



Rapport final

REALISATION D'UNE MISSION DE VERIFICATION DE LA MISE EN ŒUVRE DU PROTOCOLE DE SUIVI SYMPTOMATOLOGIQUE DU PHENOMENE DE DEPERISSEMENT OBSERVE SUR LA VEGETATION AUX ALENTOURS DU SITE DE VALE NC

Auteurs : Bota. Environnement - Alexandre Lagrange

Août 2018



Observatoire de l'environnement
en Nouvelle-Calédonie

11 rue Guynemer
98800 Nouméa
Tel.: (+ 687) 23 69 69
www.oeil.nc

Sommaire

Chapitre I - CONTEXTE	6
Chapitre II - OBJECTIF DE L'ETUDE	9
Chapitre III - METHODE	9
Chapitre IV - RESULTATS.....	12
IV.1. Le dispositif expérimental, la fréquence et la durée du suivi.....	12
IV.1.1. Evaluation de la mise en œuvre du dispositif.....	12
IV.1.2. Suivi photographique des milieux dans la zone impactée.....	16
IV.1.3. Fréquence de suivi	17
IV.1.4. Evaluation de la durée impartie pour la réalisation du suivi	17
IV.2. Les paramètres de suivi de l'état de santé de la végétation	18
IV.2.1. Présence d'espèces exogènes végétales ou animales	21
IV.2.2. Présence de rouille des myrtacées et espèces impactées.....	21
IV.2.3. Observation de coupes de bois.....	22
IV.2.4. Indice de présence de cendres et/ou de poussières.....	23
IV.2.5. Indice de reprise de la végétation.....	24
IV.2.6. Évaluation de l'état de santé des lichens terrestres	25
IV.2.7. Phénologie	26
IV.2.8. État phytosanitaire	27
IV.2.9. Les symptômes foliaires (indice et photographie)	29
IV.2.10. Indice de la qualité globale de la station	33
IV.3. Les paramètres atmosphériques	34
IV.3.1. Données météorologiques	34
IV.3.2. Relevés atmosphériques.....	35
IV.3.3. Teneurs ponctuelles en SO ₂ ambiant	36
IV.3.4. Teneur mensuelle en SO ₂ atmosphérique par tubes passifs	36
IV.4. Echantillons de sols et de plantes pour les analyses chimiques.....	39
IV.4.1. Echantillonnage et analyse chimique des sols.....	39
IV.4.2. Echantillonnage et analyse chimique de feuilles des espèces indicatrices	40
IV.4.3. Mesure de l'activité photosynthétique des individus échantillonnés :.....	42
IV.5. Saisies et analyses des données récoltées	43
IV.5.1. Classement des photographies dans le dossier photos	43
IV.5.2. Saisie informatique des données de la fiche de terrain	44
IV.5.3. Méthode d'analyses des données :.....	44

Chapitre V - SYNTHÈSE DES ANALYSES CRITIQUES ET RECOMMANDATIONS	49
V.1. Le dispositif expérimental, la fréquence et la durée du suivi	49
V.2. Les paramètres de suivi de l'évaluation de l'état de santé de la végétation	51
V.2.1. Les paramètres liés à la qualité de la station.....	51
V.2.2. Les paramètres d'évaluation des dégradations foliaires : indice de symptômes SO ₂ et indice de l'état phytosanitaire	52
V.3. Les paramètres de suivi atmosphériques.....	56
V.4. Analyses chimiques foliaires et de sols	56
V.5. Traitement des données acquises sur le terrain.....	57
Chapitre VI - CONCLUSION ET PERSPECTIVES	59

Table des figures

Figure 1. Localisation et étendue de la zone impactée par le dépérissement foliaire de plusieurs espèces végétales à la date du 2 février 2011 (source VALE NC, 2011).....	6
Figure 2. Répartition des stations de suivi dans la zone impactée (points orange) et des trois sites témoins (points vert) (source VALE NC, 2016).	11
Figure 3. Zoom sur les stations de suivi dans le bassin versant du Creek Baie Nord. L'état de santé (activité photosynthétique) des massifs forestiers en pointillé est suivi par télédétection (Etude Vegusine, Bluecham) (source VALE NC, 2016).	12
Figure 4. Localisation des 4 points de repères fixes pour les photos panoramiques de suivi de l'état général visuel de la végétation sur la zone impactée (source VALE NC, 2016).....	16
Figure 5. Localisation des stations de suivi des données météorologiques	35
Figure 6. Localisation des 10 tubes passifs autour du site industriel de VALE NC.....	38

Table des tableaux

Tableau 1. Description des caractéristiques géographiques et écologiques des stations de suivi. Les stations surlignées en vert correspondent aux stations témoins (source VALE NC, 2016).	13
Tableau 2. Nombre d'individus évalués par espèce et nombre de photographies par station de suivi. Les stations surlignées en vert correspondent aux stations témoins.	14
Tableau 3. Evaluation du temps passé par les équipes réalisant les suivis sur chaque station à l'étude durant la mission d'accompagnement terrain.	17
Tableau 4. Liste des paramètres suivis, fréquence de suivi et dispositif de suivi en place.....	18
Tableau 5. Liste des paramètres du suivi symptomatologique et identification des intervenants dans le temps.	19
Tableau 6. Tableau issu du fichier Excel de saisie des données de terrain. L'ensemble des champs de la fiche terrain est repris dans ce tableau.	45
Tableau 7. 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	47

Résumé exécutif

Titre de l'étude	Réalisation d'une mission de vérification de la mise en œuvre du protocole de suivi symptomatologique du phénomène de dépérissement observé sur la végétation aux alentours du site de Vale NC		
Auteurs	Bota. Environnement		
Collaborateurs			
Editeurs	OEIL		
Année d'édition du rapport	2018	Année des données	2017

Objectif	▪ S'assurer de la bonne mise en œuvre du protocole de suivi tel que prévu dans le document «Protocole de suivi de la végétation – zone de dépérissement en aval de l'usine de VALE NC» (VALE NC, 2016) ; ▪ Préciser certains points de détails méthodologiques ; ▪ Identifier et consigner tous changements méthodologiques qui pourraient avoir eu lieu par rapport au protocole initial, et le cas échéant identifier la date du changement, ainsi que sa raison et ses conséquences sur l'interprétation des résultats ; ▪ Procéder à une analyse critique de la mise en œuvre du suivi sur le terrain et le cas échéant suggérer des pistes d'amélioration.
Contexte	En 2016, le protocole de suivi des effets des émissions atmosphériques sur la végétation située sous le vent de l'usine de Vale NC a été révisé pour notamment : • Établir une standardisation du nombre d'espèces et d'individus balisés suivis, • Redéfinir la liste des paramètres de l'évaluation de l'état de santé du milieu. L'ensemble de ces évolutions visaient à quantifier et cartographier de manière optimale la distribution du degré de sévérité des symptômes au sein du secteur impacté et à préciser les évolutions temporelles. Dans le cadre de sa mission d'optimisation, l'OEIL a commandité une étude dédiée à mener une évaluation <i>in situ</i> des méthodes de suivi dans la perspective d'identifier des pistes d'amélioration du protocole mis en œuvre.
Méthodologie	Notre étude a consisté à accompagner l'équipe Vale NC en charge du suivi durant trois journées au cours de leur campagne terrain menée en décembre 2017. En plus des informations relevées sur le terrain concernant l'adéquation entre les opérations mises en œuvre et le cahier des charges du suivi, le travail effectué par l'équipe de Vale NC a été évalué sur des critères de technicité (capacité à différencier les symptômes foliaires, de pratiques d'échantillonnage de feuille et de sol) et sur la qualité de la saisie et du traitement des informations.

Résultats et conclusions	Le postulat de base de la mise en œuvre de l'évaluation de la présente étude porte d'une part, sur la capacité à reconnaître et à différencier les symptômes liés soit à des facteurs biotiques (ravageurs et maladies), soit à des facteurs abiotiques (SO₂) et, d'autre part sur la mise en corrélation de la teneur en soufre (air, sol et feuilles) avec les symptômes de dépérissement liés au soufre. La composition, la technicité et la qualité de l'acquisition des données et de compte rendu de l'équipe de Vale NC sont conformes avec une bonne mise en œuvre du plan de suivi. Ainsi, le cahier des charges du protocole adopté en 2016 afin de répondre aux objectifs d'évaluation de l'état de santé de la végétation a bien été respecté (durée, fréquence, nature des échantillons, observation des symptômes foliaires). Néanmoins des points d'améliorations ont été relevés, parmi lesquels on peut citer : la nécessité d'un géoréférencement des individus échantillonnés, le besoin de formations spécifiques des opérateurs en pathologies végétales renforcées par la mise à jour d'un guide de reconnaissance des symptômes foliaires, la nécessité de pérenniser la composition de l'équipe Vale en charge du suivi.			
Limite de l'étude	Les résultats des analyses chimiques foliaires n'étaient pas encore disponibles au moment de la réalisation de l'étude. Ainsi, les méthodes d'analyses de corrélations entre les symptômes foliaires de dépérissement et les valeurs de soufre n'ont pas pu être évaluées.			
Evolutions	Version	finale	Date de la version	Aout 2018

Chapitre I - CONTEXTE

En décembre 2010, VALE Nouvelle-Calédonie (VALE NC) a observé un phénomène de dépérissement du feuillage de plusieurs espèces végétales situées dans une forêt en proche contrebas de son usine, sous le vent des installations industrielles (les vents dominants sont d'origines Est et Sud-Est) (Fig. 1). Les dégâts sur le feuillage de différentes espèces se traduisent par des phénomènes de chloroses et de nécroses, semblant engendrer une chute prématurée des feuilles qui s'accumulent alors à la base des arbres. Les arbres touchés sévèrement peuvent parfois montrer des « cornes de cerf » qui correspondent à des branches mortes en hauteur sur les individus touchés. VALE NC a aussitôt engagé une série d'investigations (menée sur l'année 2011) afin d'identifier les causes possibles de dépérissement et mettre en place des mesures de suivi de l'évolution du phénomène. A l'issue de travaux d'investigations, il a été conclu que les émissions atmosphériques en provenance de l'usine seraient les causes majeures des phénomènes de dépérissement observés (notamment les émissions de SO_2). Toujours à l'issue de ces travaux d'investigations, VALE NC a fait la proposition de mettre en place plusieurs mesures afin d'assurer une surveillance de l'évolution des phénomènes de dépérissement autour du site industriel, et notamment celle d'un suivi symptomatologique foliaire et d'un suivi de qualité de l'air. VALE NC a également mandaté la société Bluecham pour la mise en œuvre d'un suivi par télédétection des massifs forestiers situés aux alentours du complexe industriel et demandé aussi au professeur Francis Murray, expert OMS, la réalisation de quatre études de fumigation en situation contrôlée.

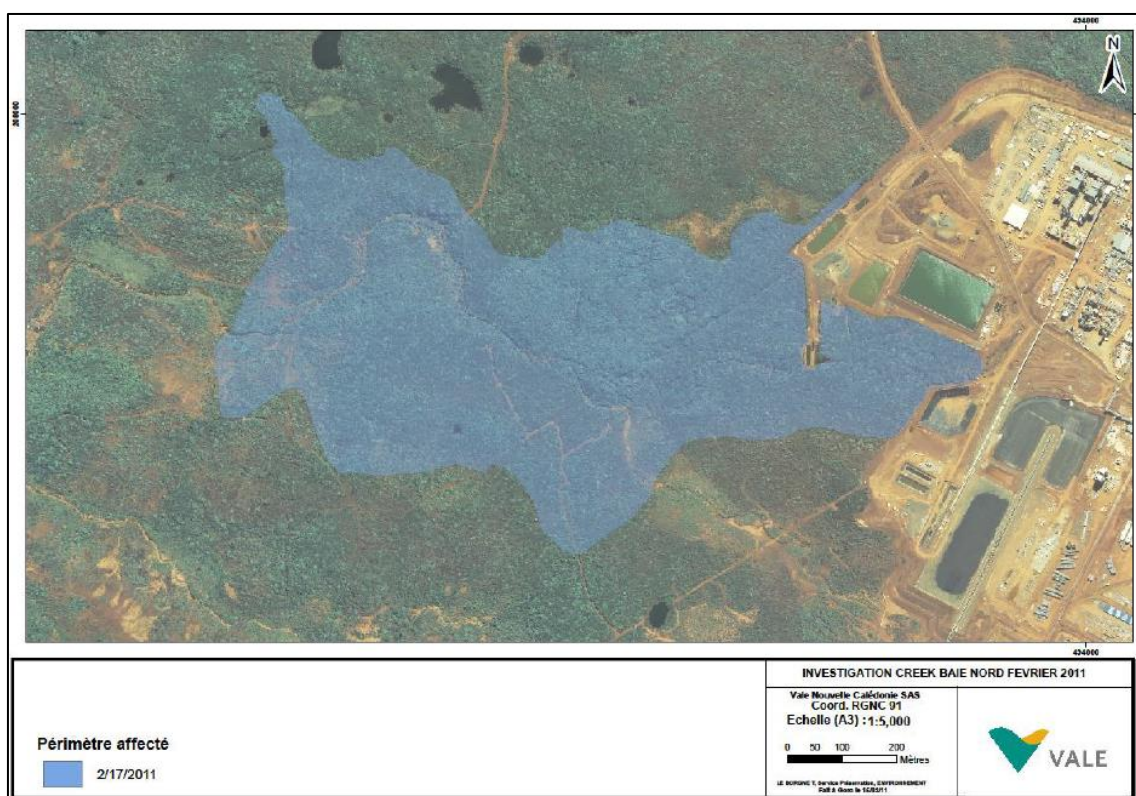


Figure 1. Localisation et étendue de la zone impactée par le dépérissement foliaire de plusieurs espèces végétales à la date du 2 février 2011 (source VALE NC, 2011).

Ainsi, conformément à l'arrêté ICPE n°1946-2012/ARR/DIMEN du 5 septembre 2012, Vale NC a mis en œuvre un plan de surveillance afin de suivre l'état de santé des formations végétales exposées aux émissions atmosphériques autour de son site industriel.

En 2012, un suivi mensuel des symptômes foliaires a été établi sur 27 stations équipées de tubes passifs et situées à différentes distances et selon diverses orientations de vent par rapport au site industriel de Vale NC. Ceci afin de signaler de manière précoce toute apparition de symptômes liés aux émissions atmosphériques de SO₂ et évaluer l'évolution de la zone impactée. Les résultats des suivis sur une période de 3 ans ont montré une persistance des symptômes et des teneurs en SO₂ sur un axe Ouest Nord-Ouest allant de 200 m à 2 750 m de l'usine. La végétation sur les autres axes (Sud, Nord, Est) n'a pas montrée de symptômes caractéristiques d'une exposition au SO₂ durant cette période de suivi. Les tubes passifs des stations localisées au Sud, Nord et Est n'ont pas non plus montré de valeurs élevées suggérant ainsi que l'axe Ouest Nord-Ouest soit la trajectoire nécessitant un suivi des symptômes foliaires afin d'évaluer l'évolution de la zone impactée.

Les derniers résultats de 2014 et 2015 ont montré que malgré l'apparition de symptômes foliaires l'état de santé de la végétation semble peu affecté. Il a été constaté une bonne reprise des individus impactés avec la production d'un nouveau feuillage en bonne santé quelques mois et parfois moins après l'apparition des symptômes et la majorité des individus ont pu assurer leur floraison et leur fructification.

Cependant l'apparition de symptômes sur les stations localisées à proximité et à mi-distance de l'usine sous l'influence des vents dominants a mérité la mise en place en 2016 d'un nouveau dispositif d'évaluation afin de quantifier et de cartographier la distribution du degré de sévérité des symptômes au sein du secteur impacté et de préciser leur évolution dans le temps. Des paramètres de suivi supplémentaires ont été rajoutés au nouveau protocole de 2016 tels que la reprise de la végétation, l'état phytosanitaire, l'évaluation des dépôts de poussières et de cendres ainsi que l'évaluation de l'état de santé des lichens. Les analyses chimiques foliaires se concentreront sur deux espèces indicatrices à large répartition jugées sensibles au SO₂ atmosphérique, à savoir *Arillastrum gummiferum* et *Garcinia neglecta*, afin d'affiner l'analyse des concentrations en soufre foliaire selon la distance au complexe industriel. Enfin, des analyses chimiques supplémentaires seront réalisées pour le sol avec l'analyse du Soufre, du pH et de la conductivité. Les analyses chimiques foliaires et les analyses chimiques du sol porteront également sur les compositions isotopiques du soufre afin de déterminer la part de soufre d'origine industrielle au sein des échantillons. Le réseau de tubes passifs sera réduit à 10 stations dans la zone d'exposition préférentielle.

L'objectif de la mise en place du nouveau protocole est centré sur l'évaluation de l'état de santé de la végétation et consiste à évaluer l'évolution du dépérissement dans le temps en prenant en compte

l'évolution du nombre de stations, du nombre d'espèces indicatrices et du nombre d'individus présentant des symptômes ainsi que l'évolution du degré de sévérité des symptômes.

Pour répondre à ces objectifs, le protocole de 2016 intègre le suivi de plusieurs paramètres de l'évaluation de l'état de santé du milieu et de paramètres qui permettent de connaître les teneurs en SO₂ atmosphérique et les teneurs en soufre des feuilles des espèces indicatrices et des sols. L'évaluation porte sur une maille de stations de suivi située à l'intérieur de la « zone impactée » et de stations de suivi localisées en périphérie qui ne présentent pas de symptômes, afin de détecter une éventuelle extension ou diminution de la « zone impactée ».

La méthodologie de suivi du protocole de 2016 a été développée conjointement avec le service Préservation de l'environnement de VALE NC et le Professeur Francis Murray, référent scientifique de l'OMS sur les effets des émissions atmosphériques sur la végétation pour améliorer le protocole de suivi précédent et afin de valider les paramètres d'évaluation ainsi que les sites les plus adaptés pour la mise en place d'un suivi symptomatologique. La méthodologie adoptée est fondée sur le manuel « Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests » - UN ECE ICP Forests, 2010.

Dans ce contexte, l'Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie (OEIL) a mandaté le bureau d'études Bota-environnement pour mener une étude visant à évaluer la pertinence du protocole de suivi symptomatologique de la flore révisé en 2016 et proposer, le cas échéant, des pistes d'améliorations.

La présente étude vient compléter, via des observations de terrain, une première analyse critique du suivi symptomatologique de la flore qui a été menée par l'Institut Agronomique Calédonien (IAC) sur la base d'une analyse bibliographique¹ en 2017.

¹ [L. Bordez & B. Fogliani \(IAC\). Analyse critique du suivi symptomatologique existant du phénomène de dépérissement observé sur la végétation aux alentours de Vale NC \(2017\)](#)

Chapitre II - OBJECTIF DE L'ETUDE

L'étude repose sur la réalisation de travaux de vérification de la mise en œuvre *in situ* du protocole de suivi symptomatologique du phénomène de dépérissement observé aux alentours du site industriel de VALE NC établi en 2016 (Vale NC, 2016). Ceci dans l'objectif de préciser certains aspects de la méthode appliquée et de s'assurer que le protocole permet une bonne évaluation de l'effet du SO₂ sur la végétation et de son évolution dans le temps.

L'étude a consisté à :

- s'assurer de la bonne mise en œuvre du protocole de suivi tel que prévu dans le document «Protocole de suivi de la végétation – zone de dépérissement en aval de l'usine de VALE NC» (VALE NC, 2016) ;
- préciser certains points de détails méthodologiques tels qu'énoncés ci-après ;
- d'identifier et de consigner tous changements méthodologiques qui pourraient avoir eu lieu par rapport au protocole initial, et le cas échéant d'identifier la date du changement, ainsi que la raison de ce changement et ses conséquences sur l'interprétation des résultats ;
- procéder à une analyse critique de la mise en œuvre du suivi sur le terrain et le cas échéant suggérer des pistes d'amélioration.

Chapitre III - METHODE

La méthodologie adoptée pour répondre aux objectifs de l'étude revient à accompagner les équipes de VALE NC lors de la session de suivi de décembre 2017, afin de s'assurer de la bonne mise en œuvre du protocole de suivi tel que prévu dans le document datant de 2016 (VALE NC, 2016).

L'évaluation de la bonne mise en œuvre du suivi consiste à préciser les points de détails méthodologiques du protocole, à identifier et à consigner les changements qui pourraient avoir eu lieu, d'en préciser les raisons et les conséquences sur l'interprétation des résultats.

Les points méthodologiques principaux étudiés pour l'évaluation de la mise en œuvre du protocole se distribuent ainsi :

- 1. Le dispositif expérimental, la fréquence et la durée du suivi**
- 2. Les paramètres de suivi de l'évaluation de l'état de santé de la végétation**
- 3. Les paramètres de suivi atmosphériques (météo et SO₂ atmosphérique)**
- 4. Les prélèvements et préparations des échantillons de sols et plantes pour les analyses chimiques**
- 5. La saisie et l'analyse des données du suivi**

La mission terrain d'accompagnement de l'équipe de VALE NC, s'est déroulée sur 3 journées les 6, 14 et 18 décembre 2017. Durant cette période, les deux membres de Bota.Environnement ont procédé à des observations concernant l'acquisition des données par les opérateurs du suivi. Le premier jour d'accompagnement correspondait au début du suivi de décembre 2017 par l'équipe de VALE NC. Le dernier jour d'accompagnement correspondait à la dernière des cinq journées nécessaires à l'équipe de VALE NC pour réaliser le suivi. Durant la matinée de cette dernière journée, les évaluations ont porté sur les trois stations témoins hors périmètre d'impact. Durant l'après-midi, une visite des locaux de préparation des échantillons de sols et de feuilles prélevés et une présentation des procédures de saisies et d'analyses des données acquises avec le protocole de mars 2016 ont été réalisées.

Dates des missions terrain	06/12/2017	14/12/2017	18/12/2017
Station visitées	SO1 - SO25 - SO15 - SO8 - SO9	SO19 - SO21 - SO26 - SO23 - SO22	SO20 - SO27 - SO28
Acteurs présents	VALE NC Bota Environnement	VALE NC Bota Environnement Œil	VALE NC Bota Environnement
Actions réalisées	- observation de la mise en œuvre du suivi - initiation à la prise de données	- co-échantillonnages des paramètres du suivi sur plusieurs stations	- visite des locaux de préparation des échantillons de sols et de feuilles - présentation des procédures de saisies et d'analyses des données

L'équipe de VALE NC réalisant le suivi est composée de trois opérateurs, membre de l'équipe Conservation du Service Préservation de l'Environnement de VALE NC. Ces trois opérateurs sont les mêmes depuis le début de la mise en place du protocole de suivi en mars 2016 : l'ingénieure responsable et 2 techniciens de l'équipe Conservation.

Des comparaisons par co-échantillonnages des paramètres du suivi relevés sur plusieurs stations ont été réalisées, afin de confronter les résultats du suivi relevés par Bota.environnement avec ceux acquis par les opérateurs de VALE NC et afin de discuter de ces résultats. Cette démarche permet de favoriser le dialogue avec les opérateurs sur les méthodes d'appréciation de la notation des différents paramètres et de mettre en lumière les difficultés et variabilités potentielles liées à l'appréciation de l'opérateur.

Les résultats de l'évaluation de la mise en œuvre du protocole de suivi de l'état de santé de la végétation sont présentés successivement, en définissant les paramètres suivis, en décrivant leur mise en œuvre par les opérateurs et en appréciant la qualité de leur mise en œuvre.

Une fois l'ensemble des résultats discuté, une synthèse de l'analyse critique et des recommandations sur la bonne mise en œuvre du protocole de suivi symptomatologique est établie.

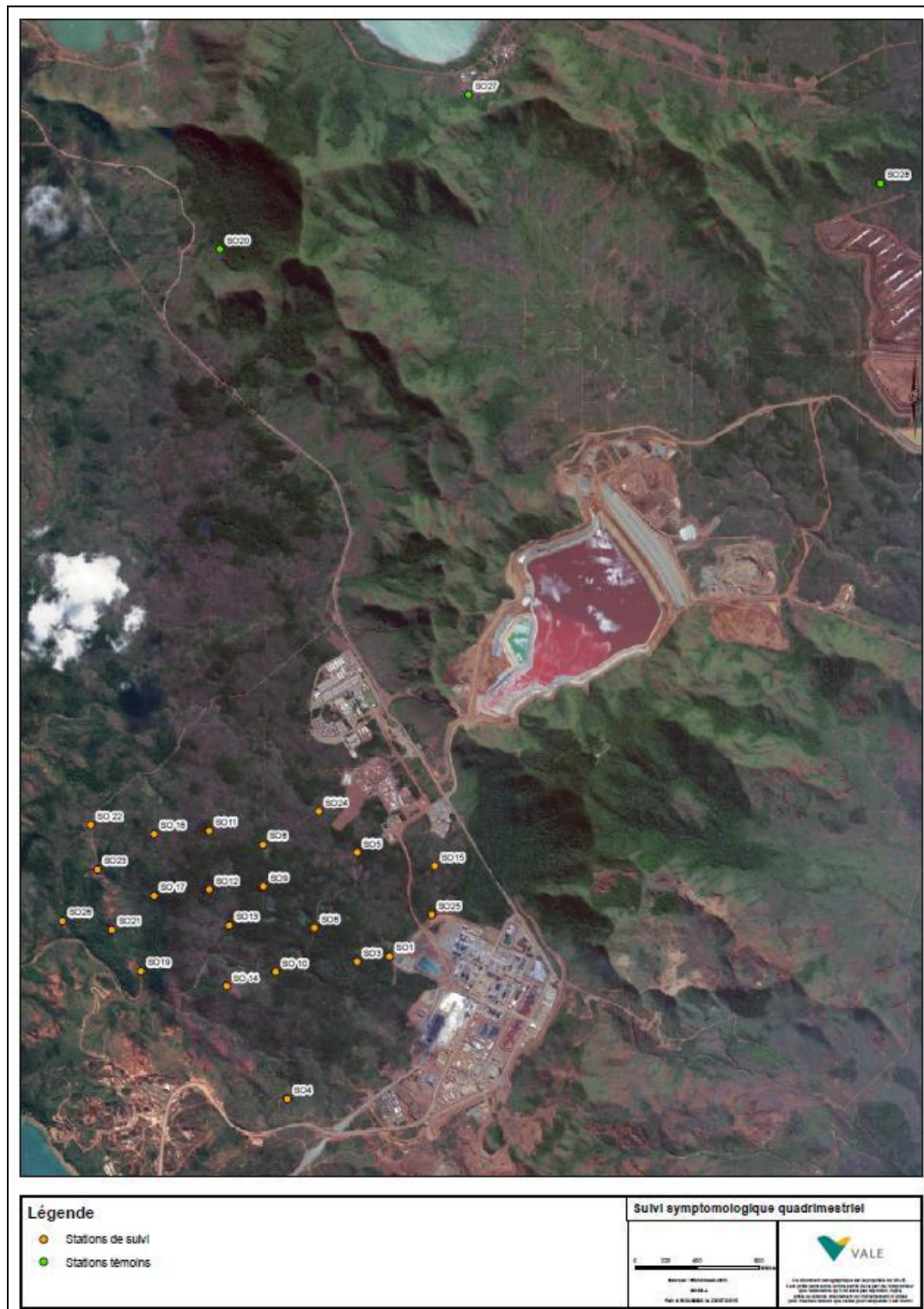


Figure 2. Répartition des stations de suivi dans la zone impactée (points orange) et des trois sites témoins (points vert)
(source VALE NC, 2016).

Chapitre IV - RESULTATS

IV.1. Le dispositif expérimental, la fréquence et la durée du suivi

IV.1.1. Evaluation de la mise en œuvre du dispositif

Le protocole de suivi symptomatologique présenté par VALE NC en 2016 prévoit le suivi de 25 stations (Fig 2). 22 stations sont localisées dans le bassin versant du Creek Baie Nord de 200 à 3 700 m en aval du site industriel sur un rayon de 8 km². Ces 22 stations sont positionnées au sein et en périphérie de la zone d'impact identifiée en 2011 (Fig. 1 et Fig. 2). Trois stations témoins situées à plus de 5 km du complexe industriel au niveau du Pic du Grand Kaori, de la plaine des lacs et de la Kué Nord, soit hors influence des émissions atmosphériques (Tab 1), sont également prévues pour être suivies afin d'établir une comparaison avec les sites localisés au sein de la zone impactée par les émissions de soufre.

Pour compléter le dispositif et mettre en relation les résultats du suivi symptomatologique sur la végétation et les résultats issus d'une autre étude de suivi des massifs forestiers par télédétection dans le cadre de l'étude VEGUSINE, des stations de suivi ont été établies au sein des massifs forestiers impactés suivis par télédétection (Fig. 3).



Figure 3. Zoom sur les stations de suivi dans le bassin versant du Creek Baie Nord. L'état de santé (activité photosynthétique) des massifs forestiers en pointillé est suivi par télédétection (Etude Vegusine, Bluecham) (source VALE NC, 2016).

Point	Code	X	Y	Emplacement topographique	Habitat	Exposition	Canopée	Données Historique	Historique Symptômes	Repères
1	S01	166,90718	-22,3308	Haut dôme de cuirasse	Maquis paraforestier à <i>Arillastrum</i>	Lisière	<i>Gymnostoma</i>	Suivi Symptôme/tubes passifs	Ancien/ Récent	Bord bassin premier filò
3	S03	166,9048962	-22,33115071	Vallon de cuirasse	Maquis paraforestier à <i>Arillastrum</i>	Fermée	<i>Arillastrum</i>	Végusine	Ancien	
4	S04	166,90004	-22,34016	Pente cuirassée	Maquis paraforestier à <i>Arillastrum</i>	Lisière	<i>Arillastrum</i>	Végusine	Pas symptômes	Limite Sud Route du port
5	S05	166,90485	-22,32398	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Ouvert			Récent	Piste CDE
6	S06	166,90189	-22,32894	Pente cuirassée	Maquis arbustif dense	Lisière	<i>Tristaniaopsis</i>	Suivi Symptôme/tubes passifs	Ancien/Récent	
8	S08	166,89821	-22,32351	Haut dôme cuirasse	Maquis paraforestier à <i>Arillastrum</i>	Lisière piste	<i>Arillastrum</i>		Pas symptômes	Limite nord
9	S09	166,89828	-22,32623	Pente cuirassée	Maquis paraforestier à <i>Arillastrum</i>	Lisière piste	<i>Arillastrum</i>		Anciens symptômes	
10	S10	166,9048962	-22,33115071	Pente cuirassée	Forêt Chêne gomme	Lisière ancienne sentier	<i>Arillastrum</i>	Végusine	Ancien	
11	S11	166,89441	-22,32262	Haut dôme cuirasse	Maquis paraforestier à <i>Arillastrum</i>	Lisière piste	<i>Arillastrum</i>		Pas symptômes	Limite Nord
12	S12	166,89444	-22,32647	Pente cuirassée	Maquis paraforestier à <i>Gymnostoma</i>	Lisière piste	<i>Gymnostoma</i>		Anciens symptômes	
13	S13	166,89587	-22,32882	Dôme cuirasse	Maquis paraforestier à <i>Arillastrum</i>	Ouvert	<i>Gymnostoma</i>		Ancien	
14	S14	166,89572	-22,332799	Dôme cuirasse	Forêt Chêne gomme	Lisière piste	<i>Arillastrum</i>	Végusine	Ancien/Récent	
16	S16	166,8905523	-22,3285594	Pente cuirassée	Maquis paraforestier à <i>Gymnostoma</i>	Lisière plateforme sondage	<i>Gymnostoma</i>		Pas de symptômes	
17	S17	166,8905566	-22,32690833	Vallon cuirasse	Maquis paraforestier à <i>Gymnostoma</i>	Lisière plateforme sondage	<i>Gymnostoma</i>		Anciens symptômes	
19	S19	166,88968	-22,33186	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert à <i>Arillastrum</i>	Lisière Route	<i>Arillastrum</i>	Végusine	Anciens symptômes	
20	S20	166,89494	-22,28448	Pente cuirassée	Forêt Chêne gomme	Lisière piste	<i>Arillastrum</i>	Suivi Symptôme/tubes passifs	Pas de symptômes	Pic du Grand Kaori
21	S21	166,8876116	-22,32914126	Cuirasse érodée	Forêt Chêne gomme	Lisière Route	<i>Arillastrum</i>	Végusine	Anciens symptômes	
22	S22	166,88607	-22,3228707	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	<i>Tristaniaopsis</i>		Pas de Symptômes	Limite Nord Ouest
23	S23	166,886554	-22,325204	Pente érodée	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	<i>Tristaniaopsis</i>	Suivi Symptôme/tubes passifs	Anciens symptômes	Bord de route
24	S24	166,90213	-22,32129	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Lisière Route	<i>Tristaniaopsis</i>		Pas de Symptômes	Limite Nord Est Aine entreposage Nord
25	S25	166,91013	-22,32802	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Lisière Route	<i>Tristaniaopsis</i>	Suivi Symptôme/tubes passifs	Anciens/récents	Limite Est
26	S26	166,88412	-22,3286	Pente érodée	Maquis dense à <i>Arillastrum</i>	Ouvert	<i>Arillastrum</i>	Végusine	Pas de symptômes	Limite Ouest
27	S27	166,91238	-22,27429	Pente érodée	Maquis ligno-herbacé	Ouvert	<i>Tristaniaopsis</i>	Suivi Symptôme/tubes passifs	Pas de symptômes	Pépière
28	S28	166,94145	-22,27995	Pente érodée	Maquis paraforestier	Lisière	<i>Gymnostoma</i>	Suivi mine	Pas de symptômes	SMLT

Tableau 1. Description des caractéristiques géographiques et écologiques des stations de suivi. Les stations surlignées en vert correspondent aux stations témoins (source VALE NC, 2016).

Le suivi concerne huit espèces indicatrices présentant des symptômes évidents en cas de forte exposition au dioxyde de soufre (Tab. 2). Le choix des espèces suivies par station s'est basé sur leur abondance relative sur chaque station. L'espèce *Arillastrum gummiferum* a été privilégiée lorsqu'elle était suffisamment représentée sur les stations. Trois espèces ont été sélectionnées sur chaque station et l'évaluation des symptômes porte sur quatre individus par espèce.

3 espèces suivies par station et 4 individus par espèce											
Nom station	<i>Arillastrum gummiferum</i>	<i>Styphelia cymbulae</i>	<i>Gymnostoma deplancheanum</i>	<i>Codia spathulata</i>	<i>Tristaniaopsis 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	80	16	48	28	48	20	12		300	225
Photo panoramique par suivi											4
Photo suivi annuel											166
Nombre photos annuelles											1051

Tableau 2. Nombre d'individus évalués par espèce et nombre de photographies par station de suivi. Les stations surlignées en vert correspondent aux stations témoins.

Evaluation du dispositif expérimental et de sa mise en œuvre :

Le nombre, la localisation et les critères de sélection des stations sont conformes au dispositif présenté par VALE NC dans le protocole de suivi de 2016. 22 stations sont localisées au sein et à proximité de la zone impactée par le dépérissement foliaire de plusieurs espèces végétales et 3 stations témoins sont positionnées dans les secteurs prévus hors zone d'influence des émissions atmosphériques de l'usine.

Les informations relatives à la description de chacune des stations de suivi étudiées durant les trois journées de terrain réalisées avec les opérateurs sont conformes aux descriptions renseignées dans le Tableau 1 du protocole de suivi (VALE NC 2016).

Note : La station SO15 représentée sur la Figure 2 et la Figure 3 n'apparaît pas dans le Tableau 1 (Description des caractéristiques géographiques et écologiques des stations de suivi) du manuscrit du protocole de suivi fourni par VALE NC, alors que la station a bien été étudiée par les opérateurs. Il semblerait que l'absence de la ligne dans ce tableau soit due à un problème de mise en page du document méthodologique. Les autres stations sont localisées dans des formations végétales allant du maquis arbustif ouvert des crêtes au maquis para-forestier et forêts sur des plateaux ou vallons de cuirasse (Tab.1).

Au total, l'évaluation symptomatologique porte sur 300 individus sur l'ensemble de la zone d'étude. Le tableau 2, repris du protocole de 2016 présente les espèces sélectionnées pour chaque station. Sur le terrain, les individus suivis sont balisés d'une part par une rubalise rouge pour visualiser de loin l'individu et d'autre part par une étiquette métallique gravée avec le numéro de l'individu.

*Note : Ce tableau nécessite une mise à jour - pour la placette SO6 une espèce suivie a été modifiée, le *Styphelia cymbulae* a été remplacé par *Tristaniopsis guillainii*. Lors du travail de terrain, l'équipe en charge du suivi à bien pris en compte cette modification qui est indiqué sur la fiche de terrain.*

Recommandations :

L'évaluation devait porter sur des individus présents sur un rayon de 10 m du centre de la station. Les dimensions réelles des stations de suivi sont aléatoires et dépendent de l'emplacement des 4 individus des 3 espèces indicatrices suivies sur chaque station.

La principale recommandation est de matérialiser la dimension de chaque station qui devra être équivalente pour chacune d'elle, afin de standardiser les notations des paramètres liés aux observations sur l'ensemble de la surface de la station. Il est recommandé de concevoir pour chaque station un schéma qui localise les bornes des stations et les individus des espèces indicatrices du suivi (coordonnées GPS).

Mis à part le fait de matérialiser sur le terrain la dimension de chaque station, de géoréférencer les individus suivis et d'effectuer deux mises à jour dans les tableaux 1 et 3 du manuscrit du protocole de 2016, la mise en œuvre du dispositif expérimental correspond aux préconisations du protocole de 2016. Depuis 2012, ce dispositif a été évalué et modifié par deux fois et semble aujourd'hui adapté aux objectifs du plan de suivi.

IV.1.2. Suivi photographique des milieux dans la zone impactée

Le protocole prévoit à chaque suivi la prise de 4 photographies de la zone impactée sur 4 points hauts différents. Il est prévu que l'emplacement pour la prise de photo soit toujours le même pour permettre de faire des comparaisons dans le temps sur les mêmes secteurs afin d'évaluer des changements visuels de la canopée.

Il est prévu que ces photographies soient mises en relation avec les résultats issus de l'étude de suivi des massifs forestiers par télédétection VEGUSINE.

Durant les trois jours d'observation terrain, l'équipe de Bota.Environnement a assisté à la réalisation de trois prises de vues à proximité de SO19, SO24 et SO16. L'emplacement de la prise de vue est matérialisé par un repère visuel (piquet).

Evaluation du suivi photographique et de sa mise en œuvre :

L'emplacement des prises de vue n'est pas conforme à la localisation des 4 points de repère fixes prévus dans le protocole de 2016. Les prises de vue sont réalisées aux abords des points S O04, SO16, SO19, et SO24. La prise de vue du point SO16 a remplacé celle du point SO23. Sur le même emplacement, l'opérateur réalise plusieurs clichés, il gardera le plus exploitable. L'opérateur est le même à chacun des suivis depuis le début de la réalisation du protocole 2016, il est habitué à ce travail et connaît bien l'angle de la prise de vue. En cas de changement d'opérateurs, l'idéal serait de matérialiser sur le terrain l'angle des prises de vues par une flèche directionnelle. La carte de la Figure 3 ci-dessous est à mettre à jours.

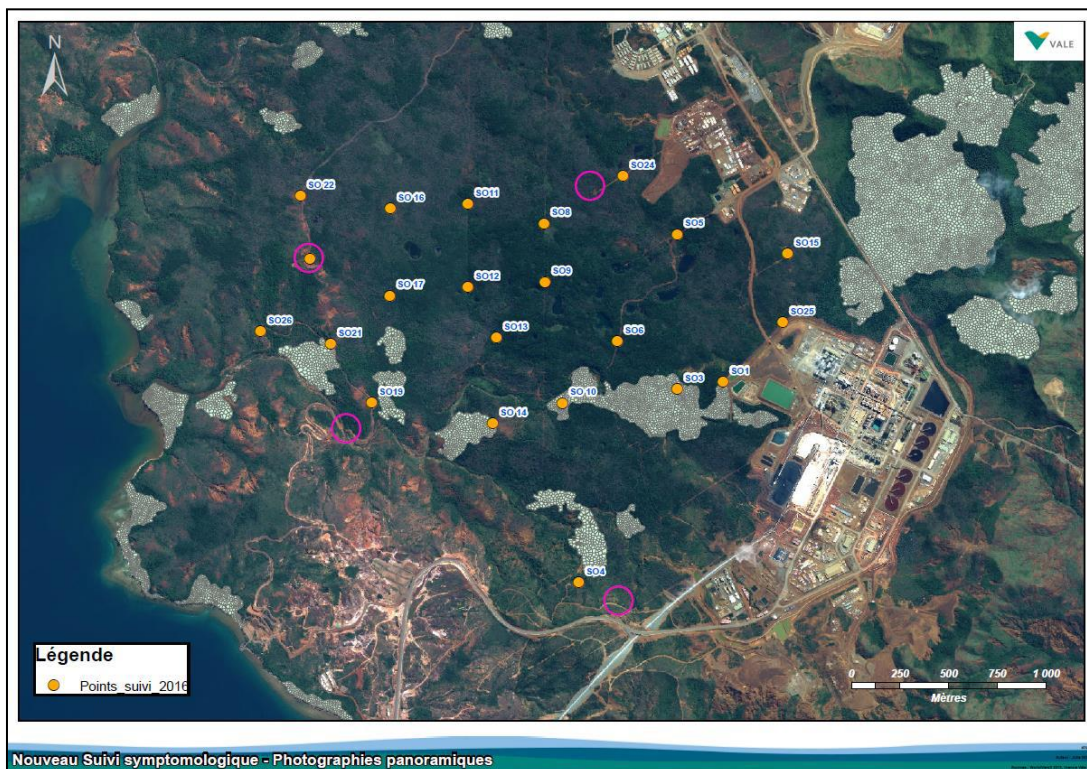


Figure 4. Localisation des 4 points de repères fixes pour les photos panoramiques de suivi de l'état général visuel de la végétation sur la zone impactée (source VALE NC, 2016).

IV.1.3. Fréquence de suivi

Le suivi symptomatologique est réalisé de façon quadrimestrielle comme indiqué dans le protocole de suivi de 2016. Les suivis ont été réalisés au mois d'avril, aout et décembre 2017.

Le protocole précise que ces trois périodes correspondent aux saisons climatiques qui influencent les cycles de croissance des végétaux. Avril correspond à la fin de la saison de la pluie accompagnée d'une baisse de température et d'une réduction en fréquence de la pluviométrie. Aout correspond au début de la saison sèche accompagné de températures plus basses. Décembre correspond à la fin de la saison sèche et est accompagné des températures les plus élevées.

La fréquence de suivi quadrimestriel, correspondant aux périodes qui influencent les cycles de croissance des végétaux, est cohérente avec l'objectif d'évaluation de l'état de santé de la végétation.

Les premières campagnes de suivis réalisées avec le protocole de 2016 datant d'avril et d'aout 2017 ont été réalisées par les trois mêmes opérateurs que ceux accompagnés lors de la mission terrain de décembre 2017.

IV.1.4. Evaluation de la durée impartie pour la réalisation du suivi

Le protocole de 2016 prévoit que la durée impartie à la réalisation du suivi des 25 stations sera de 5 jours (sans intempérie).

La mission d'accompagnement terrain de vérification de la mise en œuvre du protocole de suivi s'est déroulé sur 3 journées les 6, 14 et 18 décembre 2017. Les deux membres de Bota Environnement ont procédé à des observations sur l'acquisition des données du suivi par l'équipe VALE NC et à des comparaisons par co-échantillonnages des paramètres impliqués. Sur le terrain, le temps impartie à la prise de données sur chacune des stations à l'étude a été chronométré afin de mesurer le temps nécessaire à la réalisation de l'ensemble du suivi (Tab.3).

Date	n° stations	Temps (min.)
06/12/2017	SO1	65
	SO25	50
	SO15	55
	SO8	50
	SO9	55
14/12/2017	SO19	60
	SO21	45
	SO26	50
	SO23	50
	SO22	45
18/12/2017	SO20	55
	SO27	45
	SO28	50
Temps moyen par station		52

Tableau 3. Evaluation du temps passé par les équipes réalisant les suivis sur chaque station à l'étude durant la mission d'accompagnement terrain.

L'équipe réalisant le suivi est toujours composée de trois personnes, sauf absence d'un des employés de VALE NC. Un binôme est occupé aux tâches de prises de données relatives aux paramètres d'évaluation de la qualité de la végétation. Le troisième opérateur est affecté aux prélèvements de sols et de feuilles et aux prises photographiques relatives à la station, aux symptômes foliaires et à l'état du lichen.

Cette mission d'accompagnement a permis de calculer que le temps pour réaliser le suivi d'une station était de l'ordre d'une heure à cela il faut ajouter le temps de déplacement entre deux stations. Une équipe de trois personnes traite en moyenne 5 stations par jour. Le suivi de l'ensemble des 25 stations est réalisé comme prévu sur une durée correspondant à environ 5 jours à 3 opérateurs avec une répartition des tâches précise et bien rodée.

IV.2. Les paramètres de suivi de l'état de santé de la végétation

Le protocole de suivi de 2016 doit permettre d'évaluer l'effet des émissions de dioxyde de soufre sur la végétation. Pour ce faire, il a été sélectionné plusieurs paramètres (Tab.4) permettant de quantifier le degré de sévérité des symptômes foliaires et de quantifier le soufre atmosphérique et foliaire provenant de l'usine de VALE NC dans le but de comparer ces données et de déterminer ainsi l'effet des émissions de soufre sur la végétation aux abords de l'usine.

Les évaluations des paramètres de suivi se font, selon les paramètres, soit par des observations globales sur l'ensemble de la placette, soit par des observations spécifiques sur les individus balisés des espèces indicatrices et parfois sur les deux à la fois. Les plants balisés pour l'évaluation des symptômes foliaires concernent 12 individus par station (4 individus de 3 espèces indicatrices parmi les 8 espèces sélectionnées présentant des symptômes évidents en cas de forte exposition au dioxyde de soufre) (Tab.2).

La mise en œuvre de certains paramètres de suivi n'est pas détaillée dans le protocole établi en 2016. Nous définirons dans ce paragraphe les différents paramètres à l'étude (Tab.5), nous détaillerons leur mise œuvre et évaluerons la pertinence et la qualité du travail réalisé.

Tableau 4. Liste des paramètres suivis, fréquence de suivi et dispositif de suivi en place

Evaluation de l'état de santé du milieu	Paramètres suivis	Fréquence de suivi	Dispositifs de suivi
Suivi symptomatologique de la végétation	Symptômes foliaires	Quadrimestrielle	25 stations - 3 espèces par stations - 4 individus par espèce
			8 à 12 Photographies par station
			4 photographies de la zone d'étude selon différents axes
Mesure de la qualité de l'air	Dioxyde de soufre atmosphérique	Mensuelle	10 tubes passifs
Reprise de la végétation	Jeunes cônes foliaires, jeunes feuilles et plantules	Quadrimestrielle	25 stations
Présence de poussières/cendres	Poussières/cendres	Quadrimestrielle	25 stations
Phénologie	Boutons floraux, Fleurs, Fruits	Quadrimestrielle	25 stations
Etat phytosanitaire	Attaques insectes, champignons, stress hydriques, brûlures...	Quadrimestrielle	25 stations
Etat de santé des lichens terrestres	Peuplement de lichens terrestres	Quadrimestrielle	13 stations
Analyse chimique foliaire	Soufre foliaire	Annuelle	18 stations au total ; 2 espèces d'arbre : <i>Arillastrum gummiferum</i> et <i>Garcinia neglecta</i> 13 stations par espèce
Analyse chimique des sols	PH, soufre et conductivité	Annuelle	25 stations

Le tableau 5 ci-dessous liste les différents paramètres de suivi étudiés et identifie les opérations de VALE NC pour chacune des tâches réalisées.

Tableau 5. Liste des paramètres du suivi symptomatologique et identification des intervenants dans le temps.

Paramètre	Suivi avril 2017	Suivi août 2017	Suivi décembre 2017	Champ sur fiche terrain
Météo	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
Odeur H2S SO2	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
SO2 ponctuel	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
SO2 échantillonneurs passifs	BV	BV	BV	oui
Prélèvements sols analyses de S	/	/	Tech.	oui
Prélèvement feuilles analyses de S	/	/	Tech.	oui
Espèces exogènes	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
Coupe de bois	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
Rouille myrtacées	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
Cendre/poussière	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
Qualité station	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
Reprise végétation	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
Etats lichens	Ing. ou Tech.	Ing. ou Tech.	Tech.	oui
Phénologie	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
Etat phytosanitaire	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
Symptômes foliaires indices	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing./Tech.	oui
Symptômes foliaires photos	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Ing. ou Tech. ou Ing./Tech.	Tech.	oui
Photos suivi zone impactée	Ing. ou Tech.	Ing. ou Tech.	Tech.	oui

Initiales : **Ing.** : Ingénieure responsable de l'équipe conservation de Vale NC ; **Tech.** : techniciens de l'équipe conservation de Vale NC ; **BV** : Bureau Veritas.

Paramètres de quantification du degré de sévérité des symptômes foliaires **en bleu** - paramètre de quantification du soufre atmosphérique et foliaire **en gris**.

Tableau 6. Fiche de saisie des données de terrain. Elle prévoit les prises de notes de l'ensemble des paramètres suivis sur le terrain par l'équipe conservation de VALE NC (Tab. 5). La fiche est constituée d'encarts réservés à la notation des indices suivant et aux commentaires associés : **météo, vent, odeur de H₂S et SO₂, présence de rouille des myrtacées, présence d'espèces exogènes, indice de l'état des lichens, indice de reprise de la végétation, indice de la présence de poussière et de cendres, indice de la qualité globale de la station, indice de sévérité des symptômes foliaires, indice de l'état phytosanitaire et de l'état phénologique des espèces suivies** (les valeurs des différents indices sont rappelées en marge de la fiche et permettent à tout moment à l'observateur de se remémorer l'échelle de notation de chaque indice).

(1) : ID des individus (entre 1 et 4) évalués par espèce, pour chacun des degrés (ex: rien, léger, fort...) (2) : "0" rien, "1" jeunes feuilles saines et anciennes atteintes, "2" jeunes feuilles atteintes et anciennes saines, "3" jeunes et anciennes feuilles atteintes, "NA" pas de (3) : "Chp" champignon, "Chen" chenille ou mouche mineuse, "Pic" piqure d'insecte, Stress ("Car" carence, "Sech" sèche (4) : "Fl" fleur, "Fr" fruit, "B" bouton, "JF" jeune feuille (5) : "-" pour une régression du tapis de lichen, "0" pour aucun changement du tapis et "+" pour un développement du tapis de lichen (6) : "L" Leger, "M" moyen, "F" Fort, "R" rien

Description générale de la station

Météo : _____

Direction vent : _____

Odeur/fumée particulière : _____

Date : _____

coupe de bois : _____

Observateur : _____

Station : _____

Rouille, espèces touchées : _____

Espèces exogènes : - animale : _____

- végétale : _____

Lichens		Commentaires : _____
couleur blanc/noir	dvp - / 0 / +	
	(5)	

reprise de la végétation				Commentaires : _____
Rien	Légère	Modérée	Forte	

Poussières/cendres				Commentaires : _____
rien	léger	moyen	fort	

Indice de qualité globale de la station (initial : _____)				Commentaires : _____
mauvais	moyen	Bon	Très bon	

Description détaillée des individus par station

Sévérité symptôme foliaire						Type de symptômes				Phytosanitaire		Phénologie		Commentaires : _____
rien	léger	moy	fort	très fort	mort	Chl	Néc	Déf	Obs	Chp, Chen, Pic, stress	D° de sév	Fl, Fr, BV ou/et JF	D° de dvp	
(1)									Nv (2)	(3)	(6)	(4)	(6)	
									vieux					
									Nv					
									vieux					
									Nv					
									vieux					

IV.2.1. Présence d'espèces exogènes végétales ou animales

Définition du paramètre :

Le relevé d'espèces exogènes, dont aucune information n'est donnée dans le protocole de suivi de 2016, se fait sur chaque station et consiste à observer et identifier leur présence.

Les espèces végétales sont notées par observation directe. Dans le cas des espèces animales, seules les 4 fourmis invasives, la fourmi folle jaune (*Anoplolepis gracilipes*), la fourmi de feu tropical (*Solenopsis geminata*), la fourmi noire à grosse tête (*Pheidole megacephala*), la fourmi électrique (*Wasmannia auropunctata*) et l'oiseau appelé bulbul (*Pycnonotus cafer*) sont observables directement sur le terrain. La présence de cerf, de cochon sauvage, de chat et de rat est détectée par l'observation et la consignation de traces de pas, de fèces, de fouille, d'écorçage et d'abroutissement.

Mise en œuvre observée :

Les observations de détection d'espèces exogènes sont effectuées au cours du travail des relevés de l'état de santé de la végétation par le binôme ingénieur/technicien. Le travail consiste en des observations sur le sol de la placette lors des déplacements et des observations myrmécologiques sur les espèces végétales indicatrices. Le second technicien complète les observations par un examen des abords de la station permettant d'effectuer une veille en zone tampon. Ainsi, l'ensemble de la surface de la placette est arpentée et les prises de notes du travail de recherche d'espèces exogènes sont compilées dans le champ de la fiche de relevé terrain prévue à cet effet.

Evaluation et appréciation de la bonne mise en œuvre :

L'étude de ce paramètre est simple à mettre en œuvre. Les opérateurs du suivi sont compétents dans la détection et l'identification d'espèces exogènes. La méthodologie d'acquisition des données pour les espèces végétales, qui consiste à des observations sur la surface de la placette, est adaptée aux résultats attendus. Pour les espèces animales, fourmis - oiseaux, la méthode n'est pas standardisée (transect de capture - point d'écoute), elle consiste simplement à recueillir des informations complémentaires par des observations opportunistes lors des relevés sur la placette.

IV.2.2. Présence de rouille des myrtacées et espèces impactées

Définition du paramètre :

Le paramètre de présence de rouille des myrtacées, dont aucune information méthodologique n'est donnée dans le protocole de suivi de 2016, consiste à observer et à noter la "présence/absence" de rouille au sein de chacune des stations de suivi.

Mise en œuvre observée :

Les observations de détection de la rouille sont effectuées au cours du travail de relevé de l'état de santé de la végétation par le binôme ingénieur/technicien. Le travail consiste en des observations sur les individus des espèces de myrtacées indicatrices balisées et observées (*Arillastrum gummiferum* et *Tristaniopsis guillainii*), ainsi que sur l'ensemble des espèces de myrtacées présentes sur la placette. L'autre technicien complète les observations par un examen des abords de la station permettant d'effectuer une veille en zone tampon. Ainsi, l'ensemble de la surface de la placette est arpentée permettant d'avoir une vue exhaustive sur la présence de rouille.

La fiche terrain prévoit un champ pour les notations de la "présence/absence" de rouille et du nom et numéro de l'espèce infectée le cas échéant.

Evaluation et appréciation de la bonne mise en œuvre :

L'étude de ce paramètre est simple à mettre en œuvre, les opérateurs du suivi sont compétents dans la détection de la présence de rouille et dans l'identification des espèces impactées. La méthodologie d'acquisition de la donnée du paramètre consiste simplement à recueillir des informations complémentaires par des observations opportunistes lors des relevés sur la placette.

IV.2.3. Observation de coupes de bois

Définition du paramètre :

Le paramètre de présence de coupe de bois, dont aucune information méthodologique n'est donnée dans le protocole de suivi de 2016, consiste à observer et à noter la "présence/absence" de coupe de bois au sein de chacune des stations de suivi.

Les coupes de bois présentes sur les stations au moment de la mise en place du suivi ont été répertoriées et photographiées. Aussi, le suivi des coupes de bois ne concerne que les nouvelles coupes intervenues entre deux campagnes de suivi terrain.

Mise en œuvre observée :

Les opérateurs observent la présence de nouvelle coupe de bois sur l'ensemble de la superficie de la placette suivie. Le cas échéant, la coupe de bois est photographiée, géoréférencée et notifiée dans le champ de la fiche terrain prévu à cet effet. L'espèce de l'arbre coupé est dans la mesure du possible identifiée.

Evaluation et appréciation de la bonne mise en œuvre :

L'étude de ce paramètre est simple à mettre en œuvre, les opérateurs du suivi sont compétents dans la détection de la présence de coupe de bois. La méthodologie d'acquisition de la donnée du paramètre est adaptée au résultat attendu.

Le géoréférencement des coupes de bois au sein de la placette, qui ne semble pas systématique, serait nécessaire. Il est recommandé que les opérateurs soit munis de fiches de géoréférencement des anciennes coupes, afin de visualiser de meilleure façon les anciennes coupes, des coupes récentes. Ceci permettrait de mieux suivre dans le temps l'évolution des coupes de bois sur chacune des placettes.

IV.2.4. Indice de présence de cendres et/ou de poussières

Définition du paramètre :

Le protocole de suivi de 2016 prévoit l'attribution à chaque station d'un indice permettant d'évaluer la présence et l'abondance de poussières ou de cendres sur la végétation de la façon suivante :

- **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 (Figure) 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 (Figure). 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 et probablement récente). Les lichens et la litière au sol sont aussi couverts que la végétation (Figure). On estime que plus de 50 % des individus présentent de la poussière en couche épaisse voire de la poussière sous forme de plaque.

Mise en œuvre observée :

Sur chacune des stations une note globale de présence des cendres et poussières est attribuée à la station en fonction de l'ampleur des constatations sur l'ensemble des espèces de la surface de la station. Pour ce faire, l'ensemble des parties végétales est pris en compte : sommités, feuilles du houppier intermédiaire et feuilles basses. En effet la présence de poussière uniquement sur les feuilles

basses, laisse à penser à un ancien dépôt, dont les parties hautes de la plantes sont dépourvues après lessivage due aux précipitations, alors que la présence de poussières sur l'ensemble de la plante peut permettre de conclure à une nouvelle déposition de cendres ou de poussières, correspondant à un impact en cours.

Les observations de détection sont effectuées au cours du travail de relevé de l'état de santé de la végétation par le binôme ingénieur/technicien. Le travail consiste en des observations lors des déplacements et sur les espèces indicatrices. Le suivi de ce paramètre ne se limite pas aux espèces indicatrices, l'ensemble des espèces est pris en compte. Le deuxième technicien complète les observations par un examen des abords de la station permettant d'effectuer une veille sur l'ensemble de la surface de la placette, afin d'avoir une vue exhaustive de la présence de cendres et/ou de poussières sur la végétation.

Evaluation et appréciation de la bonne mise en œuvre :

La définition et la notation des indices de présence des cendres et poussières utilisées par les opérateurs (nul, léger, moyen, fort) correspond en tous points à celle du protocole de 2016 et permet une bonne évaluation de ce paramètre. Une série de photographies numériques des relevés précédents est disponible sur le terrain et permet en permanence à l'opérateur de confronter son interprétation aux relevés précédents servant d'outil de calibration de ce paramètre. Afin de mieux standardiser le protocole, le relevé de ce paramètre devrait concerner chaque individu suivi, permettant d'attribuer une note à chaque individu et de suivre son évolution dans le temps. Les observations globales sur le reste de la station seront succinctes et sous la forme de commentaires.

IV.2.5. Indice de reprise de la végétation

Définition du paramètre :

Le protocole de 2016 prévoit l'attribution à chaque station d'un indice permettant d'évaluer la reprise de la végétation de la façon suivante :

- ***Rien*** : Absence de jeunes pousses visibles à hauteur d'homme sur les arbres et absence de plantules au sol.
- ***Léger*** : Jeunes pousses visibles à hauteur d'homme sur 10% des arbres/arbustes, recrutement de quelques plantules au sol.
- ***Modérée*** : Jeunes pousses visibles à hauteur d'homme sur 20% des arbres/arbustes, recrutement récent de quelques plantules au sol.
- ***Fort*** : Jeunes pousses visibles à hauteur d'homme sur plus de 20% des arbres, recrutement de plantules au sol récent formant des concentrations notables.

Mise en œuvre observée :

L'indice est attribué après examen détaillé des espèces indicatrices et de l'ensemble du cortège d'espèces présent sur la station, intégrant toutes les parties végétales observables.

La note de l'indice est donnée en se référant à sa définition et en évaluant le pourcentage de reprise des espèces de la station.

Evaluation et appréciation de la bonne mise en œuvre :

L'indice de reprise de la végétation utilisé par les opérateurs du suivi reprend en tout point les définitions du protocole de 2016 en terme de pourcentage d'individus présentant des signes de reprises (feuilles jeunes, bourgeons, recrutement de plantules). L'attribution de la notation de l'indice est conforme au protocole de suivi "rien, léger, modéré, fort".

La case commentaire de la fiche terrain permet de préciser la liste des espèces présentant un développement végétatif récent.

IV.2.6. Évaluation de l'état de santé des lichens terrestres

Définition du paramètre :

Le protocole de suivi de 2016 prévoit que les lichens terrestres soient utilisés comme bio-indicateurs des retombées des émissions de soufre atmosphérique. 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. *Cladonia aggregata* et *Cladonia pycnoclada* forment des colonies au sol sur 11 stations dans la zone de dépérissement et sur 2 sites témoins : S05, S08, S011, S013, S015, S016, S017, S023, S024, S027, S028.

L'objectif sera de comparer les colonies présentes sur les zones témoins aux colonies présentes sur les stations en périphérie et au sein de la zone impactée, afin d'évaluer d'éventuels changements.

Il est prévu de comparer une vingtaine de colonies balisées de *Cladonia* par station, par la qualification de l'état de santé des tissus aériens de la façon suivante :

- Couleur crème/blanc = vivant
- Couleur marron = nécrosé et mort
- Dénombrement des « têtes identifiables » sur photographie

Mise en œuvre observée :

Les lichens terrestres *Cladonia sp.* sont suivis dans des placettes de 20 cm de côté matérialisées sur le terrain par 4 piquets entourés de rubalise.

Une photographie est prise selon le même point de vue et une analyse est effectuée au bureau afin d'établir une notation par comparaison avec l'image de la campagne précédente. A l'intérieur de la placette, le nombre de colonies (bulbe ou tête identifiable) vivantes ou mortes est comptabilisé sur la base du critère de couleur décrit dans le protocole 2016.

La comparaison du nombre de colonies vivantes entre deux relevés permet de donner une notation : + si le nombre de colonies vivantes augmente, 0 si le nombre de colonies vivantes est le même, - si le nombre de colonies vivantes décroît.

Les observations et photographies sont réalisées par le deuxième technicien ou l'ingénieur responsable en cas d'absence du technicien.

Evaluation et appréciation de la bonne mise en œuvre :

Les prises photographiques sont correctement effectuées. Les analyses photographiques semblent compliquées à interpréter. La différenciation des colonies mortes (sèches) et vivantes (humides) est difficile. Les causes de dépérissement ou de regain sont compliquées à évaluer. L'état des lichens semble varier selon les périodes d'humidité.

Il semble difficile en l'état de tirer des informations exploitables de ce suivi. Des études en recherches et développement devraient tout d'abord être entreprises sur cet indicateur pour établir une méthode d'évaluation des pollutions atmosphériques à l'aide du lichen.

IV.2.7. Phénologie

Définition du paramètre :

Le protocole de 2016 prévoit la réalisation de relevés phénologiques sur chaque individu suivi. Il consiste à relever la présence de boutons floraux, fleurs et/ou fruits. Les individus non suivis en fleurs ou fruits présents sur la station seront également dénombrés. Un indice est ensuite attribué à chaque espèce en fonction du nombre d'individus suivis et non suivis en fleur/fruits sur la station :

- ***Rien*** : Aucun individu suivi ou non suivi ne présente de fleur ou de fruit
- ***Léger*** : Un à cinq individus suivis et non suivis présentent des fleurs ou des fruits
- ***Moyen*** : Cinq à dix d'individus suivis et non suivis présentent des fleurs ou des fruits
- ***Fort*** : Plus de dix individus suivis et non suivis présentent des fleurs ou des fruits

Mise en œuvre observée :

Les observations des opérateurs concernent toutes les parties visibles des 12 individus suivis par station, les apex des chênes gommés étant difficiles à observer au-delà de 2 m de hauteur.

L'équipe de VALE-NC relève de la présence de boutons floraux, fleurs et fruits et réalise également une évaluation quantitative de l'état de développement du stade phénologique observé. Sur la fiche de terrain, il est prévu l'attribution à chaque individu balisé d'une note conforme à l'indice détaillé dans le protocole.

Les opérateurs notent également la présence de bourgeons végétatifs, permettant d'évaluer la reprise de la végétation (Cf. § IV.2.5). Les opérateurs indiquent que le relevé de bourgeons végétatifs / jeunes feuilles / cône foliaire du paramètre "phénologie" va être retiré pour l'intégrer au paramètre "reprise de la végétation".

Un examen supplémentaire, permet de recenser sous forme de remarque, les stades de floraison et fructification notoires de la cohorte d'espèces présentes mais non suivies.

Evaluation et appréciation de la bonne mise en œuvre :

L'indice de reprise de la végétation utilisé par les opérateurs du suivi reprend en tout point les définitions du protocole de 2016 en termes de nombre d'individus présentant des fleurs et/ou des fruits. L'attribution de la notation de l'indice est conforme au protocole de suivi "*rien, léger, moyen, fort*".

La case commentaire de la fiche terrain permet de préciser la liste des espèces présentant un développement d'organes reproducteurs.

IV.2.8. État phytosanitaire

Définition du paramètre :

L'évaluation de l'état phytosanitaire est réalisée sur les 12 individus des espèces indicatrices étudiées de chacune des stations. Elle consiste à relever la présence de champignons, de piqûres d'insectes, de feuilles croquées (chenille), de kystes/gales ou de symptômes qui pourraient être reliés à des carences (chlorose) et du stress hydrique...

Le protocole établi en 2016 présente un indice de sévérité de l'état phytosanitaire attribué à chaque espèce, en fonction de nombre d'individus suivis présentant des pathologies, de la façon suivante :

- ***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...), de kystes/gales.
- ***Léger*** : Quelques traces de piqûres d'insectes, de feuilles croquées (Chenille...), de kystes/gales ou présence de champignons ou encore la présence de symptômes de chlorose, de nécrose relatifs à un stress particulier (carences, sécheresse...) sont relevés sur un à deux individus suivis pour chaque

espèce et ne semble pas impacter leur état de santé (Floraison, Fructification, développement de nouvelles feuilles, défoliation).

- **Moyen** : *Des traces de piqures, de feuilles croquées (Chenille...), de kystes/gales ou le développement de champignons ou encore la présence de symptômes de chlorose, de nécrose 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 piqures, le développement de champignons ou encore la présence de symptômes de chlorose, de nécrose qui peuvent être liés à un stress particulier (carences, sécheresse, brûlures...) sont relevés sur trois à quatre individus suivis et semblent 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 30 % de la surface foliaire totale des individus.*

Mise en œuvre observée :

Sur le terrain, les agents étudient les 4 individus balisés des 3 espèces indicatrices de la station. Une note de qualité phytosanitaire est attribuée à chacun des 4 individus, puis une moyenne est réalisée afin d'attribuer une note phytosanitaire par espèce suivie tel que mentionné dans le protocole 2016.

Les plantes subissent une inspection générale poussée de toutes les parties végétales accessibles, et le cas échéant, sont répertoriés les symptômes suivants : champignons, morsures d'insectes, mouche mineuse, piqûres d'insectes, carence en nutriment, stress hydrique.

Afin d'aider l'opérateur dans le choix décisif de l'indice de qualité phytosanitaire, les notes des relevés précédents sont présentes sur le terrain et permettent d'avoir une vision relative sur l'évolution des symptômes éventuellement constatés.

En complément de ce travail répondant aux recommandations du protocole 2016, une inspection de la qualité phytosanitaire sur quelques individus de la cohorte d'espèces non suivies est réalisée sur la station lors des déplacements et les symptômes notoires ainsi que les espèces associées sont référencés en commentaire sur la fiche de terrain.

Evaluation et appréciation de la bonne mise en œuvre :

L'indice de l'état phytosanitaire de la végétation utilisé par les opérateurs reprend en tout point les définitions du protocole de 2016. Une note de sévérité est attribuée au symptôme constaté ("*rien, léger, moyen, fort*"), procurant ainsi une évaluation quantitative des impacts observés.

L'évaluation de l'état phytosanitaire d'une station est une phase critique dans l'acquisition des données de l'évaluation des impacts des émissions de soufre sur la végétation. Ce paramètre est complexe à apprécier, compte tenu des connaissances requises pour l'évaluation de l'impact des pathogènes sur les

végétaux (reconnaitre les carences, les traces de pathogène, les insectes,...), et compte tenu que les pathogènes peuvent occasionner des symptômes foliaires proches de ceux causés par le SO₂.

Cependant ce paramètre permet d'établir une sorte de bruit de fond sur les symptômes foliaires, au-delà duquel, les effets constatés sont jugés anormaux. L'équipe de VALE-NC apporte donc un grand soin dans l'évaluation de la qualité phytosanitaire de la station.

IV.2.9. Les symptômes foliaires (indice et photographie)

Définition du paramètre :

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.

Le protocole de 2016 prévoit un suivi des symptômes foliaires pour les 25 stations et concerne huit espèces indicatrices présentant des symptômes évidents en cas de forte exposition au dioxyde de soufre (Tab. 2 et 4). Le choix des espèces suivies par station est fondé sur leur abondance relative sur chaque station. L'espèce *Arillastrum gummiferum* a été privilégiée lorsqu'elle était suffisamment représentative sur les stations. Trois espèces ont été sélectionnées sur chaque station, l'évaluation portant sur 4 individus par espèce. Au total, l'évaluation symptomatologique porte sur 300 individus sur l'ensemble de la zone d'étude.

Il est prévu que le suivi symptomatologique foliaire intègre une évaluation visuelle qualitative des symptômes (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 de sévérité des symptômes foliaires est attribué à chaque espèce, en fonction du nombre d'individus suivis présentant des symptômes. L'indice doit permettre d'évaluer l'évolution des symptômes dans le temps de la façon suivante :

- **Rien** : *Aucun symptôme visible qui puisse être relié à une exposition au SO₂ atmosphérique. Symptôme pouvant être assimilé à des symptômes d'origine naturelle (avec descriptif du symptôme naturel dans la fiche terrain).*
- **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 sur une branche ou sur 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 dans ce cas sont répartis de manière localisée sur l'individu (une branche). L'état de santé de l'individu ne semble pas impacté malgré la présence de symptômes.
- **Fort** : Symptômes évidents 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 localisée sur l'individu (une branche). Mais l'état de santé global de l'individu ne semble pas impacté malgré la présence de symptômes.
- **Sévère** : Symptômes évidents 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.
- **« Vérification »** : Doute sur l'origine du symptôme : Symptômes d'origine naturelle ou liés à une exposition au SO₂ atmosphérique (Avec descriptif du symptôme dans la fiche terrain).

Le protocole de 2016 prévoit également la réalisation de photographies des trois espèces indicatrices suivies pour chacune des stations (Tab.2 et 4). Il est prévu qu'un individu par espèce soit photographié dans son ensemble ainsi qu'une branche balisée pour chaque station, afin de suivre l'évolution des symptômes foliaires dans le temps. Une photographie supplémentaire est prévue en cas d'apparition de nouveaux symptômes sur un des individus suivis.

Mise en œuvre observée :

Sur le terrain, les 12 individus suivis sont balisés d'une part par une rubalise rouge pour visualiser de loin l'individu et d'autre part par une étiquette métallique gravée avec le numéro de l'individu.

Comme prévu par le protocole pour le suivi photographique, un individu par espèce est balisé de couleur bleue afin d'être photographié dans son ensemble ainsi qu'une branche de cet individu. Une série photographique temporelle est ainsi réalisée et référencée dans une base de données.

Les différentes tâches de cette évaluation des symptômes sur le terrain ont été effectuées par les trois membres de l'équipe du suivi de la façon suivante :

- Le binôme composé de l'ingénieur/technicien a réalisé en concertation l'évaluation visuelle qualitative des symptômes foliaires (*chlorose, nécrose, défoliation*) et leur degré de sévérité associé

(rien, léger moyen, fort, très fort, mort) avec une distinction entre feuilles jeunes et vieilles pour chaque individu.

- Le second technicien est chargé de la réalisation des clichés photographiques des symptômes sur les espèces suivies.

Outre le suivi spécifique sur les espèces balisées, une veille minutieuse est effectuée par le second technicien sur les individus non suivis des espèces indicatrices présentes sur la station, ainsi que sur la cohorte d'espèces associées. Si des symptômes foliaires suspects sont constatés, une photographie est prise. La nature du symptôme, son degré de sévérité et l'espèce touchée sont notés en commentaire sur la fiche terrain.

L'appréciation des symptômes foliaires pour les huit espèces indicatrices est réalisée en se référant au guide de symptômes foliaires conçu par VALE NC en collaboration avec Francis Murray de l'OMS en 2012 et avec l'expérience des observateurs.

Evaluation et appréciation de la bonne mise en œuvre :

L'évaluation de l'indice de sévérité des symptômes foliaires est le paramètre central de l'évaluation des impacts liés aux émissions de soufre et de l'évolution dans le temps du phénomène de dépérissement.

Il est à noter que bien que facilement identifiables au sein des stations, les individus suivis balisés ne sont pas référencés par GPS. La prise des coordonnées GPS, ainsi qu'une photographie de chaque individu associée à son positionnement selon un schéma de la station, permettrait d'assurer de retrouver la localisation des individus suivis en cas de perte de rubalise (dégradation au soleil, arrachage par intempéries) ou en cas de changement d'opérateur du suivi dans le temps.

Les définitions de l'indice des symptômes foliaires et les appréciations des valeurs du degré de sévérité sont respectées et font l'objet d'une note de rappel présente sur la fiche terrain, accessible à tout moment par l'opérateur lui permettant de recalibrer son évaluation. Le guide des symptômes foliaires réalisés par Francis Murray est également disponible sur le terrain.

Les opérateurs disposent également des relevés précédents permettant de savoir si les symptômes observés sont des reliques de vieux symptômes.

Les photographies prévues par le protocole 2016 sont correctement réalisées.

Remarque :

Aux vues des constations sur le terrain et de l'exploitation des premières données temporelles, quelques remarques mises en évidence par les opérateurs sont à noter.

Chaque espèce a ses caractéristiques symptomatologiques propres à reconnaître sur le terrain. Ces reconnaissances s'améliorent et s'automatisent au fur et à mesure de la réalisation des suivis : les opérateurs savent reconnaître les symptômes liés au SO₂ et ceux qui ne le sont pas. Ainsi, les chloroses

marginales et inter-nervures sont notées comme chloroses potentiellement dues à la présence de SO₂ atmosphérique (symptômes foliaires). Les nécroses apicales avec un effet de "vague" ou internervales de couleur brune vive sont également classées comme potentiellement liées à une exposition au SO₂ atmosphérique. A l'inverse, les chloroses diffuses, les chloroses ponctuées ainsi que les nécroses apicales sans effet de "vague" ou encore tout autre symptôme également recensé sur les sites témoins et/ou hors zone d'influence des émissions atmosphériques sont référencés dans l'indice de qualité phytosanitaire et autres stress (carences...).

On constate cependant que parfois la différenciation des symptômes foliaires liés à l'effet du SO₂ ou à l'effet des pathogènes est difficile à évaluer parce que d'aspect semblable sur certaines espèces. D'après les opérateurs, cette difficulté n'a été rencontrée que pour deux types de symptômes en 2016 et 2017 (nécrose apicale sur *Garcinia* et nécrose sur quelques feuilles d'*Arillastrum*). Le doute sur ces deux symptômes a pu être levé suite à l'observation de ces mêmes symptômes hors zone d'influence des émissions (pic du pin). Au dire des opérateurs, l'ensemble des autres symptômes observés sur les espèces indicatrices suivies est bien appréhendé.

Les opérateurs sont formés à la reconnaissance des symptômes liés aux émissions de SO₂ par Francis Murray, mais ne sont pas formés à la reconnaissance de l'ensemble des symptômes liés aux phytopathogènes.

De plus, les déformations dues aux émissions de SO₂ telles que décrites dans le document de référence de 2012 sont très peu observables sur le terrain et sont également présentes sur les stations de référence non impactées. Aussi, l'équipe de VALE-NC suit-elle le symptôme « défoliation » qui semble être plus discriminant et pertinent que le symptôme « déformation » initialement prévu (S. McCoy, J. Goxe, 2017).

Lors de l'évaluation des symptômes foliaires, la localisation des individus par rapport à leur exposition physique (sous canopée ou pas, zone ouverte ou non), leur orientation par rapport au complexe industriel ne sont pas prises en compte. Toutefois, les résultats des observations symptomatologiques sont recoupés avec les données descriptives référencées de la station lors de l'implantation des stations à T₀ (formation végétale, exposition : lisière, fermée, ouverte, orientation par rapport au complexe industriel, situation topographique et substrat) et permettent ainsi de pouvoir expliquer des différences notoires au sein de la même espèce dans des stations différentes lors de l'analyse des données.

Les suivis et résultats des études de fumigation ont également été exploités et ont permis aux trois opérateurs d'acquérir une expérience supplémentaire en termes de reconnaissance de symptômes foliaires. En effet les employés de VALE NC ont été chargés lors des trois premières études de suivre l'apparition des symptômes dans les chambres de fumigation. Ils disposent aussi d'une base de données de photos issues des différentes études de fumigation.

IV.2.10. Indice de la qualité globale de la station

Définition du paramètre :

L'indice de la qualité globale de la station est une synthèse des différents paramètres suivis en amont de cette notation : présence de poussières, de rouille des myrtacées, indice de reprise de la végétation, état phytosanitaire, phénologie et symptômes foliaires compris. Il prend en compte les espèces indicatrices du suivi, plus le cortège d'espèces associées présentes sur la station, impliquant les parties végétales anciennes et récentes sur des individus de tout âge.

Le protocole de suivi prévoit l'attribution à chaque station d'un indice de la qualité du milieu de la façon suivante :

- **Très mauvais** : Etat de santé de la végétation pouvant fortement porter atteinte à la sensibilité d'un observateur inexpérimenté. On note une forte dégradation de la végétation de la station et l'état de santé de la végétation est fortement impacté. On note la présence de dépôts de poussières de type « Fort » et/ou des fruits et des fleurs présentant des attaques phytosanitaires impactant leur développement. On note la présence de symptômes de type « sévère » sur ¼ des individus suivis, ensemble des fruits et/ou fleurs observés sont attaqués. Plus d'une dizaine d'individus morts sont recensés sur la station.
- **Mauvais** : Etat de santé pouvant porter atteinte à la sensibilité d'un observateur inexpérimenté. On note une dégradation de la végétation de la station. L'état de santé semble impacté. On note la présence de dépôts de poussières de type « Moyen » et/ou des fruits et des fleurs présentant des attaques phytosanitaires impactant leur développement. On note la présence de symptômes de type « fort » à « sévère » sur la végétation associée à des phénomènes de défoliation. Quelques cas de mortalité peuvent être recensés sur la station.
- **Moyen** : Etat de santé pouvant légèrement porter atteinte à la sensibilité d'un observateur expérimenté. La végétation présente des dépôts de poussières de type « moyen » et/ou des fruits et des fleurs présentant des signes d'attaques phytosanitaires. Les jeunes feuilles sont perceptibles sur moins de 10% de la végétation. On note la présence de symptômes foliaires de type Moyen à Fort.
- **Bon** : Nouvelles feuilles perceptibles sur au moins 20% des plantes, présence de dépôts de poussière de type léger. Les fleurs ou fruits présentent un bon état de développement sans attaque phytosanitaire. On peut noter la présence de symptômes foliaires de type léger à moyen.
- **Excellent** : Nouvelles feuilles visibles sur plus de 20% des plantes, absence de poussière, absence d'attaques phytosanitaires. Les fruits ou fleurs présentent un bon état de développement. Aucun symptôme foliaire lié au SO₂ n'est relevé sur la station.

Mise en œuvre observée :

Le binôme composé de l'ingénieur et d'un technicien réalise en concertation l'évaluation visuelle qualitative et quantitative de l'indice de qualité du milieu. Une note globale est attribuée à la station en fonction de l'ampleur des constatations sur l'ensemble des espèces de la surface de la station. Pour ce faire, l'ensemble des parties végétales est pris en compte.

Evaluation et appréciation de la bonne mise en œuvre :

L'indice de qualité de la station est évalué par une notation, « très mauvais, mauvais, moyen, bon, excellent » selon les définitions du protocole 2016, en termes de pourcentage de la végétation atteinte par un ou plusieurs symptômes.

Les définitions de l'indice de qualité globale de la station sont respectées, cependant elles sont relativement complexes à assimiler car elles regroupent plusieurs paramètres et sont sujettes à la sensibilité de l'observateur. Elles ne font l'objet d'aucune note de rappel présente sur la fiche terrain. L'indice est une compilation de l'ensemble des critères précédemment relevés (présence de cendres et de poussières, état phytosanitaire, phénologie, présence de jeune pousse...). La question se pose de l'intérêt de cet indice. Etant donné qu'il reprend des indices déjà relevés, il est recommandé de supprimer du plan de suivi cet indice relativement subjectif et difficile à évaluer.

IV.3. Les paramètres atmosphériques

IV.3.1. Données météorologiques

A noter qu'aucune information n'est donnée dans le protocole de 2016 sur le contenu du suivi météorologique.

Il existe sept stations de mesure de la qualité des eaux de pluie réparties sur les communes de Yaté et du Mont-Dore, principalement situées aux alentours du site industriel. Cinq d'entre elles sont situées au même endroit que les stations de mesure de la qualité de l'air ambiant. Les localités sont présentées sur la carte ci-dessous (Station AQMS en jaune et Station qualité des eaux de pluie en rose). Pour les campagnes de mesure de la qualité des eaux de pluie, l'ensemble des analyses chimiques est effectué par le laboratoire interne de Vale Nouvelle-Calédonie (accrédité ISO 17025 par le COFRAC).

Les relevés des stations AQMS (Air Quality Monitoring Stations) sont maintenant réalisés par SCALAIR. Les paramètres collectés par les stations sont :

- la température,
- les précipitations,
- la direction du vent relevée en continu avec anémomètre directionnel.

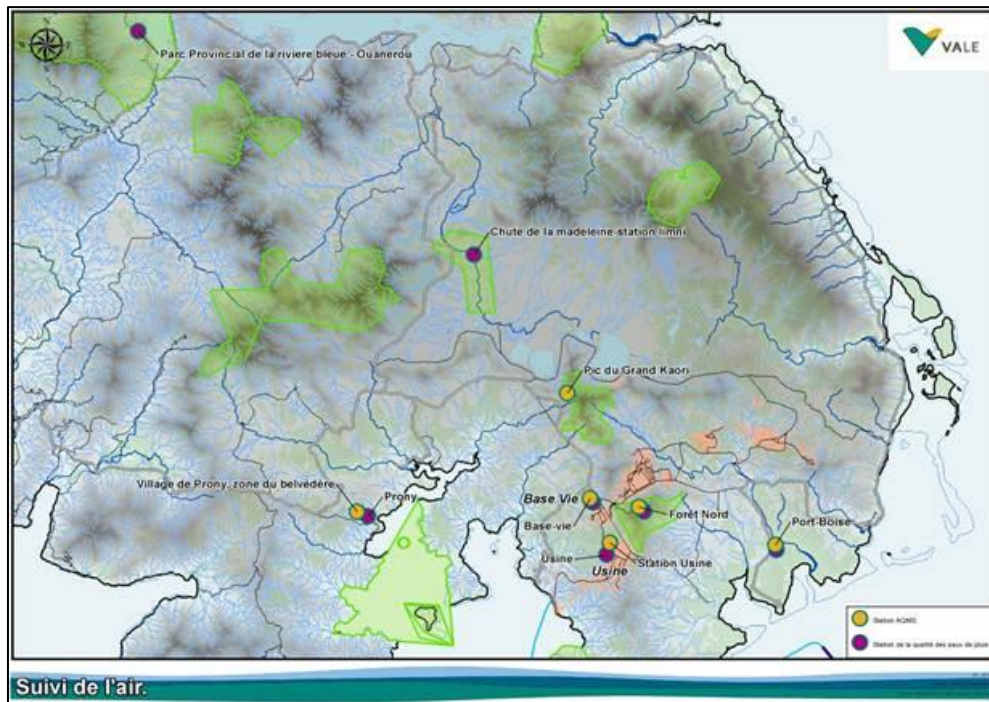


Figure 5. Localisation des stations de suivi des données météorologiques

IV.3.2. Relevés atmosphériques

A noter qu'aucune information sur l'acquisition de données des paramètres atmosphériques n'est fournie dans le protocole de 2016. La prise en compte de ces paramètres est pourtant effectuée par les opérateurs du suivi VALE NC.

Ils traitent les paramètres liés à :

- L'orientation du vent
- L'odeur des émissions atmosphériques soufrées (SO₂, H₂S)

Les opérateurs souhaitent supprimer ces deux relevés qui ne sont pas exploitables du fait de leur caractère ponctuel.

- Le paramètre "SO₂ ponctuel" correspond au détecteur de SO₂ portatif. Le détecteur est utilisé pour des raisons d'hygiène et de sécurité et n'a pas un objectif de quantification du SO₂ atmosphérique. Il ne sonne que si la valeur limite pour la santé humaine est dépassée.

IV.3.2.a. L'orientation du vent

La direction du vent est prise à l'aide d'une boussole par un des opérateurs du suivi. La donnée est collectée sur chaque station et pour chacune des trois séries de relevés annuels. Sa direction est évaluée selon les cardinaux et sub-cardinaux (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). La donnée récoltée est reportée sur la fiche terrain dans le champ prévu à cet effet. La force du vent est consignée sur la fiche de suivi selon l'échelle suivante "nul, faible, fort".

Ces valeurs sont complétées par les relevés continus avec anémomètre directionnel sur les stations météo AQMS de VALE-NC : Auxiliaire, Prony, Port Boisé, Forêt Nord et Pic du Grand Kaori.

Pour optimiser l'acquisition de donnée, un compas permettrait d'affiner la valeur en notant le cap du vent au degré. De même une définition des trois notes de l'indice « force du vent » permettrait d'harmoniser la donnée en cas changement d'opérateur.

IV.3.2.b. Odeurs des émissions atmosphériques soufrées (SO₂ et H₂S)

L'évaluation des odeurs soufrées se fait de façon organoleptique en concertation avec l'ensemble des agents de l'équipe, au début du travail sur la station.

Les paramètres consignés sont la présence ou l'absence d'odeur soufrée, sans distinction notoire entre le SO₂ et le H₂S.

Il est à noter qu'une case sur la feuille de terrain permet d'attribuer une intensité à l'odeur et permet de préciser la nature de l'odeur si celle-ci est particulière. D'une manière générale et comme nous avons pu le constater sur le terrain, c'est une odeur de soufre brut qui est légèrement détectable sous le vent direct de l'usine et du stock de soufre (SO1).

IV.3.3. Teneurs ponctuelles en SO₂ ambiant

A noter qu'aucune information n'est donnée dans le protocole de 2016 sur le suivi de ce paramètre.

Les teneurs ponctuelles en SO₂ ambiant sont relevées par un détecteur portatif Polytron 7000 de marque Dräger, d'une sensibilité de 2 ppb de SO₂ et de H₂S dans l'atmosphère immédiate.

Sa vocation est d'être un outil de sécurité pour les agents sur le terrain et n'est pas prévu ni utilisé pour l'acquisition de donnée environnementale. Il affiche en direct les valeurs instantanées. Celles-ci sont restées en permanence sous le seuil de 2 ppb lors des 3 journées d'accompagnement sur le terrain même quand l'odeur de soufre brut a été perceptible (SO1).

L'entretien, la calibration (interne automatique) et le déchargement des données sont effectués une fois par semaine par le service CSO, chargé de la maintenance du matériel HSE de VALE-NC.

Au niveau interne de l'appareil, les valeurs sont enregistrées en continu et l'interface informatique permet de visualiser les données sous forme de courbe de concentration en SO₂ dans le temps. Ces données ne sont pas exploitées étant donné que le passage des opérateurs sur les stations est quadrimestriel.

IV.3.4. Teneur mensuelle en SO₂ atmosphérique par tubes passifs

Le dispositif expérimental du protocole de 2016 prévoit le suivi de la teneur mensuelle en SO₂ atmosphérique par l'installation de 10 tubes passifs. Cinq tubes passifs sont prévus pour être situés au

niveau de cinq stations de suivi : SO01, SO25, SO23, SO20, SO06 afin de couvrir au maximum la zone d'étude. En complément, cinq tubes passifs sont prévus pour être installés au niveau de la réserve de Forêt nord, de la forêt McCoy, en contrebas du stock de soufre et au niveau du drain périphérique situé au nord du complexe industriel. Ces derniers permettront de vérifier les teneurs mensuelles en SO₂ atmosphérique sur la zone impactée et sur le site témoin.

Le concept du tube consiste en un mélange de carbonate de postassium et de glycérine, accumulant, de manière continue dans le temps, le SO₂ présent dans l'air ambiant. Les dispositifs sont composés de tubes accumulant le SO₂ atmosphérique et d'un boîtier en plastique ouvert sur la face inférieure. Ce boîtier permet de protéger le tube passif des intempéries, de réduire et d'homogénéiser l'influence du vent selon les différentes stations. On peut donc dire que tous les tubes passifs sont situés à couvert. Ils sont généralement positionnés en lisière des végétations à une hauteur de 2 m, accrochés aux arbres ou aux clôtures. Les tubes des stations SO14 et SO19 sont disposés sous la cime des arbres et un système de corde et poulies permet leur mise en place et leur relève.

Les relevés des échantillonneurs passifs étaient jusqu'à présent opérés par la société Bureau Veritas de Nouvelle-Calédonie avec une fréquence mensuelle. A compter de 2018 les relevés sont réalisés par SCALAIR. Les tubes passifs sont ensuite conditionnés et envoyés pour analyses. La limite de détection de cette méthode est de 0,2 µg de SO₂ par m³ d'air pour une exposition de 1 mois, pour des concentrations dans l'air de 0 et 240 µg de SO₂.

Les 10 tubes passifs installés sont localisés comme prévu dans le dispositif expérimental du protocole 2016, 5 situés sur les stations de référence et 5 sous influence potentielle de l'usine et des stocks de soufre brut (Fig.6). Il n'est donc pas réellement possible de réaliser des corrélations entre les données issues des résultats des tubes passifs et celles issues des suivis symptomatologiques car il n'y a que dix tubes passifs contre 25 stations. L'objectif des tubes passifs est uniquement d'indiquer l'existence dans le temps de fortes émissions et l'axe de retombées des fumées selon les vents dominants. Il s'agit uniquement d'une moyenne mensuelle à titre indicatif. Seul les stations AQMS permettent réellement de quantifier précisément les émissions émises au niveau du complexe industriel.



Figure 6. Localisation des 10 tubes passifs autour du site industriel de VALE NC

IV.4. Echantillons de sols et de plantes pour les analyses chimiques

L'objectif des analyses chimiques des sols est de quantifier les retombées atmosphériques de SO₂ sur le sol des placettes.

L'objectif des analyses chimiques des végétaux est d'indiquer si les espèces évaluées dans la zone impactée absorbent le soufre atmosphérique et de quantifier cet apport dans le temps par rapport aux espèces évaluées sur les sites témoins hors influence du complexe industriel de VALE NC.

IV.4.1. Echantillonnage et analyse chimique des sols

Protocole :

Le protocole de 2016 prévoit la réalisation de prélèvements d'échantillons de sols pour les 25 stations situées à différentes distances du complexe industriel, dont les trois sites témoins situés hors zone d'influence des émissions atmosphériques.

Il est prévu que les prélèvements soient réalisés une fois par an au mois de décembre afin de suivre l'évolution chimique des sols dans la zone impactée.

Il est prévu que les analyses chimiques portent sur l'analyse du pH, de la conductivité et des teneurs en soufre afin d'évaluer un éventuel apport atmosphériques de SO₂.

Le protocole indique que 100 g de sol est prélevé à l'aide d'une truelle sur chacun des sites, le prélèvement est réalisé au niveau d'un sol nu dépourvu de litière. L'échantillon de sol est placé dans un sac cartonné annoté de la date et du numéro de site.

Mise en œuvre observée de l'échantillonnage :

L'opérateur (second technicien), muni de gants, prélève du sol à l'aide d'une pelle de jardinage sur une surface de 100 cm² et une profondeur d'environ 15 cm. Les gros débris organiques et les graviers ont été préalablement écartés et éliminés du prélèvement. Entre chaque prélèvement le matériel d'échantillonnage est nettoyé avec un papier essuie-tout propre non contaminé.

A l'aide d'un peson, l'opérateur introduit un minimum de 100 g humide de sol dans un sachet en papier spécifique annoté des références de la station et de la date de prélèvement.

Le soir même, les échantillons de sols sont mis à sécher dans l'étuve géologique de VALE-NC. Le cycle est de 4 jours à 40 °C. Les échantillons sont ensuite reconditionnés en sachets hermétiques et stockés à l'abri de la lumière en chambre froide avant envoi au laboratoire d'analyse australien.

Analyse chimique :

Les analyses chimiques de sols sont réalisées en Australie au laboratoire du CMLR (Center of Mine Site Rehabilitation) de l'Université du Queensland. Ce Laboratoire fait partie du réseau ASPAC (Australasian

Soil and Plant Analysis Council) qui garantit la qualité du résultat par une certification ISO et un programme d'intercalibration des différents laboratoires affiliés.

Les échantillons de sols sont broyés puis séparés afin d'analyser les teneurs en soufre total à l'ICP-AES (les résultats sont exprimés en mg S/kg sol sec) et d'analyser leur nature isotopique. En effet, afin de différencier le soufre d'origine naturel du soufre d'origine industriel, une analyse isotopique par Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) est effectuée et permet en théorie de tracer l'origine géographique du soufre analysé par l'étude des ratios des isotopes du soufre. Les rapports isotopiques stables de ^{34}S dans des échantillons solides sont mesurés à l'aide d'un spectromètre de masse de rapport isotopique Thermo Delta XP+. Les matériaux de référence de laboratoire ont été étalonnés directement en fonction des normes NIST. La reproductibilité à long terme est de $\pm 0.4 \text{ ‰}$ (Technical report Thermo Delta XP+, 2014).

Evaluation et appréciation :

Les analyses des sols en soufre ont une fréquence annuelle et concernent toutes les stations suivies prévues par le protocole 2016, soit 25 stations au total. Le mode de prélèvement, de séchage et de conditionnement est conforme aux bonnes pratiques de laboratoire et aux exigences nécessaires pour de correctes analyses chimiques de sols. Une fois séchés les échantillons sont stockés à 4°C à l'abri de la lumière, pour de bonnes conditions de conservation et sont ensuite envoyés au laboratoire australien.

Les analyses initialement prévues pour être réalisées par le laboratoire de VALE NC (Cf. *Protocole VALE NC 2016*), sont réalisées dans un laboratoire australien de l'Université du Queensland. Les analyses concernent bien le pH, la conductivité du sol, les teneurs en soufre total, et les ratios isotopiques du soufre de l'échantillon. Les analyses des premiers résultats, sur les échantillons récoltés en décembre 2016 et obtenus en mars 2018, montrent de faibles valeurs en S total et montrent qu'une faible part des échantillons présente des valeurs $\delta^{34}\text{S}$ détectables. VALE NC attend les résultats de la campagne de décembre 2017 pour évaluer l'intérêt de poursuivre ce type d'analyse.

IV.4.2. Echantillonnage et analyse chimique de feuilles des espèces indicatrices

Protocole :

Le protocole de 2016 prévoit l'analyse des teneurs en soufre foliaire de deux espèces (*Arillastrum gummiferum* et *Garcinia sp.*). Les prélèvements sont réalisés sur 13 stations de suivi dont une station témoin pour chacune des deux espèces analysées.

Les prélèvements de feuilles sont prévus pour être réalisés sur des individus non concernés par le suivi symptomatologique foliaire afin de ne pas impacter les résultats des observations qualificatives et quantitatives sur les individus balisés suivis. Les prélèvements de feuilles sont prévus pour être réalisés en décembre en saison sèche, sur plusieurs individus par espèce et par station.

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 événement atmosphérique industriel. Le protocole précise que des teneurs en soufre foliaire plus élevées peuvent permettre de valider que les symptômes foliaires (nécroses, chlorose, défoliation) sont liés à une exposition au SO₂ atmosphérique. 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.

Mise en œuvre observée de l'échantillonnage :

Si les deux espèces cibles pour les analyses de soufre foliaire, *Arillastrum gummiferum* et *Garcinia neglecta* sont présentes dans la station à l'étude, deux prélèvements foliaires distincts sont effectués. Dans le cas où une seule des deux espèces cibles est présente, un seul prélèvement foliaire pour analyse chimique est effectué.

Les prélèvements sont réalisés par un opérateur muni de gants, à l'aide d'un sécateur ou d'un échenilloir pour les arbres de plus de 2 m de hauteur.

L'échantillon est constitué de feuilles jeunes et vieilles présentant si possible un symptôme foliaire. Si les individus ne présentent aucun symptôme, des feuilles saines jeunes et vieilles sont prélevées. Afin d'obtenir 50 g minimum de feuilles humides (vérifiés au peson), les prélèvements sont réalisés sur 3 à 10 individus de la même espèce présente sur la station dont le rayon est élargi à 20 m. Les feuilles de cet échantillon sont introduites dans un sac référencé en coton spécifique du service botanique de VALE NC.

Le soir même, les échantillons sont mis en dessiccation dans l'étuve géologique de VALE-NC pour un cycle de 4 jours à 40°C. Après séchage, les échantillons sont reconditionnés en sac plastique avec zip et conservés à l'abri du soleil en chambre froide à une température ne dépassant pas 4°C. Les échantillons sont envoyés en Australie pour analyse.

La comparaison entre les sites localisés dans la zone impactée et les sites témoins porte bien sur les deux mêmes espèces.

Analyse chimique :

Les analyses en soufre foliaire sont également réalisées en Australie au laboratoire du CMLR (Center of Mine Site Rehabilitation) de l'Université du Queensland, qui garantit la qualité du résultat par une certification ISO.

Les échantillons sont broyés et analysés à l'ICP-AES. Les résultats sont exprimés en mg S/kg feuille sèche. Afin de différencier le soufre d'origine naturel du soufre d'origine industriel, une analyse isotopique par Résonnance Magnétique Nucléaire (RMN) est effectuée et permet en théorie de tracer l'origine géographique du soufre analysé par l'étude des ratios des isotopes du soufre.

Evaluation et appréciation :

Les missions d'accompagnement ont montré que les prélèvements de feuilles sont réalisés sur les stations prévues et sur les deux espèces cibles.

L'échantillonnage est effectué sur des feuilles jeunes et anciennes en privilégiant des feuilles portant des traces de symptômes foliaires liés aux émissions de soufre le cas échéant. Sur le terrain, l'échantillonnage est toujours réalisé par le même opérateur (second technicien).

Les feuilles des échantillons récoltés ne sont pas nettoyées à l'eau avant séchage. De potentielles poussières sont présentes à la surface des feuilles. Nettoyer les feuilles lessiverait le soufre atmosphérique éventuellement déposé. Ce soufre déposé devrait être plus important en quantité que le soufre assimilé par la plante. Les concentrations en soufre naturel dans les poussières doivent être stables aux vues de la géologie de la zone et le soufre déposé serait la variable détectable par cette analyse. Ainsi, afin de quantifier par analyse chimique le soufre atmosphérique absorbé par les plantes des zones impactées et de les comparer aux espèces évaluées sur les sites témoins, nous recommandons de nettoyer les feuilles récoltées à l'eau avant séchage.

IV.4.3. Mesure de l'activité photosynthétique des individus échantillonnés :

Protocole :

Des mesures de fluorescence chlorophyllienne de la végétation sont également réalisées sur les individus échantillonnés grâce à un fluorimètre portatif qu'on appelle "PLANT EFFICIENCY ANALYZER", ou PEA meter (Cambridge Scientifique). L'émission de fluorescence est directement liée au processus de photosynthèse et permet ainsi d'évaluer l'état de stress de la plante. La fluorescence est observée au niveau des feuilles de toutes les plantes : c'est une conséquence de la transformation par la plante de l'énergie lumineuse en matière végétale. L'émission de fluorescence varie selon l'état de stress de la plante (Krause et al., 1991).

La mesure de fluorescence chlorophyllienne est effectuée de la manière suivante :

- **Une surface foliaire test** est placée dans l'obscurité par un « clip » durant 15 minutes. Sur le plan physiologique cette opération supprime la photosynthèse.
- **Un flash lumineux** est ensuite envoyé sur la surface test. L'énergie lumineuse excédant les possibilités de collecte des systèmes de photosynthèse est alors réémise sous forme de fluorescence, selon une cinétique particulière et numérisée par l'appareil (courbe de fluorescence).

La valeur numérique de fluorescence d'une plante saine est d'environ 0,8 et diminue en cas de stress (Krauss & Weiss, 1991; Kupper *et al*, 1996).

Mise en œuvre observée :

L'appareil est calibré à l'aide du guide présent dans la valise de l'appareil.

Les mesures de fluorescence chlorophyllienne de la végétation sont réalisées sur chacune des espèces échantillonnées et sont réalisées conformément au protocole de 2016 et au manuel d'utilisation du fluorimètre.

IV.5. Saisies et analyses des données récoltées

A noter qu'aucune information n'est donnée dans le protocole de 2016 sur les méthodes utilisées pour l'intégration et l'analyse des données acquises sur le terrain.

IV.5.1. Classement des photographies dans le dossier photos

Le classement des photographies prises sur le terrain comprend plusieurs dossiers en fonction des thématiques traitées par les prises de vue photographiques. Au bureau, le second technicien est responsable du tri des photos qu'il a lui-même prises sur le terrain. Le dossier principal renferme les sous-dossiers suivants :

- **Dossier vue panoramique du site** correspondant aux 4 photos prises sur des points hauts de la zone impactée. Des comparaisons sont faites dans le temps sur les mêmes secteurs afin d'évaluer des changements visuels de la canopée. Ces photographies pourront également être mises en relation avec les résultats issus de l'étude de suivi des massifs forestiers par télédétection VEGUSINE.
- **Dossier vue d'ensemble de chaque stations** permettant de d'évaluer des changements visuels pour chacune des stations.
- **Dossier photos illustrant les attaques de pathogènes** pour chaque espèce, permettant de créer une base de données photo des attaques de pathogènes.
- **Dossier des photographies par station**, puis par espèces, dont le classement est indiqué ci-dessous :
 - Station
 - Espèce
 - Etiquette de l'individu
 - Branche et feuille
 - Individu entier
 - Symptômes : clichés effectués sur les plantes saines et les plantes comportant des symptômes permettant d'évaluer si les symptômes sont dus aux parasites ou aux émissions de soufre
- **Création d'un PPT pour chaque thématique** qui fait défiler les photos en fonction des dates permettant d'avoir une vision chronologique pour chaque thématique.

IV.5.2. Saisie informatique des données de la fiche de terrain

La fiche de terrain est tout d'abord scannée afin de conserver une version informatique de secours en cas de perte de la fiche terrain papier.

La saisie est réalisée par la technicienne est en charge du suivi des symptômes sur le terrain et vérifiée par l'ingénieur responsable. La saisie peut être effectuée par ces deux personnes en simultané afin de vérifier et valider les données terrain instantanément.

Les données acquises sur les stations sont saisies dans un tableur Excel qui reprend l'ensemble des champs de la fiche terrain (Tab. 6).

IV.5.3. Méthode d'analyses des données :

Les analyses des données réalisées par le service Préservation de l'Environnement de VALE NC pour la surveillance symptomatologique de la flore des stations d'observation concernent principalement :

- **Les résultats des mesures de SO₂ de l'air par échantillonnage passif**
- **Les résultats des suivis quadrimestriels des symptômes foliaires**
- **Les résultats des analyses chimiques annuelles foliaires et de sols**
- **Les analyses par comparaison de moyenne entre les différentes stations pour une même variable**
- **Les analyses de corrélations pour tester les liens entre variables étudiées**

A l'heure actuelle, aucun rapport d'étude n'a été rédigé avec les données obtenues en 2016 - 2017 avec le nouveau protocole. Les données pour ce qui concerne les analyses chimiques des échantillons de feuilles et de sols prélevés en décembre 2016 n'avaient toujours pas été fournies à VALE NC en décembre 2017. Ainsi les responsables de l'analyse des données du suivi de 2016 n'ont pas pu établir de rapport d'étude des corrélations entre le suivi symptomatologique sur la végétation et les analyses chimiques de sols et de feuilles des stations suivies.

Les méthodes d'analyses des données évaluées ci-dessous sont celles établies avec les paramètres déjà existants dans le protocole précédent. Elles ont permis la rédaction de trois rapports de suivi entre 2013 et 2015. Le traitement des paramètres principaux (suivi symptomatologique lié aux émissions de soufre, suivi du SO₂ atmosphérique par tubes passifs et suivi de la concentration en soufre foliaire) ne devrait pas changer depuis l'ancien protocole. L'évaluation ci-dessous porte sur les analyses de données réalisées pour les rapports des années précédentes.

Tableau 7. Tableau issu du fichier Excel de saisie des données de terrain. L'ensemble des champs de la fiche terrain est repris dans ce tableau.

date	Station	Espèce	N°	Sévérité des symptômes R, L, Moy, F, TF, M	Types de symptômes				Phytopathogène nb d'individus					stress	Phénologie nb d'individus				JF ou CF	commentaires			
					Nv Chl	Vieux Chl	Nv Nec	Vieux Nec	Nv Def	Vieux Def	Obs 0, 1, 2 ou 3	Chp / fum	Coch		mouche min	croc/che	piq	kiste/gale/trips			degré de sévérité R, L, M, F	B	Fl
23/03/2016	SO25	Gymnostoma deplancheanum	1																				
23/03/2016	SO25	Gymnostoma deplancheanum	2																				
23/03/2016	SO25	Gymnostoma deplancheanum	3																				
23/03/2016	SO25	Gymnostoma deplancheanum	4																				
23/03/2016	SO25	Styphelia spp	1																				
23/03/2016	SO25	Styphelia spp	2																				
23/03/2016	SO25	Styphelia spp	3																				
23/03/2016	SO25	Styphelia spp	4																				
23/03/2016	SO25	Tristaniopsis guillainii	1																				
23/03/2016	SO25	Tristaniopsis guillainii	2																				
23/03/2016	SO25	Tristaniopsis guillainii	3																				
23/03/2016	SO25	Tristaniopsis guillainii	4																				

Vérification du protocole de suivi symptomatologique du phénomène de dépérissement sur la végétation aux alentours du site de VALE NC.

date	Station	Reprise de la végétation		Lichens			Indice de qualité globale de la station		Poussière et cendres		météo	vent	odeur fumée	coupe de bois	rouille	espèces exogènes
		R, L, Mod, F	commentaires	couleur blanc, gris ou noir	Dvp -/0/+	commentaires	mauv, moy, B, TB	commentaires	R, L, Moy, F	commentaires						
16/12/2017	SO25															

IV.5.3.a. Analyse des résultats des mesures de SO₂ de l'air par échantillonnage passif

Douze campagnes de prélèvement mensuel par tubes passifs sont réalisées chaque année et concernent des durées d'exposition des échantillons au jour près.

L'activité de production 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 continu. Cet arrêté définit les valeurs de références qui lui sont applicables (Tableau 7).

	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

Sur les rapports précédents, les résultats sont représentés sur des graphiques qui illustrent :

- Les concentrations moyennes annuelles en SO₂ de l'air par station

Les mesures par échantillonnage passif permettent de connaître les valeurs moyennes des concentrations en SO₂ de l'air relevées au niveau de chacune des stations et de montrer quels points d'échantillonnage ont présenté les teneurs moyennes annuelles les plus élevées ou les plus faibles.

La valeur moyenne annuelle pour la protection de la végétation et des écosystèmes est de 20 µg de SO₂/m³ d'air.

- Le profil des concentrations mensuelles en SO₂ de l'air pour les différentes campagnes

La représentation graphique du profil des concentrations mensuelles en SO₂ relevées pour les différentes campagnes d'échantillonnage et sur chacune des stations permet de visualiser les périodes des concentrations maximales mesurées, ainsi que les périodes de concentrations les plus basses depuis le début des suivis.

Ces résultats sont corrélés avec les conditions de fonctionnement des différentes unités présentes sur le site (période de maintenance) et avec les incidents opérationnels recensés durant la campagne (départs

de feu ou de gâteau de soufre au niveau de l'usine d'acide) susceptibles d'influer sur les concentrations de SO₂ présentes dans l'air ambiant.

IV.5.3.b. Analyse des résultats des suivis trimestriels des symptômes foliaires

Les quatre suivis symptomatologiques réalisés chaque année permettent de mettre en évidence les stations d'observation impactées avec l'apparition de symptômes foliaires de chlorose, nécrose et/ou défoliation sur au moins une espèce indicatrice suivie. Cette mise en évidence permet de réaliser une représentation spatiale des stations d'observation avec apparition de symptômes et de délimiter les zones de dépérissement anciennes et/ou récentes.

Les symptômes apparus au cours de l'année sont consignés dans un tableau qui indique pour chaque station les espèces indicatrices suivies et celles présentant des apparitions de symptômes de chloroses et/ou nécroses.

Une analyse par classe de stations (proche-moyenne-loin) permet de montrer si le nombre d'espèces avec apparition de symptômes diminue ou augmente dans le temps et selon la distance à la source de SO₂ atmosphérique.

IV.5.3.c. Analyse des résultats des analyses chimiques foliaires annuelles

Les résultats des analyses chimiques foliaires réalisées depuis le commencement du suivi symptomatologique sont représentés sous forme de graphique exprimant la teneur en soufre (mg/kg) des feuilles des espèces analysées en fonction du temps et selon la présence ou non de symptômes sur les stations.

IV.5.3.d. Analyses statistiques

Les analyses statistiques de comparaison de moyenne entre les différentes stations pour une même variable et les analyses de corrélations pour tester les liens entre variables étudiées sont réalisées avec XLS-stat à partir des données des différentes variables acquises sur le terrain. Les personnes responsables de l'analyse statistique des données sont en attente de l'investissement d'un logiciel de statistique traitant les données écologiques.

En l'absence de rapport d'étude concernant les résultats issus des campagnes de suivi du nouveau protocole, il est difficile d'évaluer la qualité des analyses statistiques issues des données du protocole de 2016.

Chapitre V - SYNTHÈSE DES ANALYSES CRITIQUES ET RECOMMANDATIONS

Le travail de vérification du protocole de suivi symptomatologique du phénomène de dépérissement sur la végétation réalisé a permis de s'assurer de la volonté de l'équipe technique de VALE NC rencontrée sur le terrain de répondre aux mieux aux objectifs du suivi réglementaire. Ainsi, les moyens mis en œuvre par l'équipe Conservation du service Préservation de l'Environnement de VALE NC sont à la hauteur des objectifs fixés d'évaluation de l'effet du SO₂ sur la végétation aux alentours du site de VALE NC. Ainsi, les critiques faites ici sur le suivi symptomatologique se veulent pouvoir participer à cette volonté d'amélioration continue.

Le travail de synthèse des analyses critiques et recommandations sur la bonne mise en œuvre par VALE NC du protocole de suivi symptomatologique datant de 2016 reprend les principales remarques développées dans les paragraphes de la partie résultat de l'étude. Il portera sur :

- 1. Le dispositif expérimental, la fréquence et la durée du suivi**
- 2. Les paramètres de suivi de l'évaluation de l'état de santé de la végétation**
- 3. Les paramètres de suivi atmosphériques (météo et SO₂ atmosphérique)**
- 4. Les prélèvements et préparations des échantillons de sols et plantes pour les analyses chimiques**
- 5. La saisie et l'analyse des données du suivi**

V.1. Le dispositif expérimental, la fréquence et la durée du suivi

La mission terrain d'accompagnement des opérateurs de VALE NC a permis de valider que :

- Le choix des stations de suivi est conforme aux critères de sélection des stations développées par VALE NC dans le protocole de suivi de 2016.
- Les informations relatives à la description de chacune des stations de suivi étudiées durant les trois journées de terrain réalisées avec les opérateurs sont conformes aux descriptions renseignées dans le Tableau 1 du protocole de suivi (VALE NC 2016). Notons cependant qu'il manque les informations concernant la station SO15. Cette station est représentée sur la Figure 1 et la Figure 2 du manuscrit du protocole de 2016 fourni par VALE NC mais n'apparaît pas dans le Tableau 1 (Description des caractéristiques géographiques et écologiques des stations de suivi). La station a bien été étudiée par les opérateurs. Il semblerait que l'absence de la ligne dans le tableau soit due à un problème de mise en page du document méthodologique.
- La fréquence de suivi quadrimestriel, correspondant aux périodes qui influencent les cycles de croissance des végétaux, est cohérente avec l'objectif d'évaluation de l'état de santé de la végétation.
- L'équipe réalisant le suivi est toujours composée de trois personnes, sauf absence d'un des employés de VALE NC. Un binôme est occupé aux tâches de prises de données relatives aux paramètres

d'évaluation de la qualité de la végétation. Le troisième opérateur est affecté aux prélèvements de sols et de feuilles et aux prises photographiques relatives à la station, à la détection des symptômes foliaires en périphérie de la station et à l'état du lichen.

- Les premières campagnes de suivis réalisées avec le protocole de 2016 datant d'avril et d'août 2017 ont été réalisées par les trois mêmes opérateurs que ceux accompagnés lors de la mission terrain de décembre 2017.
- L'étude a permis de calculer que le temps pour réaliser le suivi d'une station était de l'ordre d'une heure. Une équipe de trois personnes traite en moyenne 5 stations par jour. Le suivi de l'ensemble des 25 stations est réalisé comme prévu sur une durée correspondant à environ 5 jours à 3 opérateurs avec une répartition des tâches précise et bien rodée.
- Notons que les dimensions de la station de suivi sont aléatoires et dépendent de l'emplacement des individus des 3 espèces indicatrices suivies sur chaque station. Notons également que bien que facilement identifiables au sein des stations, les individus suivis balisés ne sont pas référencés par GPS.

Il est recommandé de concevoir pour chaque station un schéma qui localise les bornes des stations (coordonnées GPS) et que l'ensemble des stations soit de dimensions égales afin de standardiser l'acquisition de données des paramètres d'évaluation de l'état de santé de la végétation liés aux observations sur l'ensemble de la station.

Il est également recommandé que le schéma localise les espèces indicatrices du suivi (coordonnées GPS). En effet, la prise des coordonnées GPS, ainsi qu'une photographie de chaque individu suivi associée à son positionnement selon un schéma de la station, permettrait d'assurer de retrouver la localisation des individus suivis en cas de perte de balise (dégradation au soleil, arrachage par intempéries) ou en cas de changement d'opérateur du suivi dans le temps.

En conclusion, hormis une mise à jour à effectuer dans la rédaction du tableau 1 du manuscrit, la mise en œuvre du dispositif expérimental correspond aux préconisations du protocole de 2016. Depuis 2012, ce dispositif a été évalué et modifié par deux fois et semble aujourd'hui adapté aux objectifs du plan de suivi. La principale recommandation est de matérialiser la dimension de chaque station qui devra être équivalente pour chacune d'elle, afin de standardiser les notations des paramètres liés aux observations sur l'ensemble de la surface de la station.

Il convient de noter que le suivi des symptômes foliaires assuré depuis 2012 sur 19 stations d'observation sera maintenu annuellement en décembre afin de détecter une éventuelle apparition de nouveaux symptômes foliaires sur les localités suivies autour du complexe industriel. Ce suivi est maintenu par le service préservation de l'environnement de VALE NC, afin de valoriser les données acquises depuis 6 ans sur des analyses chimiques foliaires de plusieurs autres espèces et de les corréler

aux données des observations de symptômes foliaires dus aux émissions de SO₂ accumulées depuis 2012. En effet, il serait regrettable de ne pas mettre en valeur le jeu de données existant, dans l'attente d'acquisition d'une série de nouvelles données avec le protocole de suivi mise à jour en 2016.

V.2. Les paramètres de suivi de l'évaluation de l'état de santé de la végétation

V.2.1. Les paramètres liés à la qualité de la station

Les paramètres d'évaluation de la qualité de la végétation ci-dessous sont faciles à appréhender, simples à mettre en œuvre et les opérateurs du suivi sont compétents pour l'acquisition des données.

- Présence de la rouille des myrtacées et nom des espèces impactées
- Evaluation de l'état de santé des lichens terrestres (photographie et dénombrement)
- Présence de cendres et/ou de poussières (Indice)
- Phénologie (floraison et fructification des espèces communes)
- Reprise de la végétation (indice)

Pour l'évaluation de la qualité globale de la station, les définitions de l'indice sont relativement complexes à assimiler :

- elles regroupent l'évaluation de plusieurs paramètres
- elles sont sujettes à la sensibilité de l'observateur
- elles ne font l'objet d'aucune note de rappel sur la fiche terrain

Les définitions de l'indice de qualité globale de la station sont respectées, cependant elles sont relativement complexes à assimiler car elles regroupent plusieurs paramètres et sont sujettes à la sensibilité de l'observateur. Etant donné qu'il reprend des indices déjà relevés, il est recommandé de supprimer du plan de suivi cet indice relativement subjectif et difficile à évaluer.

Pour l'évaluation de l'état de santé des lichens terrestres, les prises photographiques sont correctement effectuées mais elles semblent compliquées à interpréter. La différenciation des colonies mortes (sèches) et vivantes (humides) est difficile. Les causes de dépérissement ou de regain sont compliquées à évaluer. L'état des lichens semble varier selon les périodes d'humidité.

Peu de données existent en Nouvelle-Calédonie sur la sensibilité du lichen par rapport aux retombées atmosphériques. Des études de recherches et développement devraient tout d'abord être entreprises sur cet indicateur pour développer une méthode d'évaluation des pollutions atmosphériques à l'aide du lichen.

Afin de mieux standardiser le protocole, il est recommandé que l'évaluation de la présence de cendres et/ou de poussières concerne chaque individu suivi, permettant d'attribuer une note à chaque individu

et de suivre son évolution dans le temps. Les observations globales sur le reste de la station seront succinctes et sous la forme de commentaires.

V.2.2. Les paramètres d'évaluation des dégradations foliaires : indice de symptômes SO₂ et indice de l'état phytosanitaire

Symptômes :

Le protocole de suivi symptomatologique lié aux émissions de soufre a été développé comme un outil simple qui intègre une évaluation visuelle qualitative de l'état du feuillage (chlorose, nécrose, déformation) et une évaluation quantitative (symptôme présent sur un individu, symptôme généralisé à l'ensemble des individus). Le protocole de 2016 répond aux objectifs de détection des phénomènes de dépérissement sur la végétation liés aux émissions de vapeur de SO₂ et d'évaluation de l'évolution de ce phénomène.

Il convient cependant de rester prudent quant à l'évaluation visuelle des symptômes foliaires. L'équipe Conservation du service Préservation de l'Environnement de VALE NC a en effet pu mettre en évidence certains symptômes semblables aux symptômes liés à une exposition au SO₂ sur diverses espèces et au niveau de secteurs très éloignés du complexe industriel et hors influence des émissions atmosphériques. Ces symptômes foliaires naturels peuvent être reliés à des phénomènes de stress hydrique, de carences nutritionnelles ou d'attaques de pathogènes. Ainsi, pour évaluer au mieux ces symptômes foliaires le protocole de 2016 mentionne le rajout d'un paramètre de suivi permettant d'évaluer l'état phytosanitaire de la végétation.

L'évaluation de ces deux indices (symptômes SO₂ et état phytosanitaire) est fortement liée à la sensibilité et compétences des observateurs.

Chaque espèce a ses caractéristiques symptomatologiques propres à reconnaître sur le terrain. Ces reconnaissances par les observateurs du suivi s'améliorent et s'automatisent au fur et à mesure de la réalisation des suivis. Les opérateurs historiques savent reconnaître des symptômes liés au SO₂ et ceux qui n'en sont pas. En cas de doute, des caractérisations sont réalisées avec l'expert Franck Murray sur la base de photographies

La reconnaissance de la majorité des symptômes SO₂, se traduisant par des nécroses brunes vives ou des chloroses marginales ou internervales bien marquées, semble bien maîtrisée par les trois opérateurs sur les huit espèces suivies. De même des symptômes de chlorose ponctuelle dus aux piqûres d'insectes sont facilement reconnaissables. Les nécroses apicales (sur le bout des feuilles) sont attribuées à différents phénomènes selon leurs caractéristiques : chez *Styphelia* par exemple les nécroses apicales liées au SO₂ atmosphérique sont bien marquées et montrent un effet "vague", alors que les nécroses apicales d'origine naturelle sont plutôt uniformes (pas d'effet "vague").

On constate cependant que parfois la différenciation des symptômes foliaires liés à l'effet du SO₂ ou à différents facteurs de stress (climat, carences, pathogènes...) sont difficiles à évaluer parce d'aspect semblable sur certaines espèces. A l'heure actuelle, en cas de doute sur l'origine des symptômes, les remarques sont exprimées dans le champ commentaire de la fiche terrain.

Rappelons que le suivi photographique est primordial pour visualiser l'évolution des symptômes et leur degré de sévérité sur les différentes espèces cibles et ainsi pouvoir évaluer dans le temps les causes de la présence de symptômes.

Sur le terrain :

Les opérateurs de VALE NC, responsables du suivi, sont les mêmes personnes depuis sa mise en place et ont une bonne mémoire des symptômes sur les différentes stations. Lors de la mission de vérification les opérateurs semblaient ne pas douter quant à l'évaluation des symptômes liés au SO₂ sur la plupart des espèces. L'équipe de VALE fonctionne de la façon suivante :

- Si le symptôme foliaire est avéré comme symptôme lié au SO₂, alors la notation est effectuée dans le champ du paramètre symptôme foliaire
- Si l'observation est une petite chlorose, on note l'observation en commentaire et on compare au bureau avec les anciennes notations pour évaluer l'origine du symptôme et ainsi remplir le champ correspondant dans le tableau de données (symptôme SO₂ ou phytosanitaire) en précisant si elle porte sur les jeunes ou les anciennes feuilles.
- En cas de doute sur l'origine du symptôme, de nombreuses remarques et commentaires sont notés sur la fiche terrain dans le champ lié aux chloroses. Le symptôme est décrit et l'individu identifié, mais le symptôme n'est pas pris en compte comme lié au SO₂, il est gardé dans l'historique des données pour une attente de validation ou invalidation selon les résultats des analyses chimiques ou l'acquisition de nouvelles données.

Depuis 2016 et la mise en place du nouveau protocole, les trois mêmes opérateurs réalisent le suivi. Les tâches sont bien réparties et la réalisation est bien rodée. Les discussions entre les opérateurs sur l'évolution de la végétation, la description des symptômes et les clichés à prendre sont nombreuses et efficaces. Un des trois opérateurs, arrivé au sein de VALE NC en 2012, a participé à la majorité des études liées à l'impact des émissions de soufre sur la végétation. Cet opérateur est la personne ressource sur la reconnaissance des symptômes, ce qui permet de minimiser les biais inter-opérateurs sur l'analyse des symptômes et de garantir la bonne mise en œuvre des observations pour l'acquisition des données.

Guide de reconnaissance :

Un travail de caractérisation des symptômes de chlorose, nécrose et déformation des feuilles liés au SO₂ a été réalisé par le professeur Francis Murray sur une dizaine d'espèces les plus sensibles sur différents sites situés aux alentours des installations industrielles de Vale NC. Ces investigations basées sur des observations de terrain ont permis d'établir le guide des symptômes foliaires, il contient un descriptif et des photographies par espèce des symptômes foliaires validés comme étant dus à une exposition aiguë et ponctuelle au SO₂ atmosphérique (Murray, 2012). D'après Murray l'évaluation des symptômes doit être simple rapide et instinctive. En outre, les travaux d'essais de fumigation contrôlée ont permis d'observer des tendances sur l'aspect des symptômes selon la dose de SO₂ apportée dans la chambre de fumigation et ont aidé les opérateurs à se former pour évaluer l'effet symptomatologique du SO₂ sur les feuilles des différentes espèces indicatrices. Notons aussi que le guide des symptômes foliaires dus aux émissions de SO₂ évolue en fonction de l'amélioration des connaissances et des observations de terrains par les opérateurs réguliers de VALE NC. Il est régulièrement actualiser en collaboration avec Franck Murray.

En revanche, aucune formation de reconnaissance des effets des différents pathogènes sur les plantes du maquis étudiées n'a été effectuée. L'équipe de Vale NC responsable du suivi a signalé cela et a demandé une formation afin de réaliser un guide de reconnaissance des impacts des différents pathogènes sur les 8 espèces étudiées. Ceci afin d'améliorer l'évaluation des causes des différents symptômes foliaires qui ne seraient pas liées au soufre. Une seule étude réalisée par l'IAC pour le compte de VALE NC est disponible (*Identification des maladies fongiques et ravageurs – Zone d'étude la pépinière de Vale, IAC; Juillet 2017. Valérie KAGY, Carole MARTIN, Rose-Mai M'BOUERI, Christian MILLE*). Il s'agissait d'identifier les pathogènes associés à certains symptômes récurrents retrouvés sur quelques espèces de maquis en culture à la pépinière de VALE NC.

A noter que fin 2018, les opérateurs disposeront d'une formation sur les carences et bio-agresseurs dispensée par le CFPPA. Il n'existe à l'heure actuelle pas de formation de ce type portée sur la flore endémique en Nouvelle-Calédonie. Les opérateurs disposeront donc des bases et devront les utiliser pour les adapter au contexte bien spécifique du Grand Sud.

Recommandations et commentaires :

- Il est à noter que même s'ils sont facilement identifiables au sein des stations, les individus suivis balisés ne sont pas référencés par GPS. Il est recommandé de géoréférencer les individus suivis, ce qui permettrait d'assurer de retrouver la localisation de ces individus en cas de perte de rubalise (dégradation au soleil, arrachage par les intempéries) ou en cas de changement d'opérateur du suivi dans le temps.

▪ Dans l'éventualité de changement d'opérateurs au sein de VALE NC, une formation spécifique à la reconnaissance des symptômes devra être effectuée pour garantir la bonne continuité du suivi et l'harmonisation des observations de terrain. Ce changement d'opérateurs ou l'absence d'opérateur habituel lors d'un suivi doivent être mentionnés dans le tableur de saisie des données terrain, afin d'identifier un éventuel changement d'estimation entre observateurs.

En complément, le guide complet et actualisé des symptômes foliaires naturels et liés aux émissions de SO₂ pour chaque espèce sera un support indispensable.

▪ Les déformations foliaires dues aux émissions de SO₂ telles que décrites dans le document de référence de 2012 sont très peu observables sur le terrain et sont également parfois présentes sur les stations de référence non impactées. Aussi, l'équipe de VALE-NC suit-elle plus particulièrement le paramètre « défoliation » (paramètre intégré au protocole en 2017) qui semble être plus discriminant et pertinent que le paramètre « déformation » initialement prévu (S. McCoy, J. Goxe, com.pers. 2017). En effet, la déformation des feuilles n'est pas un indicateur pertinent pour le suivi des effets des émissions de soufre sur la végétation parce que certains insectes parasites provoquent également ce genre de symptômes. En revanche la défoliation est un bon indicateur de l'effet des émissions de soufre sur les plantes.

▪ L'ingénieure et les deux techniciens de l'équipe de suivi VALE NC ont participé aux formations de reconnaissance des symptômes foliaires avec Francis Murray lors de son passage en Nouvelle-Calédonie pour l'élaboration et la mise en œuvre des études de fumigation à la pépinière de VALE NC. Ainsi l'ensemble des opérateurs "actuels" est capable de différencier les symptômes liés aux émissions de soufre.

▪ D'autre part, quelques modifications sont à apporter sur le manuscrit du protocole. Certains changements effectifs dans la mise œuvre n'ont pas été reportés sur le manuscrit :

- Sur la placette SO6 : une espèce suivie a été modifiée, le *Styphelia cymbulae* a été remplacé par *Tristaniopsis guillainii*.
- La station SO15 représentée sur les cartes des Figures 2 et 3 n'apparaît pas dans le Tableau 1 (Description des caractéristiques géographiques et écologiques des stations de suivi) du manuscrit du protocole de suivi fourni par VALE NC. La station a bien été étudiée par les opérateurs. L'absence de la ligne dans ce tableau est due à un problème de mise en page du document méthodologique.
- De même, la station SO06 n'apparaît pas sur la carte de localisation des stations de prélèvement annuel de feuille de *Garcinia neclecta*.

▪ Les espèces indicatrices sélectionnées pour le suivi sont les plus sensibles visuellement aux émissions de soufre. Notons toutefois qu'une espèce, *Gymnostoma deplancheanum* possède un

feuillage particulier qui rend le suivi peu évident. Il est suggéré de la conserver comme indicateur de haute dose de soufre atmosphérique en cas de symptômes flagrants (défoliation).

V.3. Les paramètres de suivi atmosphériques

L'équipe Conservation du service Préservation de l'Environnement de VALE NC, réalisant le suivi symptomatologique, n'a pas en charge le suivi de la qualité de l'air, elle ne participe pas à l'acquisition des données atmosphérique provenant des stations météo et des tubes passifs. Ainsi, la mission de terrain d'accompagnement des opérateurs du suivi n'a pas permis de vérifier la bonne mise en œuvre de l'acquisition de ces données atmosphériques.

V.4. Analyses chimiques foliaires et de sols

▪ Prélèvement et préparation des échantillons de sols pour les analyses chimiques

Le manuscrit du protocole de 2016 stipule que : "Les prélèvements de sols sont réalisés sur l'ensemble des 25 sites situés à différentes distances du complexe industriel et sur un site témoin (SO 20) hors zone d'influence des émissions atmosphérique.". Il semble y avoir un problème de mise à jour dans l'énoncé du protocole. En effet, les 25 stations suivies englobent les 3 sites témoins dont SO20.

Les prélèvements de sol sont réalisés sur chaque station par une seule prise à l'aide d'une pelle de jardinage. Afin de limiter les biais liés à l'échantillonnage, plusieurs prélèvements (2 ou 3) devraient être réalisés sur chaque station. Ces prélèvements seront mélangés, homogénéisés et quartés afin d'avoir un échantillon plus représentatif du sol de la station.

▪ Prélèvement et préparation des échantillons de plantes pour les analyses chimiques

A noter qu'il est important de veiller à ce que les prélèvements foliaires soient réalisés sur les mêmes individus à chaque période. Ceci afin d'éviter d'introduire un biais dans les analyses chimiques lié à l'individu échantillonné. A chaque prélèvement plusieurs individus d'une même espèce sont échantillonnés afin d'obtenir la quantité nécessaire de matière végétale. Les individus échantillonnés devraient être balisés afin de d'effectuer les prélèvements sur les mêmes individus à chaque période.

La question se pose de savoir si les feuilles échantillonnées doivent être nettoyées afin d'enlever les poussières à la surface des limbes qui peuvent le cas échéant, modifier les résultats d'analyses chimiques foliaires. Ainsi, afin de quantifier par analyse chimique le soufre atmosphérique absorbé par les plantes des zones impactées et de les comparer aux espèces évaluées sur les sites témoins, il est recommandé de retirer les poussières des feuilles récoltées avant séchage.

V.5. Traitement des données acquises sur le terrain

Données acquises avec le protocole de 2013

Trois rapports de suivi issus des données acquises avec l'ancien protocole en 2013, 2014 et 2015 ont été rédigés par l'ingénieure responsable de l'équipe Conservation du service Préservation de l'Environnement de VALE NC.

Les trois rapports de suivi issus des données acquises avec l'ancien protocole s'appliquent à identifier des tendances. Il a pu être identifié ainsi lors de l'analyse des rapports de suivi symptomatologique un manque important d'informations sur la mise en œuvre d'outils statistiques permettant de donner un aspect définitif aux conclusions apportées. Aussi, sans plus d'informations sur la mise en œuvre de tels outils, les conclusions, sans remettre leur véracité en cause, nécessitent dans ces conditions d'être appréciées avec certaines réserves.

Sur les 3 rapports d'étude des années précédentes (2013, 2014 et 2015), les résultats sont exprimés de la façon suivante :

- Les résultats des mesures de SO₂ atmosphérique par échantillonnage passif sont représentés sur des graphiques qui illustrent :
 - Les concentrations moyennes annuelles en SO₂ de l'air par station
 - Le profil des concentrations mensuelles en SO₂ de l'air pour les différentes campagnes

Ces résultats des teneurs en SO₂ atmosphérique sont corrélés avec les conditions de fonctionnement des différentes unités présentes sur le site (période de maintenance) et avec les incidents opérationnels recensés durant la campagne (départs de feu ou de gâteau de soufre au niveau de l'usine d'acide) susceptibles d'avoir une influence sur les concentrations de SO₂ présentes dans l'air ambiant.

- Les quatre suivis symptomatologiques effectués chaque année ont permis de réaliser une représentation spatiale des stations d'observation avec apparition de symptômes et de délimiter les zones de dépérissement anciennes et/ou récentes.

Une analyse par classe de stations (proche-moyenne-loin) permet de montrer si le nombre d'espèces avec apparition de symptômes diminue ou augmente dans le temps et selon la distance à la source de SO₂ atmosphérique.

- Les résultats des analyses chimiques foliaires réalisées depuis le commencement du suivi symptomatologique sont représentés sous forme de graphique exprimant la teneur en soufre (mg/kg) des feuilles des espèces analysées en fonction du temps et selon la présence ou non de symptômes sur les stations.

- Les analyses statistiques de comparaison de moyenne entre les différentes stations pour une même variable et les analyses de corrélations pour tester les liens entre variables étudiées sont réalisées avec XLS-stat à partir des données des différentes variables acquises sur le terrain.

Données acquises avec le nouveau protocole de 2016

A noter qu'aucune information n'est donnée dans le protocole de 2016 sur les méthodes utilisées pour l'intégration et l'analyse des données acquises sur le terrain. En cas de changement d'employé au sein du service Préservation de l'Environnement de VALE NC, il faudra s'assurer de la transmission des savoir-faire en termes d'analyses des données du suivi symptomatologique.

A l'heure actuelle, aucun rapport d'étude n'a été rédigé avec les données obtenues en 2016 - 2017 à partir du nouveau protocole. Les données des analyses chimiques des échantillons de feuilles et de sols prélevés en décembre 2016 n'avaient toujours pas été fournies à VALE NC en décembre 2017. Ainsi les analyses de corrélations entre le suivi symptomatologique sur la végétation et les analyses chimiques de sols et de feuilles sur les stations suivies n'ont pu être réalisées. Sur une partie des stations les analyses de corrélation entre les paramètres des teneurs en soufre atmosphérique et les paramètres de l'état de santé de la végétation relevés ne peuvent pas être effectuées. Effectivement, il n'y a que 10 tubes passifs pour 25 stations suivies.

L'objectif de ce protocole est de caractériser l'évolution du dépérissement. Les informations recueillies auprès de VALE NC précisent que les résultats du protocole de 2016 porteront sur des analyses entre les stations par classe de distance, sur des comparaisons de moyennes entre les stations à proximité du site, à moyenne distance, à plus longue distance et les stations témoins hors zone d'influence, et porteront aussi sur une analyse temporelle de ces données. Finalement, début mars 2018, l'équipe de VALE NC a reçu les résultats d'analyse du laboratoire australien et va pouvoir établir un rapport d'étude sur la base des données acquises à l'aide du nouveau protocole.

Aussi, en l'absence de ce rapport d'étude concernant les résultats issus des campagnes de suivi du nouveau protocole, il est difficile d'évaluer la qualité des analyses statistiques issues des données du protocole de 2016.

D'autre part, pour ce qui concerne les suivis 2016-2017 avec le nouveau protocole, la question se pose de déterminer la manière d'analyser les nombreux commentaires sur les symptômes de chloroses dont les causes ne sont pas nettement identifiées, sont-elles liées aux émissions de soufre ou à un autre stress (hydrique, carences, phytosanitaires) ? En pratique, ces commentaires, avec l'aide des résultats des analyses chimiques de soufre foliaire et de soufre atmosphérique, devraient permettre, comme nous venons de le voir, de conclure sur la cause des symptômes observés. Le protocole précise au

demeurant que des teneurs en soufre foliaire plus élevées peuvent permettre de valider que les symptômes foliaires (nécrose, chlorose, défoliation) sont liés à une exposition au SO₂ atmosphérique.

Chapitre VI - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les questions posées par le cahier des charges étaient :

- De s'assurer de la bonne mise en œuvre du protocole de suivi tel que prévu dans le document «Protocole de suivi de la végétation – zone de dépérissement en aval de l'usine de VALE NC» (VALE NC, 2016) ;
- De préciser certains points de détails méthodologiques ;
- D'identifier et de consigner tous changements méthodologiques qui pourraient avoir eu lieu par rapport au protocole initial, ainsi que la raison de ce changement et ses conséquences sur l'interprétation des résultats ;
- De procéder à une analyse critique de la mise en œuvre du suivi sur le terrain et le cas échéant suggérer des pistes d'amélioration.

Le nouveau protocole de suivi symptomatologique aux alentours du site de VALE NC permet de quantifier et de cartographier la distribution du degré de sévérité des symptômes au sein du secteur impacté et précise leurs évolutions dans le temps. Pour une meilleure appréciation, les analyses chimiques foliaires se concentrent sur deux espèces indicatrices à large répartition jugées sensibles au SO₂ atmosphérique, à savoir *Arillastrum gummiferum* et *Garcinia neglecta*, afin d'affiner l'analyse des concentrations en soufre foliaire selon la distance au complexe industriel.

Les résultats reposent sur des analyses de corrélations entre l'évaluation des symptômes foliaires, les teneurs en soufre foliaire et les teneurs en SO₂ atmosphérique à différentes distances des activités liées au soufre.

Le plan expérimental adopté est adapté aux objectifs d'évaluation de l'état de santé de la végétation à condition que la mise en œuvre soit réalisée de manière à obtenir les données les plus objectives possibles. Le postulat de base de la mise en œuvre de l'évaluation est de savoir reconnaître et différencier les symptômes liés aux émissions de soufre et ceux liés aux phytopathogènes.

L'évaluation de l'état de santé de la végétation est certes complexe, aussi faut-il insister sur le besoin d'enrichir la formation des opérateurs en pathologies végétales et sur la nécessité de bien concevoir et améliorer sans cesse les guides de reconnaissance des symptômes tant il est difficile de distinguer sans méprise les causes des symptômes observés.

Les biais liés à l'observation sont relativement importants en cas de changement d'opérateurs du suivi, il existe un risque non négligeable d'une évaluation hétérogène des symptômes d'un observateur à l'autre. En cas de changement d'opérateur, la transmission du savoir-faire sera essentielle.

Il faudrait aussi prévoir un prélèvement de feuilles sur un panel d'individus balisés, afin d'éviter les biais liés à la teneur en soufre des individus récoltés. Il s'agirait de baliser un nombre d'individus suffisant et de ne prélever chaque année que peu de matériel végétal sur chaque individu, pour éviter une défoliation excessive des individus récoltés.

Il convient de consigner que le protocole de suivi symptomatologique engagé depuis 2012 par le service préservation de l'environnement de VALE NC sera maintenu, selon une fréquence annuelle avec une continuité des analyses chimiques foliaires sur plusieurs espèces et des observations de symptômes foliaires dus aux émissions de SO₂, afin de valoriser les données obtenues depuis 6 ans et d'assurer une surveillance aux alentours du complexe industriel, comme l'ont effectué les opérateurs de l'équipe Conservation du service Préservation de l'Environnement de Vale NC jusqu'à aujourd'hui. En effet, il serait regrettable de ne pas mettre en valeur le jeu de données existant, dans l'attente d'acquisition d'une série de nouvelles données avec le protocole de suivi mise à jour en 2016.

Ainsi des améliorations ont été apportées au protocole de 2013 avec une réduction du nombre de stations suivies, une standardisation du nombre d'espèces et du nombre d'individus balisés suivis par stations afin d'optimiser l'évaluation des symptômes pour une même espèce dans le temps.

En outre, en 2016, un nouvel ajustement du protocole de suivi a été effectué permettant une meilleure représentativité des impacts sur le chêne gomme car plus d'individus évalués à différents stades de dépérissement avec des analyses chimiques à l'appui sur une superficie plus étendue. Des prélèvements de sols complémentaires sont réalisés pour des analyses chimiques (PH, S et conductivité) afin de détecter une éventuelle contamination du sol par un apport en S et son évolution temporelle.

Il serait judicieux de rajouter des sous-parcelles de suivi pour évaluer l'évolution de la régénération naturelle et la résilience du milieu au sein de la zone impactée : un changement de la composition spécifique de strate plantule pourrait indiquer une ouverture du milieu avec une augmentation d'espèces plus héliophiles.

Il serait nécessaire aussi de fournir aux opérateurs des guides de plus en plus précis, et ainsi de parfaire la détection précoce de nouveaux symptômes dans la zone d'influence potentielle des émissions issues de l'activité de l'usine. Ces retouches, à remanier sans cesse, permettront selon les résultats de définir au mieux dans les années à venir les conduites à tenir par tous les acteurs de ce site.

BIBLIOGRAPHIE

Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests » - UN ECE ICP Forests, 2010

Environmental Impact Solutions associate Professor Franck Murray. Controlled exposures of native Vegetation to Sulphur dioxide At Vale New Caldonia, 2015.

Franck Murray associé à VALE NC. Guide des symptômes foliaires associés au dioxyde de soufre sur la flore du grand Sud, 2017.

Franck Murray. 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, 2012.

L. Bordez & B. Fogliani (IAC). Analyse critique du suivi symptomatologique existant du phénomène de dépérissement observé sur la végétation aux alentours de Vale NC, 2017.

Soreco-NC. Suivi des symptômes foliaires à proximité de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie, 2013.

VALE NC. 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 NC, 2011.

VALE NC. Protocole de suivi de la végétation zone de dépérissement en aval de l'usine de VALE NC, 2016

VALE NC. Surveillance symptomologique de la flore endémique sur 27 stations d'observation situées aux alentours de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie : Bilan de Février 2012 à Mars 2013. 2013.

VALE NC. Surveillance symptomologique de la flore endémique sur 27 stations d'observation situées aux alentours de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie : Janvier 2014 à Décembre 2014. 2015

VALE NC. Surveillance symptomologique de la flore endémique sur 27 stations d'observation situées aux alentours de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie : Janvier 2015 à Décembre 2015. 2016.

Valérie KAGY, Carole MARTIN, Rose-Mai M'BOUERI, Christian MILLE. Identification des maladies fongiques et ravageurs – Zone d'étude la pépinière de Vale. IAC; 2017.