



Surveillance symptomatologique de la flore endémique liée aux émissions de dioxyde de soufre aux alentours du complexe industriel de Vale Nouvelle-Calédonie

Janvier 2016 à Décembre 2018



Vale Nouvelle-Calédonie
Juillet 2019

SOMMAIRE

1.	Introduction.....	5
2.	Protocole et méthodologie du suivi de la zone de dépérissement.....	6
2.1	Objectifs et indicateurs.....	6
2.2	Localisation des stations d'observation	8
2.3	Protocole de surveillance annuelle	11
2.4	Méthodologie du suivi quadrimestriel et du suivi annuel	12
2.4.1	Mesure de la concentration en SO ₂ de l'air	12
2.4.2	Suivi quadrimestriel des symptômes foliaires.....	12
2.4.3	Suivi annuel des symptômes foliaires	16
2.4.4	Suivi photographique de la zone d'étude	17
2.4.5	Analyses chimiques en soufre total et soufre isotopique foliaire :	18
2.4.6	Analyses chimiques annuelles des sols : S total, pH et conductivité.....	19
2.4.7	Suivi de l'état de santé du milieu	20
3	Résultats.....	24
3.1	Campagne d'échantillonnage passif de la concentration en SO ₂ de l'air.....	24
3.1.1	Campagnes d'échantillonnage et durée d'exposition des échantillonneurs.....	24
3.1.2	Valeurs de référence et commentaires sur les résultats des essais	25
3.1.3	Résultat des mesures en SO ₂ de l'air	26
3.2	Activité du site et incidents	28
3.3	Suivi des symptômes foliaires	29
3.3.1	Localisation et évolution du nombre de stations impactées.....	29
3.3.2	Evolution du pourcentage d'individus impactés.....	31
3.3.3	Caractérisation des symptômes	36
3.4	Reprise de la végétation:	38
3.5	Phénologie	40
3.6	Etat phytosanitaire.....	41
3.7	Poussières/cendres	43
3.8	Analyses chimiques foliaires : Soufre total et soufre isotopique	45
3.9	Analyses chimiques de sol : Soufre, pH, conductivité.....	50
3.10	Etat de santé des lichens.....	51

4. Etude VEGUSINE.....	52
4.1 Objectifs et indicateurs	52
4.2 Evolution globale des impacts entre décembre 2008 et décembre 2018.....	53
5. Conclusion.....	56
6. Références bibliographiques.....	58

TABLEAUX

Tableau 1: Paramètres de suivis, fréquence de suivi et dispositif de suivi en place.....	7
Tableau 2: Descriptif des 25 stations d'observation.....	10
Tableau 3: Dispositif d'évaluation des symptômes foliaires.....	13
Tableau 4: Présentation des espèces suivies par station d'observation.....	16
Tableau 5 : Liste des sites de prélèvement par espèces pour les analyses chimiques foliaires.....	18
Tableau 6: Liste des sites de prélèvement de sol pour les analyses chimiques de sol.....	19
Tableau 7: Date de début et de fin des différentes campagnes d'échantillonnage.....	24
Tableau 8 : Valeurs de références définies par l'arrêté d'autorisation sur les installations classées pour la protection de l'environnement n°1467-2008/P S du 9 Octobre 2008.....	25
Tableau 9: Date des incidents recensés entre janvier 2016 et décembre 2017	28

FIGURES

Figure 1: Localisation des 25 stations d'observation.....	9
Figure 2: Localisation des 19 stations de suivi annuel des symptômes foliaires.	11
Figure 3: Localisation des emplacements pour les prises de photos panoramiques de la zone d'étude.....	17
Figure 4 : Concentration moyenne, maximale et minimale en SO ₂ de l'air par station (µg/m ³).....	26
Figure 5: Représentation spatiale des concentrations moyennes en SO ₂ de l'air	27
Figure 6: Profil des teneurs moyennes mensuelles (µg/m ³) relevées pour les différentes campagnes.....	27
Figure 7: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du pourcentage moyen d'individus suivis avec symptômes selon l'orientation des stations par rapport au complexe industriel.....	29
Figure 8: Evolution du nombre de stations avec symptômes foliaires entre 2016 et 2018.....	29
Figure 9: Représentation spatiale des stations d'observation avec symptômes en décembre 2018.....	30
Figure 10: Evolution du pourcentage d'individus avec symptômes entre 2016 et 2018.....	32
Figure 11: Evolution du pourcentage d'individus avec symptômes entre 2016 et 2018.....	32
Figure 12 : Pourcentage moyen d'individus présentant des symptômes Léger, Moyen, Fort sur les stations impactées par classe de distance en décembre 2018.....	33
Figure 13: Pourcentage d'individus suivis avec symptômes foliaires en décembre 2018.....	34
Figure 14: Nécrose liées à un champignon – Anthracnose sur <i>Arillastrum gummiferum</i>	39
Figure 15: Chlorose diffuse liée à des attaques d'acariens sur <i>Codia spatulata</i>	37
Figure 16: Brulure associé lié à l'ensoleillement sur <i>Tristaniopsis glauca</i>	39
Figure 17: Carence sur <i>Tristaniopsis guillainii</i>	37
Figure 18: Chlorose ponctuée liée à des attaques d'acariens sur <i>Arillastrum gummiferum</i>	39
Figure 19: Brulure et stress hydrique sur <i>Codia discolor</i>	37
Figure 20: Evolution du pourcentage d'individus suivis produisant un nouveau feuillage sur les stations impactées et les sites Témoins.....	38
Figure 21: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « Pourcentage moyen d'individus avec jeunes feuilles » au niveau de stations impactées entre 2016 et 2018 par classe de distance.....	38
Figure 22: <i>Tristaniopsis guillainii</i> avec jeunes feuilles et symptômes marqués de chloroses en 2018.....	41
Figure 23: <i>Alphitonia neocaledonica</i> avec jeunes feuilles et symptômes de nécroses internervales.....	39
Figure 24: Individus de <i>Styphelia</i> en décembre 2017 et avril 2018.....	39
Figure 25: Evolution du nombre de relevé moyen de floraison et fructification au niveau des stations impactées et stations témoins.....	40

Figure 26:Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « nombre de relevé moyen de floraison/fructification »	40
Figure 27:Evolution du nombre de relevés d'attaques phytosanitaires sur les individus suivis.....	41
Figure 28:Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « nombre de relevé moyen d'attaques phytosanitaires ».....	41
Figure 29:Déformation des jeunes feuilles liées à une attaque d'insecte	44
Figure 30:Attaque de cochenilles sur le revers des feuilles de <i>Garcinia neglecta</i>	42
Figure 31: Dépôt de cendres de type « Leger » sur <i>Arillastrum gummiferum</i>	45
Figure 32:Dépôt de cendres de type « Moyen » Sur <i>Arillastrum gummiferum</i>	43
Figure 33:Brunissement superficiel du limbe lié aux dépôts de cendre et de poussières sur <i>Styphelia, Arillastrum gummiferum</i>	43
Figure 34:Répartition des dépôts de cendres sur la zone d'étude entre 2016 et 2018.....	44
Figure 35:Evolution des concentrations moyennes en soufre total foliaire entre mai 2012 et décembre 2017.....	45
Figure 36:Concentration en soufre foliaire d' <i>Arillastrum gummiferum</i> par station en décembre 2017.....	46
Figure 37:Cartographie des teneurs en soufre total foliaire d' <i>Arillastrum gummiferum</i> en décembre 2017.....	46
Figure 38:Concentration en soufre foliaire isotopique $\delta^{34}\text{S}$ (‰) d' <i>Arillastrum gummiferum</i> par classe de distance.....	47
Figure 39:Concentration en soufre total foliaire de <i>Garcinia neglecta</i> par station en décembre 2017.....	47
Figure 40:Cartographie des teneurs en soufre total foliaire de <i>Garcinia neglecta</i> en décembre 2017.....	48
Figure 41: Teneur en soufre foliaire isotopique $\delta^{34}\text{S}$ (‰) de <i>Garcinia neglecta</i> en décembre 2017.....	49
Figure 42:Cartographie de la teneur en soufre total des sols en décembre 2017.....	50
Figure 43:Illustration d'une colonie de Lichens en avril 2016 et en décembre 2018- SO13.....	51
Figure 44:Localisation des 27 massifs forestiers d'intérêt prioritaire autour de l'usine de VALE NC.	52
Figure 45:Evolution globale des impacts entre décembre 2008 et décembre 2018.....	53
Figure 46:Indicateurs satellitaires (NDVI, EVI, GRVI et Fr) sur la période considérée.....	54
Figure 47:Etat de la végétation le 17 juin 2011.....	54
Figure 48:Etat de la végétation en décembre 2018.....	55

1. Introduction

En décembre 2010 un phénomène de dépérissement d'arbres a été observé dans une forêt adjacente à la limite Ouest des installations industrielles de l'usine Vale Nouvelle-Calédonie (VNC). La zone concernée est une formation rivulaire située le long du cours supérieur du creek de la Baie Nord. L'étendue de la zone affectée a été évaluée à 55 hectares. Plusieurs espèces étaient concernées avec un dépérissement plus prononcé de la population de chênes gommés (*Arillastrum gummiferum*).

Vale NC a aussitôt engagé une série d'investigations afin d'identifier les causes possibles de ce dépérissement. Les résultats des études initiées en 2011 ont révélé que le dioxyde de soufre atmosphérique émanant de la combustion accidentelle du soufre élémentaire du site industriel de Vale NC sur l'aire de stockage de soufre serait la cause la plus probable des symptômes de chloroses et nécroses foliaires observés sur plusieurs espèces dans la zone de dépérissement des chênes gommés (Vale, 2011 ; Murray, 2012).

Conformément à l'arrêté ICPE n°1946-2012/ARR/DIMEN du 5 septembre 2012 et à l'arrêté n°375-2019/ARR/DIMENC du 08 juillet 2019, Vale NC a défini et mis en œuvre un plan de surveillance spécifique en collaboration avec le professeur Francis Murray de Murdoch University afin de suivre l'état de santé de la flore exposée aux émissions atmosphériques autour de son site industriel et signaler de manière précoce toute apparition de symptômes liés aux émissions atmosphériques en SO₂.

Les résultats des suivis réalisés depuis 2012 ont montré que des symptômes caractéristiques d'une exposition aigue au SO₂, faisant suite aux incidents enregistrés au cours de l'année, apparaissent au niveau de la zone de dépérissement. La zone d'influence reste localisée au secteur identifié depuis 2012 et se situe entre 200 et 2800 m à l'ouest de la source de SO₂ sous l'influence des vents dominants. Le suivi de la qualité de l'air par échantillonnage passif a montré la persistance de concentration en SO₂ relativement faible comparables aux stations témoins au niveau des stations situées à l'Est, au Sud et Nord du complexe industriel. Au vu de ces résultats, le protocole de suivi a été modifié en 2016 afin d'optimiser le plan de surveillance et caractériser plus finement l'évolution la zone impactée.

En complément, VALE NC a mandaté le professeur Francis Murray pour la réalisation de quatre études de fumigation de 2013 à 2015 ainsi que Bluecham pour la mise en place d'un protocole de suivi par télédétection de l'état de santé des massifs forestiers situés autour du complexe industriel de VALE NC.

Ce rapport présente un bilan des suivis effectués entre Janvier 2016 et Décembre 2018, à savoir :

1. les résultats du suivi symptomologique annuel et quadrimestriel
2. les résultats du suivi mensuel de qualité de l'air par échantillonnage passif
3. les résultats des analyses chimiques foliaires annuelles
4. les résultats des analyses chimiques de sol annuelles
5. les résultats de la reprise
6. les résultats de l'état phytosanitaire
7. les résultats des relevés phénologiques
8. les résultats du suivi des dépôts de poussières/cendres
9. les résultats du suivi de la végétation par télédétection – Etude VEGUSINE

2. Protocole et méthodologie du suivi de la zone de dépérissement

En absence d'étude scientifique sur les effets des émissions atmosphériques sur la végétation de la Nouvelle-Calédonie, Vale NC a fait appel au professeur Francis Murray de l'Université de Murdoch (Australie) pour participer à la définition et à l'amélioration du protocole de surveillance de la flore sur le site industriel (Murray, 2012). Francis Murray est un spécialiste reconnu comme référent par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) pour suivre les effets phyto-toxiques des pollutions atmosphériques industrielles sur les écosystèmes terrestres en Australie.

2.1 Objectifs et indicateurs

Les relations de cause à effet des émissions atmosphériques sur la végétation sont extrêmement complexes. La sévérité de l'impact des gaz sur la végétation peut être influencé par différents facteurs tels que :

- Les conditions météorologiques (intensité lumineuse, humidité, température, vent)
- L'exposition selon le relief de la végétation aux polluants
- La complexité structurelle des formations végétales
- Les facteurs physiologiques liés au stade de développement d'une plante
- L'espèce considérée
- Les conditions hydriques et nutritives liées au sol
- La fréquence et la durée d'exposition aux polluants
- La présence d'autres polluants (Bell, 1980 ; Murray et Wilson, 1987 In Vale, 2011).

Malgré les connaissances biologiques et écologiques limitées sur les milieux naturels du Grand Sud et sur les effets des émissions atmosphériques sur ces derniers, le protocole peut se baser sur les postulats suivants :

- Le risque d'exposition des formations végétales aux émissions de dioxyde de soufre (SO₂) diminue avec l'éloignement aux sources d'émissions atmosphériques (centrale électrique, usine d'acide, chaudières, stock de soufre).
- Le dioxyde de soufre de l'air est absorbé par les végétaux et les quantités excédentaires s'accumulent dans les feuilles. Cette quantité excédentaire génère des symptômes physiologiques de chloroses et de nécroses foliaires qui sont observables.

Le principal objectif de ce suivi est de caractériser l'évolution de la « zone de dépérissement » dans le temps par une qualification et quantification du degré de sévérité des symptômes sur des espèces indicatrices. L'évaluation porte sur une maille de stations de suivi réparties à l'intérieur de la « zone de dépérissement ». Le protocole de suivi a été développé comme un outil simple d'évaluation visuelle de l'état du feuillage des espèces végétales les plus sensibles référencées dans le guide des symptômes (Murray, 2012). Cette surveillance est réalisée de manière quadrimestrielle sur les 25 stations d'observation. Cette fréquence pluriannuelle définie dans le protocole permet de suivre l'évolution symptomatologique liée aux incidents industriels avec émissions aiguës de SO₂ atmosphérique selon les principaux cycles de croissance des plantes. La période de suivi d'Avril correspond à la saison optimale de croissance des plantes durant la saison des pluies. Août correspond à la période la plus fraîche de l'année. Décembre correspond à la période de déficit hydrique maximal.

Dix tubes passifs mesurant les teneurs mensuelles en SO₂ de l'air ont été installés au niveau de stations d'observation. Des analyses chimiques foliaires sont réalisées annuellement en complément sur deux espèces indicatrices afin d'affiner l'analyse des concentrations totales en soufre foliaire dans le temps et selon la distance au complexe industriel. Les objectifs du protocole de surveillance et les indicateurs de suivi sélectionnés pour y répondre sont présentés dans le Tableau 1.

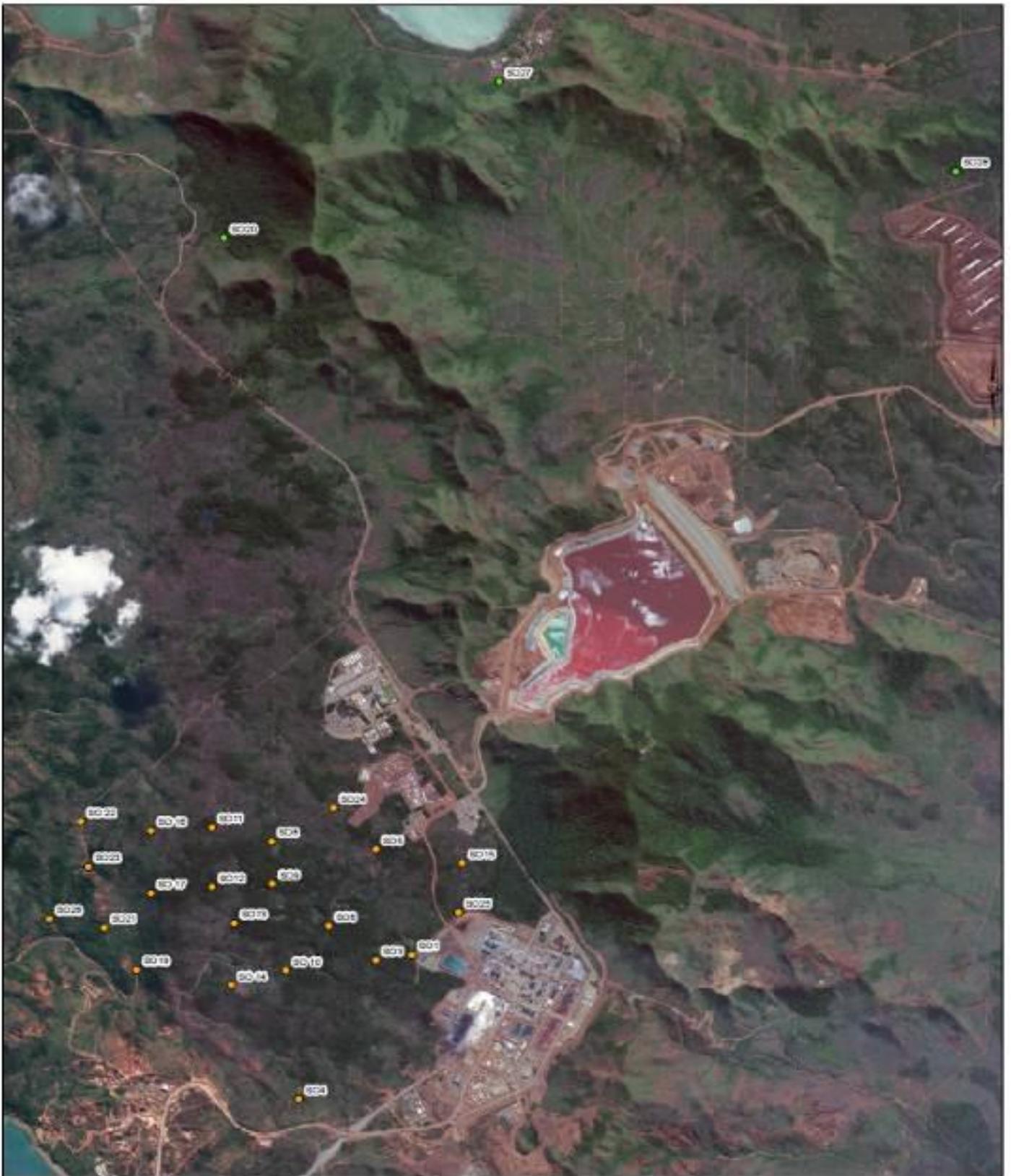
Évaluation de l'état de santé du milieu	Paramètres suivis	Fréquence de suivi	Dispositif de suivi
Suivi symptomatologique de la végétation	Symptômes foliaires Qualitatif : Chlorose, Necrose et degré de sévérité Quantitatif : Nombre d'individus	Quadrimestrielle	25 stations - 3 espèces, 12 individus par station
			8 à 12 Photographies par station
			4 photographies de la zone d'étude selon différents axes
Mesure de la qualité de l'air	Teneur mensuelle en SO ₂ de l'air	Mensuelle	10 tubes passifs
Reprise de la végétation	Jeunes feuilles et plantules Qualitatif : Rien, Leger, modérée, Fort Quantitatif : Nombre d'individus	Quadrimestrielle	25 stations - 3 espèces, 12 individus par station
Présence de poussières/cendres	Poussières/cendres Qualitatif : Rien, Leger, modérée, Fort Quantitatif : Pourcentage d'individus	Quadrimestrielle	25 stations
Phénologie	Boutons floraux, Fleurs, Fruits Qualitatif : Rien, Leger, moyen, Fort Quantitatif : Nombre d'individus	Quadrimestrielle	25 stations - 3 espèces
État phytosanitaire	Champignon, cochenille, mouche mineuse, chenille, piqueur, Kyste: Qualitatif : Rien, Leger, moyen, Fort Quantitatif : Nombre d'individus	Quadrimestrielle	25 stations - 3 espèces, 12 individus par station
État de santé des lichens terrestres	Lichens terrestres Qualitatif : Couleur Quantitatif : Nombre "d'individus"	Quadrimestrielle	13 stations - Quadrat de 15 x 15cm
Analyse chimique foliaires	Soufre total et soufre isotopique	Annuelle	2 espèces : <i>Arillastrum gummiferum</i> , <i>Garcinia neglecta</i> 13 stations par espèce
Analyse chimique des sols	pH, conductivité	Annuelle	25 stations

Tableau 1: Paramètres de suivis, fréquence de suivi et dispositif de suivi en place.

2.2 Localisation des stations d'observation

22 stations d'observation ont été établies au sein de la « zone de dépérissement » identifiée entre 2011 et 2015 ainsi qu'en périphérie de cette zone afin d'évaluer l'évolution de son emprise spatiale (Figure 1, Tableau 2). Trois stations témoins ont également été établies hors zone d'influence des émissions atmosphériques à titre de comparaison. Ces dernières permettront de détecter et fournir des informations sur des phénomènes d'origines naturels indépendant des effets des émissions atmosphériques (sécheresse, pathogènes...).

Des formations végétales communes des zones de cuirasses en aval de l'usine telles que les facies de maquis arbustif, de maquis paraforestier et de forêt à *Arillastrum gummiferum* ont été privilégiés pour la mise en place des stations d'observation. L'ensemble des stations d'observation sont situées au niveau de pistes accessibles afin d'assurer un suivi ne dépassant pas deux semaines et permettant d'intervenir efficacement en cas de signalement d'émissions notables. Ces conditions d'accès facilitées permettent ainsi d'assurer une surveillance optimale et de signaler de manière précoce toute apparition de symptômes. Une partie des stations ont été établies au sein des massifs forestiers impactés suivis par télédétection dans le cadre de l'étude VEGUSINE ainsi qu'en sous-bois sur des parcelles impactées précédemment décrites par l'étude de l'IAC « Evaluation du dépérissement de chênes gommés ». La majorité des stations ont été choisies en lisière de forêt ou de maquis car ce sont les milieux récepteurs les plus exposés aux émissions ponctuelles de dioxyde de soufre (Murray, 2003). Le tableau 2 décrit les habitats des différentes stations de suivis.



Légende  Stations de suivi  Stations limons	Suivi symptomologique quadrimestriel	
	 <small>0 200 400</small> <small>Mètres</small>	 <small>La réussite commerciale est le résultat de la collaboration entre les équipes de la Vale et de ses partenaires. Vale est une entreprise à but non lucratif. Vale est membre de la Commission canadienne de l'accès à l'information.</small>

Figure 1: Localisation des 25 stations d'observation.

ID	Nom station	X	Y	Distance au complexe industriel (m)	Classe de station	Orientation par rapport au complexe industriel	Emplacement topographique	Habitat	Exposition	Dominance Canopée	Données complémentaires	Historique Symptômes
1	SO1	166,90718	-22,3308	600	Proche	ONO	Haut dôme de cuirasse	Maquis paraforestier à Arillastrum	Lisière	Gymnostoma	Suivi annuel symptomologique Tube passif	Ancien/ Récent
2	SO3	166,9048962	-22,33115071	800	Proche	O 1/4 NO	Vallon de cuirasse	Maquis paraforestier à Arillastrum	Fermée	Arillastrum	Etude Vegusine	Ancien
3	SO4	166,90004	-22,34016	1400	Moyen	OSO	Pente cuirassée	Maquis paraforestier à Arillastrum	Lisière	Arillastrum	Etude Vegusine	Pas de symptômes
4	SO5	166,90485	-22,32398	1300	Moyen	NO 1/4 N	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Ouvert			Récent
5	SO6	166,90189	-22,32894	1200	Moyen	ONO	Pente cuirassée	Maquis arbustif dense	Lisière	Tristaniopsis	Suivi annuel symptomologique Tube passif	Ancien/Récent
6	SO8	166,89821	-22,32351	1800	Moyen	NO 1/4 O	Haut dôme cuirasse	Maquis paraforestier à Arillastrum	lisière piste	Arillastrum		Pas de symptômes
7	SO9	166,89828	-22,32623	1600	Moyen	NO 1/4 O	Pente cuirassée	Maquis paraforestier à Arillastrum	Lisière piste	Arillastrum		Anciens symptômes
8	SO10	166,9048962	-22,33115071	1300	Moyen	O 1/4 NO	Pente cuirassée	Forêt Chêne gomme	Lisière ancienne sentier	Arillastrum	Etude Vegusine	Anciens symptômes
9	SO11	166,89441	-22,32262	2200	Loin	NO 1/4 O	Haut dôme cuirasse	Maquis paraforestier à Arillastrum	Lisière piste	Arillastrum		Pas de symptômes
10	SO12	166,89444	-22,32647	2000	Loin	ONO	Pente cuirassée	Maquis paraforestier à Gymnostoma	Lisière piste	Gymnostoma		Anciens symptômes
11	SO13	166,89587	-22,32882	1700	Moyen	NO 1/4 O	Dôme cuirasse	Maquis paraforestier à Arillastrum	Ouvert	Gymnostoma		Pas de symptômes
12	SO14	166,89572	-22,332799	1700	Moyen	O	Dôme cuirasse	Forêt Chêne gomme	Lisière piste	Arillastrum	Etude Vegusine	Anciens/récents
13	SO15	166,91046	-22,32513	1000	Moyen	N 1/4 NO	Pente cuirassée	Maquis arbustif	Lisière piste ligne haute tension	Gymnostoma	Suivi annuel symptomologique	Ancien
14	SO16	166,8905523	-22,32285594	2500	Loin	NO 1/4 O	Pente cuirassée	Maquis paraforestier à Gymnostoma	Lisière plateforme sondage	Gymnostoma		Pas de symptômes
15	SO17	166,8905566	-22,32690833	2300	Loin	O 1/4 NO	Vallon cuirasse	Maquis paraforestier à Gymnostoma	Lisière plateforme sondage	Gymnostoma		Anciens symptômes
16	SO19	166,88968	-22,33186	2300	Loin	O 1/4 NO	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert à Arillastrum	Lisière Route	Arillastrum	Etude Vegusine	Anciens symptômes
17	S20	166,89494	-22,28448	5800	Loin	NNO	Pente cuirassée	Forêt Chêne gomme	Lisière piste	Arillastrum	Suivi annuel symptomologique Tube passif	Pas de symptômes
18	SO21	166,8876116	-22,32914126	2600	Loin	O 1/4 NO	Cuirasse érodée	Forêt Chêne gomme	Lisière Route	Arillastrum	Etude Vegusine	Pas de symptômes
19	SO22	166,88607	-22,32228707	3000	Loin	NO 1/4 O	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	Tristaniopsis		Pas de Symptômes
20	SO23	166,886554	-22,325204	2800	Loin	O 1/4 NO	Pente érodée	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	Tristaniopsis	Suivi annuel symptomologique Tube passif	Anciens/récents
21	SO24	166,90213	-22,32129	1700	Moyen	NO 1/4 N	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Lisière Route	Tristaniopsis		Pas de Symptômes
22	SO25	166,91013	-22,32802	700	Proche	NNO	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Lisière Route	Tristaniopsis	Suivi annuel symptomologique Tube passif	Anciens/récents
23	SO26	166,88412	-22,3286	3000	Loin	O 1/4 NO	Pente érodée	Maquis dense à Arillastrum	Ouvert	Arillastrum	Etude Vegusine	Pas de symptômes
24	SO27	166,91238	-22,27429	6500	Loin	N	Pente érodée	Maquis ligno-herbacé	Ouvert	Tristaniopsis	Suivi annuel symptomologique Tube passif	Pas de symptômes
25	SO28	166,94145	-22,27995	>5000	Loin	NNE	Pente érodée	Maquis paraforestier	Lisière	Gymnostoma	Suivi VGT mine	Pas de symptômes

Tableau 2: Descriptif des 25 stations d'observation. Les suivis symptomologique et les analyses chimiques foliaires sont réalisés sur l'ensemble des stations. Les mesures de qualité de l'air sont réalisées sur 10 stations d'observation.

2.3 Protocole de surveillance annuelle

Il convient de noter que le protocole de suivi engagé depuis 2012 est maintenu selon une fréquence annuelle avec un maintien des analyses chimiques foliaires afin de valoriser les données obtenues depuis 2012. Ce protocole permet également de maintenir une surveillance aux alentours du complexe industriel, notamment au niveau des zones Sud, Est et Nord et ainsi d'assurer la détection précoce de nouveaux symptômes dans la zone d'influence potentielle des émissions atmosphériques issues de l'activité du complexe industriel (Figure 2).



Localisation des stations de suivi symptomologique

Figure 2: Localisation des 19 stations de suivi annuel des symptômes foliaires.

2.4 Méthodologie du suivi quadrimestriel et du suivi annuel

2.4.1 Mesure de la concentration en SO₂ de l'air

- *Mesure de la qualité de l'air par la méthode des tubes passifs*

10 tubes passifs ont été installés au niveau de la zone d'étude afin de mesurer la concentration moyenne mensuelle en SO₂ de l'air. Sept tubes passifs ont été installés au niveau de sept stations de suivi : SO01 (PS11), SO23 (PS23), SO06 (PS17), SO25 (PS13), PS10, PS29 et SO 20 (PS 25) afin de couvrir au maximum la zone d'étude et mettre en relation la teneur en SO₂ de l'air et la présence de symptômes foliaires. Deux tubes passifs ont été installés au niveau de la canopée des arbres de la réserve de Forêt nord (PS19) et de la forêt McCoy (PS14) pour lesquelles l'observation visuelle de symptômes s'avère difficile. Un tube passif, PS30, a été placé au niveau du maquis situé au Nord Nord Est du complexe industriel. Ces derniers permettront de vérifier les teneurs mensuelles en SO₂ atmosphérique à différentes distances et orientation des stations par rapport au complexe industriel. Une comparaison sera réalisée entre les sites situés aux alentours du complexe industriel et les sites témoins.

2.4.2 Suivi quadrimestriel des symptômes foliaires

Un suivi quadrimestriel des symptômes foliaires est assuré sur 25 stations d'observation et concerne huit espèces indicatrices qui peuvent manifester des symptômes foliaires caractéristiques en cas de forte exposition au dioxyde de soufre. Un guide des symptômes foliaires réalisé par Francis Murray intégrant ses espèces indicatrices (Murray, 2012) sert de référence pour le relevé des symptômes sur le terrain. Ce suivi symptomologique intègre une évaluation visuelle qualitative des symptômes à hauteur d'homme (chlorose, nécrose et degré de sévérité associé) et une évaluation quantitative avec le relevé du nombre d'individus par espèce présentant des symptômes. Un indice permettant d'évaluer le degré de sévérité des symptômes foliaires a été défini afin d'évaluer leur évolution dans le temps (Cf. méthodologie ci-dessous). Trois espèces ont été sélectionnées sur chaque station, l'évaluation portant sur quatre individus par espèce sur un rayon maximum de 10 m. L'ensemble des individus suivis sont balisés et identifiés sur chaque station. Au total, l'évaluation symptomologique porte sur 300 individus sur l'ensemble de la zone d'étude (Tableau 2, Tableau 3).

Sur chaque station, un individu par espèce est photographié dans son ensemble ainsi qu'une de ces branches balisées afin de suivre l'évolution des symptômes foliaires dans le temps. Une photographie supplémentaire est réalisée en cas d'apparition de nouveaux symptômes sur un des individus suivis. Ce suivi doit permettre d'évaluer l'évolution du dépérissement dans le temps en prenant en compte l'évolution du nombre de stations, du nombre d'espèces et du nombre d'individus présentant des symptômes ainsi que l'évolution du degré de sévérité des symptômes.

3 espèces suivies par station et 4 individus par espèce											
Nom station	<i>Arillastrum gummiferum</i>	<i>Styphelia cymbulæ</i>	<i>Gymnostoma deplancheanum</i>	<i>Codia spathulata</i>	<i>Tristaniopsis guillanii</i>	<i>Garcinia neglecta</i>	<i>Alphitonia neocaledonica</i>	<i>Guoia glauca</i>	Nombre d'espèces suivies	Nombre d'individus	Nombre de photographie par suivi
S01		4		4		4			3	12	9
S03	4	4				4			3	12	9
S04	4		4					4	3	12	9
S05		4			4	4			3	12	9
S06				4	4	4			3	12	9
S08	4	4		4					3	12	9
S09	4			4		4			3	12	9
S10		4				4	4		3	12	9
S11				4		4	4		3	12	9
S12	4	4		4					3	12	9
S13	4	4				4			3	12	9
S14	4	4				4			3	12	9
S15		4		4	4				3	12	9
S16		4	4	4					3	12	9
S17	4	4		4					3	12	9
S19	4	4		4					3	12	9
S20	4	4	4						3	12	9
S21	4					4	4		3	12	9
S22		4		4	4				3	12	9
S23		4			4		4		3	12	9
S24		4			4			4	3	12	9
S25		4	4		4				3	12	9
S26	4	4				4			3	12	9
S27		4				4	4		3	12	9
S28				4	4			4	3	12	9
Nombre de station	12	20	4	12	7	12	5	3			
Nombre d'individus	48	76	16	48	32	48	20	12		300	225
Photo panoramique par suivi											4
Photo suivi annuel											166
Nombre photos annuelles											1051

Tableau 3: Dispositif d'évaluation des symptômes foliaires. Les stations surlignées en vert correspondent aux stations témoins.

- *Méthodologie relative à l'évaluation du degré de sévérité des symptômes foliaires*

❖ **Degré de sévérité des symptômes à l'échelle d'un individu :**

Rien : Aucun symptôme visible qui puisse être relié à une exposition au SO₂ atmosphérique. Présence de symptômes pouvant être assimilés à des symptômes d'origine naturelle.

Léger : Symptôme très léger non détectable par un observateur inexpérimenté mais détectable par un observateur expérimenté. L'individu présente quelques taches de chloroses et/ou de nécroses foliaires caractéristiques d'une exposition au SO₂ atmosphérique. Ces symptômes de type I sont diffus ou sont présents sur une faible surface foliaire. Ces symptômes diffus peuvent être répartis uniformément sur 10 à 100% du feuillage de l'individu. Ils peuvent être de type II mais sont dans ce cas repartis une branche ou 10% du feuillage de l'individu. L'état de santé de l'individu ne semble pas impacté malgré la présence de symptômes.

Moyen : Symptômes détectables par un observateur inexpérimenté. Les symptômes de chloroses et/ou de nécroses foliaires sont de type II. Ils sont répartis uniformément sur 50 % à 100% du feuillage de l'individu. Ils peuvent être de type III mais sont dans ce cas répartis de manière localisé sur l'individu (une branche). L'état de santé de l'individu ne semble pas impacté malgré la présence de symptômes.

Fort : Symptômes évident pouvant porter atteinte à la sensibilité d'un observateur inexpérimenté. Les symptômes sont de type III. Ils sont répartis uniformément sur l'ensemble du feuillage de l'individu. Ils peuvent être de type IV et porter atteinte à l'état de santé des feuilles (déformées, séchées...) mais dans ce cas sont répartis de manière localisés sur l'individu (une branche). Mais l'état de santé global de l'individu ne semble pas impacté malgré la présence de symptôme.

Sévère : Symptômes évident pouvant porter fortement atteinte à la sensibilité d'un observateur inexpérimenté. Les symptômes sont de type IV avec des déformations foliaires. Ils sont répartis uniformément sur l'ensemble du feuillage de l'individu. L'état de santé de l'individu est impacté. On peut constater une défoliation de l'individu ou encore un feuillage qui semble sécher.

Mort : Abscission ou dessiccation de l'ensemble des feuilles et tiges. Pas de sève apparente quand on entaille le tronc.

Doute : Une incertitude réside quant à l'origine du symptôme : Naturel ou lié au SO₂ atmosphérique.

Degré de sévérité des symptômes à l'échelle d'une feuille :

- ❖ **Symptômes de type I :** Moins de 30% de la surface foliaire atteinte ou symptômes diffus.



Tristaniopsis guillainii



Codia spatulata



Styphelia sp.

- ❖ **Symptômes de type II :** 30 à 50 % de la surface foliaire atteinte



Tristaniopsis guillainii



Codia spatulata



Styphelia sp.

- ❖ **Symptôme de type III :** Plus de 50% de la surface foliaire atteinte



Tristaniopsis guillainii



Codia spatulata



Styphelia sp.

- ❖ **Symptôme de type IV :** Plus de 50% de la surface foliaire atteinte avec impact sur l'état de santé de la feuille (déformation, défoliation...)



Styphelia sp.



2.4.3 Suivi annuel des symptômes foliaires

Le suivi des symptômes foliaires relatif à l'ancien protocole a été maintenu selon une fréquence annuelle au mois de décembre pour les 19 stations d'observation. Ce suivi concerne neuf espèces présentant des symptômes foliaires évidents en cas de forte exposition au dioxyde de soufre (Tableau 4). L'objectif de ce suivi est d'assurer une surveillance aux alentours du complexe industriel afin de détecter l'éventuelle apparition de symptômes liés au SO₂ qui seraient apparus dans l'année sur de nouveaux secteurs. 5 espèces sont suivies par station d'observation à l'exception de deux stations forestières où seule une espèce est suivie du fait des contraintes liées à l'évaluation des symptômes au niveau de la canopée (Tableau 4). Ce suivi symptomologique intègre une évaluation visuelle qualitative des symptômes (chlorose, nécrose). Des photographies des cinq espèces indicatrices suivies par station sont réalisées en décembre de chaque année. Les rameaux photographiés sont balisés afin de suivre l'évolution des symptômes foliaires par espèce et par localité dans le temps.

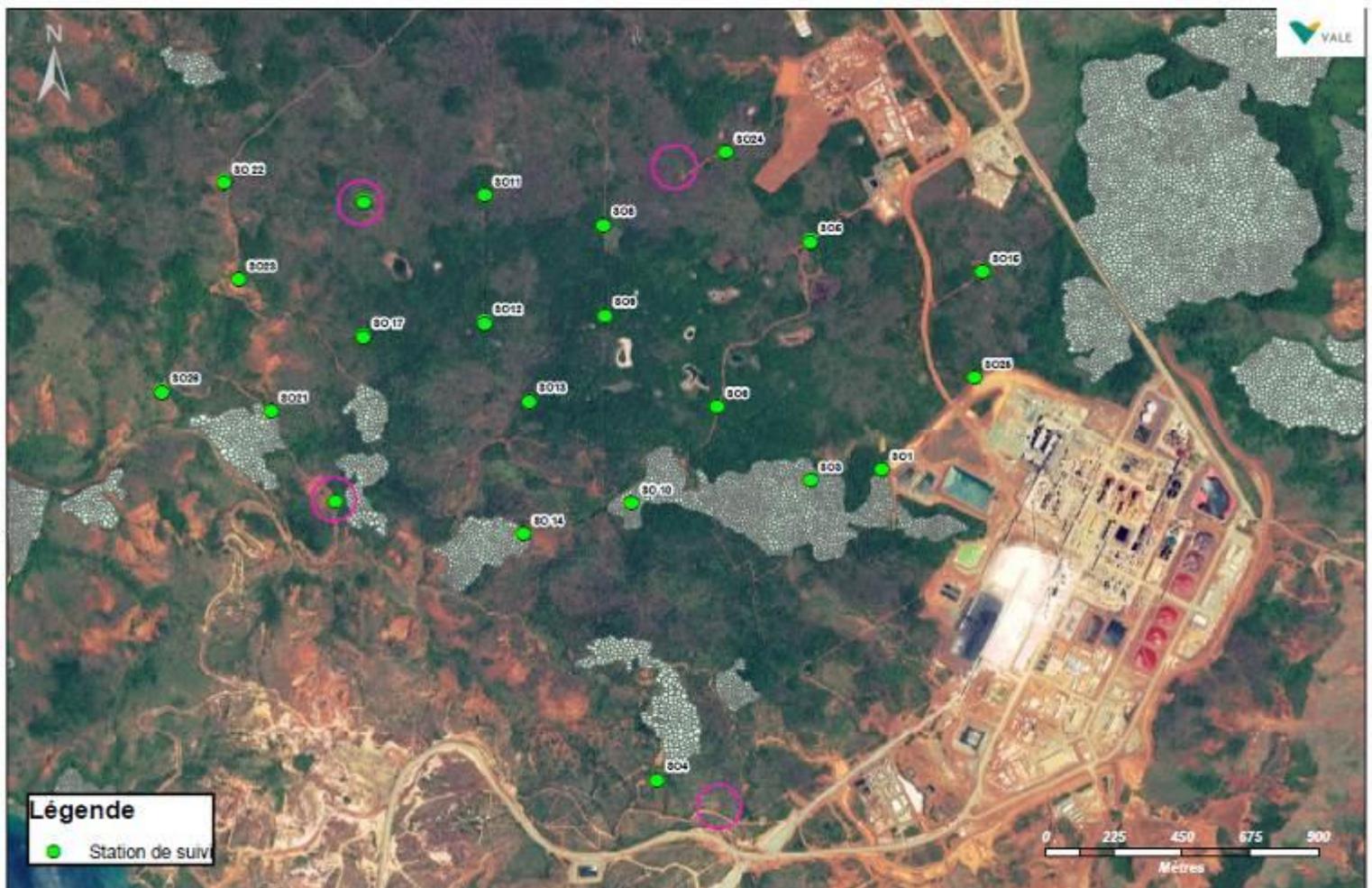
Les analyses chimiques ont également été maintenues selon une fréquence annuelle au mois de décembre. Les espèces et sites concernés par les prélèvements foliaires sont présentés en Annexe 1.

Distance par rapport à la source	Orientation par rapport au source	Station	<i>Garcinia spp</i>	<i>Gymnostoma deplancheanum</i>	<i>Alphitonia neocaledonica</i>	<i>Codia spatulata</i>	<i>Tristaniopsis guilainii</i>	<i>Guioa glauca</i>	<i>Lomandra insularis</i>	<i>Montrouziera sphaeroidea</i>	<i>Styphelia spp</i>	Nombre d'espèces suivies
PROCHE	W	4										5
	WSW	5										5
	W	8										1
	W	9										5
	W	10										5
	WNW	11										5
	NNW	13										5
	NNE	14										1
	WSW	24										5
W	12										5	
MOYENNE	S	1										5
	NNW	15										5
	NW	18										5
	E	21										5
	NNW	29										5
LOIN	SSE	2										4
	WNW	23										5
	N	26										5
	NNW	25										5

Tableau 4: Présentation des espèces suivies par station d'observation.

2.4.4 Suivi photographique de la zone d'étude

Quatre photographies paysagères de la zone d'étude sont prises à partir des points hauts fixe selon la même orientation au même emplacement à chaque suivi quadrimestriel (Figure 3, Annexe 25). L'emplacement pour la prise de photo est marqué d'un repère (piquet) et l'orientation de la prise de vue est prise à l'aide d'une boussole. Des comparaisons sont faites dans le temps sur les mêmes secteurs afin d'évaluer des changements visuels de la canopée des formations végétales photographiées. Ces photographies pourront également être mises en relation avec les résultats issus de l'étude de suivi des massifs forestiers par télédétection VEGUSINE.



Suivi symptomologique - Photographies panoramiques

Figure 3: Localisation des emplacements pour les prises de photos panoramiques de la zone d'étude.

2.4.5 Analyses chimiques en soufre total et soufre isotopique foliaire :

Deux espèces ont été sélectionnées pour les prélèvements foliaires : *Arillastrum gummiferum* et *Garcinia neglecta*. Les analyses chimiques portent sur le soufre total et le soufre isotopique foliaire. La comparaison entre les sites localisés dans la zone d'influence et les sites témoins porte sur les mêmes espèces. Les feuilles sont prélevées sur la station mais sur des individus non identifiés pour le suivi afin de ne pas impacter les résultats des observations qualificatives et quantitatives sur les individus balisés suivis. Les teneurs en soufre des feuilles des arbres d'*Arillastrum* et de *Garcinia* sont utilisées pour signaler une éventuelle augmentation en soufre foliaire qui puisse être liée à un évènement atmosphérique industriel. Les teneurs en soufre foliaire peuvent permettre de valider que les symptômes foliaires observés soient liés à une exposition au SO₂ atmosphérique. En effet, les symptômes observés peuvent parfois être confondus avec des symptômes liés à des perturbations d'origines naturelles (attaques phytosanitaires, carences, stress hydrique....) qui se traduisent également par des chloroses et des nécroses. Les prélèvements de feuilles sont réalisés en décembre durant la saison sèche. Le tableau 5 présente les sites de prélèvement pour chaque espèce.

Station	<i>Garcinia neglecta</i>		<i>Arillastrum gummiferum</i>	
	S mg/Kg	δ34S (‰)	S mg/Kg	δ34S (‰)
SO1	x	X		
SO3	x	X	X	x
SO4			X	
SO5	x	X		
SO6	x	X		
SO8			X	
SO9	x	X	X	
SO10	x	X		
SO11			X	X
SO12			X	X
SO13	x	X	X	X
SO14	x	X	X	X
SO15				
SO16				
SO17			X	X
SO19			X	X
SO20	x	X	X	
SO21	x	X	X	X
SO22				
SO23				
SO24	x	X		
SO25				
SO26	x		X	X
SO27	x	X		
SO28	x	X		
Témoin CPKE			X	X
Témoin SMLT 2	x	X		
Témoin CPKE 2			X	

Tableau 5 : Liste des sites de prélèvement par espèces pour les analyses chimiques foliaires de soufre total (mg/kg) et soufre isotopique - δ34S (‰).

2.4.6 Analyses chimiques annuelles des sols : S total, pH et conductivité

Les prélèvements de sols sont réalisés sur l'ensemble des 25 stations en décembre afin de suivre l'évolution chimique des sols de la zone d'étude. Les analyses chimiques porteront sur le pH, le soufre total et la conductivité afin de détecter un éventuel apport atmosphérique de soufre. L'analyse du soufre total, du PH et de la conductivité du sol est réalisée sur les 25 stations. Les analyses de soufre isotopique du sol sont réalisées en complément sur 15 stations afin d'évaluer les teneurs en fonction de la distance au complexe industriel (Tableau 6). Les analyses sont réalisées par le Laboratoire du centre de réhabilitation des sites miniers de l'Université du Queensland.

Station	pH	Conductivité	S Total
		EC	mg/Kg
SO1	x	x	x
SO3	x	x	x
SO4	x	x	x
SO5	x	x	x
SO6	x	x	x
SO8	x	x	x
SO9	x	x	x
SO10	x	x	x
SO11	x	x	x
SO12	x	x	x
SO13	x	x	x
SO14	x	x	x
SO15	x	x	x
SO16	x	x	x
SO17	x	x	x
SO19	x	x	x
SO20	x	x	x
SO21	x	x	x
SO22	x	x	x
SO23	x	x	x
SO24	x	x	x
SO25	x	x	x
SO26	x	x	x
SO27	x	x	x
SO28	x	x	x

Tableau 6: Liste des sites de prélèvement de sol pour les analyses chimiques de sol de la zone de dépérissement.

2.4.7 Suivi de l'état de santé du milieu

Plusieurs paramètres supplémentaires sont suivis afin d'évaluer l'état de santé du milieu et d'identifier d'éventuels effets indirects d'une exposition au SO₂ atmosphérique.

❖ *Reprise de la végétation :*

La présence/absence de jeunes feuilles est relevé sur chaque individu suivi par station. Un indice permettant d'évaluer la reprise de la végétation sur l'ensemble de la station est attribué en complément à chaque station.

Rien : Absence de jeunes pousses visibles à hauteur d'homme sur les arbres et de plantules au sol.

Léger : Jeunes pousses visibles à hauteur d'homme sur 10% des arbres/arbustes, recrutement de quelques plantules au sol.

Modérée : Jeunes pousses visibles à hauteur d'homme sur 20% des arbres/arbustes, recrutement récent de quelques plantules au sol.

Fort : Jeunes pousses visibles à hauteur d'homme sur plus de 20% des arbres, recrutement récent de plantules au sol formant des concentrations notables.

❖ *Phénologie :*

Un relevé phénologique est réalisé sur chaque individu suivi avec le relevé de la présence/absence de fleurs et/ou de fruits. Un indice est ensuite attribué à chaque espèce pour l'ensemble de la station :

Rien : Aucun individu suivi ou non suivi ne présente de fleur et/ou de fruit.

Léger : Un à cinq individus suivis et non suivis présentent des fleurs et/ou des fruits.

Moyen : Cinq à dix d'individus suivis et non suivis présentent des fleurs et/ou des fruits.

Fort : Plus de dix individus suivis et non suivis présentent des fleurs et/ou des fruits.

❖ **Etat phytosanitaire :**

Une évaluation de l'état phytosanitaire est réalisée sur chaque individu balisé suivi par station avec le relevé de la présence/absence de champignons, de piqûres d'insectes, de feuilles croquées (Chenille...), de kystes/gales ou de symptômes qui pourraient être reliés à un stress (carences/sécheresse...). Un indice est ensuite attribué à chaque espèce suivie par station.

Rien : Aucun individu suivis ne présente de symptômes de chlorose, de nécroses relatives à une carence/stress, de champignons, de piqûres d'insectes, de feuilles croquées (Chenille...) et/ou de kystes/gales.

Léger : Des traces de piqûres d'insectes, de feuilles croquées (Chenille...), de kystes/gales, de champignons ou encore de symptômes de chloroses, de nécroses relatif à un stress particulier (carences, sécheresse...) sont relevés sur un à deux individus suivis pour chaque espèce et ne semblent pas impacter leur état de santé (Floraison, Fructification, développement de nouvelles feuilles, défoliation).

Moyen : Des traces de piqûres, de feuilles croquées (Chenille...), de kystes/gales, de champignons ou encore la présence de symptômes de chloroses, de nécroses relatif à un stress particulier (carences, sécheresse...) sont relevés sur trois à quatre des individus suivis pour chaque espèce mais ne semble pas impacter leur état de santé (Floraison, Fructification, développement de nouvelles feuilles, défoliation).

Fort : Des traces de piqûres, de champignons ou encore la présence de symptômes de chloroses, de nécroses qui puissent être liés à un stress particulier (carences, sécheresse...) sont relevés sur trois à quatre individus suivis et semble impacter l'état de santé de ces individus, notamment, la floraison, la fructification ou le développement de nouvelles feuilles ou entraîner une forte défoliation sur plus de 20 % de la surface foliaire totale des individus.

❖ *Suivi des lichens terrestres :*

Les lichens terrestres sont utilisés comme bioindicateur dans les pays tempérés afin d'évaluer les retombées des émissions atmosphériques (<http://gis.nacse.org/lichenair/index.php?page=reports>). Les émissions de SO₂ peuvent avoir des effets sur les systèmes physiologiques de photosynthèse et de respiration des lichens en acidifiant leurs tissus. Aucune donnée n'existe en Nouvelle-Calédonie sur la sensibilité des lichens par rapport aux retombées atmosphériques.

Les lichens corail *Cladonia aggregata* et *Cladonia pycnoclada* sont abondants en maquis et en lisière de forêt sur les sols latéritiques (Jaffré, 1980). Ses milieux latéritiques riches en métaux ont des pH compris entre 4 et 6 qui nécessitent des adaptations des plantes afin de tolérer des sols acides (Jaffré, 1980). *Cladonia aggregata* et *Cladonia pycnoclada* forment des colonies au sol sur 11 stations dans la zone de dépérissement et deux sites témoins (Annexe 24). Une évaluation visuelle des symptômes sur les lichens est difficile car les parties actives et inactives sont difficilement distinguables et l'analyse de l'activité photosynthétique du lichen se fait par des prélèvements analysés en laboratoire (Fрати & Brunialti, 2006). Compte tenu que des prélèvements réduiraient la quantité de *Cladonia* présents sur la station, l'objectif est de comparer quantitativement les colonies des zones témoins et de la « zone de dépérissement » afin de quantifier et qualifier d'éventuels changements. L'évaluation portera sur un quadra par station intégrant une vingtaine de *Cladonia* et consistera à qualifier l'état santé des tissus aériens (Couleur crème/blanc = vivant ; Couleur marron = nécrosé et mort) et quantifier la colonie par le dénombrement de « tête » de *Cladonia*. L'évaluation porte sur la colonie balisée sur chaque station. La colonie est dénombrée et photographiée lors des suivis quadrimestriels (Annexe 24).

❖ *Présence de poussières et/ou de cendres :*

Un indice permettant d'évaluer la présence et l'abondance de poussières et/ou de cendres sur la végétation est attribué à chaque station. L'évaluation porte sur l'ensemble de la station.

Rien : Aucune poussière ou cendre visible sur l'ensemble de la végétation.

Léger : Poussières ou cendres légèrement visibles, sous forme de couches très fines et diffuses essentiellement sur les feuilles du bas de la végétation témoignant ainsi d'anciennes émissions ou d'un faible apport de poussières qui auraient probablement été en partie lessivées sur les feuilles du haut de la végétation, voir présence de petit amas très localisés sur l'apex ou entre les nervures des feuilles sur quelques individus. On estime que 20 % des individus ou moins présentent des traces de poussière.

Moyen : Poussières ou cendres visibles, sous formes de couches plus épaisses voir sous forme de plaques sur le limbe des feuilles du haut et du bas de quelques individus. On estime entre 20 et 50 % le nombre d'individus présentant de la poussière dont quelques individus présentent de la poussière sous forme de plaques.

Fort : Poussières ou cendres fortement visibles sous forme de couches épaisses et de plaques sur toutes les strates de la végétation ainsi qu'au niveau des troncs et du sol (forte émission de poussières/cendres et probablement récente). Les lichens et la litière au sol sont aussi couverts que la végétation. On estime que plus de 50 % des individus présentent de la poussière/cendres en couche épaisse voir de la poussière/cendre sous forme de plaque.

3 Résultats

3.1 Campagne d'échantillonnage passif de la concentration en SO₂ de l'air

3.1.1 Campagnes d'échantillonnage et durée d'exposition des échantillonneurs

Anciennement réalisé par Bureau Veritas le suivi des concentrations en SO₂ de l'air est réalisé par SCALAIR depuis mars 2018. Trente-deux campagnes de prélèvement mensuel par tubes passifs ont été réalisées entre le 29 décembre 2016 et le 04 janvier 2019. Chaque campagne dure environ 28 jours. Le Tableau 7 présente la durée d'exposition des échantillonneurs durant les 32 campagnes d'échantillonnages de 2016 à 2018 (Scalair, 2019):

Année	Campagne	Période d'exposition	
2016	Janvier	29/12	02/02
	Février	01/02	09/03
	Mars	09/03	04/04
	Avril	04/04	02/05
	Mai	02/05	02/06
	Juin	02/06	04/07
	Juillet	04/07	01/08
	Août	01/08	05/09
	Septembre	05/09	02/10
	Octobre	02/10	09/11
	Novembre	09/11	20/12
	Décembre	20/12	12/01
2017	Janvier	12/01	10/02
	Février	10/02	06/03
	Mars	06/03	06/04
	Avril	06/04	05/05
	Mai	05/05	01/06
	Juin	01/06	05/07
	Juillet	05/07	01/08
	Août	01/08	07/09
	Septembre	07/09	04/10
	Octobre	04/10	03/11
	Novembre	03/11	04/12
	Décembre	04/12	02/01
2018	Janvier		
	Février		
	Mars	12/03	05/04
	Avril-Mai	05/04	31/05
	Juin	31/05	28/06
	Juillet	28/06	02/08
	Août	02/08	30/08
	Septembre	30/08	27/09
	Octobre	27/09	25/10
	Novembre-Décembre	25/10	04/01

Tableau 7: Date de début et de fin des différentes campagnes d'échantillonnage.

3.1.2 Valeurs de référence et commentaires sur les résultats des essais

L'activité de production de Nickel de Vale NC est concernée par l'arrêté 1467-2008/PS du 9 octobre 2008 imposant une surveillance de la qualité de l'air. Cet arrêté définit les valeurs de références qui lui sont applicables. Le Tableau 8 présente ces valeurs de références :

Polluants	Dioxyde de soufre (SO ₂)	
Seuil d'information/ recommandation	En moyenne horaire :	300 µg/m ³
Seuil d'alerte	En moyenne horaire pendant 3 heures consécutives	500 µg/m ³
Valeur limite pour la protection de la santé humaine	En moyenne horaire :	350 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 24 heures par an.
	En moyenne journalière :	125 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 3 jours par an.
Valeur limite pour la protection de la végétation / des écosystèmes	En moyenne horaire :	570 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 9 heures par an.
	En moyenne journalière :	230 µg/m ³
	En moyenne annuelle :	20 µg/m ³
Objectif de qualité	En moyenne annuelle :	50 µg/m ³

Tableau 8 : Valeurs de références définies par l'arrêté d'autorisation sur les installations classées pour la protection de l'environnement n°1467-2008/P S du 9 Octobre 2008

Les valeurs réglementaires issues de la réglementation ICPE en Province Sud sont données pour des conditions de température et de pression données, et concernent les analyseurs automatiques (fonctionnant en conditions standardisées). Le dispositif d'échantillonnage passif ne permet pas de comparer les niveaux mesurés aux seuils et valeurs de référence, du fait de méthodes de calculs et d'unités d'expression de résultats différentes (Bureau Veritas, 2012). Dans ce rapport, seule la valeur limite annuelle pour la protection de la végétation est comparée, à titre indicatif, aux concentrations en SO₂ mesurées par échantillonnage passif (Scalair, 2019).

3.1.3 Résultat des mesures en SO2 de l'air

❖ Concentrations annuelles moyennes en SO2 de l'air par station

Les résultats des mesures par échantillonnage passif réalisées entre 2016 et 2018 montrent que les points d'échantillonnage ayant présenté les concentrations annuelles moyennes les plus élevées sont les points SO1 (PS11) et PS 10 ainsi que les points SO6 (PS17), SO25 (PS13) (Figure 4, Annexe 2). La répartition spatiale des concentrations moyennes annuelles de 2018 montre que ces points d'échantillonnage sont positionnés sous le vent dominant et au plus près de l'usine entre 200 et 1200 m (Figure 5). Ces résultats confortent les résultats obtenus depuis 2012 (VALE NC, 2012 ; VALE NC, 2013 ; VALE NC, 2014 ; VALE NC, 2015 ; VALE NC, 2017). La teneur moyenne annuelle maximale de 70.2µg/m³ a été enregistrée par l'échantillonneur SO1 (PS11) en Décembre 2018. 4 stations ont dépassé, à titre indicatif, la valeur moyenne annuelle de 20 µg/m³ en 2018 : SO1, SO6, PS10, PS13 (Figure 4, Figure 5).

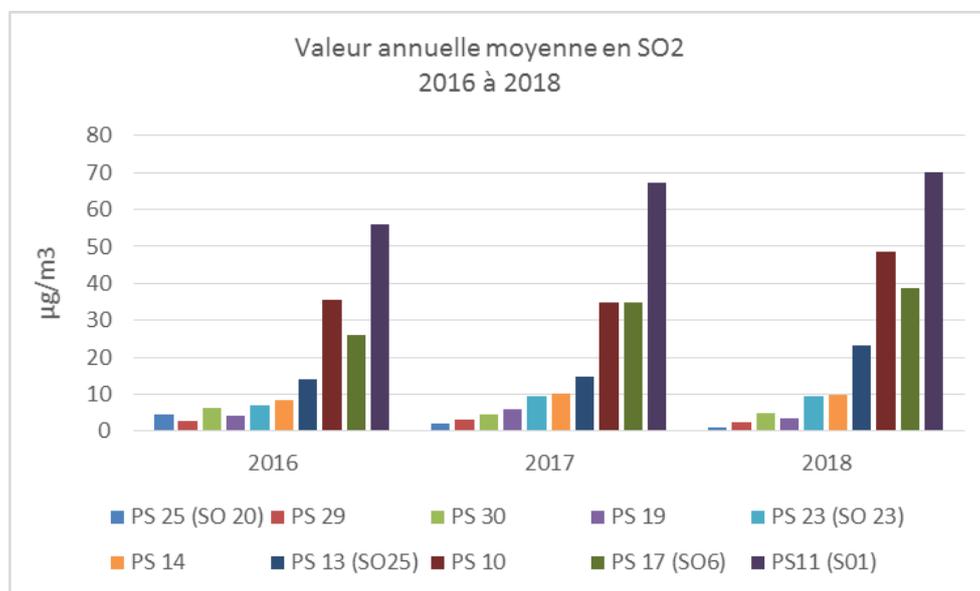
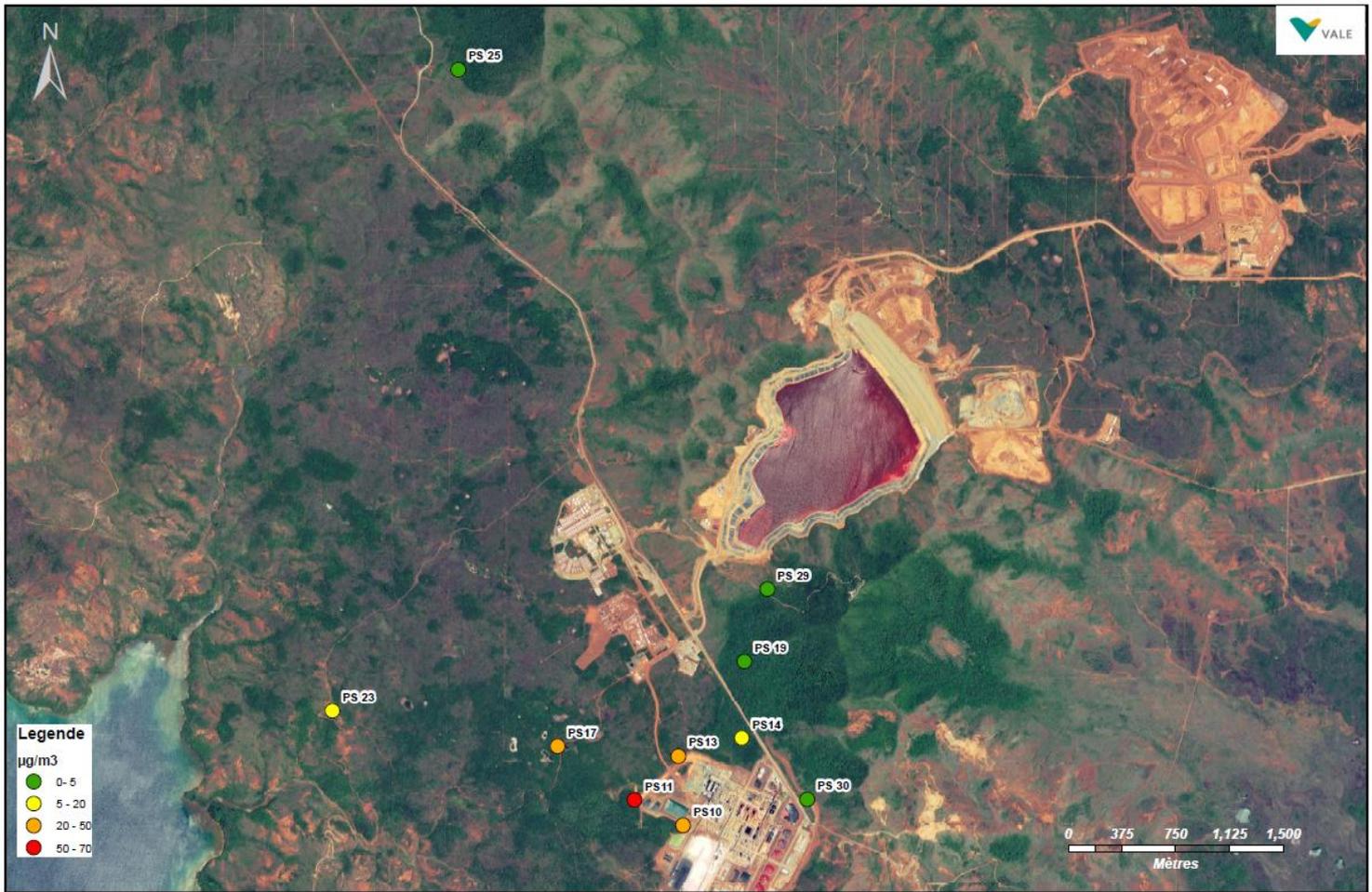


Figure 4 : Concentration moyenne, maximale et minimale en SO2 de l'air par station (µg/m³). Moyenne annuelle de 2016 à 2018.



Concentration moyenne annuelle en SO2 - 2018

Figure 5: Représentation spatiale des concentrations moyennes en SO2 de l'air mesurées entre janvier 2016 et décembre 2018.

Profil des concentrations mensuelles en SO2 de l'air pour les différentes campagnes

Les concentrations mensuelles maximales mesurées ont été de 157.7 µg/m3, 89.5 µg/m3 et 84.5 µg/m3 et 63.6 µg/m3 pour les points d'échantillonnage S01 (PS11), PS10, PS17 (SO06) et PS13 (SO25) durant respectivement les campagnes des mois de mai 2017, novembre 2018, décembre 2018 et septembre 2018 (Figure 6, Annexe 2).

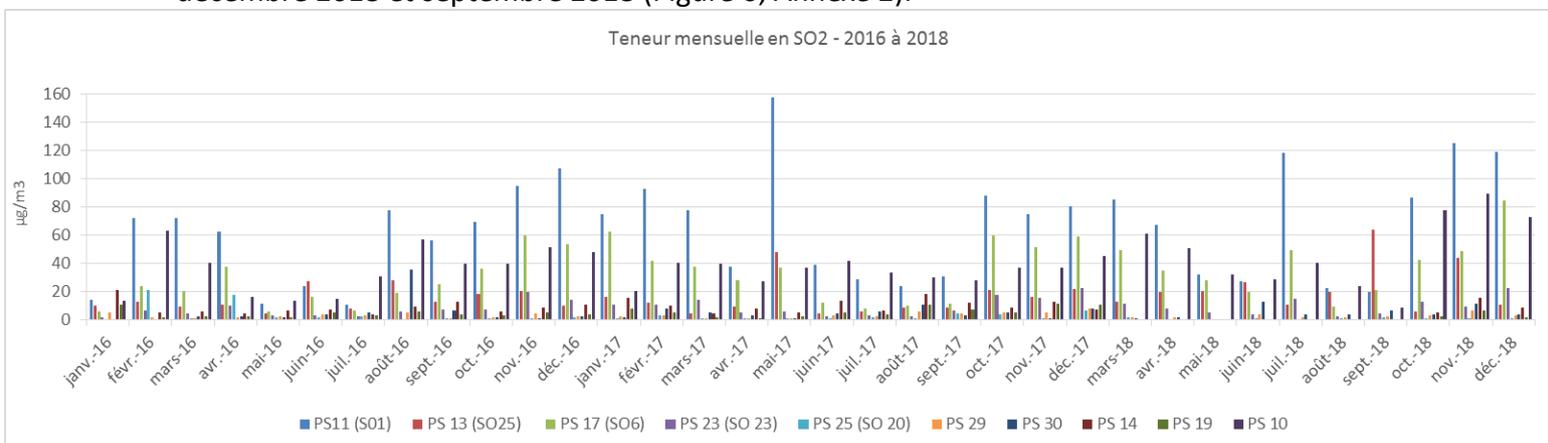


Figure 6: Profil des teneurs moyennes mensuelles (µg/m3) relevées pour les différentes campagnes entre janvier 2016 et décembre 2018.

3.2 Activité du site et incidents

Les campagnes de Février-Avril 2016, aout 2016 à mars 2017, mai 2017 et octobre à juillet 2018 et septembre à décembre 2018 ont donnés lieu aux mesures des concentrations les plus importantes, hors plusieurs incidents opérationnels avec dégagement de SO₂ ont été enregistrés durant ces périodes et ont probablement eut une influence majeure sur les concentrations en SO₂ de l'air (Tableau 9). Ces incidents sont généralement des départs de feu de soufre ou de gâteau de soufre au niveau de l'usine d'acide – Unité 330 ou de la zone de stockage du soufre – Unité 545, susceptibles d'avoir une influence sur les concentrations de SO₂ présentes dans l'air ambiant.

Incidents complexe industriel		
16/04/2016	330	Départ de feu en zone de fusion filtration avec émanation de so ₂
25/04/2016	330	Incendie au stockage soufre
05/06/2016	330	Incident fuite autoclave n°3 avec un dégagement de vapeur et de pulpe lixiviée.
04/09/2016	330	Pic d'émission de l'usine d'acide 330
01/12/2016	545	Départ de feu sur stock de gateau de soufre brut
12 et 13 dec 16	545	Incident feux gateau de soufre brut
11/05/2017	330	Départ de feu au niveau de la cuve de soufre 330TNK102
07/09/2017	330	Départ de feu dans la cuve de fusion de soufre 330-TNK-102.
24/11/2017	330	Pic d'émission de l'usine d'acide 330
03/08/2018	545	Départ de feu stock de soufre
19/09/2018	330	Dépassement de SO ₂ au niveau des émissions de la cheminée de l'usine d'acide
10/12/2018 au 22/12/2018	330	Fuite au niveau du 330-HXO-102 qui se dégrade progressivement
19/12/2018	330	Feu de soufre au niveau des filtres à plaques
23 et 24 mars 2019	330	3 départs de feu de gâteau de soufre
30/03/2019	/	Feu de résidus de soufre/charbon/calcaire situé sous le convoyeur
09 et 10 mai 2019	330	Feu de soufre au niveau de la cuve de 330-TNK-102
14-15 mai 2019	545	Depart de feu stock de soufre
22/05/2019	330	Dépassement de SO ₂ au niveau des émissions de la cheminée de l'usine d'acide

Tableau 9: Date des incidents recensés entre janvier 2016 et décembre 2018.

3.3 Suivi des symptômes foliaires

3.3.1 Localisation et évolution du nombre de stations impactées

Les suivis symptomologique quadrimestriel réalisés entre 2016 et 2018 ont montrés que 13 stations d'observations sur les 22 suivies sur la zone d'étude ont été impactées ponctuellement avec l'apparition de symptômes foliaires de chloroses et/ou nécroses caractéristiques d'une exposition au SO₂ atmosphérique. Ces stations sont situées entre 600 et 3000 m du complexe industriel sous l'influence des vents dominants (Figure 9). Les stations ayant présenté le pourcentage moyen d'individus impactés le plus élevé entre 2016 et 2018 sont les stations situées à l'Ouest Nord-Ouest suivies des stations situées au Nord-Ouest et Nord Nord Ouest du complexe industriel (Figure 7 – ANOVA, $p < 0,0001$; Figure 9).

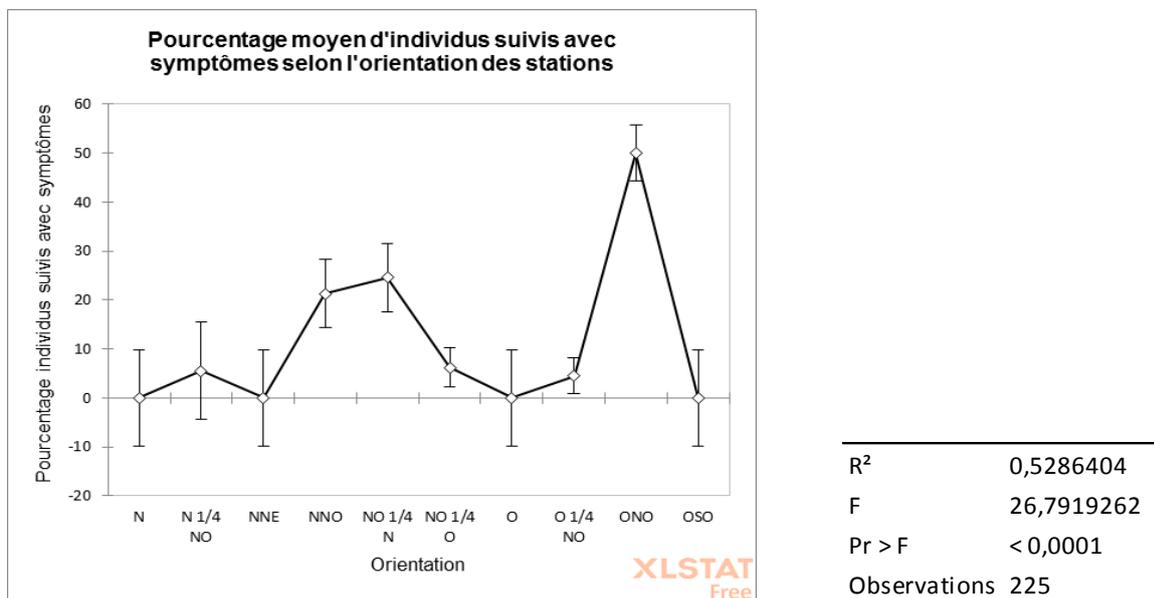


Figure 7: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du pourcentage moyen d'individus suivis avec symptômes selon l'orientation des stations par rapport au complexe industriel (Données de 2016 à 2018).

Les suivis ont mis en évidence une nette diminution du nombre de stations avec symptômes en 2018 (Figure 8). En décembre 2018, 7 stations présentent des symptômes foliaires apparus en 2018 (SO01, SO05, SO06, SO25) ou de vieux symptômes persistants apparus avant 2018 (SO24, SO17, SO11) (Figure 9).

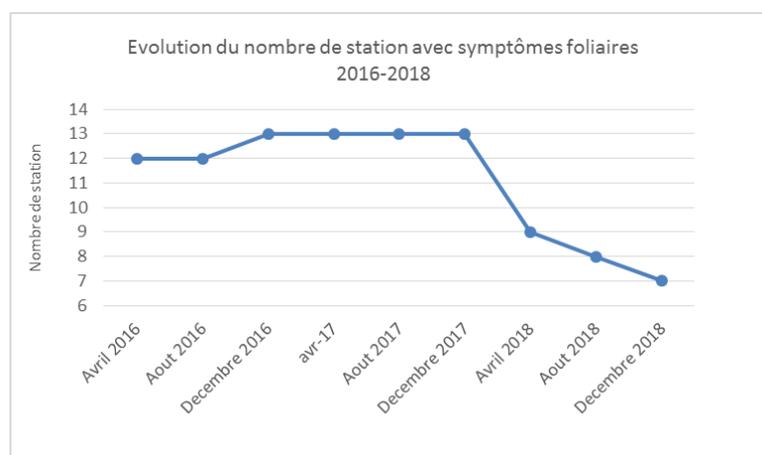


Figure 8: Evolution du nombre de stations avec symptômes foliaires entre 2016 et 2018.

Legende

Evaluation symptomatologique de Décembre 2018

- Pas de symptômes
- Symptômes récents 2018
- Vieux symptômes < 2018

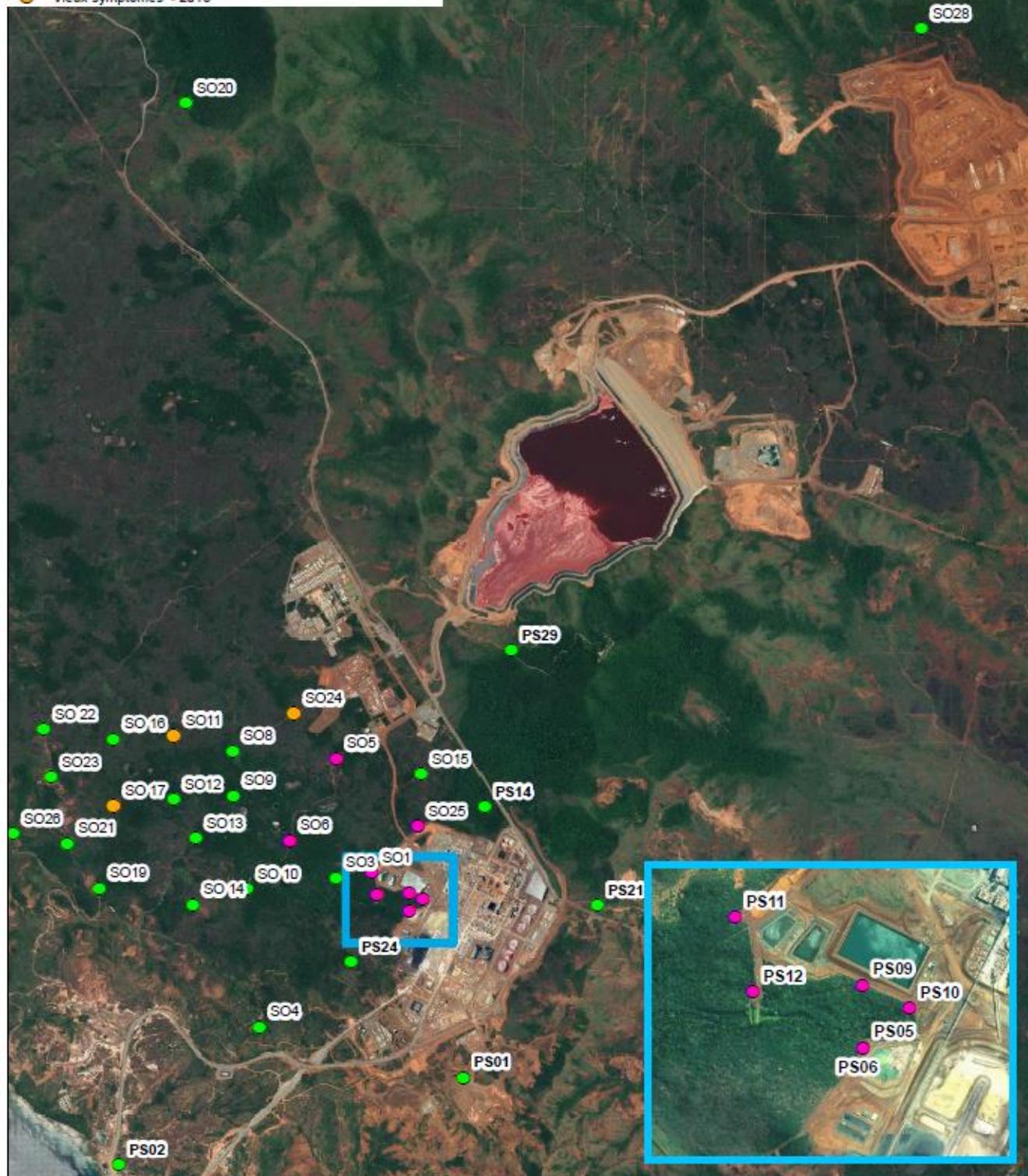


Figure 9: Représentation spatiale des stations d'observation avec symptômes en décembre 2018. La cartographie intègre les stations du suivi quadrimestriel et du suivi annuel.

3.3.2 Evolution du pourcentage d'individus impactés

Analyse sur l'ensemble de la zone d'étude

L'analyse des résultats des suivis de la teneur en SO₂ de l'air et des symptômes foliaires met en évidence une relation positive entre le pourcentage d'individus suivis avec symptôme et la teneur en SO₂ de l'air mesurée au niveau des stations par échantillonnage passif (Annexe 3 – Régression linéaire : $p < 0,0001$). Ces résultats confortent l'expertise liée à l'évaluation visuelle des symptômes foliaires comme étant liés à une exposition aigue au SO₂ atmosphérique.

Sept espèces sur les dix espèces indicatrices suivies sur l'ensemble des stations ont présenté des symptômes apparus entre janvier 2016 et décembre 2018 (Annexe 5, Annexe 6).

On note globalement une tendance à la diminution du pourcentage d'individus avec symptômes sur la zone d'étude entre Avril 2016 et Décembre 2018 (Figure 10, Figure 11). L'analyse de la figure 10 montre une augmentation du nombre d'individus avec symptômes durant la saison sèche en décembre 2016 et une augmentation du nombre d'individus avec symptômes et du degré de sévérité durant les saisons sèche de décembre 2017 et décembre 2018. Il est probable que ces périodes de déficit hydrique aient participé à fragiliser la végétation et augmenté leur sensibilité au SO₂ atmosphérique lors des incidents et ainsi favorisé l'apparition de symptômes. Il est en effet admis l'existence d'une variation saisonnière de la sensibilité des plantes au SO₂ atmosphérique ainsi que d'autres facteurs tels que l'état physiologique et l'âge des plantes (Cormis, 1973 ; Tamm and Cowling, 1976 in Mujeebur Rahman Khan and Mohd Mahmud Khan, 2011). La figure 11 met en évidence un lien entre les augmentations du pourcentage d'individus avec symptômes en décembre 2016, 2017 et 2018 le nombre d'incidents enregistrés précédents les différentes campagnes de suivis (Figure 11, Tableau 9).

Le maximum d'impact est atteint en avril et décembre 2016 avec 17,4% d'individus présentant des symptômes foliaires caractéristique d'une exposition au SO₂ atmosphérique sur l'ensemble de la zone d'étude. En décembre 2018, 11,7 % d'individus présentent des symptômes sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 10, Figure 11).

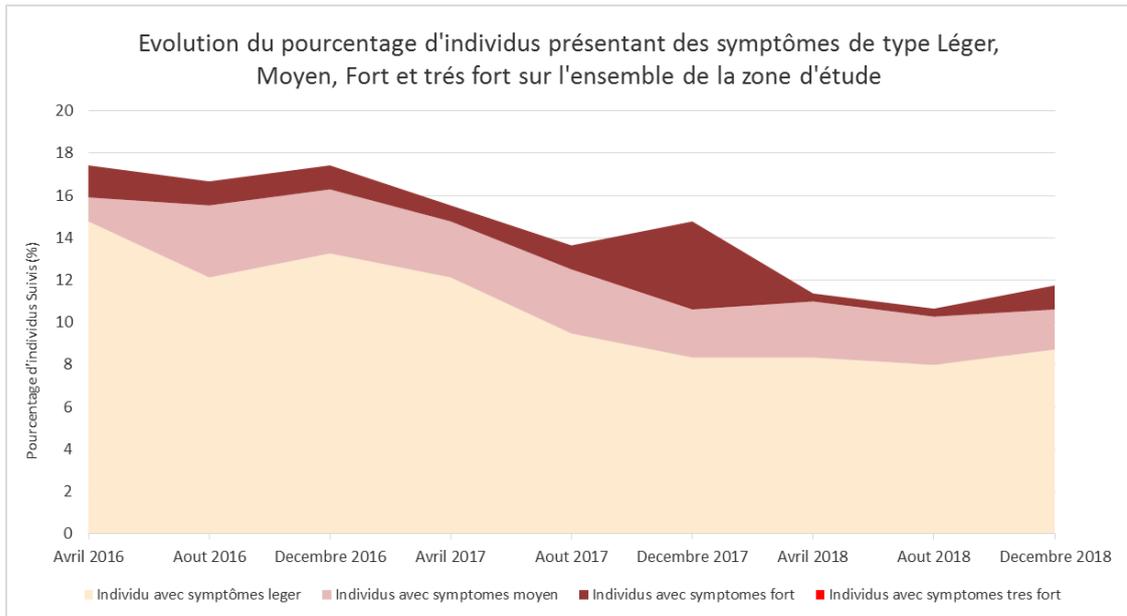


Figure 10: Evolution du pourcentage d'individus avec symptômes entre 2016 et 2018.

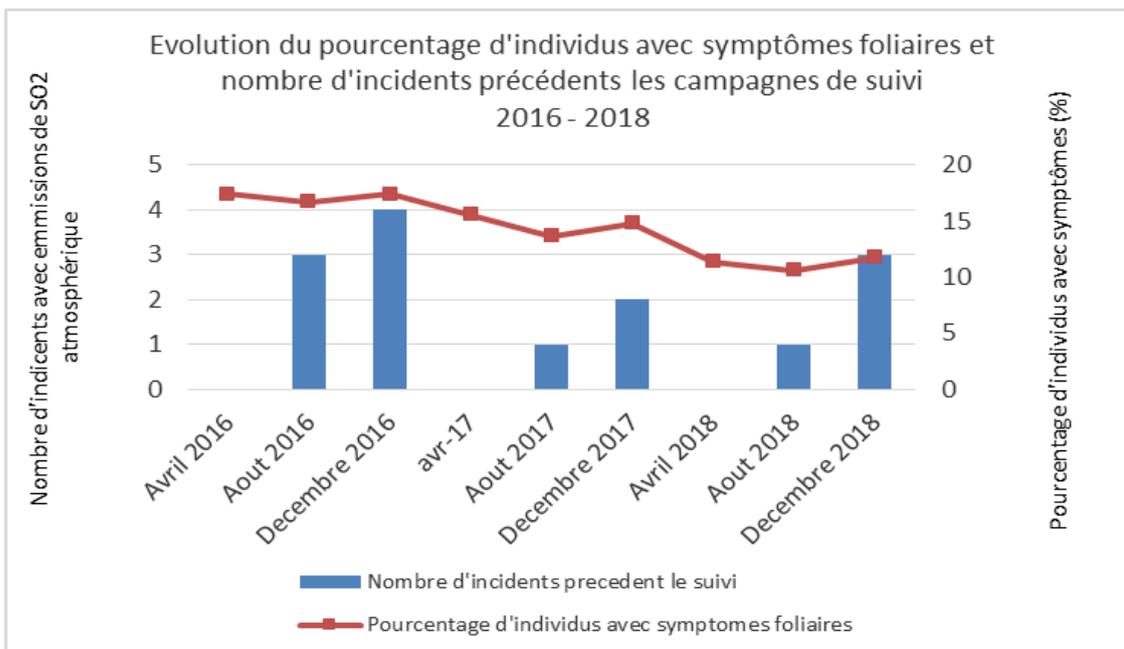


Figure 11: Evolution du pourcentage d'individus avec symptômes entre 2016 et 2018.

Analyse par classe de distance

Le pourcentage moyen d'individus impactés entre 2016 et 2018 au niveau des stations impactées « Proche » (51 %) apparaît significativement plus élevé qu'au niveau des stations « Moyen » (25%) et « Loin » (13 %) (Annexe 7 - ANOVA, $p < 0,0001$). Les stations qui ont présenté des symptômes entre 2016 et 2018 sont les stations SO01, SO11, SO12, SO15, SO17, SO22, SO23, SO24, SO25, SO05, SO06, SO08, SO09 (Annexe 4).

En décembre 2018, l'analyse par classe de stations selon la distance au complexe industriel, montre que le **nombre d'espèces**, le **nombre d'individus impactés** et le **degré de sévérité des symptômes diminuent avec la distance à la source de SO₂ atmosphérique** (Annexe 5, Annexe 6, Figure 12) :

- 5 **espèces** ont présenté des symptômes au niveau des stations « Proche », soit situées entre 200 et 800 m par rapport à la source d'émissions alors qu'une seule espèce a présenté des symptômes persistants au niveau des stations « loin » impactées les plus éloignées soit située à 2300 m (Annexe 4, Annexe 5, Annexe 6).
- Le **pourcentage moyen d'individus** au niveau des stations impactées « Proche » (54.1 %) apparaît plus élevé qu'au niveau des stations « Moyen » (19.4 %) et « Loin » (6.7 %) (Figure 12, Annexe 10)
- L'évaluation du **degré de sévérité des symptômes** par classe de station a mis en évidence une prépondérance de symptômes de type « Leger » pour chaque classe de distance avec une prépondérance d'individus impactés pour les stations « Proche ». Des symptômes de type « Fort » ont été relevés au niveau des stations « Proche » et « moyen ». Aucun symptôme de type « Sévère » n'a été recensé sur l'ensemble de la zone d'étude (Annexe 10, Figure 10, Figure 12). L'augmentation du pourcentage d'individus avec symptômes de type « fort » en décembre 2018 sur la figure 10 concerne les stations « proche » (Annexe 9, Annexe 10).

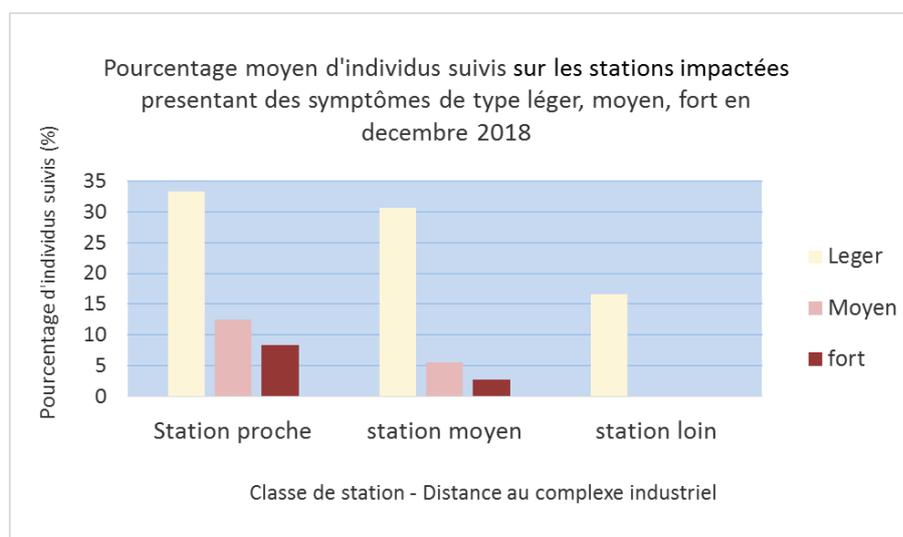


Figure 12 : Pourcentage moyen d'individus présentant des symptômes Léger, Moyen, Fort sur les stations impactées par classe de distance en décembre 2018.

La station SO6, la station SO25 et la station SO1 sont apparues comme les plus impactées en décembre 2018 avec respectivement 92, 58 et 50 % d'individus présentant des symptômes en moyenne (Figure 13, Annexe 9). Les deux stations avec symptômes les plus éloignées sont la station SO17 et la station SO11 qui n'ont présenté que des vieux symptômes foliaires persistants apparus en 2017 sur respectivement 8 % et 25 % des individus suivis.

Codia spatulata et *Tristaniopsis guillainii* sont apparus comme étant les espèces indicatrices les plus sensibles au SO2 atmosphérique et ont présenté des symptômes sur respectivement 78 % et 57 % des stations suivies considérées comme impactées entre 2016 et 2018 (Annexe 5). *Arillastrum gummiferum* et *Guioa glauca* n'ont pas présenté de symptômes caractéristiques d'une exposition au SO2 atmosphérique entre 2016 et 2018 (Annexe 5, Annexe 6, Annexe 9).

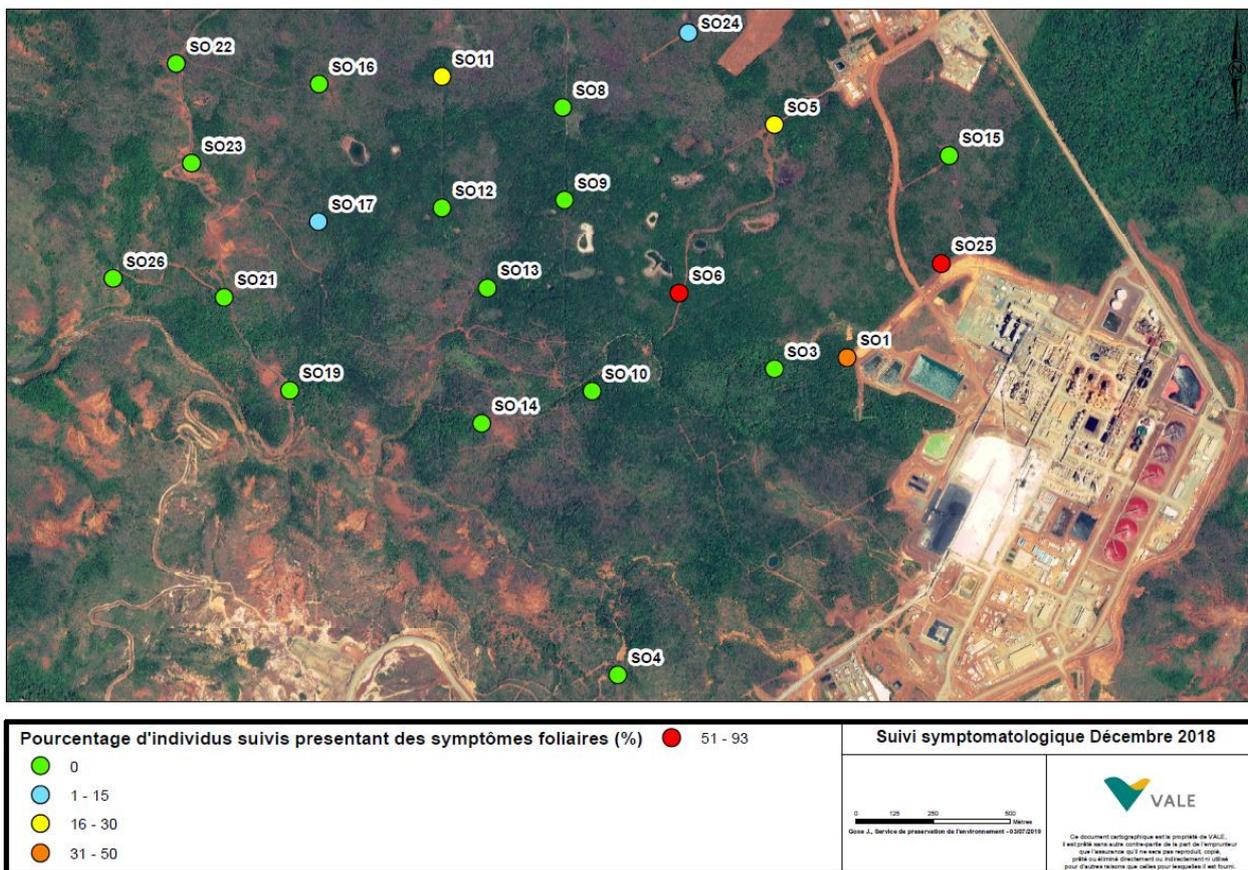


Figure 13: Pourcentage d'individus suivis avec symptômes foliaires en décembre 2018

Dix cas de mortalité ont été constatés sur les 730 individus suivis dans le cadre du protocole de suivi quadrimestriel et annuel entre 2016 et 2018 (Annexe 9). Les espèces et les sites associés sont les suivants :

- *Alphitonia neocaledonica* – PS01 : Décembre 2016
- *Gymnostoma deplancheanum*-PS10 : Décembre 2016
- *Arillastrum gummiferum* – SO19 : Avril 2017
- *Garcinia neglecta* - PS05 : Décembre 2017
- *Arillastrum gummiferum* – SO14 : Avril 2018
- *Guioa glauca* – SO24 : Aout 2018
- *Garcinia neglecta* - SO05 : Décembre 2018
- *Tristaniopsis guillainii* - PS10 : Décembre 2018
- *Gymnostoma deplancheanum*-PS23 : Décembre 2018
- *Codia spatulata* - PS05 : Décembre 2018

Les cas de mortalité relevés au niveau de PS01, SO19 et SO14 ont été recensés au niveau de stations situées hors emprise de l'axe préférentiel des vents dominants et d'apparition de symptômes identifié entre 2016 et 2018 (Annexe 4). L'évaluation des symptômes foliaires au niveau de ces stations n'a, en effet, révélé aucuns symptômes caractéristiques d'une exposition au SO₂ atmosphérique (Annexe 5, Annexe 6, Annexe 9). Les autres cas de mortalité ont quant à eux été enregistrés sur PS10, PS05, PS23, SO24 en décembre durant la saison sèche suggérant un probable stress hydrique des individus concernés de par la localité des individus situés en lisière en bordure de zone ouverte ou localisés en zone ouverte. Des cas de mortalité hors zone d'influence du complexe industriel ont par ailleurs été enregistrés durant ces périodes de déficit hydrique.

3.3.3 Caractérisation des symptômes

Les symptômes relevés en 2018 sont apparus sous forme de nécroses et/ou de chloroses marginales, internervales ou apicales selon les espèces :

- Nécroses internervales : *Codia spatulata*, *Alphitonia neocaledonica*
- Nécroses apicales : *Styphelia* sp., *Garcinia* sp., *Gymnostoma deplancheanum*
- Chloroses marginales à internervales : *Codia spatulata*, *Tristaniopsis guillainii*

- **Nécroses internervale :**



PS04 – *Alphitonia neocaledonica*



PS04 – *Codia spatulata*

- **Nécroses apicales :**



SO25 – *Styphelia* sp.



SO1 – *Garcinia neglecta*

- **Chloroses marginales ou internervales :**



SO6 – *Tristaniopsis guillainii*



SO06 – *Codia spatulata*

Une formation réalisée en octobre 2018 par l'Établissement Public d'Enseignement et de Formation Professionnelle Agricole (CFPPA) portant sur les carences et bio-agresseurs des plantes a permis de poser un diagnostic sur certains symptômes foliaires incertains relevés lors des suivis quant à leur origine naturelle ou liés à une exposition aigue au SO₂ atmosphérique. Le guide des symptômes foliaires a ainsi été modifié et enrichi au vue de ses résultats et des résultats du suivi symptomatologique de 2018 (Figure 14 à Figure 19) :



Figure 14: Nécrose liées à un champignon – Anthracnose sur *Arillastrum gummiferum*. Figure 15: Chlorose diffuse liée à des attaques d'acariens sur *Codia spatulata*.



Figure 16: Brulure associé lié à l'ensoleillement sur *Tristaniopsis glauca*. Figure 17: Carence sur *Tristaniopsis guillainii*.



Figure 18: Chlorose ponctuée liée à des attaques d'acariens sur *Arillastrum gummiferum*. Figure 19: Brulure et stress hydrique sur *Codia discolor*.

3.4 Reprise de la végétation :

Les fluctuations du pourcentage d'individus suivis avec jeunes feuilles relevées sur les stations impactées et les stations témoins suivent les mêmes tendances entre 2016 et 2018 (Figure 20).

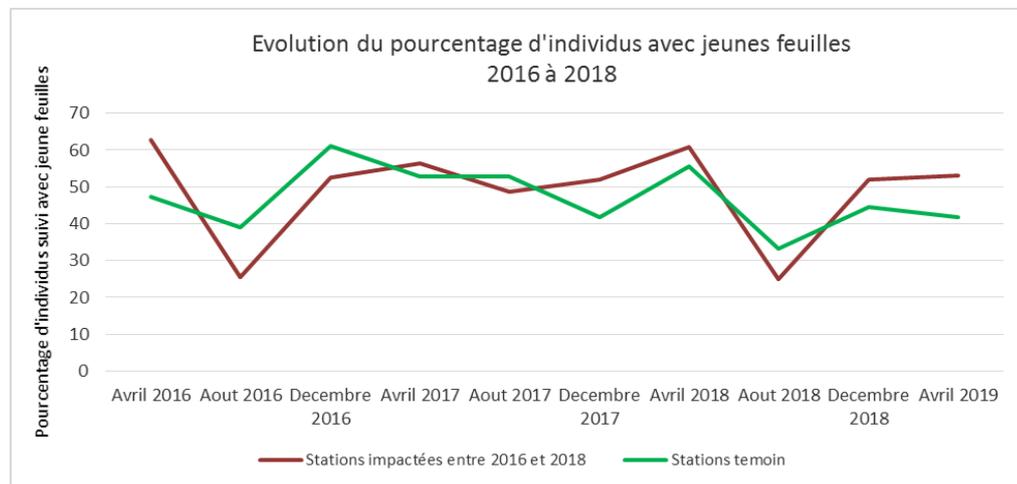


Figure 20: Evolution du pourcentage d'individus suivis produisant un nouveau feuillage sur les stations impactées et les sites Témoins.

Aucune différence significative n'a été mise en évidence concernant la reprise moyenne des individus entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » impactées entre 2016 et 2018 et les stations « Témoin » (Figure 21 – ANOVA $p > 0,0001$). Le pourcentage moyen d'individus suivis ayant produit de nouvelles jeunes feuilles est de 48 % pour les stations « proche » impactées contre 47,5 % pour les stations témoins (Figure 21; Annexe 14).

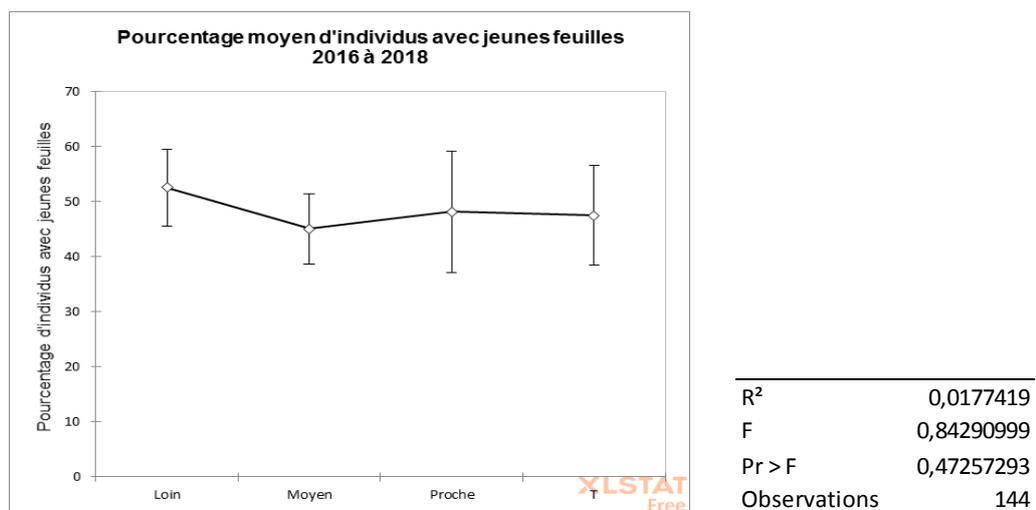


Figure 21: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « Pourcentage moyen d'individus avec jeunes feuilles » au niveau de stations impactées entre 2016 et 2018 par classe de distance comparé au témoin (T).

Une relation positive a pu être mise en évidence entre le nombre d'individus avec symptômes et le nombre d'individus présentant des jeunes feuilles (Annexe 11 – Régression linéaire ; $p < 0,0001$). Ce résultat conforte les observations de terrain et relevés photographiques des individus où il a été constaté la production d'un nouveau feuillage malgré la présence de symptômes foliaires récent et/ou la persistance de vieux symptômes foliaires sur les vieilles feuilles (Figure 22, Figure 23, Figure 24).



Figure 22: *Tristaniopsis guillainii* avec jeunes feuilles et symptômes marqués de chloroses en 2018 –SO06.

Figure 23: *Alphitonia neocaledonica* avec jeunes feuilles et symptômes de nécroses internervales - PS04.



Figure 24: Individus de *Styphelia* en décembre 2017 et avril 2018 – SO25. On constate la production d'un nouveau feuillage.

3.5 Phénologie

On constate une variabilité plus importante du nombre de relevés moyen de floraison et fructification sur les individus suivis entre 2016 et 2018 au niveau des stations impactées par rapport aux stations témoins (Figure 25).

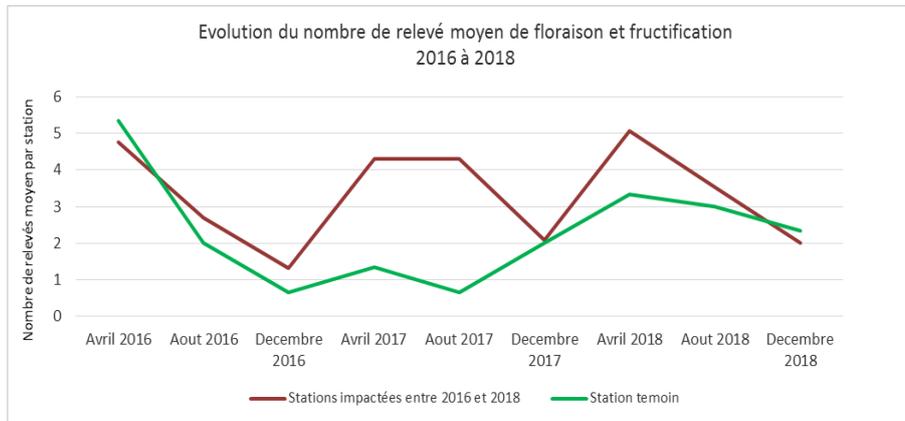


Figure 25: Evolution du nombre de relevé moyen de floraison et fructification sur les individus suivis au niveau des stations impactées et stations témoins.

Aucune différence significative n'a toutefois été mise en évidence entre les stations « témoins » et les stations « Proche », « Moyen », « Loin » impactées concernant le nombre de relevés moyen de floraison/fructification des individus entre 2016 et 2018 (Figure 26 – ANOVA; Annexe 14). Aucun lien n'a été mis en évidence entre le nombre d'individus avec symptômes et le nombre de relevés de floraison/fructification (Annexe 12 : Régression linéaire ; $p > 0,0001$).

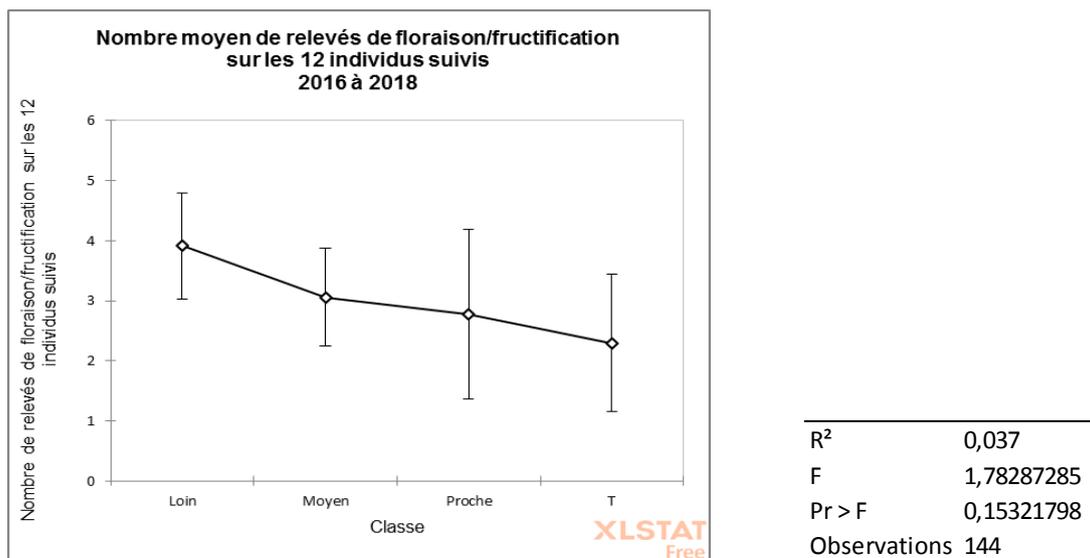


Figure 26: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « nombre de relevé moyen de floraison/fructification » au niveau des stations impactées par classe de distance – avril 2016 à décembre 2018 comparé au témoin (T).

3.6 Etat phytosanitaire

Il est admis que le SO₂ atmosphérique peut favoriser la multiplication et la reproduction de pathogènes des plantes et ainsi augmenter l’abondance et la sévérité des attaques phytosanitaires (Mujeebur Rahmnan Khan, Mohd Mahmud Khan, 2011). Les fluctuations du nombre de relevés moyen d’attaques phytosanitaire sur les stations impactées et les stations témoins suivent la même tendance entre 2016 et 2018 avec une tendance à l’augmentation depuis 2016 (Figure 27).

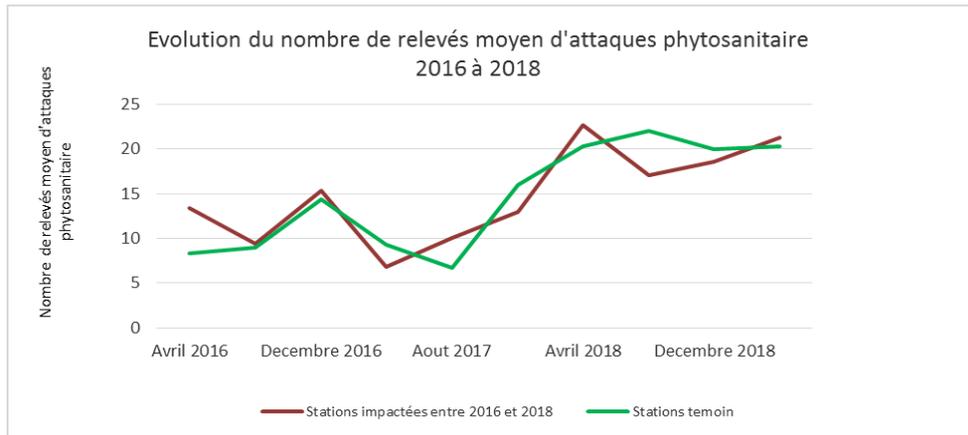
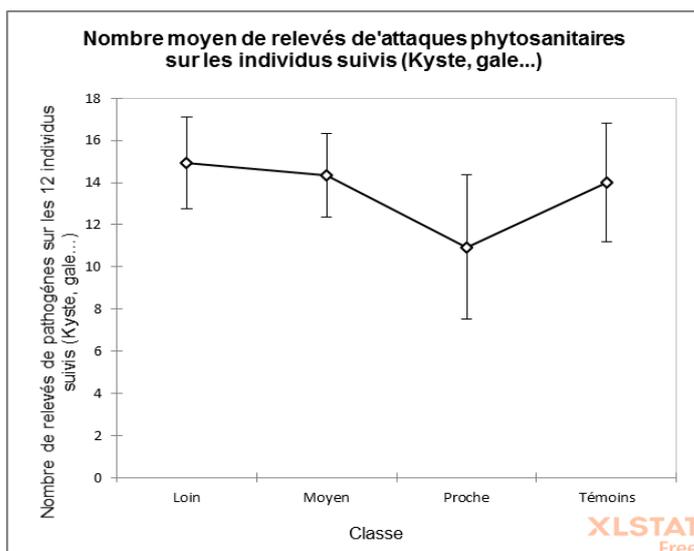


Figure 27: Evolution du nombre de relevés d’attaques phytosanitaires sur les individus suivis de 2016 à 2018.

Aucune différence significative n’a été mise en évidence concernant le nombre de relevés d’attaques phytosanitaires entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » et « Témoin » (Figure 28 –ANOVA, $p > 0,0001$). Le nombre moyen d’attaques phytosanitaires sur les individus suivis est de 11 pour les stations « Proche » impactées contre 14 pour les stations « Témoins » (figure 28, Annexe 14).



R ²	0,02729913
F	1,30971329
Pr > F	0,27372699
Observations	144

Figure 28: Résultats de l’analyse de variance (ANOVA) du « nombre de relevé moyen d’attaques phytosanitaires » sur les stations impactées et les stations témoins selon la classe de distance.

Aucun lien n'a pu être mis en évidence entre le nombre d'individus avec symptômes et le nombre d'attaques phytosanitaires (Annexe 13-régression linéaire, $p > 0,0001$). La présence de symptômes ne semble pas fragiliser les individus et indirectement influencer l'occurrence d'attaques phytosanitaires. Ce résultat conforte également l'expertise liée à l'évaluation des symptômes foliaires caractéristiques d'une exposition au SO_2 atmosphérique.



Figure 29: Déformation des jeunes feuilles liées à une attaque d'insecte - SO27. Figure 30: Attaque de cochenilles sur le revers des feuilles de *Garcinia neglecta* - SO14.

3.7 Poussières/cendres

La présence de cendres a été relevée sur 20 stations lors des suivis réalisés entre 2016 et 2018 (Figure 34, Annexe 15). L'importance des dépôts de cendres observés semble varier selon les espèces en fonction de la phyllotaxie et la forme de leurs feuilles. Les dépôts sont majoritairement de type « Leger » soit sous forme de couches très fines et diffuses (Figure 31) ou sous forme de petits dépôts localisés à l'apex des feuille et dans la majorité des cas, sur des feuilles en forme de « coupelle » réduisant ainsi les phénomènes de lessivage et favorisant l'accumulation de cendre et d'eau de pluie (Figure 32, Figure 33). 7 stations ont présenté des dépôts de type « Moyen » entre 2016 et 2018 (Figure 34) soit sous forme de petites plaques sur le limbe des feuilles (Figure 32). Ces dépôts peuvent être à l'origine d'un brunissement superficiel de la cuticule ne semblant pas impacter l'état de santé ou la viabilité de la feuille (Figure 33).



Figure 31: Dépôt de cendres de type « Leger » sur *Arillastrum gummiferum*. Figure 32: Dépôt de cendres de type « Moyen » Sur *Arillastrum gummiferum*.



Figure 33: Brunissement superficiel du limbe lié aux dépôts de cendre et de poussières sur *Styphelia*, *Arillastrum gummiferum*



Figure 34: Répartition des dépôts de cendres sur la zone d'étude entre 2016 et 2018.

3.8 Analyses chimiques foliaires : Soufre total et soufre isotopique

❖ Evolution des concentrations moyennes en soufre total foliaire –Ancien protocole

Les résultats des analyses chimiques foliaires réalisées entre mai 2012 et décembre 2017 dans le cadre de l'ancien protocole montrent que la teneur moyenne en soufre total foliaire apparaît plus élevée pour les espèces présentes sur les sites avec symptômes que sur les sites sans symptômes. On note une tendance à l'augmentation de la teneur moyenne en soufre foliaire des sites avec symptômes. (Figure 35 ; Annexe 16).

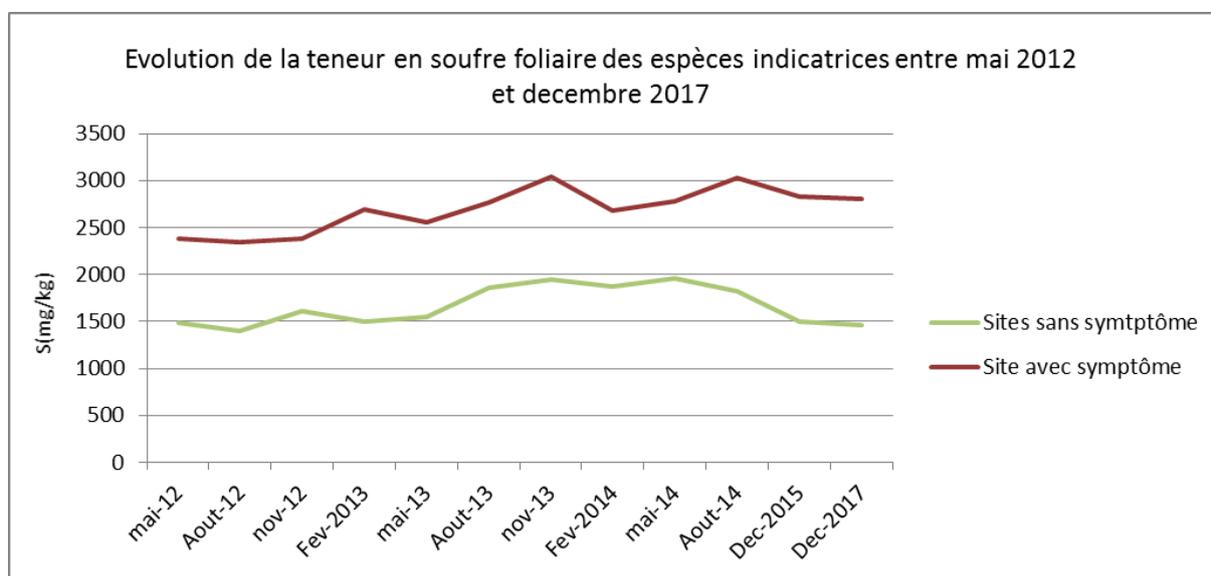


Figure 35: Evolution des concentrations moyennes en soufre total foliaire entre mai 2012 et décembre 2017. (*Alphitonia neocaledonica*, *Codia spatulata*, *Garcinia sp.*, *Montrouziera sphaeroidea* et *Styphelia sp.*)

❖ Concentration en soufre total foliaire pour *Arillastrum gummiferum*

Les teneurs en soufre total foliaire d'*Arillastrum gummiferum* en décembre 2017 varient entre 527 et 1834 mg/kg selon les stations (Annexe 17, Figure 36). On ne constate pas d'augmentation de la teneur en soufre foliaire avec la proximité au complexe industriel (Figure 37). Les stations ayant présenté les valeurs les plus élevées font partie des stations des plus éloignées de la zone d'étude : SO14, SO19, SO17, SO26 (Figure 36, Figure 37).

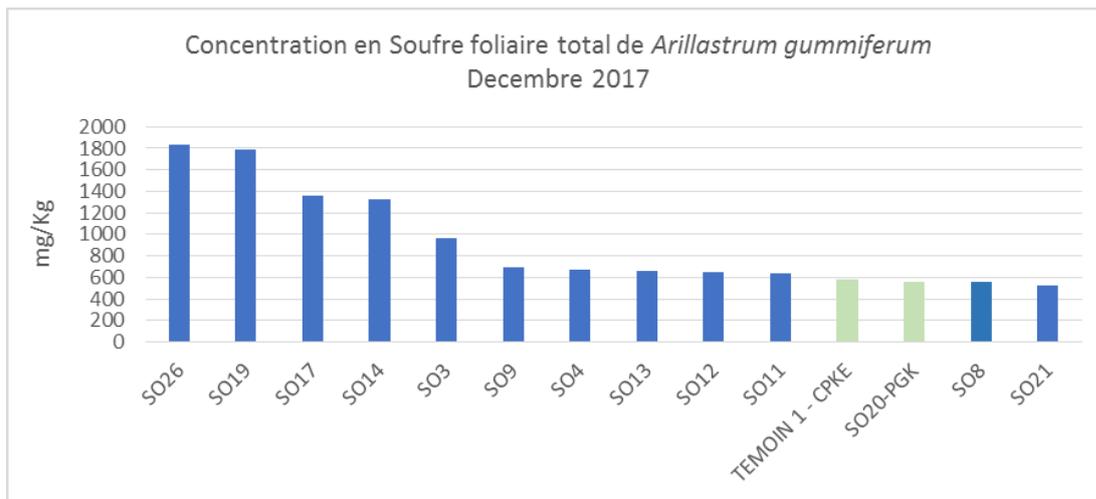


Figure 36: Concentration en soufre foliaire d'*Arillastrum gummiferum* par station en décembre 2017.

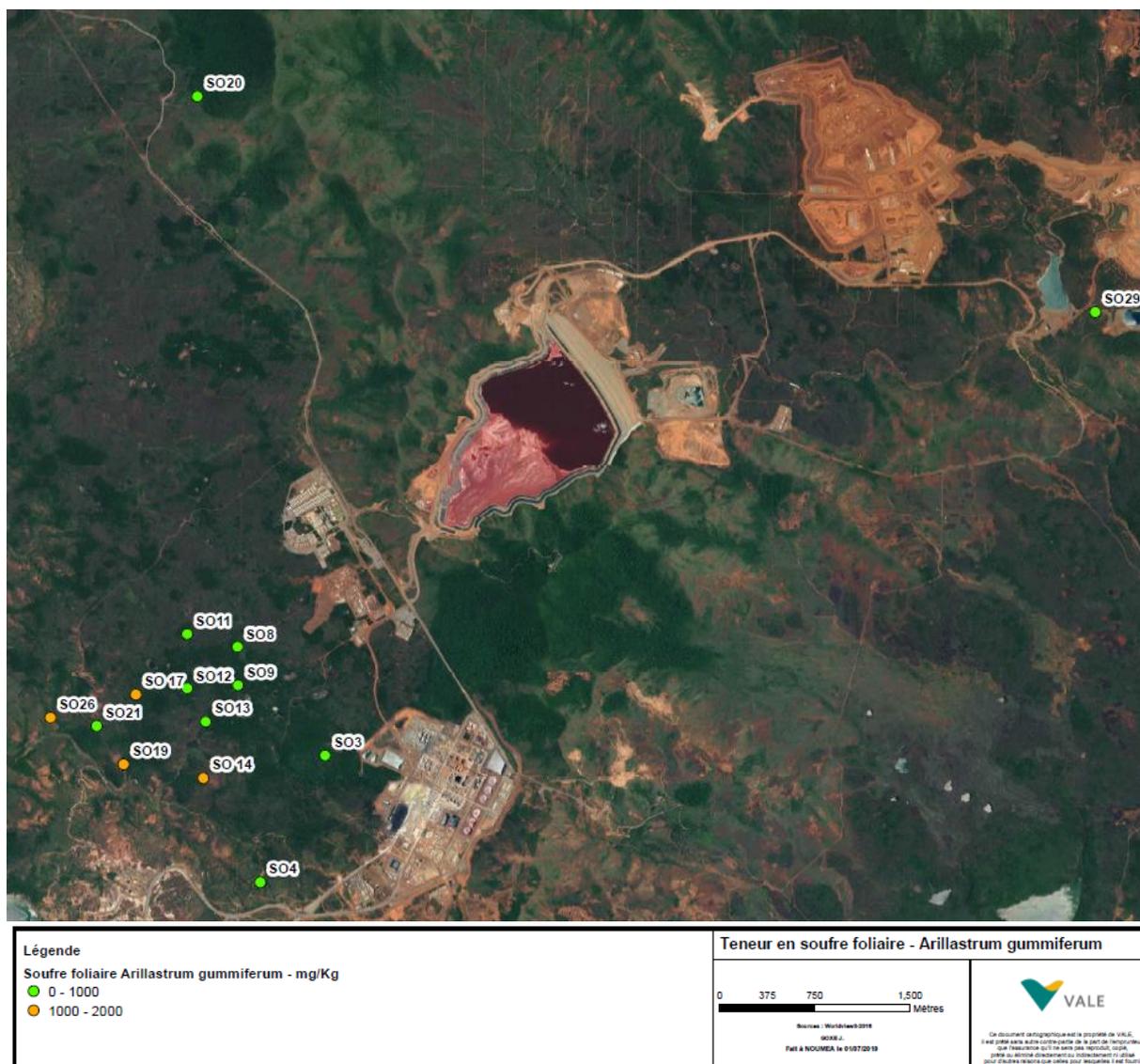


Figure 37: Cartographie des teneurs en soufre total foliaire d'*Arillastrum gummiferum* en décembre 2017.

❖ *Teneur en soufre foliaire isotopique pour Arillastrum gummiferum*

L'analyse des teneurs en soufre isotopique foliaire ($\delta^{34}\text{S}$) n'a pas permis de détecter de soufre d'origine industriel. Les stations ayant présenté les teneurs en soufre foliaire isotopique les plus élevée sont les 3 stations témoins avec respectivement des valeurs de l'ordre de 17.6, 17.4 et 12.5 ‰ (Annexe 18, Figure 38).

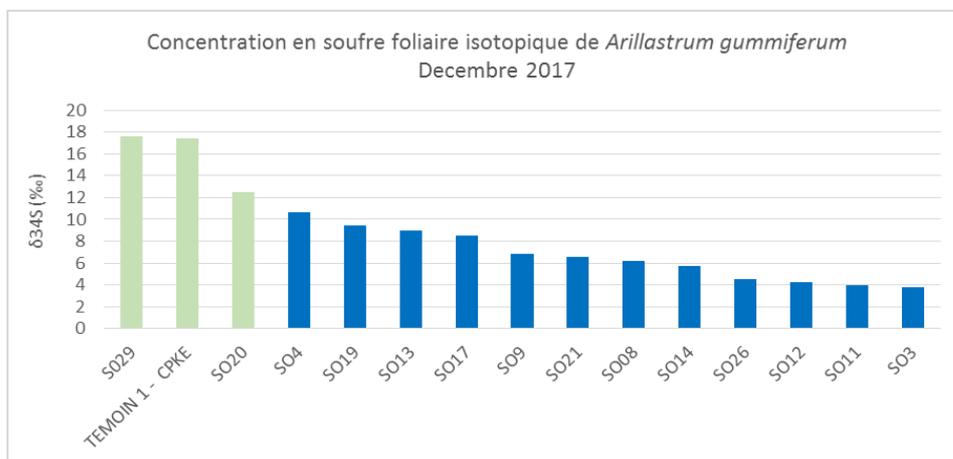


Figure 38: Concentration en soufre foliaire isotopique $\delta^{34}\text{S}$ (‰) d'*Arillastrum gummiferum* par classe de distance.

❖ *Teneurs en soufre total foliaire pour Garcinia neglecta*

Les teneurs en soufre foliaire de *Garcinia neglecta* en décembre 2017 varient entre 595 et 3012 mg/kg selon les stations (Annexe 17, Figure 39). La station ayant présenté la teneur en soufre foliaire la plus élevée pour *Garcinia neglecta* est SO1 située a proximité du complexe industriel (Figure 39, Figure 40). Il convient de noter que des symptômes foliaires de nécroses apicales ont été relevés sur *Garcinia neglecta* sur cette station en decembre 2017 suite aux indicents enregistrés fin 2017 (Annexe 5, Annexe 6, Annexe 9).

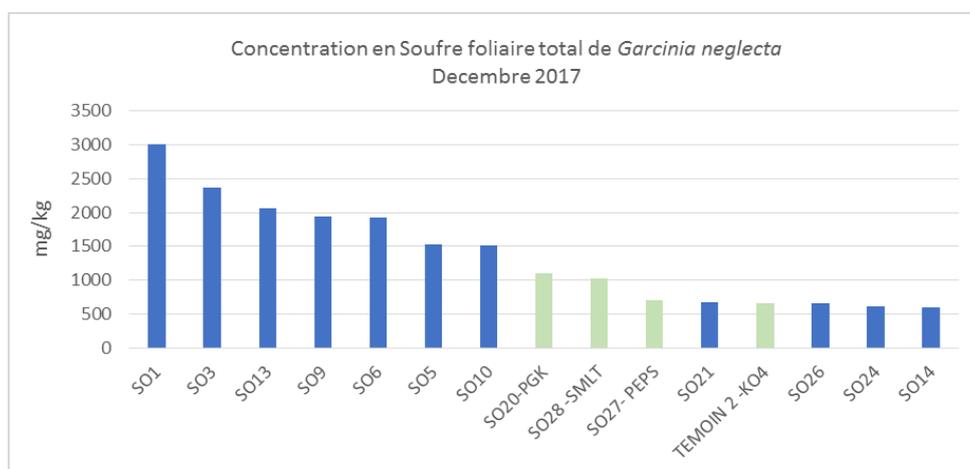


Figure 39: Concentration en soufre total foliaire de *Garcinia neglecta* par station en décembre 2017.

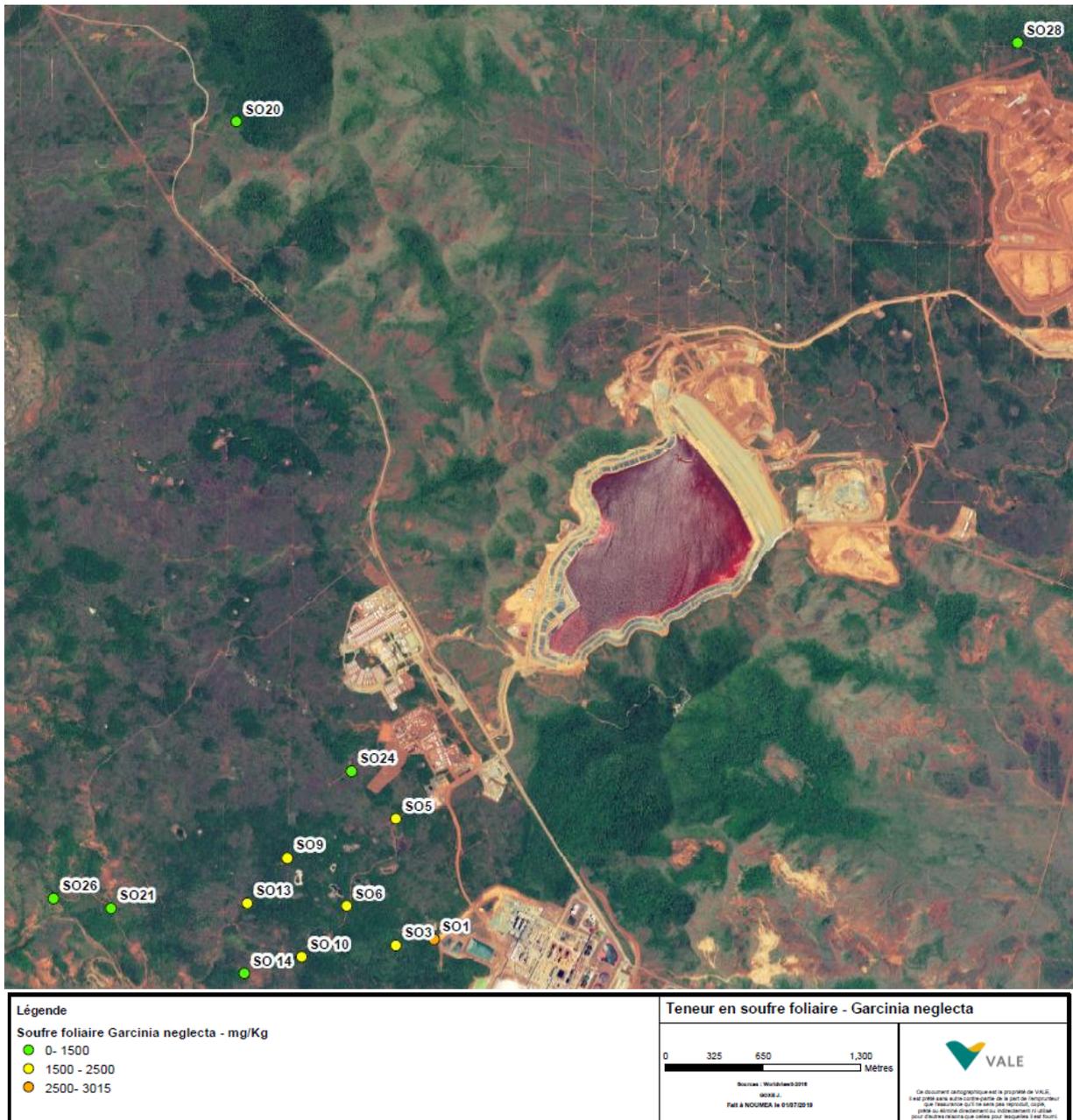


Figure 40: Cartographie des teneurs en soufre total foliaire de *Garcinia neglecta* en décembre 2017.

❖ *Teneurs en soufre foliaire isotopique pour *Garcinia neglecta**

Les stations ayant présenté les teneurs les plus élevées sont les stations témoins (SO28, SO27 et SO20) et la station la plus éloignée de la zone d'étude (SO26) avec respectivement 17.8, 12.2, 11.3 pour les stations témoins et 12.9 ‰ pour la station SO26 (Annexe 18, Figure 41).

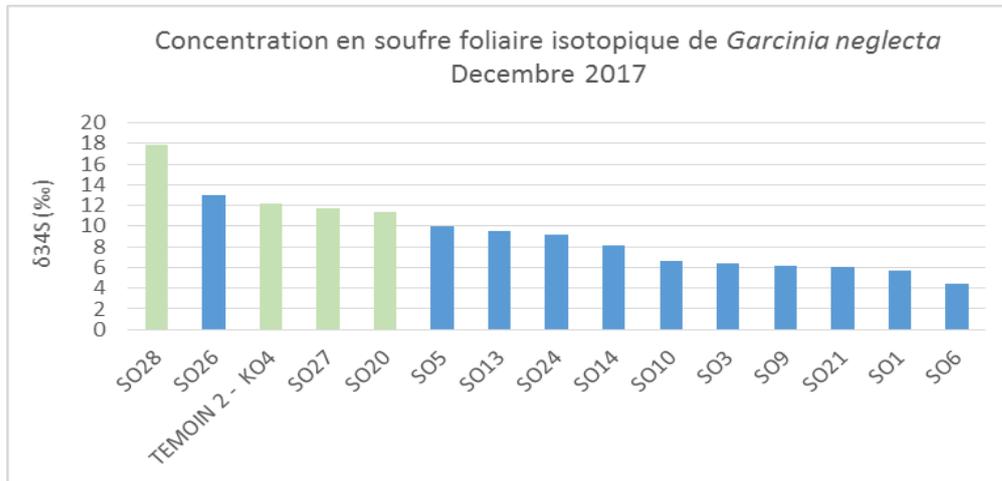


Figure 41: Teneur en soufre foliaire isotopique $\delta^{34}\text{S}$ (‰) de *Garcinia neglecta* en décembre 2017

3.9 Analyses chimiques de sol : Soufre, pH, conductivité

❖ Teneur en soufre total du sol

Les teneurs en soufre du sol varient entre 488 et 2200 mg/kg selon les stations en décembre 2017 (Annexe 19, Figure 42). Les cinq stations ayant présenté les valeurs les plus élevées sont les stations les plus éloignées (SO21,23,19), la station témoin SO28 et la station SO1 située à proximité du complexe industriel (Annexe 19, Figure 42). Aucun lien n'a pu être mis en évidence entre la teneur en soufre du sol et le pourcentage d'individus avec symptômes (Annexe 20, Régression linéaire ; $p > 0,0001$).

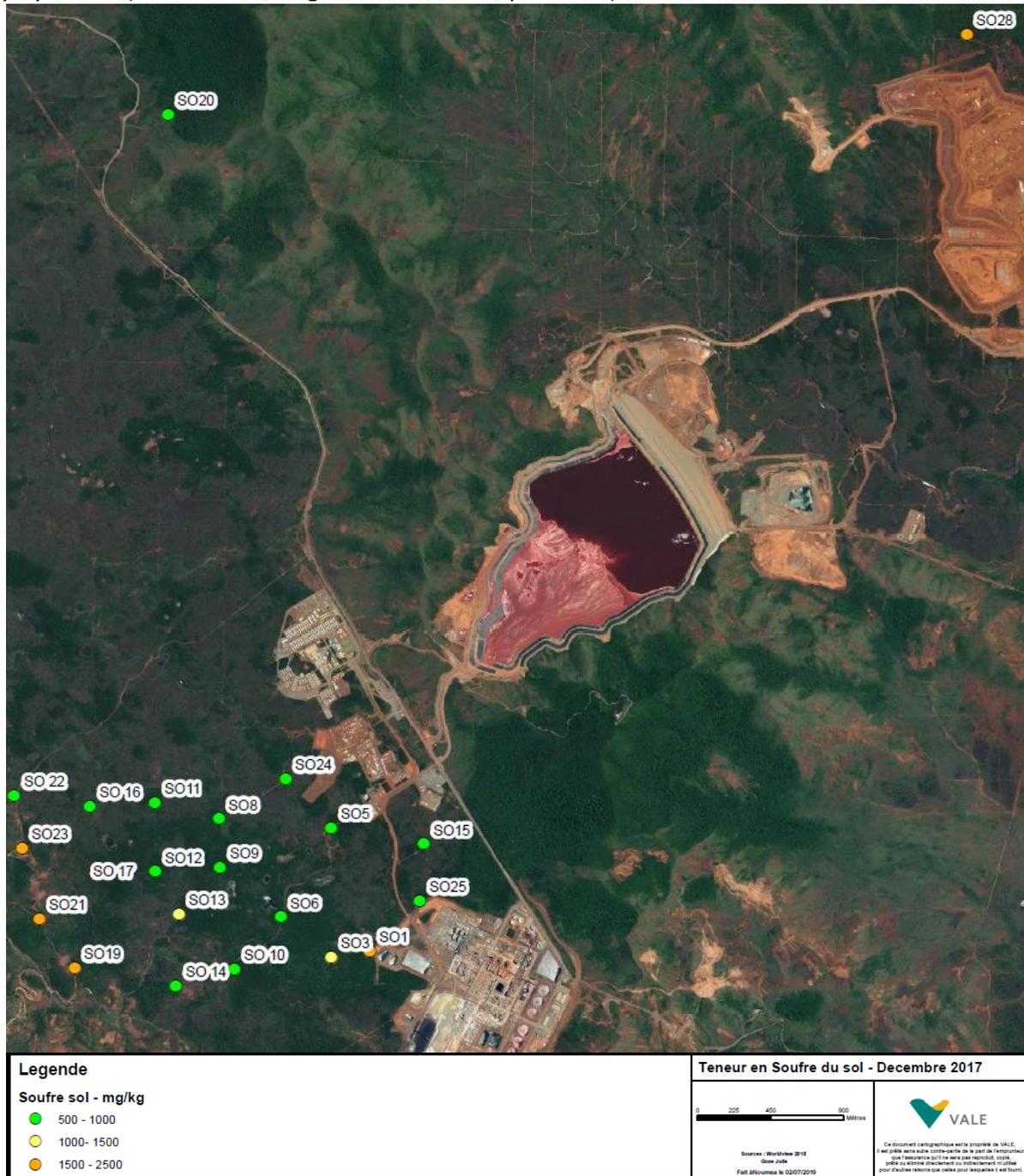


Figure 42: Cartographie de la teneur en soufre total des sols en décembre 2017.

❖ *PH du sol*

Les PH des sols relevés au niveau des différentes stations en décembre 2017 varient entre 4.45 et 5.59 (Annexe 21). Ces valeurs se rapprochent des valeurs de PH des sols que l'on retrouve en maquis et forêt sur sol ferrallitique qui varient entre 4.8 et 5.3 (Isnard et al., 2016). Aucun lien n'a pu être mis en évidence entre le pH du sol et la distance au complexe industriel (Annexe 22 - Régression linéaire ; $p > 0,0001$).

❖ *Mesure de la Conductivité du sol*

La conductivité des sols relevés au niveau des différentes stations en décembre 2017 varient entre 19.5 et 478 (Annexe 21). Aucun lien n'a pu être mis en évidence entre la conductivité du sol et le nombre d'individus avec symptômes (Annexe 23 - Régression linéaire; $p > 0,0001$).

3.10 Etat de santé des lichens

L'évaluation de la couleur et le dénombrement des « têtes » de lichen n'a montré aucun changement majeur entre avril 2016 et décembre 2018. Seule la station SO28 a présenté une diminution d'une « unité/tête » de lichen en août 2017. Le seul changement majeur observé sur les lichens entre 2016 et 2018 est une variation de volume selon la saison et la pluviométrie lors des suivis (Figure 43, Annexe 24).

Station SO 23 – Cladonia

Février 2016



Décembre 2018



Figure 43: Illustration d'une colonie de Lichens en avril 2016 et en décembre 2018- SO13.

4. Etude VEGUSINE

4.1 Objectifs et indicateurs

Depuis 2008, VALE NC a mandaté Bluecham pour la mise en place d'un protocole de suivi de l'évolution de la végétation par imagerie satellitaire autour du complexe industriel de VALE NC. 27 massifs forestiers d'intérêt prioritaire ont été sélectionnés pour ce suivi (Figure 44 ; Bluecham 2011 ; Bluecham 2013 ; Bluecham 2014).

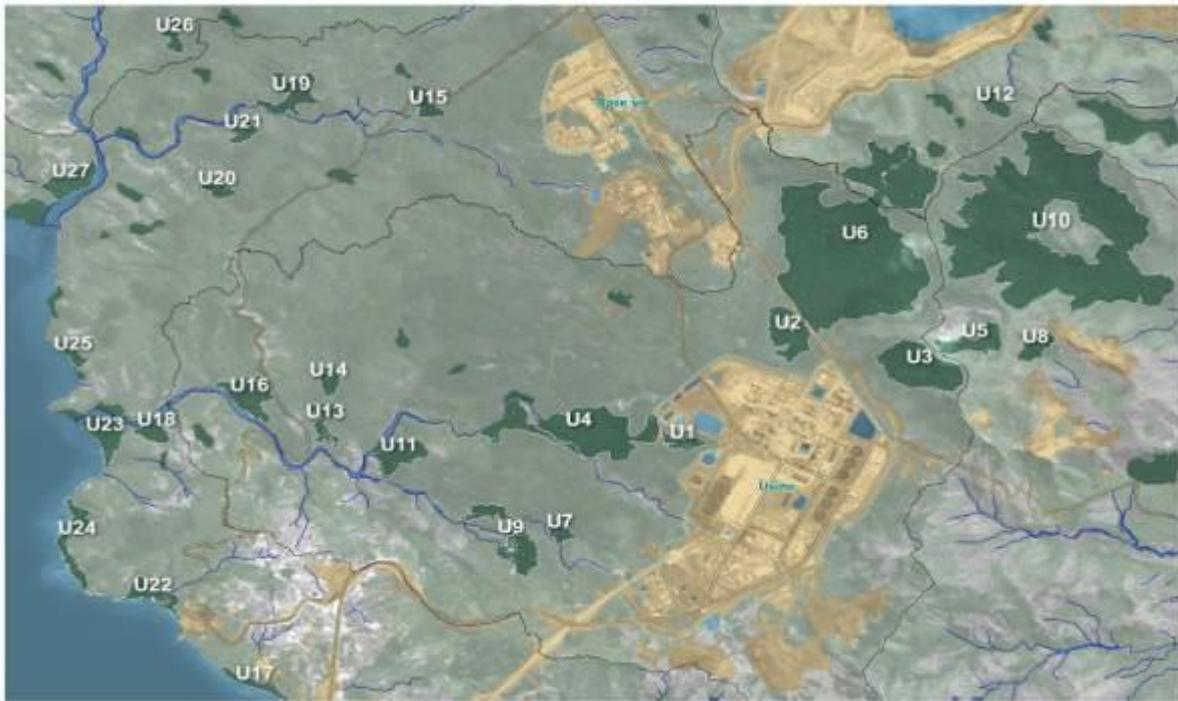


Figure 44: Localisation des 27 massifs forestiers d'intérêt prioritaire autour de l'usine de VALE NC.

Le processus de suivi de l'évolution de l'état de la végétation est réalisé à partir d'une combinaison d'indices satellitaires permettant de :

- Suivre l'activité photosynthétique de la végétation
- Suivre la structure de la canopée et la couverture de feuilles
- Suivre le stress hydrique de la végétation (fraction de la végétation)

Les indices requis en entrée sont des indices scientifiquement validés et approuvés depuis de nombreuses années dans le suivi de la végétation en milieu tropical. Ces paramètres présentent des variations complémentaires pour la caractérisation de l'état de la végétation permettant une intégration pertinente au sein de l'indicateur ISEV.

Le suivi global est réalisé à l'aide de l'indicateur ISEV. A partir des changements mesurés pour chaque paramètre caractérisant la végétation, l'indicateur synthétique de l'évolution de la végétation ISEV permet de mettre en évidence 3 états de la végétation :

- Les valeurs centrées autour de 0 correspondent à des zones sans ou à très faible changements ;
- Les valeurs tendant vers + 1 indiquent des changements positifs de l'activité de la végétation (1 = apparition de la végétation) ;
- Les valeurs tendant vers - 1 indiquent des changements négatifs de l'activité de la végétation (-1 = mort ou disparition de la végétation).

4.2 Evolution globale des impacts entre décembre 2008 et décembre 2018

Par "impact" sont considérés la dégradation voir la mort des arbres ou groupes d'arbres sans considération de l'origine de l'impact (anthropique ou naturelle). L'évolution des impacts indique une progression de ceux-ci entre 2009 et 2011 en marche d'escalier avec un premier palier mi 2010 et un second palier mi 2011 (Figure 45 ; Bluecham 2011 ; Bluecham 2013 ; Bluecham 2014). Le maximum d'impact sur l'ensemble des massifs est atteint entre mi 2011 et mi 2012 avec 10,9 % de surfaces impactées et 2,76 % de surfaces très impactées (Figure 45, Figure 47). Mi 2012, les impacts diminuent d'abord fortement puis se stabilisent globalement jusqu'à mai 2015. L'évolution depuis mai 2015 fait apparaître une tendance à la décroissance légère des impacts autour de l'usine s'interrompant à partir de juin 2017. Sur la période juin 2017 - décembre 2018, la tendance indique une augmentation légère des impacts (Figure 45). La situation de sécheresse constatée en 2017 (Rapport symptomatologique VNC, 2018 ; Figure 46) et très marquée sur la zone est à prendre en considération dans l'interprétation de ces tendances.

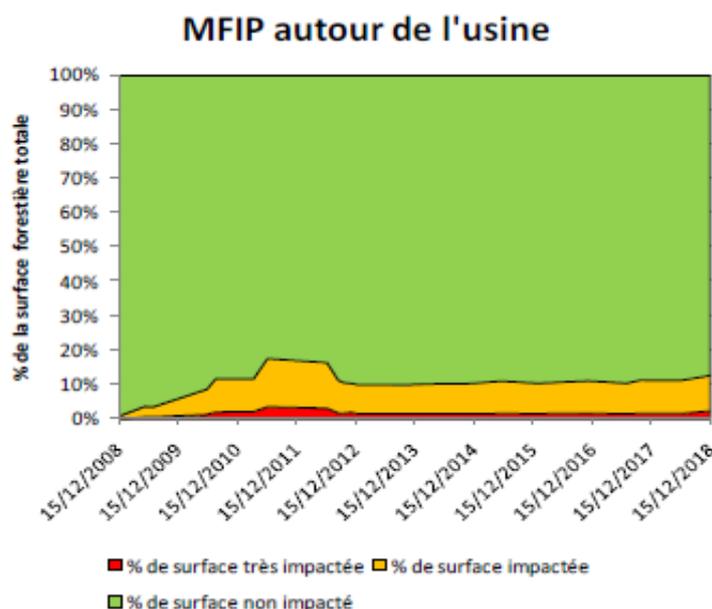


Figure 45: Evolution globale des impacts entre décembre 2008 et décembre 2018

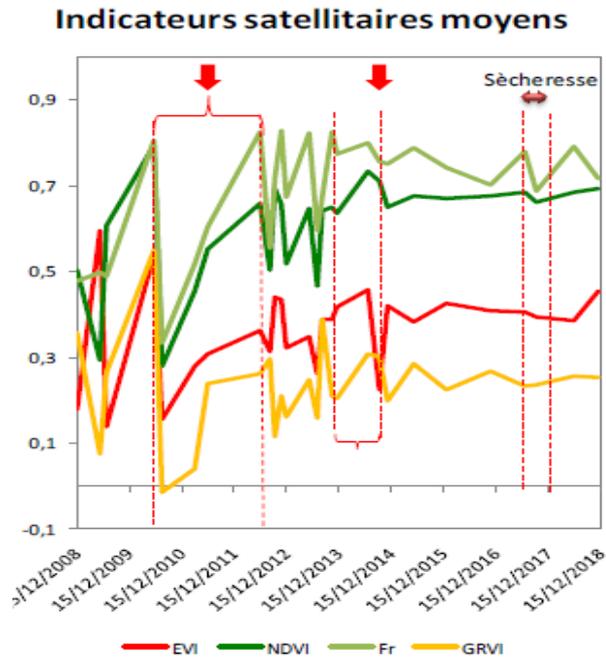


Figure 46: Indicateurs satellitaires (NDVI, EVI, GRVI et Fr) sur la période considérée

Le 02 Décembre 2018, les impacts sur les massifs forestiers autour de l'usine représentent 8,44% de la surface totale des massifs forestiers suivi cette année, respectivement 6,86% de surfaces impactées et 1,58% de surfaces très impactées (Figure 47).

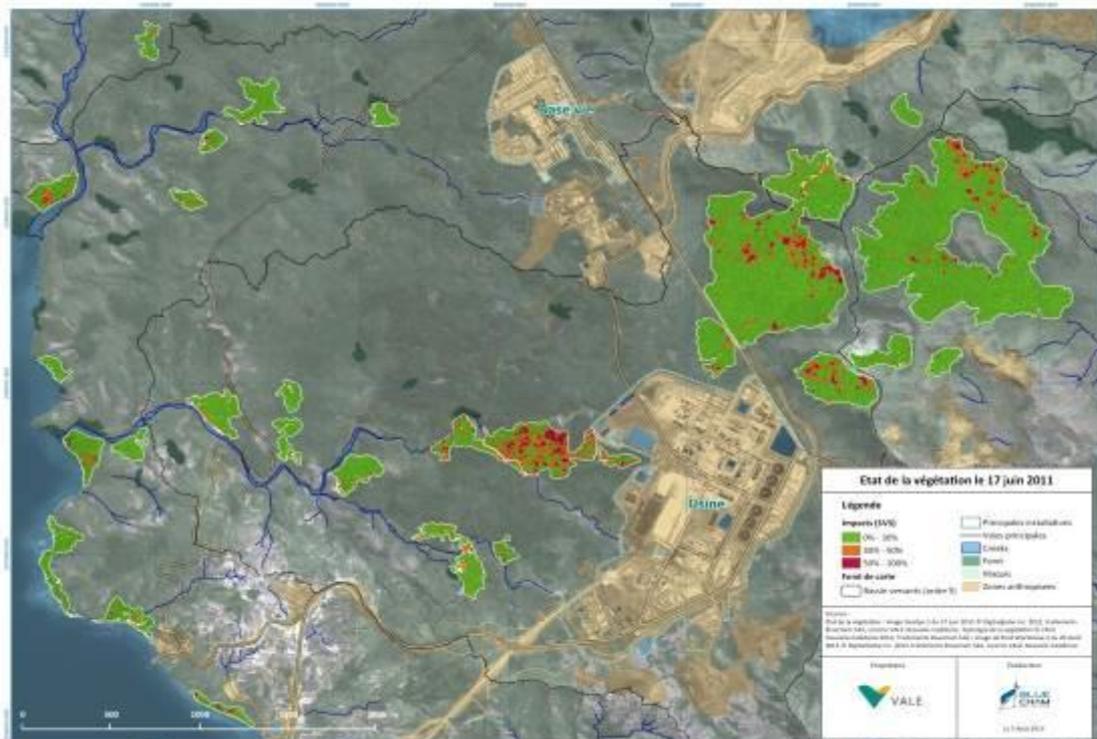


Figure 47: Etat de la végétation le 17 juin 2011. Le maximum d'impacts sur l'ensemble des massifs a été enregistré à cette date.

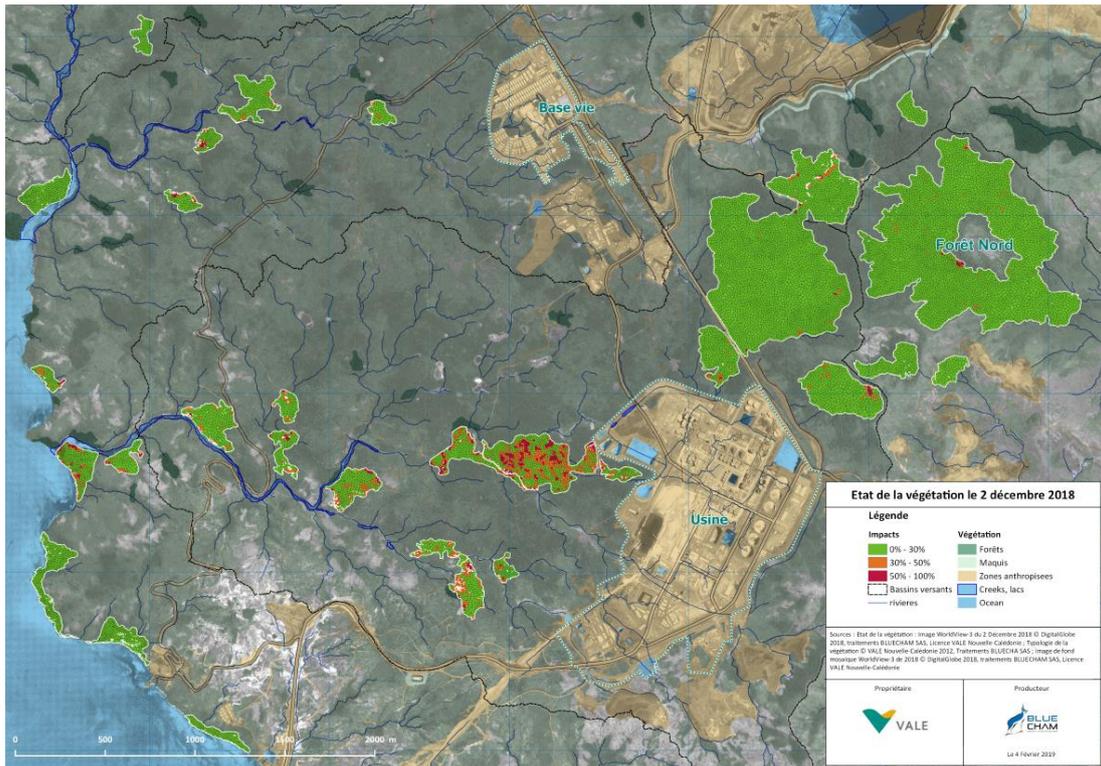


Figure 48:Etat de la végétation en décembre 2018. On observe une diminution des surfaces impactées par rapport à juin 2011.

5. Conclusion

Les suivis réalisés en 2016 et 2018 montrent que des symptômes caractéristiques d'exposition ponctuelle aigue au SO₂, faisant suite aux incidents enregistrés au cours de l'année, continuent à apparaître ou persister sur la végétation. L'interprétation des résultats d'investigations reportés dans les précédents rapports (Vale Nouvelle-Calédonie 2011 ; Murray, 2012 ; VALENC, 2013 ; VALENC 2014 ; VALENC 2015) et dans l'actuel rapport mettent en cause le dioxyde de soufre atmosphérique comme étant le facteur premier des symptômes observés sur la végétation. Une relation positive a en effet été mise en évidence entre le pourcentage d'individus avec symptômes et la teneur en SO₂ de l'air (Annexe 3). Aucun lien n'a été mis en évidence entre la teneur en soufre total du sol et le nombre d'individus avec symptômes (Annexe 20).

Entre 2016 et 2018, 13 stations d'observations sur les 22 suivies ont été impactées ponctuellement avec l'apparition de symptômes foliaires de nécroses et/ou de chloroses marginales, internervales ou apicales selon les espèces. Les suivis ont mis en évidence une nette diminution du nombre de stations avec symptômes en 2018, soit 7 stations en décembre 2018 contre 12 stations en avril 2016 (Figure 8). On constate ainsi une diminution de la zone impactée en décembre 2018 avec des stations présentant des symptômes foliaires récent entre 200 et 1300 m par rapport au complexe industriel et trois stations présentant des vieux symptômes persistants apparus avant 2018 entre 1700 et 2300 m.

On note globalement une tendance à la diminution du pourcentage d'individus avec symptômes sur la zone d'étude entre Avril 2016 et Décembre 2018 (Figure 10, Figure 11) avec une augmentation du nombre d'individus avec symptômes durant les saisons sèche de décembre 2016, décembre 2017 et décembre 2018. Il est probable que ces périodes de déficit hydrique aient participé à fragiliser la végétation et augmenté leur sensibilité au SO₂ atmosphérique lors des incidents et ainsi favorisé l'apparition de symptômes. L'augmentation du pourcentage d'individus avec symptômes en décembre 2016, 2017 et 2018 apparait lié aux incidents enregistrés précédents les différentes campagnes de suivis (Figure 11, Tableau 9). Le maximum d'impact est atteint en avril et décembre 2016 avec 17,4% d'individus présentant des symptômes caractéristiques d'une exposition au SO₂ atmosphérique sur l'ensemble de la zone d'étude. En décembre 2018, 11,7 % d'individus présentent des symptômes sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 11).

Le nombre d'espèces, le nombre d'individus avec symptômes et le degré de sévérité des symptômes diminuent avec la distance à la source de SO₂ atmosphérique. On constate une prépondérance de symptômes de type « Leger » pour chaque classe de station avec une prépondérance d'individus impactés pour les stations « Proche ». Des symptômes plus marqués ont été relevés au niveau des stations « Proche » et « moyenne ». Aucun symptôme de type « sévère » n'a été recensé sur l'ensemble de la zone d'étude. En décembre 2018, on relève 54.1 % d'individus avec symptômes pour les stations « Proche », 19,4 % pour les stations « Moyen » et 6.7 % pour les stations « Loin ».

L'analyse des résultats montre plusieurs tendances et notamment que la présence de symptômes ne semble pas influencer la floraison, la fructification, le renouvellement du feuillage ni l'occurrence d'attaques phytosanitaires des individus suivis quel que soit la distance au complexe industriel.

- Aucune différence significative n'a été mise en évidence concernant la **production d'un nouveau feuillage** des individus suivis entre les stations « proche », « moyen », « loin » impactées et les stations « témoin » (ANOVA, Figure 21). La présence de symptômes ne semble pas influencer la production d'un nouveau feuillage (Annexe 11).
- Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les stations « témoins » et les stations « Proche », « Moyen » et « Loin » impactées concernant le nombre de relevés moyen de **floraison/fructification** des individus (ANOVA, Figure 26). La présence de symptômes ne semble pas influencer la floraison et fructification des individus suivis (Annexe 12).
- Aucune différence significative n'a été mise en évidence concernant le nombre de relevés **d'attaques phytosanitaires** entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » impactées et les stations « Témoin » (ANOVA, Figure 28). La présence de symptômes ne semble pas fragiliser les individus et indirectement influencer l'occurrence d'attaques phytosanitaires (Annexe 13).
- On ne constate pas d'augmentation de la teneur en soufre foliaire avec la proximité au complexe industriel pour *Arillastrum gummiferum*. Les individus de *Garcinia neglecta* des stations « proche » impactées ont présentés une teneur moyenne en soufre foliaire significativement plus élevée que les individus des stations « Témoin ».
- L'analyse des teneurs en **soufre isotopique foliaire** ($\delta^{34}S$) d'*Arillastrum gummiferum* et *Garcinia neglecta* montre que les stations témoin ont présenté les teneurs les plus élevées.
- Aucun lien n'a pu être mis en évidence entre la teneur en soufre du sol et le nombre d'individus avec symptômes (Annexe 20).
- Aucun lien n'a été mis en évidence entre le **pH du sol** et la distance au complexe industriel (Annexe 22).
- Aucun lien n'a été mis en évidence entre la **conductivité du sol** et la distance au complexe industriel (Annexe 23).
- Aucun changement majeur de **l'état de santé des lichens** n'a été constaté entre 2016 et 2018.

6. Références bibliographiques

- Alignier A., 2010. Distribution des communautés végétales sous l'influence des lisières forestières dans des bois fragmentés. Thèse en vue de l'obtention du Doctorat de l'Université de Toulouse. INRA Toulouse UMR 1201 INPT/ENSAT DYNAFOR.
- Bell JNB. 1980. Response of plants to sulphur dioxide. *Nature* 284: 399-400.
- Bureau Veritas, 2013. Rapport de synthèse. Qualité de l'Air : Mesures des concentrations de NO₂ et de SO₂.
- Isnard, S., L'huillier, L., Rigault, F. and Jaffré, T. 2016. How did the ultramafic soils shape the flora of the New Caledonian hotspot. Plant Soil, DOI 10.1007/s11104-016-2910-5.*
- Krauss G. H., Weis E., 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annual review plant physiol. & mol. biol.* 42: 313-349
- Kuppers M., Timm H., Stegemann J., Stober R., Paliwal K., Karunaichamy K. S. T. K., Ortiz R., 1996. Effects of light environment and successional status on sunfleck use by understorey trees of temperate and tropical forests. *Tree physiology* 16: 69-80.
- Mizota C & Sasaki, A (1996) Sulphur isotope composition of soils and fertilizers: Differences between Northern and Southern Hemispheres *Geoderma* 71 77-93.
- Mujeebur Rahman Khan and Mahmud Khan, 2011. Plant response to diseases in Sulphur Dioxide Stressed Environment, Departement of plant protection, Faculty of Agricultural Sciences, Aligarh Muslim University. *Plant Pathology journal* 10 (1) 1-12.
- Murray F, Wilson S., 1987. Effects of SO₂ and HF and Their Combination on Plants of Ecological or Agricultural Importance in Australia. Department of Primary Industries and Energy, Canberra.
- Murray F., 2003. Air pollution impacts on vegetation in Australia. In: *Air pollution Impacts on crops and forests: A global assessment.* Edited by L. Emberson, M. Ashmore & F. Murray. pp.103-118. Imperial College Press, London.
- Murray F., 2004. Goro monitoring protocol. Murdoch University, Perth, Australia
- Murray F., 2011. Les enquêtes sur la cause du décès d'arbres sur un site industriel de Vale Nouvelle Calédonie: Investigations et rapport d'étape. Murdoch University, Perth, Australia
- Murray F., 2012. Investigations sur les facteurs en cause du dépérissement de la végétation dans la zone d'emprise de l'activité industrielle de Vale Nouvelle Calédonie. Murdoch University, Perth, Australia
- Scalair 2019. Rapport annuel 2018. Qualité de l'air. Prélèvement passif du SO₂.
- Soudania, K., Trautmann J., Walter J.M., 2001. Comparaison de méthodes optiques pour estimer l'ouverture de la canopée et l'indice foliaire en forêt feuillue; *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie* Volume 324, Issue 4, April 2001, Pages 381–392
- Thode, HG (1983) Chapter 1 Sulphur isotopes in nature and the environnement: An overview. 26 pages.
- Vale Nouvelle-Calédonie, 2011. Investigation sur la cause du dépérissement d'une formation végétale dominée par le chêne gomme en aval du site industriel de Vale Nouvelle-Calédonie: Rapport d'étape. Vale Nouvelle-Calédonie, Noumea.
- Vale Nouvelle-Calédonie, 2013. Suivi de l'Etat de santé de la flore des réserves forestières provinciales à proximité de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie, Bilan 2010.

Vale Nouvelle-Calédonie, 2013. Surveillance symptomologique de la flore endémique sur 27 stations d'observation situées aux alentours de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie : Bilan de Janvier 2012 à mars 2013.

Vale Nouvelle-Calédonie, 2014. Surveillance symptomologique de la flore endémique sur 27 stations d'observation situées aux alentours de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie : Bilan de Janvier 2013 à Décembre 2013.

Welles J. M., Cohen. S., 1996. Canopy structure measurement using commercial instrumentation. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 47, No. 302, pp. 1335-1342, September 1996

Winner, W.E., Bewley, J.D., Krouse, H.R. et al. (1978). Stable sulfur isotope analysis of SO₂ pollution impact on vegetation. *Oecologia* 36: 351. <https://doi.org/10.1007/BF00348061>.

Wynn, P.M., Loader, N, J., Fairchild, I,J (2013) Interrogating trees for isotopic archives of atmospheric sulphur deposition and comparison to speleothem records. *Environmental Pollution* (187) 98-105.