

Document public

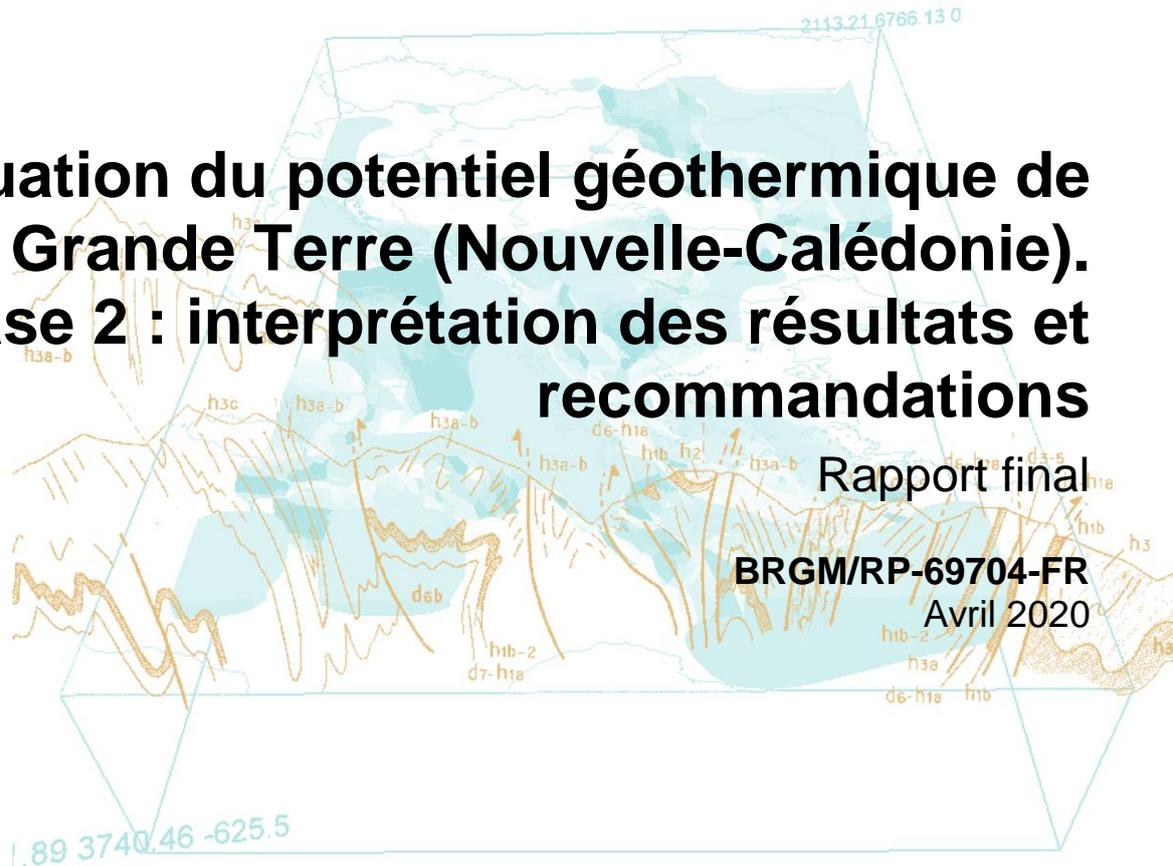


Evaluation du potentiel géothermique de la Grande Terre (Nouvelle-Calédonie). Phase 2 : interprétation des résultats et recommandations

Rapport final

BRGM/RP-69704-FR

Avril 2020



Evaluation du potentiel géothermique de la Grande Terre (Nouvelle-Calédonie). Phase 2 : interprétation des résultats et recommandations

Rapport final

BRGM/RP-69704-FR

Avril 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations d'appui aux
politiques publiques du BRGM 2018-2020

B. Sanjuan, M. Darnet, Th. Jacob - BRGM

J. Jeanpert, S. Lesimple - DIMENC/SGNC

Vérificateur :

Nom : Ph. Rocher

Fonction : Directeur adjoint DGR

Date : 20/05/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : V. Mardhel

Fonction : Directeur régional

Date : 10/06/2020

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

Mots-clés : sources thermales, potentiel géothermique, analyses géochimiques, péridotites, serpentinisation, Nouvelle-Calédonie, Canala

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

Sanjuan B., Jeanpert J., Lesimple S., Darnet M., Jacob Th. (2020) – Evaluation du potentiel géothermique de la Grande Terre (Nouvelle-Calédonie). Phase 2 : interprétation des résultats et recommandations. Rapport final BRGM/RP-69704-FR, 56 p., 31 fig., 2 tabl., 1 ann.

Synthèse

L'Agence Calédonienne de l'Energie (ACE) d'une part, la Nouvelle-Calédonie, assistée du Directeur de l'Industrie des Mines et de l'Energie de la Nouvelle-Calédonie (DIMENC), notamment son Service Géologique de Nouvelle-Calédonie (SGNC), ainsi que le BRGM d'autre part, ont établi une convention de recherche et de développement partagés sur « l'Évaluation du potentiel en géothermie de la Grande Terre », qui a démarré le 29 octobre 2018 et a une durée de 18 mois.

L'inventaire des sources thermales de la Nouvelle-Calédonie a été établi lors de la première phase de ce projet par le SGNC, en collaboration avec le BRGM (Jeanpert *et al.*, 2019). La campagne d'échantillonnage des principales eaux thermales de la Grande Terre a été menée par ces deux entités, en septembre 2019, au cours de la seconde phase du projet. Les résultats des analyses physico-chimiques faites sur site, ainsi que ceux des analyses chimiques et isotopiques réalisées ensuite dans les laboratoires du BRGM et de l'Université de Montpellier sur chacun des échantillons prélevés, ont été reportés dans le rapport de mission, premier livrable de la phase 2 (Jeanpert *et al.*, 2020). Cette campagne a confirmé que les températures maximales à l'émergence des sources thermales sont de 42,5°C, pour La Crouen, dans la région de Canala, et de 40°C, pour Bain des Japonais, dans la région de la Baie de Prony. Elle a également permis d'échantillonner, pour la première fois, par le SGNC et le BRGM, des sources thermales telles que Nemwegi, Fanama et Kopélia, dans la région de Canala, et Pourina, Poco Mié, Lembi sur la côte est Oubliée. Des analyses de certains éléments traces (Rb, Cs, W, Ge, etc.) et de certains isotopes (^{18}O et ^{34}S des sulfates dissous, ^{34}S des sulfures dissous, rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ont été réalisées pour la première fois sur ces eaux.

Ce rapport final présente l'interprétation des données obtenues au cours de cette étude et leur mise en regard avec les potentialités géothermiques et les besoins économiques de la Nouvelle-Calédonie.

Les résultats des analyses chimiques et isotopiques réalisées ont permis de mieux caractériser les deux types d'eaux thermales très différents :

- les eaux bicarbonatées sodiques de la région de Thio-Canala, les plus riches en silice, en Li, en B et en autres éléments traces (F, Cs, Ge, W, As), avec des valeurs de pH comprises entre 7,8 et 9,4, qui dégagent du sulfure d'hydrogène, de l'azote et un peu d'hélium d'origine crustale. A l'émergence des sources, on observe souvent des dépôts de gel et de filaments associés, de couleur blanchâtre et/ou verdâtre, très probablement constitués de soufre, de gypse et d'argiles (interstratifiés smectites/illite) ;
- les eaux Ca (Na) - OH (Cl) hyperalcalines du Massif du Sud, dépourvues de bicarbonates, carbonates, sulfates, magnésium et silice, qui émergent des péridotites, en dégageant de l'hydrogène (altération de fayalite et de forstérite, au cours de la serpentinisation des péridotites) et du méthane.

Les rapports isotopiques de Sr confirment que le deuxième type d'eaux thermales interagit bien avec des péridotites dans leurs réservoirs profonds, tandis que le premier type est plutôt en contact avec des roches volcano-clastiques métamorphisées (schistes, grès, siltites, etc.) associées au socle mésozoïque. Les valeurs des isotopes stables de l'eau montrent que toutes les eaux thermales sont d'origine météorique, avec des aires de recharge différentes pour la plupart d'entre elles.

Les géothermomètres chimiques classiques et certains auxiliaires, ainsi que le géothermomètre isotopique $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}-\text{SO}_4}$, permettent d'estimer la température des réservoirs géothermiques profonds d'où sont issues ces eaux.

On constate que la température profonde la plus élevée ($85 \pm 20^\circ\text{C}$) a été estimée pour les sources de La Crouen, Nemwegi et Gelima. Pour l'eau de Fanama et de Mokoué, ces températures sont inférieures ($70 \pm 15^\circ\text{C}$ et $55 \pm 15^\circ\text{C}$, respectivement). On conclut, par ailleurs, que les températures profondes des eaux thermales du Massif du Sud sont autour de 50°C , même si leur température est plus difficile à estimer, en raison des faibles salinités de leurs eaux ainsi que de leur composition chimique, et que l'on exclut des processus importants de mélange avec des eaux plus superficielles, qui viendraient modifier de façon significative leur composition chimique. Une estimation de température de $65 \pm 15^\circ\text{C}$ a été faite pour l'eau profonde de la source thermale Pévou, localisée sur la côte ouest et prélevée en mars 2019 par le SGNC, qui serait la seule source de cette zone à indiquer une température aussi élevée.

L'étude confirme la plupart des résultats antérieurs et l'absence d'indices de ressources géothermales de haute température. Etant donné la gamme restreinte de températures (de 24 à $42,5^\circ\text{C}$ sans trop de travaux onéreux, et de 50 à 85°C avec des forages profonds de $1-3$ km, très coûteux), les applications de la géothermie deviennent moins nombreuses, même si la balnéothérapie/le thermalisme qui avaient, d'ailleurs, déjà existé à La Crouen, semblent être de bons candidats. Une piste qui pourrait être explorée pour rendre les projets plus attractifs et rentables est l'utilisation multiple de la géothermie et la combinaison de production d'électricité moyennant un module ORC (Organic Ranking Cycle) avec l'exploitation d'une station thermale. Dans la région de Canala, cela pourrait constituer une première expérience, après, bien sûr, la réalisation d'études de surface complémentaires et d'une étude de préfaisabilité.

Un cahier des charges proposant un programme scientifique, constitué principalement d'exploration géologique et géophysique, pour poursuivre le développement de projets de géothermie en Nouvelle-Calédonie, si l'intérêt demeure, a été élaboré en fin de rapport. D'autres projets tels que celui de stockage souterrain de CO_2 et/ou le programme ICDP-IODP dans lequel le SGNC est impliqué, et pour lequel la réalisation de forages profonds est proposée, pourraient également bénéficier à la connaissance géologique du sous-sol et au développement de la géothermie de l'île, à frais réduits.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Rappel sur les sources thermales étudiées	11
3. Interprétation des résultats de géochimie des eaux.....	13
3.1. CLASSIFICATION ET NATURE DES EAUX THERMALES	13
3.1.1. Les eaux thermales de la région de Thio-Canala	15
3.1.2. Les eaux thermales du Massif du Sud	18
3.2. ORIGINE DES EAUX.....	20
3.3. GEOTHERMOMETRIE	26
3.3.1. Premiers indices concernant la température des eaux thermales	26
3.3.2. Diagramme triangulaire Na-K-Mg.....	27
3.3.3. Géothermomètres chimiques et isotopiques	28
4. Modèles conceptuels de réservoirs géothermiques.....	31
4.1. MODELE CONCEPTUEL GLOBAL DE BASE PROPOSE PAR DEVILLE ET PRINZHOFER (2016).....	31
4.2. MODELE CONCEPTUEL PROPOSE POUR LES EAUX THERMALES LES PLUS CHAUDES DE LA REGION DE THIO-CANALA.....	33
4.3. MODELE CONCEPTUEL PROPOSE POUR LES EAUX THERMALES DE LA BAIE DE PRONY.....	35
5. Potentialités géothermiques de la Grande Terre.....	37
5.1. USAGES POSSIBLES DE LA GEOTHERMIE	37
5.2. PROPOSITION DE POURSUITE DU PROJET ACTUEL.....	42
5.2.1. Acquisitions gravimétriques	43
5.2.2. Acquisitions électromagnétiques.....	44
5.2.3. Intégration géophysique - modélisation géologique 3D.....	44
5.2.4. Synthèse.....	44
5.3. OPPORTUNITES D'AMELIORATION DES CONNAISSANCES DU SOUS-SOL	45
6. Conclusion.....	47
7. Bibliographie	49

Liste des figures

Figure 1 - Localisation des sources échantillonnées au cours de la mission de reconnaissance sur fond de carte géologique au 1/1 000 000 et limites communales.	11
Figure 2 - Carte géologique à 1/50 000 de localisation des sources échantillonnées au cours de la mission de reconnaissance dans le secteur Thio-Canala, sur la côte est.	12
Figure 3 - Carte géologique au 1/1 000 000 de localisation des sources échantillonnées au cours de la mission de reconnaissance dans le Massif du Sud.	12
Figure 4 - Diagramme de Stabler appliqué aux eaux thermales de cette étude.	13
Figure 5 - Diagramme de Piper appliqué aux eaux thermales de cette étude.	14
Figure 6 - Diagramme triangulaire Cl-HCO ₃ -SO ₄ (Giggenbach, 1988) appliqué aux eaux thermales de cette étude.	14
Figure 7 - Diagrammes binaires Na-HCO ₃ , Na-Ca, Na-SO ₄ et Na-F appliqués aux eaux thermales de cette étude.	15
Figure 8 - Diagramme binaire ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr vs 1/Sr appliqué aux eaux thermales de cette étude. ...	17
Figure 9 - Diagramme de l'évolution du rapport isotopique ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr de l'eau de mer et des sédiments marins à travers les périodes géologiques (Burke <i>et al.</i> , 1982).....	17
Figure 10 - Diagramme qui représente les valeurs de δ ¹⁸ O et δD de serpentines fibreuses et trémolites des sites de Poro, Kopéto, Tiébaghi et Thio en Nouvelle-Calédonie, et les différents domaines de température de serpentinisation (Cluzel <i>et al.</i> , 2019). ...	18
Figure 11 - Diagramme ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr versus ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd pour différents types de roches ultrabasiques de la Nouvelle-Calédonie (tiré de Secchiari <i>et al.</i> , 2020).....	19
Figure 12 - Diagramme ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr versus ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd présentant les compositions isotopiques initiales des harzburgites de Nouvelle-Calédonie. Le trajet en pointillé représente l'évolution de la signature isotopique du mélange entre le pôle pur mantellique et les fluides d'origine sédimentaire (Secchiari <i>et al.</i> , 2020).	19
Figure 13 - Diagramme δD versus δ ¹⁸ O pour les valeurs des eaux de pluie de la Nouvelle-Calédonie acquises par le SGNC et relation obtenue pour la droite météorique locale, après compilation de toutes ces données.....	21
Figure 14 - Diagramme δD versus δ ¹⁸ O concernant les valeurs des eaux thermales de cette étude.	21
Figure 15 - Diagramme δD versus Cl concernant les valeurs des eaux thermales de cette étude.	22
Figure 16 - Diagramme δ ¹⁸ O versus Cl concernant les valeurs des eaux thermales de cette étude.	22
Figure 17 - Diagramme de δ ¹⁸ O en fonction de l'altitude du point haut du bassin versant où émergent les sources thermales de la cote est.	23
Figure 18 - Diagramme de δ ² H en fonction de l'altitude du point haut du bassin versant où émergent toutes les sources thermales échantillonnées en septembre 2019.	24
Figure 19 - Diagramme de δ ¹⁸ O en fonction de l'altitude du point haut du bassin versant où émergent toutes les sources thermales échantillonnées en septembre 2019.	24
Figure 20 - Diagrammes Na-Cl et Cl-F concernant les concentrations des eaux thermales de cette étude.	25
Figure 21 - Diagrammes SiO ₂ -Na, Li-Na, B-Cl et Sr-Cl concernant les concentrations des eaux thermales de cette étude.	26

Figure 22 - Diagramme triangulaire Na-K-Mg (Giggenbach, 1988) appliqué aux eaux thermales de cette étude.	27
Figure 23 - Diagramme triangulaire N ₂ -H ₂ -CH ₄ indiquant la composition chimique des gaz associés aux principales sources thermales de la Nouvelle-Calédonie (Deville et Prinzhofer, 2016). 'Roc Aiguille' correspond à l'émergence d'une source hypercalcaire en mer, dans la Baie du Carénage, dans le sud.	31
Figure 24 - Modèle global conceptuel pour expliquer les compositions chimiques et isotopiques des gaz des principales sources thermales de la Nouvelle-Calédonie (d'après Deville et Prinzhofer, 2016), complété par les résultats de la présente étude.	32
Figure 25 - Modèle conceptuel de réservoirs géothermiques proposé pour les eaux thermales les plus chaudes de la région de Thio-Canala.	33
Figure 26 - Modèle conceptuel de réservoirs géothermiques proposé pour les eaux thermales de la région de la Baie de Prony.	35
Figure 27 - Diagramme de Lindal.	37
Figure 28 - Schéma d'un module ORC à basse température (à partir de 80°C) de la société ENOGIA pour la production d'électricité.	40
Figure 29 - Principe de fonctionnement général du premier module ORC de Chena, en Alaska (en réalité, il existe 3 modules ORC, au total).	42
Figure 30 - Données gravimétriques disponibles (tirées de la Banque de données internationales).	43
Figure 31 - Proposition d'acquisition de profils MT sur la région de Canala.	44

Liste des tableaux

Tableau 1 - Températures profondes estimées pour les eaux thermales de cette étude, à partir des principaux géothermomètres chimiques et isotopiques connus dans la littérature (les températures en rouge sont relativement concordantes).	29
Tableau 2 - Caractéristiques de fonctionnement de la centrale ORC Aqylon ATM-10006L de 1 MWe net (source : entreprise Aqylon).	41

Liste des annexes

Annexe 1 - Données physico-chimiques de la campagne de terrain de septembre 2019 et résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux thermales correspondantes.	53
--	----

1. Introduction

L'Agence Calédonienne de l'Energie (ACE) d'une part, la Nouvelle-Calédonie, assistée du Directeur de l'Industrie des Mines et de l'Energie de la Nouvelle-Calédonie (DIMENC), notamment son Service Géologique de Nouvelle-Calédonie (SGNC), ainsi que le BRGM d'autre part, ont établi une convention de recherche et de développement partagés sur « l'Évaluation du potentiel en géothermie de la Grande Terre », qui a démarré le 29 octobre 2018 et a une durée de 18 mois.

Dans le cadre de la première phase de cette convention, une synthèse - inventaire des sources thermales connues en Nouvelle-Calédonie et reconnaissance géologique des sites potentiels - a été réalisée au premier trimestre 2019 par le SGNC, en collaboration avec le BRGM (Jeanpert *et al.*, 2019).

La seconde phase de ce programme s'est poursuivie par une campagne d'échantillonnage des principales sources thermales recensées lors de l'inventaire, afin d'effectuer des analyses chimiques et isotopiques des eaux de ces sources. Cette mission de terrain avait pour objectif principal la reconnaissance des sources les plus prometteuses en termes de potentiel géothermique de la Grande-Terre de la Nouvelle-Calédonie et a été menée par une équipe mixte SGNC - BRGM, entre le 4 et le 12 septembre 2019, après une phase importante de préparation (matériel, prise de rendez-vous avec les municipalités, localisation précise des sources, organisation de la campagne, etc.). Le déroulement de cette campagne et les résultats des analyses physico-chimiques faites sur site, ainsi que ceux des analyses chimiques et isotopiques réalisées ensuite en laboratoire sur chacun des échantillons prélevés, ont été reportés dans le premier rapport de la phase 2 (Jeanpert *et al.*, 2020).

Ce rapport final présente l'interprétation des données obtenues au cours de cette étude et leur mise en regard avec les potentialités géothermiques et les besoins économiques de la Nouvelle-Calédonie. Il donne aussi des recommandations et propose un cahier des charges pour une poursuite de l'exploration géothermique, si celle-ci est jugée pertinente.

2. Rappel sur les sources thermales étudiées

La sélection des sources thermales devant être étudiées s'est faite après l'étude bibliographique menée au cours de la phase 1 de ce projet (Jeanpert *et al.*, 2019). Au cours de la campagne de reconnaissance, douze sources thermales ont été visitées. Ces sources peuvent être regroupées en quatre ensembles (figs. 1, 2 et 3) :

- les sources thermales de la région de la côte est, situées sur les communes de Canala et de Thio (La Crouen, Nemwegi, Kopélie, Mokoué, Gélina et Fanama) ;
- les sources thermales de la région du Massif du Sud, dans la baie de Prony (Bains des Japonais et Kaoris) ;
- les sources thermales de la côte Oubliée, au sud de Thio (Pourina, Poco Mié, Lac Yaté) ;
- la source Lembi sur la commune du Mont Dore, près de la source de la Coulée, qui avait été antérieurement prélevée par le SGNC.

De nombreuses illustrations de ces sources thermales sont reportées dans le premier rapport de la phase 2 (Jeanpert *et al.*, 2020), ainsi que les données physico-chimiques de terrain et les résultats des analyses chimiques et isotopiques de laboratoire obtenus sur les eaux de ces sources. Afin de faciliter l'interprétation des résultats, ces données ont également été reportées dans l'annexe 1 de ce rapport. Il est à noter que les eaux des sources thermales Nemwegi, Kopélie, Pourina, Poco Mié et Lembi ont été analysées pour la première fois.

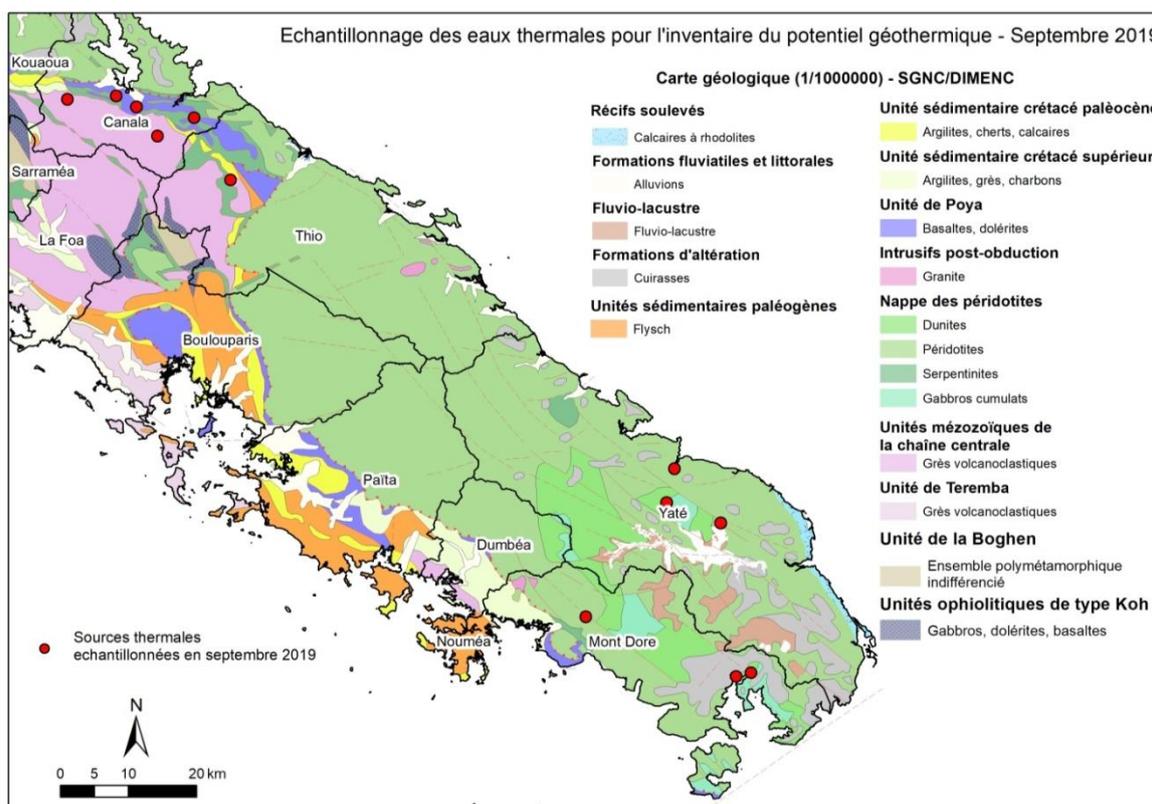


Figure 1 - Localisation des sources échantillonnées au cours de la mission de reconnaissance sur fond de carte géologique au 1/1 000 000 et limites communales.

Les principales caractéristiques géologiques (lithologiques, structurales, zones d'altérations hydrothermales, etc.) de la plupart de ces sources thermales ont été présentées dans les rapports antérieurs de cette étude, notamment à l'issue de l'étude bibliographique, et sont synthétisées sur les figures 1, 2 et 3.

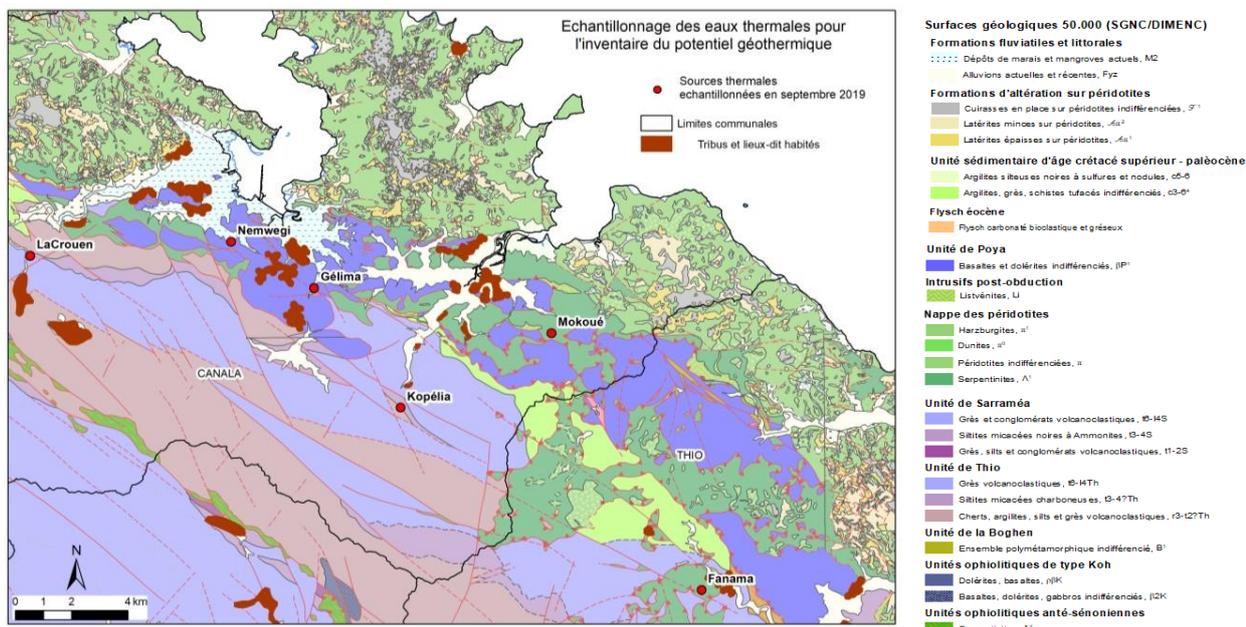


Figure 2 - Carte géologique à 1/50 000 de localisation des sources échantillonnées au cours de la mission de reconnaissance dans le secteur Thio-Canala, sur la côte est.

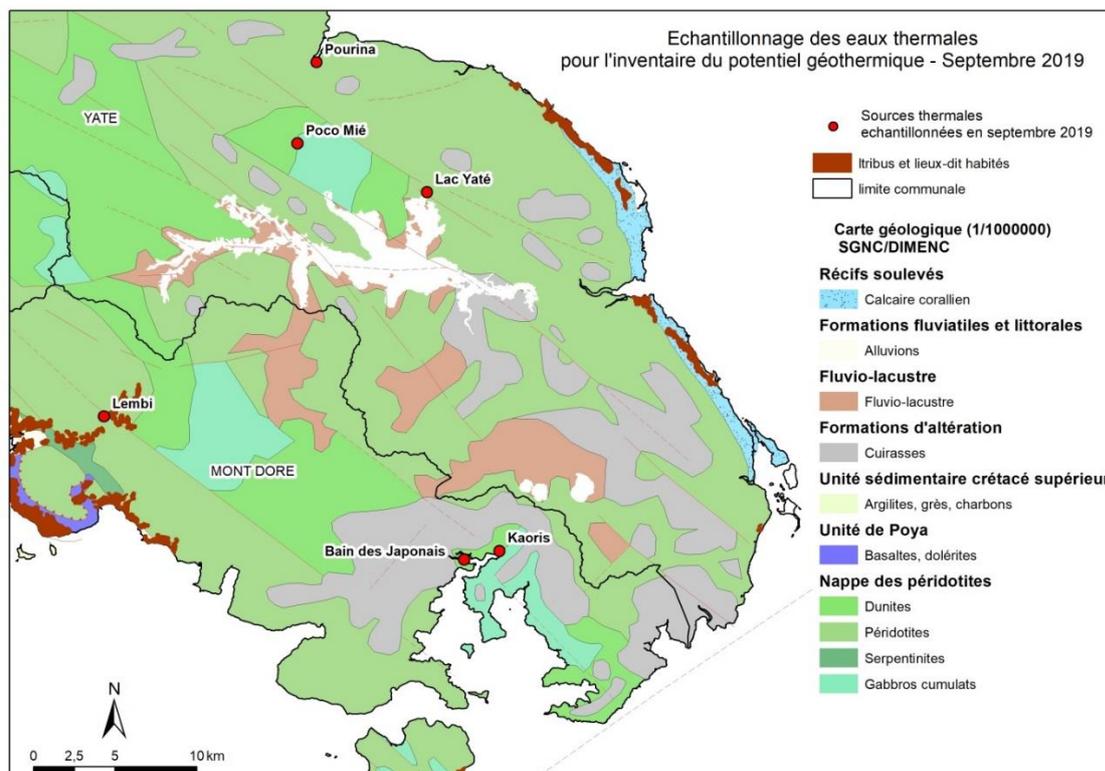


Figure 3 - Carte géologique au 1/1 000 000 de localisation des sources échantillonnées au cours de la mission de reconnaissance dans le Massif du Sud.

3. Interprétation des résultats de géochimie des eaux

3.1. CLASSIFICATION ET NATURE DES EAUX THERMALES

Par rapport aux données de terrain (ann. 1), on peut constater que les sources de La Crouen, du Bain des Japonais et de Kaoris indiquent les températures d'émergence les plus élevées (42,5, 39,4 et 31,2°C, respectivement). La température d'émergence la plus basse correspond à celle des sources Lembi et du Lac Yaté (24°C).

L'eau la plus minéralisée, qui indique la valeur de conductivité la plus élevée (1464 µS/cm à 25°C), est de loin celle de la source du Lac Yaté. Elle est suivie par celles des sources Mokoué et Pourina, qui indiquent des valeurs de conductivité respectives de 652 et 642 µS/cm, à 25°C. L'eau la moins minéralisée est celle de la source de La Crouen, qui affiche une conductivité de 234 µS/cm à 25°C, et indique la température d'émergence la plus élevée.

Les mesures de potentiel Redox de toutes les eaux thermales sont très basses, pouvant atteindre des valeurs aussi basses que -740 mV (ann. 1). Ces valeurs, ainsi que la quasi-absence d'oxygène dissous pour la plupart des eaux, sont en accord avec les observations et les compositions chimiques des gaz associés reportées par Deville et Prinzhofer (2016) pour les deux types de sources thermales.

Les diagrammes de Stabler (Figure 4) et de Piper (Figure 5) permettent de visualiser les compositions chimiques en espèces majeures de toutes les eaux thermales. Il en ressort que l'on peut distinguer deux grands types d'eau :

- les eaux de la région de Thio-Canala, qui sont majoritairement de type bicarbonaté sodique, avec des concentrations de calcium, magnésium, chlorure et sulfates plutôt basses et variables, et qui indiquent les concentrations de silice les plus élevées ;
- toutes les eaux du grand Massif du Sud, qui sont hyperalcalines (l'anion OH⁻ est prédominant) et dépourvues de bicarbonates, carbonates, magnésium, sulfates et silice. Le calcium est le cation prédominant, suivi du sodium.

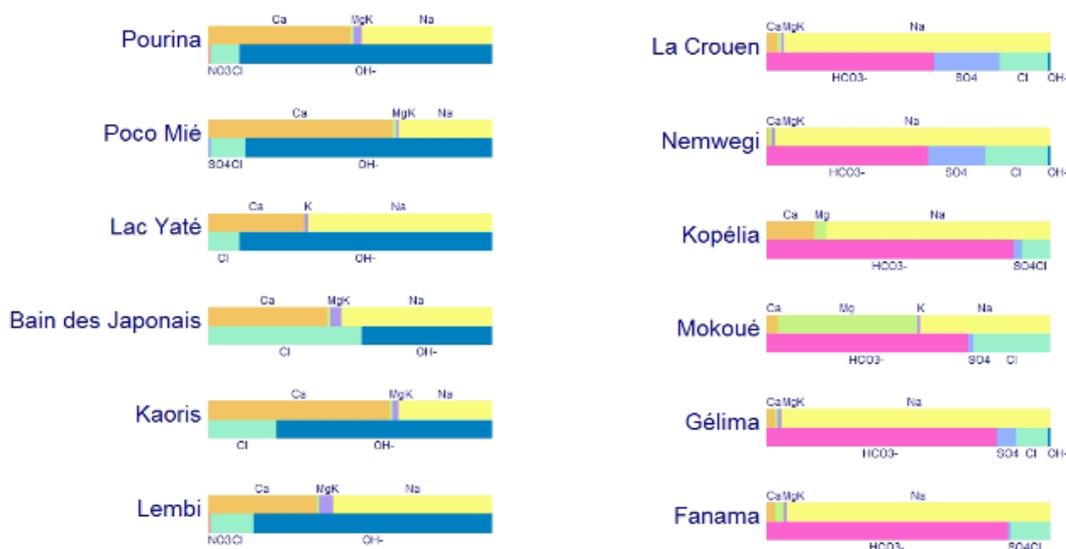


Figure 4 - Diagramme de Stabler appliqué aux eaux thermales de cette étude.

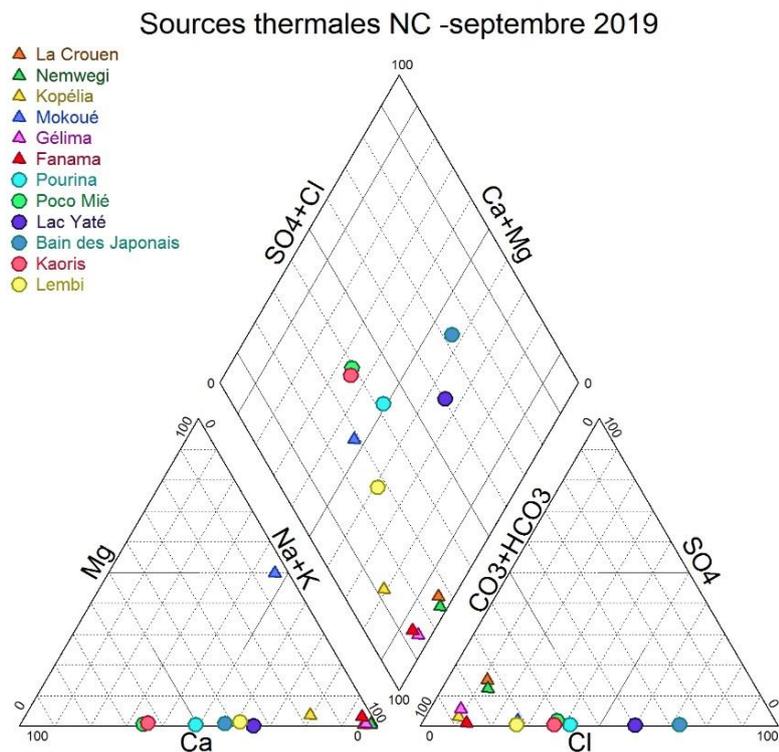


Figure 5 - Diagramme de Piper appliqué aux eaux thermales de cette étude.

Le diagramme ternaire $\text{Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$ (Giggenbach, 1988 ; fig. 6), plus adapté aux eaux géothermales, confirme la coexistence de ces deux types d'eau.

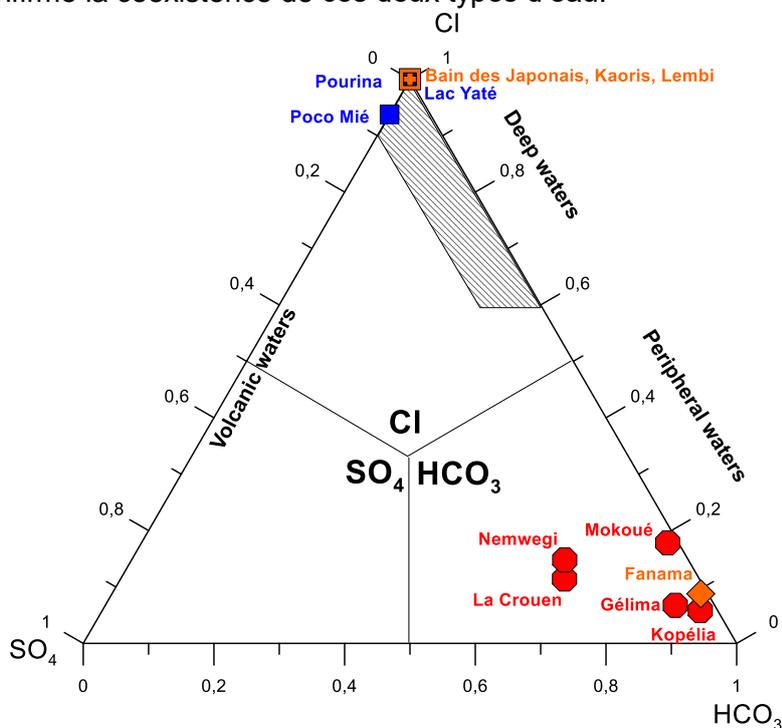


Figure 6 - Diagramme triangulaire $\text{Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$ (Giggenbach, 1988) appliqué aux eaux thermales de cette étude.

Si la qualification « d'eaux périphériques à un système hydrothermal » des eaux du premier type, avec les bicarbonates prédominants, semble être appropriée, dans ce diagramme, ce dernier n'est pas adapté pour les eaux hyperalcalines du second groupe, pour lesquelles l'ion OH^- est prédominant et n'est pas pris en compte (comme dans le diagramme de Piper, d'ailleurs). Du coup, leur qualification d'eau profonde et mature, étant donné que l'ion Cl^- devient prépondérant, lorsque l'ion OH^- n'est pas considéré, n'est pas justifiée.

Pour les sources déjà connues dans la littérature, on retrouve, dans l'ensemble, des données de terrain et de laboratoire similaires aux données antérieures (Koch, 1958 ; Barnes and O'Neil, 1978 ; Cox *et al.*, 1982 ; Launay et Fontes, 1985 ; A2EP, 2000 ; Mairie de Canala, 2007, 2008 ; GEOIMPACT, 2013 ; Monnin *et al.*, 2014 ; Deville et Prinzhofer, 2016 ; Jeanpert *et al.*, 2019).

3.1.1. Les eaux thermales de la région de Thio-Canala

En ce qui concerne les eaux du premier type, les diagrammes Na- HCO_3 , Na-Ca, Na- SO_4 et Na-F de la figure 7 permettent de bien illustrer les différences de composition chimique qui existent avec celles du second type, qui sont dépourvues de bicarbonates, de sulfates et de fluorures et dont le cation prédominant est souvent le calcium.

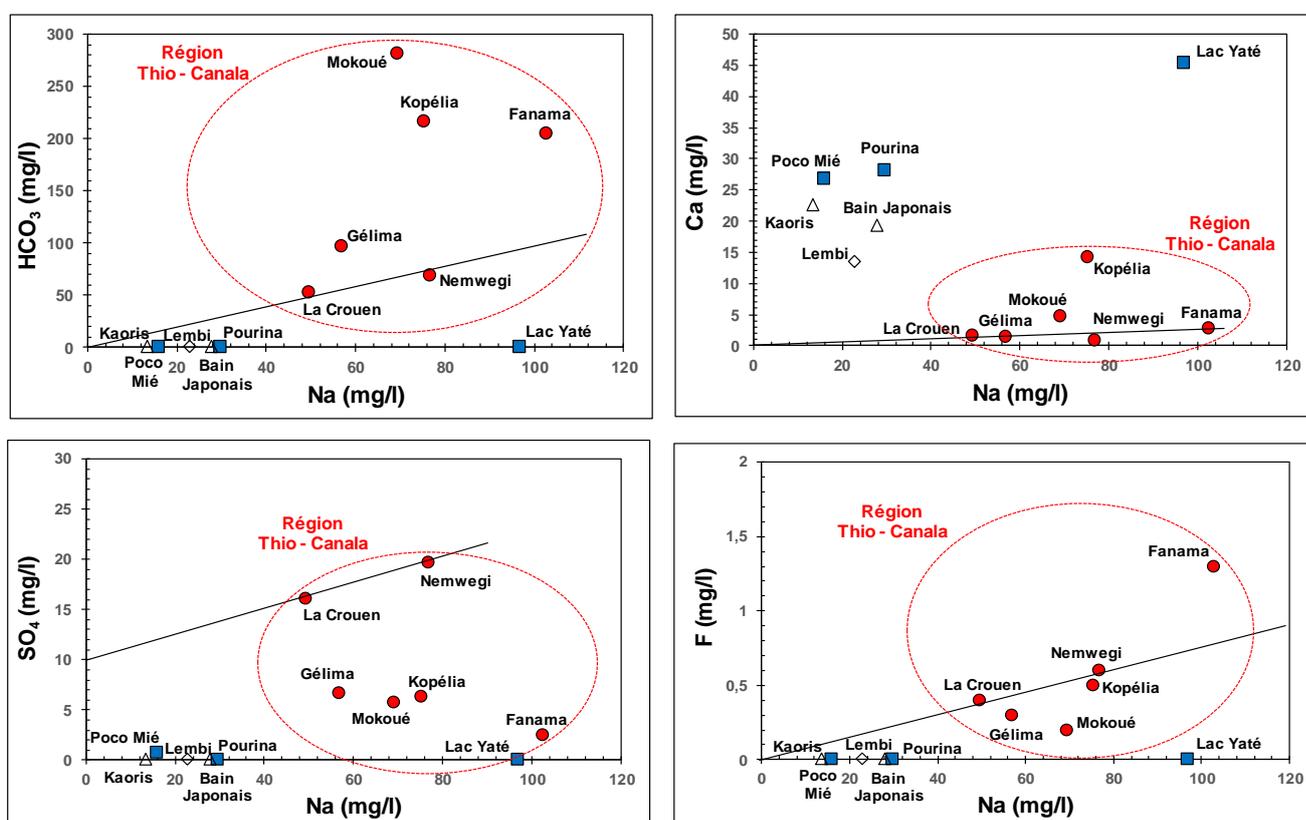


Figure 7 - Diagrammes binaires Na- HCO_3 , Na-Ca, Na- SO_4 et Na-F appliqués aux eaux thermales de cette étude.

Seules les valeurs de pH des eaux des sources Kopélia, Mokoué et Fanama sont inférieures à 9 (7,82, 7,92 et 8,71, respectivement ; ann. 1). Celles de La Crouen, Nemwegi et Gélima sont respectivement de 9,18, 9,38 et 9,32.

Toutes ces eaux sont associées à des dégagements de H_2S , plus ou moins importants, qui ont une odeur caractéristique « d'œuf pourri ». Des observations similaires avaient été faites par Koch (1958) et Cox *et al.* (1982) pour les eaux de La Crouen et de Fanama.

Ces auteurs indiquaient aussi que ces sources émergent de formations métamorphiques et de roches volcaniques associées, à des altitudes de 20 à 55 m, suivant des linéaments structuraux de direction NO majoritairement. Ces structures sont associées à des lentilles de serpentine, des silicifications et des minéralisations métallifères, indices d'anciennes circulations de fluides hydrothermaux, qui présentent les plus grandes variétés de l'île.

D'après Koch (1958), toutes ces sources thermales sont nettement liées aux grandes fractures, qui ont affecté le socle de cette région postérieurement à la mise en place des péridotites. C'est en effet le long de la côte est, entre la « langue » de péridotites qui borde la mer, de Thio à Houaïlou, et les terrains sédimentaires situés plus au sud, que s'imprimèrent les mouvements tectoniques les plus violents. Le fait que ces sources soient sulfureuses proviendrait de leur association avec les venues sulfureuses diverses, mais surtout pyriteuses, qui elles aussi ont accompagné ou suivi l'intense activité orogénique de cette partie de la côte est ; ces dépôts sulfurés seraient actuellement lessivés à grande profondeur par les eaux thermales.

D'après Deville et Prinzhofer (2016), les gaz associés à la source de La Crouen sont principalement constitués d'azote (environ 97 %), avec un peu de méthane (2,7 %) et des traces d'hélium, l'azote et l'hélium étant tous les deux d'origine crustale (signature isotopique $^3\text{He}/^4\text{He}$ caractéristique). Cette origine pourrait être aussi celle du H_2S associé à l'eau thermale de La Crouen dont la valeur de $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$, déterminée pour la première fois, indique une signature de 9,2 ‰, qui ne traduit pas une origine mantellique (0 ‰ par rapport à la météorite de référence Canyon Diablo), ni une origine bactérienne sédimentaire (valeurs plutôt négatives ; Martinez, 2019). Par contre, le fait que la gamme de fractionnement soit inférieure à +10 ‰ par rapport à la météorite de référence, suggère que les composés soufrés ne sont pas issus de multiples réactions et équilibres chimiques inorganiques (Grousset, 2016). Il en va de même pour les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ des sulfates dissous des eaux thermales de La Crouen, de Gélima et de Fanama, déterminées également pour la première fois, qui indiquent un fractionnement modéré par rapport à la météorite de Canyon Diablo (7,5 ‰, 10,4 ‰ et 11,1 ‰, respectivement ; ann. 1).

Pour une grande partie de ces sources, on a pu observer des dépôts de gel et de filaments associés, de couleur blanchâtre et/ou verdâtre (Koch, 1958 ; Jeanpert *et al.*, 2020). Ce même type de dépôts avait été observé en République Dominicaine pour des eaux thermales, avec dégagement de H_2S et températures d'émergence similaires (Sanjuan *et al.*, 2017a). Leurs analyses minéralogiques avaient indiqué qu'ils étaient principalement constitués de soufre (60-80 %), d'argiles de type smectite ou interstratifiés smectite/illite (10-20 %), et d'un peu de gypse (10%).

Les valeurs isotopiques en strontium ont été déterminées pour la première fois sur des eaux thermales de Nouvelle-Calédonie. Le principal intérêt de ces déterminations est que le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux, associé au contexte géologique d'un site, est relativement discriminant pour donner des informations sur la nature des roches du réservoir en contact avec ces eaux.

Ainsi, les valeurs isotopiques en strontium pour les eaux thermales de La Crouen, de Mokoué et de Fanama, toutes inférieures à 0,707 (fig.8 ; ann. 1), suggèrent que ces eaux restent en contact avec des roches volcano-clastiques du socle mésozoïque, dans le réservoir, et ne sont pas en contact avec la couverture du Crétacé-Paléocène, pour laquelle les valeurs isotopiques en Sr seraient supérieures à 0,707 (fig. 9).

Par contre, pour l'eau thermale de Gélima, qui indique une valeur du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,707845, on ne peut pas exclure un tel contact (fig. 9) et cette signature traduit une modification par rapport à la nature des roches du réservoir des eaux thermales précédentes. Toutefois, ce changement de nature ne semble pas être si important que cela, étant donné la similarité de la composition chimique de cette eau par rapport à celle de La Crouen et de Nemwegi (figs. 5 et 6).

La nature de la roche du réservoir pourrait correspondre à celle observée en surface (roche massive de patine gris clair à gris foncé), qui pourrait correspondre à des argilites, grès ou grauweekes probablement métamorphisés, que l'on peut rattacher à l'ensemble de la chaîne centrale (zone de sources à proximité de la zone de contact entre les basaltes de Poya et ces formations).

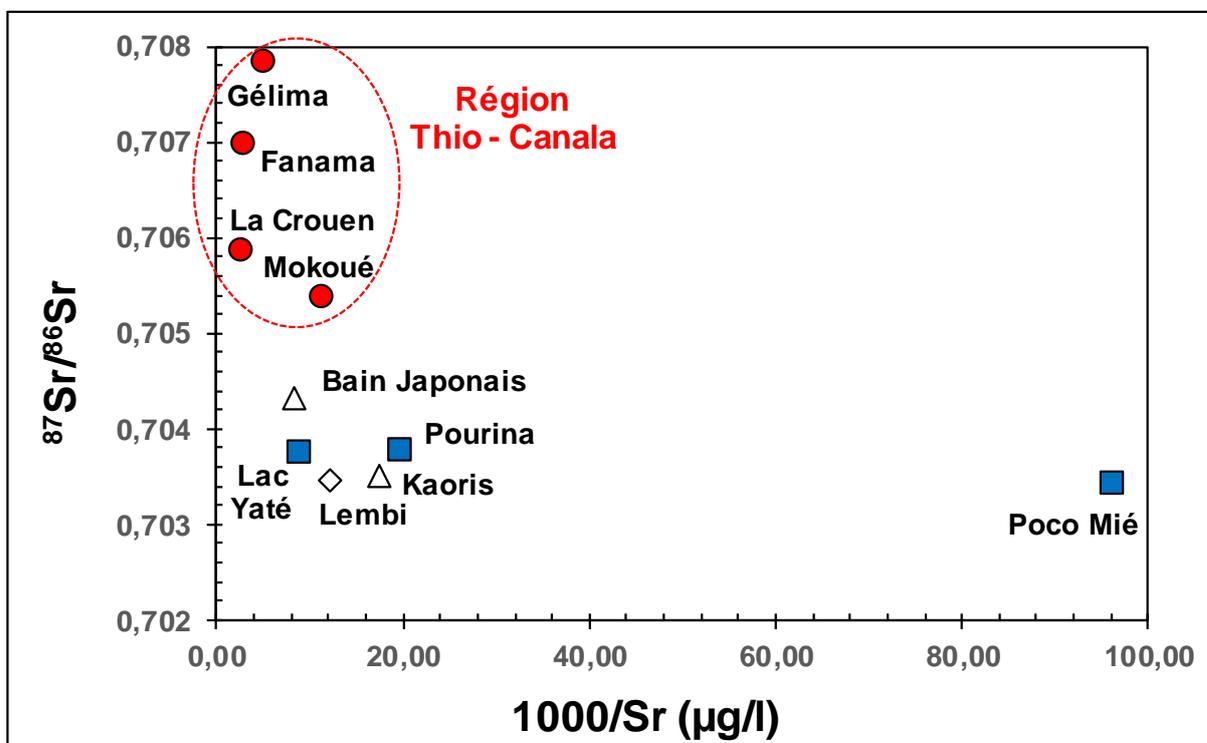


Figure 8 - Diagramme binaire ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr vs 1/Sr appliqué aux eaux thermales de cette étude.

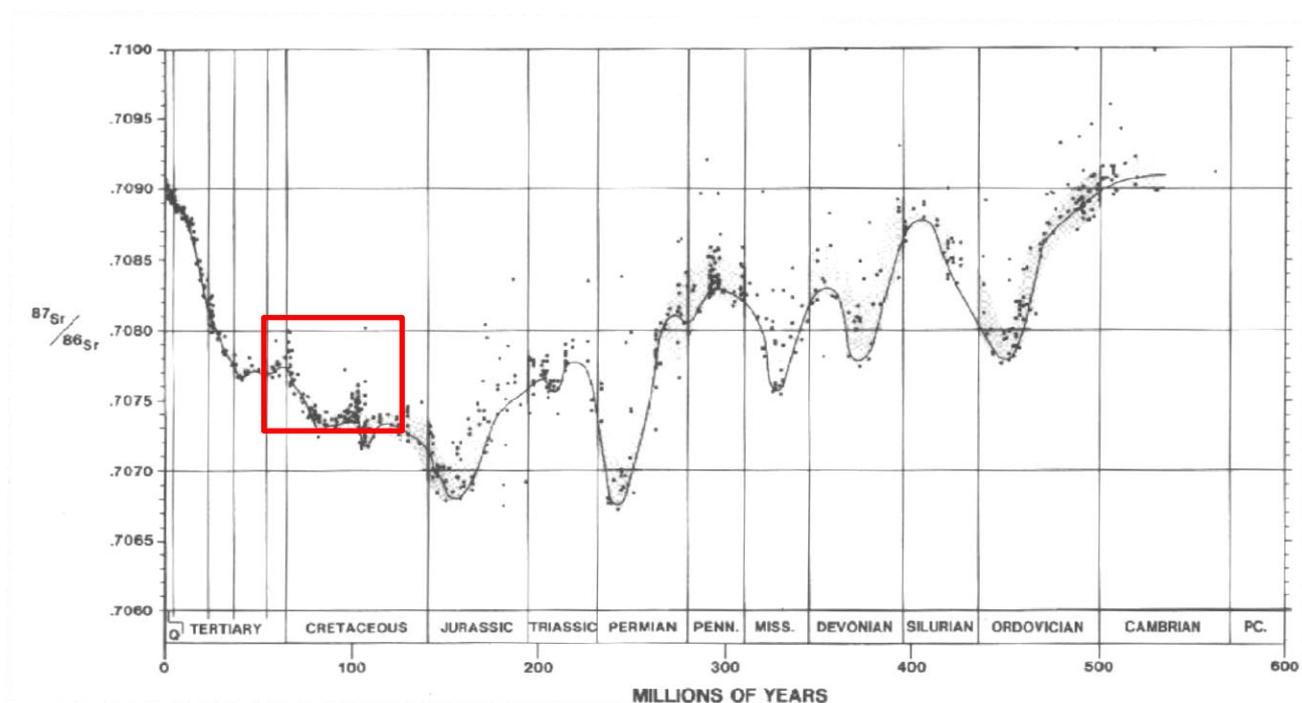


Figure 9 - Diagramme de l'évolution du rapport isotopique ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr de l'eau de mer et des sédiments marins à travers les périodes géologiques (Burke et al., 1982).

3.1.2. Les eaux thermales du Massif du Sud

Pour les eaux des sources du Massif du Sud, qui émergent toutes dans la Nappe de Péridotites, le pH dépasse la valeur de 10, jusqu'à atteindre 11,83 sur la source du Lac Yaté, indiquant ainsi des valeurs de pH très basiques (ann. 1), qui sont associées à la production d'ions hydroxydes en solution et de gaz hydrogène, provenant de l'altération des péridotites (serpentinisation), et notamment des olivines (dissolution de fayalite et de forstérite), suivant les réactions chimiques bien connues :



Deville et Prinzhofer (2016) confirment bien, pour les eaux des sources du Bain des Japonais et de Kaoris, la production d'hydrogène (26-36 %), qui est accompagnée de celle d'azote (50-60 %) et de méthane (11-16 %), avec quelques traces d'hélium (mélange d'hélium mantellique avec de l'hélium crustal, d'après la signature isotopique $^3\text{He}/^4\text{He}$).

La production d'hydrogène liée à des processus d'altération des péridotites à haute température (au-dessus de 300°C) est bien connue, mais la serpentinisation de ces roches à des températures plus faibles (de 35 à 300°C) peut avoir lieu aussi (Wenner and Taylor, 1971 ; Moody, 1976 ; Mével, 2003 ; Sylantsev et al., 2009 ; Okland *et al.*, 2012 ; Mayhew *et al.*, 2013 ; Deville et Prinzhofer, 2016). La figure 10, tirée de Cluzel *et al.* (2019), illustre bien les différents domaines de température possibles de serpentinisation.

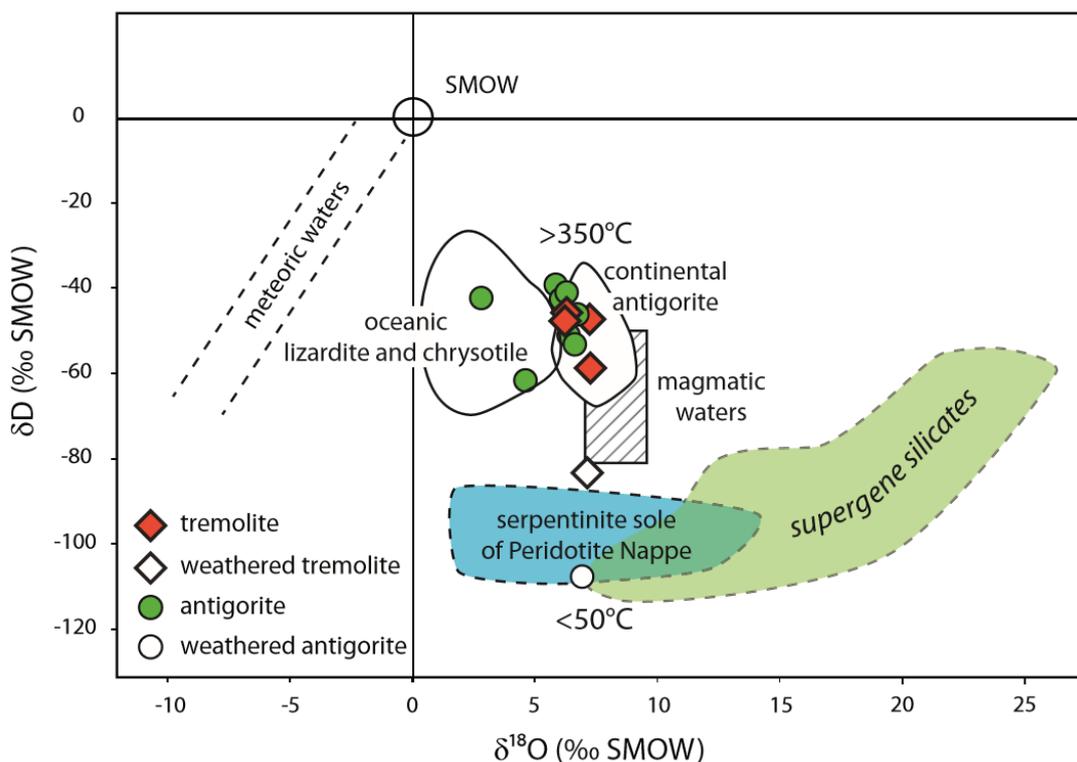


Figure 10 - Diagramme qui représente les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et δD de serpentines fibreuses et tremolites des sites de Poro, Kopéto, Tiébaghi et Thio en Nouvelle-Calédonie, et les différents domaines de température de serpentinisation (Cluzel *et al.*, 2019).

L'absence de sulfates et de sulfures dans ces eaux (ann. 1 et fig. 7) n'a pas permis de faire d'analyses isotopiques de $\delta^{34}\text{S}$, ni de $\delta^{18}\text{O}$ pour les sulfates dissous.

La détermination des rapports isotopiques de strontium de la plupart de ces eaux thermales indique des valeurs allant de 0,703444 à 0,703786 (ann. 1 et fig. 8), à l'exception de l'eau thermale du Lac Yaté, qui affiche une valeur légèrement supérieure (0,704326). Ces valeurs sont supérieures à celles des péridotites de la région de Yaté (autour de 0,7025), mais sont dans la gamme de celles des péridotites abyssales (figs. 11 et 12 ; Secchiari *et al.*, 2020). Pour ces auteurs, les péridotites de la région de Yaté auraient une origine mantellique quasiment « pure », très peu marquée par l'origine sédimentaire des fluides de la plaque subductée. Néanmoins, la figure 12 montre bien que la contribution de fluides d'origine sédimentaire peut faire augmenter, de façon significative, les rapports isotopiques de strontium. Etant donné le contexte géologique de ces sources thermales, ceci implique que le réservoir de ces eaux serait constitué de péridotites, d'origine mantellique légèrement moins « pure » que celle de la région de Yaté, et avec des signatures de Sr proches de celle des péridotites abyssales.

La valeur plus élevée du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour l'eau thermale du lac Yaté pourrait être due à un léger mélange avec de l'eau de mer dont le rapport isotopique de strontium est actuellement autour de 0,709 (Sanjuan *et al.*, 1990).

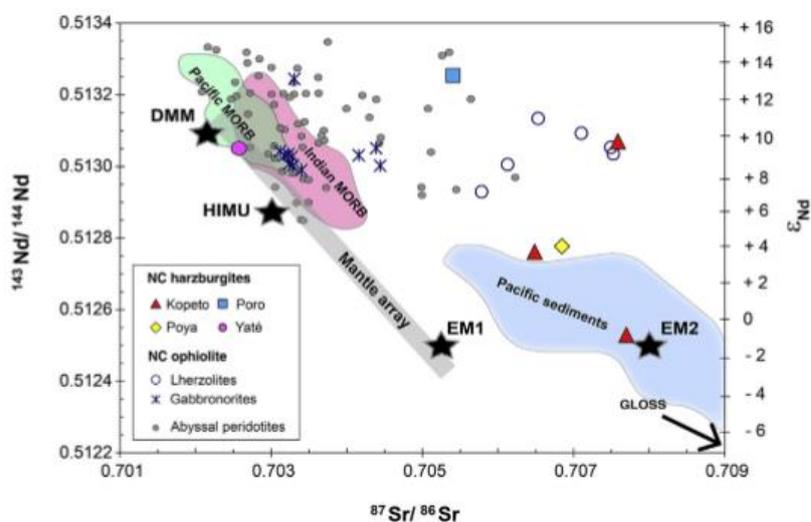


Figure 11 - Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ pour différents types de roches ultrabasiques de la Nouvelle-Calédonie (tiré de Secchiari *et al.*, 2020).

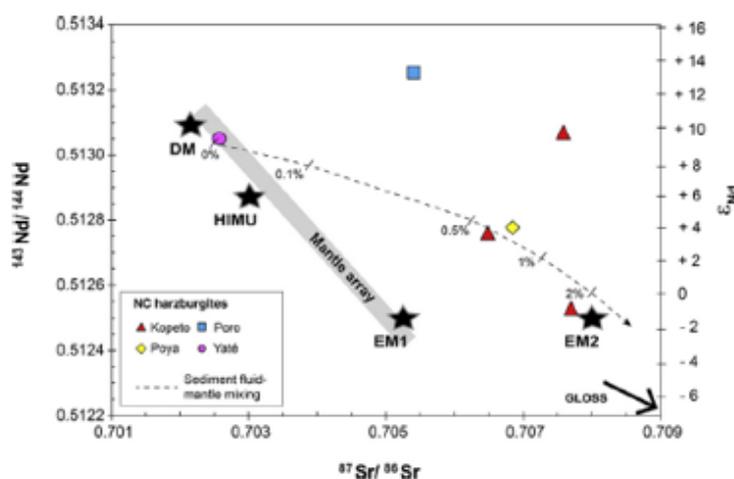


Figure 12 - Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ présentant les compositions isotopiques initiales des harzburgites de Nouvelle-Calédonie. Le trajet en pointillé représente l'évolution de la signature isotopique du mélange entre le pôle pur mantellique et les fluides d'origine sédimentaire (Secchiari *et al.*, 2020).

3.2. ORIGINE DES EAUX

Les valeurs de δD (ou δ^2H) et $\delta^{18}O$ des isotopes stables de l'eau font partie des outils les plus efficaces pour déterminer l'origine des eaux, et voire même, localiser leur aire de recharge, lorsqu'on a une bonne connaissance de ces valeurs isotopiques pour les pluies et les eaux de surface d'une région donnée.

En ce qui concerne les pluies de la Nouvelle-Calédonie, plusieurs stations de mesures des isotopes stables de l'eau ont été mises en place par le SGNC sur des périodes assez courtes, annuelles à pluriannuelles. Ainsi, à Pouembout (côte ouest), on dispose de 5 mesures des pluies mensuelles tombées sur le bassin versant de la Pouembout, entre janvier et mai 2018. Des mesures en isotopes stables ont également été réalisées sur trois pluviomètres positionnés dans le Massif du Sud, d'une part, et sur le Massif du Koniambo, d'autre part.

En compilant l'ensemble des données d'isotopes de pluie acquises par le SGNC sur ces 4 stations, la droite météorique locale de Nouvelle-Calédonie s'écrit :

$$\delta^2H = 8,5 \delta^{18}O + 15,8$$

Cette dernière relation est très proche de celle déterminée à Lifou, entre 2012 et 2014 :

$$\delta^2H = 8,3 \delta^{18}O + 14 \text{ (Nicolini } et al., 2016)$$

Cette relation est assez proche également de celle proposée par Cox *et al.* (1982), sans mesures *a priori* :

$$\delta^2H = 8 \delta^{18}O + 16$$

Ces relations sont légèrement décalées de la droite des eaux météoriques mondiales (GWML ou WMWL) dont l'équation est :

$$\delta^2H = 8 \delta^{18}O + 10 \text{ (Craig, 1963)}$$

Les eaux thermales échantillonnées en septembre 2019 sont reportées sur le même graphique que les données de pluie (fig. 13).

En ce qui concerne les eaux thermales de la région Thio-Canala, les eaux de La Crouen et de Fanama étudiées par Cox *et al.* (1982) suivaient d'assez près la droite météorique locale définie par ces auteurs ($\delta^2H = 8 \delta^{18}O + 16$). Dans cette étude, les sources thermales se distribuent entre les droites météoriques locale et mondiale (fig. 14), sauf pour la source thermale de Mokoué, qui indique un très léger décalage vers la droite par rapport à la droite mondiale.

Le shift vers la droite de l'eau thermale de Mokoué qui, par ailleurs, montre une salinité et une concentration de chlorure supérieure à celles des autres (figs. 15 et 16), indique un enrichissement en oxygène-18, qui pourrait être dû à une interaction plus intense avec les roches silicatées, dans un contexte de faible rapport eau-roche, car on verra, par la suite, que ce n'est pas uniquement l'effet de la température qui peut expliquer cette différence avec les autres eaux.

D'après les figures 15 et 16, et la configuration de la source thermale de Nemwegi (eau quasi-stagnante), cette eau subit probablement un processus d'évaporation par rapport à l'eau de La Crouen, qui modifie sa signature en isotopes stables de l'eau et augmente légèrement ses concentrations en espèces dissoutes (sans en modifier les rapports) et, par conséquent, sa salinité.

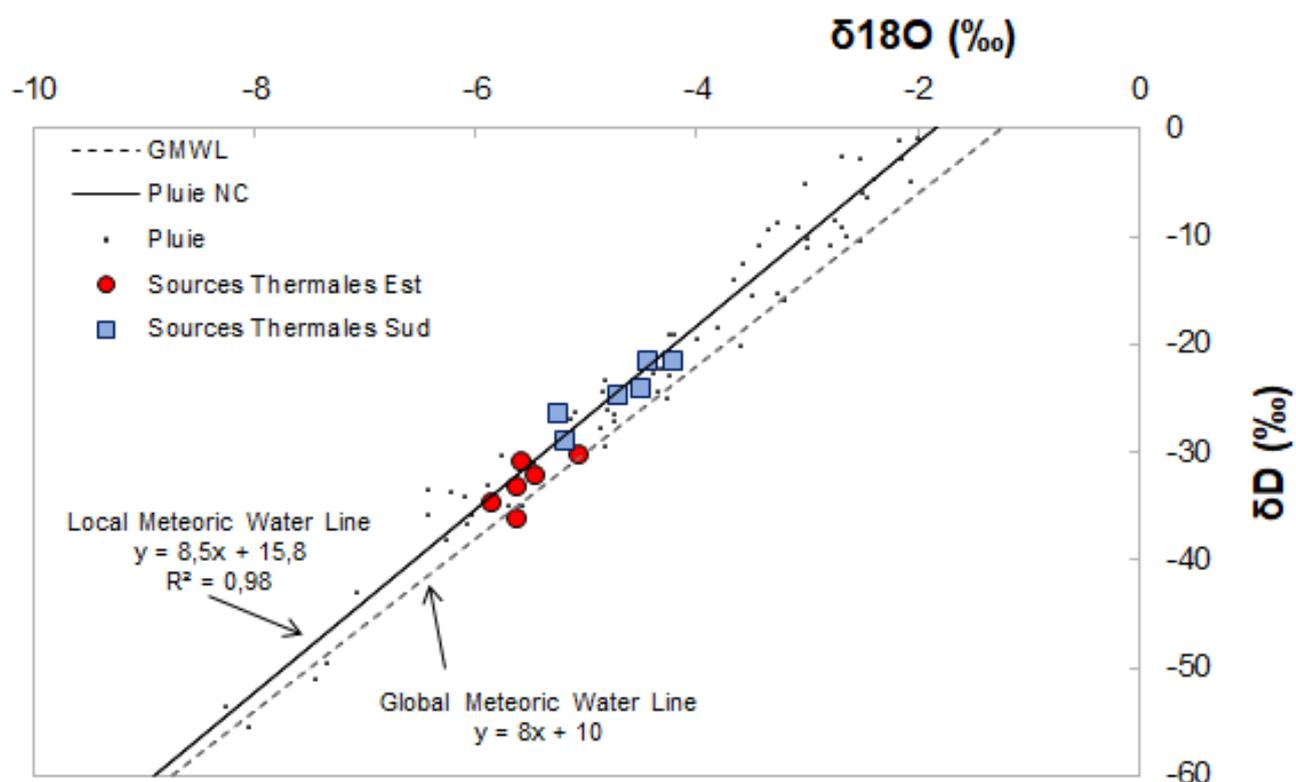


Figure 13 - Diagramme δD versus $\delta^{18}O$ pour les valeurs des eaux de pluie de la Nouvelle-Calédonie acquises par le SGNC et relation obtenue pour la droite météorique locale, après compilation de toutes ces données.

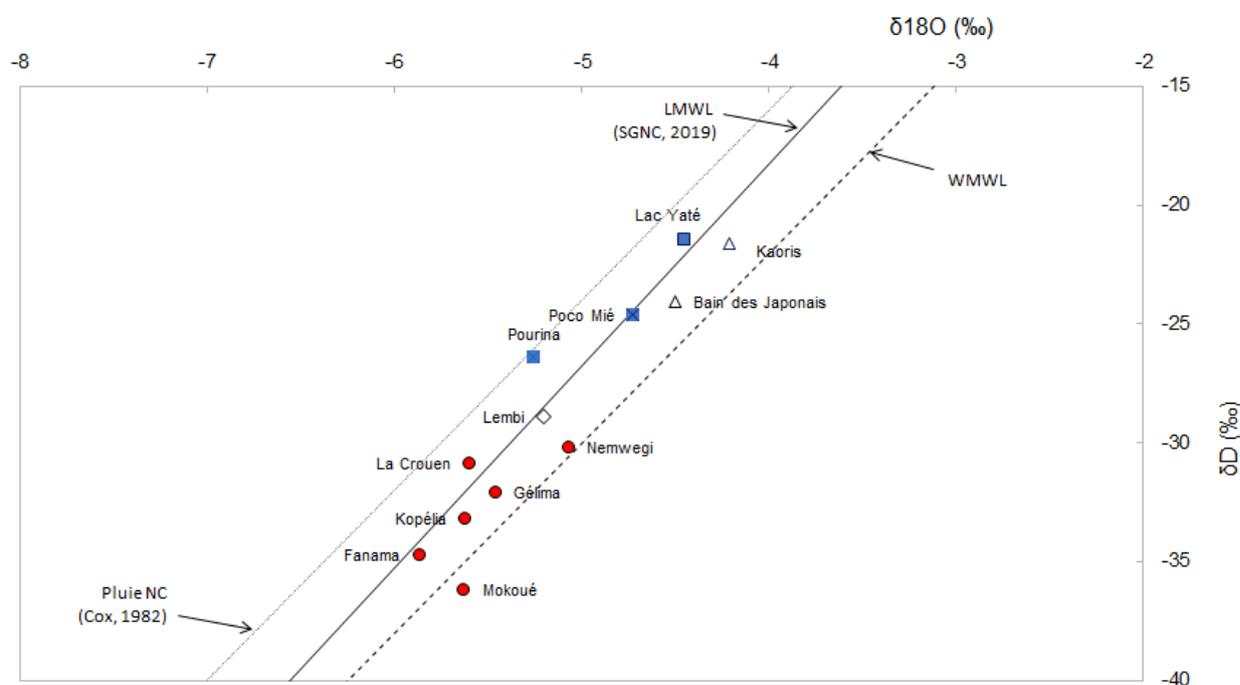


Figure 14 - Diagramme δD versus $\delta^{18}O$ concernant les valeurs des eaux thermales de cette étude.

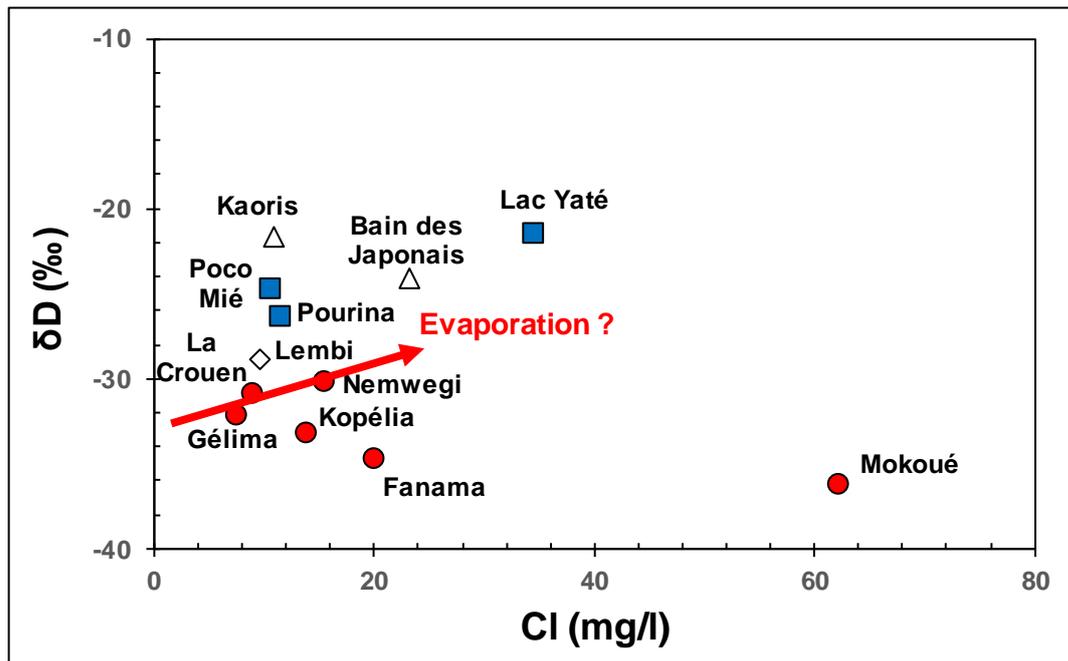


Figure 15 - Diagramme δD versus Cl concernant les valeurs des eaux thermales de cette étude.

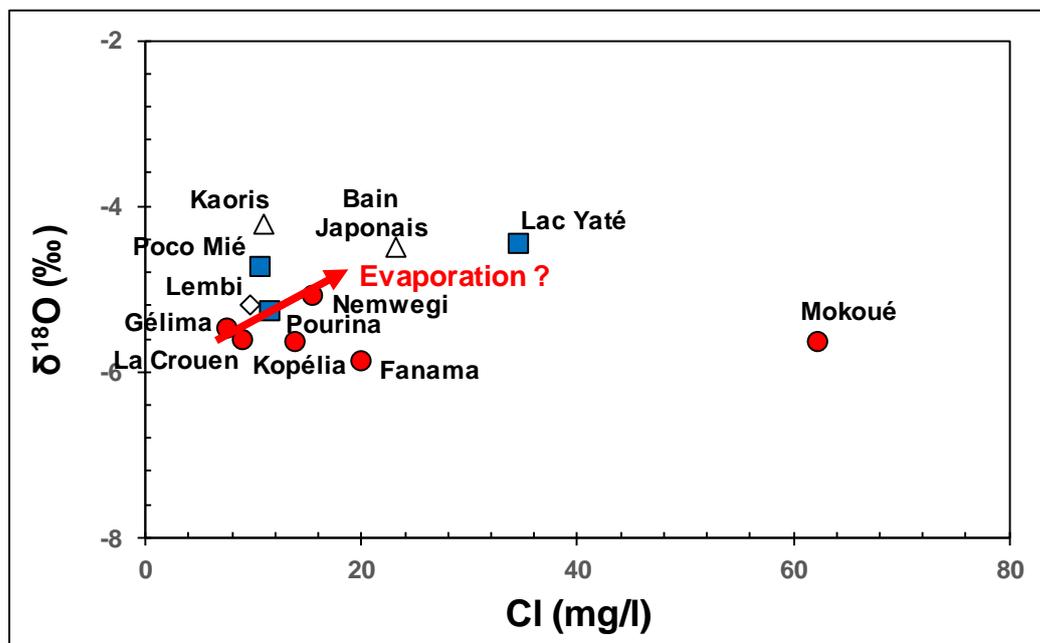


Figure 16 - Diagramme $\delta^{18}O$ versus Cl concernant les valeurs des eaux thermales de cette étude.

Cette hypothèse semble se confirmer sur la figure 17, qui représente la distribution des valeurs de ^{18}O en fonction de l'altitude du point haut du bassin versant sur lequel émerge chacune des sources. Il apparaît que la source de Nemwegi s'écarte de la droite représentative du gradient altitudinal estimé à $-0,125 \text{ ‰} / 100 \text{ m}$ pour l'oxygène-18.

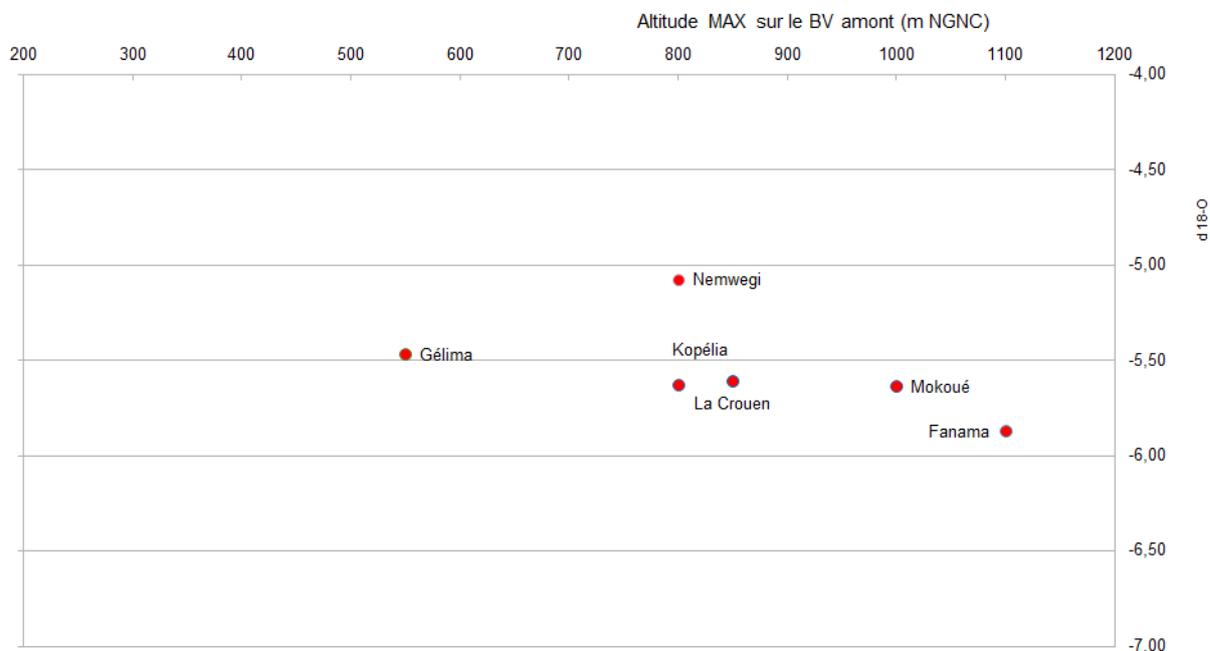


Figure 17 - Diagramme de $\delta^{18}\text{O}$ en fonction de l'altitude du point haut du bassin versant où émergent les sources thermales de la côte est.

Cependant, cette hypothèse doit être confirmée, car l'effet de l'évaporation ne semble pas marqué sur le graphe des valeurs de deutérium en fonction de l'altitude (fig. 18), ou sur le graphe représentant l'ensemble des points, incluant les sources du Massif du Sud, de la figure 19.

En considérant l'ensemble des données, le gradient altitudinal peut être revu et estimé à $-0,4 \text{ ‰} / 100 \text{ m}$ pour l'oxygène-18 et $-2,3 \text{ ‰} / 100 \text{ m}$ pour le deutérium. Ces valeurs sont proches des gradients calculés en milieu tropical et estimés entre $-0,16$ et $-0,3 \text{ ‰} / 100 \text{ m}$ pour l'oxygène-18 et entre $-2,6$ et $1,6 \text{ ‰} / 100 \text{ m}$ pour le deutérium (Gonfiantini *et al.*, 2001).

Les figures 18 et 19 montrent des aires de recharge sur les points hauts des bassins versants. L'alimentation des eaux thermales est d'origine météorique, avec des zones différentes de recharge suivant les sources thermales considérées :

- une zone de recharge située à une altitude d'environ 800 m pour les eaux thermales de La Crouen, Nemwegi, Gélima et Kopéla ;
- deux autres zones de recharge autour de 1000-1100 m d'altitude pour les eaux de Fanama et de Mokoué ;
- une zone de recharge autour de 800 m NGNC pour la plupart des eaux du Massif du Sud, en cohérence avec les points culminants de ces secteurs, à l'exception de l'eau de Pourina, dont l'aire de recharge serait un peu plus élevée.

La Chaîne Centrale et les monts du Massif du Sud correspondent ainsi aux aires de recharge des sources thermales.

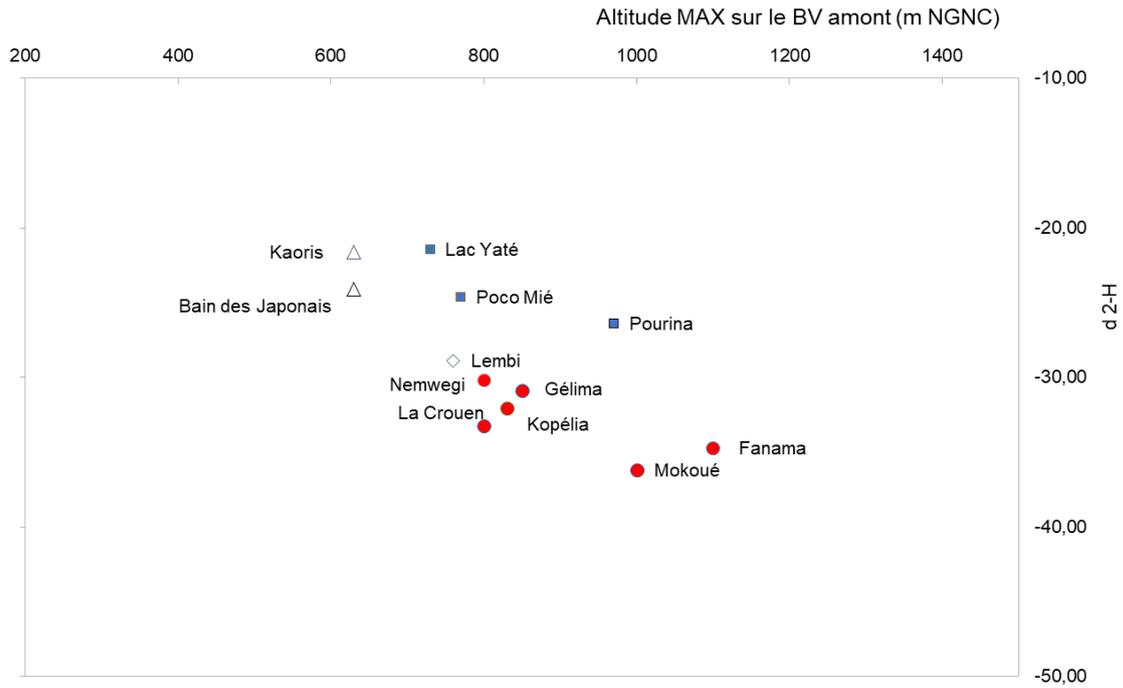


Figure 18 - Diagramme de δ^2H en fonction de l'altitude du point haut du bassin versant où émergent toutes les sources thermales échantillonnées en septembre 2019.

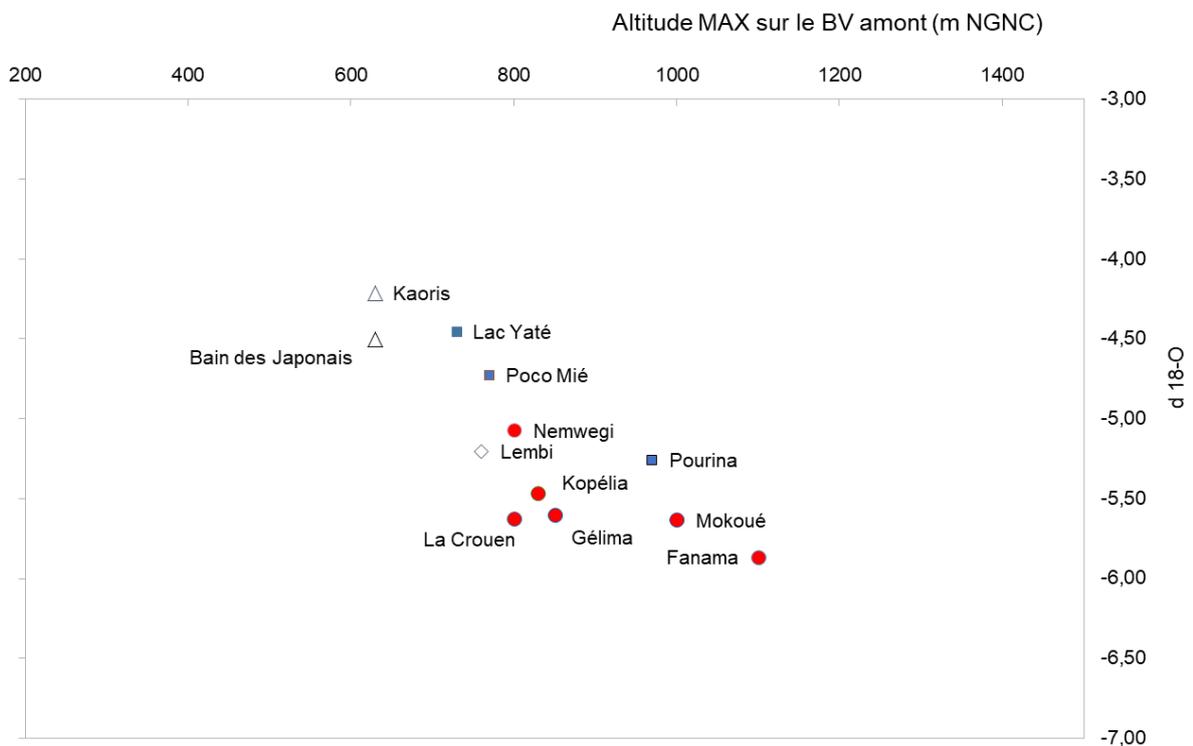


Figure 19 - Diagramme de $\delta^{18}O$ en fonction de l'altitude du point haut du bassin versant où émergent toutes les sources thermales échantillonnées en septembre 2019.

Un autre marqueur d'origine des eaux est le rapport Cl/Br, ces deux éléments étant considérés comme « conservatifs » par rapport à des processus d'interaction eau-roche, vu qu'ils ne sont généralement pas apportés par la dissolution des roches (ou alors en quantité très négligeable) et qu'ils n'ont pas tendance à précipiter ou s'adsorber. Malheureusement, ce rapport n'a pas pu être utilisé au cours de cette étude, vu que les concentrations de bromure ont toutes été analysées en dessous du seuil de détection (ann. 1).

Enfin, les diagrammes Na-Cl et Cl-F (

Figure 20) semblent bien confirmer que les eaux thermales de La Crouen, Nemwegi, Gélima et Kopélia ont une origine similaire, tandis que celles de Mokoué et de Fanama sont assez différentes.

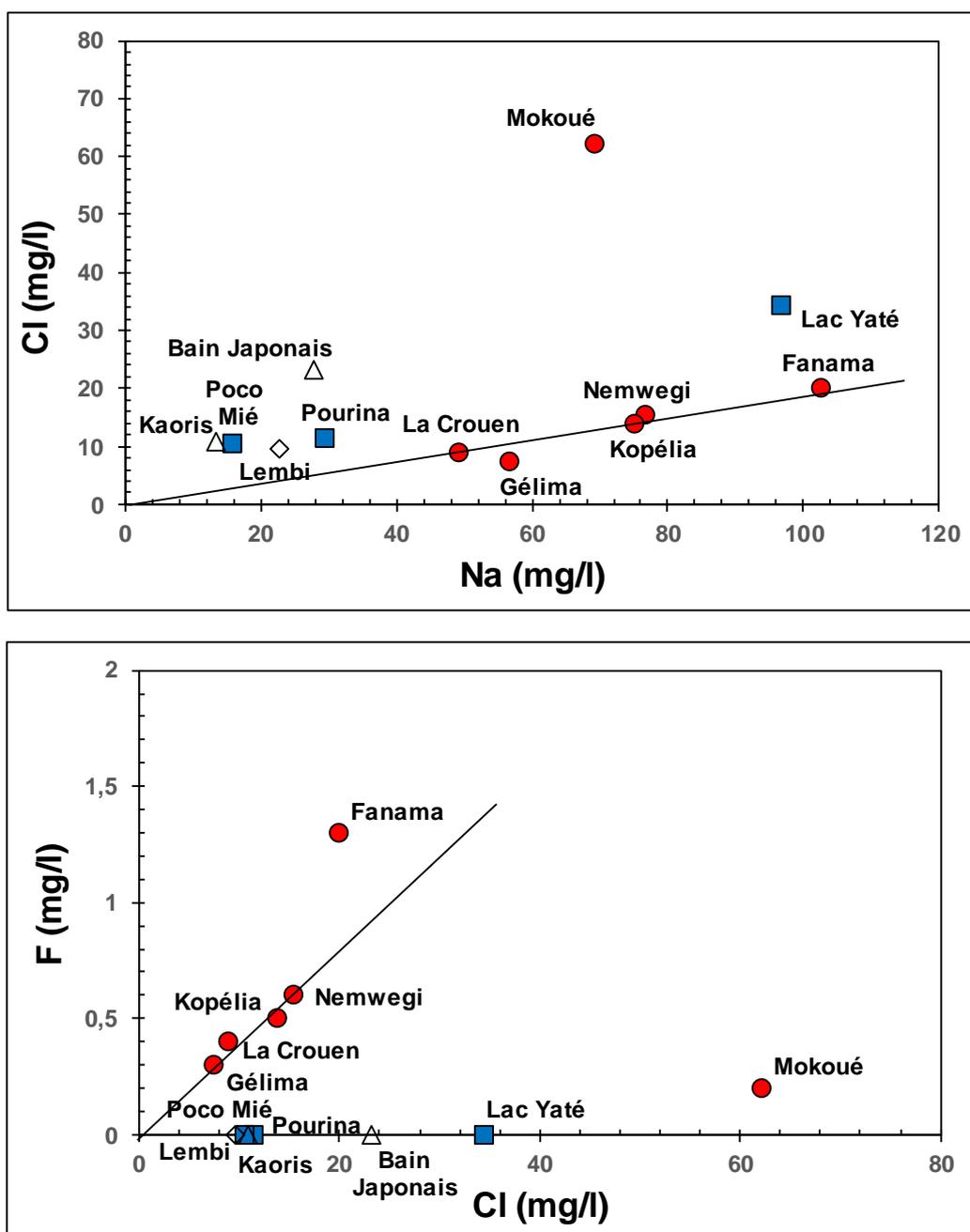


Figure 20 - Diagrammes Na-Cl et Cl-F concernant les concentrations des eaux thermales de cette étude.

3.3. GEOTHERMOMETRIE

3.3.1. Premiers indices concernant la température des eaux thermales

Les diagrammes $\text{SiO}_2\text{-Na}$, Li-Na et B-Cl de la figure 21 montrent que ce sont les eaux thermales de Nemwegi, La Crouen, Gélima, Fanama, Kopélia et Mokoué de la région de Thio-Canala, qui possèdent les concentrations de SiO_2 , de Li et de B les plus élevées. Les eaux thermales du Massif du Sud sont très appauvries en ces espèces, qui sont, en principe, les premiers indicateurs concernant la température croissante des eaux. Elles sont également très appauvries en éléments traces tels que F, Cs, Ge, W, As par rapport aux eaux de la région de Thio-Canala. Par contre, leurs concentrations en Al dissous sont beaucoup plus importantes (ann. 1).

Parmi les eaux thermales de la région de Thio-Canala, ce sont les eaux de Nemwegi, La Crouen et Gélima, qui indiquent les concentrations de SiO_2 les plus élevées (fig. 21). Ce sont elles aussi qui affichent les concentrations de HCO_3 les plus basses (fig. 7). La solubilité de la calcite (carbonate de calcium souvent rencontré dans les réservoirs géothermaux) diminuant avec la température, tous ces indices prètent à penser que ce sont ces eaux thermales qui sont portées aux températures profondes les plus élevées. Par ailleurs, le fait que leurs concentrations de Mg soient basses ($< 2 \text{ mg/l}$; ann. 1) est également un indice favorable.

Par contre, l'eau thermique de Mokoué, qui indique les concentrations de Mg et de HCO_3 les plus élevées de ces eaux (ann. 1 ; fig. 7), est très probablement portée à des températures profondes inférieures, même si elle possède la concentration de Cl la plus importante et affiche la salinité la plus élevée de toutes ces eaux. L'eau thermique de Kopélia, qui semble être relativement froide en profondeur, indique étonnement une concentration en Sr très élevée par rapport à celle des autres eaux (fig. 21 ; ann. 1). L'origine du strontium est à chercher dans les formations de l'unité de Thio de la Chaîne Centrale formée principalement de grauwackes.

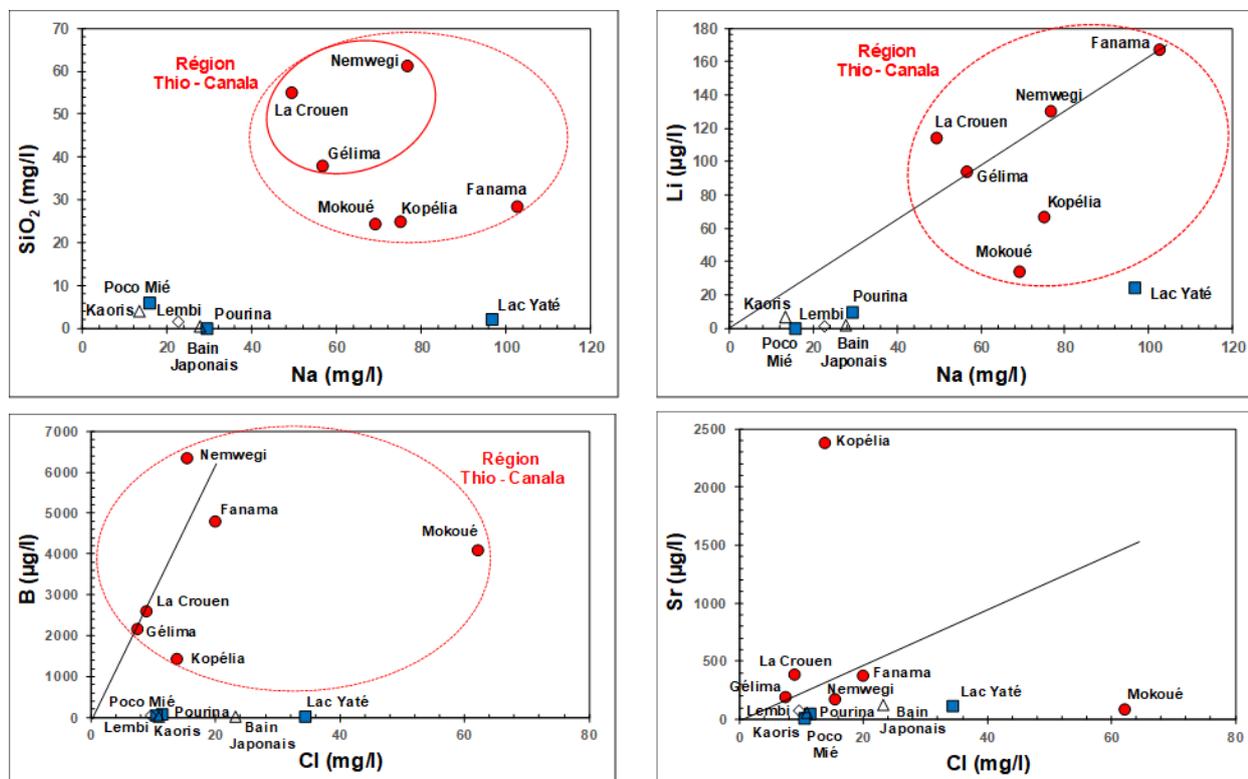


Figure 21 - Diagrammes $\text{SiO}_2\text{-Na}$, Li-Na , B-Cl et Sr-Cl concernant les concentrations des eaux thermales de cette étude.

3.3.2. Diagramme triangulaire Na-K-Mg

Le diagramme triangulaire Na-K-Mg (Giggenbach, 1988) de la figure 22, basé sur l'application de deux géothermomètres chimiques (Na-K et K-Mg) définis à partir de données thermodynamiques concernant plutôt des eaux géothermales très chaudes ($\geq 200^{\circ}\text{C}$) et des minéraux contrôlant les équilibres chimiques bien cristallisés, montrent que la plupart des eaux thermales se retrouvent dans la zone des eaux considérées comme « immatures », n'ayant pas atteint d'équilibres chimiques avec les roches du réservoir.

Néanmoins, on peut constater, sur ce même diagramme, que les eaux de La Crouen, Nemwegi et Gélima sont les seules à se retrouver, avec l'eau thermale du Lac Yaté, dans la zone d'équilibres chimiques partiels. Les estimations de température pour les trois premières eaux sont comprises entre 60 et 100°C . Pour l'eau thermale du Lac Yaté, les estimations de température ne sont pas cohérentes (de 80 à 180°C) et nous verrons que l'application d'autres géothermomètres chimiques donne une estimation de température bien inférieure.

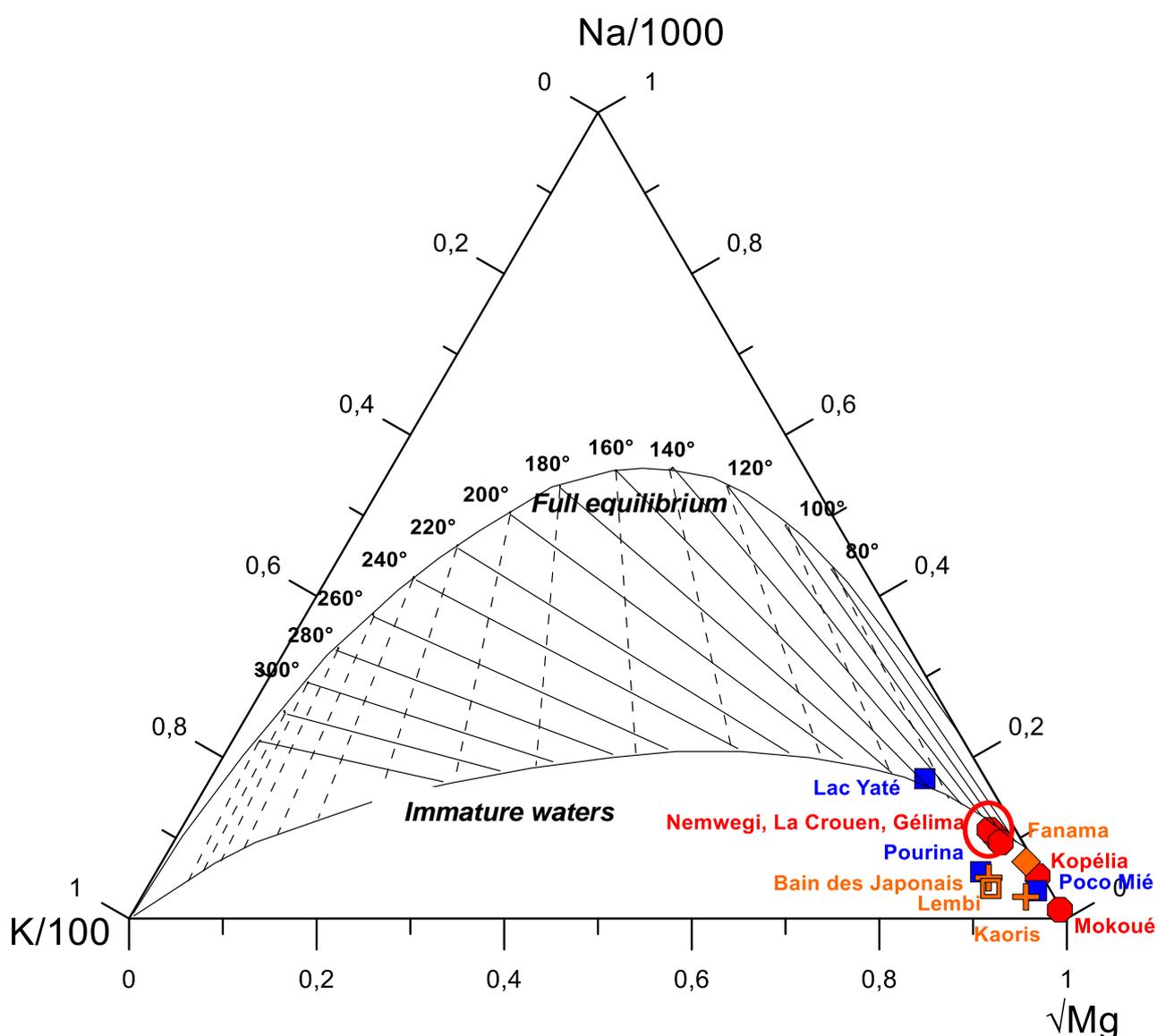


Figure 22 - Diagramme triangulaire Na-K-Mg (Giggenbach, 1988) appliqué aux eaux thermales de cette étude.

3.3.3. Géothermomètres chimiques et isotopiques

Une des applications majeures de la géochimie des eaux pour l'exploration de nouveaux réservoirs géothermiques concerne l'estimation de leur température en utilisant des géothermomètres chimiques et isotopiques. Depuis 1965, des géothermomètres classiques tels que Na-K, Na-K-Ca, Na-K-Ca-Mg, K-Mg, Ca-K, SiO₂ ou $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}-\text{SO}_4}$, basés sur des lois empiriques ou semi-empiriques qui traduisent l'existence de réactions chimiques ou isotopiques à l'équilibre dans des réservoirs profonds à une température donnée, sont utilisés à partir des résultats des analyses chimiques ou isotopiques obtenus sur des échantillons d'eaux thermales ou de forages issues de ces réservoirs.

Malheureusement, les estimations des températures de réservoirs utilisant ces outils classiques ne sont pas toujours concordantes (Michard, 1979 ; Nicholson, 1993 ; Serra and Sanjuan, 2004), si les conditions d'équilibre des réactions n'existent pas dans le réservoir ou ne sont plus respectées entre le réservoir et la surface, après la remontée de l'eau et son refroidissement. Souvent, des processus de mélange avec des eaux superficielles, au cours de la remontée des eaux thermales vers la surface, peuvent venir perturber ces conditions d'équilibre.

Etant donné ces problèmes de discordance et à partir de nombreuses données obtenues dans plusieurs champs géothermiques à travers le monde (Fouillac and Michard, 1981), avec aussi des données de champs pétroliers aux USA (Kharaka and Mariner, 1989), un nouveau géothermomètre auxiliaire Na-Li a été proposé, fondé sur trois relations thermométriques empiriques et statistiques. Ces relations semblent être essentiellement dépendantes de la salinité des fluides et de la nature des roches du réservoir (roches cristallines ou sédimentaires). Vu que la réactivité du lithium est plutôt faible au cours de la remontée des eaux thermales vers la surface, l'application de ce géothermomètre donne souvent des estimations de température profonde plus fiables que celles données par les géothermomètres classiques tels que Na-K. Par contre, le principe de fonctionnement du géothermomètre Na-Li est encore assez mal connu.

Quatre autres relations thermométriques Na-Li pour des milieux bien particuliers (eaux thermales en contact avec des granites en Europe, eaux géothermales d'origine marine en contact avec des basaltes, eaux géothermales peu minéralisées en contact avec des basaltes en Islande, eaux thermales en milieu sédimentaire) ont été, respectivement, définies par Michard (1990) et Sanjuan *et al.* (2014, 2017b). D'autres géothermomètres chimiques auxiliaires tels que Na-Rb, Na-Cs, K-Sr, K-Fe, K-Mn, K-F, K-W ont également été déterminés pour des contextes particuliers, à partir d'une approche statistique (Michard, 1990 ; Sanjuan *et al.*, 2016, 2017b).

Comme le montre le tableau 1, la plupart des principaux géothermomètres connus dans la littérature, allant des géothermomètres chimiques classiques tels que Na-K (Fournier, 1979 ; Michard, 1979 ; Giggenbach, 1988), Na-K-Ca (Fournier and Truesdell, 1973), K-Mg (Giggenbach, 1988), Ca-K (Michard, 1990) et SiO₂ (Fournier, 1977) aux géothermomètres chimiques auxiliaires mentionnés, ainsi que le géothermomètre isotopique $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}-\text{SO}_4}$ (Mizutani and Rafter, 1969 ; Kusakabe and Robinson, 1977), ont été appliqués sur les eaux thermales de cette étude, afin d'estimer la température du réservoir profond dont elles sont issues. Tous les résultats obtenus sont reportés dans ce tableau.

Ces résultats montrent qu'il existe une assez bonne convergence d'estimations de température pour les eaux thermales issues de la région de Thio-Canala. Pour ces eaux, la plupart des géothermomètres, qu'ils soient chimiques ou isotopiques, classiques ou auxiliaires donnent des estimations de température relativement convergentes, ce qui suggère que l'eau profonde ait atteint un état d'équilibre avec de nombreux minéraux des roches du réservoir géothermique.

On trouve ainsi des estimations de température profonde de :

- 85 ± 20°C pour les eaux thermales de La Crouen, Nemwegi et Gélima ;
- 70 ± 15°C pour l'eau thermale de Fanama ;
- 55 ± 15°C pour l'eau thermale de Mokoué ;
- 35 ± 15°C pour l'eau thermale de Kopéla.

La plupart de ces estimations confirment et précisent celles obtenues par Cox *et al.* (1982) pour les eaux thermales de La Crouen et de Fanama. Pour l'eau thermale de Fanama, relativement sulfurée, les géothermomètres isotopiques donnent des valeurs de température profonde surestimées. Pour l'eau thermale de La Crouen, des simulations numériques ont été menées au moyen des codes géochimiques EQ3/6 (Wolery, 1995 ; Wolery and Daveler, 1995) et GEOT (Spycher *et al.*, 2014) et confirment l'estimation de température obtenue en utilisant la plupart des géothermomètres chimiques et isotopiques.

Point de prélèvement	n°	Date	T _{émerg.} °C	pH	T _{Oz} °C	T _{Calculé.} °C	T _{Na-K (1)} °C	T _{Na-K (2)} °C	T _{Na-K (3)} °C	T _{Na-K-Ca (β=4/3)} °C	T _{Na-K-Ca (β=1/3)} °C	T _{Ca-K} °C	T _{K-Mg} °C
La Crouen - Captage	LC-C	05/09/2019 11:15	42,5	9,18	106	84	85	119	140	77	115	81	64
Source Nemwegi	NEM	05/09/2019 13:30	27,0	9,38	112	89	86	120	141	112	126	110	66
Source Kopéla	KOP-2	06/09/2019 11:10	25,3	7,92	72	51	33	73	94	25	73	30	30
Source Mokoué	MOK-1	06/09/2019 12:00	24,7	7,82	71	50	73	106	127	60	103	64	14
Source Gélima	GELI-1	06/09/2019 14:00	29,3	9,32	90	68	85	120	141	85	118	87	62
Fanama	FANA	12/09/2019 10:00	31,4	8,71	77	56	53	83	104	73	94	71	40
Source Pourina	POU-1	10/09/2019 10:00	26,1	11,42			174	223	239	44	152	65	86
Source Poco Mié	PM-1	10/09/2019 11:25	25,1	11,29	23	5	116	155	175	5	106	22	51
Source Lac Yaté	LYAT	10/09/2019 12:20	24,0	11,83	-5	-23	107	144	164	50	119	61	90
Source Bain des Japonais	BJ	11/09/2019 11:00	39,4	10,73	-35	-50	179	229	244	51	157	71	83
Source Kaoris	KAOR	11/09/2019 12:15	31,2	10,95	12	-6	177	226	241	23	143	45	66
Source Lembi	LEMB-2	11/09/2019 16:10	24,0	11,17	-11	-27	209	265	277	60	176	84	85
Source Pévou	PEV	22/03/2019	24,1	8,45	76	55	80	116	136	107	122	139	63

Point de prélèvement	n°	T _{Na-Li (1)} °C	T _{Na-Li (2)} °C	T _{Na-Cs} °C	T _{K-Fe} °C	T _{K-Mn} °C	T _{K-W} °C	T ¹⁸ O _{H2O-SO4 (1)} °C	T ¹⁸ O _{H2O-SO4 (2)} °C
La Crouen - Captage	LC-C	128	67	63	66	108	61	98	80
Source Nemwegi	NEM	107	59	23	33	86	84		
Source Kopéla	KOP-2	70	42	53	38	46	43		
Source Mokoué	MOK-1	43	28	85	46	52	49		
Source Gélima	GELI-1	106	58	65	67	81	59	76	62
Fanama	FANA	105	57	56	72	60	71	128	98
Source Pourina	POU-1	-43	-23		111	126			
Source Poco Mié	PM-1	-63	-37		45				
Source Lac Yaté	LYAT	16	13		103				
Source Bain des Japonais	BJ	-22	-9		111	120			
Source Kaoris	KAOR	46	30		58	114			
Source Lembi	LEMB-2	-29	-14		120	118			

T_{Oz}: Fournier (1977); T_{Calculé.}: Helgeson *et al.* (1978)
 T_{Na-K (1)}: Michard (1990); T_{Na-K (2)}: Fournier (1979); T_{Na-K (3)}: Giggenbach (1988)
 T_{Na-K-Ca}: Fournier and Truesdell (1973).
 T_{K-Mg}: Giggenbach (1988)
 T_{Ca-K}: Michard (1990)

T_{Na-Li (1)}: Fouillac and Michard (1981); T_{Na-Li (2)}: Sanjuan *et al.* (2017b)
 T_{Na-Cs}, T_{K-Fe}, T_{K-Mn}, T_{K-W}: Michard (1990)
 T_{K-Mg}: Sanjuan *et al.* (2017b)
 T¹⁸O_{H2O-SO4 (1)}: Mizutani and Rafter (1969); T¹⁸O_{H2O-SO4 (2)}: Kusakabe and Robinson (1977)

Tableau 1 - Températures profondes estimées pour les eaux thermales de cette étude, à partir des principaux géothermomètres chimiques et isotopiques connus dans la littérature (les températures en rouge sont relativement concordantes).

Pour les eaux thermales du Massif du Sud, il n'existe pas vraiment de concordance entre les différentes estimations de température, ce qui suggère la quasi-absence de réactions d'équilibre chimique dans l'eau des réservoirs dont elles sont issues. En même temps, ce sont des eaux peu minéralisées, principalement constituées de Ca (parfois un peu de Na) en cations, et OH (parfois un peu de Cl) en anions.

Bien qu'il soit difficile, dans ces conditions, de donner des estimations de température profonde, à partir de leur composition chimique (la plupart des géothermomètres chimiques et isotopiques ne sont pas applicables), leur faible minéralisation et leurs basses concentrations en nombreux éléments traces laissent envisager que ces eaux ne sont pas portées à des températures très élevées en profondeur ($\leq 50^{\circ}\text{C}$). Ceci est plus ou moins indiqué par le géothermomètre Na-K-Ca ($\beta = 4/3$), mais dans ces conditions d'application, il est difficile de se prononcer sur la fiabilité des valeurs de température données par ce géothermomètre (tabl. 1).

Pour l'eau thermique de la source Bain des Japonais, des simulations numériques ont été menées au moyen du code géochimique EQ3/6 (Wolery, 1995 ; Wolery and Daveler, 1995) et ont montré que cette eau est, à $39,4^{\circ}\text{C}$ (température d'émergence), proche de la saturation (voire légèrement sur-saturée) vis-à-vis de la forstérite (Mg_2SiO_4), avec un indice de saturation $\text{IS} = 0,37$ ($\text{IS} = 0$ à l'équilibre). Ceci suggère qu'à cette température, on n'est pas très loin des conditions d'équilibre chimique de la réaction suivant laquelle la forstérite se transforme en serpentine, lors de l'altération des péridotites, et que, par conséquent, cette eau n'est pas portée à des températures supérieures en profondeur. Si on exclut un processus important de mélange avec des eaux superficielles, qui pourrait modifier de façon significative la composition chimique de l'eau profonde, on peut considérer que la serpentinisation des péridotites, se fait autour de $40\text{-}50^{\circ}\text{C}$, dans ce cas-là.

Enfin, on peut signaler une relativement bonne concordance des estimations de température autour de $65 \pm 15^{\circ}\text{C}$ pour l'eau profonde de la source thermique Pévou (tabl. 1), localisée sur la côte ouest et prélevée par le SGNC en mars 2019, qui semble être la seule source de cette zone à indiquer une valeur de température aussi élevée.

4. Modèles conceptuels de réservoirs géothermiques

Pour établir ces modèles conceptuels, nous avons utilisé toutes les informations géoscientifiques collectées au cours de l'étude bibliographique (Jeanpert *et al.*, 2019), qui ont été complétées et confrontées aux nouvelles données acquises pendant notre campagne de terrain (Jeanpert *et al.*, 2020). Nous nous sommes également appuyés sur le modèle global conçu par Deville et Prinzhofer (2016), à partir essentiellement des données géologiques existantes et de leurs compositions chimiques et isotopiques de gaz, qui nous permet d'avoir un modèle référent de base sur les principaux sites géothermiques qui nous intéressent (régions de Thio-Canala et du Massif du Sud) et que nous pourrions améliorer, affiner et rectifier par la suite, avec nos propres données obtenues au cours de cette étude.

4.1. MODELE CONCEPTUEL GLOBAL DE BASE PROPOSE PAR DEVILLE ET PRINZHOFER (2016)

Un modèle a été conçu par Deville et Prinzhofer (2016) pour expliquer les compositions chimiques et isotopiques de gaz déterminées sur les sources thermales de La Crouen, dans la région de Canala, et les sources Bain des Japonais (également appelée Carénage) et Kaoris, dans la région de la Baie de Prony. Comme cela a déjà été évoqué, et est illustré dans la figure 23, la composition chimique des gaz associés à ces sources est très différente, tout comme le sont les compositions chimiques de leurs eaux.

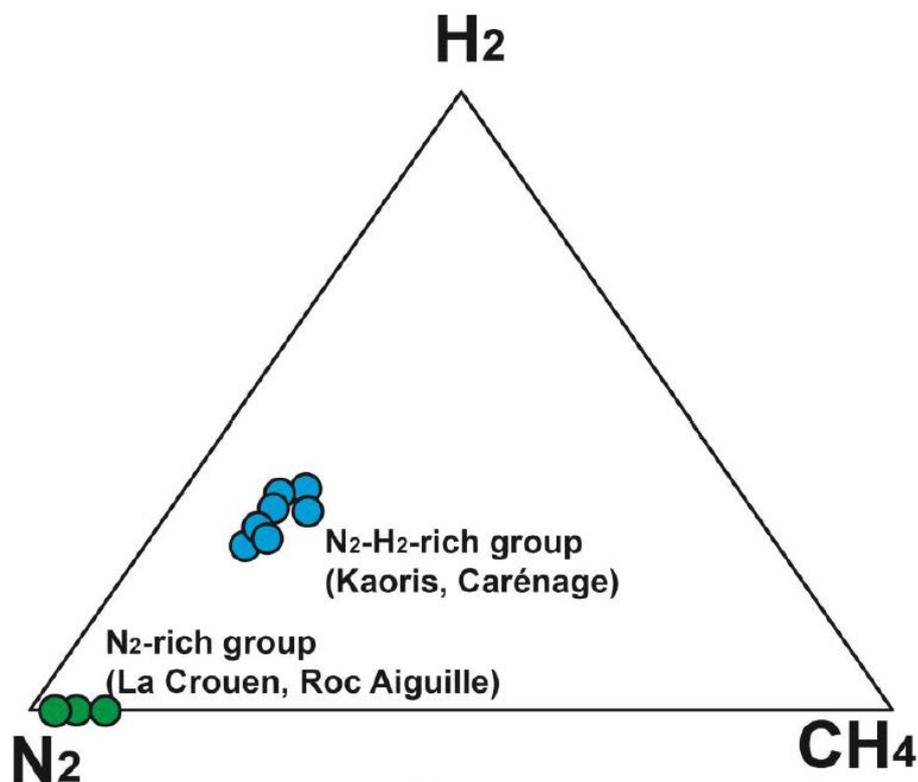


Figure 23 - Diagramme triangulaire N₂-H₂-CH₄ indiquant la composition chimique des gaz associés aux principales sources thermales de la Nouvelle-Calédonie (Deville et Prinzhofer, 2016). 'Roc Aiguille' correspond à l'émergence d'une source hyperalcaline en mer, dans la Baie du Carénage, dans le sud.

Le modèle global conceptuel proposé par Deville et Prinzhofer (2016) est présenté en figure 24.

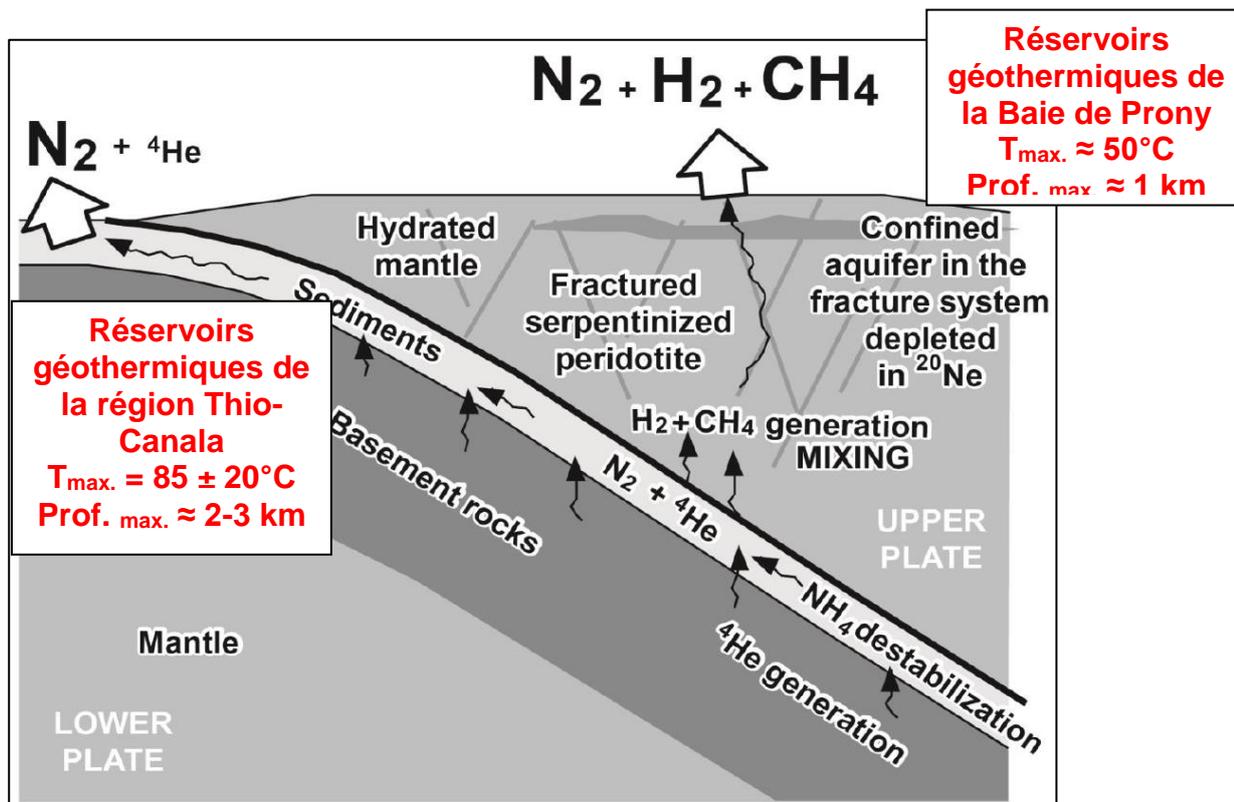


Figure 24 - Modèle global conceptuel pour expliquer les compositions chimiques et isotopiques des gaz des principales sources thermales de la Nouvelle-Calédonie (d'après Deville et Prinzhofer, 2016), complété par les résultats de la présente étude.

Grâce à nos données isotopiques et géothermométriques, nous sommes maintenant en mesure de donner des indications sur les aires de recharge en eau d'origine météorique des réservoirs géothermiques et des estimations sur leur température maximale ($85 \pm 20^\circ\text{C}$ pour la région de Thio-Canala et autour de 50°C pour la région du Massif du Sud), ainsi que des informations complémentaires sur la nature de leurs roches (formations volcano-clastiques pour la région de Thio-Canala et péridotites pour la région du Massif du Sud, confirmées par les données isotopiques de strontium).

Si nous considérons un gradient thermique moyen de $30^\circ\text{C}/\text{km}$ pour la Nouvelle-Calédonie, qui est un gradient thermique de la croûte normal¹, on peut alors estimer que la profondeur de ces réservoirs géothermiques peut atteindre jusqu'à un peu plus de 2 km. Ce serait ainsi le cas pour le réservoir géothermique dont sont issues les eaux thermales de La Crouen, de Nemwegi et de Gélima.

¹ Cox *et al.* (1982) avaient choisi un gradient légèrement supérieur de $35^\circ\text{C}/\text{km}$ pour la région de Thio-Canala, alors que Monnin *et al.* (2014) avaient plutôt considéré un gradient de $20^\circ\text{C}/\text{km}$ pour la région de la Baie de Prony. L'unique mesure de température disponible en Nouvelle-Calédonie a été réalisée sur le forage Cadart de 1900 m de profondeur réalisé dans l'anticlinal de Gouaro près de Bourail sur la côte ouest (France, 2000), nous permet d'estimer le gradient géothermique à $26^\circ\text{C}/\text{km}$, soit un peu plus faible que le gradient « normal ».

Pour les eaux thermales de Kaoris et Bain des Japonais, leur réservoir pourrait être situé plutôt à des profondeurs susceptibles d'aller jusqu'à 1 km, ou moins, car la plupart des réactions associées aux processus de serpentinisation des péridotites, qui dégagent de l'hydrogène, sont exothermiques (dégagement de chaleur).

Rappelons également la présence de granitoïdes mis en place à l'Oligocène (Cluzel *et al.*, 2005), qui affleurent dans le Massif du Sud aux lieux-dits de Koum et Saint-Louis. Cependant, bien que ce plutonisme ait pu générer la circulation de fluides réchauffés, il est trop ancien pour modifier, de façon significative, le gradient géothermique actuel.

4.2. MODELE CONCEPTUEL PROPOSE POUR LES EAUX THERMALES LES PLUS CHAUDES DE LA REGION DE THIO-CANALA

Les informations récoltées au cours de l'étude bibliographique pour cette région (Jeanpert *et al.*, 2019), complétées par celles provenant de la campagne de terrain (Jeanpert *et al.*, 2020), sont utilisées afin de dresser le modèle conceptuel de réservoirs géothermiques pour les eaux thermales de la côte est (fig. 25).

Les données isotopiques et chimiques nous permettent de proposer que les eaux météoriques infiltrées à une altitude de l'ordre de 800 m, dans la Chaîne Centrale, peuvent traverser les formations du socle mésozoïque jusqu'à une profondeur d'environ 2 km. Cela semble être le cas pour les sources thermales de La Crouen, Nemwegi et Gélima. Pour l'eau thermale de Kopélia, cette profondeur de pénétration serait bien moins importante. Pour les sources thermales de Fanama et de Mokoué, alimentées en eau météorique par des aires de recharge situées à des altitudes un peu plus élevées (1000-1100 m) que les sources précédentes, les profondeurs atteintes par l'eau seraient aussi plus faibles. Ces données permettent également d'établir des hypothèses sur les formations traversées en sus des formations du socle, selon la source ; ainsi, les eaux météoriques poursuivent localement leur cheminement jusqu'aux formations du Crétacé (sources de Fanama et de Gélima), voire les formations de Poya dans le cas de la source de Mokoué.

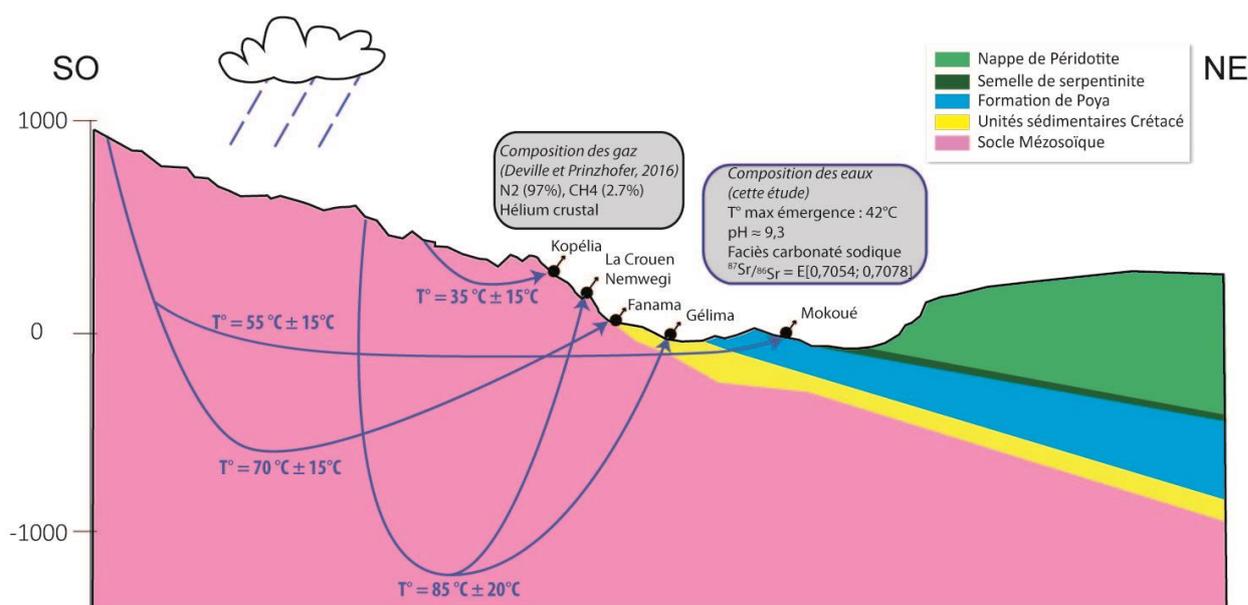


Figure 25 - Modèle conceptuel de réservoirs géothermiques proposé pour les eaux thermales les plus chaudes de la région de Thio-Canala.

Il faut garder présent à l'esprit qu'au cours des temps géologiques, la Nouvelle-Calédonie a été soumise à d'importants mouvements tectoniques, entraînant des déformations intenses de terrains (plissements, zones de broyage, failles, etc.) et que c'est le long de la côte est, entre les massifs de péridotites qui bordent la mer, de Thio à Houaïlou, et les terrains sédimentaires de la Chaîne Centrale situés plus au sud, que se sont imprimés les mouvements les plus violents (Koch, 1958).

Ainsi, dans ce secteur, dans une zone de 50 km de long s'étendant le long de la côte, les levés gravimétriques ont mis en évidence la plus forte anomalie positive signalée en Nouvelle-Calédonie. Cette anomalie pourrait correspondre à un enfoncement presque vertical des péridotites, qui atteindraient une puissance de 8 km.

Les basaltes de Poya sont pincés entre deux grands ensembles : ils sont recouverts, à l'est, par la masse chevauchante des péridotites et surmontent, à l'ouest, les formations de la Chaîne Centrale (assises du Permien et du Trias, siltites micacées charbonneuses, grès volcanoclastiques, etc.). Ces basaltes sont associés à des serpentinites qui affleurent sous la forme d'une semelle marquant le contact avec les péridotites, ou jalonnant les grandes fractures, ou encore sous forme de lambeaux et d'écaillés recouvrant les basaltes.

C'est également dans cette région que l'on rencontre plusieurs importants dykes de quartz ou de brèche siliceuse (listvénite), de quelques mètres de puissance, bordant les formations ultramafiques ou recoupant les terrains environnants, et ayant pour origine la circulation de fluides hydrothermaux riches en silice (Koch, 1958). On y observe également la plus grande densité de filons de quartz, ainsi que d'intenses mylonitisations des grauwackes. C'est aussi, dans cette région, qu'apparaissent les diorites et granodiorites associées aux roches basalto-andésitiques.

C'est également dans cette région que l'on note la plus grande variété de la minéralisation calédonienne (Koch, 1958). En dehors de la chromite, de la garnierite et de l'asbolite cobaltifère, fréquentes dans les roches ultrabasiques, des minéralisations exceptionnelles ont été signalées dans les péridotites : pyrite, chalcopyrite, pentlandite, heazlewoodite et millérite. Dans les importants dykes de brèche siliceuse, on a signalé de la pyrite, de l'or, de la stibine et du cinabre ; dans les roches sédimentaires et les filons de quartz qui les recoupent, on trouve de la pyrite aurifère ; dans les roches volcaniques basalto-andésitiques, on a découvert, en dehors du manganèse et de la chalcopyrite habituels, des indices de scheelite et de cinabre.

La plupart des sources thermales de cette région sourdent au sein de formations volcano-sédimentaires triasiques-liasiques (passées de schistes bleu noir, parfois pyriteux, parallèles à la direction structurale du socle constituant un véritable « drain thermal » au fond du Val Pierrette, diaclases affectant les mylonites qui recouvrent les schistes du sud dans le lit de la rivière Crouen, schistes de la vallée pour la source Kopélia, argillites, grès ou grauwackes probablement métamorphisés que l'on peut rattacher à l'ensemble de la Chaîne Centrale pour les sources de Gélima, présence de serpentinites qui recoupent les basaltes et de listvénites pour les sources de Mokoué, etc.). La zone des sources de Gélima et de Mokoué se situe dans l'ensemble des basaltes, intercalé entre les terrains de la nappe des péridotites et les formations de la Chaîne Centrale.

Trois directions principales d'accidents structuraux majeurs peuvent être mises en évidence dans cette région :

- une direction principale NO/SE très fréquente en Nouvelle-Calédonie, suivie par les grands ensembles géologiques sous la forme de larges bandes, et qui structure plus particulièrement les massifs de péridotites et les formations de la Chaîne Centrale. Les lames siliceuses s'étirent également suivant cette direction ;

- une direction secondaire avec une famille de linéaments N10 à N30, qui se retrouve de manière particulièrement dense au niveau des basaltes affleurant au sud de Canala et de Gélima ;
- une dernière direction N160 plus discrète, qui se manifeste notamment à proximité de la zone de contact entre les basaltes et les formations de la Chaîne Centrale.

4.3. MODELE CONCEPTUEL PROPOSE POUR LES EAUX THERMALES DE LA BAIE DE PRONY

Ce modèle conceptuel repose, en grande partie, sur celui proposé par Monnin *et al.* (2014), qui reprend la plupart des informations existantes et a été complété avec les données obtenues au cours de cette étude.

Les zones de recharge du réservoir par les eaux météoriques se situent à l'altitude maximale de 800 m, et traversent les formations de gabbros qui apportent le calcium absent des formations péridotitiques sous-jacentes. La profondeur maximale des eaux est de l'ordre de 1 km, si l'on considère les températures estimées par les géothermomètres, avec un gradient géothermique normal, et qu'il n'existe pas de processus de mélange important avec des eaux plus superficielles. La profondeur de la semelle de serpentinite liée à l'obduction n'étant pas connue actuellement, les caractéristiques chimiques des sources semblent confirmer que l'épaisseur de la nappe des péridotites dans le Massif du Sud dépasse le kilomètre. Les eaux chargées en calcium qui émergent en surface sont à l'origine des carbonates de calcium déposés en surface, accompagnés du dégazage de H₂.

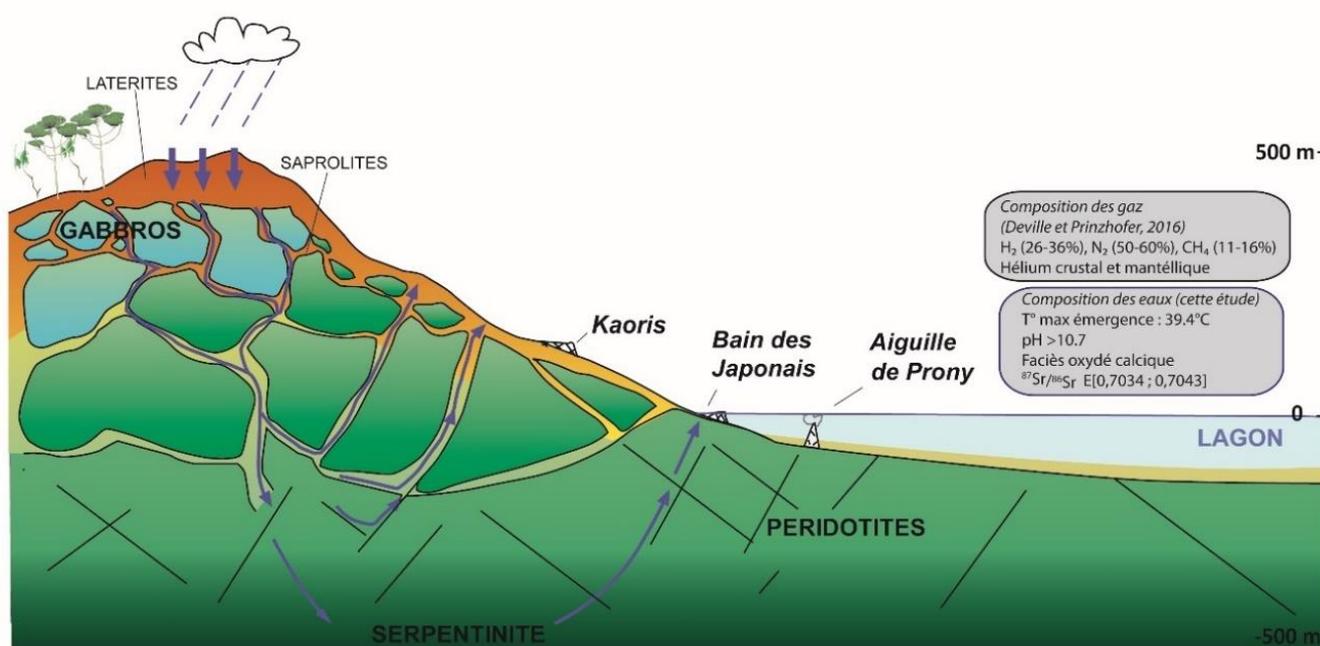


Figure 26 - Modèle conceptuel de réservoirs géothermiques proposé pour les eaux thermales de la région de la Baie de Prony.

5. Potentialités géothermiques de la Grande Terre

5.1. USAGES POSSIBLES DE LA GEOTHERMIE

Cette étude a non seulement permis de valider l'existence d'eaux thermales dont la température à l'émergence pouvait atteindre 42°C dans la région de Canala et 39°C dans la région de la Baie de Prony, mais elle a aussi confirmé que ces mêmes eaux sont très probablement issues de réservoirs géothermiques profonds portés à des températures pouvant aller jusqu'à 85 ± 20°C, dans la région de Canala, et environ 50°C, dans la deuxième région. En considérant un gradient géothermique moyen normal (30°C/km), cela représente une localisation du réservoir autour de 2 km de profondeur pour le premier cas, et à environ 1 km pour le second.

Même si cela était prévisible, il est clair que, d'après cette étude, il n'existe pas d'indices en surface de ressources géothermiques de haute température en Nouvelle-Calédonie. Bien évidemment, la gamme de température trouvée limite les usages de la géothermie (fig. 27), et si l'on veut dépasser une température de 50°C, on voit qu'il sera nécessaire de réaliser des forages relativement profonds, ce qui représente tout de suite un coût très important pour les projets.

Géothermie - Applications industrielles

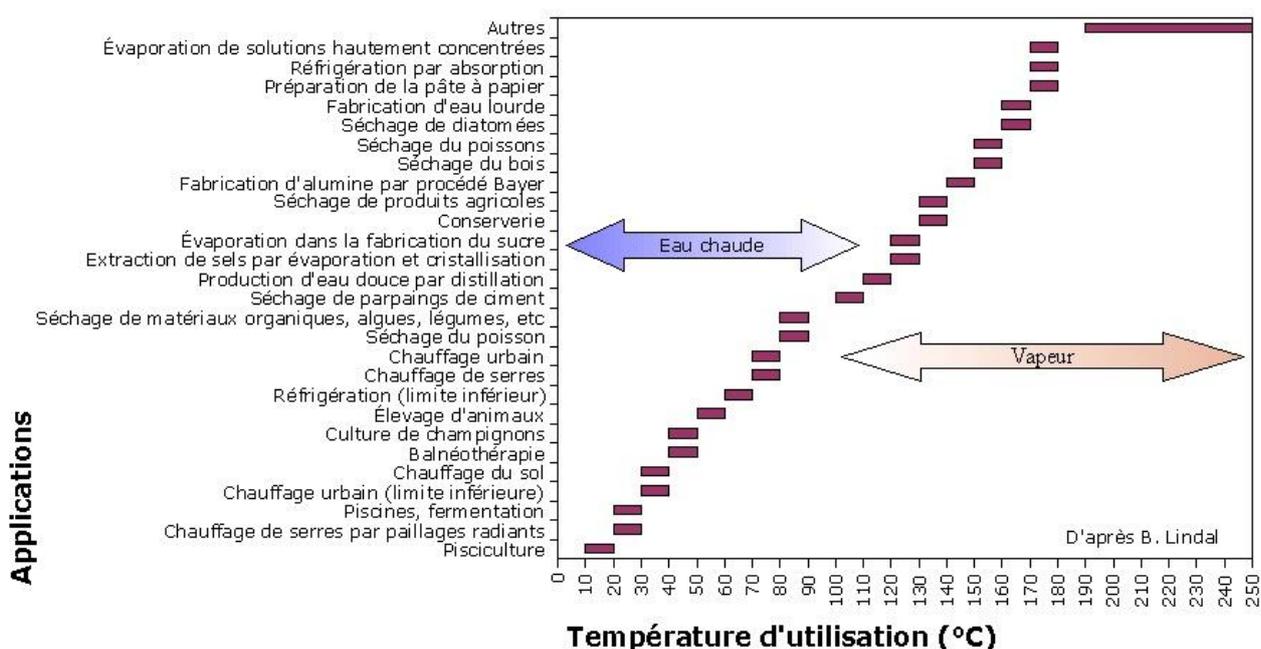


Figure 27 - Diagramme de Lindal.

Si pour le développement de la géothermie, la température est un paramètre clé, il n'en demeure pas moins que la production d'eau chaude, qui va dépendre de la perméabilité (débit d'eau extractible), la capacité (volume d'eau) et la recharge (alimentation en eau) du réservoir, est aussi un facteur clé pour exploiter une ressource géothermale.

Si on peut avoir assez rapidement une idée de la température de la ressource après des travaux d'exploration géothermique, les autres paramètres clés s'obtiennent plutôt après la réalisation d'essais de production sur ouvrages.

Ainsi, dans le cas présent, les rares informations hydrogéologiques que l'on possède sur les sources thermales les plus chaudes de la région de Canala est que leur débit peut atteindre une dizaine de m³/h, et que c'est surtout la fracturation des roches qui va guider la perméabilité du milieu.

Cette perméabilité peut dépendre de nombreux facteurs. Par exemple, il va de soi que si de nombreuses failles sont colmatées par des dépôts de minéraux d'altération hydrothermale, cette perméabilité sera diminuée. Le degré d'incertitude des perméabilités et des porosités des formations de la Chaîne Centrale, des sédiments du Crétacé, des péridotites et des basaltes reste fort. En effet, il existe peu de forages sur les formations de la Chaîne Centrale et les valeurs de perméabilité intrinsèque extraites de la BDSSNC² sont comprises entre 10⁻¹⁰ et 10⁻¹³ m².

Espirat (1967) évalue à 10⁻¹² m² la perméabilité des grauwackes altérés. En profondeur, les nombreuses fissures qui les parcourent contribuent probablement à une perméabilité du même ordre de grandeur. Les formations sédimentaires du Crétacé affleurent peu sur le secteur et les perméabilités attendues sur cette formation sont également proches de 10⁻¹² m² (Espirat, 1967). Enfin, les perméabilités de la formation des basaltes de Poya sont assez faibles mais variables, comprises entre 10⁻¹⁴ et 10⁻¹² m², caractéristiques des horizons fracturés, et les valeurs les plus élevées correspondent aux niveaux altérés. Les perméabilités des péridotites saines sont de l'ordre de 10⁻¹⁵ m² et proches de 10⁻¹² m² dans les horizons altérés saprolitiques (Jeanpert *et al.*, 2019). Ainsi, les réservoirs potentiels des sources thermales sont globalement peu perméables, mais restent proches des valeurs de perméabilité des réservoirs géothermaux du Dogger en région parisienne ($k = 10^{-12}$ m²).

En dehors des paramètres clés pour le développement de la géothermie, il faut également penser aux infrastructures qui seront nécessaires pour l'exploitation et l'acheminement de cette ressource (éviter les zones inaccessibles ou trop éloignées de la population). Dans la région de Canala, il n'existe pas de centres industriels importants, et dans la région de la Baie de Prony, la ressource est moins intéressante au niveau de la température.

D'après les températures d'émergence des sources existantes, on voit que, parmi les possibles activités à développer (fig. 27), la balnéothérapie/le thermalisme semblent être un usage à privilégier, étant donné que ce développement ne requiert pas d'investissements démesurés. De fait, une station thermale existait déjà, par le passé, à La Crouen, mais n'est plus en activité. De nouveaux projets de thermalisme touristique ont été envisagés sur ce site (Kecho, 2004, dans Jeanpert *et al.*, 2020) et sur d'autres sites tels que ceux de Gélima et de Mokoué (Mairie de Canala, 2007 ; 2008 ; GEOIMPACT, 2013), ainsi que de Kaoris (A2EP, 2000), mais n'ont, pour l'instant, pas vu le jour.

A ces basses températures, quelques applications agricoles (cultures sous serres) ou industrielles (fig. 27) pourraient également être développées en fonction des opportunités et des besoins exprimés. L'exploitation de la chaleur pour la distribution d'eau chaude n'est pas appropriée à cause de l'absence de réseaux de transport et du coût de réalisation de ces derniers, peu concurrentiels avec le solaire.

² BDSSNC = Base de Données du Sous-Sol de Nouvelle-Calédonie recensant tous les ouvrages souterrains de plus de 10 m de profondeur et leurs caractéristiques géologiques et hydrodynamiques. Cette BDD est gérée par le SGNC/DIMENC.

En raison de la présence de H₂S associée aux eaux thermales de la région de Thio-Canala et de l'existence de valeurs de pH très élevées pour les eaux du Massif du Sud, l'usage de ces eaux pour la consommation ou l'embouteillage n'est pas du tout recommandé.

Par ailleurs, dans le cadre du projet INTERREG V - Transition Énergétique Caraïbes (TEC), qui a démarré cette année et a une durée de 3 ans, le BRGM souhaite réactualiser les connaissances et la réflexion sur les usages thermiques i) du proche sous-sol, au-delà de la géothermie superficielle conventionnelle, dite de géothermie très basse énergie, et ii) des environnements côtiers, souvent dénommés "géothermie marine" aux Antilles (cf. encadré ci-dessous pour davantage de détails). Les techniques géothermiques concernées peuvent utiliser l'eau souterraine (par pompage et réinjection après échange thermique) ou directement les formations rocheuses (par échangeurs en boucles fermées), tant pour des usages de production de chaleur et de rafraîchissement que pour des usages de stockage périodique de chaleur, par exemple issues de sources solaires ou de chaleur fatale³.

La Guadeloupe sera le principal terrain de jeu de ce projet. En se basant sur quelques sites d'étude (zones pilotes) spécifiques de cette île (milieu carbonaté, milieu volcanique, milieu littoral, ...) et représentatifs de la diversité géologique et hydrogéologique des Petites Antilles, cette « action » a pour objectif de requalifier les milieux superficiels au regard de leurs propriétés thermo-physiques propices au développement de la géothermie de surface aux Antilles. Ces zones pilotes seront donc évidemment sélectionnées également au regard des intérêts économiques qu'elles représentent. En particulier, il s'agira d'estimer la pertinence d'usages innovants de la géothermie, tels que la production simultanée de chaud (pour des processus agricoles ou agroalimentaires) et de froid (stocké en proche sous-sol), etc.

Des mini-atlas de potentialités géothermiques et d'opportunités économiques seront alors proposés pour ces zones pilotes. Pour ces dernières, il s'agira ensuite, en collaboration avec des acteurs technico-économiques, d'esquisser les contours de systèmes énergétiques pouvant tirer parti des opportunités mises en évidence, avec l'objectif de susciter des initiatives (expérimentations, démonstrateurs, opérations ...) et de préciser les enjeux économiques et financiers.

L'approche sera pluridisciplinaire, intégrant les problématiques scientifiques (caractérisation géologique et hydrogéologique), environnementales (impacts sur la ressource et cadre législatif), techniques et économiques en s'appuyant sur les travaux de recherche et de développement existants dans les zones pilotes. Les conclusions de cette étude d'opportunité viseront la mise en évidence de contextes favorables au développement des usages thermiques du proche sous-sol et de ses extensions dans l'environnement côtier. Notamment en prenant en considération les possibilités de combinaison de cette géothermie de surface avec d'autres EnR, l'ambition sera de proposer divers leviers pour lever les actuels verrous scientifiques, techniques ou économiques qui en freinent le développement aux Antilles. La démarche et les résultats de cette étude pourront également être utilisés, en partie, sur la Nouvelle-Calédonie.

³ Par chaleur fatale, on entend une production de chaleur dérivée d'un site de production, qui n'en constitue pas l'objet premier, et qui, de ce fait, n'est pas nécessairement récupérée.

A des températures supérieures à 50°C, il faudra tenir compte, dans les projets industriels, du coût des forages relativement profonds qu'il faudra réaliser, qui devient vite un poste de dépenses important et devra être considéré dans les calculs de rentabilité des études de pré faisabilité de ces projets.

A notre avis, une piste qui mériterait d'être explorée serait de pouvoir coupler le développement de plusieurs usages de la géothermie, afin de rendre les projets plus attractifs et plus rentables.

Ainsi, il serait intéressant d'examiner, dans la région de Canala, si la production d'électricité à partir d'un module binaire ORC⁴ à 80-85°C, quoique limite, pourrait être couplée avec une activité touristique de type balnéothérapie/thermalisme. Des contacts ont été pris avec la société française ENOGIA, basée à Marseille, un des rares spécialistes mondiaux en systèmes binaires ORC à basse température pour produire de l'électricité (fig. 28).

Il est certain que la réalisation de forages profonds de 2000 m constitue plutôt un frein, mais si leurs débits dépassaient 300 m³/h et une température de 80°C était atteinte, on pourrait envisager l'installation d'un module ORC d'environ 700 kW_e, d'une durée de vie de 20 à 30 ans et sans maintenance particulière.

Ceci pourrait permettre d'alimenter en électricité une partie de la population de la commune de Canala. Bien sûr, une étude de pré faisabilité reste nécessaire car il faudrait intégrer les coûts de forages profonds (important poste budgétaire) et de mise en place de la station thermique, ainsi que les recettes financières apportées par le thermalisme.

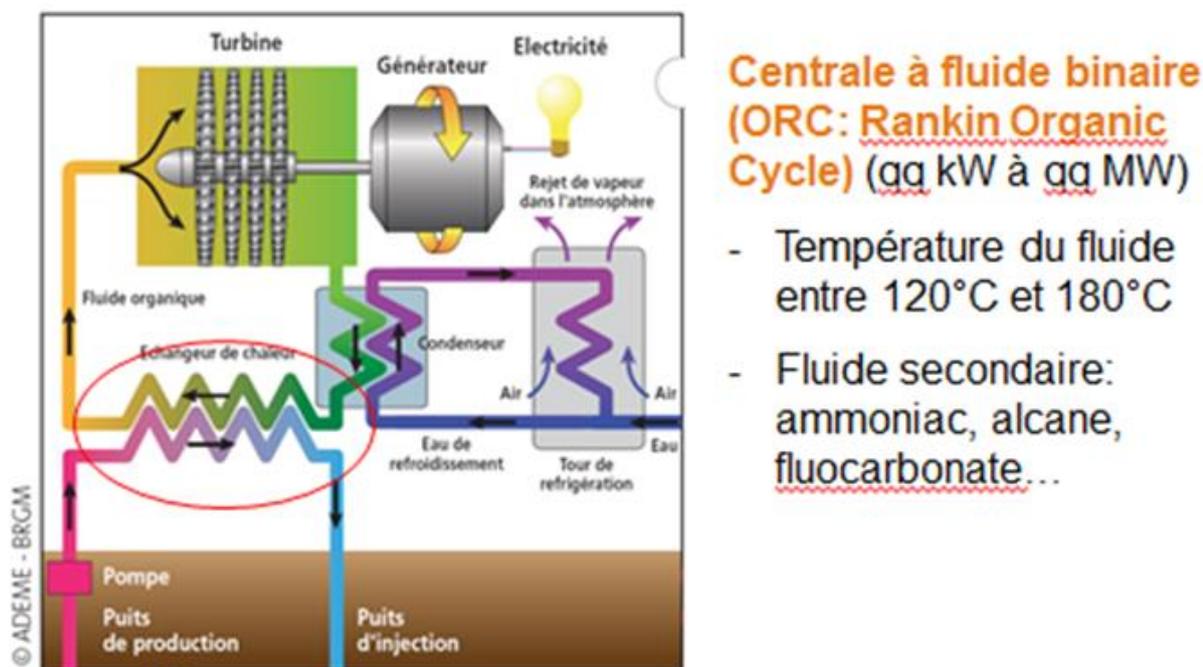


Figure 28 - Schéma d'un module ORC à basse température (à partir de 80°C) de la société ENOGIA pour la production d'électricité.

⁴ Une machine à Cycle Organique de Rankine appelée aussi ORC (pour Organic Rankine Cycle en anglais) est une machine thermodynamique produisant de l'électricité, à partir de chaleur (eau chaude dans le cas de la géothermie), en utilisant un cycle thermodynamique de Rankine mettant en œuvre un composé organique comme fluide de travail.

Il existe très peu d'exemples dans le monde de production d'électricité à partir de ressources géothermales à basse température, notamment entre 80 et 100°C car, d'une part, le rendement électrique des modules ORC chute avec les températures décroissantes (< 10 % dans la gamme 80-100°C, qui est la gamme limite) et les débits doivent être très élevés (≥ 300 m³/h), ce qui demande la réalisation de puits de grand diamètre et, d'autre part, le coût des forages profonds devient vite un obstacle économique. Néanmoins, l'exemple singulier de la centrale ORC de 1 MWe, à Chena, en Alaska, mise en place par la société Aqylon, qui opère avec une ressource géothermale de 100°C, mérite d'être cité (cf. encadré ci-dessous pour plus de détails).

A Chena, les volumes de fluides nécessaires sont particulièrement élevés (450 m³/h) et le rendement électrique est relativement faible (< 7 %). Le tableau 2 présente les principales caractéristiques de fonctionnement de cette centrale, voisine de sources thermales qui se trouvent en bordure d'un pluton granitique.

Toujours à Chena, en Alaska, il existe aussi une autre centrale ORC qui produit de l'électricité en utilisant une ressource géothermale à 74°C, à partir de trois modules ORC (fig. 29), avec une puissance brute de 730 kWe et nette de 500 kWe. L'ensemble de cette opération a coûté de l'ordre de 2 M US\$ (4000 US\$/kWe installé), mais offre un taux de disponibilité de 95 %.

On peut, cependant, souligner que le cas de Chena, en Alaska, est très particulier car :

- les ressources géothermales sont peu profondes (seulement 200 m) et les coûts de forages de production et de réinjection ont été « anormalement » réduits ;
- la zone bénéficie d'une source de refroidissement (air ou eau) continue à 4°C, en moyenne, pendant toute l'année, ce qui a pour conséquence de maintenir un écart de température maximum dans le cycle ORC et améliore, bien évidemment, son taux de rendement ;
- les coûts des infrastructures pour la construction de la centrale ont été très bas ;
- ce projet était un site pilote et a bénéficié de modules ORC spécifiquement construits pour ce projet et non disponibles sur le marché.

	Parameters	Unit	ORC Module
			ATM-1000L
Electrical performances	Gross electrical production (with nominal heat values), up to	kWe	1066
	Net electrical production (with nominal heat values), up to	kWe	1000
	Self consumption	%	6,19%
	Voltage - Frequency	V - Hz	400V - 50Hz 480V - 60Hz
	Electrical efficiency	%	6,77%
Hot circuit - Pressurized water	Thermal power requested for the hot circuit	kWth	15 750
	Inlet temperature on the hot circuit	°C	100
	Outlet temperature of the hot circuit	°C	70
	Water flow rate	kg/s	125
Cold circuit - cold water	Thermal power available on the cold circuit	kWth	14 600
	Inlet temperature on the cold circuit	°C	30
	Outlet temperature on the cold circuit	°C	40
	Water flow rate	kg/s	350

Tableau 2 - Caractéristiques de fonctionnement de la centrale ORC Aqylon ATM-10006L de 1 MWe net (source : entreprise Aqylon).

L'objectif du programme d'exploration géophysique est de mettre en œuvre des outils d'imagerie afin de cartographier la géométrie des formations géologiques dans la région de Canala, et ainsi, de mieux définir la géométrie du réservoir géothermique et de mieux estimer son potentiel. Parmi les formations géologiques à étudier, nous retiendrons :

- le socle mésozoïque,
- la couverture sédimentaire cénozoïque,
- la nappe de péridotite obductée.

Ces formations présenteraient *a priori* des contrastes de propriétés physiques importants (Maurizot *et al.*, 2007), avec notamment un socle et une nappe de péridotites généralement plus denses et électriquement résistants (car moins poreux) que la couverture sédimentaire, plus légère et électriquement plus conductrice (car plus poreuse et pouvant héberger des fluides). Nous recommandons, par conséquent, de considérer des levés gravimétriques et électromagnétiques, afin de cartographier les variations de densité et de résistivité électrique sur la région de Canala, et ainsi, construire une image tridimensionnelle du sous-sol étudié.

5.2.1. Acquisitions gravimétriques

Les mesures gravimétriques existantes sur la Nouvelle-Calédonie (fig. 30) ne sont pas suffisamment denses au niveau de la région de Canala pour pouvoir obtenir une image précise des contrastes de densité des formations ciblées. Nous recommandons donc d'acquérir de nouvelles données gravimétriques avec une maille plus fine (un point tous les kilomètres) pour couvrir la zone d'intérêt (~10 x 10 km = 100 km²). Un budget compris entre 40 et 50 k€ serait nécessaire à l'acquisition et au traitement de telles données.

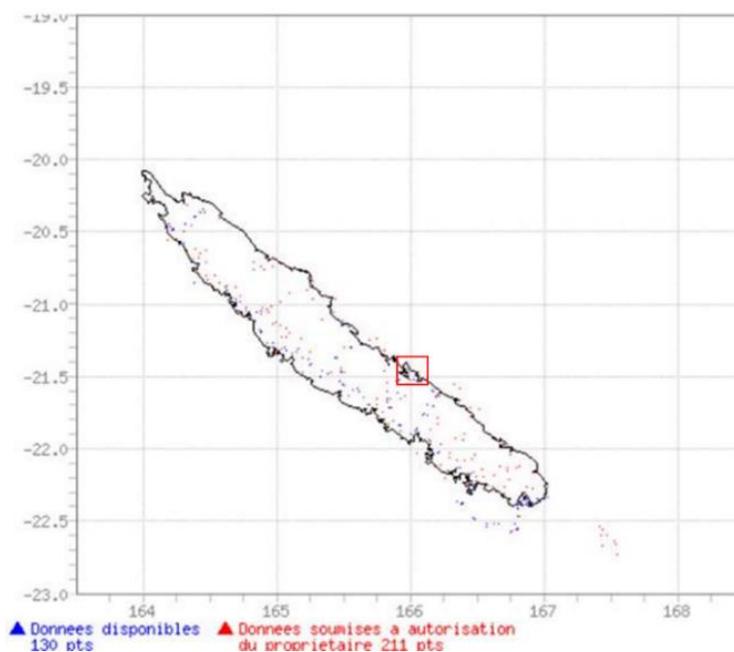


Figure 30 - Données gravimétriques disponibles (tirées de la Banque de données internationales).

5.2.2. Acquisitions électromagnétiques

Aucune donnée magnéto-tellurique (MT) n'est *a priori* disponible sur la zone d'intérêt. Nous recommandons donc d'effectuer des levés MT, avec un maille d'environ 2 km, sur une zone d'environ 10 x 10 km = 100 km² (fig. 31), afin d'obtenir une image précise des contrastes de résistivité électrique des formations ciblées et éventuellement identifier une signature des fluides géothermaux jusqu'à une profondeur d'une dizaine de kilomètres. Un budget compris entre 130 et 150 k€ serait nécessaire à l'acquisition et traitement de telles données.

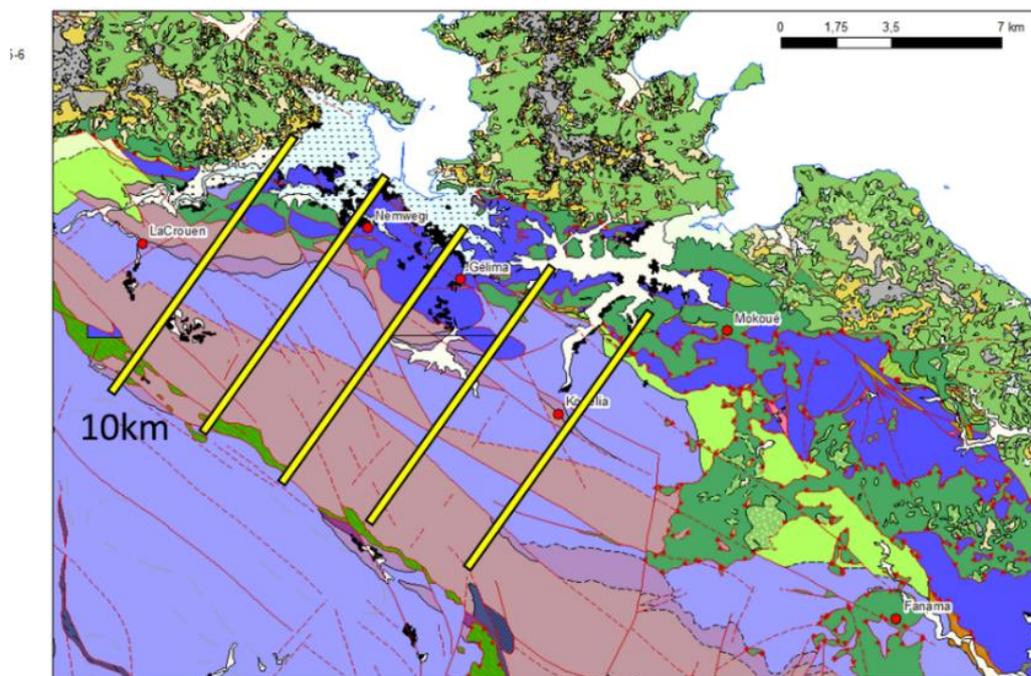


Figure 31 - Proposition d'acquisition de profils MT sur la région de Canala.

5.2.3. Intégration géophysique - modélisation géologique 3D

Afin d'interpréter au mieux les données géophysiques, un modèle géologique numérique 3D sera construit en collaboration avec le SGNC. En effet, ce modèle servira à intégrer toutes les observations géo-scientifiques (géologie, géochimie et géophysique) tout en permettant de tester les différentes hypothèses sur la présence d'une ressource géothermale. Un budget compris entre 30 et 40 k€ serait nécessaire à la réalisation d'un tel modèle.

5.2.4. Synthèse

Tâche	Budget
1. Gravimétrie	40 - 50 k€
2. Electromagnétisme	130 - 150 k€
3. Intégration - modélisation	30 - 40 k€
TOTAL	200 - 240 k€

5.3. OPPORTUNITES D'AMELIORATION DES CONNAISSANCES DU SOUS-SOL

Les sondages existants sont tous à une profondeur maximum de 200 m, sauf pour la région de Bourail (1 900 m). Il est certain que la réalisation de forages profonds en Nouvelle-Calédonie, accompagnés de travaux scientifiques, permettrait d'améliorer nettement la connaissance du sous-sol de cette île.

Le projet CNRT « Stockage géologique du CO₂ en Nouvelle-Calédonie » (Bénézeth *et al.*, 2014), réunissant plusieurs institutions scientifiques, s'était terminé, entre autres, par la rédaction d'un cahier des charges, qui proposait un programme de recherche d'environ 47 M€, et dans lequel figurait la réalisation de forages profonds. Il va de soi que si un tel programme voyait le jour (ou même un programme un peu moins ambitieux), le développement de la géothermie sur l'île pourrait également en bénéficier, à coup sûr. Ceci permettrait de diminuer nettement les risques d'échec liés aux forages, qui constituent l'un des principaux freins au développement de la géothermie profonde.

De même, un programme de forages multi-sites on-shore et off-shore est en cours de construction auprès des deux organismes qui coordonnent les forages scientifiques internationaux : ICDP et IODP. Si le projet a pour ambition d'étudier les mécanismes de la serpentinisation à basse température, le(s) forage(s) profond(s) réalisé(s) par ICDP (International Continental Scientific Drilling Program) fourniraient une très bonne opportunité pour l'amélioration des connaissances géologiques du sous-sol en vue de son exploitation minière ou énergétique.

6. Conclusion

L'inventaire des sources thermales de la Nouvelle-Calédonie, établi lors de la première phase de ce projet, et la campagne d'échantillonnage des principales eaux thermales de la Grande Terre, menée par le BRGM et le SGNC en septembre 2019, au cours de la seconde phase du projet, ont confirmé que les températures maximales à l'émergence de ces sources sont de 42,5°C pour La Crouen, dans la région de Canala, et de 40°C pour Bain des Japonais, dans la région de la Baie de Prony. Ils ont également permis d'échantillonner, pour la première fois, des sources thermales telles que Nemwegi et Kopéla, dans la région de Canala, et Pourina, Poco Mié, dans le Massif du Sud, sur la côte Oubliée.

Les résultats des analyses chimiques et isotopiques réalisées dans les laboratoires du BRGM et de l'Université de Montpellier ont montré que deux types d'eaux très différents caractérisent les eaux thermales étudiées :

- les eaux bicarbonatées sodiques de la région de Thio-Canala, les plus riches en silice, en Li, en B et en autres éléments traces (F, Cs, Ge, W, As), avec des valeurs de pH comprises entre 7,8 et 9,4, qui dégagent du sulfure d'hydrogène, de l'azote et un peu d'hélium d'origine crustale. A l'émergence des sources, on observe souvent des dépôts de gel et de filaments associés, de couleur blanchâtre et/ou verdâtre, très probablement constitués de soufre, de gypse et d'argiles (interstratifiés smectites/illite) ;
- les eaux Ca (Na) - OH (Cl) hyperalcalines du Massif du Sud, dépourvues de bicarbonates, carbonates, sulfates, magnésium et silice, qui émergent des péridotites, en dégageant de l'hydrogène (altération de fayalite et de forstérite, au cours de la serpentinisation des péridotites) et du méthane.

Cette étude a permis également de réaliser, pour la première fois, des analyses de certains éléments traces (Rb, Cs, W, Ge, etc.) et de certains isotopes (^{18}O et ^{34}S des sulfates dissous, ^{34}S des sulfures dissous, rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) sur ces eaux. Les rapports isotopiques de Sr confirment que le deuxième type d'eaux thermales interagit bien avec des péridotites dans leurs réservoirs profonds, tandis que le premier type est plutôt en contact avec des roches volcano-sédimentaires métamorphisées (shistes, grès, siltites, etc.).

Les valeurs des isotopes stables de l'eau montrent que toutes les eaux thermales sont d'origine météorique, avec des aires de recharge différentes, suivant la localisation des sources dans la Chaîne Centrale ou des péridotites dans le Massif du Sud.

Les géothermomètres chimiques classiques et certains auxiliaires, ainsi que le géothermomètre isotopique $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}-\text{SO}_4}$, permettent d'estimer la température des réservoirs géothermiques profonds d'où sont issues ces eaux.

On constate que la température profonde la plus élevée ($85 \pm 20^\circ\text{C}$) a été estimée pour les sources de La Crouen, Nemwegi et Gelima. Pour l'eau de Fanama et de Mokoué, ces températures sont inférieures ($70 \pm 15^\circ\text{C}$ et $55 \pm 15^\circ\text{C}$, respectivement). Etant donné la valeur proche de la normale du gradient géothermique terrestre ($30^\circ\text{C}/\text{km}$), ceci correspond à des profondeurs de circulation des fluides maximales de l'ordre de 2 km.

On conclut que les températures profondes des eaux thermales du Massif du Sud sont autour de 50°C, même si leur température est plus difficile à estimer en raison des faibles salinités de leurs eaux ainsi que de leur composition chimique, et que l'on exclut des processus importants de mélange avec des eaux plus superficielles, qui viendraient modifier de façon significative leur composition chimique. La circulation de ces fluides serait donc relativement superficielle (de l'ordre d'un kilomètre de profondeur).

Une estimation de température de $65 \pm 15^\circ\text{C}$ a été faite pour l'eau profonde de la source thermique Pévou, localisée sur la côte ouest près de Poya, et prélevée en mars 2019 par le SGNC, qui serait la seule source de cette zone à indiquer une température aussi élevée.

L'étude confirme la plupart des résultats antérieurs et l'absence d'indices de ressources géothermales de haute température. Etant donné la gamme restreinte de températures (de 24 à 42,5°C sans trop de travaux onéreux et de 50 à 85°C, avec des forages profonds de 1-3 km, par contre, très coûteux), les applications de la géothermie deviennent moins nombreuses, même si la balnéothérapie/le thermalisme semblent être de bons candidats, ce type d'activités ayant d'ailleurs déjà existé à La Crouen.

Une piste qui pourrait être explorée pour rendre les projets plus attractifs et rentables est l'utilisation multiple de la géothermie et la combinaison de production d'électricité, moyennant un module ORC (Organic Ranking Cycle), avec l'exploitation d'une station thermique, dans la région de Canala, qui pourrait constituer une première expérience, après, bien sûr, la réalisation d'études de surface complémentaires et une étude de préfaisabilité.

Un cahier des charges proposant un programme scientifique, constitué principalement d'exploration géologique et géophysique, pour poursuivre le développement de projets de géothermie en Nouvelle-Calédonie, si l'intérêt demeure, a été élaboré en fin de rapport. La structure du socle mésozoïque doit notamment être investiguée pour être mieux définie.

D'autres projets tels que celui de stockage souterrain de CO₂ ou le programme ICDP, dans lesquels la réalisation de forages profonds est proposée, pourraient également bénéficier à la connaissance géologique du sous-sol et au développement de la géothermie de l'île, à frais réduits.

7. Bibliographie

- A2EP (2000) - Etude de la source du ruisseau des Kaoris, Baie de Prony. *Rapport technique A2EP NCH 00/02 01*, 7 p.
- Barnes I., O'Neil J.R. (1978) - Present day serpentinization in New Caledonia, Oman and Yugoslavia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 42, 144-145.
- Bénézech P., Godard M., Thinon I., Maurizot P., Gouze Ph., Wolff-Boenisch D., Laurent J., Cluzel D., Audigane P., Monnin Ch., Augé Th., Ménez B., Baby P., Kelemen P. (2014) - Stockage géologique du CO₂ *in situ* en Nouvelle-Calédonie. *Rapport final CNRT Nickel et Environnement-2013*, 128 p.
- Burke W.H., Denison R.E., Hetherington E.A., Koepnick R.B., Nelson H.F., Otto J.B. (1982) - Variation of seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr throughout Phanerozoic time. *Geology*, v. 10, 516-519.
- Cluzel D., Bosch D., Paquette J.-L., Lemennicier Y., Montjoie P., Ménot R.-P. (2005) - Late Oligocene post- obduction granitoids of New Caledonia: A case for reactivated subduction and slab break- off. *Island Arc*, 14(3), 254-271.
- Cluzel D., Boulvais Ph., Iseppi M., Lahondère D., Lesimple S., Maurizot P., Paquette J.-L., Tarantola A., Ulrich M. (2019) - Slab-derived origin of tremolite-antigorite veins in a supra-subduction ophiolite; the Peridotite Nappe (New Caledonia) as a case study. *International Journal of Earth Sciences*, Springer Verlag.
- Cox M.E., Launay J., Paris J.-P. (1982) - Geochemistry of low temperature geothermal systems in New Caledonia. *Proceedings Pacific Geothermal Conference, 1982, University of Auckland, New Zealand, Part 2*, 453-459.
- Deville E., Prinzhofer A. (2016) - The origin of N₂-H₂-CH₄-rich natural gas seepages in ophiolitic context: a major and noble gases study of fluid seepages in New Caledonia. *Chemical Geology*, 440, 139-147.
- Espirat J. J. (1967) - Etude hydrogéologique de la côte ouest de la Nouvelle-Calédonie. Rapport d'ensemble sur les travaux effectués par le BRGM de 1962 à 1967. *Rapport BRGM*, 247 p.
- Fouillac C. and Michard G. (1981) - Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoir. *Geothermics* 10, p. 55-74.
- Fournier R.O. (1977) - Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5, 41-50.
- Fournier R.O. (1979) - A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geoth. Res. Council Trans.*, 3, p. 221-224.
- Fournier R.O. and Truesdell A.H. (1973) - An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, p. 1255-1275.
- France R. (2000) - Cadart-1 & Cadart-1st. Final well report - PRA436 - Bourail Basin New Caledonia. Victoria Petroleum N.L.

- GEOIMPACT (2013) - Etude géologique de deux sources hydrothermales : Gélima et Mokoué, Commune de Canala. *Rapport technique R13-199*, 26 p.
- Giggenbach W.F. (1988) - Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, p. 2749-2765.
- Gonfiantini R., Roche M.-A., Olivry J.-C., Fontes J.-C., Zuppi G. M. (2001). The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chemical Geology*, 181(1), 147-167.
- Grousset S. (2016) - Détermination de la composition isotopique du soufre pour l'étude de l'origine, biotique ou abiotique, des sulfures de fer en corrosion anoxique. *Thèse de Doctorat de Physique et Chimie des Matériaux, Chimie analytique - Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)*, 280 p.
- Helgeson H.C., Delany J.M., Nesbitt H.W., Bird D.K. (1978) - Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals. *Amer. Jour. Sci.*, 278A.
- Jeanpert J. (2017) - Structure et fonctionnement hydrogéologiques des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie. *Thèse de Doctorat, Université de la Réunion*.
- Jeanpert J., Iseppi M., Adler P., Genthon P., Sevin B., Thovert J.-F., Dewandel B. and Join J.-L. (2019) - Fracture controlled permeability of ultramafic basement aquifers. Inferences from the Koniambo massif, New Caledonia. *Engineering Geology*, 256, 67-83.
- Jeanpert J., Lesimple S., Sevin B., Mardhel V., Sanjuan B. (2019) - Inventaire des sources thermales en Nouvelle-Calédonie. *Rapport final phase 1*, 18 p. + annexes, SGNC-2019-(01).
- Jeanpert J., Lesimple S., Sanjuan B. (2020) - Evaluation du potentiel géothermique de la Grande Terre (Nouvelle-Calédonie). Phase 2 : rapport de mission d'échantillonnage des sources thermales et analyses géochimiques associées. *Rapport intermédiaire phase 2*, 30 p. + 1 annexe, SGNC-2020-(02).
- Kecho (2004) - Relance du thermalisme en Nouvelle-Calédonie : projet « La Crouen », à Canala. *Revue municipale de Canala n° 7, juillet 2004*, p. 8-9.
- Kharaka Y.K. and Mariner R.H. (1989) - Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In: Naeser, N.D. and McCulloch, T.H. (eds), *Thermal history of sedimentary basins: methods and case histories. Springer-Verlag*, New York, p. 99-117.
- Koch P. (1958) - Sources thermales de Nouvelle-Calédonie et captage des sources de La Crouen. *Bulletin Géologique Nouvelle-Calédonie*, 189-203.
- Kusakabe M., Robinson B.W. (1977) - Oxygen and sulfur isotope equilibria in the system from 110 to 350°C and applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41, 1033-1040.
- Launay J., Fontes J.-Ch. (1985) - Les sources thermales de Prony (Nouvelle-Calédonie) et leurs précipités chimiques. Exemple de formation de brucite primaire. *Géologie de la France*, n°1, 83-100.
- Mairie de Canala (2007) - Exploitation d'une source thermale à Gélima, Commune de Canala - Province Nord, Avant-projet. *Rapport technique*, 4 p.

- Mairie de Canala (2008) - Exploitation d'une source thermale à Nakéty, Commune de Canala - Province Nord, Avant-projet. *Rapport technique*, 4 p.
- Martinez M. (2019) - Spéciation et isotopie du soufre inorganique en milieu aqueux. *Thèse de Doctorat de Chimie analytique et Environnement, Université de Pau et des Pays de l'Adour*, 256 p.
- Maurizot P., Rouet I., Robineau B., Allenbach M., Parisot J.-C. (2007) - Mécanismes fondamentaux des mouvements de terrain dans les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-55041-FR, 48 p.
- Mayhew L.E., Ellison E.T., McCollom T.M., Trainor T.P., Templeton A.S. (2013) - Hydrogen generation from low-temperature water-rock reactions. *Nature Geoscience*, vol. 6, 478-484.
- Mével C. (2003) - Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges. *C. R. Geosciences, Geomaterials (Petrology)*, 335, 825-852.
- Michard G. (1979) - Géothermomètres chimiques. Bull. du BRGM (2^{ème} série), Section III, n°2, 183-189.
- Michard G. (1990) - Behaviour of major elements and some trace elements (Li, Rb, Cs, Sr, Fe, Mn, W, F) in deep hot waters from granitic areas. *Chem. Geol.*, 89, p. 117-134.
- Mizutani Y. and Rafter T.A. (1969) - Oxygen isotopic composition of sulphates, 3. Oxygen isotopic fractionation in the bisulphate ion-water system. *N. Zealand J. Sci.*, 12, p. 54-59.
- Monnin C., Chavagnac V., Boulart C., Ménez B., Gérard M., Pisapia C., Quéménéur M., Erauso G., Postec A., Guentas-Dombrowski L., Payri C., and Pelletier B. (2014) - Fluid chemistry of the low temperature hyperalkaline hydrothermal system of Prony Bay (New-Caledonia). *Biogeosciences*, 11, 5687-5706.
- Moody J. B. (1976) - Serpentinization: a review. *Lithos*, 14 p.
- Nicholson K. (1993) - Geothermal fluids. Chemistry and Exploration Techniques. *Springer-Verlag Berlin, Heidelberg*, 260 p.
- Nicolini E., Rogers K. and Rakowski D. (2016) - Baseline geochemical characterisation of a vulnerable tropical karstic aquifer; Lifou, New Caledonia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 5, 114-130.
- Okland I., Huang S., Dahle H., Thorseth I. H. and Pedersen R. B. (2012) - Low temperature alteration of serpentinized ultramafic rock and implications for microbial life. *Chemical Geology*, 318, 75-87.
- Sanjuan B., Michard G. et Michard A. (1990) - Origine des substances dissoutes dans les eaux des sources thermales et des forages de la région Asal-Ghoubbet (République de Djibouti). *J. Volcanol. Geotherm. Research*, 43, p. 333-352.
- Sanjuan B., Millot R., Asmundsson R., Brach M., Giroud N. (2014) - Use of two new Na/Li geothermometric relationships for geothermal fluids in volcanic environments. *Chemical Geology*, 389, 60-81.

- Sanjuan B., Millot R., Dezayes Ch. (2016) - Three new auxiliary chemical geothermometers for hot brines from geothermal reservoirs. *Goldschmidt 2016 Conference Abstract, June 26 - July 1, Yokohama, Japan*, 1 p.
- Sanjuan B., Bouchot V., Gal F., Vittecoq B. (2017a) - Evaluación del potencial geotérmico de la República Dominicana - II. Estudio de campo e interpretación de los datos. *Informe final BRGM/RC-66921-FR*, 136 p.
- Sanjuan B., Gal F., Guglielmetti L., Nawratil de Bono C. (2017b) - Thônex fluid geochemistry and geothermometric applications. *IMAGE-D8.02 final report - Application of exploration techniques on sedimentary Basin fields*, 209 p.
- Secchiari A., Montanini A., Bosch D., Macera P., Cluzel D. (2020) - Sr, Nd, Pb and trace element systematics of the New Caledonia harzburgites: tracking source depletion and contamination processes in SSZ setting. *Geosciences Frontiers*, 11, 37-55.
- Silant'ev S. A., Mironenko M. V., Novoselov A. A. (2009) - Hydrothermal Systems in Peridotites of Slow-Spreading Mid-Oceanic Ridges. Modeling Phase Transitions and Material Balance: Downwelling Limb of a Hydrothermal Circulation Cell. *ISSN 0869-5911, Petrology, vol. 17, n°2, 138-157. Pleiades Publishing, Ltd. (2009). Original Russian Text © S.A. Silant'ev M.V. Mironenko, Novoselov A.A. (2009), published in Petrologiya, 2009, vol. 17, n° 2, 154-174.*
- Spycher N., Peiffer L., Sonnenthal E.L., Saldi G., Reed M.H., Kennedy B.M. (2014) - Integrated multicomponent solute geothermometry. *Geothermics*, 51, 113-123. DOI: DOI:10.1016/j.geothermics.2013.10.012.
- Wenner D.B. and Taylor H. P., Jr (1971) - Temperatures of serpentinization of ultramafic rocks based on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ fractionation between coexisting serpentine and magnetite. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 32, 165-185.
- Wolery T.J. (1995) - EQ3NR, A Computer Program for Geochemical Aqueous Speciation-Solubility Calculations. *Theoretical Manual, User's Guide, and Related Documentation (version 7.0)*, 246 p.
- Wolery T.J. and Daveler S.A. (1995) - EQ6, A Computer Program for Reaction Path Modeling of Aqueous Geochemical Systems. *Theoretical Manual, User's Guide, and Related Documentation (version 7.0)*, 338 p.

Annexe 1

Données physico-chimiques de la campagne de terrain de septembre 2019 et résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux thermales correspondantes

Point de ...	n°	Date	X RGNC Lambert	Y	Debit l/mn	T _{émis.} °C	Cond. 25°C µS/cm	pH	E _h mV	O ₂ mg/l	O ₂ diss. %	Alc. méq/l	H ₂ S	Commentaires	Observations géologiques
La Crouen - Vasque	LC-V	05/09/2019 11:00				40,9	234	9,18	-340	0,89	14		oui	Grés volcano-sédimentaires de la Chaîne Centrale	Pas d'affleurements visibles sur le site
La Crouen - Captage Ø = 350 mm	LC-C	05/09/2019 11:15	388554	286066		42,5	233	9,18	-440	0,01	0,1	1,61	oui		Pas d'affleurements visibles sur le site
Source Nemweji	NEM	05/09/2019 13:30	395711	285565		27,0	346	9,38	-395	0,01	0,1	2,13	oui	Nombreux "poissons millions" + bulles de gaz (prélèvement)	Pas d'affleurement, mais des blocs éparés de roche massive sombre (basalte probable)
Source Kopélla	KOP-1	06/09/2019 11:00	401739	280619		25,5	401	8,05	-245	3,44	41,9		non	Source rive gauche de la rivière. Présence de filaments blancs	Affleurement de sédiments. Probables grès (volcanoclastiques ?), avec une schistosité fuste développée selon N24-85NE
Source Kopélla	KOP-2	06/09/2019 11:10	401739	280619	6,1	25,3	399	7,92	-336	0,05	0,6	3,02	non	Source rive gauche de la rivière. Présence de filaments blancs	Affleurement de sédiments. Probables grès (volcanoclastiques ?), avec une schistosité fuste développée selon N114-85NE
Source Mokoué	MOK-1	06/09/2019 12:00	407110	280287		24,7	652	7,82	-322	0,37	4,4	3,94	oui	Source rive droite de la rivière. Présence de nombreux dépôts et de filaments blancs. Prélèvement de gaz dans la rivière (bulles)	Pas d'affleurement dans la rivière, mais de nombreux blocs de basaltes ou sédiments jaspeux associés, ainsi qu'un énorme bloc de tysthénite. La source se trouve dans l'axe de la cote armée d'une tysthénite
Source Mokoué	MOK-3	06/09/2019 12:10	407114	280296		27,5	330	7,72	-50	0,43	5,5		oui	Petite vasque rive droite de la rivière	Pas d'affleurement dans la rivière, mais de nombreux blocs de basaltes ou sédiments jaspeux associés, ainsi qu'un énorme bloc de tysthénite. La source se trouve dans l'axe de la cote armée d'une tysthénite
Source Gélina	GEL-4	06/09/2019 09:00	398468	294663		21,2	114	8,49	-256	7,92	83		oui	Nouvelle émergence.	Affleurement de basalte massif fracturation légère, globalement orientée N75-65SE
Source Gélina	GEL-1	06/09/2019 14:00	398860	294913		29,3	257	9,32	-396	0,00	0	1,91	oui	Présence de filaments blancs	
Source Pourina	POU-1	10/09/2019 10:00	477598	241430		28,1	642	11,42	-740	0,35	4,5	1,98	non	Prélèvement de l'échantillon d'eau	
Source Pourina	POU-2	10/09/2019 10:30	477592	241415		29,2	536	8,49	-94				non	Bulles de gaz prélevées	
Source Poco Miré	PM-1	10/09/2019 11:25	478419	238423		25,1	446	11,29	-523	0,01	0,2	1,41	non	Prélèvement d'eau et de gaz	
Source Poco Miré	PM-2	10/09/2019 11:35	478421	238456		26,5	164		-238				non	Mélange avec l'eau de la rivière	
Source Lac Yaté	LT	10/09/2019 12:20	484358	238406		24,0	1464	11,83	-550	0,75	9,1	4,65	non	Vasques. Traverins de calcite en surface	
Source Bain des Japonais	BJ	11/09/2019 11:00	489842	210699	8,2	38,4	447	10,73	-730	0,04	0,5	1,30	oui	Bullage	Les 3 plateformes carbonatées sont alignées selon une direction N80
Source Ka'oris	KAOR	11/09/2019 12:15	488800	211242		31,2	367	10,95	-470	0,79	11	1,17	non	Prélèvement de l'échantillon d'eau	Péridotites
Source Lembi	LEMB-1	11/09/2019 16:00	464562	219535		23,8	383	11,17	-230	2,11	26		non	Petite vasque avec dépôts blanchâtres	Péridotites serpentinisées
Source Lembi	LEMB-2	11/09/2019 16:10	464562	219535		24,0	394	11,17	-320	1,60	19	1,22	non	Prélèvement de l'échantillon d'eau. Présence de bulles	
Fanam a	FANA	12/09/2019 10:00	412450	284086		31,4	450	8,71	-375	0,08	1,1	3,38	oui	Prélèvement de l'échantillon d'eau - bullage important - zone de contact géologique	L'affleurement dans lequel suit le contact est un contact entre des sédiments (siliceux, verditres et siltites noires) et une zone de serpentinites. Schistosité développée dans la serp. : N110-85NE, litage sédiments : NE-50W

Données de terrain acquises au cours de la campagne de reconnaissance des principales sources thermales de Nouvelle-Calédonie, menée du 5 au 12 septembre 2019, par le BRGM et le SGNC.

Évaluation du potentiel GTH de la Grande Terre (Nouvelle-Calédonie). Phase 2 : Interprétations et recommandations

Point de prélèvement	n°	Date	T _{émerg.} °C	Cond. 25°C µS/cm	pH	Eh _{brut} mV	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	HCO ₃ mg/l	CO ₃ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	OH mg/l	SiO ₂ mg/l	TDS mg/l	B.I. %
La Crouen - Captage Φ = 350 mm	LC-C	05/09/2019 11:15	42,5	233	9,18	-440	49,3	1,2	1,6	0,18	53	23	8,9	16,1	< 0,5		54,9	211	2,15
Source Nemwegi	NEM	05/09/2019 13:30	27,0	346	9,38	-395	76,6	1,9	0,9	0,36	69	42	15,4	19,7	< 0,5		61,3	293	2,34
Source Kopélie	KOP-2	06/09/2019 11:10	25,3	399	7,92	-336	75,1	0,7	14,2	1,8	217	< 10	13,8	6,3	< 0,5		24,8	358	1,57
Source Mokoué	MOK-1	06/09/2019 12:00	24,7	652	7,82	-322	69,1	1,3	4,8	39,4	281	< 10	62,2	5,7	< 0,5		24,3	492	0,65
Source Gélima	GELI-1	06/09/2019 14:00	29,3	257	9,32	-386	56,6	1,4	1,5	0,28	97	16	7,5	6,7	< 0,5		38,0	227	4,80
Source Pourina	POU-1	10/09/2019 10:00	26,1	642	11,42	-740	29,5	3,2	28,2	0,20	< 10	11	11,4	< 0,5	< 0,5	35,0	< 0,5	83	1,51
Source Poco Mié	PM-1	10/09/2019 11:25	25,1	446	11,29	-523	15,8	0,7	26,8	0,19	< 10	12	10,5	0,7	< 0,5	22,0	5,9	72	2,63
Source Lac Yaté	LYAT	10/09/2019 12:20	24,0	1464	11,83	-550	96,7	3,6	45,3	0,18	< 10	17	34,5	< 0,5	< 0,5	81,8	2,0	199	3,44
Source Bain des Japonais	BJ	11/09/2019 11:00	39,4	447	10,73	-730	27,8	3,2	19,2	0,24	< 10	< 10	23,2	< 0,5	< 0,5	26,0	0,5	74	3,82
Source Kaoris	KAOR	11/09/2019 12:15	31,2	367	10,95	-470	13,4	1,5	22,5	0,22	< 10	13	10,9	< 0,5	< 0,5	17,0	3,9	65	1,22
Source Lembli	LEMB-2	11/09/2019 16:10	24,0	394	11,17	-320	22,7	3,8	13,4	0,30	< 10	20	9,7	< 0,5	< 0,5	15,0	1,6	71	-2,48
Fanama	FANA	12/09/2019 10:00	31,4	450	8,71	-375	102,5	1,2	2,7	1,8	205	17	20	2,5	< 0,5		28,4	381	4,93

Résultats des analyses chimiques (espèces majeures) concernant les eaux des sources thermales de Nouvelle-Calédonie (mission du 5 au 12 septembre 2019).

Point de prélèvement	n°	Date	T _{émerg.} °C	F mg/l	Br mg/l	S mg/l	Fe mg/l	B µg/l	Sr µg/l	Ba µg/l	Mn µg/l	Li µg/l	Rb µg/l	Cs µg/l	Ge µg/l	Al µg/l	W µg/l	As µg/l	Pb µg/l	Zn µg/l	Cu µg/l	Ag µg/l	Ni µg/l	Cd µg/l	Co µg/l	Cr µg/l
La Crouen - Captage Φ = 350 mm	LC-C	05/09/2019 11:15	42,5	0,4	< 0,1	< 0,1	0,004	2605	387	4,37	0,1	114	1,6	1,5	2,7	13,6	23,7	< 0,05	< 0,05	< 0,5	< 0,1	< 0,01	< 0,1	0,04	< 0,05	< 0,1
Source Nemwegi	NEM	05/09/2019 13:30	27,0	0,6	< 0,1	< 0,1	0,06	6339	170	3,61	1,5	130	1,1	0,2	4,2	37,0	41,5	0,11	0,05	0,6	0,1	< 0,01	1,2	0,21	0,07	0,5
Source Kopélie	KOP-2	06/09/2019 11:10	25,3	0,5	< 0,1	< 0,1	0,006	1444	2380	28,8	9,0	66,8	0,7	1,3	6,5	2,0	19,4	0,07	< 0,05	< 0,5	< 0,1	< 0,01	< 0,1	0,02	< 0,05	< 0,1
Source Mokoué	MOK-1	06/09/2019 12:00	24,7	0,2	< 0,1	< 0,1	0,013	4099	88,9	34,4	16,9	34,4	2,6	6,3	9,8	0,8	8,6	56,8	< 0,05	< 0,5	< 0,1	< 0,01	10,9	< 0,01	0,2	0,1
Source Gélima	GELI-1	06/09/2019 14:00	29,3	0,3	< 0,1	< 0,1	0,005	2154	198	4,6	1,2	94,1	1,7	1,9	1,7	10,4	15,4	0,06	< 0,05	0,7	< 0,1	< 0,01	0,1	0,12	< 0,05	< 0,1
Source Pourina	POU-1	10/09/2019 10:00	26,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,004	89,3	50,8	7,16	0,2	9,7	3,9	0,4	< 0,05	1,6	0,1	< 0,05	< 0,05	1,4	< 0,1	< 0,01	0,4	0,07	< 0,05	0,4
Source Poco Mié	PM-1	10/09/2019 11:25	25,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,004	53,3	10,4	0,14	< 0,1	0,2	0,4	< 0,05	< 0,05	141	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,5	< 0,1	< 0,01	< 0,1	0,02	< 0,05	< 0,1
Source Lac Yaté	LYAT	10/09/2019 12:20	24,0	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,007	34,1	113,9	4,51	< 0,1	24,2	1,2	< 0,05	< 0,05	337	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,5	< 0,1	< 0,01	< 0,1	0,01	< 0,05	< 0,1
Source Bain des Japonais	BJ	11/09/2019 11:00	39,4	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,004	34,2	121,3	8,27	0,3	2,1	4,5	< 0,05	< 0,05	63,3	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,5	< 0,1	< 0,01	< 0,1	0,01	< 0,05	< 0,1
Source Kaoris	KAOR	11/09/2019 12:15	31,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,009	32,6	57,4	6,13	0,1	7,2	1,8	< 0,05	< 0,05	139,3	< 0,05	0,5	< 0,05	0,9	0,3	< 0,01	0,3	5,75	< 0,05	0,3
Source Lembli	LEMB-2	11/09/2019 16:10	24,0	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,004	38,5	81,8	7,12	0,5	1,3	4,7	< 0,05	< 0,05	143	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,9	0,2	< 0,01	0,6	0,21	0,05	0,2
Fanama	FANA	12/09/2019 10:00	31,4	1,3	< 0,1	< 0,1	0,003	4794	373,6	15,5	6,7	167	1,6	2,1	10,9	2,6	47,0	< 0,05	< 0,05	< 0,5	< 0,1	< 0,01	< 0,1	1,05	< 0,05	< 0,1

Résultats des analyses chimiques (éléments traces) concernant les eaux des sources thermales de Nouvelle-Calédonie (mission du 5 au 12 septembre 2019).

Point de prélèvement	n°	Date	T _{émerg.} °C	δ ¹⁸ O ‰ vs SMOW	δD ‰ vs SMOW	δ ¹⁸ O _{SO4} ‰ vs SMOW	δ ³⁴ S _{SO4} ‰ vs CDT	δ ³⁴ S _{H2S} ‰ vs CDT	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	± 2σ _m
La Crouen - Captage Φ = 350 mm	LC-C	05/09/2019 11:15	42,5	-5,60	-30,84	11,2	7,5	9,2	0,705888	0,000008
Source Nemwegi	NEM	05/09/2019 13:30	27,0	-5,07	-30,18					
Source Kopélie	KOP-2	06/09/2019 11:10	25,3	-5,63	-33,20					
Source Mokoué	MOK-1	06/09/2019 12:00	24,7	-5,63	-36,16				0,705380	0,000006
Source Gélima	GELI-1	06/09/2019 14:00	29,3	-5,47	-32,07	14,1	10,4		0,707845	0,000008
Source Pourina	POU-1	10/09/2019 10:00	26,1	-5,26	-26,35				0,703786	0,000007
Source Poco Mié	PM-1	10/09/2019 11:25	25,1	-4,73	-24,63				0,703444	0,000008
Source Lac Yaté	LYAT	10/09/2019 12:20	24,0	-4,46	-21,42				0,703774	0,000008
Source Bain des Japonais	BJ	11/09/2019 11:00	39,4	-4,50	-24,09				0,704326	0,000007
Source Kaoris	KAOR	11/09/2019 12:15	31,2	-4,22	-21,62				0,703507	0,000006
Source Lembli	LEMB-2	11/09/2019 16:10	24,0	-5,20	-28,87				0,703462	0,000006
Fanama	FANA	12/09/2019 10:00	31,4	-5,87	-34,70	8,7	11,1		0,706983	0,000009

Résultats des analyses isotopiques concernant les eaux des sources thermales de Nouvelle-Calédonie (mission du 5 au 12 septembre 2019).

Point de prélèvement	n°	Date	T _{émerg.} °C	Cond. 25°C µS/cm	pH	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	HCO ₃ mg/l	CO ₃ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	SiO ₂ mg/l	TDS mg/l	S mg/l	F mg/l	Br mg/l	B µg/l	Sr µg/l
Pévou	PEV	22/03/2019	24,1	772	8,20	184	4,2	5,5	2,4	207	23	200	28,6	27,9	687	6,59	1,22	0,72	7326	597

Résultats des analyses chimiques (espèces majeures et quelques éléments traces) concernant l'eau de la source Pévou, localisée sur la côte ouest et prélevée par le SGNC en mars 2019.



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

Direction régionale Nouvelle-Calédonie

1 ter, rue E. Unger
Vallée du Tir – BP 56

98845 – Nouméa Cedex – France

Tél. : 06 87 27 03 65