACP) révèlent que la grande majorité des eaux souterraines étudiées ont une signature hydrochimique relativement similaire. Seuls les points situés à Ua Pou (Marquises) et Rangiroa (Tuamotu) se distinguent nettement par leurs concentrations plus fortes en la plupart des espèces chimiques et par leur faciès hydrochimique.

En effet, alors que la plupart des archipels présentent des eaux de type bicarbonaté calcique et magnésien, à Ua Pou les eaux sont surtout chlorurées sodiques ou calcique tandis qu'à Rangiroa les eaux varient d'un pôle chloruré sodique à un pôle bicarbonaté calcique.

Ces observations peuvent s'expliquer, en première approche, par une différence d'environnement géologique :

À Rangiroa, île basse-atoll, le seul aquifère présent est celui de la lentille d'eau douce qui s'étend des sédiments holocènes au sommet des calcaires pléistocènes. Les interactions eau-roche au sein de l'aquifère couplées aux intrusions marines plus ou moins marquées selon les sites, confèrent aux eaux souterraines de l'atoll une signature particulière.

À Ua Pou, il est possible que les nombreuses phonolites, laves riches en silice et en sodium, jouent un rôle important dans l'acquisition du faciès hydrochimique singulier des eaux de cette île. Mais le faible nombre d'échantillons à disposition pour la présente étude ainsi que la présence d'un centre d'enfouissement technique à proximité de deux d'entre eux, impose une certaine prudence vis-à-vis de cette interprétation.

Pour les autres îles, l'analyse statistique n'a pas pu faire de réel distinguo entre archipels, ni même au sein des îles hautes du fait de la surreprésentation des prélèvements dans l'aquifère basal des îles. De plus, l'absence de données contextuelles précises sur la plupart des points de prélèvements n'a pas permis de rattacher telle ou telle signature hydrochimique à un contexte géologique ou hydrogéologique donné.

Les données hydrochimiques ont aussi été examinées au regard des dépassements des seuils réglementaires polynésiens de qualité de l'eau. L'enseignement principal est que tous les archipels, hormis les Australes, présentent au moins un site affecté par un phénomène d'intrusion saline. Les îles de Tahiti et Moorea rencontrent également des dépassements témoignant de pollutions liées aux activités agricoles (dépassement sur les pesticides) et aux activités industrielles (dépassement pour les hydrocarbures polycycliques aromatiques). Des dépassements sont également observés sur Taha'a (agriculture) et sur Raiatea (industrie). Par ailleurs, des coliformes sont fréquemment dénombrés dans les eaux souterraines, révélant des contaminations d'origine humaine.

Le traitement statistique des données relatives aux propriétés hydrodynamiques des aquifères, quant à lui, n'a pas permis d'apporter des résultats probants en raison du faible nombre de données disponibles et du peu d'information sur les aquifères sollicités.

Il ressort des résultats résumés ci-dessus que l'analyse des données a été fortement contrainte par la qualité limitée des données. C'est pourquoi il est recommandé de consolider et d'harmoniser les bases de données existantes (qualité physico-chimique, paramètres hydrodynamiques, ...) en :

- revérifiant la cohérence entre les valeurs rapportées (incluant les unités et les limites de quantification associées) et les valeurs compilées dans les documents sources ;
- corrigeant autant que possible les incohérences détectées ;
- indiquant les données non corrigeables qui demeurent peu fiables et, enfin ;
- en veillant à ce que tous les points d'observation soient suffisamment bien décrits, de façon systématique et sans lacunes, par des informations contextuelles directes ou sinon au moins par des renvois vers les études associées.

Ce travail devrait permettre, à terme, d'améliorer la fiabilité et donc l'exploitabilité de ces données.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Éléments de contexte	9
2.1. CONTEXTE CLIMATIQUE	9
2.1.1. Contexte général	9
2.1.2. Climat par archipel.....	10
2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	11
2.2.1. La mise en place des archipels	11
2.2.2. Évolution et géomorphologie	12
2.2.3. Les différentes lithologies	13
2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	15
3. Méthodologie d'analyse des données.....	19
4. Limites liées à la qualité des données	23
5. Résultats de l'analyse des données.....	25
5.1. HYDROCHIMIE : DIAGRAMME DE PIPER	25
5.2. HYDROCHIMIE : ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP).....	26
5.3. HYDROCHIMIE : COMPILATION DES DÉPASSEMENTS RÉGLEMENTAIRES	28
5.4. PROPRIÉTÉS HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFÈRES : UN APERÇU	33
6. Conclusion.....	35
7. Bibliographie	37

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation des points chauds reconnus sur le territoire de la Polynésie française (d'après la carte géologique de Moorea : Maury et al., 2000).....	11
Illustration 2 : Les différents stade d'évolution d'une île volcanique issue d'un point chaud (D'après Werner et al., 2017).	13
Illustration 3 : Diagramme de Piper résumant l'ensemble des analyses chimiques disponibles.	25
Illustration 4 : Analyse en composantes principales (ACP) des données hydrochimiques après leur agrégation par lieu de prélèvement (par sélection du prélèvement le moins minéralisé).	27
Illustration 5 : Analyse en composantes principales (ACP) des données hydrochimiques après leur agrégation par île.....	28
Illustration 6 : Portait par île des dépassements réglementaires relatifs à la qualité de l'eau souterraine dans les aquifères de la Polynésie française : a) îles de l'Archipel de la Société.....	31
Illustration 7 : Portait par île des dépassements réglementaires relatifs à la qualité de l'eau souterraine dans les aquifères de la Polynésie française : b) autres archipels.	32
Illustration 8 : Aperçu de la distribution statistique de la transmissivité (T) et du coefficient d'emmagasinement (S) par île en excluant les îles où aucune donnée n'est disponible.	33

Liste des annexes

Annexe 1 : graphiques et tableaux additionnels	39
---	-----------

1. Introduction

Le programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française, intitulé VAITEA, a été initié suite à la signature le 3 mars 2016 de la convention MCE n° 1366 entre le BRGM et le Ministère de la Culture et de l'Environnement polynésien.

Ce programme d'une durée initialement fixée à 36 mois puis étendue à 48 mois par le biais d'un avenant s'inscrit dans le cadre des « Opérations diverses venant en appui des axes AEP, déchets et assainissement » du volet « Environnement » du Contrat de Projets 2008-2013.

D'un point de vue technique, le programme vise à doter la Polynésie française d'outils de gestion et d'exploitation des ressources en eaux souterraines performants de façon à faire face aux défis actuels (augmentation des besoins en lien avec le développement démographique et touristique, distribution d'une eau de qualité au plus grand nombre, sécurisation de l'approvisionnement en période de sécheresse, maîtrise des risques de pollution et d'intrusion du biseau salé,...) et futurs (possible évolution des conditions d'accès aux ressources en raison du changement climatique).

D'un point de vue réglementaire, le programme se déroule dans un contexte où les communes doivent mettre en œuvre des moyens pour assurer la distribution d'eau potable conformément à l'article L 2573-27 du Code Général des Collectivités Territoriales. Initialement fixé au 31 décembre 2015, le délai de mise en œuvre a été repoussé au 31 décembre 2024.

Le programme VAITEA comporte 3 actions, synthèse des données relatives aux aquifères des principales îles polynésiennes et typologie de ces aquifères (action 1), élaboration d'outils de gestion des nappes d'eau souterraine (action 2) et assistance technique et formation pour une gestion intégrée et à long terme de la ressource en eau (action 3).

Suite à la phase d'inventaire des données qui a été menée dans le cadre de l'action 1 du programme VAITEA avec des observations sur le terrain de 8 îles Moorea, Maiao, Huahine, Raiatea, Taha'a, Ua Pou, Makatea et Rangiroa (Corbier et Pasquier, 2018), le comité de suivi du projet a retenu les îles de Moorea, Ua Pou et Rangiroa pour faire l'objet d'études détaillées. Ces dernières ont en effet été jugées représentatives d'une île haute, d'une île mixte et d'un atoll. Deux bassins versants de Tahiti (Papenuu et Punaruu) ont également fait l'objet d'études détaillées.

Ces études qui ont comporté des investigations géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et hydrogéochimiques ont permis de proposer des modèles conceptuels de fonctionnement, notamment pour les zones d'intérêt définies par les instances communales.

Au terme de cette étape et toujours dans le cadre de l'action 1, il est proposé d'étudier s'il est possible de distinguer différentes typologies d'aquifères parmi les archipels polynésiens en se basant sur les résultats de ces études et en menant une analyse de l'ensemble des données disponibles sur les autres îles de la Polynésie française (données hydrochimiques et paramètres hydrodynamiques).

Après un bref rappel d'éléments de contexte, le présent document fait état des enseignements apportés par les études détaillées, décrit la méthode utilisée pour analyser les jeux de données disponibles puis présente les résultats de l'analyse effectuée.

2. Éléments de contexte

Préalablement à la recherche des particularités des aquifères des différents archipels de Polynésie française, il est important de rappeler que ceux-ci se répartissent au droit d'une zone grande comme l'Europe.

Si toutes les îles sont toutes issues du fonctionnement de points chauds (anomalies situées dans le manteau terrestre), elles présentent des âges très variables qui conditionnent leur morphologie, les îles hautes correspondant aux îles les plus jeunes, les îles mixtes correspondant aux îles en cours de démantèlement et les atolls, au statut d'évolution le plus avancé.

Sur le plan de la géologie, le volcanisme de points chauds intraplaques génère des formations basaltiques plus ou moins différenciées. Il en résulte une certaine homogénéité mais des particularités peuvent néanmoins exister.

Les îles sont également soumises à des conditions climatiques variables depuis un climat de type tropical humide à un climat tempéré (cas de l'Archipel des Australes lors de la saison fraîche). Il en résulte une grande variabilité de la pluviométrie qui s'échelonne de moins de 1000 mm/an (archipel des Marquises notamment) à plus de 10 000 mm/an sur les hauts sommets de Tahiti.

Il est proposé dans les paragraphes suivants d'étudier de façon plus approfondie ces éléments de contexte.

2.1. CONTEXTE CLIMATIQUE

2.1.1. Contexte général

La Polynésie française est située au droit d'une zone de conflit entre les masses d'air chaud circulant aux basses latitudes et portées par les alizés de nord-est ou, en altitude, par des vents d'ouest venant de la région indonésienne et, les masses d'air plus frais des latitudes subtropicales portées par les alizés de sud-est. La circulation atmosphérique et les types de temps sont sous la dépendance des centres d'action (anticyclones et dépressions) qui dirigent ces masses d'air.

Selon Météo France®, le climat polynésien est de type maritime humide et comporte généralement deux grandes saisons :

- de novembre à avril, une saison dite « chaude » ou été austral qui coïncide avec une humidité plus importante ;
- de mai à octobre, une saison dite « fraîche » ou hiver austral qui coïncide avec une humidité moindre.

Cette distinction très simple du cycle saisonnier ne s'applique pas rigoureusement à toutes les îles. En effet, du fait de la grande étendue latitudinale de la Polynésie française, chaque archipel est soumis à des types de temps bien spécifiques. Ainsi, le nord de l'archipel des Marquises connaîtra plutôt un type de temps tropical aride alors que le sud de l'archipel des Australes est plutôt soumis à un type de temps des moyennes latitudes.

2.1.2. Climat par archipel

- Marquises : le climat peut être considéré comme étant du type tropical humide.

Certains sites plus au nord sont à la limite du climat tropical aride. Si l'on s'appuie sur les températures, les saisons sont peu marquées. Au contraire, si l'on se base sur les précipitations, on peut entrevoir un cycle saisonnier qui s'écarte du schéma classique. En effet, la saison chaude et humide s'étale du mois de janvier au mois d'août, et la saison fraîche du mois de septembre au mois de décembre. Cet archipel est généralement soumis au régime d'alizés. Le climat est caractérisé par des précipitations modérées (moins de 1 000 mm/an), des températures chaudes (27 °C en moyenne) et un bon ensoleillement (2 850 heures/an) (source : ORSTOM, 1993).

- Tuamotu : le climat des Tuamotu est de type tropical humide.

Les saisons sont relativement bien distinctes. La saison des pluies va du mois de novembre au mois d'avril, et c'est au mois de décembre et de janvier qu'on enregistre les cumuls de précipitations les plus importants. De par sa position, cet archipel est soumis à des systèmes organisés, mais aussi à des masses d'air humide drainées par l'alizé. Le climat est défini par des précipitations modérées (de 1 200 à 1 400 mm), de faibles variations de température, un bon ensoleillement (2 850 heures). Les vents sont peu perturbés du fait de l'absence de relief.

- Société : le climat est de type tropical humide.

Le cycle annuel est bien marqué. Il se caractérise par des pluies fortes en saison chaude, qui deviennent souvent faibles en saison fraîche. La saison des pluies débute en novembre et s'achève en avril. Les mois de décembre et janvier sont les plus arrosés. Les pluies fortes sur l'archipel de la Société sont essentiellement dues à des systèmes organisés pris dans un flux général de nord à nord-ouest. Les côtes exposées à l'alizé et surtout les hauteurs sont beaucoup plus arrosées : sur Tahiti par exemple, la pluviométrie annuelle observée à Papenoo (3 550 mm) est deux fois plus élevée que celle de Fa'a (1 700 mm) et, les cumuls annuels sont estimés à plus de 8 500 mm sur les sommets de l'île.

Les températures sont chaudes mais pas excessives : moyenne annuelle de 26°C à Faa'a.

- Australes : le climat des australes connaît les conditions météorologiques les plus atypiques de la Polynésie.

De par sa situation géographique, l'environnement atmosphérique de cet archipel se rapproche de celui des zones tempérées en saison fraîche et de celui des zones tropicales en saison chaude. Le climat est caractérisé par des pluies assez bien réparties tout au long de l'année (supérieures à 2 000 mm à Rapa), une humidité relative élevée et des températures moyennes inférieures à 25°C. Les vents sont plus soutenus et plus variables qu'ailleurs. L'insolation est la plus faible du territoire : 1 600 heures à Rapa. C'est sur cette zone que l'on observe les plus fortes houles, en dehors des houles cycloniques.

- Gambier : le climat des Gambier présente des caractéristiques proches des Australes.

Les îles Gambier jouissent d'un climat maritime typique, de nature tropicale mais relativement frais. Les pluies sont relativement constantes dans l'année. Les températures y sont plutôt fraîches, analogues à celles de Tubuai (Australes). L'insolation y est relativement faible.

2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

2.2.1. La mise en place des archipels

La Polynésie française est située au droit de la plus vaste plaque lithosphérique terrestre : la plaque pacifique. Cette dernière est délimitée par des dorsales océaniques au sud et à l'est, des zones de subduction au Nord et à l'Ouest et des failles transformantes en Nouvelle Zélande et Californie. La plaque pacifique se déplace du sud-est vers le nord-ouest à une vitesse de l'ordre de 10 à 11 cm par an.

Les îles polynésiennes ont pour origine un volcanisme intraplaque de type point chaud, ou « hot spot », situé sous la plaque océanique.

Selon Foucault *et al.* (2014), un point chaud correspond à une zone volcanique d'extension limitée qui serait liée à la montée d'une colonne de matériaux corrélative d'une anomalie thermique. Relativement immobiles par rapport au mouvement de dérive de la plaque lithosphérique, les points chauds donnent naissance à des édifices volcaniques. Ces derniers forment des chaînes linéaires qui s'alignent selon la direction de déplacement de la plaque : les volcans les plus récents se trouvant à proximité du point chaud tandis que les plus âgés en sont les plus éloignés.

Plusieurs points chauds à l'origine des alignements observés dans les différents archipels polynésiens ont été reconnus (cf. Illustration 1) :

- point chaud de Pitcairn à l'origine des Gambier ;
- point chaud situé à l'aplomb de l'île de Mehetia, à l'origine de l'archipel de la Société ;
- points chauds à l'aplomb des monts Macdonald et Tino Mana, à l'origine de l'archipel des Australes et du volcanisme secondaire observé à Rurutu.

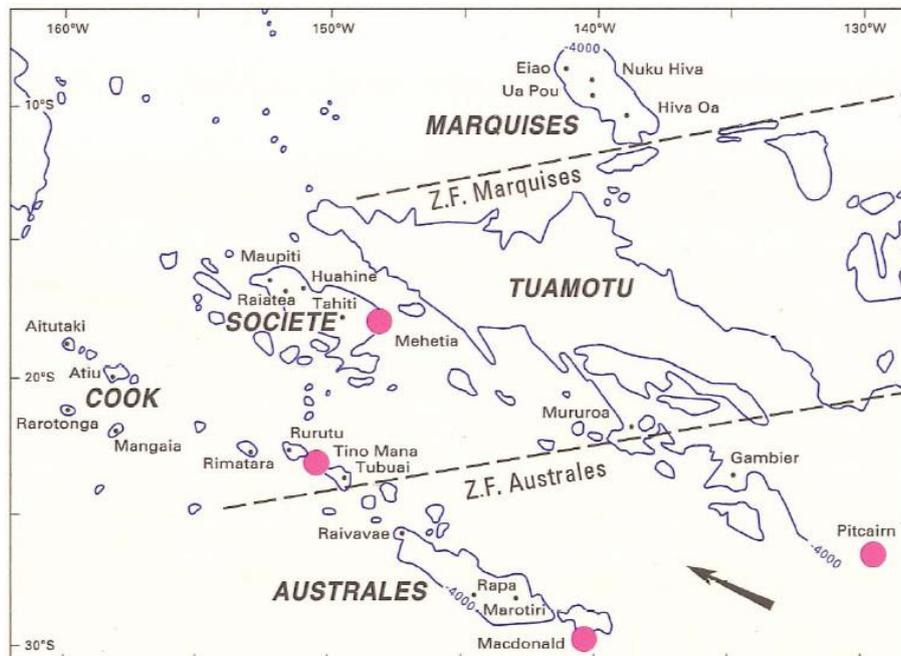


Illustration 1 : Localisation des points chauds reconnus sur le territoire de la Polynésie française (d'après la carte géologique de Moorea : Maury et al., 2000).

En ce qui concerne l'archipel des Marquises, l'alignement des îles ainsi que l'augmentation croissante de l'âge des formations géologiques du sud vers le nord traduisent une mise en place à partir d'un ou plusieurs points chauds. Ces derniers n'ont toutefois pas encore été clairement identifiés.

L'origine des Tuamotu est à ce jour encore controversée. En effet, si le fondement volcanique de l'archipel est avéré, le débat n'est pas tranché sur une mise en place à partir d'un point chaud : l'alignement des îles selon une direction N115° plaide en la faveur de cette hypothèse ou, pour une origine en liaison avec une bouffée mantellique très étalée en surface et n'émergeant que sous la forme d'une centaine d'îles de basse altitude (Demougeot http://www.saga-geol.asso.fr/Volcanisme_frameset.html).

Il est à noter que la Polynésie française se situe au droit d'une zone appelée super bombement du Pacifique Sud, où le plancher océanique est surélevé de 250 à 680 m par rapport à la moyenne des fonds océaniques du même âge (Adam, 2012). Ce bombement aurait pour origine un super panache de magma en provenance de la limite manteau inférieur/noyau.

2.2.2. Évolution et géomorphologie

Les îles qui se créent sont emportées par la plaque pacifique et s'enfoncent progressivement avec elle au fur et à mesure que cette dernière s'éloigne du point chaud. Ce phénomène de subsidence explique la diminution de la hauteur des volcans émergés en fonction de l'accroissement de la distance avec le point chaud mais il n'est pas le seul. En effet, l'érosion, particulièrement active sous ce climat, participe à la réduction de la hauteur des îles de même que l'éloignement du point chaud, qui ne permet plus d'alimenter les édifices volcaniques qui cessent alors leur croissance.

Située dans la zone intertropicale, la Polynésie française bénéficie de conditions (température luminosité, oxygénation, salinité ...) qui permettent le développement de nombreuses espèces de coraux, en général près de la surface. Ces coraux peuvent former une couronne qui entoure presque intégralement l'île, couronne initialement proche du rivage où la profondeur n'est pas trop importante. Avec la subsidence de l'île, son rivage s'enfonce, mais les coraux croissent de façon à rester près de la surface. De ce fait, la distance entre la rive solide de l'île volcanique et l'anneau de corail qui l'entoure augmente avec le temps. L'île volcanique finit par entièrement disparaître et ne subsiste que l'anneau de corail (Labrosse, 2010).

L'illustration 2 présente l'évolution d'une île volcanique issue d'un point chaud.

Les grands traits de la structure géologique de la région servent de cadre à l'évolution géomorphologique. Dans son atlas de la Polynésie française (1993), l'ORSTOM indique qu'aux quatre archipels de la Polynésie française correspondent quatre types de formes et quatre types d'évolution géomorphologique :

- l'archipel de la Société caractérisé par un enfoncement progressif des édifices, est lié à un bombement sous-marin par amincissement de la lithosphère au-dessus du point chaud, puis à la subsidence en direction du nord-ouest ;
- dans le cas de l'alignement des Iles Australes – Iles Cook du sud, point chaud et réactivation volcanique due à un « *superswell* » (amincissement d'origine thermique de la lithosphère au sud de la faille transformante des îles Marquises) provoquent la formation d'îles volcaniques espacées et le soulèvement de certaines d'entre elles ;
- les îles Marquises sont des reliefs volcaniques très marqués par une tectonique d'effondrement des édifices et par l'absence de couronne récifale ou par son immersion ;

- les îles Tuamotu sont l'expression même des atolls, couronnes coralliennes au tracé plus ou moins circulaire reposant sur un socle volcanique situé d'autant plus profondément que l'on va vers le Nord-Ouest de l'archipel.

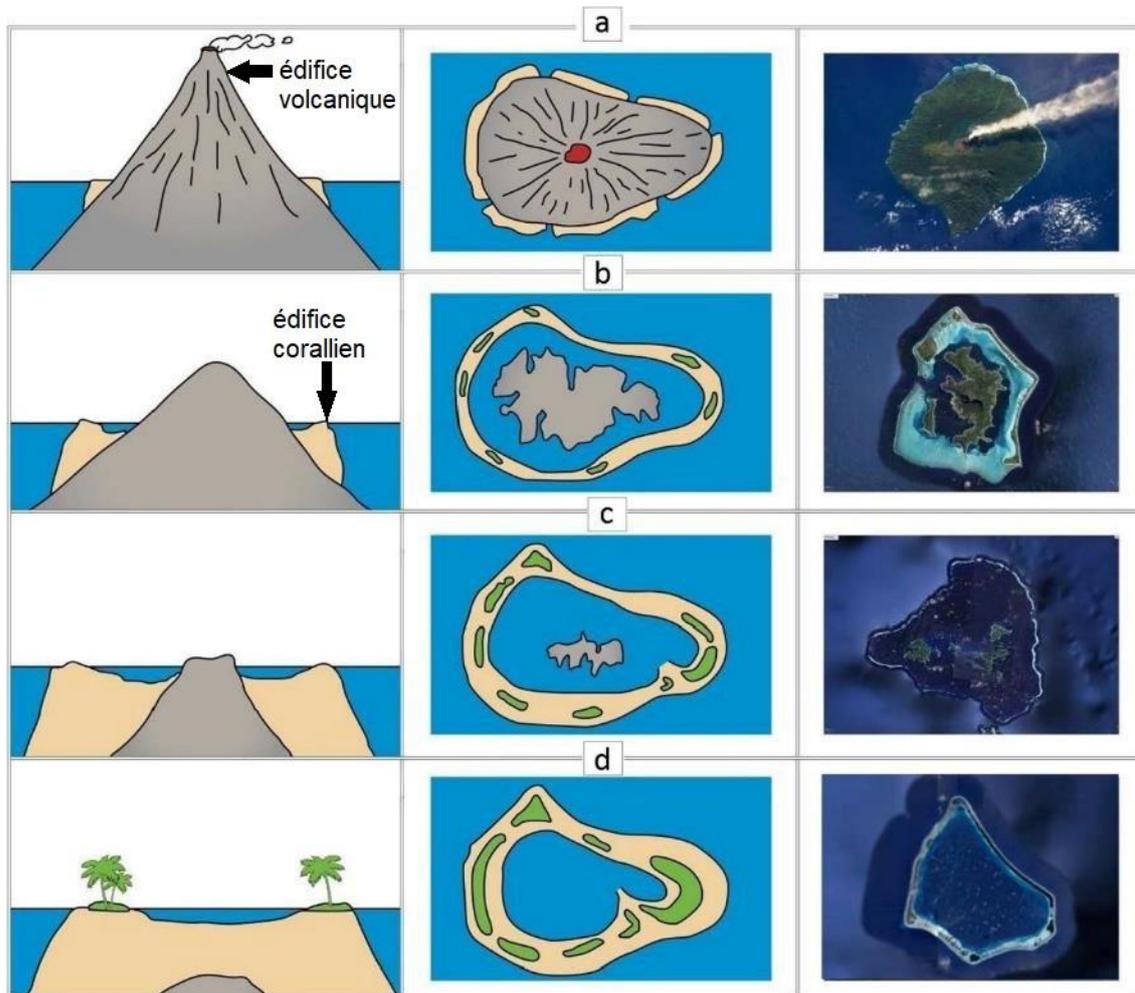


Illustration 2 : Les différents stades d'évolution d'une île volcanique issue d'un point chaud (D'après Werner et al., 2017).

2.2.3. Les différentes lithologies

Dans un souci de simplification, il sera décrit ci-après, les formations géologiques typiques rencontrées sur une île haute et les formations géologiques d'une île basse qui correspond à un stade d'évolution avancé d'une île haute.

Île haute

Les éléments suivants décrivent de façon simplifiée la construction d'une île haute et ses formations géologiques, elle concerne plus spécifiquement les îles de la Société. Ce schéma général de construction peut s'appliquer aux autres îles hautes avec des variantes possibles : absence de caldeira, nature et quantité des laves produites ...

Ainsi qu'il a été vu dans le paragraphe 2.2.1., la plupart des îles volcaniques de Polynésie française se sont mises en place directement sur le plancher océanique. Les magmas qui sont émis sont le plus souvent de type basaltes alcalins.

Lorsque le volcan aérien atteint une taille de l'ordre de quelques centaines de mètres, l'explosivité diminue et les coulées prédominent. Il se forme alors un « volcan bouclier » constitué d'une succession de coulées de lave d'épaisseur unitaire réduite (métrique) qui s'accumulent sur des hauteurs conséquentes. Le point d'émission des coulées de laves est souvent situé dans la partie centrale ou au droit de fractures. L'inclinaison des coulées est faible : de l'ordre de 2 à 10°. Les coulées sont fluides à surfaces lisses ou drapées (pa-hoe-hoe) et peuvent former des tube-lavas. Les laves sont de type hawaïtes (ORSTOM, 1993).

Des projections scoriacées (matériaux éjectés lors des phases explosives ; cendres, lapilli, scories) peuvent s'intercaler dans les épisodes d'émission de coulées fluides.

Des épisodes d'épanchement de coulées massives, fréquemment prismées, se mettent également en place notamment en fin de construction du volcan où apparaissent des laves plus différenciées. Cette différenciation résulte de la cristallisation fractionnée du magma basaltique qui conduit dans le cas des basaltes alcalins à des hawaïtes, puis des mugéarites, des benmoréites (trachy-andésites), des trachytes puis des rhyolites ou des phonolites dans les lignées sodiques (Foucault *et al.*, 2014).

La fin de cette phase est marquée par un gonflement sommital de l'édifice volcanique qui se traduit par l'ouverture de fissures radiales dans lesquelles s'injecte du magma en formant des dykes qui recoupent les formations en place.

Cette activité volcanique conduit à un effondrement polyphasé de l'édifice et à la formation d'une caldeira. Chaque épisode d'effondrement est accompagné d'éruptions dont les conduits d'alimentation sont situés sur les failles bordières ou à l'intérieur de la caldeira. La différenciation du magma est plus poussée et donne des mugéarites et parfois des benmoréites.

Les éruptions peuvent être accompagnées de lahars (coulées de boues à débris de roches volcaniques). Les périodes d'accalmie permettent le creusement de vallées radiales qui sont progressivement et alternativement remplies par les coulées de lave et les lahars. Les coulées peuvent également combler l'intérieur de la caldeira.

Selon les îles et les volcans, l'activité volcanique ultérieure peut parfois se limiter à la mise en place de dômes de phonolites et dykes recoupant les formations antérieures (Huahine par ex.), ou comme l'a décrit Hildenbrand (2002) pour le volcan de Tahiti-Nui être particulièrement complexe. Cet auteur a en effet montré qu'un second volcan bouclier s'est mis en place et qu'un glissement majeur a entraîné le démantèlement d'une partie du complexe éruptif provoquant une avalanche de débris (brèches torrentielles). Cet effondrement a par la suite conditionné l'histoire éruptive ultérieure en captant l'activité principale a contrario du mouvement de la plaque. La fin de la phase de la construction principale de Tahiti-nui s'achève par une éruption ignimbritique. Cette observation illustre bien l'évolution des laves vers des termes de plus en plus alcalins et sous-saturés en silice.

L'histoire post-volcanique des îles hautes est ensuite marquée par le démantèlement des formations géologiques sous l'effet de l'érosion. Selon Hildenbrand (2002), les variations eustatiques ont certainement contribué à l'existence de différents pulses érosifs sur Tahiti Nui.

Outre les formations volcaniques et leurs produits d'altération, il est possible de rencontrer des unités sédimentaires sur les îles hautes :

- des formations alluviales. Ces dépôts proviennent du démantèlement des épanchements volcaniques et sont associés aux cours d'eau ;
- des formations littorales constituées de débris coralliens et d'éléments détritiques charriés par les cours d'eau ;
- une haute falaise fossile côtière, vestige du dernier relèvement eustatique quaternaire, est souvent présente sur les îles hautes.

Île basse

Un atoll, île corallienne basse, est constitué d'un soubassement volcanique témoin de l'ancienne activité volcanique surmonté par des formations récifales calcaires pléistocènes, sur lesquelles reposent des sédiments peu consolidés datant de l'holocène.

Les formations volcaniques des îles ne sont plus visibles car totalement immergées du fait de la subsidence. Les formations récifales calcaires peuvent être plus ou moins émergées selon les îles. Les épisodes de rebonds isostatiques ont entraîné une mise hors d'eau des calcaires, provoquant leur érosion par dissolution qui a abouti à des phénomènes de karstification locale.

Les sédiments holocènes sont constitués de sables, de graviers et de blocs arrachés à la frange corallienne. Localement, il est possible de distinguer un horizon plus consolidés appelé « couche à conglomérats » ou « couche à papa ».

2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Île basse

Une lentille d'eau douce alimentée par les précipitations météoriques peut être présente dans les sédiments détritiques holocènes. Elle peut être semi-captive voire captive sous la « couche à papa » lorsque cette dernière est particulièrement indurée, avec pour conséquences une recharge limitée de l'aquifère mais une relative protection vis-à-vis des activités anthropiques.

Cette lentille peut se prolonger jusqu'à la partie sommitale des calcaires pléistocènes. Au-delà et après une zone de transition eau douce/ eau salée, les calcaires sont saturés en eau salée en provenance de l'océan.

L'extension en profondeur de la lentille d'eau douce varie en fonction des saisons : elle est maximale en fin de saison des pluies et minimale en fin de saison sèche. Elle dépend également de la taille des atolls ainsi que des prélèvements d'eau qui y sont pratiqués. Des puits de faibles profondeurs (1,5 à 2,5 m de profondeur en moyenne à Rangiroa par ex, Corbier *et al.* 2019a) interceptent en effet la nappe. Des pompes intensives ou trop nombreuses peuvent provoquer la remontée d'eau saumâtre et la disparition à terme de la lentille d'eau douce.

L'extension latérale de la lentille d'eau douce est limitée par le niveau de l'océan et par le niveau d'eau dans le lagon quand il existe. Les fluctuations piézométriques de la nappe sont étroitement corrélées avec les marées.

Compte tenu des différences lithologiques des deux formations aquifères, leurs propriétés hydrodynamiques sont différentes. En effet, les sédiments holocènes de type essentiellement

poreux sont affectés d'une perméabilité d'interstices tandis que les calcaires sous-jacents présentent une perméabilité de fissures.

Île haute

Ainsi qu'il a été vu dans le paragraphe 2.2.3., les îles hautes sont essentiellement constituées de formations volcaniques. Ces dernières se caractérisent par la variété des lithologies rencontrées et leur morcellement lié a) à une mise en place en milieu aérien selon une dynamique très active et b) à des épisodes de démantèlements conséquents. Chaque formation géologique présente par conséquent des propriétés hydrogéologiques spécifiques qui peuvent en outre être modifiées par l'altération, phénomène non négligeable dans cette partie du monde.

D'une manière générale, les formations volcaniques possèdent de bonnes propriétés hydrodynamiques (bonne capacité d'infiltration, perméabilité élevée...).

Selon Lachassagne et Maréchal (2004), plusieurs types de perméabilités peuvent coexister au sein des aquifères volcaniques et concourir à la mise en place de nappes d'eau souterraine :

- une perméabilité d'interstices au sein :
 - des niveaux scoriacés ou brèches de progression que l'on peut observer au niveau des coulées basaltiques ;
 - des projections pyroclastiques en particulier lorsqu'elles ne sont pas altérées ;
 - des formations sédimentaires, alluvions pour l'essentiel, en particulier au sein des paléovallées. Des investigations géophysiques (Corbier *et al*, 2019c) ont mis en évidence de tels remplissages sur l'île de Moorea. Il est important de souligner le rôle des paléovallées dans le rassemblement et la concentration des écoulements souterrains.
- une perméabilité de fractures, observée essentiellement sous la forme de fissures de refroidissement des laves (prismes ou orgues des cœurs de coulées). Les vitesses d'infiltration et de circulation de l'eau peuvent être élevées avec pour corollaire une minéralisation faible de l'eau en raison d'un temps de contact eau/roche réduit et, dans le cas d'une pollution un transfert rapide du contaminant.

Si un paléosol a pu se développer entre deux épanchements laviques ou si ces formations surmontent un faciès de moindre perméabilité, une nappe peut se mettre en place. Son existence se traduit souvent par la présence d'une ligne de sources observables dans l'empilement de coulées de lave des secteurs amont des îles hautes. Ces nappes perchées sont caractérisées par une recharge rapide mais un potentiel limité. Elles peuvent être compartimentées par des intrusions de type dykes. Il est à noter que les îles hautes de Polynésie peuvent comporter plusieurs générations d'intrusions qui complexifient les écoulements souterrains en agissant parfois comme drain et parfois comme barrière pour les eaux. Hildenbrand (2002) considère par exemple, que dans la vallée de la Fautaua (Tahiti Nui), les nombreux dykes ont pour effet de connecter les écoulements au sein de l'ensemble de la structure volcanique.

Les lahars et avalanches de débris sont en général caractérisés par un fort degré d'altération et ne sont généralement pas aquifères car peu perméables. Toutefois, ils peuvent être recoupés par des dykes, comporter des coulées de lave ou des niveaux de pyroclastites qui permettent potentiellement la circulation de l'eau et la constitution de nappes.

Plus exceptionnellement, la présence de tunnels de laves (au sein des basaltes fluides du volcan bouclier) permet des écoulements souterrains et l'émergence de sources.

Les îles volcaniques de Polynésie française comportent outre les nappes perchées des parties hautes des îles, un aquifère basal dont les débits sont importants et pérennes. Cet aquifère donne naissance à des sources en pied des reliefs mais son exutoire principal se situe en mer. Souvent exploitées par forages pour l'alimentation en eau potable, les nappes de cet « aquifère basal » montrent de faibles gradients hydrauliques et donc des niveaux piézométriques peu élevés même à distance du littoral. L'absence de forages très profonds ne permet pas de statuer sur la continuité de la ressource vers l'intérieur des terres. Les nappes sont fréquemment captives ou semi-captives et présentent des conductivités électriques supérieures à celles des eaux des nappes perchées, traduisant un temps de contact avec les formations géologiques plus long. Il est probable que l'aquifère basal soit alimenté pour partie via des écoulements souterrains complexes depuis les nappes perchées des reliefs - avec un rôle majeur des intrusions (notamment des réseaux de dykes) et des paléoreliefs - et pour partie, par des pertes depuis le réseau hydrographique.

Dans un souci d'exhaustivité, il convient de mentionner l'existence de nappes en dehors des formations volcaniques notamment dans les alluvions des cours d'eau actuels, et dans les formations littorales mixtes. Dans les vallées de taille importante, les nappes des aquifères alluviaux sont captées pour l'alimentation en eau potable par des galeries drainantes. La composante argileuse peut parfois être importante et induire une déconnexion partielle vis-à-vis du cours d'eau attenant.

3. Méthodologie d'analyse des données

Des analyses statistiques de différents types ont été réalisées à partir des jeux de données disponibles sur les îles de la Polynésie française, en vue de répondre à l'objectif de la présente étude d'établir une typologie des îles polynésiennes. Ces analyses devaient permettre d'identifier des groupes de localisations (îles, archipels) partageant des similarités d'un point de vue hydrogéologique et hydrogéochimique. Plus précisément, étant donné la nature des données disponibles, les analyses statistiques (et donc de similarité) se sont concentrées sur des variables liées à la qualité des eaux souterraines d'une part, et aux propriétés hydrodynamiques des aquifères, d'autre part. Toutefois, considérant le grand nombre de données hydrochimiques par rapport au petit nombre de données hydrodynamiques disponibles, l'exercice d'analyse s'est principalement concentré sur la qualité des eaux souterraines.

Quatre jeux de données (JD) ont été considérés pour ces analyses. Ceux-ci sont énumérés ci-dessous avec, à droite de la flèche, les types d'informations qui ont été exploités dans chacun :

- JD1 : résultats d'analyses réalisées sur eaux brutes transmis par le CHSP (Centre d'Hygiène et de Salubrité Publique) → hydrochimie ;
- JD2 : analyses chimiques réalisées par le BRGM dans le cadre du projet VAITEA → hydrochimie et propriétés hydrodynamiques ;
- JD3 : données recensées par le BRGM Polynésie dans le cadre du projet VAITEA entre 2016 et 2019, hors Tahiti → hydrochimie et propriétés hydrodynamiques ;
- JD4 : données recensées par le BRGM en 2011/2012, uniquement pour Tahiti → hydrochimie et propriétés hydrodynamiques.

En un premier temps, les jeux de données hydrochimiques ont été traités dans un tableur afin de les rendre exploitables par des outils statistiques. Cette phase de préparation a débuté par un parcours visuel des tables de données afin de constater le nombre de variables présentes puis d'apprécier la quantité et la qualité des données disponibles pour chacune des variables, en particulier pour les variables de nature quantitative. Ensuite, les tables ont été restructurées de sorte qu'il soit possible, plus tard, de les fusionner facilement et aussi d'agréger les valeurs provenant d'un même lieu de prélèvement. Une trentaine de nouveaux champs de « codes » ont été ajoutés aux tables hydrochimiques afin d'exprimer les informations hydrochimiques quantitatives en termes qualitatifs codés. Ainsi, une valeur manquante est signalée par le code -1, une concentration inférieure à la limite de quantification (LQ) par le code 0 (« absence » relative de l'espèce chimique) et une concentration supérieure à la LQ par le code 1 (« présence » de l'espèce chimique) tant qu'elle respecte le critère réglementaire rattaché à cette espèce chimique. Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque la concentration excède le critère réglementaire, le code 2 est attribué (signalant alors un « dépassement » par rapport à la réglementation). De plus, les entrées textuelles présentes au sein de champs numériques ont été traitées : les textes « < LQ » ont été remplacés par $0,5 * LQ$ alors que les autres textes (ex. 'nd', 'en cours') ont simplement été effacés (devenant alors des valeurs manquantes). Une fois la qualité des données de chaque table mieux connue, certaines valeurs écartées et les champs de codes ajoutés, des tables hydrochimiques allégées ont été préparées en n'extrayant qu'une sélection de champs suffisamment bien renseignés.

En un deuxième temps, les tables hydrochimiques allégées ont été traitées dans R. La première étape de traitement sous R a consisté à charger ces tables puis à les fusionner. Puis, un autre script R a permis d'identifier les variables trop mal renseignées dans la table fusionnée et de les exclure. Deux filtres ont ensuite été appliqués aux lignes de la table fusionnée de manière à

exclure les nombreux prélèvements ne correspondant pas à des eaux souterraines (prélèvement exclu si \neq 'ESO') et les quelques prélèvements ayant une concentration en chlore (et aussi en plusieurs autres espèces chimiques) très élevée et donc très à l'écart par rapport à la moyenne (prélèvement exclu si $[Cl] > 1000$ mg/L). Ce second filtre est pertinent pour les analyses multivariées car il permet d'examiner plus finement la dispersion statistique de la grande majorité des prélèvements, dont les eaux ne montrent pas une salinité importante. Un choix de 11 variables numériques statistiquement exploitables a été fixé, comprenant 1 paramètre physico-chimique (conductivité), 9 éléments majeurs et mineurs (Na, Cl, Ca, Mg, K, HCO_3 , NO_3 , PO_4 , SO_4) et la silice dissoute (donnée en SiO_2). Quatre variables qualitatives relatives à la localisation du prélèvement ont été retenues en parallèle : l'archipel, l'île, la commune et le lieu de prélèvement.

Les données numériques de la table ont ensuite été agrégées par lieu de prélèvement de sorte qu'il n'y ait plus qu'une seule ligne par lieu de prélèvement dans la table. Le prélèvement le moins minéralisé de chaque lieu de prélèvement a été retenu pour les analyses multivariées, en utilisant la somme des concentrations des 4 cations majeurs (Na, Ca, Mg et K) exprimées en meq/L comme estimateur du degré de minéralisation du prélèvement. La valeur la moins minéralisée a été considérée comme la moins influencée par l'intrusion saline, processus pouvant masquer la composition hydrochimique de l'eau résultant des interactions eau-roche et permettant le travail de typologie. Cette approche d'agrégation par sélection a été préférée à une approche d'agrégation statistique par calcul des valeurs médianes car elle présente l'avantage de conserver la composition originale d'un prélèvement donné plutôt que de créer des « compositions fictives » constituées de valeurs statistiques dont les rapports peuvent perdre de leur cohérence. Dans le cas des variables codées, la valeur maximale parmi tous les prélèvements faits en un lieu donné a été retenue (par exemple 2 pour l'agrégation de -1, -1, 0, 2, 1). Un troisième et dernier filtre a été appliqué à la table agrégée par lieu de prélèvement afin d'en retirer les lignes ayant des valeurs manquantes. Puis, les variables numériques retenues dans la table ont toutes fait l'objet d'une transformation logarithmique afin que les distributions empiriques s'approchent davantage de distributions normales.

Un second niveau d'agrégation, optionnel, a été implémenté en plus afin qu'il soit possible de comparer les résultats des analyses par lieux de prélèvement versus par îles. La valeur médiane est alors utilisée pour agréger les variables quantitatives et la valeur maximale utilisée pour agréger à nouveau les variables codées, par île. Une fois le ou les niveaux d'agrégation souhaités atteints, des corrélogrammes ont été générés pour avoir un premier aperçu de la force des liens entre les variables numériques retenues. Puis, les variables numériques ont été standardisées (c'est-à-dire centrées et réduites par soustraction de la moyenne puis division par l'écart type), de sorte que toutes aient un « poids » égal. En effet, les variables standardisées sont de façon générale mieux adaptées à l'exécution d'analyses multivariées, incluant les analyses en composantes principales (ACP) qui nous intéresseront ici.

En un troisième temps, des ACP ont été réalisées, toujours dans R, à partir de la sélection de variables numériques expressément log-transformées, agrégées et standardisées. Différentes paires de composantes principales (CP) ont été testées jusqu'à trouver des combinaisons permettant de bien distinguer certains groupes de points par rapport à d'autres, la symbologie des points informant sur la localisation des prélèvements ou des îles.

En un quatrième temps, les variables codées agrégées par lieu de prélèvement ont fait l'objet d'un traitement spécifique. Après avoir été agrégées par île, les informations codées ont été résumées sous la forme d'un diagramme circulaire par île regroupant 23 codes en 5 groupes reflétant autant d'origines probables de contamination de l'eau souterraine (géogénique, intrusion marine, pollution agricole, pollution industrielle, pollution humaine/eaux usées).

Enfin, les tables contenant des données numériques relatives aux propriétés hydrodynamiques des aquifères ont été examinées et traitées dans un tableur, puis analysées dans R. Seules deux variables numériques se sont avérées exploitables : la transmissivité¹ (T) et le coefficient d'emmagasinement² (S). Des diagrammes à boîtes et moustaches (*boxplots*) ont été produits afin de visualiser les distributions statistiques de T et de S par île et de pouvoir constater d'éventuelles similarités entre îles.

¹ Transmissivité : produit de la conductivité hydraulique (aptitude d'une couche de terrain à se laisser traverser par l'eau) par l'épaisseur de la nappe. La transmissivité est exprimée en m²/s.

² Coefficient d'emmagasinement : rapport du volume d'eau libérée ou emmagasinée par unité de surface d'un aquifère, à la variation de charge hydraulique correspondante, sans référence au temps (ou en un temps illimité). (Castany et Margat, 1997)

4. Limites liées à la qualité des données

Plusieurs problèmes ont été constatés en relation à la qualité des données hydrochimiques :

- Incohérence des unités de mesure

Plusieurs champs des tables hydrochimiques contiennent un mélange incohérent de valeurs de concentrations tantôt en mg/L tantôt en µg/L, bien qu'une seule unité soit spécifiée dans l'entête du champ. À titre d'exemple, dans le premier jeu de données (JD1 : voir § 3), on trouve dans le même champ « Plomb (µg Pb/L) » des valeurs autour de l'unité (cohérentes avec des µg/L) et des valeurs de l'ordre du millième (certainement obtenues par conversion de µg/L vers mg/L). Ainsi, lorsqu'un champ contient à la fois des valeurs cohérentes (dont l'unité de mesure respecte celle spécifiée dans l'entête du champ) et des valeurs incohérentes (qui ont été converties vers une unité autre que celle spécifiée dans l'entête du champ), il ne peut être utilisé lors des analyses statistiques.

- Valeurs égales à des limites de quantification (LQ)

Un autre problème fréquemment observé dans les jeux de données hydrochimiques JD1, JD3 et JD4 est la présence fréquente de valeurs identiques. Les concentrations étant des valeurs décimales et non entières, on ne devrait normalement pas trouver autant de répétitions. C'est partant de ce constat et puis en comparant ces valeurs avec une LQ associée à chaque espèce chimique que l'on a pu en déduire que les concentrations compilées dans ces JD comprennent fréquemment des valeurs numériques reflétant une voire plusieurs LQs dans un même champ (pour une même espèce chimique). Or, un champ devient difficilement exploitable lorsque ses valeurs sont limitées par plusieurs LQs différentes, surtout si les valeurs limitées par une LQ sont inscrites sous forme numérique dans la table. À titre d'exemple, dans le JD1, on trouve parmi les « Fluorures (mg F/L) » 43 % de valeurs égales à 0,35 mg/L et 16 % de valeurs égales à 0,05 mg/L alors que les autres valeurs n'atteignent pas des fréquences supérieures à 7 %. Le reste des valeurs de concentration en fluorures étant très majoritairement situé entre ces deux LQs, on ne peut pas non plus accorder une grande fiabilité à ces valeurs puisqu'elles sont potentiellement inférieures à une LQ identifiée. Le mélange de concentrations mesurées selon différentes méthodologies d'analyse en laboratoire avec différentes LQs est donc une autre limite importante en termes de qualité et donc d'exploitabilité des jeux de données hydrochimiques. Difficiles à corriger, les champs concernés doivent généralement être exclus lors des analyses statistiques.

- Valeurs non numériques et valeurs manquantes

On trouve parfois des valeurs non numériques (texte) dans un champ censé ne contenir que des valeurs numériques de concentration. Parmi ces textes : « ND » (non détecté ou non déterminé), « ABS » (absence), « présence », « en cours » / « en attente » (...des résultats du laboratoire). Si ces textes apportent bel et bien une information sur l'espèce chimique concernée, elle demeure inutilisable lors des analyses statistiques multivariées puisque non quantitatives. Elles peuvent néanmoins être considérées lors de la préparation des variables codées résumant la qualité des eaux de manière qualitative (cf. § 3).

Les valeurs manquantes (ou en d'autres termes les « trous ») sont fréquentes dans les tables de données hydrochimiques. Le taux de renseignement des champs des JD1, JD3 et JD4 est très variable entre les champs. Dans le JD1, par exemple, le taux de renseignement est élevé pour les éléments majeurs (~90 % pour Na, Cl, K, Ca, Mg, ...) mais nettement plus faible pour certains éléments en trace (<10 % pour As) et pour diverses substances toxiques surveillées. Or, comme

les analyses multivariées requièrent un tableau de données complet (sans trou), les paramètres trop peu renseignés doivent préférablement être exclus. Autrement, s'ils sont conservés, un trop grand nombre de lignes de données devront être exclues lors de l'analyse.

- Informations contextuelles limitées

Enfin, un autre problème lié aux données est le manque d'informations complémentaires (autres qu'hydrochimiques) permettant de situer précisément le lieu de prélèvement (coordonnées géographiques) et de connaître la nature de l'environnement dans lequel l'échantillon d'eau a été prélevé (forage vertical crépiné dans un aquifère ? source ? rivière ?, lac ? station de traitement ?, ...) y compris en termes de caractéristiques géologiques et hydrogéologiques. Les données de localisation du JD1 se limitant à la mention de l'archipel, de l'île, de la commune et du lieu de prélèvement, il ne sera donc pas possible de relier les résultats des analyses multivariées aux caractéristiques géologiques locales, ces dernières n'étant pas décrites dans le JD1 (qui est le principal jeu de données en termes de nombre de prélèvements dans cette étude). Il a néanmoins été possible d'ajouter au JD1 un champ « ESU / ESO » permettant de distinguer les prélèvements associés à des eaux de surface (ESU) versus à des eaux souterraines (ESO). Ce champ, construit en examinant les noms des lieux de prélèvements, a ainsi permis d'exclure tous les prélèvements n'étant pas liés à de l'eau souterraine. Les JD3 et JD4 offrent davantage de données de localisation mais, malgré cela, n'offrent pas une information suffisamment précise et complète pour distinguer correctement les prélèvements d'ESO vs d'ESU : pour les besoins de la présente étude, il a donc été présumé que tous les prélèvements rapportés dans les JD3 et JD4 sont liés à des ESO. Mais, malgré toutes ces limites, les informations contextuelles pourront servir lors de l'interprétation des résultats.

En résumé, la qualité des données hydrochimiques est limitée par plusieurs problèmes, souvent combinés en un même champ. En effet, il a été constaté que plusieurs champs sont inexploitable car composés d'une majorité de valeurs incohérentes soit en raison d'un mélange d'unités de mesure, soit de la présence de plusieurs LQs. C'est ainsi que les éléments trace (Cu, Zn, Ba, ...) ont dû être exclus bien qu'ils eurent été de bons candidats (potentiellement meilleurs que les éléments majeurs) pour distinguer les eaux souterraines entre les différentes îles polynésiennes. En outre, la variable pH a également dû être exclue malgré son taux de renseignement très élevé, car un examen des valeurs de pH a mené à la conclusion que les valeurs rapportées sont en majorité peu représentatives des conditions in situ. Il ressort de ces constats qu'un examen attentif des jeux de données hydrochimiques compilés serait nécessaire afin d'améliorer, dans la mesure du possible, la fiabilité et l'exploitabilité de ces données.

Par ailleurs, les jeux de données hydrodynamiques s'avèrent eux aussi limités, principalement en termes de quantité de données disponibles. Les seules variables quantitativement exploitables sont les estimations de la transmissivité (T) et du coefficient d'emmagasinement (S) de l'aquifère issues de l'interprétation d'essais de pompage. Or, les trous (valeurs manquantes) sont fréquents au sein de ces champs avec, au total, seulement 126 valeurs de T et 17 valeurs de S pour 351 essais de pompage rapportés. De plus, ces valeurs ne renseignent que sur 7 des 12 îles abordées par l'hydrochimie, ce qui empêche de combiner vraiment les deux types d'informations.

5. Résultats de l'analyse des données

Ce chapitre présente et interprète les résultats des différentes analyses statistiques réalisées à partir des jeux de données hydrochimiques et hydrodynamiques disponibles pour les îles de la Polynésie française. Un diagramme de Piper résumant l'ensemble des données hydrochimiques est d'abord présenté. Puis, les résultats issus de l'analyse multivariée (par ACP) de l'hydrochimie sont présentés. Ceux liés à l'analyse des variables hydrochimiques codées en fonction des critères réglementaires et aux dépassements réglementaires sont présentés par la suite. Ces analyses sont toutes basées sur la table de données hydrochimiques agrégées préparée en suivant la méthodologie présentée au chapitre 3, caractérisant 248 lieux de prélèvement sur 39 communes, 12 îles et 5 archipels de la Polynésie française. Enfin, sont présentés les résultats de l'analyse plus simple des données hydrodynamiques.

5.1. HYDROCHIMIE : DIAGRAMME DE PIPER

A partir du jeu de données traité comme indiqué dans la méthodologie (chapitre 3), une représentation simple des concentrations en éléments majeurs dissous dans l'eau souterraine, sous la forme d'un diagramme de Piper, a été préparée. L'établissement de ce diagramme se basant sur le calcul de la proportion de chaque élément majeur dissous dans l'eau (Ca, Na, K, Mg, HCO₃, CO₃, Cl, SO₄, NO₃), il a été nécessaire, au préalable, de retirer du jeu de données les analyses présentant une « mauvaise » balance ionique supérieure à |10%|. Pour rappel, le calcul de la balance ionique se traduit par la formule suivante :

$$balance\ ionique = 100 \times \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions}$$

où les sommes d'anions et de cations en réaction sont exprimées en meq/L, la balance ionique étant un indicateur pratique de la qualité de l'analyse.

La projection des résultats des analyses en éléments majeurs dans un diagramme de Piper permet de déterminer le faciès hydrochimique des eaux souterraines (Illustration 3).

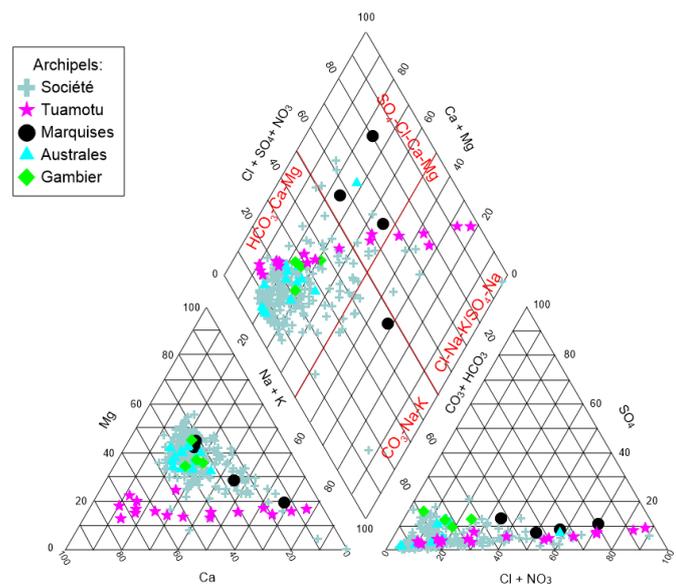


Illustration 3 : Diagramme de Piper résumant l'ensemble des analyses chimiques disponibles.

L'archipel des Marquises n'est représenté que par l'île de Ua Pou, celui des Tuamotu par l'île de Rangiroa et Gambier par l'île de Mangareva. Pour les autres archipels, on dispose d'analyses chimiques de points d'eau répartis sur plusieurs îles, 6 pour l'archipel de la Société et 3 pour les Australes.

Le diagramme met en évidence les particularités déjà relevées dans les études antérieures (Corbier *et al.*, 2019a et Corbier *et al.* 2019b), à savoir celles des îles de Rangiroa et Ua Pou.

À Ua Pou, les quatre points d'eau présentent un faciès chloruré-calcique à chloruré-sodique. Les eaux qui s'infiltrent au cœur de l'île et qui émergent à mi-pente au contact des formations basaltiques pourraient notamment s'enrichir en sodium au contact des phonolites sommitales. Toutefois, sur les 4 points d'eau pour lesquels on dispose d'analyses, deux points se trouvent proche d'un centre d'enfouissement technique et une influence anthropique sur la chimie des eaux est possible. Ces résultats doivent être considérés avec précaution.

Les eaux de Rangiroa montrent une forte variabilité de faciès qui est liée uniquement à un enrichissement progressif en Na et Cl donc à une influence d'eau marine. Les eaux les moins salées sont de type bicarbonaté-calcique et magnésien.

Les eaux des îles Australes et de l'archipel des Gambier ont un chimisme qui varie peu et typiquement de type bicarbonaté calcique et magnésien, comme la très grande majorité des points d'eau de l'archipel de la Société.

5.2. HYDROCHIMIE : ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)

Une première ACP a été réalisée sur les 11 variables hydrochimiques retenues agrégées par lieu de prélèvement (

Illustration 4). Le graphique de gauche montre la force des composantes principales (CP) produites par l'ACP : on y constate que la CP1 permet à elle seule d'expliquer près de la moitié de la variance totale du jeu de données analysé. Le graphique central illustre quant à lui la contribution des 11 variables hydrochimiques aux axes CP1 et CP2. On y observe en même temps les fortes corrélations (positives ou négatives) existant entre plusieurs variables, à titre d'exemples : corrélations positives fortes entre Na–Cl–conductivité et moyennes entre Ca–Mg–HCO₃–conductivité, et corrélation négative faible entre Ca et SiO₂ (pour une vue plus complète des corrélations entre les variables hydrochimiques, voir le corrélogramme fourni en annexe 1). Mais c'est surtout le nuage de points du graphique de droite qui nous intéresse ici.

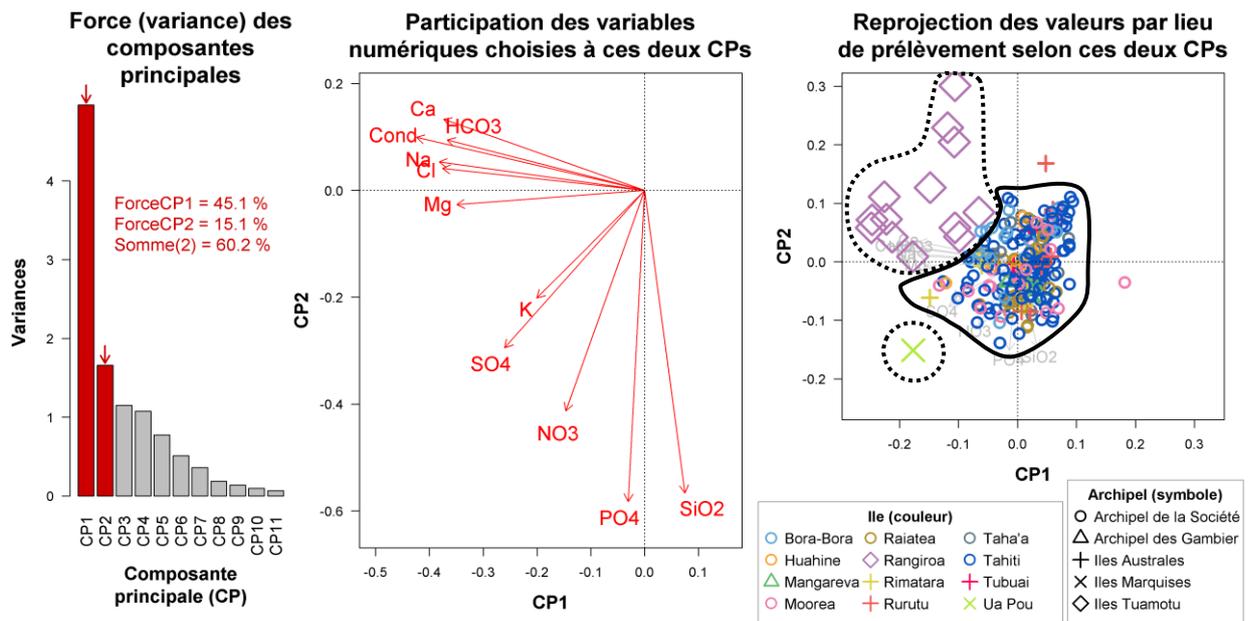


Illustration 4 : Analyse en composantes principales (ACP) des données hydrochimiques après leur agrégation par lieu de prélèvement (par sélection du prélèvement le moins minéralisé).

On remarque tout d'abord que la grande majorité des points (entourés d'un trait continu) se concentre autour de l'origine des axes (0, 0) ce qui suggère qu'une grande majorité des prélèvements ont une signature hydrochimique relativement similaire. On trouve toutefois une quinzaine de points à l'écart du groupe majoritaire avec des valeurs moins élevées dans la CP1 (points entourés de traits pointillés). Ces prélèvements à l'écart correspondent aux archipels des Iles Tuamotu (13 lieux sur Rangiroa) et des Iles Marquises (1 lieu sur Ua Pou). Ils reflètent des concentrations plus fortes que la moyenne en la plupart des espèces chimiques (à l'exception des faibles concentrations en PO_4 et en SiO_2 sur Rangiroa) ainsi que des conductivités et donc des salinités plus élevées. À noter que la conductivité croît, dans l'ensemble, de la droite vers la gauche du graphique. Ceci confirme la première analyse faite à l'aide du Piper.

Une seconde ACP a ensuite été réalisée sur les données hydrochimiques agrégées cette fois-ci par île. L'information s'en trouve ainsi réduite mais plus facile à lire et interpréter. L'illustration 5 présente les résultats de cette seconde ACP. On constate d'abord que la CP1 de cette seconde ACP permet d'expliquer près des 2/3 de la variance totale des données agrégées par île. On remarque à nouveau les îles Rangiroa et Ua Pou (des archipels des Iles Tuamotu et des Iles Marquises) qui s'écartent significativement des autres îles avec une CP1 plus négative. Cette nouvelle analyse multivariée par îles invite maintenant à regrouper les îles en 5 groupes principaux, délimités par des traits pleins dans le graphique de droite, dont certains pourraient être subdivisés en sous-groupes. On distingue ainsi : 1) un grand groupe de 6 îles hautes majoritairement dans le quadrant supérieur droit du graphique (groupe qui pourrait éventuellement être subdivisé en 3 sous-groupes dont un sous-groupe central de 4 îles appartenant à l'Archipel de la Société et incluant Tahiti), 2) un groupe de 2 îles hautes des Australes modérément similaires (Rurutu et Tubuai) dans le quadrant inférieur droit, 3) un autre groupe de 2 îles hautes partageant certaines similarités hydrochimiques et géologiques (Rimatara et Bora-Bora qui sont toutes deux des atolls surélevés) près du centre du graphique, 4) 1 île haute (Ua Pou, Iles Marquises) très à l'écart dans le coin supérieur gauche du graphique et, enfin, 5) 1 atoll très peu élevé par rapport au niveau de la mer (Rangiroa, Iles Tuamotu) tout en bas du graphique. Les eaux souterraines de ces deux dernières îles se démarquent d'abord par leurs plus fortes salinités, mais aussi par leurs signatures hydrogéochimiques propres

respectivement riches en bicarbonate et calcite (pour Rangiroa) et sulfate et silice (pour Ua Pou). Le tableau des valeurs médianes issues de l'agrégation des données hydrochimiques par île est fourni en annexe 1.

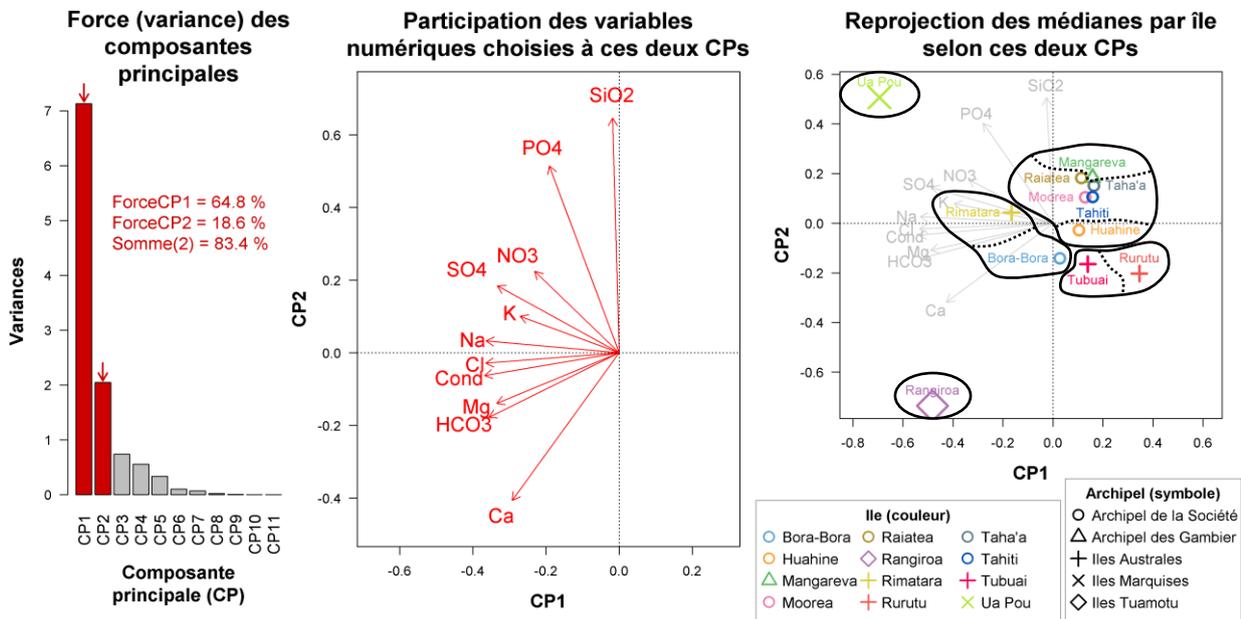


Illustration 5 : Analyse en composantes principales (ACP) des données hydrochimiques après leur agrégation par île.

5.3. HYDROCHIMIE : COMPILATION DES DÉPASSEMENTS RÉGLEMENTAIRES

Les informations hydrochimiques codées, préparées afin de renseigner sur l'absence de donnée, la « présence » quantifiable ou non de l'espèce chimique ou le « dépassement » éventuel du critère réglementaire associé, ont été analysées et compilées conformément à la méthodologie décrite au § 3. Ces informations sont résumées ici sous la forme d'un diagramme circulaire par île, regroupant 23 indicateurs sur la qualité des eaux souterraines en 5 familles d'origines probables de contamination de l'eau : géogénique (paramètres physico-chimiques, éléments majeurs et métaux liés au fond géochimique), intrusion marine (salinité, sulfates), pollution agricole (potassium, nitrate, pesticides), pollution industrielle (HPA/HAP) et pressions humaine/eaux usées (coliformes, nitrites, nitrates). Ces classes de pression et choix des paramètres indicateurs des pressions sont critiquables du fait d'une forte simplification et ubiquité de certains paramètres (le Cl est représentatif des pressions eaux usées, origine géogénique et intrusion marine par exemple) mais permet une première analyse des données disponibles. L'illustration 6 et l'illustration 7 présentent les résultats de ces analyses par îles regroupées par archipel. Chaque diagramme circulaire est partagé en cinq secteurs égaux correspondant aux 5 familles de contamination mentionnées plus haut, chaque famille ayant sa couleur propre. Chaque secteur est ensuite divisé en N parts égales en fonction du nombre N d'indicateurs appartenant à chaque famille. L'étiquette accompagnant l'indicateur suit la forme « nom ($n_d/n_p/n_{tot}$) » où n_d = le nombre de lieux avec au moins un dépassement (concentration dépassant le critère réglementaire), n_p = nombre de lieux avec au moins une présence quantifiable (concentration supérieure ou égale à la LQ) et n_{tot} = nombre total de lieux avec au moins une valeur rapportée pour le paramètre lié (que la concentration rapportée soit supérieure, égale ou inférieure à la LQ). S'il y a dépassement du critère réglementaire, la part de l'indicateur concerné est alors remplie d'une couleur plus foncée et le texte de son étiquette est coloré en rouge et mis en gras pour mettre le dépassement en évidence. S'il n'y a pas de dépassement, la part

représentant l'indicateur est remplie d'une couleur plus pâle, de façon complète ou hachurée selon que des valeurs sont disponibles ou non.

Ces analyses sont complémentaires aux ACP et viennent valoriser les données d'un plus grand nombre de variables des tables hydrochimiques, incluant cette fois-ci plusieurs paramètres liés à des contaminations anthropiques. Certaines variables exclues des ACP sont même considérées ici (notamment le pH et la température de l'eau ainsi que les concentrations en quelques éléments traces) puisque leur analyse peut apporter des informations d'intérêt sans que leur présence n'influence l'analyse des autres variables, ce qui n'est pas le cas lors d'analyses multivariées. Les diagrammes circulaires produits lors de cette analyse apportent un regard critique sur l'état chimique actuel des aquifères polynésiens. Il convient toutefois de noter qu'en raison de la qualité limitée des données utilisées dans la préparation des variables codées (voir chapitres 3 et 4), ces résultats ne doivent pas être considérés comme certains mais plutôt comme un portrait général des problèmes de dépassements vraisemblablement rencontrés sur les différentes îles.

Les diagrammes des illustrations 6 et 7 permettent tout d'abord de constater que l'archipel de la Société apparaît le mieux renseigné sur l'ensemble des indicateurs considérés. En effet, nombre d'indicateurs sont sans information (hachurés car $n_{\text{tot}} = 0$) dans les autres archipels. Malgré cela, on peut souligner le nombre plus important de dépassements (n_d) sur Tahiti, Moorea et Raiatea par rapport aux autres îles. Cette différence est toutefois beaucoup moins prononcée en termes de taux de dépassements (n_d / n_{tot}).

En termes de « fond hydrogéochimique », les dépassements d'origine géogénique apparaissent rares dans l'ensemble. On note toutefois quelques îles où le pH des eaux prélevées est parfois un peu trop acide (Moorea, Taha'a, Rurutu et Ua Pou), ou la concentration en potassium (K) ou en magnésium (Mg) trop élevée par rapport aux critères réglementaires (Tahiti, Moorea, Raiatea, Taha'a, Bora-Bora, Mangareva, Rangiroa et Ua Pou).

Du point de vue de la « salinité » (Na : sodium, Cl : chlore, K : potassium et SO_4 : sulfates), les dépassements sont plus ou moins fréquents selon l'île. Tous les archipels sauf les Iles Australes présentent au moins un lieu de prélèvement apparemment affecté par l'intrusion d'eau marine dans l'aquifère. Les dépassements les plus fréquents, en particulier en termes de chlorures (Cl), sont observés sur Ua Pou (Iles Marquises) et sur Rangiroa (Iles Tuamotu), l'unique atoll non surélevé parmi les îles présentes dans le jeu de données analysé.

La « pollution agricole » apparaît concerner surtout les îles de Tahiti, Moorea et Taha'a, lesquelles présentent des dépassements en molécules liées à différents pesticides. Malgré cela, aucun dépassement en nitrate (NO_3) n'est observé sur ces îles. De plus, il convient de souligner que le nombre de mesures rapportées (n_{tot}) en lien avec ces indicateurs de pollution agricole étant très limité voire nul pour plusieurs îles, la prévalence de la contamination agricole ne peut être commentée équitablement pour toutes les îles.

Concernant la « pollution industrielle », limitée ici à la surveillance des concentrations en hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA), un nombre important de dépassements en HPA est observé sur Tahiti, avec 8 lieux de prélèvement contaminés. De rares dépassements en HPA sont également observés sur Moorea et Raiatea. Ce type d'information n'étant pas disponible pour les Iles Tuamotu et les Iles Marquises, il n'est cependant pas possible de déterminer (à partir des seules données hydrochimiques disponibles) si les lieux de prélèvement des îles Rangiroa et Ua Pou sont tous exempts ou non d'une telle contamination industrielle.

Enfin, dans la famille « origine humaine/eaux usées », on remarque la présence très fréquente de coliformes dans les eaux souterraines prélevées, avec environ 50 % des lieux de prélèvement concernés par cette problématique, toutes îles confondues (sauf Ua Pou et Rangiroa pour

lesquelles l'information est indisponible). Or, les coliformes dans l'eau souterraine présentent un risque microbiologique potentiel pour la santé qui mérite une attention particulière. Les autres indicateurs de la famille, nitrite (NO_2) et ammonium (NH_4) montrent quant à eux des dépassements peu fréquents limités à quelques îles seulement (Tahiti, Moorea et Rangiroa). A noter que lors du calcul de l'indicateur relatif aux coliformes et donc également pour sa représentation graphique, il a été considéré qu'il y a dépassement réglementaire dès lors qu'il y a présence d'un coliforme dans l'échantillon d'eau (c'est pourquoi $n_d = n_p$ en tous lieux pour cet indicateur dans les illustrations 6 et 7).

En résumé, du point de vue des dépassements réglementaires, les îles polynésiennes montrent une diversité de scénarios, les aquifères apparaissant plus fréquemment contaminés sur certaines îles, tout particulièrement sur Tahiti, l'île la plus peuplée. De plus, quelques sites semblent affectés par un phénomène d'intrusion marine, mais les lieux où ce phénomène a mené à des dépassements réglementaires (en Na, K, Cl ou SO_4) demeurent peu nombreux à ce jour parmi les lieux de prélèvement suffisamment renseignés dans les jeux de données à disposition. L'intrusion marine peut être naturelle ou accentuée par les pompages.

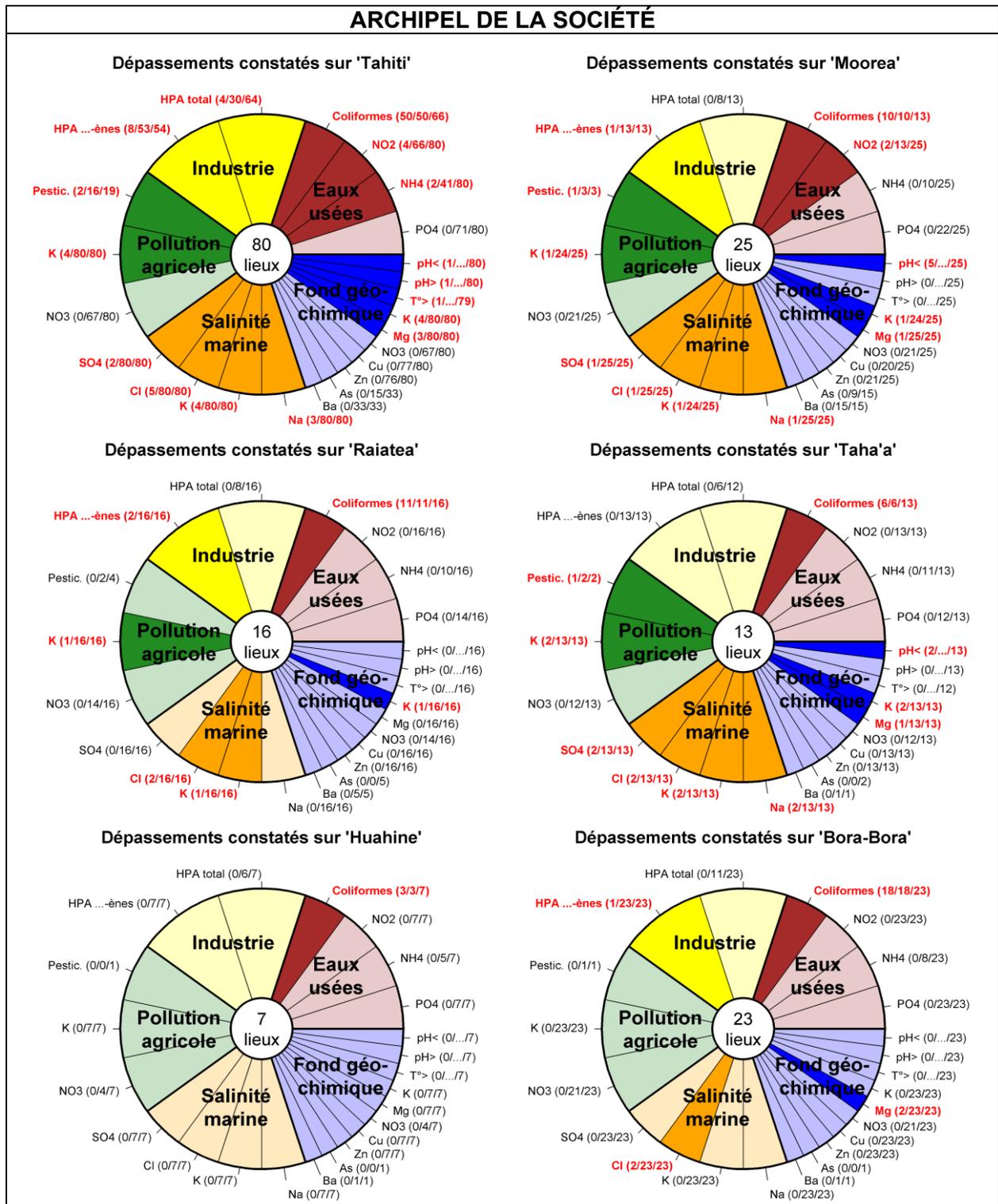


Illustration 6 : Portait par île des dépassements réglementaires relatifs à la qualité de l'eau souterraine dans les aquifères de la Polynésie française : a) îles de l'Archipel de la Société.

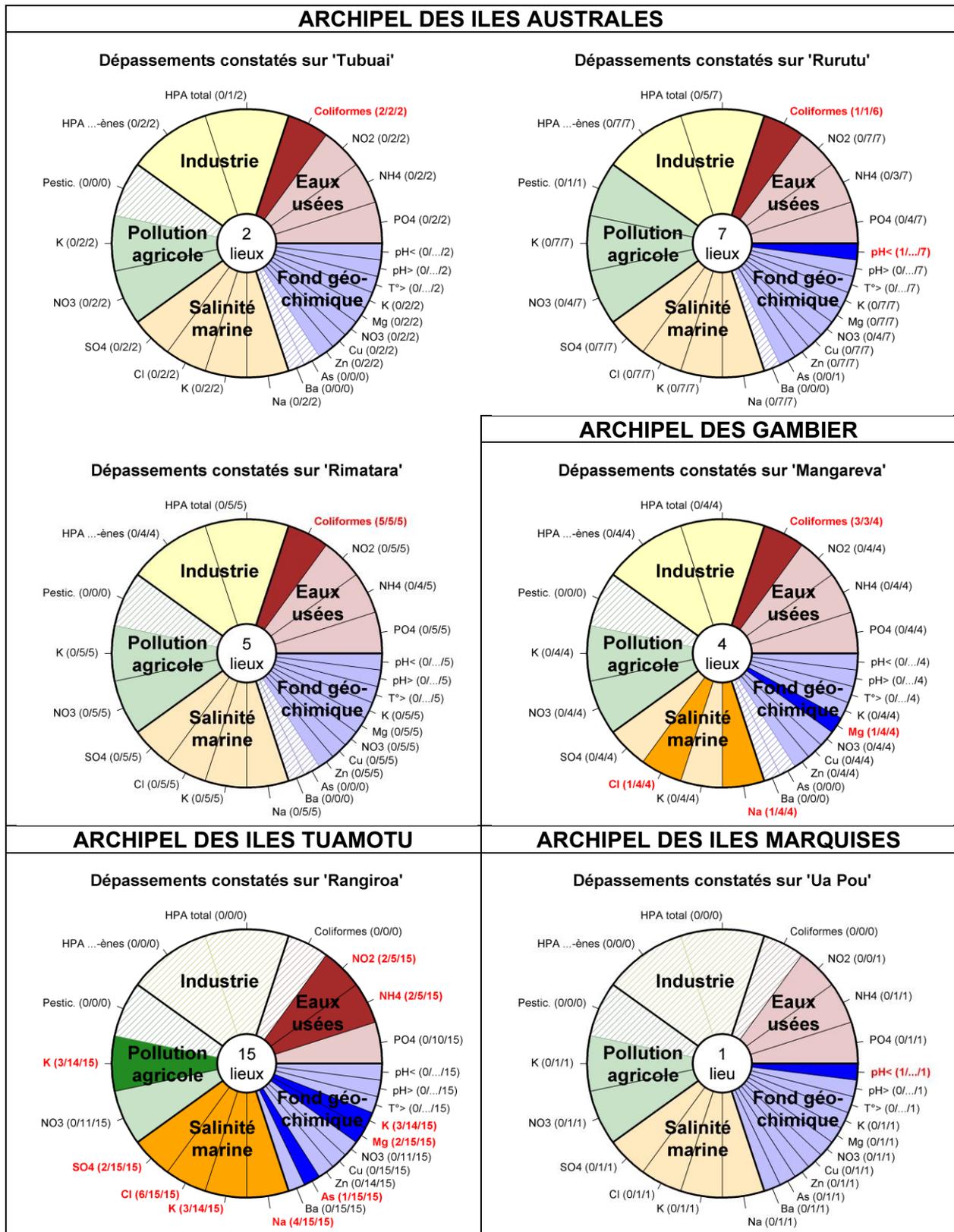


Illustration 7 : Portait par île des dépassements réglementaires relatifs à la qualité de l'eau souterraine dans les aquifères de la Polynésie française : b) autres archipels.

5.4. PROPRIÉTÉS HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFÈRES : UN APERÇU

Une analyse statistique simple des données relatives aux propriétés hydrodynamiques des aquifères a été réalisée en complément des informations hydrochimiques. Deux paramètres hydrauliques ont pu être analysés : la transmissivité (T) et le coefficient d'emmagasinement (S). Les diagrammes à boîtes à moustaches (*boxplots*) de l'illustration 8 présentent les résultats de l'analyse de T puis de S par île. À noter que seules 7 des 12 îles de la section sur l'hydrochimie figurent ici puisque aucune donnée de T ou S n'est disponible pour les 5 autres îles. Suivant la convention, les boîtes à moustaches illustrent l'intervalle interquartile, le trait épais indique la médiane, les moustaches l'étendue des données non extrêmes et les points les valeurs extrêmes. L'analyse statistique a été réalisée sur les données log-transformées (soit sur $\log_{10} T$ et $\log_{10} S$).

Ces résultats montrent que la transmissivité varie fortement entre îles et à l'intérieur d'une même île. Certaines îles apparaissent, ainsi, offrir des perméabilités plus élevées que d'autres, avec Tahiti au premier rang, suivie par deux autres îles du même archipel (Raiatea et Taha'a) puis par les autres îles et enfin par Ua Pou, apparemment la moins perméable. Du côté du coefficient d'emmagasinement, on distingue clairement des valeurs typiques d'aquifères libres (0,01–0,50) versus captifs ($<10^{-3}$). Parmi les essais de pompage rapportés dans les jeux de données analysés, seuls les 2 essais réalisés à Moorea et 2 des 4 essais réalisés à Huahine indiquent des aquifères captifs. Autrement, les valeurs de S plus élevées des aquifères libres montrent une dispersion typique correspondant à des porosités allant de 1 à 30 %.

Cette analyse exploratoire de T et S, bien qu'intéressante, demeure toutefois d'un usage limité en raison du nombre de données disponibles très faible ainsi que du manque d'informations complémentaires sur la nature locale de l'aquifère pompé (profondeur du puits et de la crépine, géologie rencontrée, etc.), d'où une catégorisation des données limitée à un regroupement par île et par archipel.

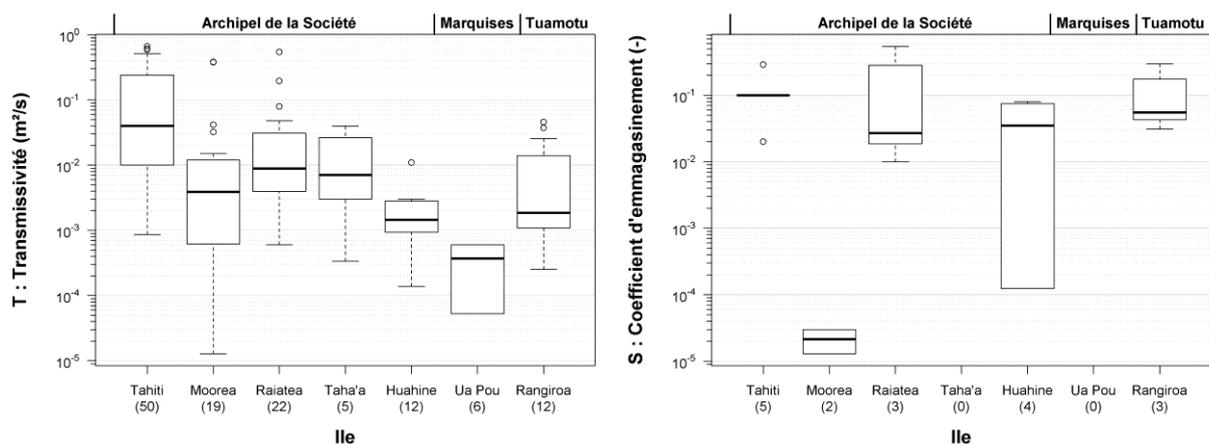


Illustration 8 : Aperçu de la distribution statistique de la transmissivité (T) et du coefficient d'emmagasinement (S) par île en excluant les îles où aucune donnée n'est disponible.

6. Conclusion

Après la définition des principaux éléments de contexte (climatique, géologique et hydrogéologique) et dans l'objectif de rechercher d'éventuels types d'aquifères au sein des îles de Polynésie française, un traitement statistique par analyses multivariées en composantes principales (ACP) a été réalisé sur une fusion de plusieurs jeux de données hydrochimiques et hydrodynamiques en provenance du Centre d'Hygiène et de Salubrité Publique et d'études récentes du BRGM (Vaitea et Tahiti 2011-2012).

En préalable à la synthèse des résultats, il convient de signaler que le traitement analytique s'est heurté à plusieurs obstacles qui ont nécessité d'écarter un certain nombre de données afin de pouvoir réaliser un traitement statistique correct. Il s'agit notamment :

- d'incohérences dans les unités de mesure ;
- de l'existence concomitante de limites de quantification différentes pour un même paramètre ;
- de valeurs manquantes. Moins fréquentes pour les éléments majeurs, les valeurs manquantes prédominent pour les éléments traces (l'arsenic par exemple). Or, les éléments traces auraient pu permettre de mieux discriminer les différents aquifères.

Par ailleurs, l'exploitation des données a été limitée par la pauvreté ou l'absence d'informations concernant : la localisation précise du point de prélèvement, son altitude, le mode de prélèvement de la ressource (pompage et profondeur concernée, captage gravitaire de source, ...), le contexte géologique, le contexte hydrogéologique (nappe libre, nappe captive, ...). De plus, le petit nombre de données hydrodynamiques au regard des données hydrochimiques ainsi que des lacunes pour certaines variables, n'ont pas réellement permis de combiner ces deux types de données.

Les analyses en composantes principales (ACP) révèlent malgré tout que la grande majorité des eaux souterraines étudiées ont une signature hydrochimique relativement similaire. Seuls les points situés à Ua Pou (Marquises) et Rangiroa (Tuamotu) se distinguent nettement par leurs concentrations plus fortes en la plupart des espèces chimiques, et par leur faciès hydrochimique.

En effet, alors que la plupart des archipels présentent des eaux de type bicarbonaté calcique et magnésien, à Ua Pou les eaux sont surtout chlorurées sodiques et calciques tandis qu'à Rangiroa les eaux varient d'un pôle chloruré sodique à un pôle bicarbonaté calcique.

Ces observations peuvent s'expliquer, en première approche, par une différence d'environnement géologique. En effet, en l'absence de pollution, la quantité et la diversité des éléments en solution dans une eau souterraine dépend des différentes formations géologiques qui ont été traversées par les précipitations météoriques.

À Rangiroa, île basse-atoll, le seul aquifère présent est celui de la lentille d'eau douce qui s'étend des sédiments holocènes au sommet des calcaires pléistocènes. Les interactions eau-roche avec les carbonates et l'influence plus ou moins marquée de l'intrusion saline donnent aux eaux souterraines de l'atoll cette signature particulière que l'on ne retrouve pas dans autres les îles.

À Ua Pou, il a été mis en évidence dans un précédent rapport (Corbier et al., 2019b), l'influence possible des phonolites, laves riches en silice et en sodium, dans l'acquisition du faciès hydrochimique singulier des eaux de cette île. Le faible nombre d'échantillons à disposition pour la présente étude (1 à 4 selon les critères de sélection) ainsi que l'existence d'un centre d'enfouissement technique à proximité de deux sites, impose une certaine prudence vis-à-vis de cette interprétation.

Pour les autres îles, l'analyse statistique n'a pas pu faire de réel distinguo entre archipels, ni même au sein des îles hautes où était potentiellement attendue une certaine variabilité hydrochimique entre les nappes perchées et les nappes de l'aquifère basal. Pour ce dernier point, la raison principale est que l'essentiel des prélèvements se fait au sein de l'aquifère basal en raison d'une meilleure productivité et d'une proximité avec les principaux lieux de consommation. Les résultats des analyses sont par conséquent biaisés par la surreprésentation de l'aquifère basal. De plus, l'absence de données contextuelles précises sur la plupart des points de prélèvements n'a pas permis de rattacher telle ou telle autre signature hydrochimique à un contexte géologique ou hydrogéologique donné.

Les données hydrochimiques ont aussi été examinées au regard des dépassements des seuils réglementaires polynésiens de qualité de l'eau. L'enseignement principal est que tous les archipels, hormis les Australes, présentent au moins un site affecté par un phénomène d'intrusion saline qui se traduit par un dépassement pour les chlorures, le sodium, le potassium et les sulfates. Des coliformes sont dénombrés dans environ 50 % des lieux de prélèvements, révélant des contaminations par les eaux usées ou une mauvaise protection des forages/puits. Les îles de Tahiti et Moorea rencontrent également des dépassements témoignant de pollutions liées aux activités agricoles (dépassement sur les pesticides) et aux activités industrielles (dépassement pour les hydrocarbures polycycliques aromatiques). Des dépassements sont également observés sur Taha'a (agriculture) et sur Raiatea (industrie).

Le traitement statistique des données relatives aux propriétés hydrodynamiques des aquifères, quant à lui, n'a pas permis d'apporter des résultats probants en raison du faible nombre de données disponibles et du peu d'information sur les aquifères sollicités.

Il ressort des résultats résumés ci-dessus que la qualité des données est primordiale pour mener à bien un traitement et une analyse statistique corrects en vue d'établir une typologie. Il est en outre capital de pouvoir disposer d'un minimum d'informations contextuelles sur les lieux de prélèvement. Il est donc recommandé de consolider les bases de données existantes (qualité physico-chimique, paramètres hydrodynamiques, ...) :

- en revérifiant la cohérence entre les valeurs rapportées (incluant les unités et les limites de quantification associées) et les valeurs compilées dans les documents sources ;
- en corrigeant autant que possible les incohérences détectées ;
- en indiquant les données non corrigeables qui demeurent peu fiables et, enfin ;
- en veillant à ce que tous les points d'observation soient suffisamment bien décrits, de façon systématique et sans lacunes, par des informations contextuelles directes ou sinon au moins par des renvois vers les études associées.

Cet effort de consolidation et d'harmonisation des jeux de données existants devrait permettre, à terme, d'améliorer significativement la fiabilité et donc l'exploitabilité de ces données.

7. Bibliographie

Adam C (2012) - Hotspot concept: the French Polynesia complexity, updates in volcanology. A comprehensive approach to volcanological problems, Prof. Francesco Stoppa (Ed.) pp 125-152, ISBN : 978-953-307-434-4.

Castany G., Margat J. (1997) - Dictionnaire français d'hydrogéologie. Edition du BRGM, 249 p.

Corbier P. et Pasquier S. (2018) – Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française. Inventaire des données existantes sur les îles de Moorea, Maiao, Huahine, Raiatea, Taha'a, Ua Pou, Makatea et Rangiroa. Rapport final. BRGM/RP-67128-FR, 137 p., 95 ill., 4 ann.

Corbier P., Pasquier S., Baltassat J.-M., Hakoun V., Maréchal J.-C et Malcuit E. (2019a) - Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française : bilan des investigations menées à Rangiroa. Rapport final. BRGM/RP-68897-FR, 139 p., 142 ill., 4 ann.

Corbier P., Pasquier S., Bourdon E., Brugeron A., Dewandel B., François B., Gourcy L. et Malcuit E. (2019b) – Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française : bilan des investigations menées à Ua Pou. Rapport final. BRGM/RP-69286-FR, 108p., 98 ill., 5 ann.

Corbier P., Pasquier S., Bernard J., Baltassat J.-M., Mardel V., Dewandel B., Gourcy L. et Malcuit E. (2019c) - Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française : bilan des investigations menées à Moorea. Rapport final. BRGM/RP-69218-FR, 110 p., 98 ill., 5 ann.

Hildenbrand A. (2002) - Etude géologique de l'île volcanique de Tahiti-Nui (Polynésie française) : évolution morphostructurale, géochimique et hydrologique. Thèse Université de Paris-Sud, centre d'Orsay, 302 p.

Lachassagne P., Maréchal J. C. (2004) - Synthèse des concepts et méthodes de l'hydrogéologie des milieux volcaniques appliqués à la prospection géothermique. Rapport final. BRGM/RP-53135-FR, 76 p., 14 fig., 2 tabl., 2 ann.

ORSTOM (1993) - Atlas de la Polynésie française. 379 p.

Foucault A., Raoult J. F., Cecca F., Platevoet B. (2014) - Dictionnaire de géologie, 8^e édition. DUNOD 396 p.

Maury R. C., Le Dez, A, Guillou H. (2000) - Carte géologique de Moorea à 1/25000. Editions du BRGM

Werner A.D., Sharp H.K., Galvis S. C., Post V.E.A., Sinclair P. (2017) - Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands. Review of current knowledge and research needs. Journal of hydrogeology, <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydro.2017.02.047>

Sites Internet :

Données climatiques : <http://www.meteofrance.com/accueil>

Patrick Demougeot : origine géologique des Tuamotu :

http://www.saga-geol.asso.fr/Volcanisme_frameset.html

Stéphane Labrosse (2010) : des îles hautes aux atolls.

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/ile-haute-atoll.xml#subsidence-coraux>

Annexe 1 : graphiques et tableaux additionnels

L'illustration A1.1 ci-dessous schématise les corrélations existant entre l'ensemble des 11 variables numériques retenues pour l'ACP. Les données utilisées sont les valeurs issues de l'agrégation des valeurs log-transformées disponibles par lieu de prélèvement. Le corrélogramme ainsi obtenu permet d'apprécier la bonne cohérence des variables retenues en termes de relations hydrochimiques. A titre d'exemples, on y voit d'abord la forte corrélation positive entre les variables liées à la salinité (le plus fréquemment marine) de l'eau : conductivité, Na et Cl, mais aussi le lien fort entre d'autres d'espèces, notamment entre Ca, Mg et HCO_3 .

**Corrélogramme des variables numériques utilisées dans l'ACP
calculé à partir des valeurs par lieu de prélèvement**

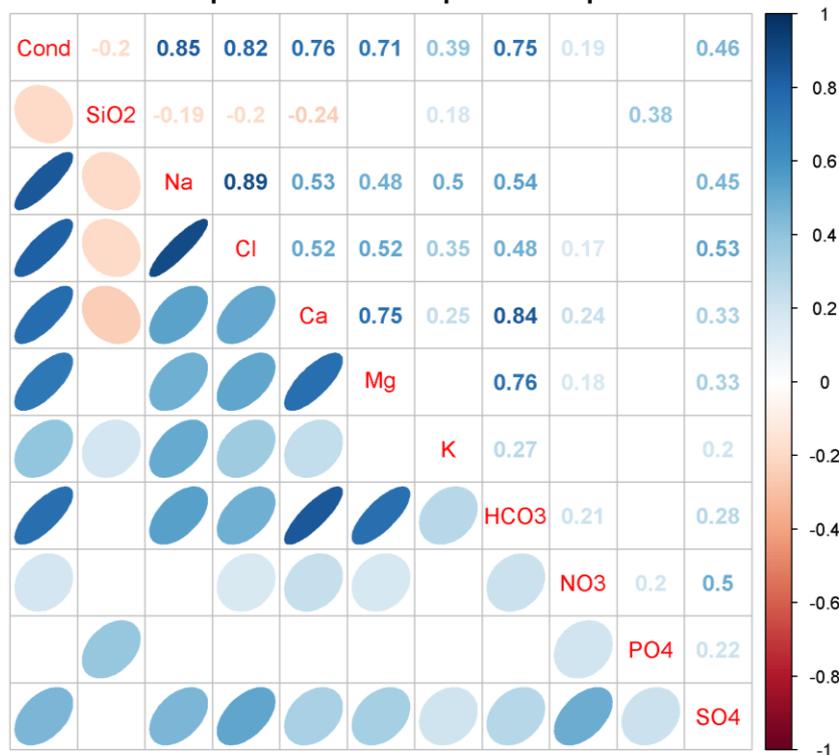


Illustration A1.1 : Corrélogramme des variables numériques utilisées dans l'ACP calculé à partir des valeurs issues de l'agrégation des valeurs disponibles par lieu de prélèvement.

Le tableau A1.1 ci-dessous présente les valeurs médianes résultant de l'agrégation par île des 11 variables hydrochimiques retenues. Ces valeurs ont été utilisées, une fois log-transformées puis standardisées (centrées et réduites), pour réaliser la seconde ACP « par îles ».

Île	Nombre de lieux	Conductivité (µS/cm)	[Na] (mg/L)	[Cl] (mg/L)	[Ca] (mg/L)	[Mg] (mg/L)
Bora-Bora	22	276.20	15.00	17.15	14.03	11.00
Huahine	10	206.00	10.49	9.90	13.20	11.40
Mangareva	4	141.43	8.22	8.96	9.25	6.81
Moorea	22	189.00	7.45	6.80	10.80	7.60
Raiatea	23	161.00	9.20	8.70	12.30	6.15
Rangiroa	13	817.00	49.40	73.80	86.70	18.60
Rimatara	5	324.00	13.00	17.40	26.00	12.00
Rurutu	7	137.00	6.00	2.40	11.00	6.30
Taha'a	16	157.74	8.17	7.00	10.94	5.20
Tahiti	123	165.00	8.50	5.30	12.00	7.53
Tubuai	2	201.05	7.01	6.47	13.58	9.59
Ua Pou	1	1277.00	139.30	110.90	22.90	21.50
Bora-Bora	1.40	112.00	0.99	0.075	4.00	20.00
Huahine	1.26	106.00	0.35	0.228	3.16	21.98
Mangareva	0.93	69.38	4.00	0.229	10.00	16.54
Moorea	1.86	84.46	1.10	0.095	6.29	32.19
Raiatea	1.81	78.00	2.00	0.200	5.00	25.00
Rangiroa	2.20	318.00	2.50	0.070	17.30	3.10
Rimatara	2.16	144.00	4.00	0.160	9.00	29.60
Rurutu	1.50	79.00	0.50	0.050	1.00	16.00
Taha'a	1.80	75.32	2.15	0.115	5.00	26.35
Tahiti	1.70	87.85	1.20	0.150	2.60	30.00
Tubuai	1.18	107.77	4.14	0.042	2.83	18.49
Ua Pou	3.00	306.00	10.20	0.850	59.00	89.60

Tableau A1.1 : Médianes des valeurs disponibles par variable hydrochimique et par île.

De plus, les données hydrochimiques agrégées par lieu de prélèvement ou par île sont disponibles sous la forme de tableaux dans des fichiers joints en tant qu'annexes électroniques accompagnant le fichier PDF du présent rapport, y compris la compilation des dépassements réglementaires par île. Les statistiques de base sur les propriétés hydrodynamiques (T et S) par île sont également mises à disposition, dans un autre fichier.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

BRGM Polynésie

Immeuble Le Bihan à Pirae (local L1)
BP 141 227

98701 – Arue – Polynésie française

Tél. : 87 33 56 50