



**Dossier de  
Demande d'octroi d'un Permis Exclusif de Recherches de  
gîtes géothermiques dans l'Île de la Réunion,  
dit « Permis du Piton des Neiges»**

Permis portant sur les communes de : Cilaos, Salazie

**8<sup>ème</sup> Partie –  
Résumé Non Technique**

Février 2022



## SOMMAIRE

<b>I.</b>	<b>PRESENTATION DU PROJET .....</b>	<b>5</b>
<b>I.1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.</b>	<b>Localisation du Permis du Piton des Neiges.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.</b>	<b>Périmètre du Permis du Piton des Neiges .....</b>	<b>6</b>
<b>I.4.</b>	<b>Cadre règlementaire de la demande de PER.....</b>	<b>6</b>
<b>I.5.</b>	<b>Présentation synthétique d'ALBIOMA .....</b>	<b>10</b>
	I.5.1 Les capacités techniques d'Albioma à La Réunion .....	10
	I.5.2 Les capacités techniques d'Albioma en géothermie .....	11
<b>I.6.</b>	<b>Objet de cette demande de Permis Exclusif de Recherches.....</b>	<b>12</b>
<b>II.</b>	<b>CADRE GEOLOGIQUE DU PERMIS DU PITON DES NEIGES.....</b>	<b>13</b>
<b>II.1.</b>	<b>Présentation de l'île de La Réunion.....</b>	<b>13</b>
<b>II.2.</b>	<b>Contexte géologique du Permis du Piton des Neiges .....</b>	<b>14</b>
	II.2.1 Histoire du massif volcanique du Piton des Neiges .....	14
	II.2.2 Géologie du Cirque de Salazie .....	14
	II.2.3 Géologie du Cirque de Cilaos .....	16
<b>II.3.</b>	<b>Historique de l'exploration géothermique à La Réunion .....</b>	<b>17</b>
<b>II.4.</b>	<b>Les connaissances actuelles sur le système hydrothermal du Piton des Neiges.....</b>	<b>19</b>
	II.4.1 Cartographie des manifestations hydrothermales de surface .....	19
	II.4.2 Les résultats apportés par le forage d'exploration profond SLZ-1 .....	21
	II.4.3 Le modèle du système hydrothermal du Piton des Neiges .....	22
<b>II.5.</b>	<b>Justification du périmètre du permis demandé .....</b>	<b>22</b>
<b>III.</b>	<b>PROGRAMME DESTRAVAUX ENVISAGES .....</b>	<b>24</b>
<b>III.1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>24</b>
<b>III.2.</b>	<b>Programme de travaux.....</b>	<b>25</b>
<b>IV.</b>	<b>JUSTIFICATION DU PROJET .....</b>	<b>27</b>
<b>IV.1.</b>	<b>La production d'électricité à La Réunion .....</b>	<b>27</b>
<b>IV.2.</b>	<b>Les enjeux énergétiques.....</b>	<b>27</b>
<b>IV.3.</b>	<b>Les enjeux climatiques .....</b>	<b>28</b>
<b>V.</b>	<b>DESCRIPTION DE L'ETAT INITIAL DE L'ENVIRONNEMENT .....</b>	<b>30</b>
<b>V.1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>30</b>
<b>V.2.</b>	<b>Le milieu physique .....</b>	<b>30</b>
	V.2.1 Morphologie .....	30
	V.2.2 Les eaux superficielles .....	31
	V.2.3 Les eaux souterraines .....	32
	V.2.4 Les risques naturels .....	33

<b>V.3. Le milieu naturel</b> .....	<b>35</b>
V.3.1 Présentation générale .....	35
V.3.2 La végétation .....	35
V.3.3 La faune .....	37
V.3.4 Les espaces naturels protégés.....	38
<b>V.4. Le milieu humain et les données socio-économiques</b> .....	<b>43</b>
V.4.1 Démographie .....	43
V.4.2 Occupation des sols.....	43
V.4.3 Economie .....	43
<b>VI. LES IMPACTS DES TRAVAUX</b> .....	<b>46</b>
<b>VI.1. Introduction</b> .....	<b>46</b>
<b>VI.2. Résumé des travaux d'un programme de forage d'exploration</b> .....	<b>46</b>
<b>VI.3. les impacts des travaux et les mesures envisageables</b> .....	<b>46</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des deux polygones du <b>Permis du Piton des Neiges</b> sollicité par ALBIOMA au niveau des communes de Cilaos et Salazie dans le Département de la Réunion. ....	5
Figure 2 : Périmètres du Permis Exclusif de Recherches de gîtes géothermiques dit « Permis du Piton des Neiges » sollicité par ALBIOMA, reporté sur une carte topographique de l'IGN. ....	9
Figure 3 : Localisation de l'île de la Réunion à l'extrémité de la ride des Mascareignes dans l'Océan Indien.....	13
Figure 4 : Vue 3D de l'île de la Réunion depuis le Sud (source : Géoportail).....	14
Figure 5 : Cartographie simplifiée du cirque de Salazie (d'après Chaput, 2013). ....	15
Figure 6 : Coupe interprétative de la géologie du Cirque de Salazie selon le profil A-A' de la Figure 5, intégrant les données du forage d'exploration géothermique SLZ-1 (Chaput, 2013). ....	15
Figure 7 : Coupe interprétative de la géologie du Cirque de Cilaos d'après Chaput (2013). Le complexe intrusif différencié (microsyénites) n'apparaît pas car parallèle à cette section. ....	17
Figure 8 : Localisation des cinq sondages de gradient thermique et des deux forages d'exploration géothermique profonds réalisés par le BRGM dans l'île de la Réunion entre 1980-1985. ....	18
Figure 9 : Localisation et température d'émergence des sources thermo-minérales dans les Cirques de Salazie et de Cilaos (Données tirées de la compilation de Bénard (2020)). ....	20
Figure 10 : Profils de température enregistrés dans les cinq sondages de gradient (SGTH-1 à SGTH-5) et les deux forages d'exploration profonds (SLZ-1 et SR-1). Source : BRGM.....	21
Figure 11 : Modèle conceptuel du système géothermal du Piton des Neiges proposé par Bénard et al. (2020) selon une section verticale orientée NE-SW. ....	22
Figure 12 : Planning indicatif de réalisation d'un programme de forage d'exploration sur le PER du Piton des Neiges à La Réunion.....	25
Figure 13 : Origine de l'électricité à La Réunion en 2019 (source : Bilan Energétique de La Réunion 2019 -Edition 2020. OER, Horizon Réunion). ....	27
Figure 14 : Répartition des moyens de production électrique à La Réunion en 2019 (source : Bilan Energétique de La Réunion 2019 -Edition 2020. OER, Horizon Réunion).....	28

Figure 15 : Répartition par secteurs d'activités des émissions de CO2 liées à la combustion d'énergies fossiles à La Réunion en 2019 (source : Bilan Energétique de La Réunion 2019 -Edition 2020. OER, Horizon Réunion). .....	29
Figure 16 : Vue en perspective depuis l'Ouest des 3 cirques du Piton des Neiges (source : Géoportail). .....	30
Figure 17 : Carte des cours d'eau présents à l'intérieur et à proximité du périmètre du PER du Piton des Neiges.....	31
Figure 18 : Evaluation de l'Etat global des masses d'eau souterraine à la Réunion en 2019 (source : SDAGE de la Réunion - Etat des lieux 2019). .....	33
Figure 19 : Carte du zonage réglementaire issu des PPRN (Plan de Prévention des Risques Naturels) au niveau du PER du Piton des Neiges (Source : DEAL Réunion).....	34
Figure 20 : Extrait de la Carte de végétation de La Réunion (source : carte de végétation (Université Réunion-UMR Cirad Université, PVBMT, 2003) ; contour du domaine forestier-ONF 2016).....	36
Figure 21 : Périmètres du PER du Piton des Neiges et carte des zones du Parc National de La Réunion (source : DEAL Réunion). .....	39
Figure 22 : Carte du Bien inscrit au Patrimoine Mondial de l'UNESCO et de ses zones tampons à l'échelle du PER du Piton des Neiges (source : DEAL Réunion). .....	40
Figure 23 : Cartographie des ZNIEFFS terrestres à l'échelle du PER du Piton des Neiges (source : DEAL Réunion). .....	42
Figure 24 : Carte d'Occupation des sols au niveau du PER du Piton des Neiges (données 2018) d'après CORINE Land Cover.....	44

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Coordonnées des sommets du périmètre (Polygone de Salazie) sollicité pour le Permis Exclusif de Recherches du Piton des Neiges dans l'Île de La Réunion dans le système de référence géographique RGR92/UTM 40Sud. ....	7
Tableau 2 : Les principales étapes d'un projet de géothermie pour la production d'électricité et leur durée moyenne. ....	24
Tableau 3 : Taux d'émissions gazeuses de différents types de centrales électriques (en tonne/jour par MWe). ....	29
Tableau 4 : Notes des Indices Diatomées, Invertébrés et Poissons déterminant l'état biologique des cours d'eau au niveau des cirques de Salazie et de Cilaos en 2019 (source : Chronique de l'Eau Réunion. N°116 – 12 nov. 2020). ....	32
Tableau 5 : Les masses d'eau souterraine définies au niveau des cirques de Salazie, Cilaos et Mafate. ....	32
Tableau 6 : Synthèse des sensibilités des terrains vis-à-vis des risques naturels dans le périmètre du PER du Piton des Neiges. ....	34
Tableau 7 : Taux d'endémisme des groupes animaux à La Réunion en 2008 (tiré de : Comment compenser les impacts résiduels sur la biodiversité ? Guide méthodologique pour l'île de La Réunion. DEAL Réunion, janvier 2013).....	37
Tableau 8 : Données démographiques sur les deux communes de Salazie et Cilaos concernées par le PER du Piton des Neiges (Données 2020).....	43
Tableau 9 : Emplois selon les secteurs d'activité dans les deux communes concernées par le PER du Piton des Neiges (Chiffres 2018 ; source : INSEE).....	45



## I. PRESENTATION DU PROJET

### I.1. INTRODUCTION

Ce document constitue le Résumé Non Technique (RNT) du dossier de demande d'octroi d'un Permis Exclusif de Recherches (PER) de gîtes géothermiques à La Réunion, dit **Permis du Piton des Neiges** déposé par la société ALBIOMA.

Conformément au Décret n°2019-1518 du 30 décembre 2019 relatif aux titres d'exploration et d'exploitation des gîtes géothermiques, ce document est un résumé de la Partie III « Mémoire Technique » et de la Partie VII « Caractéristiques sur l'état du site et de son environnement ainsi que les impacts potentiels du projet sur l'environnement et la ressource en eau » du Dossier de demande de PER.

### I.2. LOCALISATION DU PERMIS DU PITON DES NEIGES

Le Permis sollicité porte sur le territoire de deux communes du Département et Région de La Réunion : Cilaos et Salazie (Figure 1).

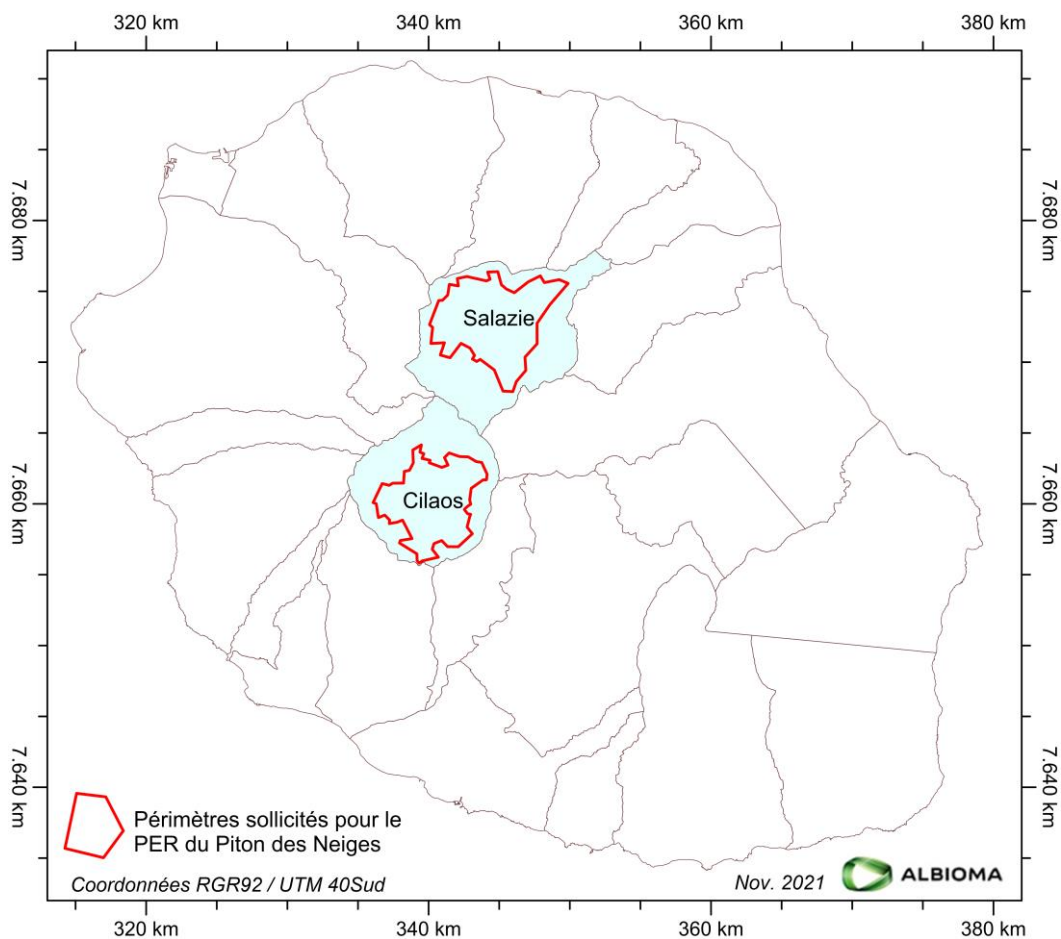


Figure 1 : Localisation des deux polygones du **Permis du Piton des Neiges** sollicité par ALBIOMA au niveau des communes de Cilaos et Salazie dans le Département de la Réunion.

### I.3. PERIMETRE DU PERMIS DU PITON DES NEIGES

Le Permis sollicité a une superficie de 79,64 km<sup>2</sup>. Le découpage du Permis en deux polygones disjoints est imposé par la topographie des cirques et l'extension du Parc National de la Réunion qui recouvre une large partie du massif volcanique du Piton des Neiges. Ces deux polygones sont circonscrits aux cirques de Salazie et de Cilaos (Figure 1 et Figure 2).

Les coordonnées des sommets des périmètres sollicités pour le Permis Exclusif de Recherches (PER) du Piton des Neiges à la Réunion sont reportées dans le Tableau 1 et les sommets sont représentés sur la Figure 2.

### I.4. CADRE REGLEMENTAIRE DE LA DEMANDE DE PER

Cette demande de Permis Exclusif de Recherche de gîtes géothermiques dans l'Île de la Réunion est déposée par la société ALBIOMA conformément aux articles du Code Minier L112-1 et L124-1 et suivants, ainsi qu'aux articles 4 et 5 du décret n°2019-1518 du 30 décembre 2019 relatif aux titres d'exploration et d'exploitation des gîtes géothermiques, et d'octroi d'un Permis Exclusif de Recherches (PER) de gîtes géothermiques.

Ce Permis Exclusif de Recherche du Piton des Neiges est sollicité pour une durée de 5 années.

#### Polygone de Salazie

Sommet	Projection UTM Fuseau 40Sud		Coordonnées géographiques (Deg Min Sec)	
	X (km)	Y (km)	Latitude S	Longitude E
A	349,882	7675,561	055°33'19.95"E	21°00'52.46"S
B	348,588	7674,062	055°32'34.65"E	21°01'40.83"S
C	347,679	7672,743	055°32'02.77"E	21°02'23.44"S
D	347,682	7671,297	055°32'02.41"E	21°03'10.45"S
E	346,822	7670,354	055°31'32.33"E	21°03'40.88"S
F	346,883	7669,418	055°31'34.14"E	21°04'11.31"S
G	346,211	7668,632	055°31'10.59"E	21°04'36.67"S
H	345,966	7667,923	055°31'01.89"E	21°04'59.66"S
I	345,265	7667,958	055°30'37.62"E	21°04'58.31"S
J	344,655	7669,450	055°30'16.96"E	21°04'09.62"S
K	343,654	7670,199	055°29'42.54"E	21°03'44.94"S
L	343,405	7670,051	055°29'33.84"E	21°03'49.67"S
M	343,100	7670,225	055°29'23.34"E	21°03'43.92"S
N	343,254	7670,476	055°29'28.77"E	21°03'35.81"S
O	342,936	7670,993	055°29'17.90"E	21°03'18.90"S
P	342,294	7671,330	055°28'55.80"E	21°03'07.74"S
Q	341,520	7670,314	055°28'28.62"E	21°03'40.54"S
R	340,827	7670,505	055°28'04.71"E	21°03'34.12"S
S	341,122	7671,371	055°28'15.22"E	21°03'06.05"S
T	340,160	7671,320	055°27'41.88"E	21°03'07.40"S
U	340,286	7672,455	055°27'46.59"E	21°02'30.54"S



V	340,064	7672,651	055°27'38.98"E	21°02'24.12"S
W	340,717	7674,352	055°28'02.17"E	21°01'28.99"S
X	340,982	7674,371	055°28'11.34"E	21°01'28.46"S
Y	341,352	7674,733	055°28'24.27"E	21°01'16.81"S
Z	341,470	7675,493	055°28'28.62"E	21°00'52.12"S
AA	342,109	7675,385	055°28'50.73"E	21°00'55.84"S
AB	342,031	7675,904	055°28'48.19"E	21°00'38.93"S
AC	342,710	7676,046	055°29'11.74"E	21°00'34.53"S
AD	344,094	7675,736	055°29'59.57"E	21°00'45.02"S
AE	344,355	7675,853	055°30'08.63"E	21°00'41.30"S
AF	344,177	7676,361	055°30'02.64"E	21°00'24.73"S
AG	344,902	7676,389	055°30'27.98"E	21°00'24.04"S
AH	345,153	7675,465	055°30'36.17"E	21°00'54.15"S
AI	345,501	7675,167	055°30'48.13"E	21°01'03.96"S
AJ	346,069	7674,902	055°31'07.69"E	21°01'12.75"S
AK	347,056	7675,670	055°31'42.12"E	21°00'48.06"S
AL	347,910	7676,094	055°32'11.83"E	21°00'34.53"S
AM	348,197	7675,618	055°32'21.61"E	21°00'50.09"S
AN	349,252	7675,826	055°32'58.21"E	21°00'43.67"S

Tableau 1 : Coordonnées des sommets du périmètre (Polygone de Salazie) sollicité pour le Permis Exclusif de Recherches du Piton des Neiges dans l'Île de La Réunion dans le système de référence géographique RGR92/UTM 40Sud.

### Polygone de Cilaos

Sommet	Projection UTM Fuseau 40Sud		Coordonnées géographiques (Deg Min Sec)	
	X (km)	Y (km)	Latitude S	Longitude E
AO	343,759	7662,925	055°29'43.77"E	21°07'41.50"S
AP	343,382	7662,980	055°29'30.73"E	21°07'39.60"S
AQ	342,810	7663,315	055°29'11.02"E	21°07'28.52"S
AR	342,182	7663,343	055°28'49.28"E	21°07'27.44"S
AS	341,452	7663,593	055°28'24.06"E	21°07'19.05"S
AT	341,121	7663,266	055°28'12.46"E	21°07'29.60"S
AU	341,377	7662,736	055°28'21.16"E	21°07'46.90"S
AV	340,943	7662,574	055°28'06.08"E	21°07'52.04"S
AW	340,045	7662,898	055°27'35.07"E	21°07'41.23"S
AX	340,111	7663,073	055°27'37.39"E	21°07'35.55"S
AY	339,532	7663,209	055°27'17.39"E	21°07'30.95"S
AZ	339,663	7663,543	055°27'22.02"E	21°07'20.13"S
BA	339,386	7663,648	055°27'12.46"E	21°07'16.62"S
BB	339,489	7664,165	055°27'16.23"E	21°06'59.85"S
BC	338,882	7663,801	055°26'55.07"E	21°07'11.48"S
BD	338,916	7662,895	055°26'55.93"E	21°07'40.96"S
BE	338,645	7662,369	055°26'46.37"E	21°07'57.99"S

BF	338,278	7662,290	055°26'33.61"E	21°08'00.42"S
BG	338,228	7661,467	055°26'31.58"E	21°08'27.19"S
BH	337,450	7661,459	055°26'04.63"E	21°08'27.19"S
BI	337,209	7661,307	055°25'56.22"E	21°08'32.06"S
BJ	336,714	7661,435	055°25'39.12"E	21°08'27.73"S
BK	336,067	7660,090	055°25'16.22"E	21°09'11.26"S
BL	336,293	7660,009	055°25'24.04"E	21°09'13.96"S
BM	336,445	7659,030	055°25'28.97"E	21°09'45.86"S
BN	336,895	7659,209	055°25'44.62"E	21°09'40.18"S
BO	337,241	7658,855	055°25'56.51"E	21°09'51.81"S
BR	337,219	7658,605	055°25'55.64"E	21°09'59.92"S
BS	337,795	7658,710	055°26'15.64"E	21°09'56.67"S
BT	338,153	7658,855	055°26'28.11"E	21°09'52.08"S
BU	338,826	7657,548	055°26'51.01"E	21°10'34.79"S
BV	338,000	7657,416	055°26'22.31"E	21°10'38.84"S
BW	337,935	7657,240	055°26'19.99"E	21°10'44.52"S
BX	339,171	7656,471	055°27'02.61"E	21°11'09.93"S
BY	339,184	7655,997	055°27'02.89"E	21°11'25.33"S
BZ	339,320	7655,816	055°27'07.53"E	21°11'31.28"S
CA	339,552	7655,976	055°27'07.53"E	21°11'31.28"S
CB	340,695	7656,236	055°27'55.36"E	21°11'18.03"S
CC	340,255	7656,797	055°27'40.29"E	21°10'59.65"S
CD	340,385	7657,198	055°27'44.92"E	21°10'46.68"S
CE	340,926	7657,411	055°28'03.77"E	21°10'39.92"S
CF	341,340	7656,983	055°28'17.97"E	21°10'53.98"S
CG	342,101	7656,973	055°28'44.35"E	21°10'54.52"S
CH	343,098	7657,894	055°29'19.22"E	21°10'24.90"S
CI	342,723	7658,359	055°29'06.38"E	21°10'09.65"S
CJ	342,923	7659,133	055°29'13.54"E	21°09'44.56"S
CK	342,982	7659,259	055°29'15.65"E	21°09'40.45"S
CL	342,756	7659,307	055°29'07.83"E	21°09'38.83"S
CM	342,528	7659,604	055°29'00.02"E	21°09'29.10"S
CN	342,621	7659,711	055°29'03.28"E	21°09'25.66"S
CO	342,809	7659,863	055°29'09.83"E	21°09'20.77"S
CR	342,984	7659,974	055°29'15.94"E	21°09'17.21"S
CS	342,908	7660,275	055°29'13.41"E	21°09'07.40"S
CT	343,015	7661,097	055°29'17.39"E	21°08'40.71"S
CU	343,862	7661,696	055°29'46.96"E	21°08'21.51"S
CV	344,097	7661,698	055°29'55.08"E	21°08'21.51"S
CW	344,143	7662,089	055°29'56.82"E	21°08'08.81"S

Tableau 1 (suite) : Coordonnées des sommets du périmètre (Polygone de Cilaos) sollicité pour le Permis Exclusif de Recherches du Piton des Neiges dans l'Île de La Réunion dans le système de référence géographique RGR92/UTM 40Sud.

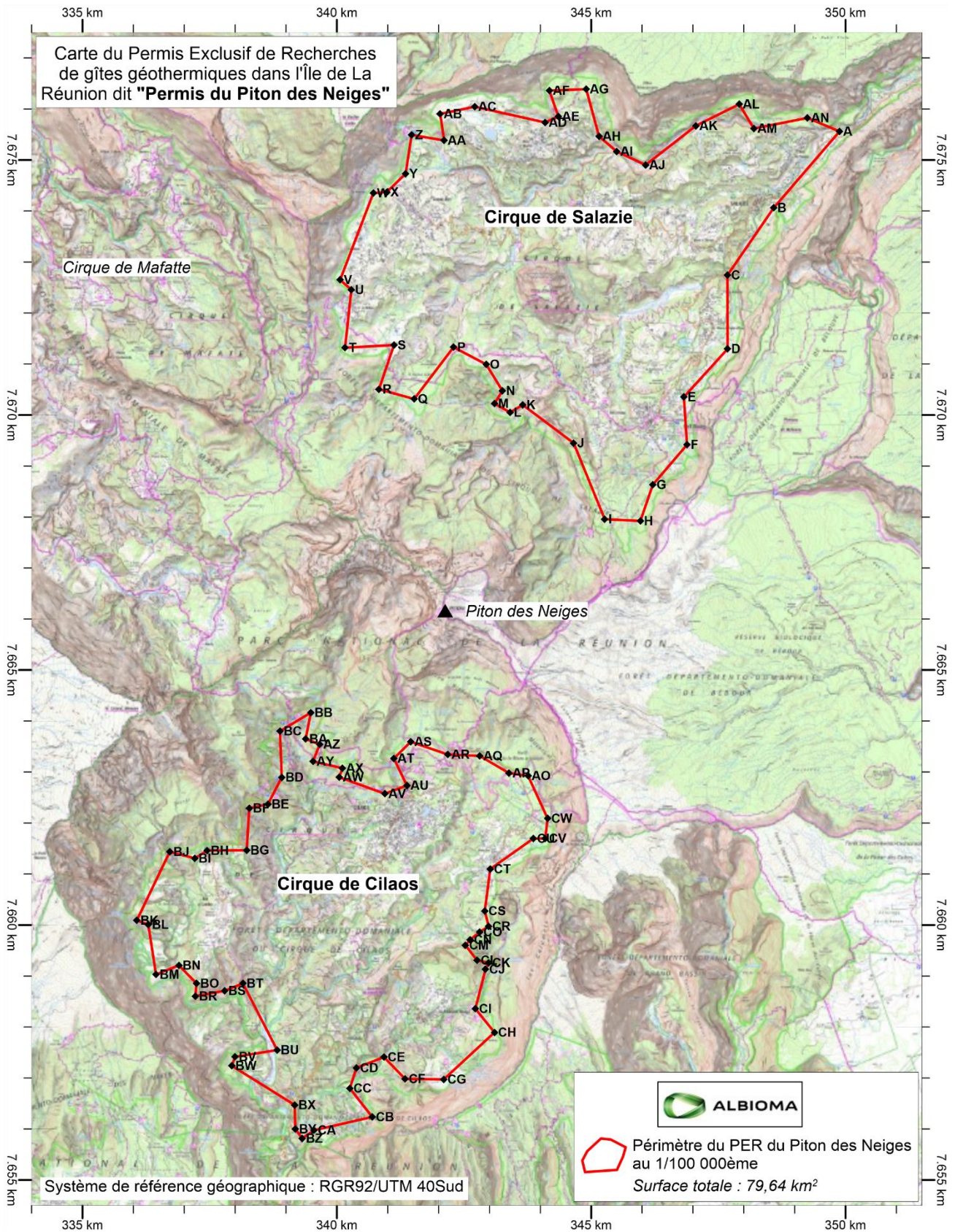


Figure 2 : Périmètres du Permis Exclusif de Recherches de gîtes géothermiques dit « **Permis du Piton des Neiges** » sollicité par ALBIOMA, reporté sur une carte topographique de l'IGN.

## 1.5. PRESENTATION SYNTHETIQUE D'ALBIOMA

ALBIOMA est un producteur d'électricité renouvelable indépendant spécialisé dans la biomasse, le solaire et la géothermie, et particulièrement implanté en outre-mer français : Guyane, Guadeloupe, Martinique, Mayotte et la Réunion. ALBIOMA possède et exploite plus de 1000 MWe.



### 1.5.1 Les capacités techniques d'Albioma à La Réunion

ALBIOMA dispose d'une présence extrêmement forte à la Réunion depuis 1992. **C'est le premier fournisseur d'électricité à La Réunion, assurant aujourd'hui 46% de la production électrique du territoire.** ALBIOMA possède en majorité et exploite notamment :

- La centrale thermique de Bois-Rouge, 108 MWe, 67 employés, bagasse/charbon, en cours de conversion pour remplacer le charbon et devenir 100% bagasse/biomasse.
- La centrale thermique du Gol, 122 MWe, 71 employés, bagasse/charbon qui sera également convertie 100% bagasse/biomasse dans les prochaines années.
- La turbine à combustion de Saint-Pierre, 41 MW, 6 employés, fonctionnant en priorité au bioéthanol local.

En outre, avec 33 MWc de puissance installée en 2020, Albioma est le leader de la production photovoltaïque à La Réunion.



Au total, ALBIOMA dispose d'environ 175 employés présents à La Réunion, autant de compétences pouvant bénéficier au développement d'un projet de géothermie (recherche de foncier, études d'impact environnemental, collaboration avec les autorités locales etc.) et à l'exploitation d'une future centrale de géothermie (mécanique, électrotechnique, chimie, fonctionnement des turbines à vapeur, modélisation thermodynamique etc.).

### **1.5.2 Les capacités techniques d'Albioma en géothermie**

Concernant plus spécifiquement la géothermie, ALBIOMA est membre de l'Association Française des Professionnels de Géothermie, possède et exploite aujourd'hui deux centrales de géothermie électrogène en Turquie :

- La centrale de Gümüşköy, 13 MWe, technologie ORC. ALBIOMA a réalisé en 2021 de nouveaux forages et réparations de forages existants. Via l'ajout de pompes submergées dans les puits, ALBIOMA a pu significativement augmenter la production de la centrale.
- La centrale de Kuyucak, 18 MWe, technologie ORC. Elle produit de l'électricité à partir de 5 puits de production pour une production nette exportée à fin 2021 de 83 GWh.

60 personnes travaillent aujourd'hui pour ALBIOMA dans la géothermie, qui dispose désormais de nombreuses compétences techniques internes pour de développement de projets :

- Drilling Project Manager
- Drilling Engineer
- Reservoir Engineer
- Wellsite geologist
- Mud Logger

#### I.6. OBJET DE CETTE DEMANDE DE PERMIS EXCLUSIF DE RECHERCHES

L'objet de cette demande d'octroi d'un Permis Exclusif de Recherches de gîtes géothermiques dit **Permis du Piton des Neiges** déposée par la société ALBIOMA est de reprendre l'exploration géothermique dans les cirques du massif volcanique du Piton des Neiges, et de confirmer par forages l'existence d'un réservoir géothermique haute température.

En cas de mise en évidence d'une ressource géothermique exploitable commercialement à l'intérieur de ce permis, ALBIOMA envisage de l'exploiter pour la production d'énergie sous forme d'électricité. Cette dernière activité se déroulerait dans le cadre d'une concession de gîtes géothermiques.

## II. CADRE GEOLOGIQUE DU PERMIS DU PITON DES NEIGES

### II.1. PRESENTATION DE L'ÎLE DE LA REUNION

L'île de la Réunion est située dans l'Océan Indien à environ 750 km de Madagascar et 170 km de l'île Maurice (Figure 3). Elle constitue le jalon méridional de la Ride volcanique des Mascareignes dont l'origine est encore débattue. Cette ride serait le témoin du fonctionnement d'un point chaud asthénosphérique et du déplacement de la plaque indienne vers le nord (Duncan, 1981 ; Morgan, 1981).

L'île repose sur un fond océanique à 4000 m de profondeur constitué de segments de paléo-dorsales océaniques. La partie émergée ne représente donc qu'une faible portion de l'ensemble de l'édifice (3%) en termes de volume (de Voogd et al., 1999).

La Réunion présente une forme elliptique (50x70 km) et elle a une superficie de 2 512 km<sup>2</sup>. Elle est d'origine entièrement volcanique et son édification aurait débutée il y a 5 millions d'année environ. Elle est le résultat de la coalescence de trois massifs volcaniques. Le premier édifice volcanique (La Montagne) est situé au Nord-ouest de l'île (Figure 4). Son activité a été datée avant 1,8 Ma. Puis le massif du Piton des Neiges aurait démarré son activité vers 1,4 Ma et sa dernière éruption est datée à 29 000 ans (Quidelleur et al., 2010 ; Salvany et al., 2012). Il a édifié l'essentiel de l'île et il culmine à 3069 m. Le massif du Piton de la Fournaise qui s'est édifié sur le flanc Est du Piton des Neiges est récent (0,5 Ma). Il culmine à 2632 m. C'est l'un des volcans les plus actifs au monde avec une fréquence de 1 éruption tous les 9 mois depuis 10 ans.

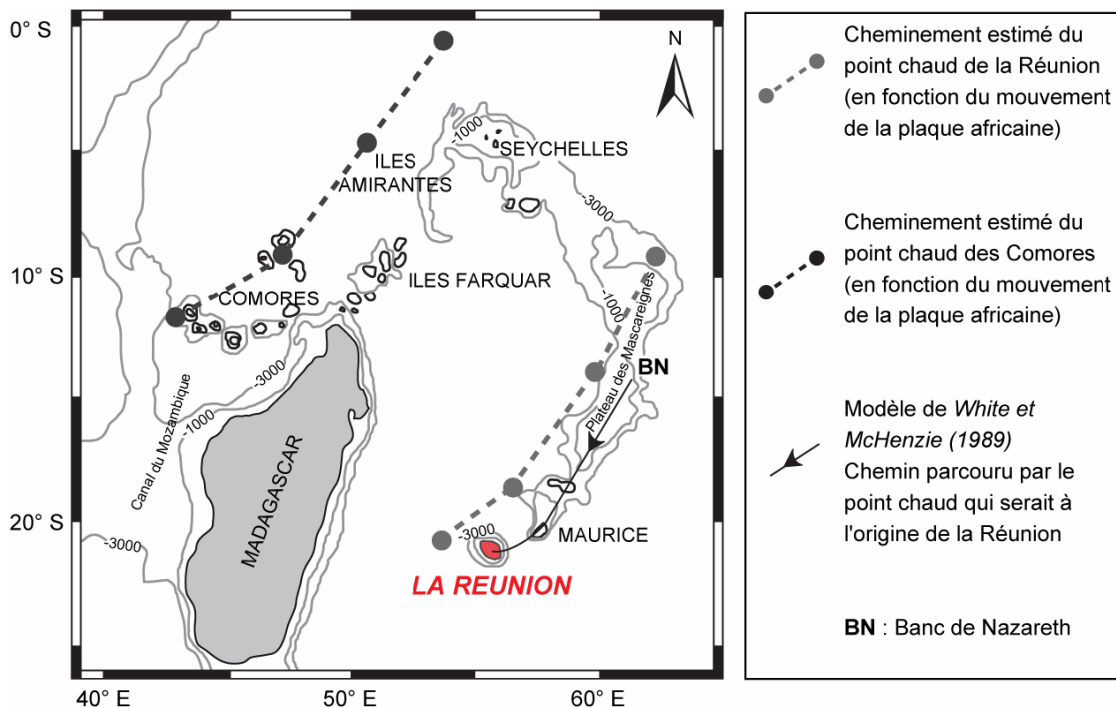


Figure 3 : Localisation de l'île de la Réunion à l'extrémité de la ride des Mascareignes dans l'Océan Indien.



Figure 4 : Vue 3D de l'île de la Réunion depuis le Sud (source : Géoportail).

## II.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE DU PERMIS DU PITON DES NEIGES

### II.2.1 Histoire du massif volcanique du Piton des Neiges

L'activité du Piton des Neiges a été subdivisée en plusieurs stades qui ont été résumés par Salvany et al., 2012). Un premier stade de volcan bouclier (PN1) entre 1,4 et 0,95 Ma a vu l'émission de très nombreuses coulées de basaltes et basaltes riches en olivine (océanites). Un second stade de volcan bouclier (PN2) a été identifié entre 600 000 et 430 000 ans. Puis, après un arrêt de 90 000 ans, l'activité a repris avec cette fois-ci l'émission de magmas formant une série différenciée complète (basaltes riches en plagioclase, hawaïites, mugéarites, benmoréites, trachytes et comendites) et édifiant un stratovolcan entre 340 000 et 180 000 ans. Ce stade (PN3) se termine par deux éruptions explosives majeures responsables de l'émission de deux dépôts ignimbricitiques distincts : l'un daté à 193 000 ans (« dalle soudée ») et l'autre daté à 184 000 ans et associé à la formation d'une caldera.

Le dernier stade d'activité (PN4) s'est déroulé entre 140 000 ans et 29 000 ans et a vu l'édification du stratovolcan terminal du Piton des Neiges. Des éruptions laviques et explosives se sont succédées, délivrant des magmas différenciés (mugéarites à comendites (rhyolites hyperalcalines)).

Aujourd'hui, le massif du Piton des Neiges est entaillé par trois dépressions topographiques majeures appelées cirques (Salazie, Cilaos, Mafate). Après de nombreux débats, l'origine de ces cirques par érosion régressive semblent maintenant faire consensus (Salvany et al., 2012 ; Gayer et al., 2019). Le taux d'érosion particulièrement élevé est attribué au climat tropical et en particulier à l'importance des pluies.

### II.2.2 Géologie du Cirque de Salazie

La géologie du cirque est présentée de façon synthétique sur les Figure 5 et Figure 6 tirées de la thèse de Chaput (2013).



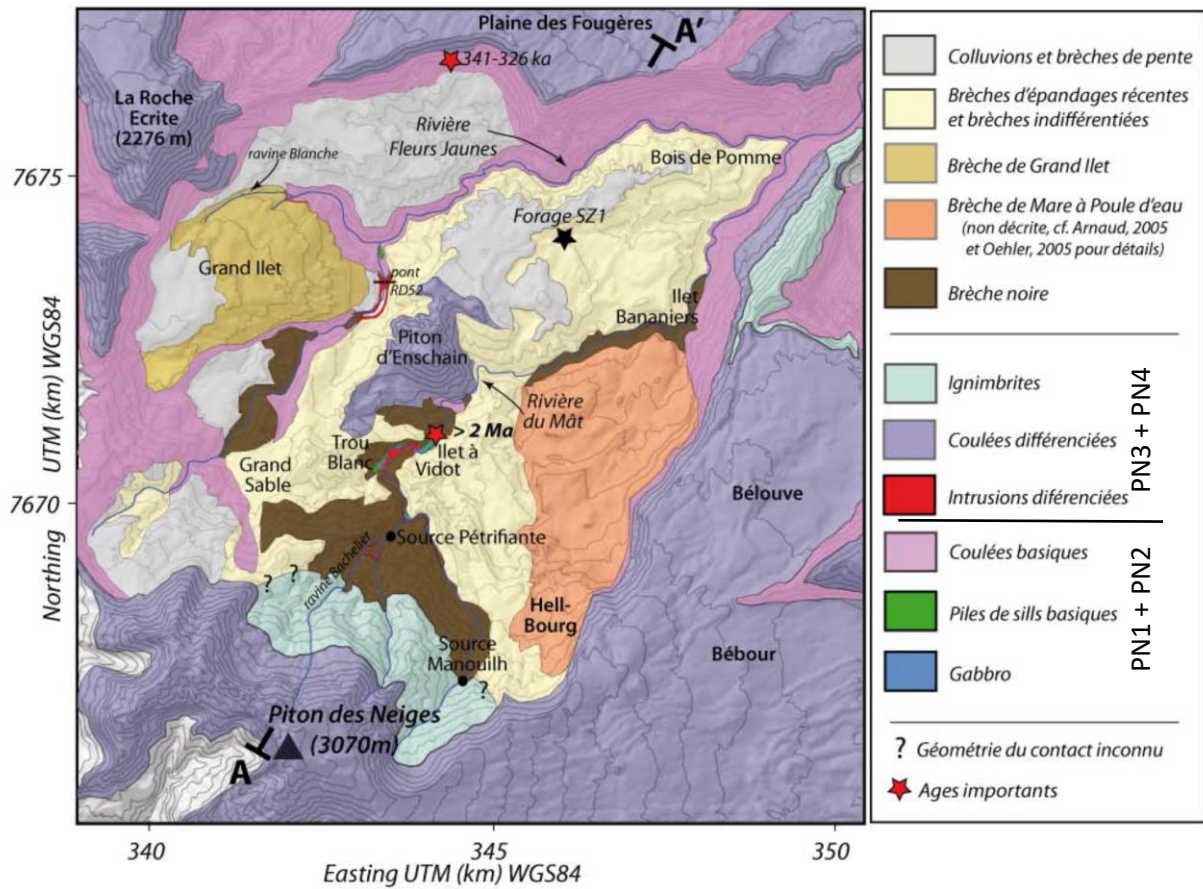


Figure 5 : Cartographie simplifiée du cirque de Salazie (d'après Chaput, 2013).

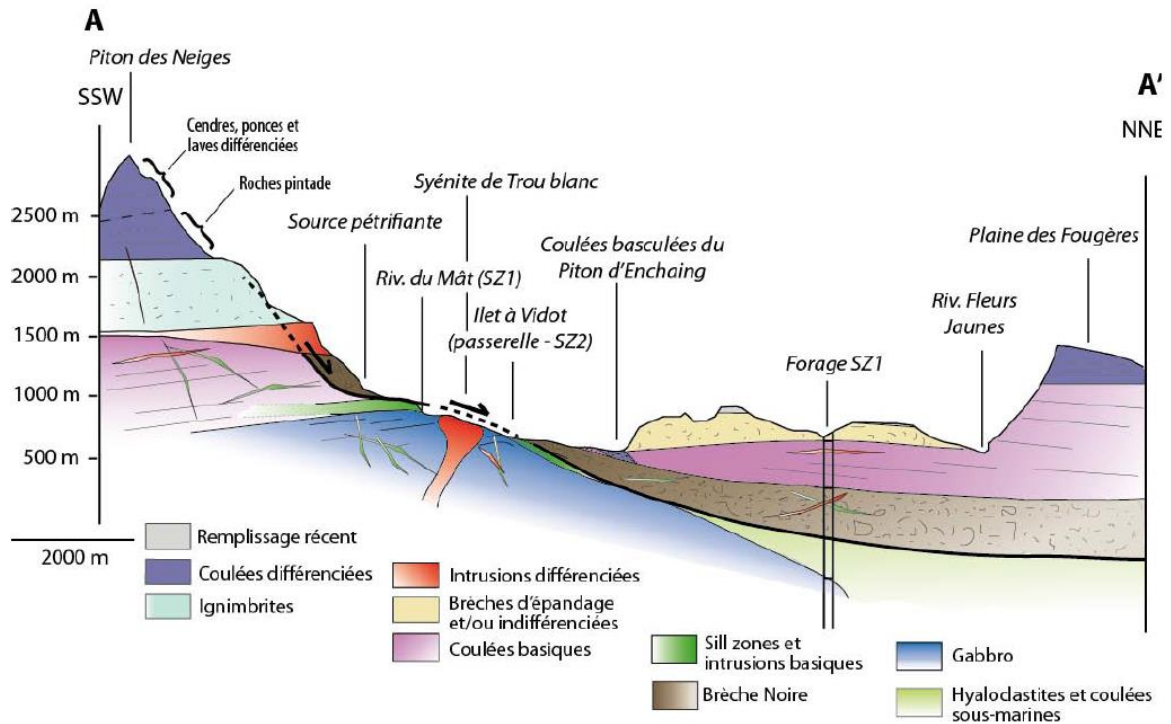


Figure 6 : Coupe interprétative de la géologie du Cirque de Salazie selon le profil A-A' de la Figure 5, intégrant les données du forage d'exploration géothermique SLZ-1 (Chaput, 2013).

Le cirque de Salazie forme une dépression de 9 km sur 11 km ayant une surface approximative de 100 km<sup>2</sup> (voir Figure 2). Son altitude varie entre 600 m et 1200 m. Il est encadré par des reliefs formant des remparts de près de 1000 m de hauteur.

D'un point de vue géologique, la majeure partie du plancher du cirque de Salazie est recouverte par des formations qualifiées de « brèches » qui proviennent de l'érosion et du démantèlement des remparts du cirque (Figure 5 et Figure 6). Ce sont des formations chaotiques de type coulées de boue, conglomérats, avalanches de débris... Elles reposent sur des coulées de laves basaltiques riches en olivine (océanites) appartenant aux stades de bouclier ancien de l'édification du volcan (Stades PN1 et PN2). Localement au niveau du cirque et surtout au niveau des remparts, ces coulées de laves basaltiques riches en olivine sont elles-mêmes recouvertes par des formations plus récentes des stades PN3 et PN4, constituées par des laves différenciées mises en place sous forme de coulées de laves ou de produits pyroclastiques (ignimbrites).

Les coulées de laves anciennes (stades PN1 et PN2) affleurant au plancher et dans les remparts du cirque sont recoupées par de très nombreuses intrusions verticales (dykes, corps intrusifs) et horizontales (sills). Selon leur date de mise en place, ces intrusions sont de composition basaltique (océanites, basaltes à olivine) ou différenciée (hawaiites à trachytes). L'ensemble a été intensément hydrothermalisé dans le faciès schistes verts avec le développement de minéraux hydrothermaux de basse-moyenne température (chlorite, argiles, serpentines, zéolites, calcite, ...) qui ont colmaté et/ou cimenté les roches poreuses et les fractures.

Dans la partie sud du cirque de Salazie, des roches grenues de type gabbro et péridotite affleurent ponctuellement au niveau de l'îlet à Vidot et dans la Rivière du Mât (Figure 5 et Figure 6). Des gabbros ont également été reconnus dans la partie profonde du forage d'exploration géothermique SLZ-1 foré par le BRGM en 1985. Selon Berthod (2016), ces roches grenues témoigneraient d'un vaste complexe plutonique formé par la coalescence au cours du temps de plusieurs intrusions ou chambres magmatiques.

Enfin, ce complexe plutonique basique est recoupé par des intrusions de roches microgrenues différenciées (syénites). Ces intrusions syénitiques sont interprétées comme des structures annulaires (sills et dykes) associées à la caldera formée à la fin du 1<sup>er</sup> stade du stratovolcan (PN3) et datée à 184 000 ans. Un tracé hypothétique de cette caldera a été proposé par Rocher (1988) et est indiqué plus loin.

### II.2.3 Géologie du Cirque de Cilaos

Le cirque de Cilaos forme une dépression quasi-circulaire de 10 km sur 10 km ayant une surface approximative de 85 km<sup>2</sup> (voir Figure 2). Son altitude varie entre 500 m et 1200 m. Il est encadré par des reliefs formant des remparts de près de 1000 m de hauteur. La géologie du cirque est présentée de façon synthétique sur la Figure 7 tirée de la thèse de Chaput (2013).

Le cirque de Cilaos résulterait d'un premier effondrement majeur. Cet événement n'est pas daté précisément mais il aurait eu lieu entre 180 000 et 135 000 ans. L'avalanche de débris associée forme des dépôts importants dans le cirque. Suite à cet effondrement, l'activité volcanique du Piton Des Neiges s'est poursuivie entre 1,35 Ma et 0,95 Ma (Stade PN4) et a mis en place un empilement de coulées de laves basiques que l'on retrouve aujourd'hui au niveau des remparts du cirque. Un second effondrement majeur aurait eu lieu il y a moins de 0,95 Ma. La morphologie du cirque a ensuite évolué sous l'action antagoniste de l'activité volcanique comblant la dépression avec des coulées de laves basiques et de l'érosion avec de nouveaux épisodes d'effondrements. Toutefois, à partir de 70 000 ans, il semble que l'activité volcanique se soit réduite et que l'érosion ait progressivement entaillé le cirque pour lui donner sa configuration actuelle.

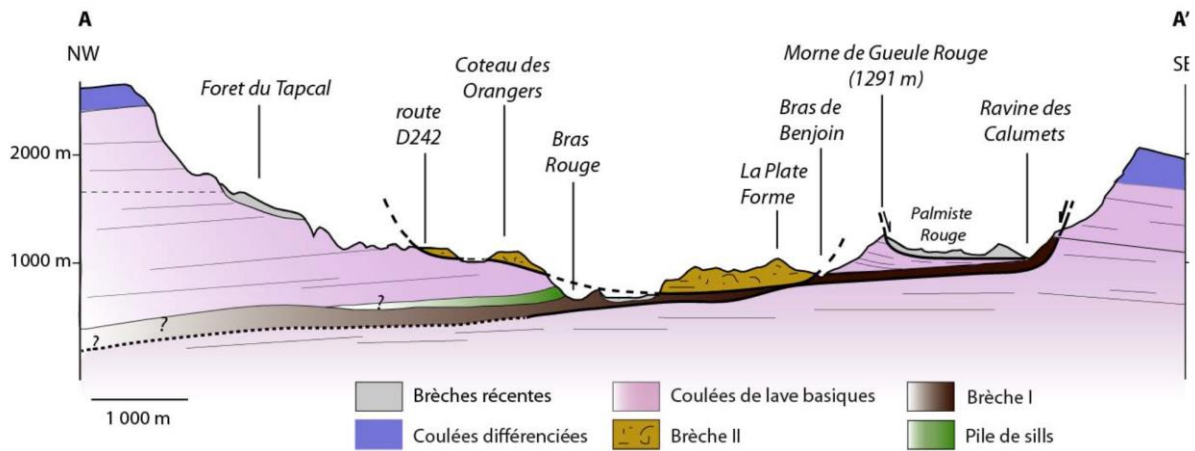


Figure 7 : Coupe interprétative de la géologie du Cirque de Cilaos d'après Chaput (2013). Le complexe intrusif différencié (microsyénites) n'apparaît pas car parallèle à cette section.

Le plancher du cirque de Cilaos est occupé par des dépôts d'avalanches de débris provenant d'effondrements sectoriels majeurs à l'origine du cirque et des dépôts de brèches plus récents (Figure 7). Ces dépôts sont intercalés avec les coulées de laves basiques mises en place lors des stades bouclier ancien du Piton des Neiges (PN1 et PN2). Ces coulées de laves basiques empilées sur plus de 1000 m d'épaisseur forment l'essentiel des remparts du cirque. Comme dans le cirque de Salazie, elles sont recoupées par de très nombreuses intrusions verticales (dykes) et horizontales (sills) et elles ont été intensément hydrothermalisées dans le faciès schistes verts avec le développement de minéraux hydrothermaux (chlorite, argiles, serpentines, zéolites, calcite, ...).

Dans la partie Nord-Ouest du cirque, affleure un complexe intrusif important constitué par une roche microgrenue différenciée (microsyénite). Il forme deux intrusions principales (Le Pain de Sucre et la Chapelle) qui se présentent comme des lames sub-verticales d'épaisseur pluri-hectométrique, de direction moyenne N120° et plongeant de 60° vers le Nord-Est, c'est-à-dire vers le cœur du massif du Piton des Neiges. Ce complexe intrusif a été interprété comme une structure de « cone-sheet », rattachée à la formation de la caldera datée vers 184 000 ans et qui clôt l'activité du 1<sup>er</sup> stade de stratovolcan (PN3) du Piton des Neiges (Rocher, 1988). Ces intrusions de microsyénite sont considérées comme équivalentes aux intrusions de syénite rencontrées dans le cirque de Salazie.

### II.3. HISTORIQUE DE L'EXPLORATION GEOTHERMIQUE A LA REUNION

L'île de la Réunion a été l'objet de nombreuses études depuis les années 1970 au titre de l'exploration géothermique. Les deux campagnes majeures ont été menées d'abord par le BRGM en 1978-1986 puis par la Région Réunion, avec l'appui du bureau d'études néo-zélandais PB Power entre 2000 et 2005.

Le BRGM avait réalisé en 1985-1986 des sondages de gradient thermique et un forage d'exploration profond sur chaque massif volcanique de La Réunion (Figure 8). Concernant le Massif volcanique du Piton de la Fournaise, le forage d'exploration profond SR-1 (3003 m de profondeur) avait été implanté au Grand Brûlé, sur le flanc Est du volcan. Il n'avait pas mis en évidence d'anomalie thermique particulière, ni de circulation de fluide en profondeur. Concernant le Massif du Piton des Neiges, un forage profond SLZ-1 (2108 m) avait été réalisé dans le Cirque de Salazie au lieu-dit Mare à Vielle

Place. Il avait mis en évidence des conditions de température intéressantes ( $192 \pm 8^\circ\text{C}$  à 2000 m de profondeur) mais la perméabilité du milieu était très faible.

Plus récemment (2000-2005), la Région Réunion avait mené un programme d'exploration sur le secteur de la Plaine des Sables sur le massif du Piton de la Fournaise. Plusieurs forages d'exploration avaient été programmés, puis abandonnés avant réalisation pour permettre l'inscription du cœur du Parc National au Bien inscrit du Patrimoine Mondial de l'UNESCO.

En dehors de ces travaux à finalité première d'exploration géothermique, il faut également mentionner les travaux de recherches académiques de l'Université de la Réunion, de l'OVPF (Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise), de l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris). Ils ont contribué indirectement à l'évaluation du potentiel géothermique en améliorant significativement la connaissance du massif du Piton des Neiges.

En 2016, un Permis Exclusif de Recherches de gîtes géothermiques dit Permis de Salazie-Cilaos avait été attribué à la société Volcanergie SAS. Ce permis est arrivé à échéance en octobre 2021.

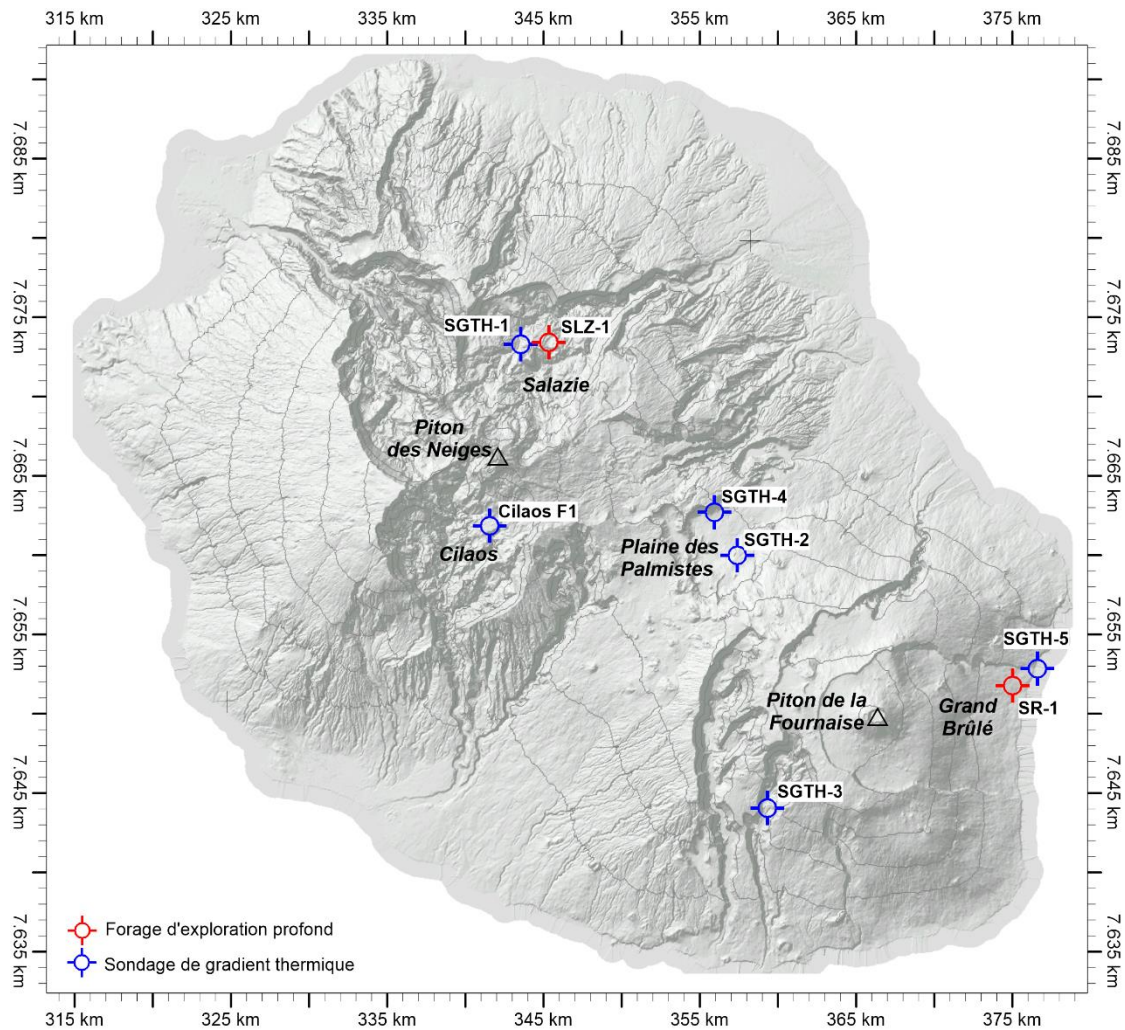


Figure 8 : Localisation des cinq sondages de gradient thermique et des deux forages d'exploration géothermique profonds réalisés par le BRGM dans l'île de la Réunion entre 1980-1985.

## II.4. LES CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LE SYSTEME HYDROTHERMAL DU PITON DES NEIGES

### II.4.1 Cartographie des manifestations hydrothermales de surface

L'intérêt porté au Piton des Neiges dès les années 1980 est lié à la présence de **sources thermo-minérales** qui émergent dans les cirques de Salazie et de Cilaos. Les autres manifestations hydrothermales de surface décrites sont des **zones d'altération fumerollienne** subactuelles à Salazie.

Récemment, Bénard et al. (2020) ont fourni un inventaire complet des sources thermo-minérales du massif du Piton des Neiges. Dans le Cirque de Salazie, une vingtaine de sources ont été répertoriées principalement dans la partie sud du cirque au pied du Piton des Neiges (Figure 9) : au niveau du cours amont de la Rivière du Mât ; dans la Ravine Olivette ; dans les Ravine Blanche et Ravine Grand Sable. Dans le cirque de Cilaos, une trentaine de sources ont été répertoriées. La plupart émergent dans le cours amont de la Rivière Bras Rouge entre 1600 m et 800 m d'altitude. Les autres sources sont concentrées dans le bourg de Cilaos, au niveau des Thermes (sources Irénée, Véronique et Manès) et dans la Rivière Bras Benjoin, en aval de Bras Sec. Au total, environ 50 sources dont la température d'émergence est supérieure à 16°C ont été reconnues dans les cirques de Salazie et de Cilaos.

D'un point de vue géologique, on remarque que la majorité des sources se situe à la bordure et à l'intérieur de la caldera proposée par Rocher (1988) et rattachée à une grande éruption ignimbritique datée à 184 000 ans (Figure 9). On remarque également que nombre d'entre elles sont localisées au niveau des intrusions de syénites associées à la formation de cette caldera. En première approche, cela suggère un contrôle de ces structures intrusives sur les circulations de fluides hydrothermaux. Ceci est corroboré par des mesures de concentration des gaz dans les sols (CO<sub>2</sub>, radon et hélium) réalisées par le BRGM en 2000-2001 (Sanjuan et al., 2001) qui montrent une forte anomalie en gaz à proximité de l'intrusion syénitique du Pain de Sucre à Cilaos.

La salinité de ces eaux thermales est faible et comprise entre 0,2 et 4,8 g/L. Elle va de pair avec leurs températures d'émergence qui varient entre 16°C et 42°C. Les eaux les plus salées (> 2 g/L) sont rencontrées à Cilaos avec les sources Irénée (2,8 g/L), Véronique (2,1 g/L), Manès (2,4 g/L) et Bras Rouge 16 (2,3 g/L). Les teneurs en silice varient de 20 à 160 mg/L. Ces eaux thermales de Salazie et Cilaos ont un faciès d'eaux bicarbonatées. Ce sont des eaux de surface infiltrées en profondeur et réchauffées probablement par conduction thermique et/ou par des gaz (CO<sub>2</sub>). D'après les géothermomètres géochimiques, ces eaux auraient été équilibrées en profondeur entre 130-150°C environ (Bénard et al., 2020). Les eaux des deux sources de Cilaos (BR16 et RR1) montrent des températures d'équilibre plus élevées entre 161°C et 220°C.

Rançon et Rocher (1985) et Rocher (1988) ont décrit plusieurs zones d'altération fumerollienne subactuelles dans le cirque de Salazie : dans la Ravine Grosse Roche, dans la Ravine Camp Pierrot, dans la Rivière Fleurs Jaunes, dans la Ravine Olivette, aux abords du Piton d'Enchain (Figure 9). Ces zones d'altération fumerollienne ne sont plus actives mais leur âge est considéré comme récent au vu de leur bon état de conservation. Elles témoignent donc de l'arrivée en surface de fluides thermaux à une température suffisante pour être à l'ébullition (env. 98°C à 600 m d'altitude) à une époque récente. C'est *a priori* un indice positif dans la recherche d'une ressource géothermale au sein du substratum du cirque de Salazie.

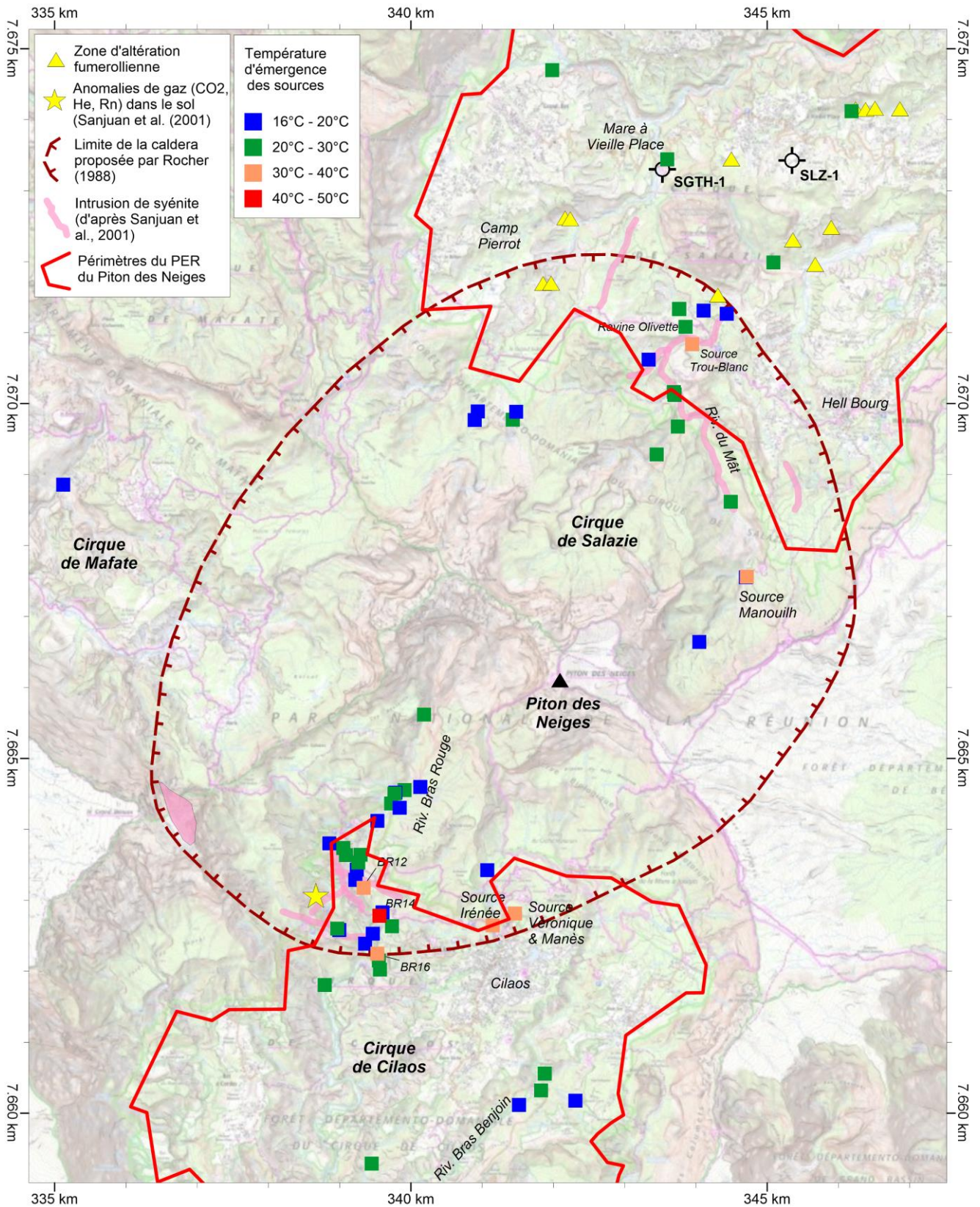


Figure 9 : Localisation et température d'émergence des sources thermo-minérales dans les Cirques de Salazie et de Cilaos (Données tirées de la compilation de Bénard (2020)).

#### II.4.2 Les résultats apportés par le forage d'exploration profond SLZ-1

Le forage d'exploration profond SLZ-1, implanté au cœur du cirque de Salazie à Mare à Vieille Place (Figure 8, Figure 9) a atteint la profondeur de 2108 m (Chovelon, 1986, Demange et al., 1989). Des mesures de température ont été effectuées régulièrement pendant le forage et elles sont reportées sur la Figure 10. Ces mesures ont été corrigées des perturbations thermiques qui sont engendrées par la circulation du fluide de foration. Il s'agit donc de valeurs extrapolées et c'est la raison pour laquelle la température mesurée au fond est entachée d'une incertitude ( $192 \pm 8^\circ\text{C}$ ).

Le profil de température dans le puits SLZ-1 confirme l'existence de conditions de température élevées dans le substratum du cirque de Salazie à des profondeurs accessibles par forage, et suffisantes pour la production d'électricité. Toutefois, le gradient thermique relativement uniforme tout au long des 2000 m du puits suggère un transfert thermique essentiellement par conduction, sans évidence de régime convectif lié à des circulations de fluides dans ce secteur du cirque de Salazie.

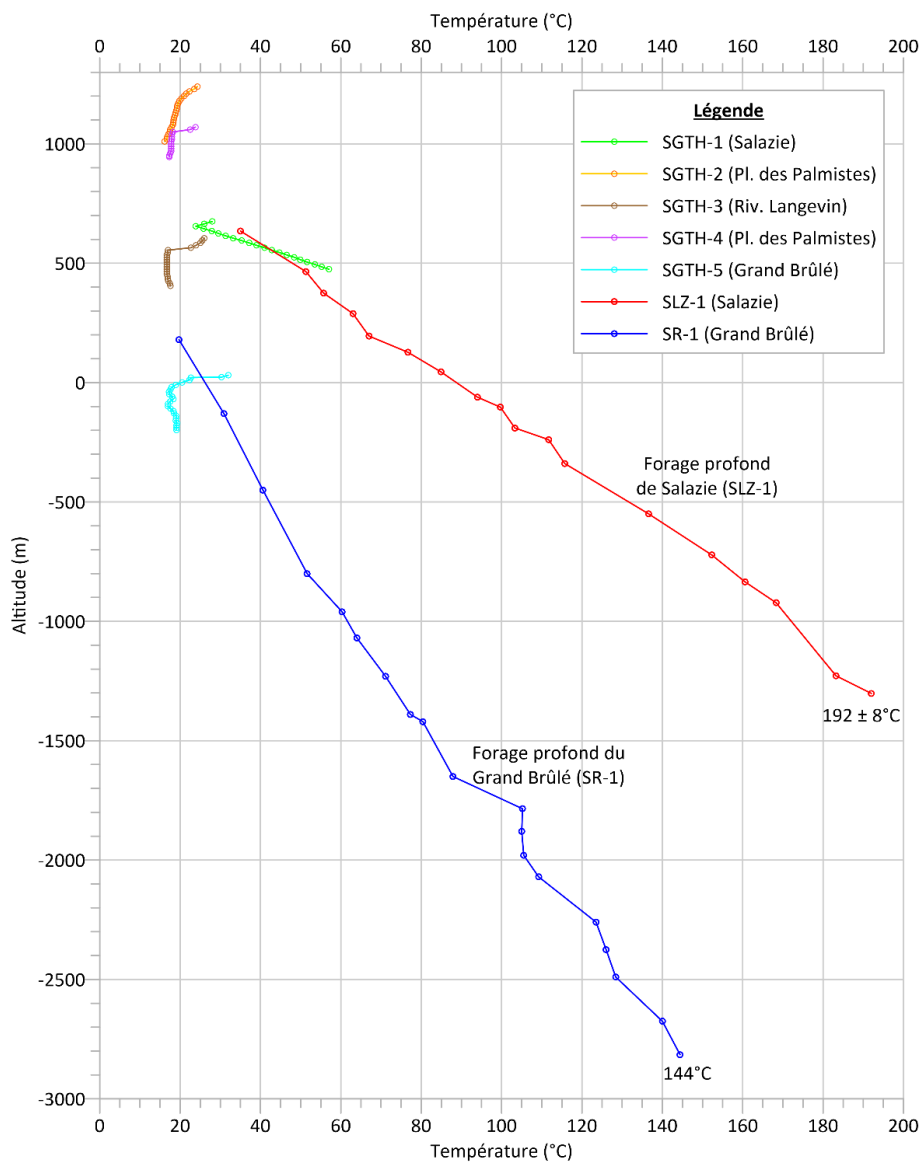


Figure 10 : Profils de température enregistrés dans les cinq sondages de gradient (SGTH-1 à SGTH-5) et les deux forages d'exploration profonds (SLZ-1 et SR-1). Source : BRGM.

### II.4.3 Le modèle du système hydrothermal du Piton des Neiges

Bénard et al. (2020) ont proposé un modèle conceptuel des circulations de fluides hydrothermaux au sein du massif volcanique du Piton des Neiges (Figure 11). Ce modèle décrit la recharge en eaux météoriques, les infiltrations plus ou moins profondes, l'existence de réservoirs superficiels et de réservoirs profonds distincts pour chaque cirque, le contrôle structural fort exercé par les intrusions de syénite sur la remontée des fluides profonds, la présence d'une source de chaleur magmatique à l'origine du dégazage de CO<sub>2</sub>. En raison de la configuration du massif volcanique, des réservoirs distincts ont pu s'individualiser au niveau de chaque cirque. Dans ce modèle, le puits SLZ-1 apparaît implanté à l'écart des zones de circulation des fluides hydrothermaux ; ce qui rend compte de l'absence de perméabilité constatée dans ce puits.

Dans ce modèle proposé par Bénard et al. (2020), les données de température indiquées sont à considérer avec précaution. L'absence de fluides équilibrés chimiquement avec la roche réservoir ne permet pas d'appliquer les géothermomètres en toute rigueur.

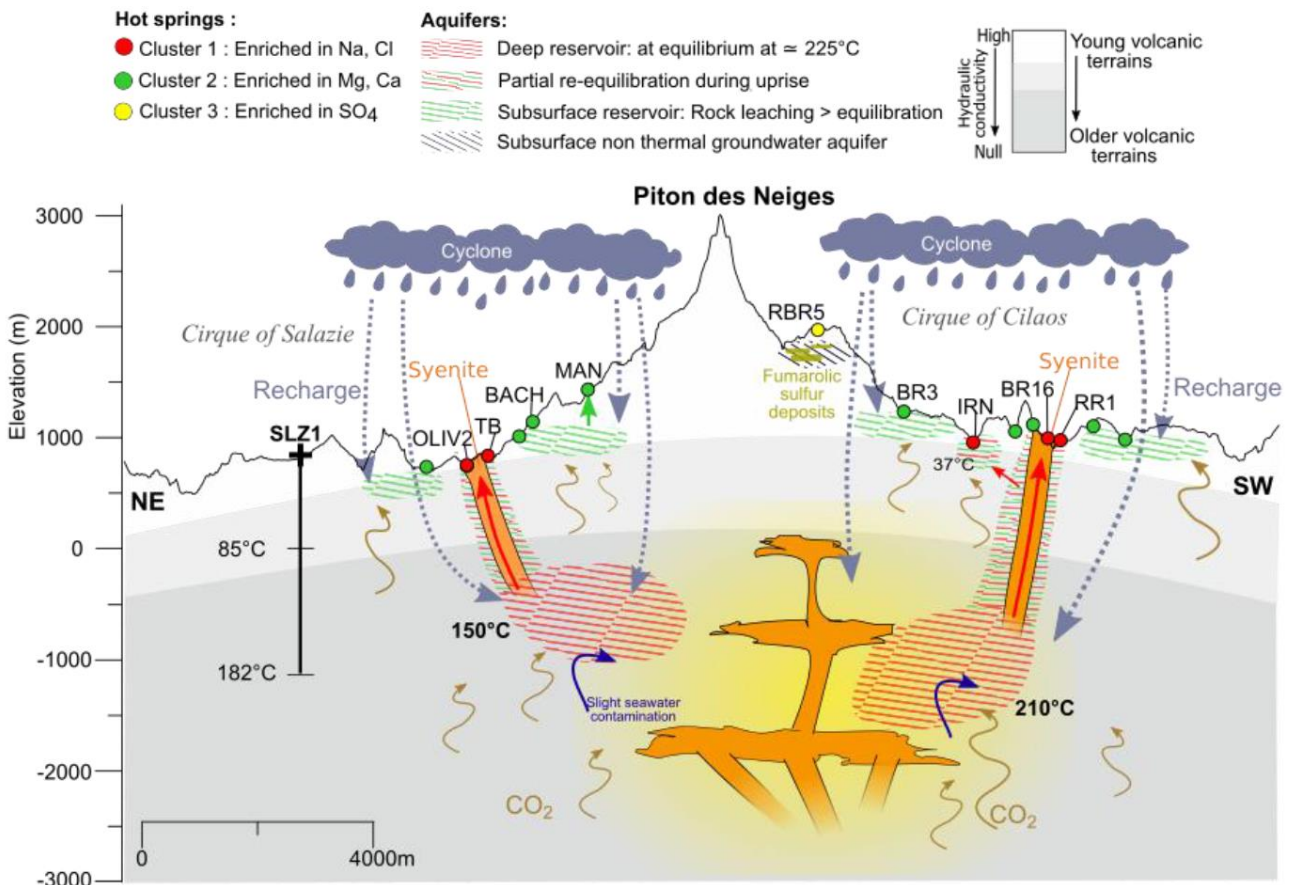


Figure 11 : Modèle conceptuel du système hydrothermal du Piton des Neiges proposé par Bénard et al. (2020) selon une section verticale orientée NE-SW.

### II.5. JUSTIFICATION DU PERIMETRE DU PERMIS DEMANDE

Les périmètres sollicités pour le Permis Exclusif de Recherches du Piton des Neiges ont été indiqués sur la Figure 2. Ils couvrent une surface totale de 79,64 km<sup>2</sup>. Le découpage en deux périmètres



disjoints est imposé par la topographie et en particulier par le relief du Piton des Neiges. Il est également imposé par l'extension de la zone cœur du Parc National de La Réunion qui couvre une large partie du massif volcanique du Piton des Neiges. Au niveau de chaque cirque, le périmètre du PER est cantonné à l'intérieur du territoire appartenant à l'aire d'adhésion.

Chacun des deux cirques présente un intérêt en termes de potentiel géothermique. Les manifestations les plus tangibles sont les nombreuses sources thermales concentrées dans la moitié sud de Salazie et dans la moitié nord de Cilaos (Figure 9). Ces sources thermales sont des indices de fuites du système hydrothermal développé à l'aplomb du Piton des Neiges, utilisant les discontinuités structurales offertes par la bordure supposée de la caldera datée à 184 000 ans et les intrusions syénitiques. Les deux cirques offrent donc un accès privilégié à ce système hydrothermal. Les secteurs situés le long du tracé de la caldera à Salazie et à Cilaos apparaissent comme étant potentiellement les plus prometteurs. Toutefois, l'ensemble de la surface des deux cirques présente un intérêt géothermique qu'il conviendrait également d'explorer.

Ces différentes observations justifient les périmètres sollicités pour ce Permis Exclusif de Recherche du Piton des Neiges.

### III. PROGRAMME DESTRAVAUX ENVISAGES

#### III.1. INTRODUCTION

L'objet de cette demande d'octroi d'un Permis Exclusif de Recherches dit **Permis du Piton des Neiges** est de reprendre l'exploration du massif volcanique du Piton des Neiges initiée par le BRGM et de confirmer par forages l'existence d'un réservoir géothermique haute température.

En cas de mise en évidence d'une ressource géothermique exploitable commercialement à l'intérieur de ce permis, ALBIOMA envisage de l'exploiter pour la production d'énergie sous forme d'électricité. Cette dernière activité se déroulerait dans le cadre d'une concession de gîtes géothermiques.

Le Tableau 2 présente les stades classiques d'un projet de géothermie pour la production d'électricité et donne un ordre de grandeur de la durée d'un projet de géothermie. Entre l'étape des campagnes d'exploration de surface et l'étape de mise en service d'une centrale, il s'écoule en moyenne 6 à 8 ans.

En ce qui concerne le massif du Piton des Neiges, on peut considérer que les phases 1 à 4 ont déjà été réalisées. Toutefois, les phase 3 (Etude de Préfaisabilité) et phase 4 (forage d'exploration profond) se sont achevées en 1985 sur un échec.

<b>Stades</b>		<b>Durée indicative</b>
1	Reconnaissance préliminaire	0,5 à 1 an
2	Campagnes d'exploration de surface	1 à 2 ans
3	<b>Etude de préfaisabilité</b>	<b>0,5 à 1 an</b>
4	<b>Forages d'exploration et de confirmation</b>	<b>1,5 à 3 ans</b>
5	Etude de faisabilité	1 an
6	Développement du champ	1,5 à 3 ans
7	Construction de la centrale	2 ans
8	Période d'essai et mise en service	0,5 an

Tableau 2 : Les principales étapes d'un projet de géothermie pour la production d'électricité et leur durée moyenne.

Dans le cadre de cette demande de PER, l'objectif d'ALBIOMA est de réitérer les phases 3 et 4 sur la base des résultats acquis lors des premiers travaux d'exploration du BRGM et des connaissances nouvelles acquises depuis, et en considérant que le modèle conceptuel du système hydrothermal actuellement disponible permet d'envisager une nouvelle approche exploratoire par forage.

L'étude de préfaisabilité (Phase 3) sera destinée à définir et à encadrer réglementairement le programme de forages d'exploration (Phase 4).

En cas de résultats positifs des forages d'exploration, le projet se poursuivra à travers une étude de faisabilité technico-économique (Phase 5) qui devrait déboucher sur un projet de développement avec le forage de puits grand-diamètre pour la production et la réinjection des fluides et la construction d'une centrale géothermique pour la production d'électricité.

### III.2. PROGRAMME DE TRAVAUX

Le programme prévisionnel de travaux qui est envisagé par ALBIOMA est structuré en trois étapes successives :

- ⇒ 1<sup>ère</sup> Etape : Préparation d'un programme de forage d'exploration ;
- ⇒ 2<sup>ème</sup> Etape : Réalisation des travaux de forage ;
- ⇒ 3<sup>ème</sup> Etape : Analyse des résultats et décision de poursuivre/arrêter.

Le planning et la durée prévisionnelle la plus optimiste de ces différentes tâches sont indiqués sur la Figure 12. De manière réaliste, ces tâches devraient davantage se dérouler sur 5 ans.

Au cours de la 1<sup>ère</sup> étape, il n'est pas prévu *a priori* de nouvelles campagnes d'exploration de surface. Par contre, un travail important d'analyse et de synthèse des données existantes (géologie, hydrogéologie, géochimie des fluides, gravimétrie et résistivité) est prévu afin notamment d'alimenter les réflexions sur deux points importants :

- D'une part, décider si l'exploration par forage concerne un seul ou les deux cirques et dans ce dernier cas, définir le cirque qui sera prioritaire ;
- D'autre part, déterminer les implantations optimales pour ces forages d'exploration et leur design.

Etape	Tâches	Années	1	2	3	4
<b>1ère Etape : Préparation des travaux de forage</b>						
a)	Validation modèle conceptuel de réservoir					
b)	Finalisation des objectifs et de la stratégie					
c)	Rédaction du programme technique de forage					
d)	Rédaction du programme de tests et essais					
e)	Estimation des coûts et plan de financement					
f)	Consultation des entreprises, sélection, marchés					
g)	Réalisation d'une étude d'impact					
h)	Rédaction d'un dossier demande d'autorisation					
i)	Instruction du dossier demande d'autorisation					
j)	Maitrise foncière des sites de forages					
k)	Concertation avec collectivités / administrations					
l)	Mise en place instance de concertation locale					
<b>2ème Etape : Réalisation des travaux de forage</b>						
a)	Concertation avec les parties concernées					
b)	Amenée des équipements forage à La Réunion					
c)	Préparation de(s) plateforme(s)					
d)	Forage de(s) puits					
e)	Suivi géologique					
f)	Mesures dans les puits (diagraphies)					
g)	Réalisation des tests et essai production					
h)	Démobilisation machine de forage					
i)	Remise en état de(s) site(s)					
<b>3ème Etape : Analyse des résultats</b>						
a)	Actualisation du modèle de réservoir					
b)	Estimation capacité production du réservoir					
c)	Décision de poursuite/arrêt de l'exploration					

Figure 12 : Planning indicatif optimiste de réalisation d'un programme de forage d'exploration sur le PER du Piton des Neiges à La Réunion.

La réalisation de la 2<sup>nd</sup>e étape sera suspendue à l'obtention de l'arrêté préfectoral autorisant et encadrant les travaux de forage.

La préparation de la ou des plateformes donnera lieu à des travaux de génie civil (terrassément et confortement des terrains, creusement de bourbiers, ...). La surface à prévoir est comprise entre 3000 m<sup>2</sup> et 5000 m<sup>2</sup> selon l'encombrement de la machine de forage et le nombre de puits. Si la plateforme est éloignée d'une voie existante, un chemin carrossable sera aménagé.

Les opérations de forage se dérouleront en continu 24h/24h et 7j/7j. La durée de forage pour chaque puits est estimée entre 30 et 60 jours selon le type de puits et la complexité des opérations. L'approvisionnement en eau du chantier sera probablement assuré par un captage en rivière.

Pendant et à la fin du forage, des diagraphies seront réalisées dans le puits pour mesurer la température, la pression, l'inclinaison du puits et son azimut s'il est directionnel, ...

Pendant le forage, un suivi géologique sera réalisé. Il consiste à échantillonner, dans les boues de forage ramenées à la surface, les éléments de roche broyés par l'outil et les observer à la loupe binoculaire. Il permettra de reconstituer la colonne lithologique des formations traversées par le puits et d'identifier les altérations hydrothermales causées par le fluide géothermal. Ce suivi permettra de détecter l'approche d'éventuelles zones perméables et d'estimer la température.

A la fin du forage, un programme de tests permettra de caractériser la perméabilité du réservoir. Il sera suivi d'un essai de production dans la mesure où les contraintes environnementales liées à ce type d'opération (bruit, émissions atmosphériques, gestion des effluents liquides) auront été résolues. Lors de l'essai de production, le fluide géothermal sera échantillonné et analysé afin de déterminer ses caractéristiques physico-chimiques en vue d'évaluer son exploitabilité.

A la fin du (ou des) forages(s), la machine de forage sera démobilisée et la ou les plateformes seront nettoyées et débarrassées de tout déchet. En fonction des résultats obtenus, les puits d'exploration pourront être conservés ou rebouchés dans les règles de l'art. S'ils sont conservés, ils pourront être utiles en tant que futurs puits d'observation pour mesurer les variations de pression au sein du réservoir. Il est prévu que la ou les plateformes soient entièrement démontées et rendues à leur état initial si le ou les puits sont bouchés.

En cas de résultat positif, l'extension et le volume du réservoir seront évalués, conduisant à estimer sa capacité de production électrique. Le modèle conceptuel sera actualisé. Les zones de recharge naturelle du réservoir et les zones de circulation du fluide géothermal haute température seront précisées. Ceci servira de guide pour implanter de façon optimale de nouveaux puits de confirmation ou d'exploitation. La phase suivante sera l'étude de faisabilité d'un projet de centrale géothermique (Phase 5 ; Tableau 2).

## IV. JUSTIFICATION DU PROJET

### IV.1. LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ À LA RÉUNION

La Réunion est très dépendante des énergies fossiles pour son approvisionnement énergétique. En 2019, 87,5% de l'énergie consommée provenait des énergies fossiles dont 63,4% d'hydrocarbures et 24,1% de charbon. Parmi les énergies renouvelables, la bagasse et l'hydroélectricité sont dominantes.

En ce qui concerne la production électrique en 2019 (Figure 13), 69% de l'électricité consommée provenaient d'énergies fossiles (charbon, fioul-gazole). Les moyens de production électrique à La Réunion sont localisés sur la carte de la Figure 14. La capacité de production installée totale en 2019 était de 899,7 MWe. Les centrales à fioul/gazole et charbon/bagasses représentent une puissance de 542 MW. Les 8 centrales hydroélectriques représentent une capacité de 133,3 MWe. Les autres sources EnRs sont l'éolien (16,5 MWe), le biogaz (4,4 MWe), et les systèmes photovoltaïques (197,6 MWe).

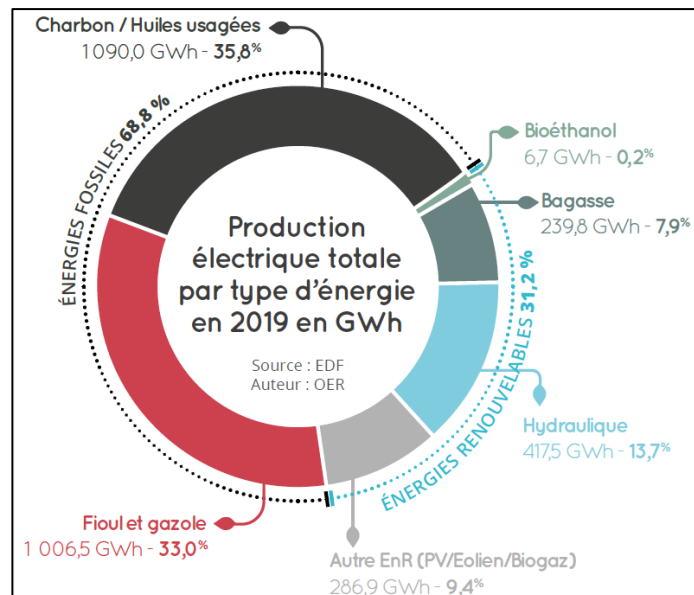


Figure 13 : Origine de l'électricité à La Réunion en 2019 (source : Bilan Énergétique de La Réunion 2019 -Edition 2020. OER, Horizon Réunion).

### IV.2. LES ENJEUX ÉNERGETIQUES

La volonté d'ALBIOMA d'explorer et d'exploiter les ressources géothermiques locales pour la production d'électricité est pleinement en phase avec les politiques énergétiques et environnementales de la Région Réunion, affichées au travers de la PPE et du SRCAE.

La PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Énergie) 2019-2028 de la Réunion prévoit d'augmenter de façon importante la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité pour diminuer la dépendance de l'île aux importations d'hydrocarbures et de charbon. Ceci ira également dans le sens d'une maîtrise des coûts de production de l'électricité en s'affranchissant partiellement des fluctuations des prix des énergies fossiles.

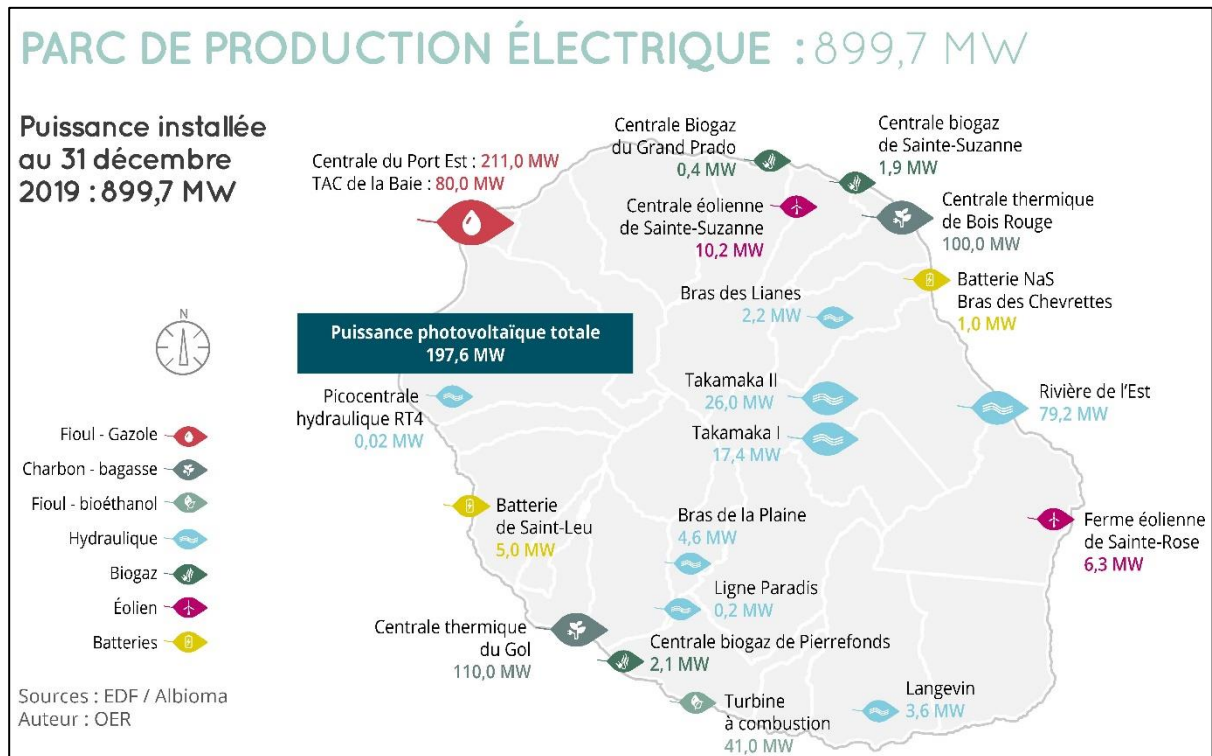


Figure 14 : Répartition des moyens de production électrique à La Réunion en 2019 (source : Bilan Énergétique de La Réunion 2019 -Edition 2020. OER, Horizon Réunion).

Le Schéma Régional Climat Air Energie (SRCAE) est un document stratégique ayant pour vocation de définir les orientations régionales en matière de lutte contre le changement climatique et la pollution atmosphérique sur le territoire de La Réunion. Il vise notamment à avoir une cohérence des volets air, énergie. Le SRCAE de La Réunion qui a été adopté le 16/06/2011 prévoit une augmentation de la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité venant en substitution des sources d'énergies fossiles afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Le taux de production d'énergies renouvelables à La Réunion augmente peu depuis 10 ans et cette stagnation compromet l'atteinte des objectifs de la PPE et du SRCAE. L'introduction de la géothermie comme un moyen de production électrique en substitution aux énergies fossiles (charbon et fuel) apparaît donc comme une nécessité. Faute de pouvoir disposer de données fiables sur le potentiel géothermique réel de la Réunion, la PPE a affiché un objectif prudent de capacité de production électrique de 5 MWe pour la géothermie et a positionné plusieurs sites susceptibles de recevoir une centrale géothermique dont deux à l'intérieur du périmètre du PER du Piton des Neiges (un à Salazie et un à Cilaos).

### IV.3. LES ENJEUX CLIMATIQUES

La dépendance énergétique de La Réunion aux énergies fossiles se traduit par un niveau d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES) important. Dans ce bilan, le secteur de la production électrique représente quasiment la moitié des émissions de CO<sub>2</sub>, à égalité avec le secteur des transport (Figure 15). Afin de réduire cette dépendance et les émissions de CO<sub>2</sub> associées, La Réunion doit développer la production d'énergies renouvelables décarbonées dont la géothermie.

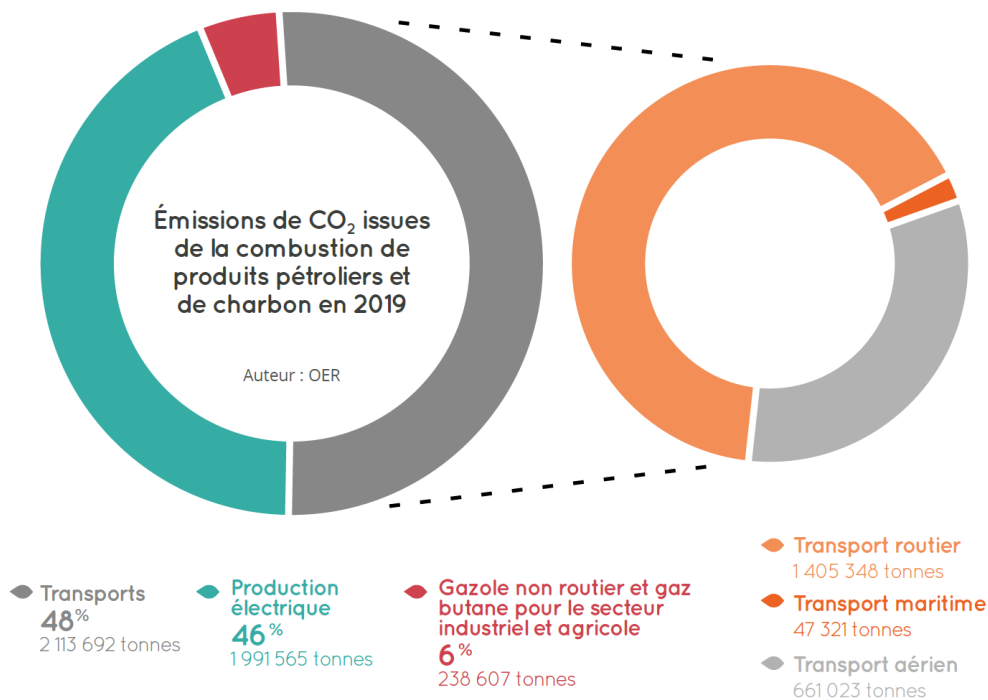


Figure 15 : Répartition par secteurs d'activités des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion d'énergies fossiles à La Réunion en 2019 (source : Bilan Energétique de La Réunion 2019 - Edition 2020. OER, Horizon Réunion).

Le Tableau 3 permet de comparer les taux d'émissions en CO<sub>2</sub> de différents types de centrales de production électrique. La géothermie émet très peu de CO<sub>2</sub> comparé aux sources d'énergies fossiles. L'atout principal d'une future exploitation géothermique à La Réunion est d'offrir une source d'énergie locale, continue, décarbonée et non délocalisable.

Types de centrale	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	H <sub>2</sub> S	Poussières
Charbon	22	0,09	0,22	0	0,7
Diesel	18	0,04	0,12	0	0,2
Gaz naturel	12	0,05	-	0	0
Géothermie	0,7	0	0	0,01	0

Tableau 3 : Taux d'émissions gazeuses de différents types de centrales électriques (en tonne/jour par MWe).

## V. DESCRIPTION DE L'ÉTAT INITIAL DE L'ENVIRONNEMENT

### V.1. INTRODUCTION

Ce chapitre a vocation à présenter le milieu naturel et humain à l'intérieur du périmètre retenu pour le PER. A ce stade, Il est important de mentionner que les implantations éventuelles de futurs forages et d'une future unité de production géothermique ne sont pas encore définies. La description de l'état initial de l'environnement est donc appréhendée à l'échelle du PER.

L'aire restreinte qui sera affectée par la réalisation de forages et/ou la construction d'une centrale fera l'objet d'une étude d'impact environnemental détaillée lors de la préparation de la demande d'autorisation d'ouverture de travaux.

### V.2. LE MILIEU PHYSIQUE

#### V.2.1 Morphologie

Le PER du Piton des Neiges est inscrit à l'intérieur des deux cirques de Salazie et de Cilaos. Les cirques sont des dépressions de forme plus ou moins circulaire entaillant les flancs du massif du Piton des Neiges (Figure 16). Ils sont délimités par des falaises verticales (remparts) dont les dénivelés peuvent dépasser 1000 m de hauteur.

A l'intérieur des cirques, la topographie est très irrégulière avec des plateaux ou îlets séparés par les vallées et gorges encaissées des rivières et ravines. Cette topographie particulière contraint fortement le réseau routier et les zones urbanisables.



Figure 16 : Vue en perspective depuis l'Ouest des 3 cirques du Piton des Neiges (source : Géoportail).



## V.2.2 Les eaux superficielles

Ces milieux ont une sensibilité écologique élevée et il est important de bien appréhender leurs caractéristiques initiales avant tout projet. Les réseaux hydrographiques des cirques de Salazie et de Cilaos sont représentés sur la Figure 17. Ils sont composés de quelques rivières pérennes et de très nombreuses ravines. Les principaux cours d'eau sont :

- La Rivière du Mât et la Rivière des Fleurs Jaunes à Salazie ;
- Les Rivières Bras Rouge, Bras de Benjoin et Bras Saint Paul à Cilaos.

Dans le cirque de Salazie, il faut également mentionner la présence de quelques plans d'eau de faible superficie (mares) : Mare d'Affouche, Mare à Citrons, Mare à Goyaves, Mare à Martin, Mare à Poules d'eau, Mare à Vieille Place. Les mares sont plus rares à Cilaos (Mare à Joncs).

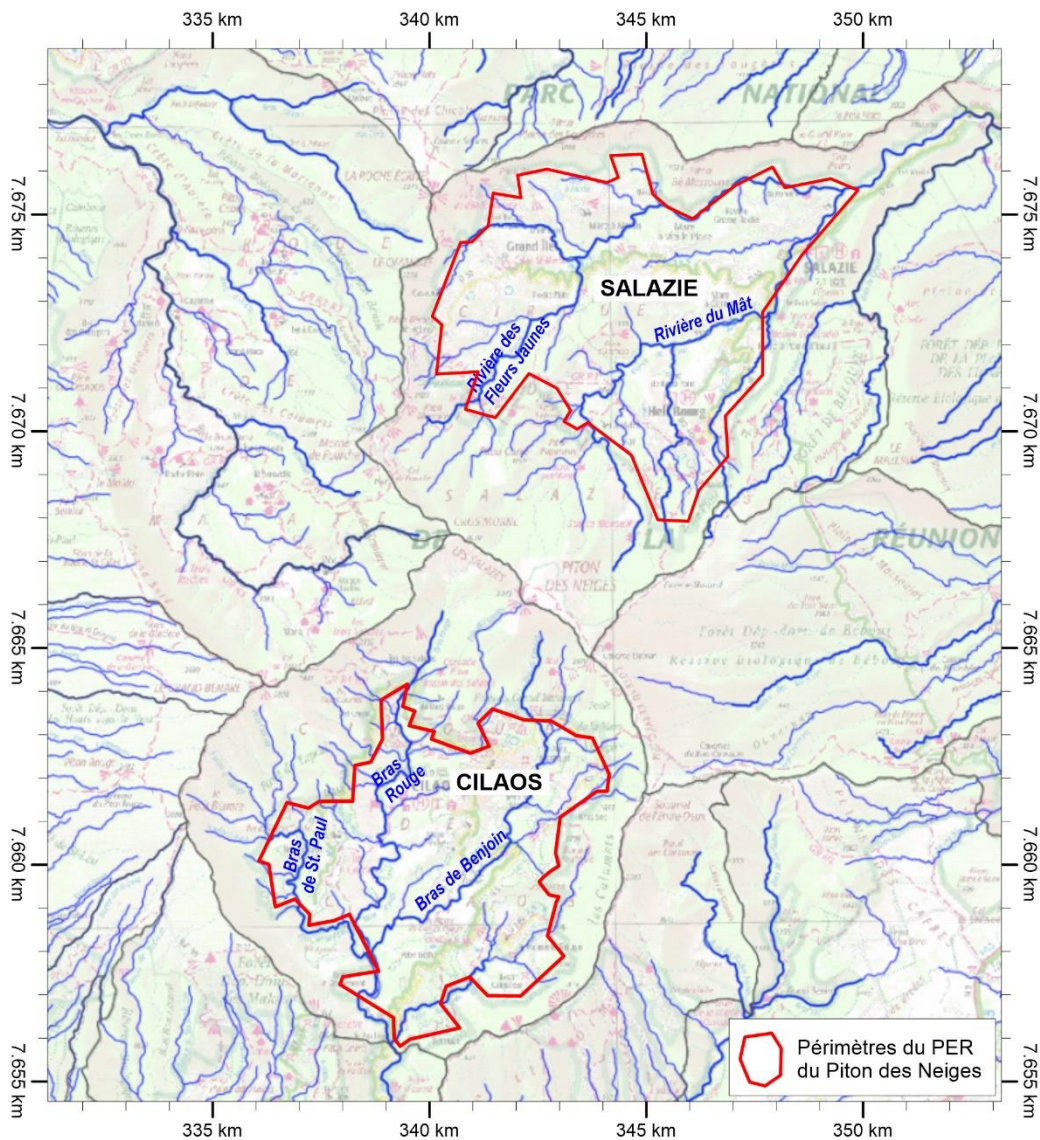


Figure 17 : Carte des cours d'eau présents à l'intérieur et à proximité du périmètre du PER du Piton des Neiges.

Ces cours d'eau sont alimentés par les eaux de ruissellement et les nappes superficielles à travers de très nombreuses sources, avec des régimes très irréguliers et marqués par la saisonnalité des précipitations.

Dans le cadre de la Directive Cadre de l'Eau (DCE), un réseau de 34 stations de suivi de la **qualité physico-chimique**, de la **qualité chimique** et de l'**état biologique** des cours d'eau est en place à la Réunion. En 2019, les analyses ont montré un état chimique moyen à mauvais pour la plupart des cours d'eau de l'île, y compris ceux de Salazie et de Cilaos. Chaque prélèvement comportait un certain nombre de micropolluants issus des activités humaines et agricoles.

L'état biologique est apprécié à travers l'analyse de la diversité des populations de diatomées, de macro-invertébrés benthiques et de poissons. Les résultats pour l'année 2019 sont résumés dans le Tableau 4. Les indices Macro-invertébrés et Poissons sont déclassants pour la plupart des cours d'eau de Salazie et de Cilaos. Les macro-invertébrés benthiques sont sensibles aux conditions hydrauliques et d'oxygénation des cours d'eau. Une diminution globale des effectifs en cabots bouche ronde est observée depuis 10 ans avec des densités en *Cotylopus acutipinis* qui atteignent des minima historiques sur plusieurs cours d'eau. Seul l'indice Diatomées est bon à très bon. Au global, l'état biologique des cours d'eau de Salazie et de Cilaos est jugé Moyen à Médiocre.

Cirque	Salazie			Cilaos	
	Riv. du Mât (Ilêt à Vidot)	Riv. Fleurs Jaunes	Riv. du Mât (Escalier)	Bras de Benjoin	Grand Bras de Cilaos
Code station	25026	25031	22078	18121	34077
Indice Diatomées	0,9861	0,9732	0,9712	0,9659	0,9946
Indice Invertébrés	0,83	0,5	0,55	0,73	0,78
Indice Poisson	0,533	0,733	0,667	-	0,467
Etat biologique	Médiocre	Médiocre	Médiocre	Moyen	Médiocre

Tableau 4 : Notes des Indices Diatomées, Invertébrés et Poissons déterminant l'état biologique des cours d'eau au niveau des cirques de Salazie et de Cilaos en 2019 (source : Chronique de l'Eau Réunion. N°116 – 12 nov. 2020).

### V.2.3 Les eaux souterraines

La Réunion compte 27 masses « d'eau souterraine » qui sont localisées sur la Figure 18. Les deux masses d'eau souterraine concernées par le PER des Piton des Neiges sont répertoriées dans le Tableau 5. Elles sont localisées au sein des formations volcano-détritiques présentes sous le plancher des cirques. Les masses d'eau souterraine font également l'objet d'un suivi qui s'appuie sur l'évaluation de deux paramètres : l'Etat quantitatif ; l'Etat chimique.

L'état global des 2 masses d'eau souterraine concernées par le PER du Piton des Neiges a été jugé en bon état en 2019 (Figure 18).

Code	Nom de la masse d'eau souterraine
FRLG125	Formations volcano-détritiques de Salazie
FRLG126	Formations volcano-détritiques de Cilaos

Tableau 5 : Les masses d'eau souterraine définies au niveau des cirques de Salazie et Cilaos.

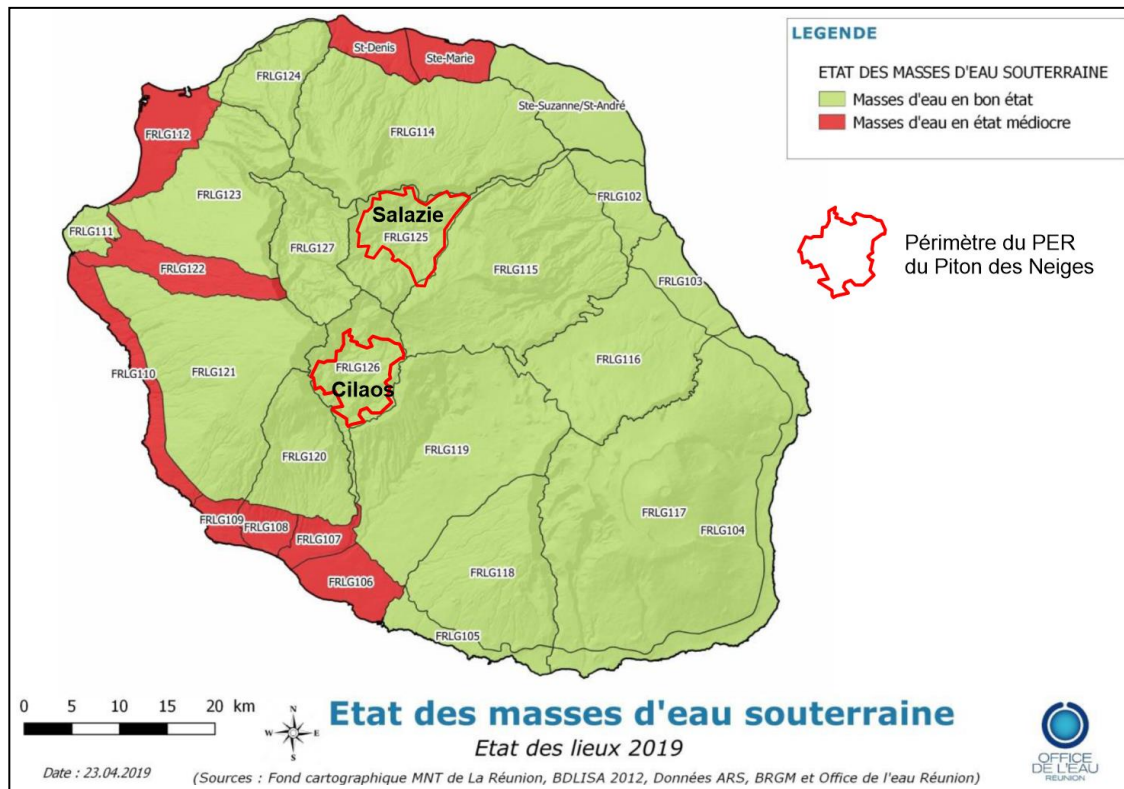


Figure 18 : Evaluation de l'Etat global des masses d'eau souterraine à La Réunion en 2019 (source : SDAGE de la Réunion - Etat des lieux 2019).

#### V.2.4 Les risques naturels

La Réunion est l'une des régions françaises les plus exposées aux risques naturels. Ceci s'explique par son relief jeune, la nature de ses sols, son exposition au milieu tropical océanique et cyclonique. Le Tableau 6 liste les principaux types de risques naturels présents au niveau des cirques de Salazie et de Cilaos et la sensibilité des territoires.

Des Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN) ont été élaborés et sont disponibles pour les deux communes concernées par le PER du Piton des Neiges. Ils comportent un zonage réglementaire basé sur la synthèse des risques naturels au niveau de chaque commune. Ce zonage précise les possibilités de construction et d'aménagement du territoire en fonction du type et du niveau des risques naturels. La Figure 19 présente ce zonage réglementaire à l'échelle du PER. Trois zones sont distinguées :

- en blanc, les zones sans prescriptions où s'appliquent les dispositions réglementaires générales ;
- en bleu, les zones dites **constructibles** sous conditions toutefois de conception, de réalisation, d'utilisation et d'entretien, de façon à ne pas aggraver l'aléa et ne pas accroître la vulnérabilité des biens et des personnes. Ces prescriptions énoncées dans le règlement du PPRN sont applicables à l'échelle de la parcelle ;
- en rouge, les zones dites **inconstructibles** où les constructions ne sont pas autorisées sauf exceptions précisées au règlement du PPRN. Certains aménagements tels que les ouvrages de protection ou les infrastructures publiques n'aggravant pas l'aléa peuvent être autorisés.

Risque naturel	Sensibilité des terrains à l'intérieur du PER	Conformité du projet
<b>Mouvements de terrain</b>	Sensibilité forte à très forte selon les territoires	Des prescriptions particulières sont présentes sur la quasi-totalité du périmètre du PER.  La localisation du projet n'est pas connue à ce stade mais il devra se conformer aux prescriptions réglementaires des PPRN.
<b>Sismicité</b>	Zone de sismicité faible (2/5).	
<b>Inondation</b>	Sensibilité nulle à forte selon les cours d'eau en lien avec les épisodes de précipitations importantes et les cyclones.	
<b>Cyclone (vent)</b>	Sensibilité élevée aux vents forts.	
<b>Volcanisme</b>	Sensibilité faible à très faible.	
<b>Feux de forêts</b>	Sensibilité faible à élevée selon les territoires.	

Tableau 6 : Synthèse des sensibilités des terrains vis-à-vis des risques naturels dans le périmètre du PER du Piton des Neiges.

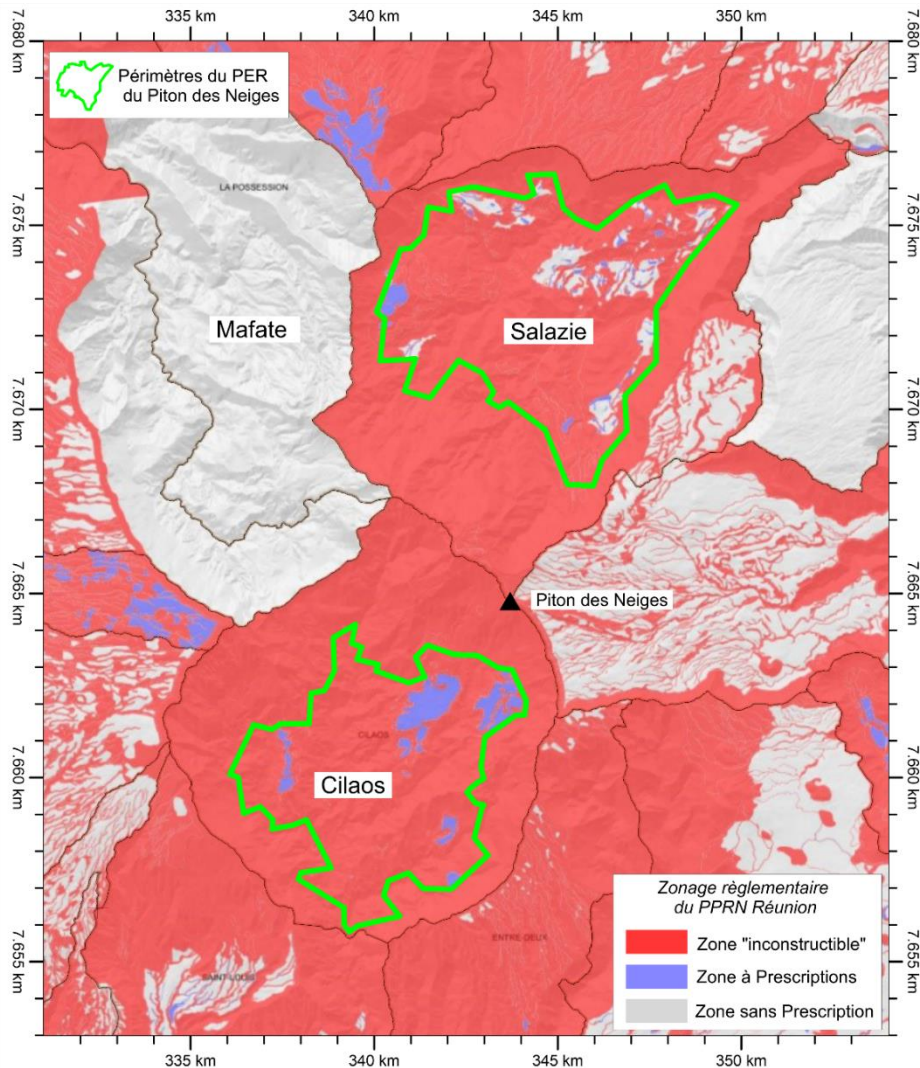


Figure 19 : Carte du zonage réglementaire issu des PPRN (Plan de Prévention des Risques Naturels) au niveau du PER du Piton des Neiges (Source : DEAL Réunion).

**Au niveau des cirques de Salazie et de Cilaos, la majorité des territoires sont en « zone rouge » dite inconstructible car soumis aux aléas Mouvements de terrain et Inondation.** Dans le cadre d'un projet de géothermie, il y aura lieu de vérifier au préalable sa compatibilité avec le zonage du PPRN en fonction de la localisation des différents équipements (plateforme de puits, conduites de transport, centrale, etc...). Parmi les exceptions en zone rouge, sont généralement mentionnés les travaux, aménagements, ouvrages ou exploitations soumis à déclaration d'utilité publique ou à déclaration d'intérêt général suivant l'article L211-7 du code de l'environnement, qui devront toutefois faire l'objet de toutes les mesures adéquates afin de réduire les risques. En particulier, ils devront faire l'objet d'une étude préalable précisant les conditions de faisabilité et de sécurité au regard du ou des types d'aléa présents et montrant qu'ils ne sont pas de nature à aggraver les risques naturels.

### V.3. LE MILIEU NATUREL

#### V.3.1 Présentation générale

A La Réunion, il existe une diversité exceptionnelle des habitats et écosystèmes naturels due au relief et aux variabilités climatiques suivant les paliers d'altitude. Le milieu terrestre suit ainsi un étagement. La présence de trois importants cirques naturels (Mafate, Cilaos, Salazie) et de reliefs tels que le Piton des Neiges et le Piton de la Fournaise se traduit par la présence de plus de 100 microclimats sur l'île et de nombreuses espèces endémiques. On compte ainsi près de 1000 espèces de plantes, 30 espèces d'oiseaux, 6 espèces de reptiles et des centaines d'espèces d'insectes. En raison de cette richesse naturelle considérable, La Réunion a été classée parmi les 34 "points chauds" de la biodiversité dans le monde par l'Union Mondiale pour la Nature (UICN). La préservation de la biodiversité est donc un enjeu fondamental et un défi à relever pour tout projet d'aménagement à La Réunion.

#### V.3.2 La végétation

La végétation réunionnaise se caractérise par sa diversité, son origine géographique très variée, son taux d'endémisme élevé mais aussi une grande diversité, mise à mal par les activités anthropiques. Récemment, des espèces ont été introduites et certaines se sont montrées envahissantes.

À La Réunion, la très grande diversité des formations végétales reflète celle des sols, de l'altitude et des climats. L'université de la Réunion a établi une carte détaillée qui met bien en lumière l'étagement de la végétation en fonction de l'altitude et de la pluviométrie. La Figure 20 montre un détail de cette carte dans la partie centrale de l'île. Elle permet d'appréhender la diversité des milieux naturels à l'intérieur du périmètre des PER du Piton des Neiges, et en particulier la nette différence entre le cirque de Salazie et le cirque de Cilaos. Au niveau du **cirque de Salazie**, les principaux types de végétation rencontrés sont :

- La forêt tropicale de moyenne altitude au vent ;
- La forêt tropicale de montagne au vent.

Au niveau du **cirque de Cilaos**, les principaux types de végétation rencontrés sont :

- La forêt semi-sèche des fonds de cirque ;
- La forêt semi-sèche.

Comme indiqué sur la Figure 20, ces milieux naturels ont été largement dégradés par l'impact des activités humaines à l'intérieur des cirques.

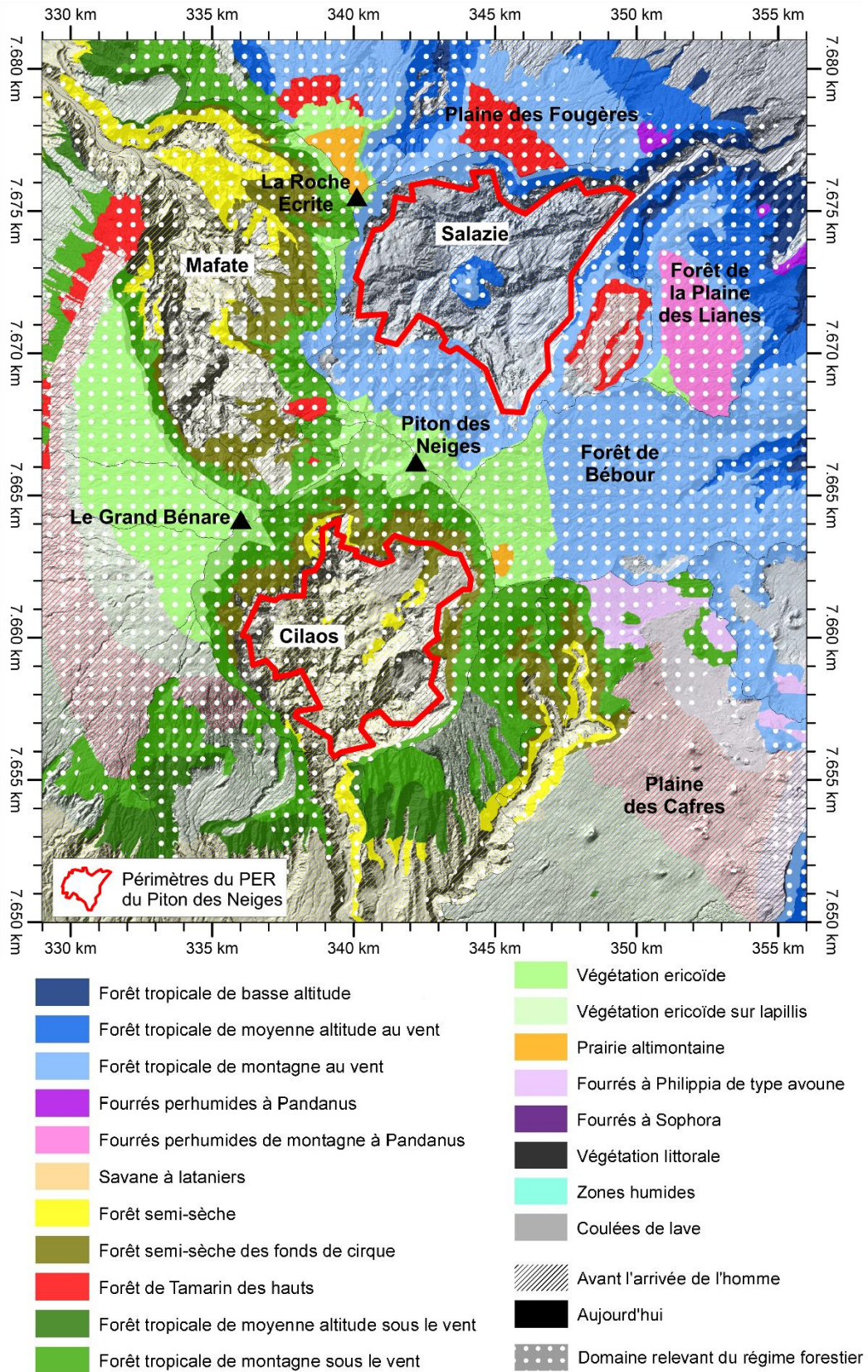


Figure 20 : Extrait de la Carte de végétation de La Réunion (source : carte de végétation (Université Réunion-UMR Cirad Université, PVBMT, 2003) ; contour du domaine forestier-ONF 2016).

### **Endémisme**

À La Réunion, sur les quelques 1000 espèces végétales connues à ce jour, le quart est endémique de l'île. Issues de phénomènes évolutifs, cette flore endémique est très sensible aux perturbations (introductions d'espèces, pression humaine...) et donc également très fragile. 237 espèces végétales ne se rencontrent nulle part ailleurs, parmi lesquelles 82 sont menacées (soit 35%), comme le Petit Tamarin des Hauts (En danger) et le Bois d'éponge (En danger critique). 152 autres espèces sont endémiques des Mascareignes (Réunion, Maurice, Rodrigues).

### **Invasion de plantes exotiques**

A côté des quelques 900 espèces végétales présentes à La Réunion avant l'arrivée de l'Homme, plus de 3 000 autres ont été amenées sur l'île. La plupart sont restées dans les jardins, mais près de 1 000 espèces se sont malheureusement propagées dans la nature, et plus d'une centaine sont devenues envahissantes. Le Longose, le Raisin marron, le Bringellier marron, le Fuschia, l'Ajonc d'Europe, la Liane papillon ou encore le Goyavier font partie de ces plantes invasives répertoriées sur l'île.

### **Espèces protégées**

La Réunion compte 239 espèces végétales protégées qui sont recensées dans l'arrêté ministériel du 27 octobre 2017 relatif à la liste des espèces végétales protégées dans le département de La Réunion.

### **V.3.3 La faune**

Le Tableau 7 établit une liste des principaux groupes faunistiques présents à La Réunion avec le nombre d'espèces indigènes et endémiques répertoriées en 2008. Il reste encore de nombreuses espèces à décrire en particulier chez les insectes.

### **Espèces invasives**

L'envahissement des milieux par les espèces exotiques animales est jugé comme la première source de perte de la biodiversité des écosystèmes terrestres après la destruction des habitats. De nombreuses espèces exotiques ont été introduites sur l'île, certaines sont devenues envahissantes, mettant en péril des écosystèmes jusque-là peu perturbés et très vulnérables.

Groupe taxonomique		Nombre d'espèces indigènes	Nombre d'espèces endémiques	Pourcentage d'espèces endémiques (%)
Faune	Mammifères	2	-	-
	Oiseaux	18	8	44,4
	Reptiles	2	2	100
	Mollusques terrestres	55	20	36,4
	Crustacés d'eau douce	9	1	11,1
	Poissons d'eau douce	21	1	4,8
	Insectes	1491	525	35,2

Tableau 7 : Taux d'endémisme des groupes animaux à La Réunion en 2008 (tiré de : Comment compenser les impacts résiduels sur la biodiversité ? Guide méthodologique pour l'île de La Réunion. DEAL Réunion, janvier 2013)

### Les menaces

Comme pour la flore, l'île de La Réunion héberge de nombreuses espèces qui ne se rencontrent nulle part ailleurs. Parmi celles-ci, le Tuit-tuit et le Gecko vert de Manapany, tous deux sont classés "En danger critique". Trois des quatre espèces de phasmes indigènes sont également endémiques de l'île, dont le Phasme du Palmiste rouge, "En danger critique". L'état des lieux de l'UICN (2010) fait également apparaître un fort taux d'extinction chez les oiseaux et les reptiles terrestres. Près du quart des espèces d'oiseaux de La Réunion sont désormais éteintes à l'échelle mondiale, soit 13 espèces sur les 55 qui étaient présentes avant l'arrivée de l'Homme. Parmi celles-ci, onze espèces étaient endémiques de l'île, comme le Solitaire de la Réunion.

Les menaces actuelles qui pèsent sur la biodiversité sont : les invasions biologiques, le braconnage, les feux de forêt et la surexploitation, le changement climatique, la fréquentation accrue, le défrichement, l'extension urbaine, les aménagements et infrastructures.

La Réunion compte 48 espèces animales terrestres protégées (vertébrés et insectes) qui sont répertoriées dans les arrêtés ministériels du 17 février 1989 et du 19 novembre 2007.

### V.3.4 Les espaces naturels protégés

En lien avec la richesse et la diversité de ses milieux naturels, l'île de La Réunion comporte de très nombreux espaces naturels protégés qu'il convient de recenser ici dans la mesure où un futur projet de géothermie devra en tenir compte et être compatibles avec les orientations définies pour la protection de ces milieux naturels. A La Réunion, 44% du territoire bénéficie d'une protection forte du milieu naturel. Les espaces naturels protégés recensés à l'intérieur ou en périphérie des périmètres du PER du Piton des Neiges sont :

- Le Parc National de La Réunion ;
- Le Bien inscrit au Patrimoine mondial de l'UNESCO ;
- Les Arrêtés préfectoraux de protection du biotope (APPB) ;
- Les espaces naturels sensibles (ENS) ;
- Les réserves biologiques ;
- Les Zones humides ;
- Les ZNIEFF terrestres.

#### V.3.4.1 Le Parc National de La Réunion

Parmi les espaces protégés, le **Parc National de La Réunion** est le plus important et le plus emblématique. Il a été créé par le décret n° 2007-296 du 5 mars 2007. Il comporte une zone cœur et une aire d'adhésion périphérique (Figure 21). Son cœur protégé couvre la partie centrale de l'île, avec une surface de 105 500 ha soit 42 % du territoire de l'île. Il est à vocation naturelle, à l'exception de quelques îlets habités et parcelles agricoles exploitées. L'aire d'adhésion et l'aire ouverte à l'adhésion couvrent une surface de 87 696 ha (35 % du territoire) qui entoure le cœur de parc.

Pour la zone **cœur du parc**, espace à protection forte, la Charte du Parc National définit une réglementation « sur mesure » ainsi que des mesures contractuelles en faveur d'une gestion exemplaire de cet espace à forte valeur patrimoniale. La Charte propose en outre des mesures spécifiques pour le cœur habité et pour le cœur cultivé. Pour **l'aire d'adhésion**, espace de partenariat, la Charte n'introduit pas de réglementation nouvelle mais propose des orientations de développement durable, axées sur la protection et la valorisation des patrimoines naturels, culturels et paysagers.



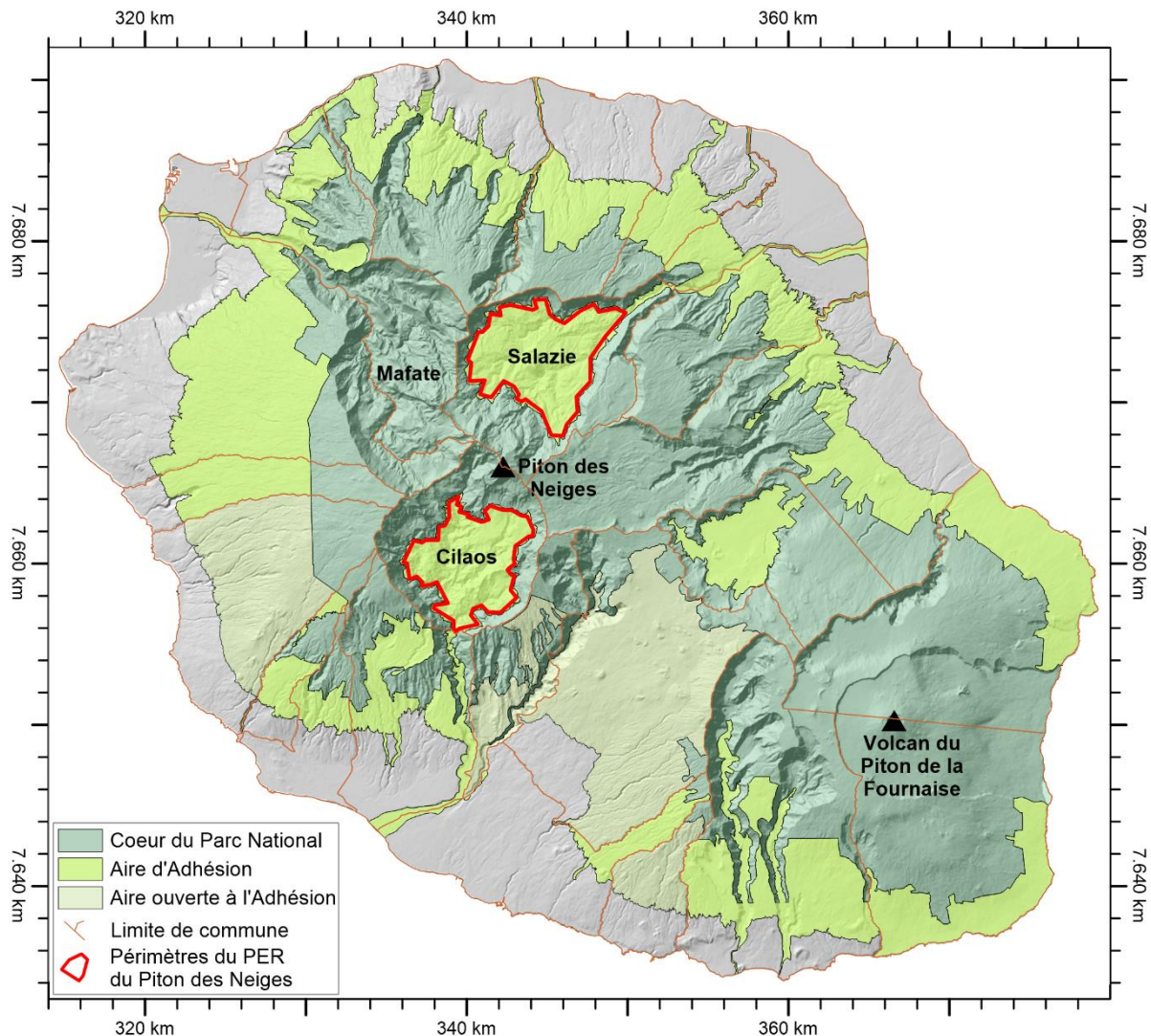


Figure 21 : Périmètres du PER du Piton des Neiges et carte des zones du Parc National de La Réunion (source : DEAL Réunion).

Les deux polygones du PER du Piton des Neiges sont circonscrits à l'intérieur de l'aire d'adhésion correspondant aux cirques de Salazie et de Cilaos (Figure 21). Ils sont entourés par la zone cœur du parc.

### **Les travaux au sein de l'aire d'adhésion**

Les travaux projetés au sein de l'aire d'adhésion du Parc National de La Réunion ne nécessitent pas d'autorisation de l'établissement du Parc National. Toutefois, les travaux et aménagements qui sont soumis à une étude d'impact en application de l'article L. 122-1 du code de l'environnement, ou qui sont soumis à autorisation en application des articles L. 214-3 (loi sur l'eau) ou L. 512-1 (installations classées pour la protection de l'environnement) et qui « sont de nature à affecter de façon notable le cœur du Parc » sont soumis à avis simple de l'établissement public du Parc National émis après consultation de son Conseil scientifique.

### **Les travaux dans la zone cœur du Parc National**

En ce qui concerne la production d'énergie géothermique dans le cœur du parc, elle est abordée au niveau de l'Annexe 1.1 de la Règlementation dans le cœur du Parc National, et plus précisément dans sa Modalité 17 relative aux travaux, constructions ou installations pouvant être autorisés par le conseil d'administration qui précise dans son alinéa III :

*Pour les constructions et installations indispensables à la production d'énergie géothermique, l'autorisation dérogatoire du conseil d'administration ne peut être délivrée que pour les forages géothermiques exploratoires et les forages inclinés passant en profondeur sous le cœur de parc n'ayant pas d'impacts négatifs directs ou indirects sur le cœur, et sous réserve que les installations d'exploitation envisagées soient situées hors du cœur du parc.*

La réglementation qui s'applique à l'intérieur de la zone cœur du Parc autorise donc la réalisation de forages directionnels implantés à la bordure interne du périmètre du PER et passant en profondeur sous la zone cœur du Parc. Cette disposition est importante si l'on se réfère à la localisation des zones d'intérêt dans les cirques de Salazie et de Cilaos où sont localisées les sources thermales (voir Figure 9 page 20).

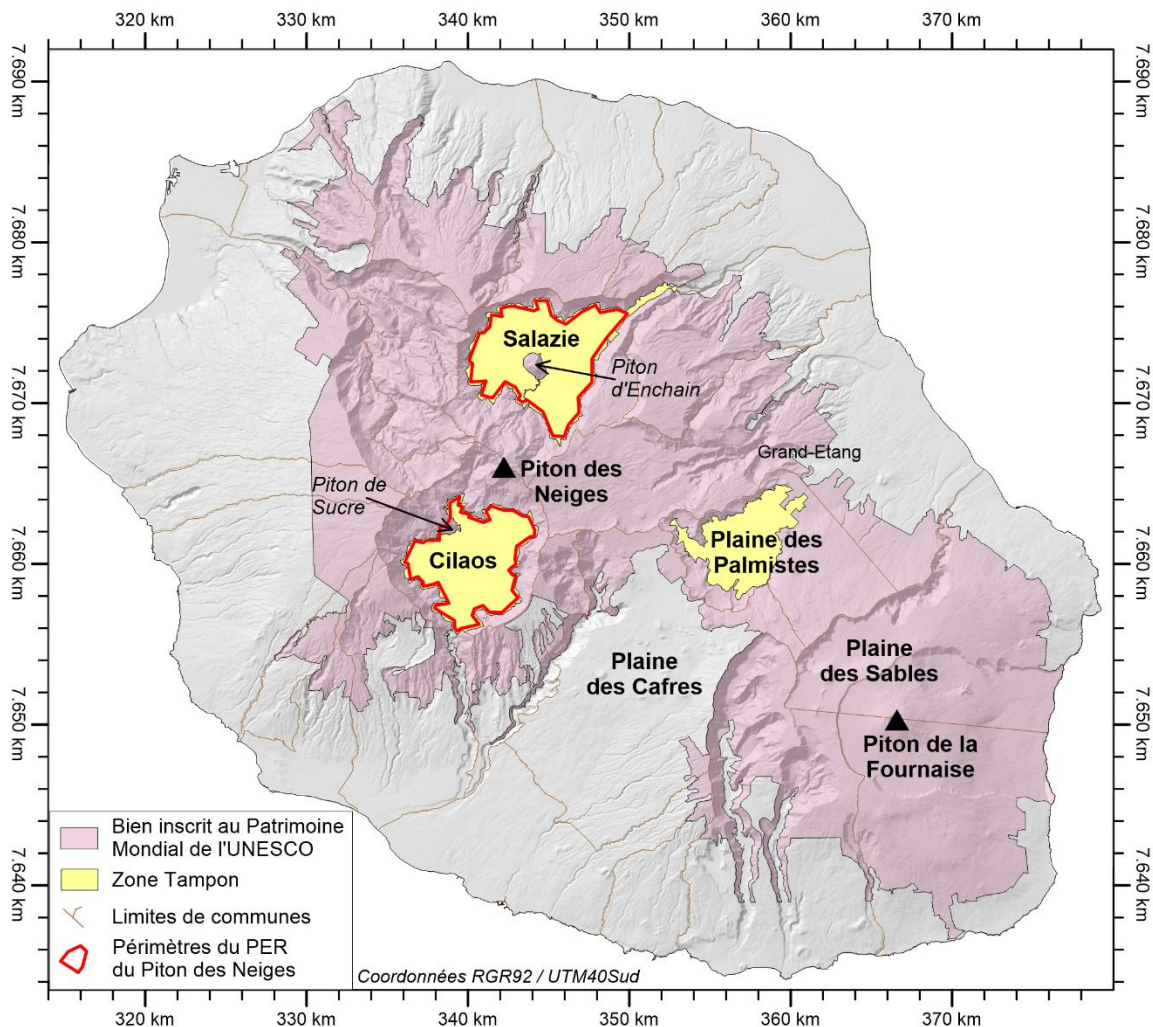


Figure 22 : Carte du Bien inscrit au Patrimoine Mondial de l'UNESCO et de ses zones tampons et périmètres du PER du Piton des Neiges (source : DEAL Réunion).

#### **V.3.4.2 Le Bien inscrit au Patrimoine Mondial de l'UNESCO.**

L'autre espace naturel protégé emblématique de la Réunion depuis le 1er août 2012 est le Bien inscrit au Patrimoine Mondial de l'UNESCO. Ce bien coïncide quasiment avec la délimitation du cœur du Parc National de La Réunion (Figure 22). Il est complété par des « zones tampons » (fond des cirques de Salazie et de Cilaos et Plaine-des-Palmistes), qui correspondent majoritairement à des zones anthropisées encerclées par des milieux naturels. Ces zones tampons revêtent une importance particulière pour la préservation de l'intégrité du Bien, et notamment de son esthétisme et de son intégrité visuelle.

Les deux polygones du PER du Piton des Neiges sont circonscrits à l'intérieur des cirques de Salazie et de Cilaos qui sont à la fois aire d'adhésion au Parc National et Zone tampon du Bien inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO. Dans le cadre du projet de développement géothermique porté par ALBIOMA, il sera donc particulièrement important de prendre en compte les contraintes imposées par la réglementation du Parc National de La Réunion et son articulation avec le Bien inscrit au Patrimoine Mondial de l'UNESCO et sa Zone Tampon.

#### **V.3.4.3 ZNIEFFs terrestres**

Les Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) constituent des outils de connaissance et non des espaces protégés et ne sont donc pas opposables aux tiers. Elles permettent cependant d'éclairer la décision d'autorisation et de définir les modalités de mise en œuvre de projets d'aménagement (notamment sur la base de l'étude d'impact) sur leurs aires de répartition. La richesse en biodiversité qui les caractérise, croisée aux pressions qui s'appliquent dessus, peuvent entraîner la création d'espaces protégés sur tout ou partie de ces ZNIEFFs. On distingue deux types de ZNIEFF :

- Les ZNIEFFs de type I recouvrent des territoires correspondant à une ou plusieurs unités écologiques homogènes abritant au moins une espèce ou un habitat naturel caractéristique remarquable ou rare, justifiant d'une valeur patrimoniale plus élevée que celle du milieu environnant ;
- Les ZNIEFFs de type II réunissent des milieux naturels formant un ou plusieurs ensembles d'unités écologiques homogènes possédant une cohésion élevée et entretenant de fortes relations entre elles. Elles se distinguent de la moyenne du territoire régional par leur contenu patrimonial plus riche et leur degré d'artificialisation plus faible.

La carte de la Figure 23 montre la distribution des ZNIEFFs à l'échelle du PER du Piton des Neiges. La majeure partie des cirques de Salazie et de Cilaos est occupée par deux ZNIEFFs de type II (Salazie et sa vallée, Cilaos et sa vallée). Ces deux ZNIEFFs de grande taille coexistent avec des ZNIEFFs de type I de taille plus réduite et justifiant d'une valeur patrimoniale plus élevée.

L'importance des ZNIEFFs au niveau des cirques de Salazie et de Cilaos illustre la richesse du milieu naturel et sa biodiversité remarquable. Les travaux qui seront réalisés dans le cadre du projet géothermique d'ALBIOMA devront prendre en compte cette biodiversité au niveau des études d'impact et appliquer les mesures nécessaires pour sa protection.

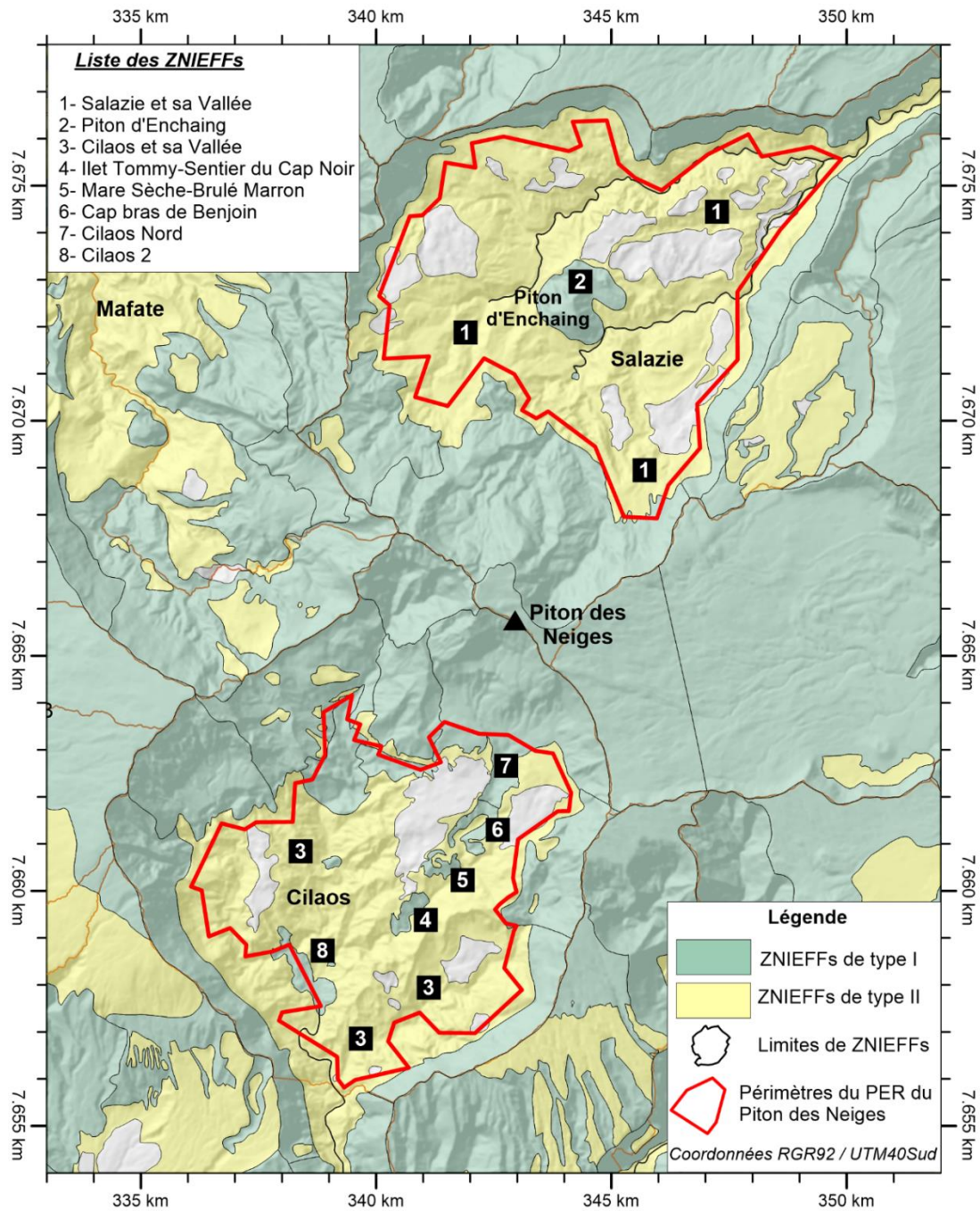


Figure 23 : Cartographie des ZNIEFFs terrestres à l'échelle du PER du Piton des Neiges (source : DEAL Réunion).

#### V.4. LE MILIEU HUMAIN ET LES DONNEES SOCIO-ECONOMIQUES

##### V.4.1 Démographie

Le Tableau 8 récapitule les données démographiques des deux communes concernées par le PER du Piton des Neiges. Elles ont des populations et des densités de population équivalentes et faibles, comparé à d'autres communes de la Réunion. Leur population est stable depuis de nombreuses années.

<b>Commune</b>	<b>Surface (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Nombre d'habitants (chiffres au 1/1/2020)</b>	<b>Densité (nbre Hab./km<sup>2</sup>)</b>
Salazie	103,8	7 618	73
Cilaos	84,4	6 117	72
La Réunion	2 503,7	860 000	342

Tableau 8 : Données démographiques sur les deux communes de Salazie et Cilaos concernées par le PER du Piton des Neiges (Données 2020).

##### V.4.2 Occupation des sols

La Figure 24 montre l'occupation des sols telle que cartographiée par CORINE Land Cover (données 2018). Cette cartographie est issue de l'interprétation visuelle d'images satellitaires. Elle comprend 44 postes répartis selon 5 grands types d'occupation du territoire :

- Territoires artificialisés ;
- Territoires agricoles ;
- Territoires forestiers et milieux semi-naturels ;
- Zones humides ;
- Surfaces en eau.

En ce qui concerne le cirque de Salazie, l'occupation des sols se répartit approximativement entre territoires forestiers (40%), territoires agroforestiers (20%), territoires agricoles (30%) et territoires artificialisés (10%). En ce qui concerne le cirque de Cilaos, les territoires forestiers dominent largement (80%). Les territoires agricoles ne représentent que 10% environ des surfaces et le tissu urbain 10%.

##### V.4.3 Economie

Le Tableau 9 détaille les emplois par secteurs d'activité dans les deux communes de Salazie et de Cilaos concernées par le PER du Piton des Neiges. Les emplois non marchands concernent près de la moitié d'entre eux.

L'agriculture est un secteur d'activité important à Salazie. Elle est axée vers les cultures vivrières. Le tourisme est un autre secteur d'activité important. Il s'était développé dès le 19<sup>ème</sup> siècle à Hell Bourg en lien avec les thermes. Cette activité thermale cessa dans les années 1950. Il en reste aujourd'hui des bâtiments d'une grande valeur patrimoniale.

Les principales activités économiques de Cilaos sont le tourisme et l'agriculture avec notamment la vigne et la culture de la lentille. Les thermes de Cilaos qui ont fait l'objet de travaux importants attirent de plus en plus de touristes. L'eau minérale gazeuse de Cilaos est également mise en bouteille depuis 1999.

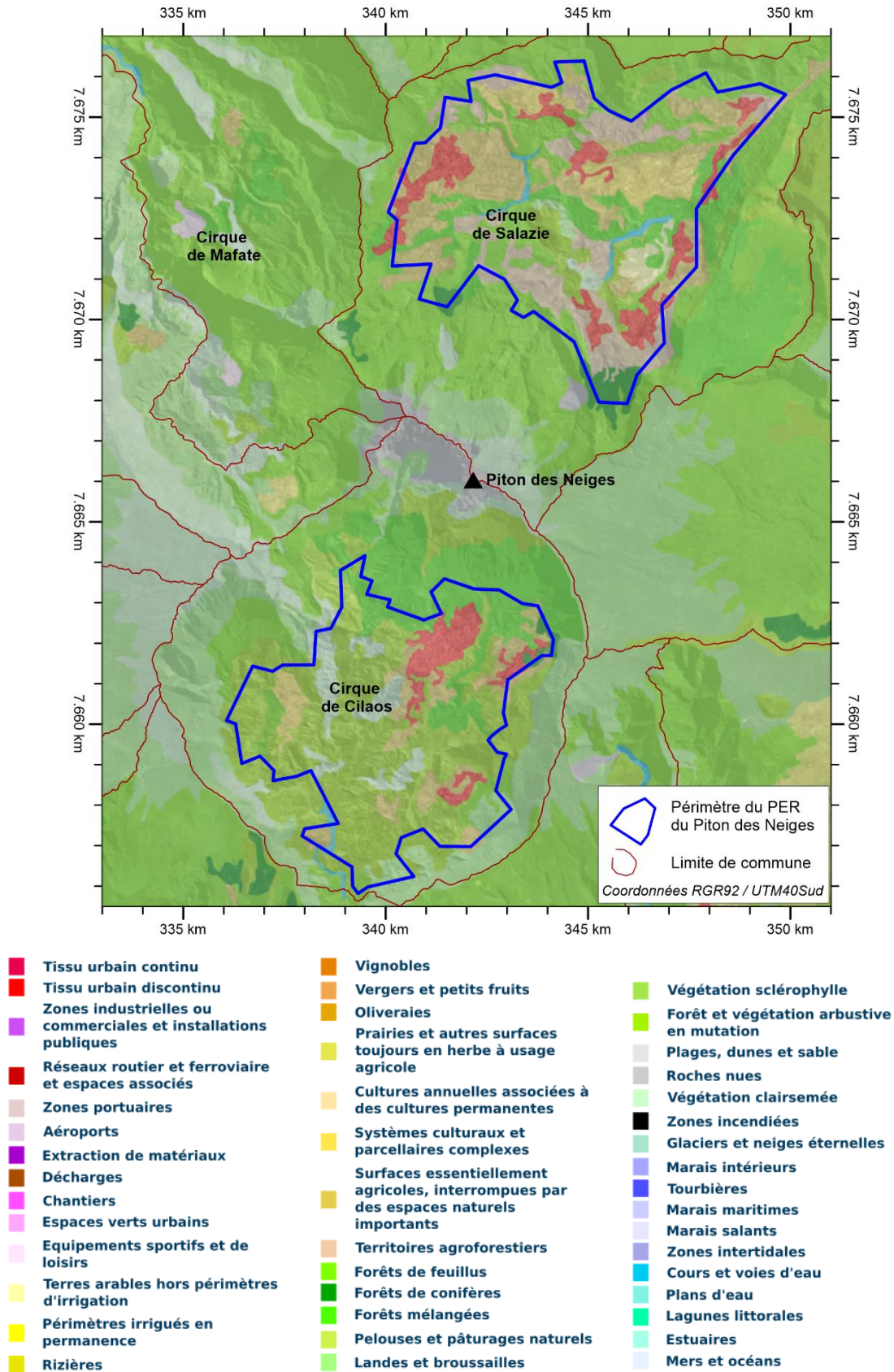


Figure 24 : Carte d'Occupation des sols au niveau du PER du Piton des Neiges (données 2018) d'après CORINE Land Cover.

	<b>Commune de Salazie</b>		<b>Commune de Cilaos</b>		<b>Île de La Réunion</b>
	Nombre	%	Nombre	%	%
Ensemble	1 336	100	1 315	100	1
Agriculture	271	20,3	49	3,7	
Industrie	25	1,9	44	3,3	7
Construction	133	9,9	83	6,3	5, 5
Commerces, transports, services divers	304	22,7	554	42,1	45
Administration publique, santé, enseignement, action sociale	603	45,1	586	44,6	41,5

Tableau 9 : Emplois selon les secteurs d'activité dans les deux communes concernées par le PER du Piton des Neiges (Chiffres 2018 ; source : INSEE).

## **VI. LES IMPACTS DES TRAVAUX**

### **VI.1. INTRODUCTION**

Cette demande de Permis Exclusif de Recherche de gîtes géothermiques à La Réunion déposée par la société ALBIOMA s'inscrit dans le cadre d'un projet de développement géothermique visant à explorer une ressource potentielle à l'intérieur du périmètre du permis sollicité. En cas de résultats positifs des forages d'exploration, ALBIOMA ambitionne de conduire un projet de développement visant à la construction et l'exploitation d'une centrale géothermique pour la production d'électricité.

Ces différentes phases de travaux généreront des impacts environnementaux distincts. Toutefois, à ce stade préliminaire, il est proposé d'examiner les impacts environnementaux associés aux travaux de forages d'exploration prévus dans le cadre de ce Permis Exclusif de Recherches.

Ces impacts potentiels et les mesures préventives envisagées sont présentés de façon générale dans la mesure où l'implantation précise des travaux n'est pas encore arrêtée.

NB : Cet examen préliminaire des impacts environnementaux ne remplace en aucun cas les études d'impacts qui seront réalisées dans le cadre des dossiers réglementaires de Demande d'Autorisation d'Ouverture de Travaux Miniers (DAOTM) et qui traiteront de façon détaillée de tous ces impacts.

### **VI.2. RESUME DES TRAVAUX D'UN PROGRAMME DE FORAGE D'EXPLORATION**

Un programme de forages d'exploration comporte généralement un à trois puits. Leur implantation précise n'est pas encore arrêtée, ils s'inscriront cependant à l'intérieur des périmètres du PER.

Une ou plusieurs plateformes de forages seront préparées. Leur surface sera comprise entre 3000 et 5000 m<sup>2</sup> selon l'encombrement de la machine de forage et de ses auxiliaires. Si nécessaire, une voie d'accès sera aménagée.

La durée prévisible des travaux de forage et de tests des puits est de l'ordre de 6 mois à 1 an.

Une fois les travaux de forage et de tests terminés, la ou les plateformes seront nettoyées. Si les puits sont conservés, ils seront équipés d'une tête de puits avec des vannes maîtresses pour assurer leur fermeture. La ou les plateformes seront aménagées et clôturées.

Si la décision d'abandonner les puits est prise, ils seront bouchés dans les règles de l'art. La ou les plateformes seront démantelées et remises à l'état initial.

### **VI.3. LES IMPACTS DES TRAVAUX ET LES MESURES ENVISAGEABLES**

Les tableaux suivants résument les impacts attendus des travaux et les mesures envisagées selon les thématiques suivantes :

- Milieu naturel terrestre (Flore, Faune) ;
- Eaux de surface, milieux aquatiques ;
- Eaux souterraines ;
- Ressources en eau ;
- Qualité de l'air ;
- Nuisances sonores ;
- Risques naturels ;



- Circulation routière ;
- Déchets et effluents ;
- Paysages et impacts visuels ;
- Monument et patrimoine culturel ;
- Activité économiques locales ;
- Contribution à l'économie locale.

### Milieu naturel terrestre (Flore, Faune)

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Pertes de biotopes liés au défrichage et aux terrassements ;	Choix de sites évitant au maximum le défrichage ; Limitation des surfaces terrassées ; Défrichage réalisé en dehors des périodes de reproduction, sous le contrôle d'un expert faune et flore ;	Minimum
Bruits des engins éloignant certaines espèces ;	Utilisation d'engins répondant aux normes en matière de bruit ;	Minimum
Nuisances lumineuses des chantiers ;	Orientation des sources lumineuses vers le chantier ; Restriction des usages ;	Minimum
Présence de déchets attirant des nuisibles ;	Stockage des déchets en contenants fermés ; Enlèvement régulier des déchets et propreté des sites.	Nul
Pollutions des eaux superficielles impactant les biotopes de certaines espèces aquatiques.	Réseau de collecte des eaux de ruissellement sur les plateformes de forage muni de dispositifs de traitement des eaux avant rejet dans milieu naturel.	Nul

### Eaux de surface, milieux aquatiques

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Déversements accidentels entraînant la pollution des eaux de surfaces et des sols : hydrocarbures et produits chimiques, fluide de forage lors des opérations, fluide géothermal lors de l'essai de production.	Stockage des hydrocarbures et produits chimiques sur des bacs de rétention conformément à la réglementation ; Fluide de forage utilisé en circuit fermé et stocké dans des bacs et bassins étanches ; Réseau de collecte des eaux de ruissellement sur les plateformes de forage muni de dispositifs de traitement des eaux avant rejet dans le milieu naturel ; Fluide géothermal stocké dans des bassins étanches, rejeté dans milieu naturel ou réinjecté dans le puits selon ses caractéristiques physico-chimiques.	Nul

**Eaux souterraines**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Contamination par le fluide de forage durant la foration ;  Contamination par le fluide géothermal ;  Pollutions par des infiltrations de polluants et eaux polluées.	Contrôle des volumes de fluide de forage pendant la foration pour détecter des pertes dans les aquifères et adapter la rhéologie du fluide et les équilibres hydrostatiques ; Mise en place dans le puits de plusieurs cuvelages acier emboîtés et cimentés constituant des barrières étanches au droit des aquifères ; En cas d'abandon des puits, mise en place de plusieurs bouchons de ciment dans le puits.	Nul

**Ressources en eau**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Prélèvements d'eau pour les besoins du forage.	Sollicitation du réseau d'adduction uniquement pour des besoins limités ; Recyclage du fluide de forage pour limiter les besoins en eau ; Utilisation d'eau prélevée en puits ou en rivière pour les besoins importants.	Nul

**Qualité de l'air**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Emissions de poussières ;	Eloignement de la plateforme des zones habitées ; Arrosage des sols nus pour fixer les poussières ;	Minimum
Emissions de gaz d'échappement des moteurs ;	Utilisation d'engins de chantier et moteurs conformes à la réglementation en matière d'émissions de gaz ;	Minimum
Emissions de gaz géothermaux (H <sub>2</sub> S).	Contrôle des venues de gaz géothermaux pendant le forage et mise en place de BOP (Bloc d'Obturation de Puits) en tête de puits ; Durée limitée de l'essai de production ; Système de détection du gaz H <sub>2</sub> S sur la plateforme et aux alentours ; Masques et équipements respiratoires autonomes présents sur le chantier ; Manche à air installée sur le chantier ; Formation du personnel aux dangers inhérents au gaz H <sub>2</sub> S.	Minimum

**Nuisances sonores**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Bruits des moteurs de la machine de forage 24hx24h et 7jx7j ;	Eloignement de la plateforme des zones habitées ; Travaux les plus bruyants différés en période diurne ;	Minimum
Circulation des véhicules autour du chantier ;	Restriction de circulation nocturne ; Restrictions des klaxons et avertisseurs ; Conformité des engins et moteurs à la réglementation ;	Minimum
Décharge du fluide géothermal à l'atmosphère lors de l'essai de production.	Isolation phonique des sources les plus bruyantes au niveau du chantier ; Isolation phonique au niveau des riverains impactés ; Aménagement de la ligne de décharge du fluide lors de l'essai de production ; Mesures de compensation (indemnisation, relogement temporaire) pour les riverains proches qui seraient impactés malgré les mesures appliquées.	Nul

**Risques naturels**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Ravinement et érosion des sols par ruissellements des eaux de pluies, inondation ;	Revégétalisation des sols mis à nu par les travaux ;	Nul
Déstabilisation des pentes et mouvements de terrain ;	Dimensionnement approprié des réseaux d'eaux pluviales ;	Nul
Déstabilisation du mât de forage par vents violents.	Prise en compte des données de METEO France pour calculer la résistance du mât de forage aux vents.	Nul

**Circulation routière**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Augmentation temporaire du trafic routier et des risques d'accidents ;	Panneaux d'information sur la présence du chantier à l'intention des usagers de la route concernée ;	Nul
Encombrement des voies de circulation ;	Aire de retournement aménagée sur la plateforme de forage ; Parking pour les véhicules du personnel et les livraisons aménagées sur la plateforme de forage ;	Nul
Apport de boues sur la chaussée.	Nettoyage de la voirie si présence de boue.	Nul

**Déchets et effluents**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Risques de pollutions des eaux de surface par les déchets et les effluents ;	Etanchéification de la zone d'opération ; Fluide de forage et fluide géothermal stockés dans des bacs et bassins étanches ;	Nul
Présence de déchets attirant les nuisibles ; Risque d'atteinte à la santé des personnels et des riverains.	Stockage des déchets en contenants fermés ; Collecte, tri sélectif et enlèvement des déchets vers des filières de traitement et recyclage agréées ; Nettoyage du chantier et de ses abords de tout déchet pour éviter d'attirer des nuisibles.	Nul

**Paysages et impact visuel**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Création de plateforme, ouverture de voies d'accès ;	Recherche de sites d'implantation favorables permettant de limiter les impacts visuels ; Revégétalisation des sols nus ;	Minimum
Mât de forage visible de loin ;	Clôture de chantier facilitant l'intégration visuelle ;	Minimum
Eclairage nocturne ;	Eclairage centré sur le chantier ;	Minimum
Panache de vapeur lors des essais de production.	Essai de production de courte durée ;	Minimum

**Monument et patrimoine culturel**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Impact visuel dans le périmètre de protection de monument historique.	Respect des périmètres de protection, Intégration paysagère des équipements.	Nul Minimum

**Activités économiques locales**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Accaparement de terrains agricoles ;	Limitations des surfaces agricoles accaparées ; Clôture des sites pour empêcher la divagation des animaux ;	Minimum
Interférences avec les activités touristiques.	Limitations des nuisances sonores, des nuisances olfactives, de la gêne au niveau du trafic routier, à proximité d'une zone touristique ; Actions d'information sur la nature des travaux en cours et possibilités d'éco-tourisme industriel autour du chantier.	Minimum Positif

**Contribution à l'économie locale**

<i>Impacts attendus des travaux</i>	<i>Mesures d'évitement, de réduction et de compensation</i>	<i>Impacts résiduels après mesures</i>
Sous-traitances auprès des entreprises locales dans les domaines du génie civil, des transports, de la mécanique, de la maçonnerie, de la location d'engins de chantier ;	Retombées économiques bénéfiques.	Positif
Embauche de personnels temporaires pour renforcer les équipes de forage ;	Retombées économiques bénéfiques.	Positif
Activités temporaires de restauration et d'hôtellerie.	Retombées économiques bénéfiques.	Positif

## Références

- Bénard B., Famin V., Agrinier P., Aunay B., Lebeau G., Sanjuan B., Vimeux F., Bardoux G., Chrystel Dezayes C., (2020) - Origin and fate of hydrothermal fluids at Piton des Neiges volcano (Réunion Island) : A geochemical and isotopic (O, H, C, Sr, Li, Cl) study of thermal springs. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 392 (2020) 106682.
- Berthod, C., (2016) - Relation entre système intrusif et instabilités sur un volcan basaltique (Piton des Neiges, La Réunion). Université de La Réunion.
- Chaput M., (2013) – Déformation et activité intrusive des volcans boucliers - Du terrain à la modélisation numérique (Piton des Neiges, La Réunion). Sciences de la Terre. Université de la Réunion.
- Chovelon P. (1986) - Forage géothermique de Salazie (SLZ1). Étude géologique du forage et dossier des ouvrages exécutés. (N° 86CFG018).
- Demange, J., Chovelon, P. et Puvilland, P., 1989. Geothermal model of the Salazie Cirque (Reunion Island): volcanic and structural implications. *J. Volcanol. Geotherm Res.*, 36: 153-176.
- De Voogd, B., Pou Palomé, S., Hirn, A., Charvis, P., Gallart, J., Rousset, D., Danobeitia, J. et Perroud, H., (1999) - Vertical movements and material transport during hotspot activity; seismic reflection profiling offshore La Réunion. *Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets*, 104,(2): 2855-2874.
- DIREN La Réunion (2005) - Stratégie réunionnaise pour la biodiversité 2005-2010.
- Duncan, R.A., (1981) - Hotspots in the southern oceans – an absolute frame of reference for motion of the Gondwana continents. *Tectonophysics*, 74: 29-42.
- Gayer, E., Michon, L., Louvat, P., Gaillardet, J., (2019) - Storm-induced precipitation variability control of long-term erosion. *Earth Planet. Sci. Lett.* 517, 61–70.
- Morgan, W.J., (1981) - Hotspot tracks and the opening of the Atlantic and Indian Oceans. Dans: C. Emiliani (Ed), *The Sea*, pp. 443-487.
- Quidelleur, X., Holt, J.W., Salvany, T., Bouquerel, H., 2010. The double structure of the Réunion geomagnetic event based on new K–Ar ages from the type locality, massif de la Montagne, Réunion Island (Indian Ocean) and assessment of the global context. *Geophysical Journal International* 182, 699–710.
- Rançon J-Ph., Rocher Ph., (1985) – Découverte de zones fumerolliennes récentes dans el cirque de Salazie (Île de La Réunion, Océan Indien). *C.R. Acad. Sc. Paris, T300, série II, n°16*, pages 821-826.
- Rocher Ph. (1988) – Contexte volcanique et structural de l'hydrothermalisme récent dans le massif du Piton des Neiges, Île de la Réunion. *Etude détaillée du cirque de Salazie*.
- Salvany T., Lahitte P., Nativel P., Gillot P-Y., (2012) - Geomorphic evolution of the Piton des Neiges volcano (Réunion Island, Indian Ocean): Competition between volcanic construction and erosion since 1.4 Ma. *Geomorphology*, 136 (2012) 132–147
- Sanjuan B., Genter A., Brac M., & Lebon D. (2001) - Compléments d'étude géothermique dans l'île de La Réunion (géologie, Géochimie). *Rapport BRGM/RP-51189-FR*.
- UICN France et al. (2010) – La liste rouge des espèces menacées en France. *Flore vasculaire de la Réunion*. 28pp.

\*\*\*\*\*