



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

Janvier 2016 à Décembre 2017



Vale Nouvelle-Calédonie
Mai 2018

SOMMAIRE

1.	Introduction.....	6
2.	Protocole de suivi de la zone de déperissement.....	7
2.1	Objectifs et indicateurs.....	7
2.2	Localisation des stations d'observation	9
2.3	Protocole de surveillance annuelle	12
2.4	Méthodologie du suivi quadrimestriel et du suivi annuel	13
2.4.1	Mesure de la concentration en SO ₂ de l'air	13
2.4.2	Suivi quadrimestriel des symptômes foliaires.....	13
2.4.3	Suivi annuel des symptômes foliaires	17
2.4.4	Suivi photographique de la zone d'étude	18
2.4.5	Analyses chimiques en soufre total et soufre isotopique foliaire :	19
2.4.6	Analyses chimiques annuelles des sols : S total, S isotopique, pH et conductivité.....	20
2.4.7	Suivi de l'état de santé du milieu	21
3	Résultats.....	25
3.1	Campagne d'échantillonnage passif de la concentration en SO ₂ de l'air.....	25
3.1.1	Campagnes d'échantillonnage et durée d'exposition des échantillonneurs.....	25
3.1.2	Valeurs de référence et commentaires sur les résultats des essais	26
3.1.3	Résultat des mesures de 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 des stations impactées	29
3.3.2	Caractérisation de l'impact au niveau de la zone d'étude	31
3.3.3	Caractérisation des symptômes et de leur évolution	34
3.4	Reprise de la végétation:	36
3.5	Phénologie	38
3.6	Etat phytosanitaire.....	39
3.7	Poussières/cendres	40
3.8	Analyses chimiques foliaires : Soufre total et soufre isotopique	42
3.9	Analyses chimiques de sol : Soufre, pH, conductivité.....	49
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 septembre 2017	53
4.3 Signalement de zone de dépérissement durant la saison sèche	55
5. Conclusion.....	57
6. Références bibliographiques.....	60

TABLEAUX

Tableau 1: Paramètres de suivis, fréquence de suivi et dispositif de suivi en place.....	8
Tableau 2: Descriptif des 25 stations d'observation.....	11
Tableau 3: Dispositif d'évaluation des symptômes foliaires.....	14
Tableau 4: Présentation des espèces suivies par station d'observation.....	17
Tableau 5 : Liste des sites de prélèvement par espèces pour les analyses chimiques foliaires.....	19
Tableau 6: Liste des sites de prélèvement de sol pour les analyses chimiques de sol.....	20
Tableau 7: Date de début et de fin des différentes campagnes d'échantillonnage.....	25
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.....	26
Tableau 9: Date des incidents recensés entre janvier 2016 et décembre 2017	28

FIGURES

Figure 1: Localisation des 25 stations d'observation.....	10
Figure 2: Localisation des 19 stations de suivi annuel des symptômes foliaires.....	12
Figure 3: Localisation des prises de photos panoramiques de la zone d'étude.....	18
Figure 4 : Concentration moyenne, maximale et minimale en SO ₂ de l'air par station (µg/m ³).....	27
Figure 5: Représentation spatiale des concentrations moyennes en SO ₂ de l'air mesurées entre janvier 2016 et décembre 2017.....	27
Figure 6: Profil des teneurs moyennes mensuelles (µg/m ³) relevées pour les différentes campagnes entre janvier 2016 et décembre 2017.....	28
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: Représentation spatiale des stations d'observation avec apparition de symptômes entre janvier 2016 et décembre 2017.....	30
Figure 9: Pourcentage d'individus suivis avec symptômes foliaires entre 2016 et 2017.....	32
Figure 10 : Pourcentage moyen d'individus présentant des symptômes Léger, Moyen, Fort par classe de distance.....	35
Figure 11: Evolution du pourcentage d'individus avec symptômes entre 2016 et 2017.....	36
Figure 12: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « Pourcentage moyen d'individus avec jeunes feuilles » par classe de distance.....	36
Figure 13: <i>Tristaniopsis guillainii</i> avec jeunes feuilles et symptômes marqués de chloroses – SO6.....	37
Figure 14: <i>Codia spatulata</i> avec jeunes feuilles et symptômes de chloroses marginales – SO8.....	38
Figure 15: <i>Codia Spatulata</i> avec jeunes feuilles et symptômes de nécroses internervales-PS12.....	37
Figure 16 : Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « nombre de relevé moyen de floraison/fructification » par classe de distance.....	38
Figure 17: Individu de <i>Tristaniopsis guillainii</i> avec des symptômes de chlorose marginale en floraison en aout 2017.....	38
Figure 18: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « nombre de relevé moyen d'attaques phytosanitaires » par classe de distance.....	39
Figure 19: Attaque de mouches mineuses sur <i>Garcinia neglecta</i> - SO11.....	40
Figure 20: Galles sur les parties ligneuses d' <i>Alphitonia neocaledonica</i> - SO21.....	40

Figure 21:Attaques de chenilles sur <i>Codia spatulata</i> – SO6.....	39
Figure 22:Dépôt de cendres de type « Leger » sur <i>Arillastrum gummiferum</i>	41
Figure 23:Dépôt de cendres de type « Moyen » Sur <i>Arillastrum gummiferum</i>	40
Figure 24:Brunissement superficiel du limbe lié aux dépôts de cendres sur <i>Tristaniopsis guillainii</i> , <i>Codia discolor</i> et <i>Styphelia</i> sp.....	40
Figure 25:Répartition des dépôts de cendres sur la zone d'étude entre 2016 et 2017.....	41
Figure 26:Evolution des concentrations moyennes en soufre total foliaire entre mai 2012 et décembre 2016.....	42
Figure 27: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « teneur moyenne en soufre total foliaire d' <i>Arillastrum gummiferum</i> » par classe de distance.....	43
Figure 28:Concentration en soufre foliaire d' <i>Arillastrum gummiferum</i> par station en décembre 2016	43
Figure 29: Cartographie des teneurs en soufre total foliaire d' <i>Arillastrum gummiferum</i> de décembre 2016.....	44
Figure 30:Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « teneur en soufre isotopique d' <i>Arillastrum gummiferum</i> » par classe de distance.....	45
Figure 31:Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « teneur en soufre total foliaire de <i>Garcinia neglecta</i> » par classe de distance.....	46
Figure 32:Concentration en soufre total foliaire de <i>Garcinia neglecta</i> par station en décembre 2016	46
Figure 33:Cartographie des teneurs en soufre total foliaire de <i>Garcinia neglecta</i> en décembre 2016.....	47
Figure 34:Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « teneur en soufre foliaire isotopique de <i>Garcinia neglecta</i> » par classe de distance.....	48
Figure 35:Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « teneur en soufre total du sol » par classe de distance.....	49
Figure 36: Cartographie de la teneur en soufre total des sols en décembre 2016.....	49
Figure 37:Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « pH du sol » par classe de distance.....	50
Figure 38:Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « conductivité du sol » par classe de distance.....	51
Figure 39: Illustration d'une colonie de Lichens en avril 2016 et en décembre 2017- SO5.....	51
Figure 40: Localisation des 27 massifs forestiers d'intérêt prioritaire autour de l'usine de VALE NC..	52

Figure 41: Evolution globale des impacts entre décembre 2008 et novembre 2016.....	53
Figure 42: Etat de la végétation le 17 juin 2011.....	54
Figure 43: Etat de la végétation en septembre 2017.....	54
Figure 44: Détection d'un jaunissement de la végétation par image satellite en septembre 2017.....	55
Figure 45: Dépérissement de <i>Gymnostoma deplancheanum</i> à COFREMI en octobre 2017.....	57
Figure 46: Dépérissement de chênes gommés au niveau des plantations de la Netcha en octobre 2017.....	57
Figure 47: Phénomène de dépérissement au niveau de la plaine Paillard en Novembre 2017 : <i>Codia discolor</i> , <i>Grevillea</i> sp., <i>Styphelia</i> sp.....	56
Figure 48: Phénomène de dépérissement au niveau du deversoir en novembre 2017 : <i>Codia nitida</i> , <i>Hibbertia</i> sp., <i>Montrouziera sphaeroidea</i> , <i>Solmsia callophylla</i> , <i>Tristaniopsis glauca</i> , <i>Amyema scadens</i>	56

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, 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 montrés que des symptômes caractéristiques d'une exposition aigue au SO₂, faisant suite aux incidents enregistrés au cours de l'année, continuent d'apparaître au niveau de la zone de dépérissement. La zone impactée reste localisée au secteur identifié depuis 2012 et se situe entre 200 et 2750 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 2017, 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. 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 totale 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.

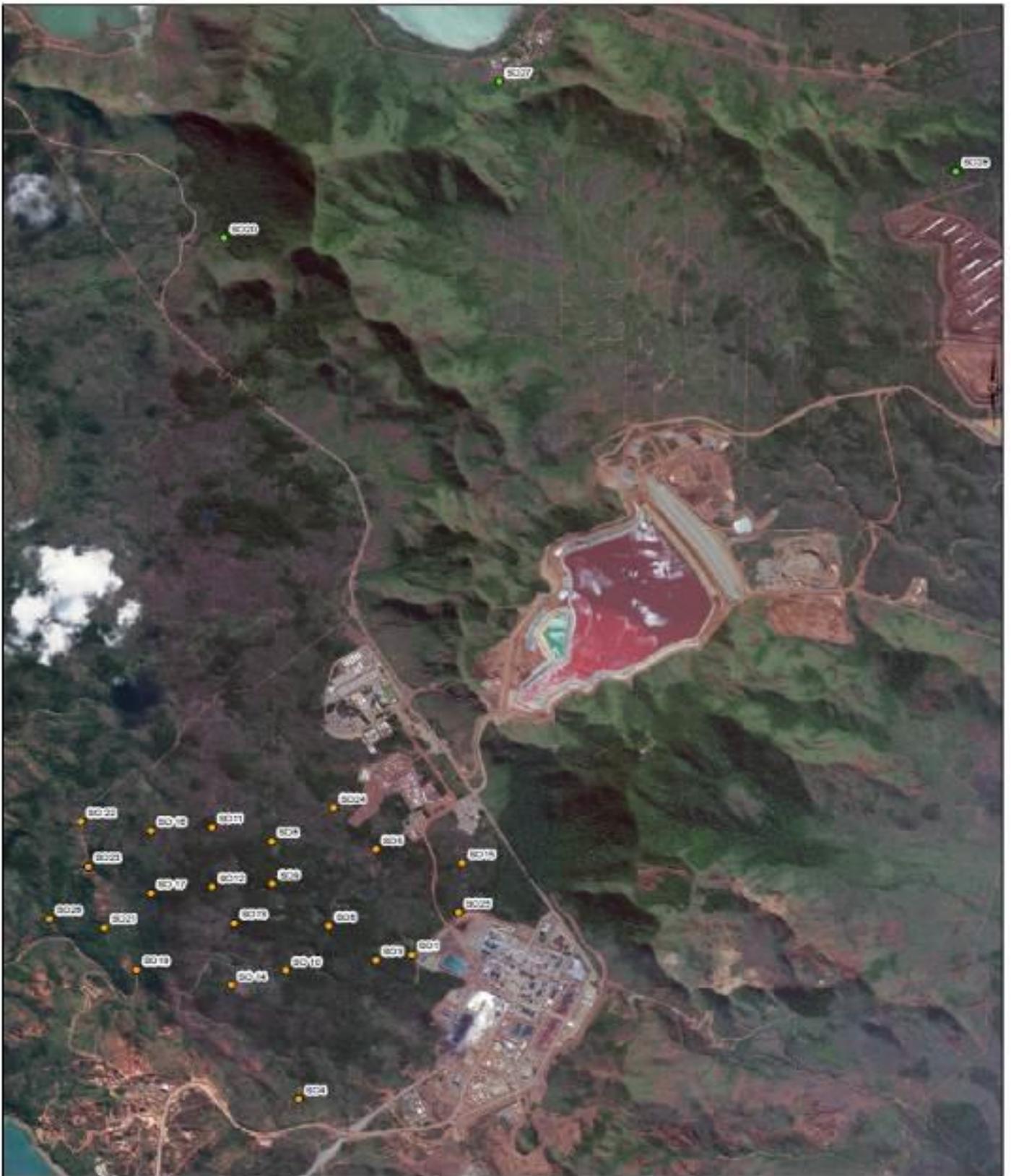
Évaluation de l'état de santé du milieu	Paramètres suivis	Fréquence de suivi	Dispositif de suivi
Suivi symptomologique de la végétation	Symptômes foliaires Qualitatif : Chlorose, Necrose et degré sévérité Quantitatif : Nombre d'individus	Quadrimestrielle	25 stations - 3 espèces, 12 individus par station
			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
Etat phytosanitaire	Champignon, cochenille, mouche mineuse, chenille, pique, Kyste: Qualitatif : Rien, Leger, moyen, Fort Quantitatif : Nombre d'individus	Quadrimestrielle	25 stations - 3 espèces, 12 individus par station
Etat 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 indépendants des effets des émissions atmosphériques (sécheresse, pathogènes...).

Des formations végétales communes des zones de cuirasses en aval de l'usine telles que les faciès 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 lemons	Suivi symptomologique quadrimestriel	

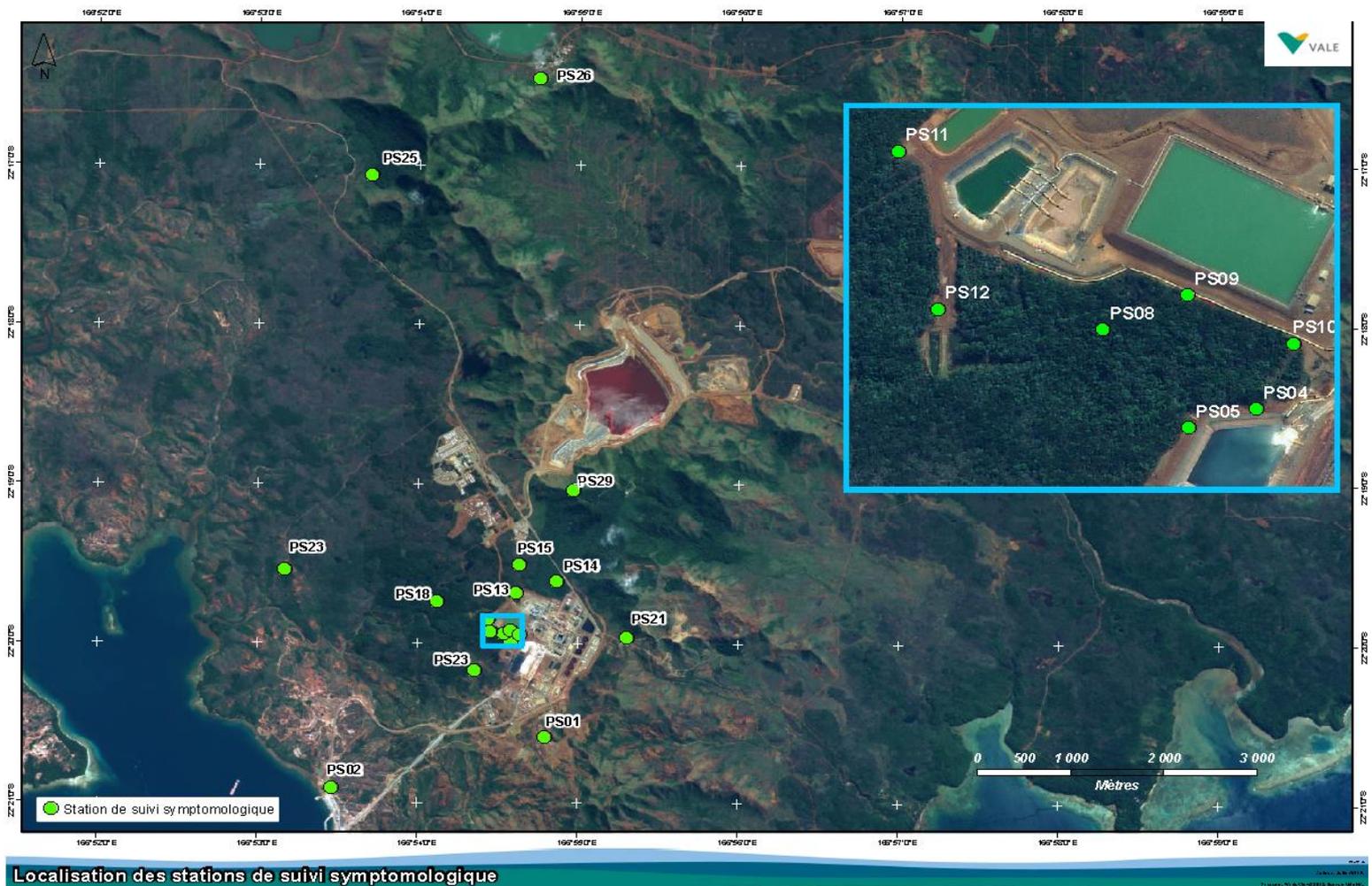
Figure 1: Localisation des 25 stations d'observation.

ID	Nom station	X	Y	Distance au complexe industriel (m)	Classe de station	Orientations 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 selon la même orientation au même emplacement à chaque suivi quadrimestriel (Figure 3, Annexe 35, Annexe 36). 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, S isotopique, 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, le soufre isotopique 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	S isotopique
		EC	mg/Kg	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)
SO1	x	x	x	x
SO3	x	x	x	x
SO4	x	x	x	x
SO5	x	x	x	x
SO6	x	x	x	
SO8	x	x	x	
SO9	x	x	x	
SO10	x	x	x	
SO11	x	x	x	x
SO12	x	x	x	x
SO13	x	x	x	
SO14	x	x	x	x
SO15	x	x	x	x
SO16	x	x	x	
SO17	x	x	x	
SO19	x	x	x	x
SO20	x	x	x	x
SO21	x	x	x	
SO22	x	x	x	x
SO23	x	x	x	x
SO24	x	x	x	x
SO25	x	x	x	
SO26	x	x	x	x
SO27	x	x	x	
SO28	x	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/arbrustes, recrutement de quelques plantules au sol.

Modérée : Jeunes pousses visibles à hauteur d'homme sur 20% des arbres/arbrustes, 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 relatifs 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 relatifs 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 34). 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 34).

❖ **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

Vingt-quatre campagnes de prélèvement mensuel par tubes passifs ont été réalisées entre le 29 décembre 2016 et le 02 janvier 2018. Le Tableau 7 présente la durée d'exposition des échantillonneurs durant les 24 campagnes d'échantillonnages de 2016 et de 2017 :

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	2/05	02/06
	Juin	02/06	04/07
	Juillet	4/07	01/08
	Août	1/08	05/09
	Septembre	5/09	02/10
	Octobre	2/10	9/11
	Novembre	9/11	20/12
	Décembre	20/12	12/01
2017	Janvier	12-janv	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	1/08	07/09
	Septembre	07/09	04/10
	Octobre	04/10	03/11
	Novembre	03/11	04/12
	Décembre	04/12	02/01

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

La durée d'exposition des échantillonneurs a été ajustée au fur et à mesure des différentes campagnes afin de rester dans les spécifications du laboratoire (durée d'exposition et gammes de mesures) tout en essayant d'avoir un taux de couverture temporel maximum (Bureau Veritas, 2012). A compter de 2018, la campagne d'échantillonnage sera menée par SCALAIR.

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 d'autorisation sur les installations classées pour la protection de l'environnement imposant une surveillance de la qualité de l'air par le biais d'un réseau de stations de mesures en continues. Cet arrêté définit les valeurs de références qui lui sont applicables. Le Tableau 8 présente ces valeurs de références :

	Dioxyde de soufre (SO ₂)
Objectif de qualité	Moyenne annuelle : 50 µg/m ³
Seuil de recommandation et d'information	Moyenne horaire : 300 µg/m ³
Seuil d'alerte	Moyenne horaire : 500 µg/m ³ (3 heures consécutives)
Valeurs limites pour la protection de la santé humaine	- Centile 99,7 : 350 µg/m ³ moyenne horaire. - Centile 99,2 : 125 µg/m ³ moyenne journalière.
Valeurs limites pour la protection de la végétation /des écosystèmes	-Centile 99,9 : 570 µg/m ³ moyenne horaire. - Moyenne horaire : 230 µg/m ³ . - Moyenne annuelle : 20 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

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). Néanmoins, les résultats des mesures qui font l'objet de ce rapport sont comparés à titre indicatif aux valeurs de références issues de l'arrêté.

3.1.3 Résultat des mesures de SO₂ de l'air

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

Les mesures par échantillonnage passif permettent de connaître les valeurs moyennes, maximales et minimales des concentrations en SO₂ de l'air relevées au niveau de 10 stations entre janvier 2016 et décembre 2017.

Les résultats montrent que les points d'échantillonnage ayant présenté les teneurs moyennes maximales et les teneurs mensuelles maximales les plus élevées sont les points SO1 (PS11) et PS 10 ainsi que les points SO18 (PS17), SO25 (PS13) (Figure 4, Annexe 2). Ces stations d'observation présentent des teneurs en SO₂ atmosphérique moyenne plus élevées que les autres stations de suivi.

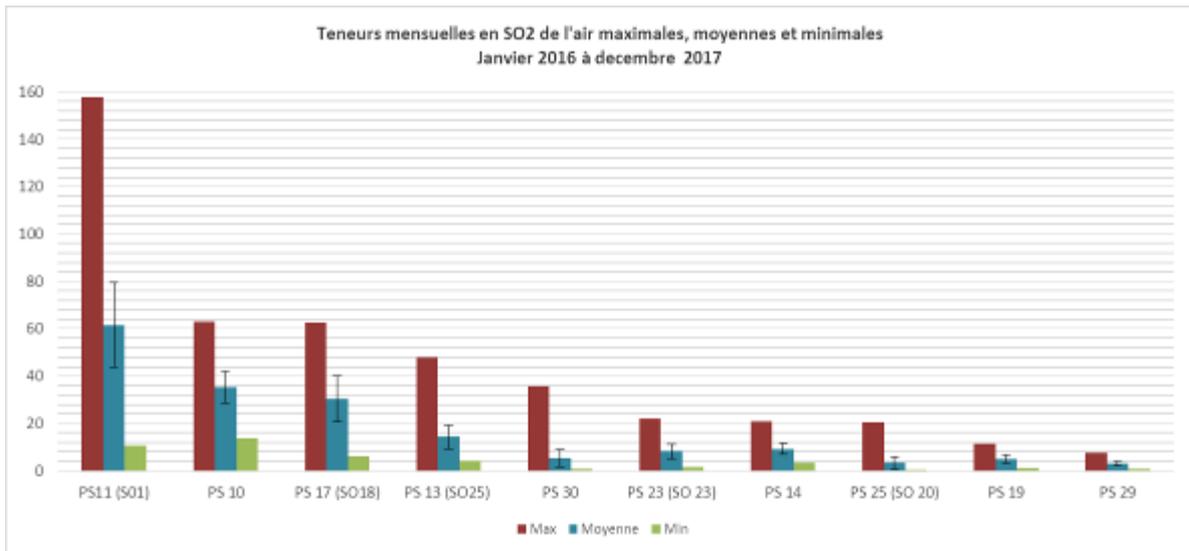


Figure 4 : Concentration moyenne, maximale et minimale en SO2 de l'air par station (µg/m3). Moyenne de janvier 2016 à Décembre 2017.

La représentation spatiale des teneurs moyennes en SO2 de l'air montre que ces points d'échantillonnage sont positionnés sous le vent et au plus près de l'usine entre 200 (Figure 5). Ces résultats confortent les résultats obtenus depuis 2012 (VALE NC, 2012 ; VALE NC, 2013 ; VALE NC, 2014 ; VALE NC, 2015). La teneur mensuelle maximale de 157.7 µg/m3 a été enregistrée par l'échantillonneur SO1 (PS11) en mai 2017.



Concentration moyenne mensuelle mesurées entre janvier 2016 et decembre 2017

Figure 5: Représentation spatiale des concentrations moyennes en SO2 de l'air mesurées entre janvier 2016 et décembre 2017.

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

Les campagnes de février-Avril 2016, août 2016 à mars 2017, mai 2017 et septembre à décembre 2017 ont donné lieu aux mesures des concentrations les plus importantes. Les concentrations maximales mesurées ont été de 157.7 µg/m³, 62.8 µg/m³ et 62.5 µg/m³ pour les points d'échantillonnage S01 (PS11), PS10 et PS17 (SO06) durant respectivement les campagnes des mois de mai 2017, février 2016 et janvier 2017 (Figure 6, Annexe 2). Les concentrations les plus basses ont quant à elles été enregistrées entre mai et juillet 2016 et entre juin et septembre 2017.

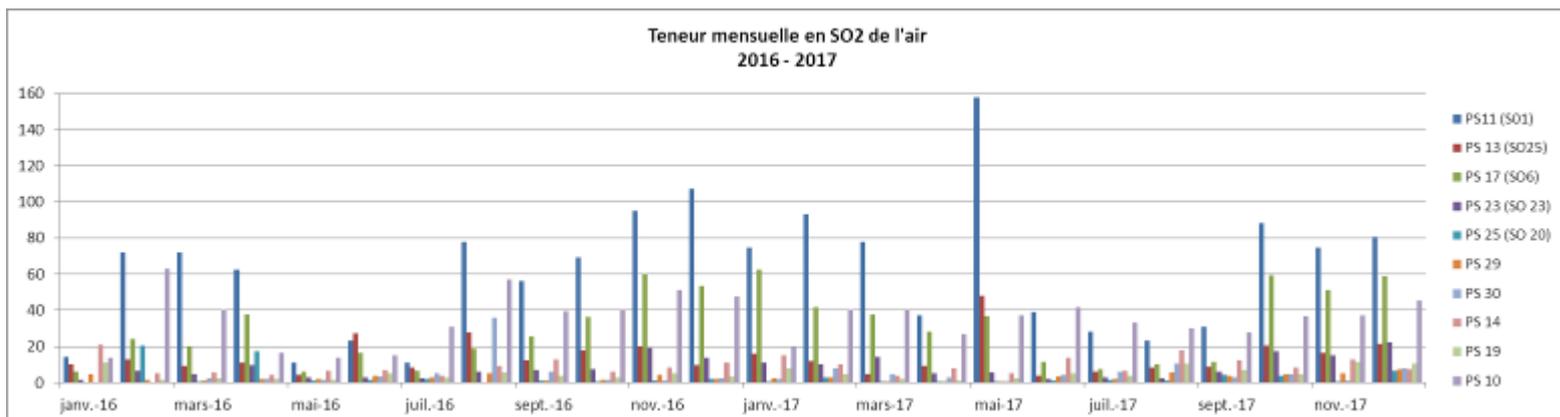


Figure 6: Profil des teneurs moyennes mensuelles (µg/m³) relevées pour les différentes campagnes entre janvier 2016 et décembre 2017.

3.2 Activité du site et incidents

Les campagnes de Février-Avril 2016, août 2016 à mars 2017, mai 2017 et septembre à décembre 2017 ont donné 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 eu 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.

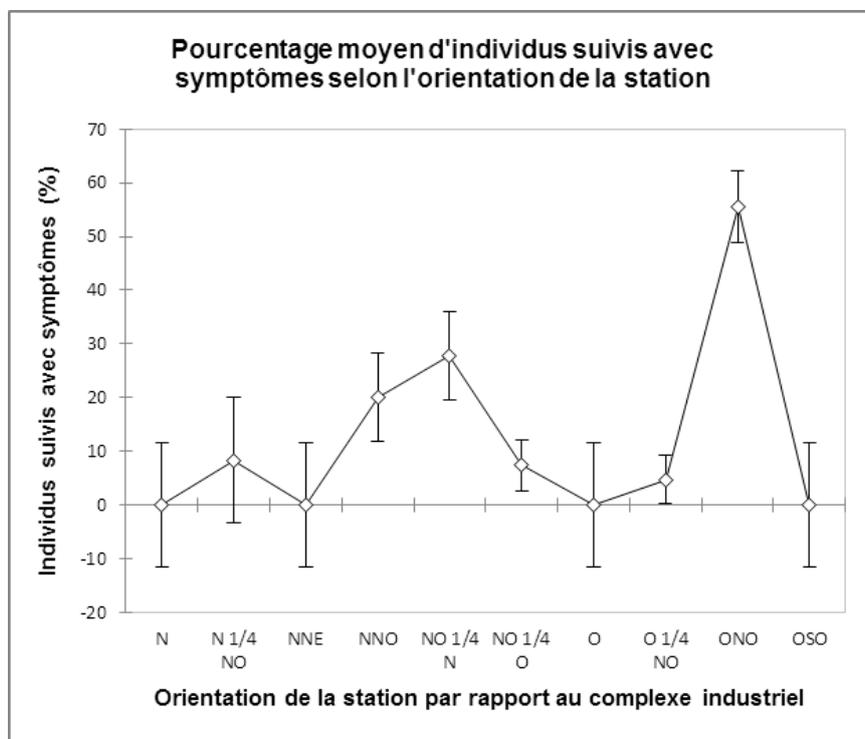
Incidents complexe industriel		
08/03/2016	330	Départ de feu au niveau de la chute d'alimentation entre le convoyeur CVB-101 et la cuve TNK-101 -330
25/04/2016	330	Incendie au stockage soufre
05/06/2016		Incident fuite autoclave n°3 avec un dégagement de vapeur et de pulpe lixivifiée.
01/09/2016 au 03/09/2016	330	Les moyennes horaires restent modérées (<570µg/m ³) mais la moyenne journalière est en augmentation et a atteint la limites pour la protection des écosystèmes (230µg/m ³).
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 - 545
16/04/2017	545	Départ de feu
24/04/2017		Incident Bruleur centrale
11/05/2017	330	Départ de feu au niveau de la cuve de soufre 330TNK102
16/06/2017	545	Départ de feu
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

Tableau 9: Date des incidents recensés entre janvier 2016 et décembre 2017.

3.3 Suivi des symptômes foliaires

3.3.1 Localisation des stations impactées

Les suivis symptomologique quadrimestriels et annuels réalisés en 2016 et 2017 ont montré que 18 stations d'observations sur les 39 suivies ont été impactées ponctuellement avec l'apparition de symptômes foliaires de chloroses et/ou nécroses sur au moins une espèce indicatrice suivie. Ces stations sont situées entre 600 et 3000 m du complexe industriel sous l'influence des vents dominants (Figure 8). Les stations ayant présenté le pourcentage moyen d'individus impactés le plus élevé entre 2016 et 2017 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 8).



R ²	0,601
F	23,424
Pr > F	< 0,0001
Observations	150,000

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 et 2017).

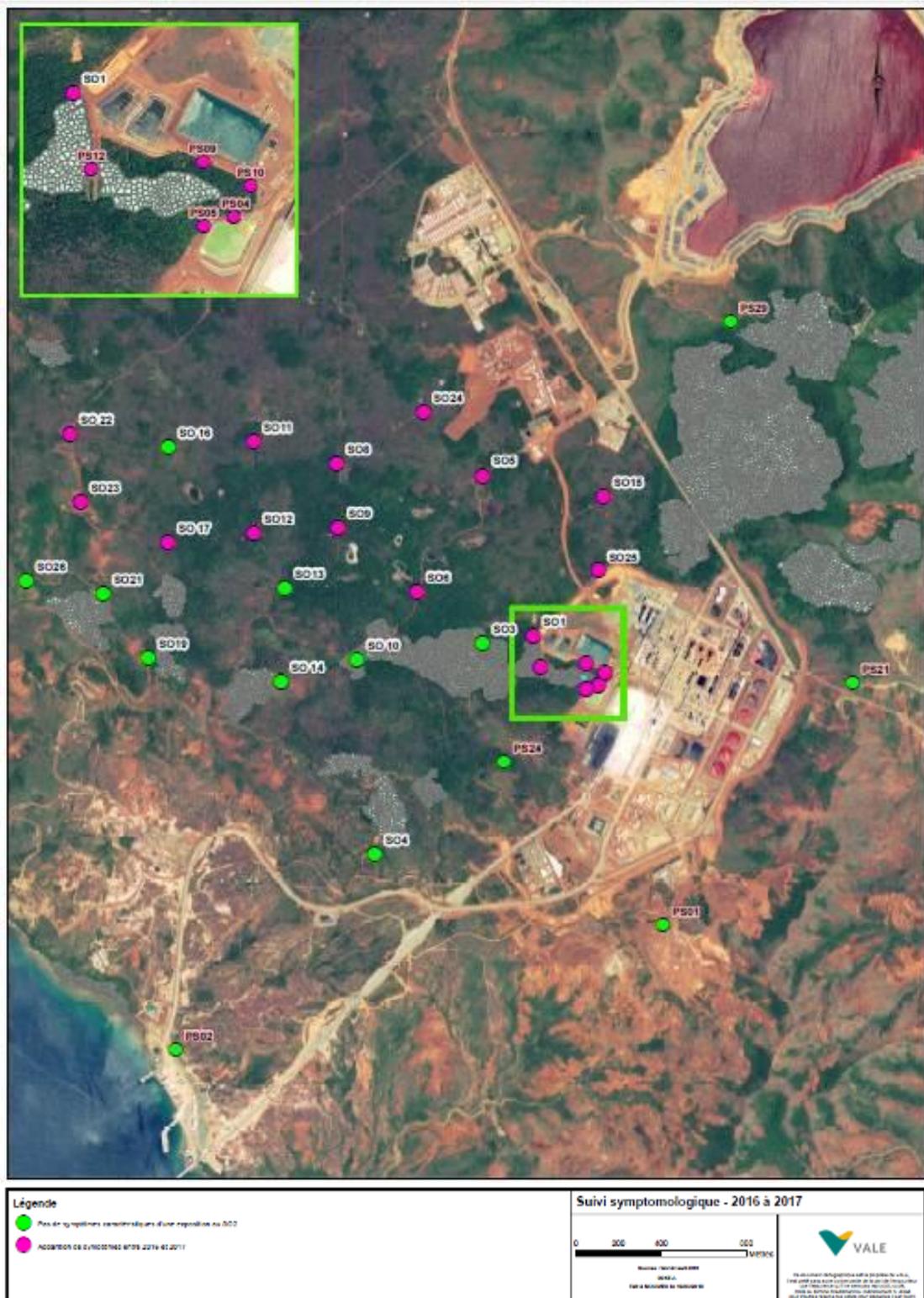


Figure 8: Représentation spatiale des stations d'observation avec apparition de symptômes entre janvier 2016 et décembre 2017. La cartographie intègre les stations du suivi quadrimestriel et du suivi annuel.

3.3.2 Caractérisation de l'impact au niveau de la zone d'étude

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

Six espèces sur les dix espèces indicatrices suivies sur l'ensemble des stations ont présenté des symptômes apparus entre janvier 2016 et décembre 2017 (Annexe 4, Annexe 5, Annexe 6). L'analyse par classe de stations selon la distance au complexe industriel, montre que le nombre d'espèces et le nombre d'individus impactés diminuent avec la distance à la source de SO₂ atmosphérique (Annexe 4, Annexe 5, Annexe 6). Les suivis quadrimestriels et annuels réalisés entre 2016 et 2017 sur les stations « Proche », soit situées entre 200 et 800 m par rapport à la source d'émissions, ont mis en évidence que cinq espèces ont présenté des symptômes contre trois espèces pour les stations impactées les plus éloignées soit située à 3000 m (Annexe 4, Annexe 5, Annexe 6). Le pourcentage moyen d'individus impactés entre 2016 et 2017 au niveau des stations « Proche » (36.5%) apparaît significativement plus élevé qu'au niveau des stations « Moyen » (16%) et « Loin » (7.8%) (Annexe 7 - ANOVA, $p < 0,0001$; Annexe 8 - Test de Tukey, $p < 0,0001$).

La station SO6, la station SO1 et la station SO25 sont apparues comme les plus impactées avec respectivement 81, 69 et 40 % d'individus présentant des symptômes en moyenne entre 2016 et 2017 (Figure 9, Annexe 9). La station SO1 a présenté le maximum d'impact en 2016 avec 92 % d'individus présentant des symptômes (Annexe 9).

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 2017 (Annexe 5). *Arillastrum gummiferum*, *Gymnostoma deplancheanum* et *Guioa glauca* n'ont pas présenté de symptômes caractéristiques d'une exposition au SO₂ atmosphérique entre 2016 et 2017 (Tableau 13, Annexe 5, Annexe 6).

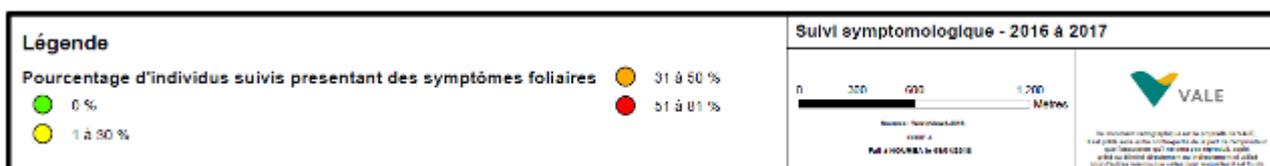


Figure 9: Pourcentage d'individus suivis avec symptômes foliaires entre 2016 et 2017.

Quatre cas de mortalité ont été constatés sur les 730 individus suivis dans le cadre du protocole de suivi quadrimestriel et annuel (Annexe 10). Les espèces et les sites associés sont les suivants :

- *Arillastrum gummiferum* – SO19 : Avril 2017
- *Alphitonia neocaledonica* – PS01 : Décembre 2016
- *Gymnostoma deplancheanum*-PS10 : Décembre 2016
- *Garcinia neglecta* - PS05 : Décembre 2017

Les cas de mortalité relevés au niveau de PS01 et SO19 ne semblent pas liés à un impact du SO₂ atmosphérique car ils ont été recensés au niveau de stations situées hors emprise de l'axe préférentiel des vents dominants et d'apparition de symptômes identifié (Figure 7). L'évaluation des symptômes foliaires au niveau de ces stations n'a, en effet, révélé aucuns symptômes caractéristiques d'une exposition au SO₂ atmosphérique entre 2016 et 2017 (Annexe 5, Annexe 6, Annexe 10).

Les deux autres cas de mortalité ont quant à eux été enregistrés sur PS10 et PS05 en décembre durant la saison sèche lors de périodes d'important déficit pluviométrique suggérant un probable stress hydrique des individus. De nombreux cas de mortalité hors zone d'influence du complexe industriel ont par ailleurs été enregistrés durant cette période (Paragraphe 4.3).

3.3.3 Caractérisation des symptômes et de leur évolution

Les symptômes relevés entre 2016 et 2017 sont apparus sous forme de nécroses et/ou de chloroses marginales, internervales ou apicales selon les espèces :

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

- **Nécroses internervale :**



PS12 – *Codia spatulata*



SO1 – *Alphitonia neocaledonica*

- **Nécroses apicales :**



SO25 – *Styphelia* sp.



SO1 – *Garcinia neglecta*

- **Chloroses marginales ou internervales :**



SO6 – *Tristaniopsis guillainii*



SO11 – *Codia spatulata*

L'évaluation du degré de sévérité des symptômes par classe de station a mis en évidence une prépondérance de symptômes de type « Léger » pour chaque classe de station 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).

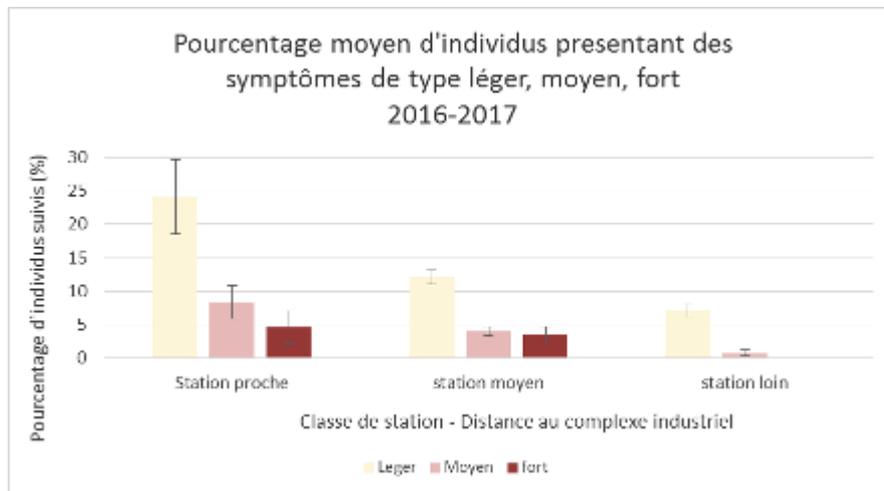


Figure 10 : Pourcentage moyen d'individus présentant des symptômes Léger, Moyen, Fort par classe de distance.

On note une fluctuation du pourcentage d'individus avec symptômes sur la zone d'étude entre Avril 2016 et Décembre 2017 (Figure 11). Globalement, on constate une tendance à la diminution du pourcentage d'individus avec symptômes entre avril 2016 et aout 2017 avec respectivement 17.4% d'individus avec symptômes en avril 2016 et 13.6 % d'individus avec symptômes en aout 2017. Le maximum d'impact est atteint entre avril et décembre 2016 avec 17,4% d'individus impactés. L'analyse de la figure 11 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 en décembre 2017. Il est probable que ces périodes de déficit hydrique aient fragilisé la végétation, augmenté leur sensibilité au SO₂ atmosphérique et ainsi favorisé l'apparition de symptômes (Paragraphe 4.3). 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). En décembre 2017, 17,04 % d'individus sur l'ensemble de la zone d'étude présentent des symptômes (Figure 11).

L'analyse par classe de station montre que l'augmentation du degré de sévérité des symptômes, notamment des symptômes de type « Fort » en décembre 2017, concerne les stations « Proche » et « Moyen » (Annexe 11).

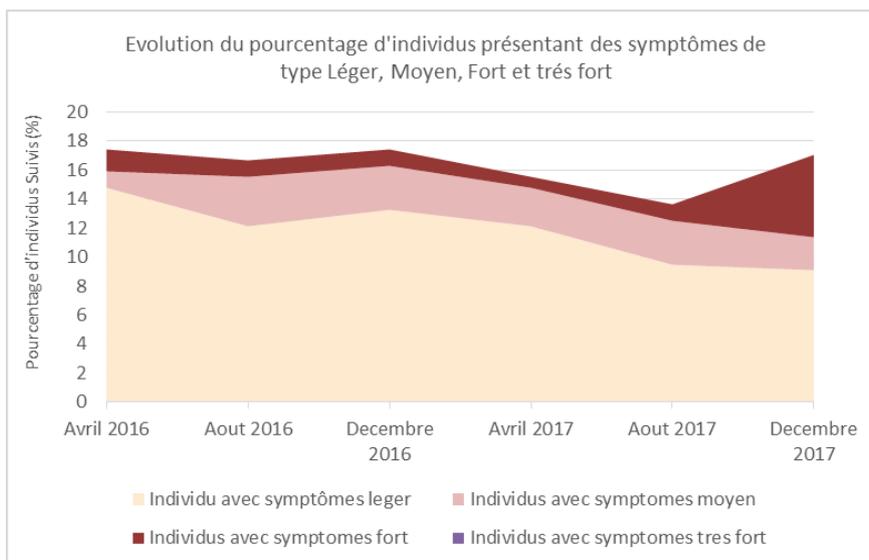


Figure 11: Evolution du pourcentage d'individus avec symptômes entre 2016 et 2017.

3.4 Reprise de la végétation:

Aucune différence significative n'a été mise en évidence concernant la reprise des individus entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » et « Témoin » (Figure 12 – ANOVA $p > 0,0001$; Annexe 12 – Test de Tukey, $p < 0,0001$). Le pourcentage moyen d'individus suivis ayant produit de nouvelles jeunes feuilles est de 42 % pour les stations proche contre 49 % pour les stations témoins (Figure 12 ; Annexe 12, Annexe 18).

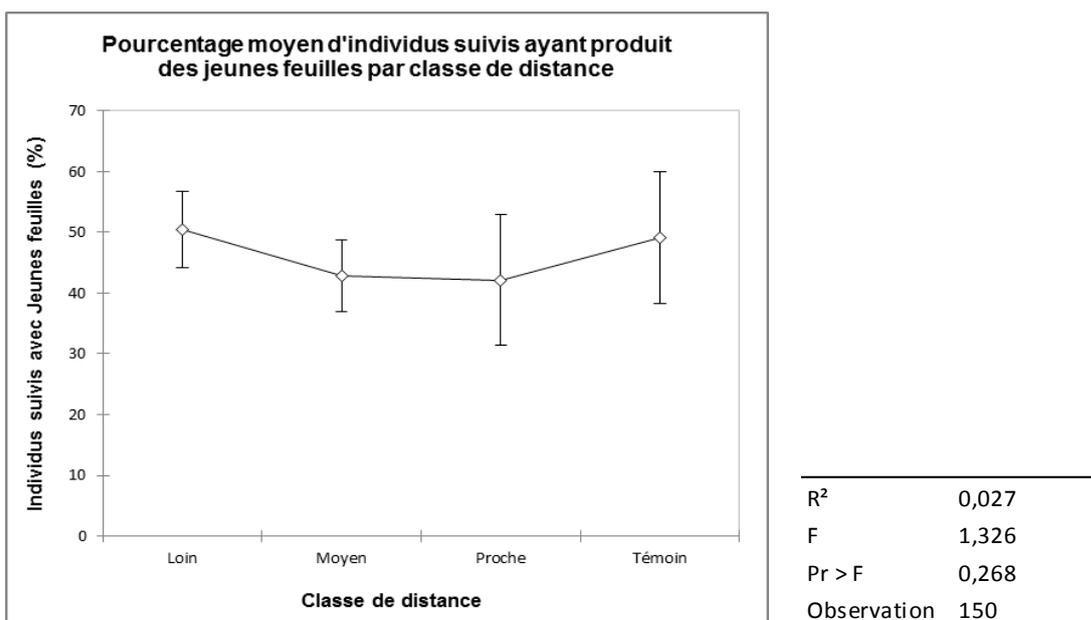


Figure 12: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « Pourcentage moyen d'individus avec jeunes feuilles » par classe de distance.

Aucun lien n'a pu être mis en évidence entre le nombre d'individus avec symptômes et le nombre d'individus présentant des jeunes feuilles (Annexe 13 – Régression linéaire ; $p > 0,0001$). La présence de symptômes ne semble pas influencer la production d'un nouveau feuillage. Ce résultat conforte les observations de terrain et relevés photographiques où il a été constaté une bonne reprise des individus qui ont régulièrement produit un nouveau feuillage en bonne santé malgré l'apparition ponctuelle de symptômes foliaires et/ou la persistance de vieux symptômes foliaires sur les vieilles feuilles (Figure 13, Figure 14, Figure 15).



Figure 13:*Tristaniopsis guillainii* avec jeunes feuilles et symptômes marqués de chloroses –SO6. **Figure 14:***Codia spatulata* avec jeunes feuilles et symptômes de chloroses marginales – SO8. **Figure 15:***Codia Spatulata* avec jeunes feuilles et symptômes de nécroses internervales-PS12.

3.5 Phénologie

Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les stations « témoins » et les stations « Proche », « Moyen » et « Loin » concernant le nombre de relevés moyen de floraison/fructification des individus (Figure 16 – ANOVA ; $p > 0,0001$; Annexe 18). Seule une différence significative du nombre de relevés de floraison/fructification a été mise en évidence entre les stations « Loin » et « Proche » (Annexe 14 - Test de Tukey).

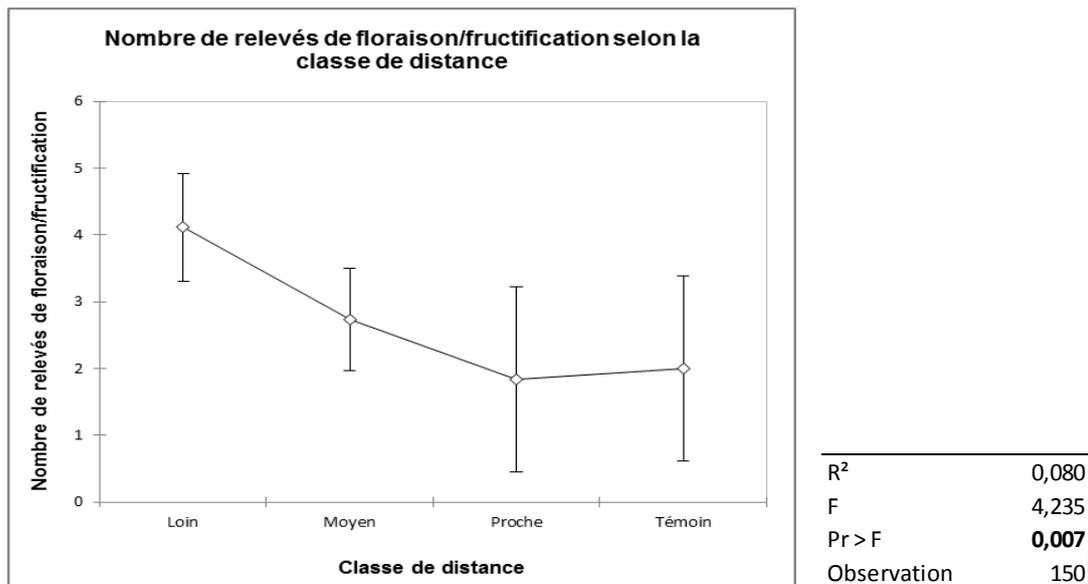


Figure 16 : Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « nombre de relevé moyen de floraison/fructification » par classe de distance.

Aucun lien n'a pu être mis en évidence entre le nombre d'individus avec symptômes et le nombre de relevés de floraison/fructification (Annexe 15 : Régression linéaire ; $p > 0,0001$). La présence de symptômes ne semble pas influencer la floraison et fructification des individus suivis (Figure 17).



Figure 17: Individu de *Tristaniopsis guillainii* avec des symptômes de chlorose marginale en floraison en août 2017.

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). 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 18 – ANOVA, $p > 0,0001$, Annexe 16 -Test de Tukey). Le nombre moyen d'attaques phytosanitaires sur les individus suivis est de 11.83 pour les stations « Proche » contre 10.6 pour les stations « Témoins » (figure 18, Annexe 16, Annexe 18).

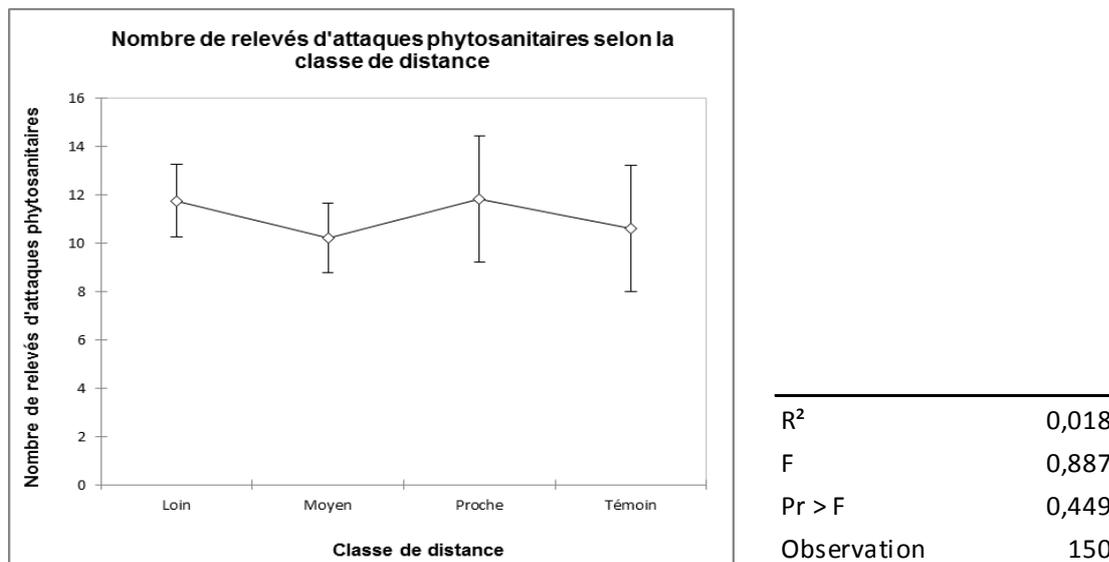


Figure 18: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « nombre de relevé moyen d'attaques phytosanitaires » par classe de distance.

Aucun lien n'a pu être mis en évidence entre le nombre d'individus avec symptômes et le nombre d'attaques phytosanitaires (Annexe 17-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 SO₂ atmosphérique.



Figure 19: Attaque de mouches mineuses sur *Garcinia neglecta* - SO11. Figure 20: Galles sur les parties ligneuses d'*Alphitonia neocaledonica* - SO21. Figure 21: Attaques de chenilles sur *Codia spatulata* - SO6.

3.7 Poussières/cendres

La présence de cendres a été relevée sur 18 stations lors des suivis réalisés entre 2016 et 2017 (Figure 25, Annexe 19). 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 22) 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. Six stations ont présenté des dépôts de type « Moyen » entre 2016 et 2017 (Figure 25) soit sous forme de petites plaques sur le limbe des feuilles (Figure 23). 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 24).



Figure 22:Dépôt de cendres de type « Leger » sur *Arillastrum gummiferum*. Figure 23:Dépôt de cendres de type « Moyen » Sur *Arillastrum gummiferum*.



Figure 24:Brunissement superficiel du limbe lié aux dépôts de cendres sur *Tristaniopsis guillainii*, *Codia discolor* et *Styphelia* sp.

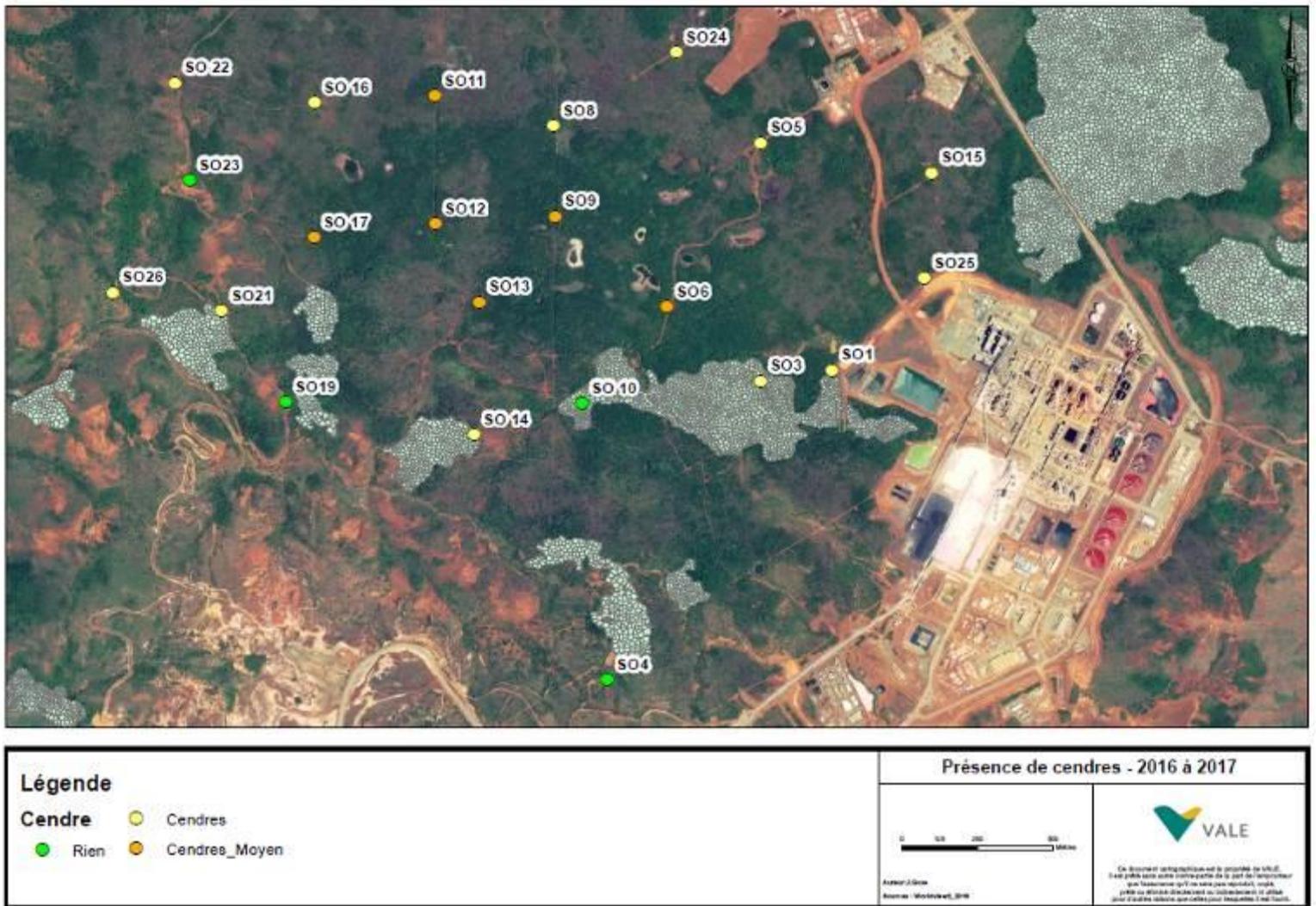


Figure 25: Répartition des dépôts de cendres sur la zone d'étude entre 2016 et 2017.

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 2016 dans le cadre de l'ancien protocole montrent que la teneur moyenne en Soufre total foliaire apparait plus élevée pour les espèces présentes sur les sites avec symptômes que sur les sites sans symptômes. On note une augmentation de la teneur moyenne en soufre foliaire des sites avec symptômes de mai 2012 à Aout 2014 puis une diminution marquée jusqu'en décembre 2016. Cette diminution est également constatée au niveau des sites témoins suggérant un phénomène d'origine naturel (Figure 26 ; Annexe 20).

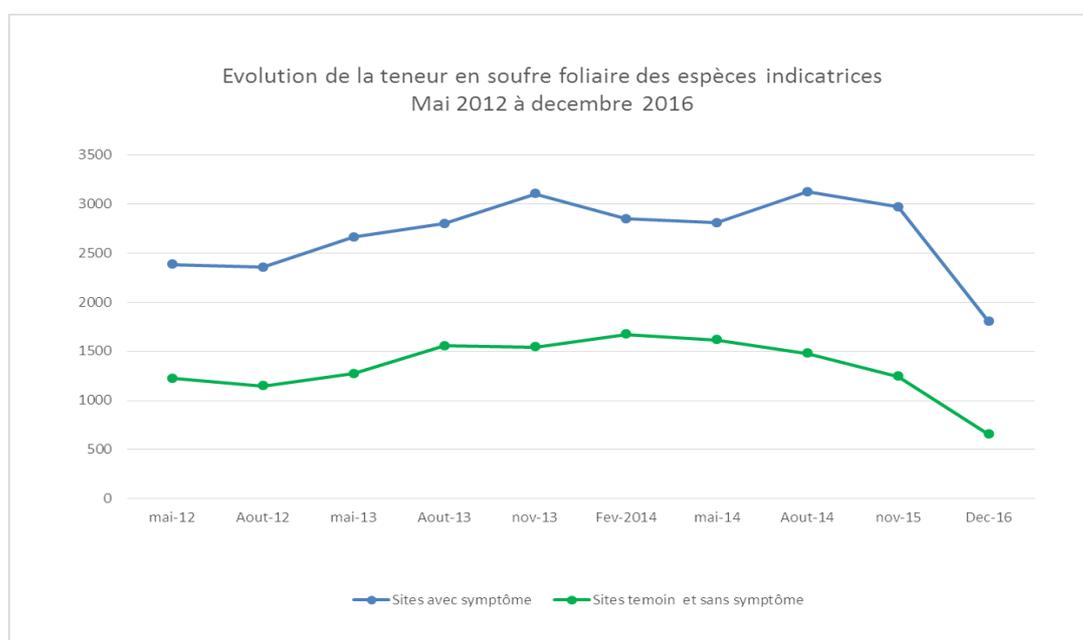


Figure 26: Evolution des concentrations moyennes en soufre total foliaire entre mai 2012 et décembre 2016. (*Alphitonia neocaledonica*, *Codia spatulata*, *Garcinia sp.*, *Montrouziera sphaeroidea* et *Styphelia sp.*)

❖ *Concentration en soufre total foliaire pour Arillastrum gummiferum*

Aucune différence significative de la teneur moyenne en soufre foliaire n'a été relevée entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » et « Témoin » (Figure 27-ANOVA : $p > 0,0001$, Annexe 22 -Test de Tukey). Les teneurs en soufre total foliaire d'*Arillastrum gummiferum* en décembre 2016 varient entre 179.6 et 562.7 mg/kg selon les stations (Annexe 21, Figure 29). Ces valeurs apparaissent relativement faible par comparaison aux teneurs moyennes mesurées dans le cadre des études de fumigation 1,2 et 4 et lors des études initiées par le professeur Frank Murray dans la zone de déprissement en 2011 (Figure 28).

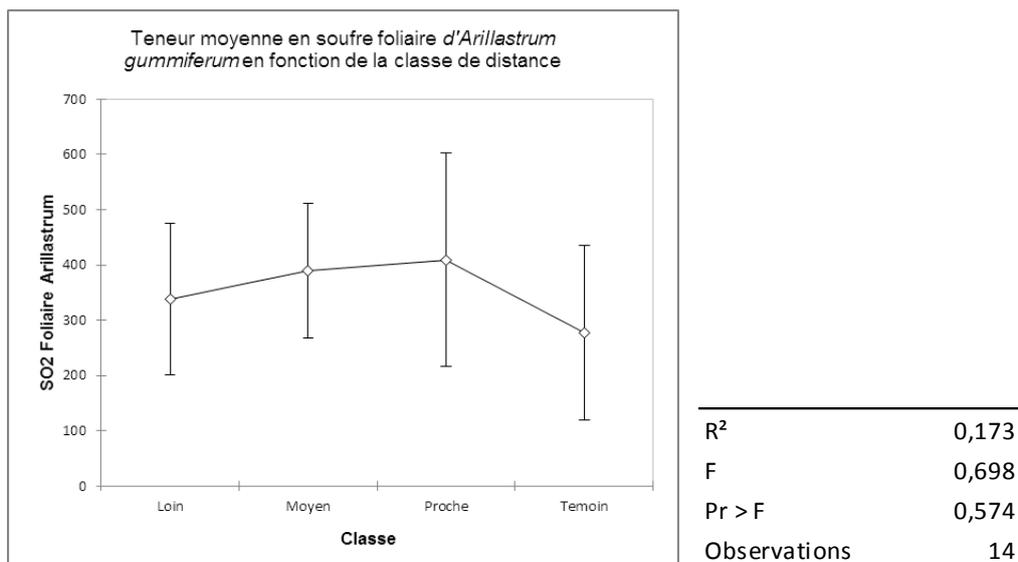


Figure 27: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « teneur moyenne en soufre total foliaire d'*Arillastrum gummiferum* » par classe de distance.

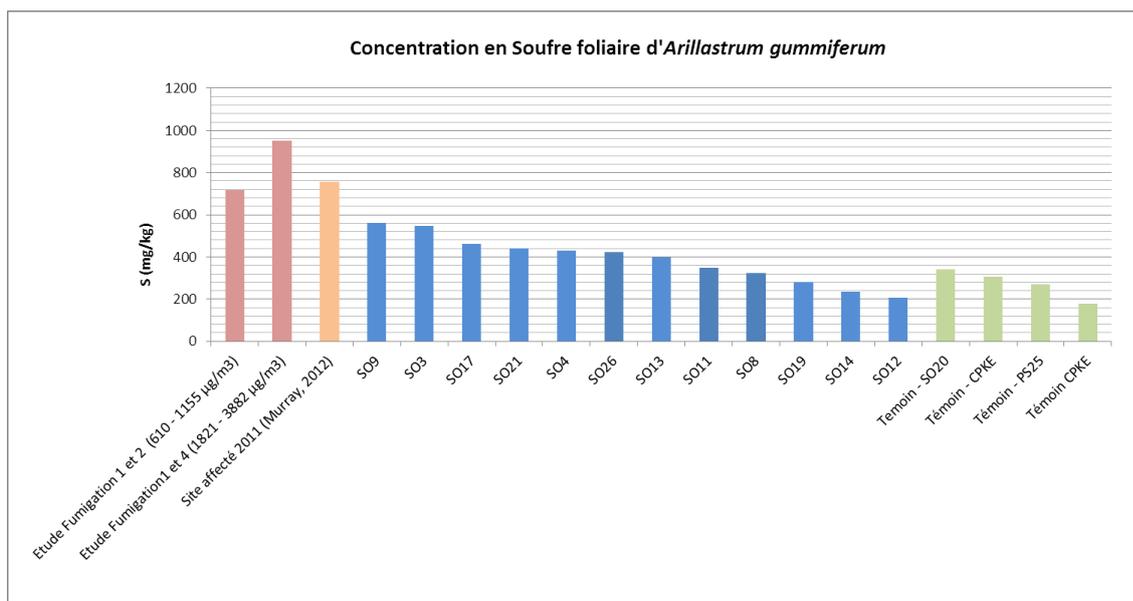


Figure 28: Concentration en soufre foliaire d'*Arillastrum gummiferum* par station en décembre 2016 comparé aux concentrations moyennes relevées lors des quatre études de fumigation et des investigations de terrain menées en 2011 par le professeur Francis Murray.



Figure 29: Cartographie des teneurs en soufre total foliaire d'*Arillastrum gummiferum* en décembre 2016.

❖ *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. Aucune différence significative de la teneur en soufre isotopique d'*Arillastrum gummiferum* n'a été mise en évidence entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » et « Témoin » (Figure 30-ANOVA : $p > 0,0001$; Annexe 24- Test Tukey). On constate à l'inverse une tendance à l'augmentation du soufre isotopique par rapport à la distance au complexe industriel (Figure 30). Cette augmentation sur les stations les plus proches de Prony peut être liée à l'influence des embruns marin avec des teneurs de l'ordre de +21‰ en soufre isotopiques (Winner et al, 1978 ; Wynn et al, 2014). Les valeurs en soufre isotopique foliaire d'*Arillastrum gummiferum* apparaissent très faibles et varient entre 2.77 et 8.2 dont 6.61 pour le site témoin (Annexe 23).

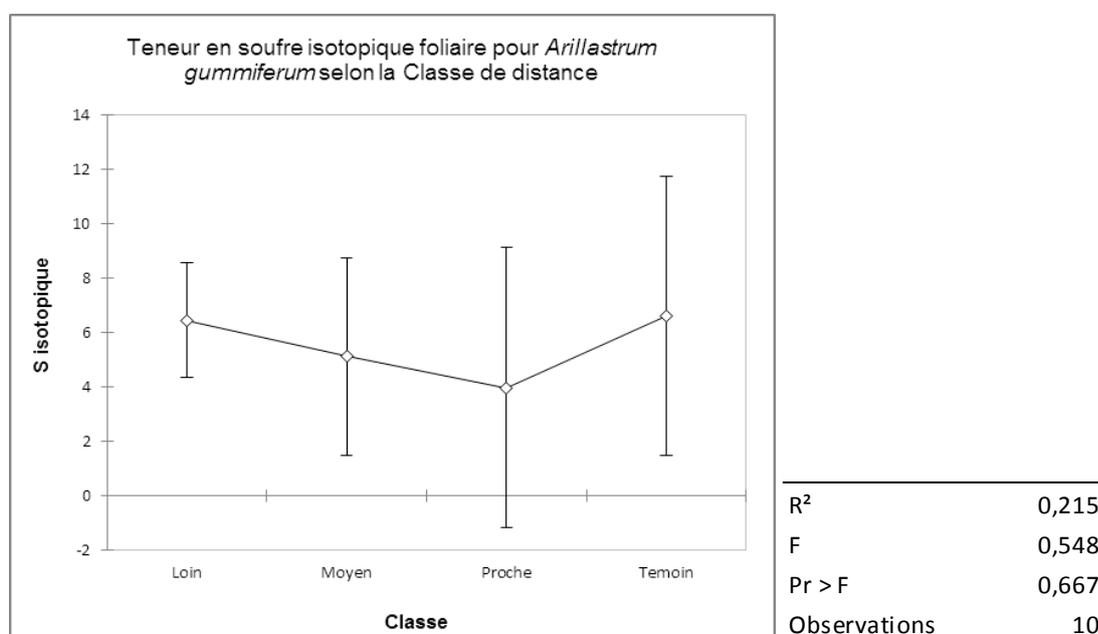


Figure 30: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « teneur en soufre isotopique $\delta^{34}\text{S}$ (‰) d'*Arillastrum gummiferum* » par classe de distance.

❖ *Teneurs en soufre total foliaire pour Garcinia neglecta*

Aucune différence significative de la teneur moyenne en soufre foliaire n'a été mise en évidence entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » et « Témoin » (Figure 31-ANOVA, $p > 0,0001$, Annexe 25-Test de Tukey, Figure 33). On note toutefois une tendance à la diminution de la teneur en soufre foliaire avec la distance au complexe industriel (Figure 31). Les teneurs en soufre foliaire de *Garcinia neglecta* en décembre 2016 varient entre 545,5 et 1724.7 mg/kg selon les stations (Annexe 21, Figure 33). Ces valeurs apparaissent également relativement faible car l'ensemble des teneurs relevées au niveau de la zone d'étude apparaissent inférieures aux valeurs mesurées en 2015 sur Pic du pin dans le cadre du suivi des réserves (Figure 32).

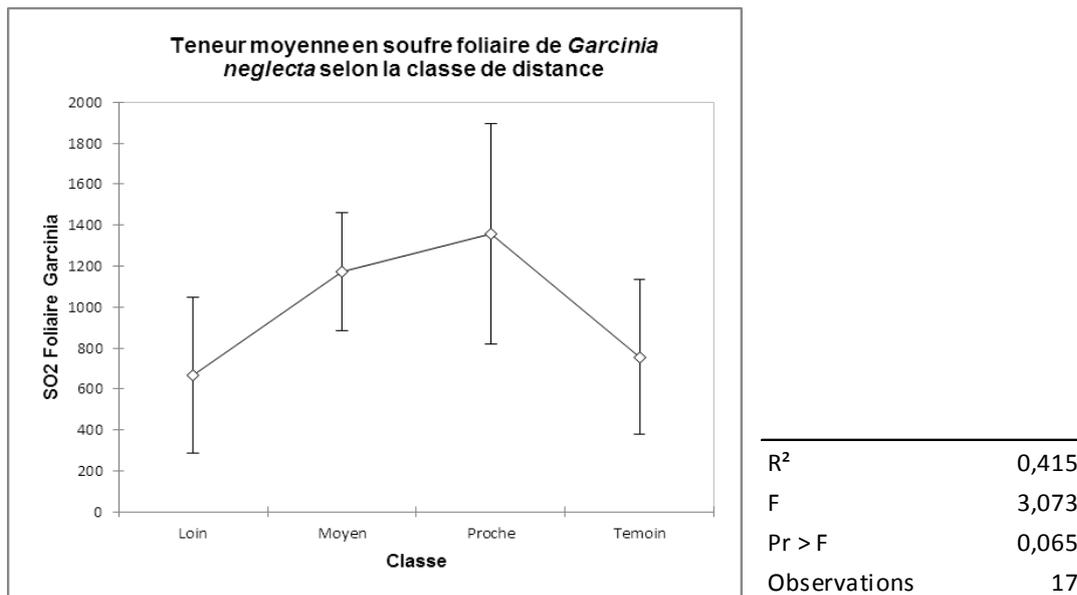


Figure 31: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « teneur en soufre total foliaire de *Garcinia neglecta* » par classe de distance.

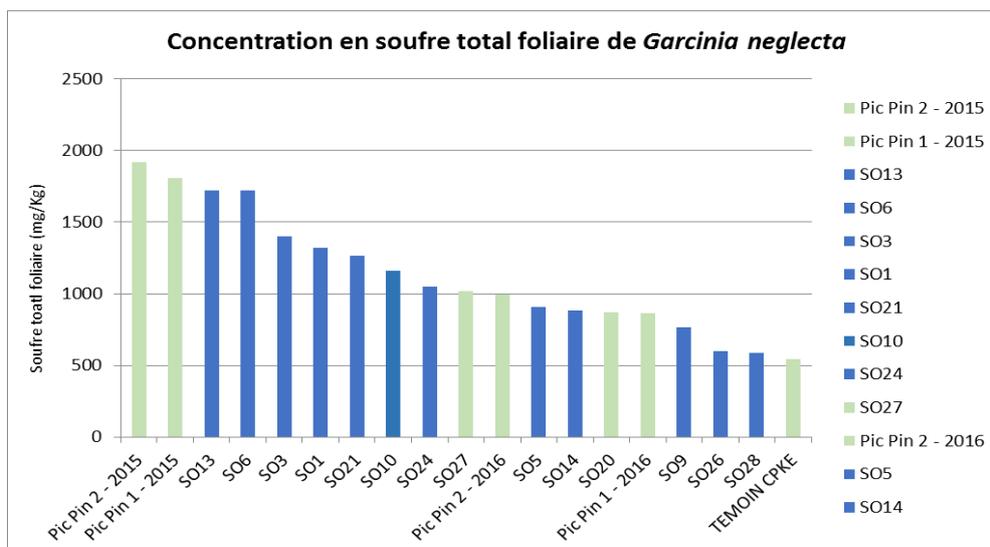


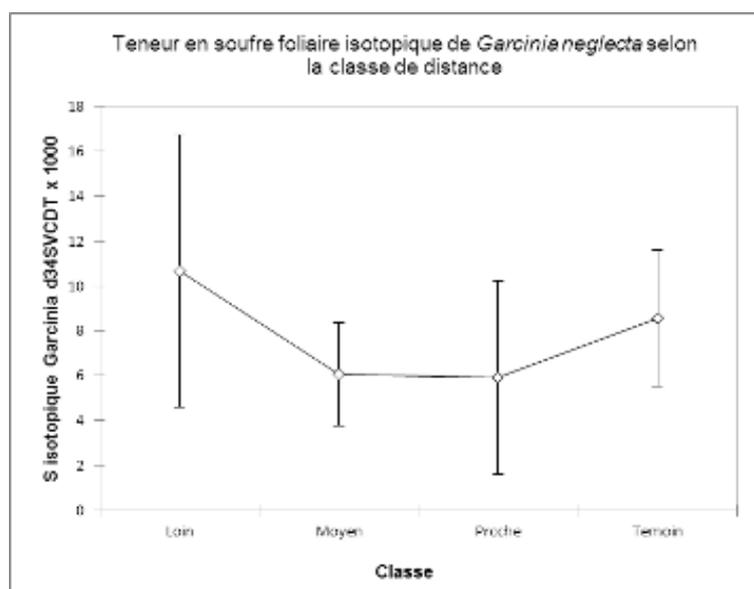
Figure 32: Concentration en soufre total foliaire de *Garcinia neglecta* par station en décembre 2016 comparé aux concentrations relevées sur Pic du Pin en 2015 et 2016.



Figure 33: Cartographie des teneurs en soufre total foliaire de *Garcinia neglecta* en décembre 2016.

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

L'analyse des teneurs en soufre isotopique foliaire ($\delta^{34}\text{S}$) n'a pas permis de détecter de soufre d'origine industriel. Aucune différence significative de la teneur en soufre isotopique de *Garcinia neglecta* n'a été mise en évidence entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » et « Témoin » (Figure 34-ANOVA : $p > 0,0001$, Annexe 26–Test Tukey). On constate à l'inverse une tendance à l'augmentation du soufre isotopique par rapport à la distance au complexe industriel (Figure 34) pouvant correspondre à des apports liés aux embruns marin de l'ordre de +21‰ en soufre isotopiques (Winner et al, 1978 ; Wynn et al, 2014) au niveau la baie de Prony.



R ²	0,298
F	1,417
Pr > F	0,295
Observations	14

Figure 34: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « teneur en soufre foliaire isotopique $\delta^{34}\text{S}$ (‰) de *Garcinia neglecta* » par classe de distance.

3.9 Analyses chimiques de sol : Soufre, pH, conductivité

❖ Teneur en soufre total du sol

Aucune différence significative de la teneur en soufre du sol n'a été relevée entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » et « Témoin » (Figure 35-ANOVA : $p > 0,0001$; Annexe 27-Test de Tukey, Figure 36). Les teneurs en soufre du sol varient en décembre 2016 entre 346 et 1444 mg/kg selon les stations dont 930 mg/Kg pour la station témoin SO27 (Annexe 28, Figure 36).

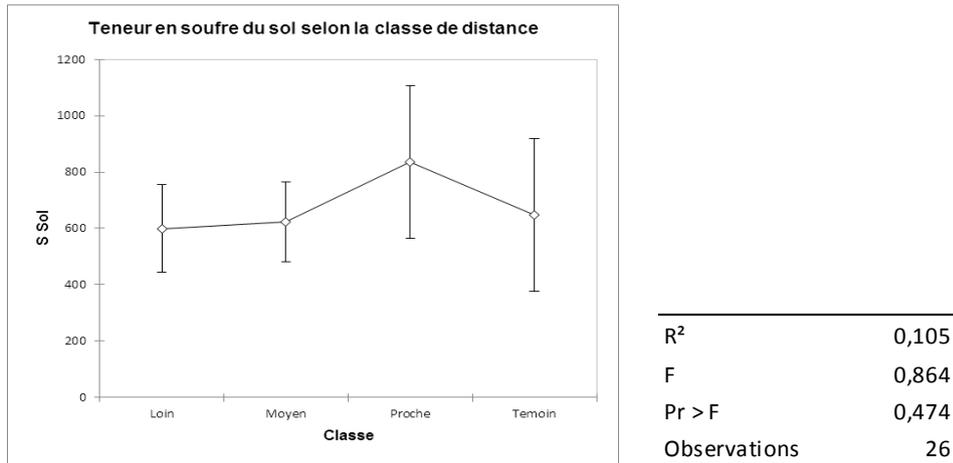


Figure 35: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « teneur en soufre total du sol » par classe de distance.

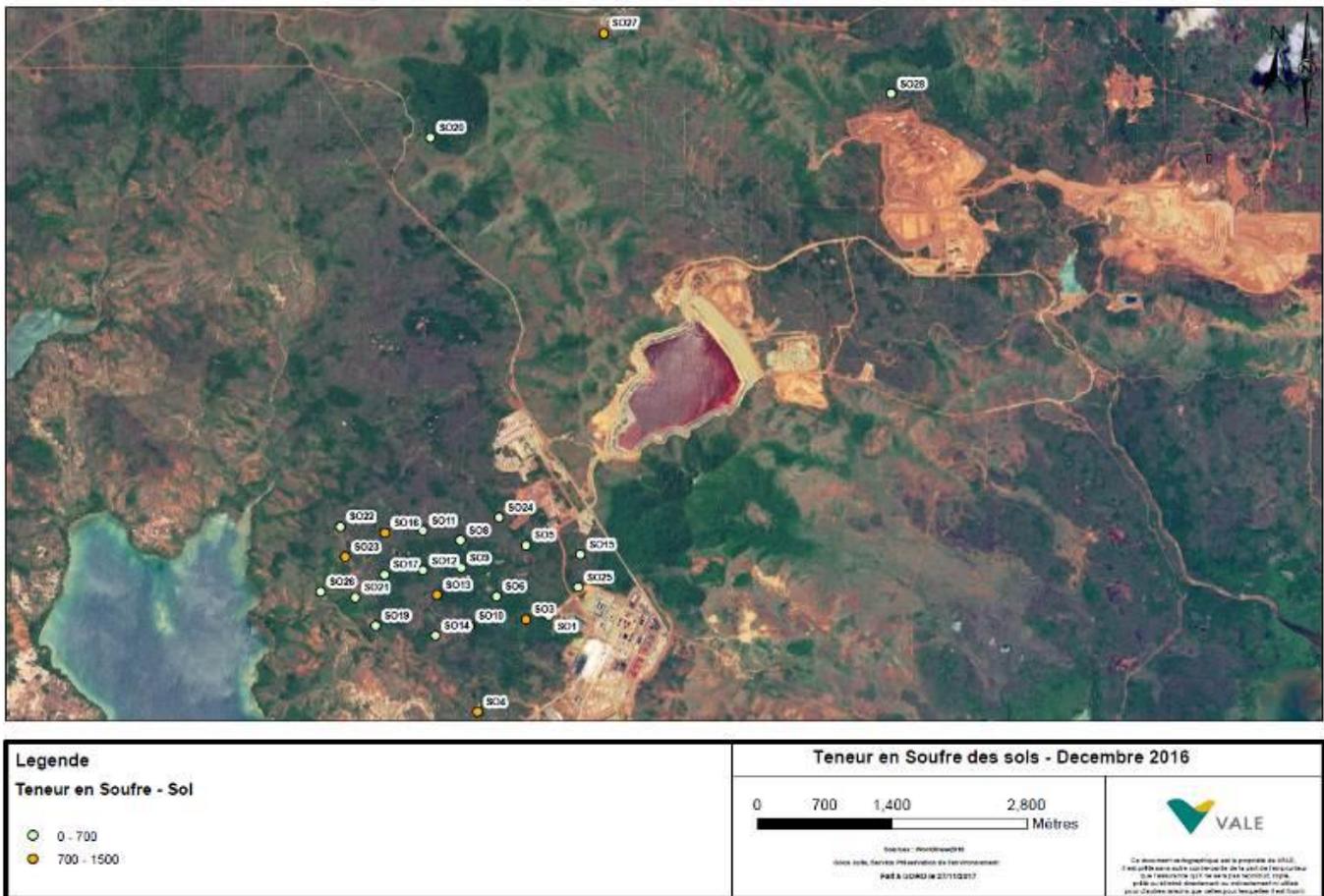


Figure 36: Cartographie de la teneur en soufre total des sols en décembre 2016.

❖ Teneur en soufre isotopique du sol

Les teneurs en soufre isotopique du sol en décembre 2016 varient entre 9.63 (‰) et 17.47 (‰) selon les stations (Annexe 29). Ces valeurs apparaissent relativement faible et la valeur la plus élevée a été relevée au niveau du site témoin SO28. Les valeurs relevées peuvent ainsi être comparées aux teneurs liées aux apports de pluies compris entre +10 à +15‰ voir aux valeurs mesurées sur la végétation littorale liées à un apport des embruns marins pouvant atteindre +21‰ (Winner *et al*, 1978 ; Thode, 1983 ; Mizota & Sasaki, 1996 ; Wynn *et al*, 2013).

❖ PH du sol

Aucune différence significative n'a été mise en évidence concernant le PH du sol entre les stations « Proches », « Moyen », « Loin » et « Témoin » (Figure 37-ANOVA : $p > 0,0001$, Annexe 31-Test de Tukey). Les PH moyen relevés sont de 5.5 pour les stations « Proches », 4.5 pour les stations « Moyen », 4.8 pour les stations « Loin » et 5 pour les stations « Témoins » (Figure 37, Annexe 30). 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).

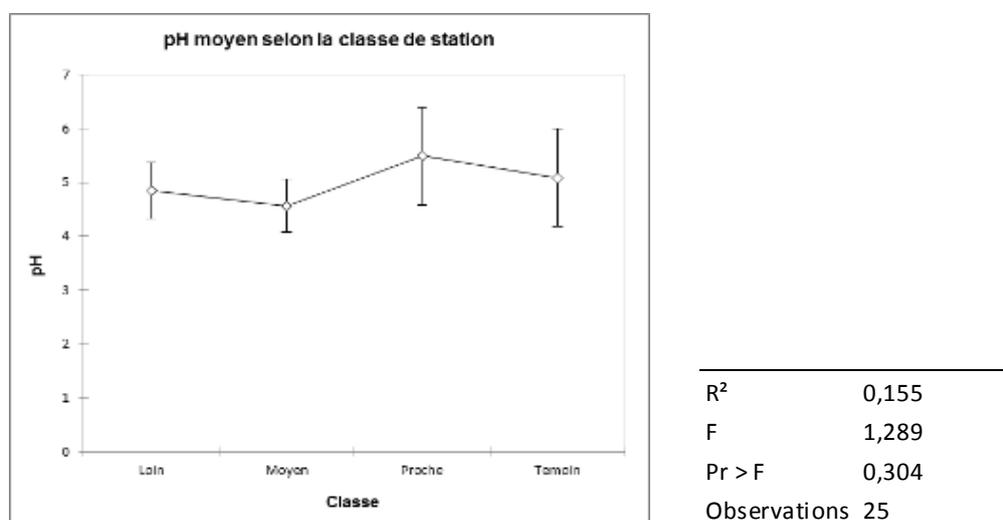


Figure 37: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du « pH du sol » par classe de distance.

❖ Mesure de la Conductivité du sol

Aucune différence significative de la conductivité du sol n'a été relevée entre les stations « Témoin » et les autres classes de stations (Figure 38-ANOVA : $p > 0,0001$, Annexe 30). On note toutefois une tendance à la diminution de la conductivité avec la distance au complexe industriel avec une différence significative identifiée entre les stations « Proche » et « Loin » (Figure 38, Annexe 32-Test de Tukey). Aucun lien n'a pu être mis en évidence entre la conductivité du sol et le nombre d'individus avec symptômes (Annexe 33-Regression linéaire).

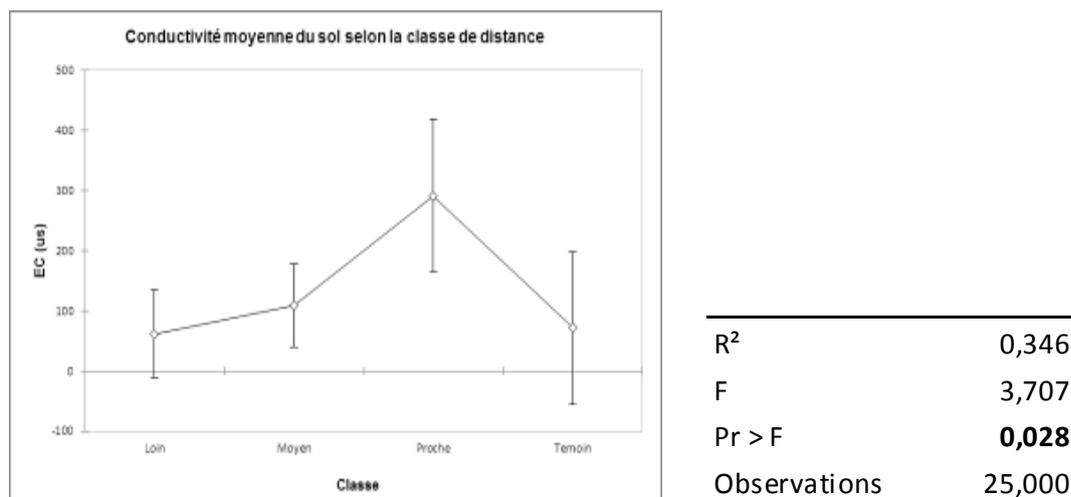


Figure 38: Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la « conductivité du sol » par classe de distance.

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 2017. Seule la station SO28 a présenté une diminution d'une « unité/tête » de lichen. Le seul changement majeur observé sur les lichens entre 2016 et 2017 est une variation de volume selon la saison et la pluviométrie lors des suivis (Figure 39, Annexe 34).

Station SO 05 – Cladonia

Avril 2016



Décembre 2017



Figure 39: Illustration d'une colonie de Lichens en avril 2016 et en décembre 2017- SO5.

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 40 ; Bluecham 2011 ; Bluecham 2013 ; Bluecham 2014).

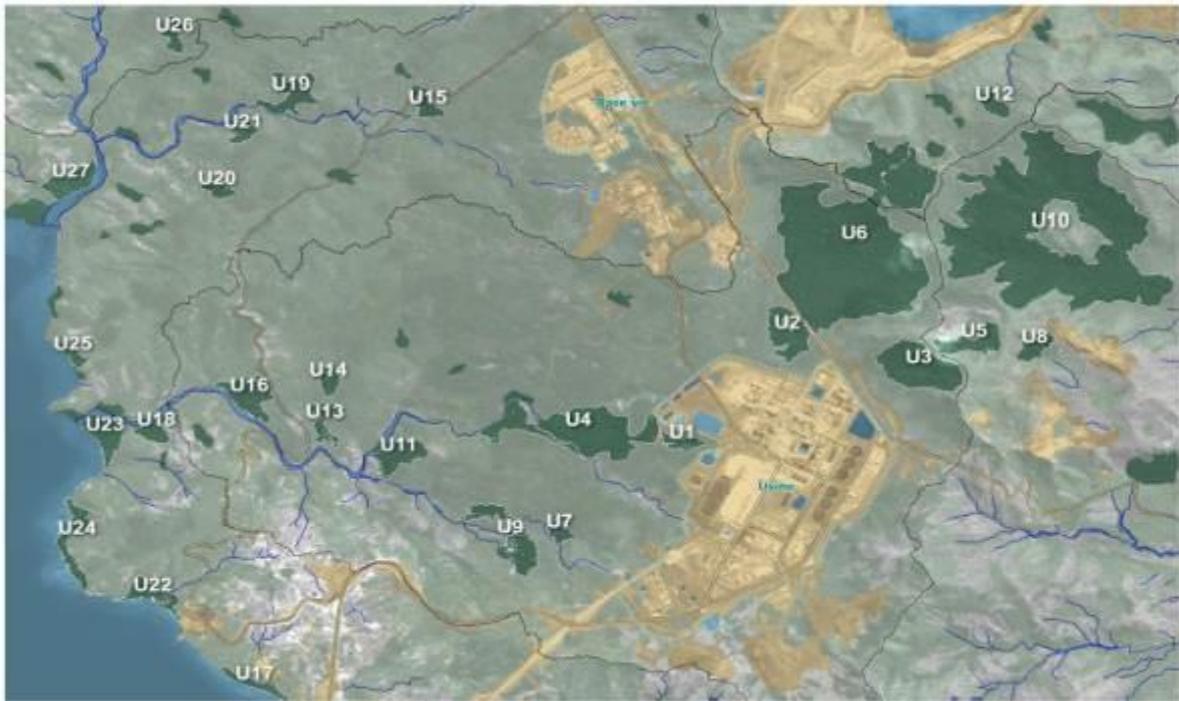


Figure 40: Localisation des 27 massifs forestiers d'intérêt prioritaire autour de l'usine de VALE NC.

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 septembre 2017

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 41 ; 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 41, Figure 42). Mi 2012, les impacts diminuent d'abord fortement puis se stabilisent globalement jusqu'à fin 2016. Entre janvier 2016 et juillet 2017, les surface impactées et très impactées régressent de manière régulière (respectivement -1.84% et -0.36%). Une légère augmentation des surfaces impactées (+0.39%) et des surfaces très impactées (+0.08%) est observée entre juillet et septembre 2017.

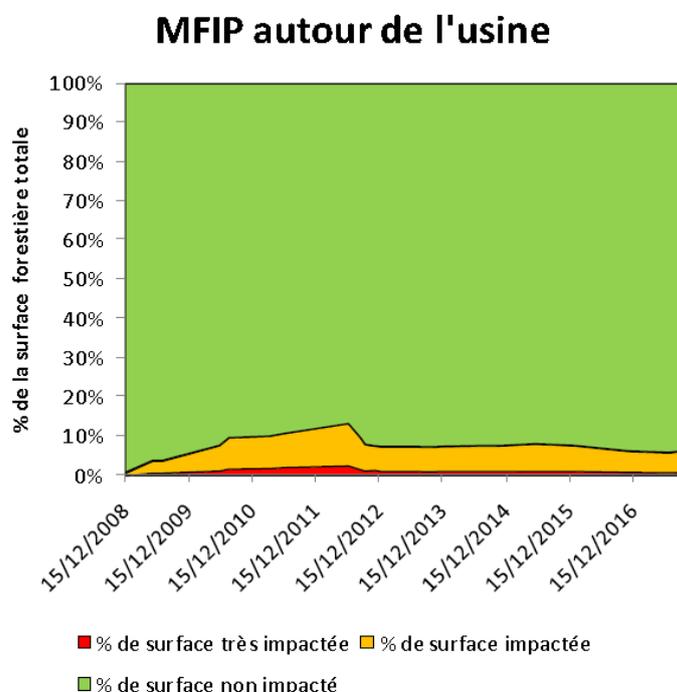


Figure 41: Evolution globale des impacts entre décembre 2008 et novembre 2016

4.3 Signalement de zone de dépérissement durant la saison sèche

En septembre 2017, des jaunissements ont pu être observés à partir des images satellites au niveau de formation de maquis (Bluecham, 2017 ; Figure 44). En Octobre, novembre et décembre 2017, les équipes du Service Préservation de l'environnement ont par ailleurs détecté plusieurs zones de dépérissements de végétation dans l'emprise et hors emprise des émissions atmosphériques du complexe industriel. Les symptômes observés se distinguent des symptômes caractéristiques d'une exposition au SO₂ atmosphérique et se présentent sous forme de nécroses marginales touchant partiellement ou totalement les feuilles. Ces phénomènes de dessèchement ont été observés sur plus d'une dizaine d'espèces au niveau des plantations de la Netcha, déversoir, col paillard, COFREMI (à proximité de la Kue Nord). Plusieurs cas de mortalités ont été relevés avec un dessèchement total du feuillage des individus (Figure 45, Figure 46, Figure 47, Figure 48). Ce phénomène a également été constaté sur l'ensemble de la Grande terre (Endemia Groupe RLA, com. Pers., 2017). L'important déficit hydrique constaté par rapport aux années précédentes est très probablement à l'origine de ces patches de dépérissement.



Figure 44: Détection d'un jaunissement de la végétation par image satellite en septembre 2017.



Figure 45: Dépérissement de *Gymnostoma deplancheanum* à COFREMI en octobre 2017. Figure 46: Dépérissement de chênes gommés au niveau des plantations de la Netcha en octobre 2017. Ces dépérissement ont également impactés des *Agathis* plantés.



Figure 47:Phénomène de dépérissement au niveau de la plaine Paillard en Novembre 2017 : *Codia discolor*, *Grevillea* sp.,*Styphelia* sp.



Figure 48:Phénomène de dépérissement au niveau du deversoir en novembre 2017 : *Codia nitida*, *Hibbertia* sp., *Montrouziera sphaeroidea*, *Solmsia callophylla*, *Tristaniopsis glauca*, *Amyema scadens*.

5. Conclusion

L'analyse des résultats montre plusieurs tendances :

- Aucune différence significative n'a été mise en évidence concernant la **reprise** des individus entre les stations « proche », « moyen », « loin » et « témoin » (ANOVA, Test Tukey). La présence de symptômes ne semble pas influencer la production d'un nouveau feuillage.
- Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les stations « témoins » et les stations « Proche », « Moyen » et « Loin » concernant le nombre de relevés moyen de **floraison/fructification** des individus. La présence de symptômes ne semble pas influencer la floraison et fructification des individus suivis.
- 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 ». La présence de symptômes ne semble pas fragiliser les individus et indirectement influencer l'occurrence d'attaques phytosanitaires.
- Il a été mis en évidence une tendance non significative à la diminution de la **teneur en soufre total foliaire** de *Garcinia neglecta* et *Arillastrum gummiferum* avec la distance au complexe industriel.
- L'analyse des teneurs en **soufre isotopique foliaire** ($\delta^{34}\text{S}$) d'*Arillastrum gummiferum* et *Garcinia neglecta* n'a pas permis de détecter de soufre d'origine industriel. Aucune différence significative de la teneur en soufre isotopique d'*Arillastrum gummiferum* n'a été mise en évidence entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » et « Témoin ». On constate à l'inverse une tendance à l'augmentation du soufre isotopique avec la distance au complexe industriel.
- Aucune différence significative de la teneur en **soufre du sol** n'a été relevée entre les stations « Proche », « Moyen », « Loin » et « Témoin ». Aucun lien n'a pu être mis en évidence entre la teneur soufre du sol et le nombre d'individus avec symptômes.
- Aucune différence significative n'a été mise en évidence concernant le **pH du sol** entre les stations « Proches », « Moyen », « Loin » et « Témoin ».
- Aucune différence significative de la **conductivité du sol** n'a été relevée entre les stations « Témoin » et les autres classes de stations. On note toutefois une tendance à la diminution de la conductivité avec la distance au complexe industriel avec une différence significative identifiée entre les stations « Proche » et « Loin ».
- Aucun changement majeur de **l'état de santé des lichens** n'a été constaté entre 2016 et 2017.

Les suivis réalisés en 2016 et 2017 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 des stations d'observation au niveau de la zone de dépérissement. L'interprétation des résultats d'investigations reportés dans les précédents rapports (Vale Nouvelle-Calédonie 2011 ; Murray, 2012 ; VALENC, 2013 ; VALENC 2014) 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. Aucun lien n'a été mis en évidence entre la teneur en soufre total du sol et le nombre d'individus avec symptômes et aucune différence significative de la teneur en soufre total du sol n'a été mis en évidence selon la distance au complexe industriel.

18 stations d'observations sur les 39 suivies ont été impactées ponctuellement avec l'apparition de symptômes foliaires de nécroses et/ou de chloroses marginales, internervales ou apicales selon les espèces. Dans la plupart des cas, les symptômes recensés sur l'année sont plutôt des nouveaux symptômes accompagnés de vieux symptômes persistants parfois sur les mêmes rameaux. Les nécroses internervales ou apicales sont typiquement caractéristique d'exposition aigue au SO₂ atmosphérique. La zone impactée reste localisée au secteur identifié depuis 2012 et se situe entre 600 et 3000 m à l'ouest de la source de SO₂ sous l'influence des vents dominants. Six espèces sur les dix espèces indicatrices suivies sur l'ensemble des stations ont présenté des symptômes apparus entre janvier 2016 et décembre 2017. Le nombre d'espèces et le nombre d'individus avec 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 2017, on relève 31 % d'individus avec symptômes pour les stations « Proche », 19 % pour les stations « Moyen » et 8 % pour les stations « Loin ».

Globalement, l'analyse de l'évolution des symptômes au niveau de la zone d'étude montre une tendance à la diminution du pourcentage d'individus avec symptômes entre avril 2016 et aout 2017. Une augmentation du nombre d'individus avec symptômes a été relevée durant la saison sèche en décembre 2016 et une augmentation du nombre d'individus avec symptômes et du degré de sévérité en décembre 2017. Il est probable que ces périodes de déficit hydrique, particulièrement marquée en 2017, aient fragilisé la végétation, augmenté sa sensibilité au SO₂ atmosphérique et ainsi favorisé l'apparition de symptômes. Le maximum d'impact est atteint entre avril et décembre 2016 avec 17,4% d'individus impactés. En décembre 2017, 17,04 % d'individus sur l'ensemble de la zone d'étude présentent des symptômes.

Le suivi par télédétection des massifs forestiers d'intérêt prioritaire conforte les résultats obtenus et met également en évidence une diminution régulière des surfaces impactées et très impactées entre janvier 2016 et juillet 2017 suivie d'une légère augmentation des surfaces impactées et très impactées fin 2017 avec très probablement une influence de la saison sèche.

Les résultats des analyses chimiques en soufre foliaire montre une légère augmentation de la teneur moyenne en soufre foliaire des espèces indicatrices au niveau des sites avec symptômes entre 2012 et 2014 puis une diminution plutôt marquée jusqu'en décembre 2016. En décembre 2016, les teneurs en soufre foliaire apparaissent relativement basses si l'on compare les résultats obtenus dans le cadre du suivi symptomologique avec ceux obtenus lors de l'étude de fumigation.

Malgré l'apparition de symptômes foliaires entre 2016 et 2017, on constate sur l'ensemble des stations dont les plus exposées, une bonne reprise avec la production d'un nouveau feuillage des individus avec symptômes. La présence de symptômes ne semblant 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.

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
- 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.