



PROTOCOLE DE SUIVI DE LA VEGETATION

ZONE DE DEPERISEMENT EN AVAL DE L'USINE DE VALE NC

Julie Goxe, Stephane McCoy, Warren Kotopeu, Zoe Foullonneau - Vale NC

21/03/2016



Résumé : Le protocole présente les mesures qualificatives et quantificatives des plantes communes de 25 stations d'observation afin d'évaluer l'évolution quadrimestrielle de la zone impactée en aval de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie.

Contenu

Avant-propos :	2
Objectif :	2
Présentation de la zone d'étude	2
Méthodologie	6
Critères de sélection des stations	6
Fréquence et durée du suivi:	7
Evaluation de l'état de santé du milieu – Paramètres de suivi :	7
<i>Indice de qualité de la station :</i>	8
<i>Reprise de la végétation :</i>	9
<i>Présence de poussières et/ou de cendres :</i>	9
<i>Evaluation de l'état de santé des lichens terrestres :</i>	10
<i>Phénologie</i>	12
<i>Etat phytosanitaire :</i>	11
<i>Symptômes foliaires :</i>	12
<i>Mesure de la concentration en SO₂ de l'air</i>	19
<i>Prélèvements et analyses chimiques des sols et des végétaux</i>	14
Analyses chimiques des sols : S, pH et conductivité :	14
Analyses chimiques en soufre foliaire :	16
<i>Suivi photographique des milieux dans la zone impactée</i>	20
Avantage par rapport à l'ancien protocole :	23
Bibliographie	24

Avant-propos :

Depuis 2012, un suivi mensuel des symptômes foliaires a été établi sur 27 stations équipées de tubes passifs et situées à différentes distances et orientations de vent par rapport au site industriel de Vale NC afin de signaler de manière précoce toute apparition de symptômes liés aux émissions atmosphériques en SO₂ et évaluer l'évolution de la zone impactée. Les résultats de ces suivis ont montrés une persistance des symptômes et des teneurs en SO₂ sur un axe Ouest Nord-Ouest allant de 200 m à 2750 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 de trois ans. Les tubes passifs des stations localisées au Sud, Nord et Est n'ont pas 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 ne semble pas impacté. Il a été constaté une bonne reprise des individus impactés avec la production d'un nouveau feuillage en bonne santé quelques mois ou 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 mérite la mise en place d'un nouveau dispositif d'évaluation afin de quantifier plus précisément l'évolution de la zone impactée dans le temps.

Objectif :

L'objectif du suivi de l'état de santé de la végétation dans l'emprise du dépérissement en aval du site industriel est de préciser l'évolution de la « zone d'impactée » dans le temps par une qualification et quantification du degré de sévérité des symptômes sur des espèces indicatrices. L'évaluation porte sur une maille de stations de suivi située à l'intérieur de la « zone impactée » et de stations de suivi localisées en périphérie qui ne présentent pas de symptômes (ou des traces de vieux symptômes) afin de détecter une éventuelle extension ou diminution de la « zone impactée ».

Présentation de la zone d'étude

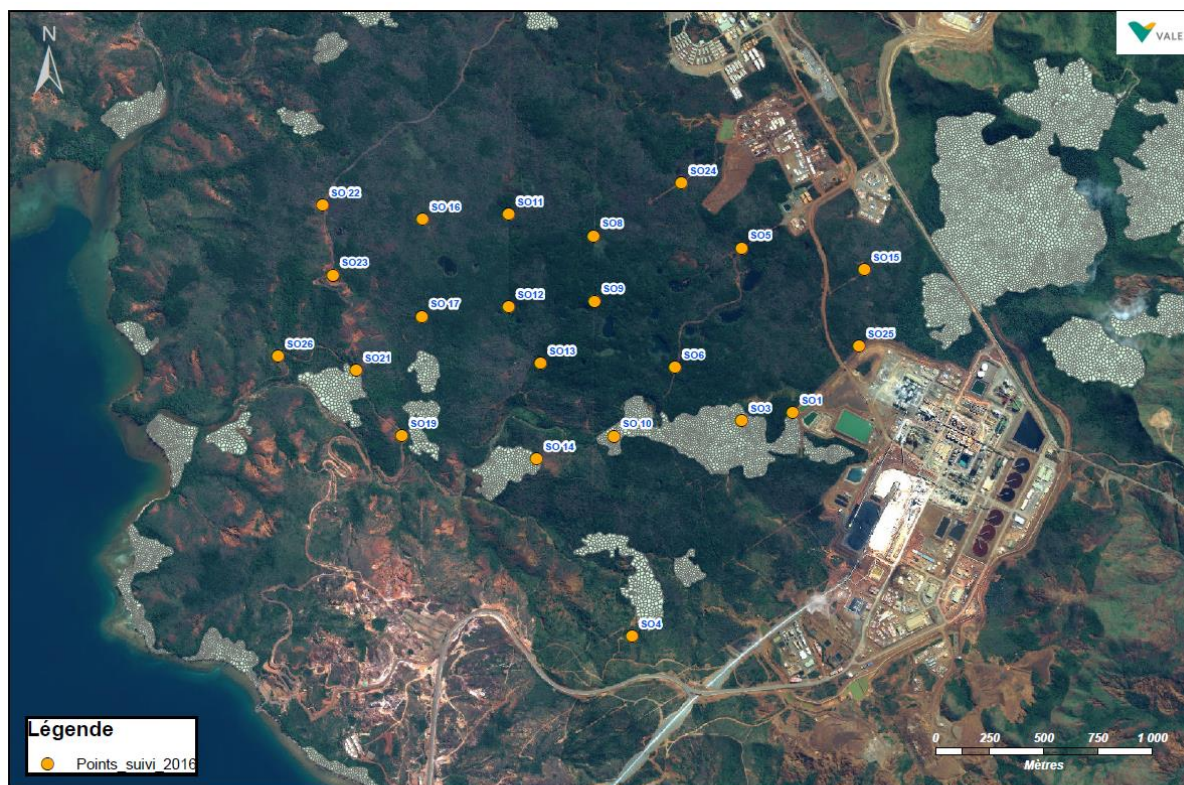
25 stations localisées au sein et en périphérie de la zone d'impact, espacées sur une maille de 200 m, ont été établies en Novembre 2015 (Figure 1, Figure 2). Les stations sont localisées dans le bassin versant du Creek Baie Nord de 200 à 3700 m en aval du site industriel sur un rayon de 8 km² dans des formations végétales allant du maquis arbustif ouvert des crêtes au maquis para-forestier et forêts sur des plateaux ou vallons de cuirasse. 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 Kue Nord, soit hors influence des émissions atmosphériques, sont également suivies pour établir une comparaison avec les sites localisés au sein de la zone impactée. La maille de stations de suivi est axée sur les sites PS 11, 18 et PS 23 de l'ancien protocole de suivi symptomologique. Les stations PS 11 et PS 18 présentaient le plus de symptômes et les valeurs les plus élevées en SO₂ entre 2012 et 2015. Des stations de suivi ont également été établies au sein des massifs forestiers impactés suivis par télédétection dans le cadre de l'étude VEGUSINE ainsi qu'en sous-bois sur des parcelles impactées précédemment décrites par l'étude de l'IAC « Evaluation du dépérissement de chênes gommés ». Le tableau 1 décrit les habitats des différentes stations de suivis.

PROTOCOLE 2016 – SUIVI SYMPTOMOLOGIQUE DE LA VEGETATION EXPOSEE AUX EMISSIONS ATMOSPHERIQUES



Figure 1: Répartition des stations de suivi dans la zone impactée (points orange) et des trois sites témoins (points vert).

PROTOCOLE 2016 – SUIVI SYMPTOMOLOGIQUE DE LA VEGETATION EXPOSEE AUX EMISSIONS
ATMOSPHERIQUES



Suivi symptomologique semestriel 2016

Figure 2: Zoom sur les stations de suivi dans le bassin versant du Creek Baie Nord. L'état de santé (activité photosynthétique) des massifs forestiers en vert est suivi par télédétection (Etude Vegusine, Bluecham).

PROTOCOLE 2016 – SUIVI SYMPTOMOLOGIQUE DE LA VEGETATION EXPOSEE AUX EMISSIONS ATMOSPHERIQUES

Point	Code	X	Y	Emplacement topographique	Habitat	Exposition	Canopée	Données Historique	Historique Symptômes	Repères
1	SO1	166,90718	-22,3308	Haut dôme de cuirasse	<i>Maquis paraforestier à Arillastrum</i>	Lisière	<i>Gymnostoma</i>	Suivi Symptôme/tubes passifs	Ancien/ Récent	Bord bassin premier flô
3	S03	166,9048962	-22,33115071	Vallon de cuirasse	<i>Maquis paraforestier à Arillastrum</i>	Fermée	<i>Arillastrum</i>	Vegusine	Ancien	
4	SO4	166,90004	-22,34016	Pente cuirassée	<i>Maquis paraforestier à Arillastrum</i>	Lisière	<i>Arillastrum</i>	Vegusine	Pas symptômes	Limite Sud Route du port
5	SO5	166,90485	-22,32398	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Ouvert			Récent	Piste CDE
6	SO6	166,90189	-22,32894	Pente cuirassée	Maquis arbustif dense	Lisière	<i>Tristaniopsis</i>	Suivi Symptôme/tubes passifs	Ancien/Récent	
8	SO8	166,89821	-22,32351	Haut dôme cuirasse	<i>Maquis paraforestier à Arillastrum</i>	lisière piste	<i>Arillastrum</i>		Pas symptômes	Limite nord
9	SO9	166,89828	-22,32623	Pente cuirassée	<i>Maquis paraforestier à 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>	Vegusine	Ancien	
11	S11	166,89441	-22,32262	Haut dôme cuirasse	<i>Maquis paraforestier à Arillastrum</i>	Lisière piste	<i>Arillastrum</i>		Pas symptômes	Limite Nord
12	S12	166.89444	-22,32647	Pente cuirassée	<i>Maquis paraforestier à Gymnostoma</i>	Lisière piste	<i>Gymnostoma</i>		Anciens symptômes	
13	S13	166,89587	-22,32882	Dôme cuirasse	<i>Maquis paraforestier à Arillastrum</i>	Ouvert	<i>Gymnostoma</i>		Ancien	
14	S14	166,89572	-22,332799	Dôme cuirasse	Forêt Chêne gomme	Lisière piste	<i>Arillastrum</i>	Vegusine	Ancien/Récent	
16	S16	166,8905523	-22,32285594	Pente cuirassée	<i>Maquis paraforestier à Gymnostoma</i>	Lisière plateforme sondage	<i>Gymnostoma</i>		Pas de symptômes	
17	S17	166,8905566	-22,32690833	Vallon cuirasse	<i>Maquis paraforestier à 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>	Vegusine	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>	Vegusine	Anciens symptômes	
22	S22	166,88607	-22,32228707	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	<i>Tristaniopsis</i>		Pas de Symptômes	Limite Nord Ouest
23	S23	166,886554	-22,325204	Pente érodée	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	<i>Tristaniopsis</i>	Suivi Symptôme/tubes passifs	Anciens symptômes	Bord de route
24	S24	166,90213	-22,32129	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Lisière Route	<i>Tristaniopsis</i>		Pas de Symptômes	Limite Nord Est Aire entreposage Nord
25	S25	166,91013	-22,32802	Pente cuirassée	Maquis arbustif ouvert	Lisière Route	<i>Tristaniopsis</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>	Vegusine	Pas de symptômes	Limite Ouest
27	S27	166,91238	-22,27429	Pente érodée	Maquis ligno-herbacé	Ouvert	<i>Tristaniopsis</i>	Suivi Symptôme/tubes passifs	Pas de symptômes	Pépinière
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. Les points GPS des stations sont sur la projection RGNC91.

Méthodologie

La méthodologie a été développée conjointement avec le Professeur Francis Murray, référent scientifique de l'OMS sur les effets des émissions atmosphérique sur la végétation, afin de valider les paramètres d'évaluation ainsi que les sites les plus adaptés pour la mise en place d'un suivi symptomologique. La méthodologie adoptée est basée sur le manuel « Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests » - UN ECE ICP Forests, 2010.

Critères de sélection des stations

1. Les stations ont été établies à proximité ou au sein de massifs forestiers faisant l'objet d'un suivi de leur activité photosynthétique par télédétection à haute résolution (étude VEGUSINE Bluecham, Rapid Eye 30cm) à l'ouest de l'usine afin d'assurer un calage annuel des observations de terrain avec les images aériennes.
2. Les stations de suivi sont situées en maquis et en forêt avec un effort de suivi plus important en lisière et à proximité du complexe industriel. Les lisières de forêt, de maquis para-forestier et de maquis ouvert ont été privilégiées car ces milieux sont les premiers milieux récepteurs des effets du dioxyde de soufre et leur suivi facilite l'évaluation visuelle des symptômes foliaires des espèces indicatrices à hauteur d'homme ou à l'aide de jumelles.
3. Les installations du complexe industriel de VALE NC sont visibles même à partir des stations situées à plus de 2 km sur les parties hautes du bassin du creek de la baie nord.
4. Les espèces sélectionnées pour le suivi sont des espèces indicatrices dont les symptômes foliaires sont caractéristiques d'une exposition liée au SO₂ atmosphérique. Ces espèces ont déjà été décrites et validées par l'expert de l'OMS - Francis Murray. Ces espèces indicatrices sont bien représentées dans la canopée ou en sous-bois. La présence de chênes gommés a été privilégiée pour la sélection des stations.
5. Les stations ont été sélectionnées si un minimum de 4 individus appartenant à 3 espèces indicatrices se trouvaient dans un rayon de 10 m.
6. Les stations localisées en périphérie de la zone d'étude ne présentent aucun symptôme visible voir des vieux symptômes persistants et correspondraient aux limites de la zone d'impact.
7. Les voies d'accès aux points de suivis sont composées de pistes ou de sentiers en bon état afin de faciliter l'accès aux points de suivi en toute sécurité.

Fréquence et durée du suivi:

Les résultats de l'ancien protocole de suivi ont permis de mettre en évidence un développement de la végétation et une apparition de symptômes sur un pas de temps lent et assez conséquent pouvant s'étaler sur plusieurs mois. Une fréquence quadrimestrielle a donc été validée dans le cadre du nouveau protocole de suivi : Avril, Aout et Décembre. Ses 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 durée impartie pour la réalisation du suivi des 25 stations a été estimée à 5 jours (sans intempérie).

Evaluation de l'état de santé du milieu – Paramètres de suivi :

Ce protocole de surveillance a pour objectifs principaux de détecter précocement tout phénomène de dépérissement lié aux émissions atmosphériques et d'évaluer l'évolution de l'état de santé de la zone impactée. Pour répondre à ces objectifs le protocole intègre le suivi de plusieurs paramètres (tableau 2).

Evaluation de l'état de santé du milieu	Paramètres suivis	Fréquence de suivi	Dispositifs de suivi
Suivi symptomologique de la végétation	Symptômes foliaires	Quadrimestrielle	25 stations - 3 espèces par stations
			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 - 12 individus par station
Etat phytosanitaire	Attaques insectes, champignons, stress hydriques, brulures...	Quadrimestrielle	25 stations - 3 espèces par stations
Etat de santé des lichens terrestres	Peuplement de lichens terrestres	Quadrimestrielle	13 stations
Analyse chimique foliaires	Soufre foliaires	Annuelle	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

Tableau 2: Paramètres suivis, fréquence de suivi et dispositif de suivi en place.

Paramètres évalués sur les stations :

- Météo
- Odeurs des émissions atmosphériques soufrées (SO₂, H₂S)
- Teneur ponctuel en SO₂ ambiant avec un détecteur portatif (Polytron précision 2ppb)
- Orientation du vent
- Présence d'espèces exogènes végétales ou animales
- Présence de la rouille des myrtacées et espèces impactées
- Observation de coupes de bois
- Présence de cendres et/ou de poussières (Indice)
- Qualité de la station (indice)
- Reprise de la végétation (indice)
- Evaluation de l'état de santé des lichens terrestres (dénombrement et photographie)
- Phénologie (floraison et fructification des espèces communes)
- Etat phytosanitaire (indice)
- Symptômes foliaires (indice et photographie)
- Teneur mensuelle en SO₂ atmosphérique par tubes passifs.
- Analyse chimique des sols
- Analyse chimique en soufre foliaire

Indice de qualité de la station :

Un indice permettant d'évaluer la qualité du milieu est attribué à chaque station.

Très mauvais : On note une forte dégradation de la végétation de la station. Les nouvelles feuilles et les anciennes feuilles sont recouvertes de poussières, attaquées par des insectes et/ou présente des symptômes de type « sévère », ensemble des fruits ou fleurs attaquées ou malades plus de 50 % de la végétation. L'état de santé de la végétation est fortement impacté.

Mauvais : On note une dégradation de la végétation de la station. L'état de santé semble impacté. Les nouvelles feuilles et les anciennes feuilles sont recouvertes de poussières, attaquées par des insectes et/ou présente des symptômes de type fort, ensemble des fruits ou fleurs attaquées ou malades au moins 20% de la végétation.

Moyen : Aucun développement ou dégradation

Bon : Légère amélioration. Quelques bourgeons perceptibles. Nouvelles feuilles perceptibles, fleurs ou fruits en développement sans signes d'attaques ou de maladies.

Excellent : On note une forte amélioration de l'état de santé de la végétation. Nouvelles feuilles visibles, absence de poussière, absence d'attaques insectes ou nécroses, fruit ou fleurs en bon état de développement.

Reprise de la végétation :

Un indice permettant d'évaluer la reprise de la végétation est attribué à chaque station.

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

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

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

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

Présence de poussières et/ou de cendres :

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

- **Rien** : Aucune poussière ou cendre visible sur l'ensemble de la végétation de la station d'observation ni sur les individus suivis.
- **Léger** : Poussières ou cendres légèrement visibles, sous forme de couches fines, 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.
- **Moyen** : Poussières ou cendres visibles, sous forme de couches plus épaisse voir de plaques sur les feuilles du haut et du bas de la végétation de la station d'observation.
- **Fort** : Poussières ou cendres fortement visibles, en couche épaisse, sur toutes les strates de la végétation ainsi qu'au niveau du sol.

Evaluation de l'état de santé des lichens terrestres :

Les lichens terrestres sont utilisés comme bioindicateur dans les pays tempérés afin d'évaluer les retombées des émissions atmosphériques (<http://gis.nacse.org/lichenair/index.php?page=reports>). Des émissions de SO₂ peuvent avoir des effets sur les systèmes physiologiques de photosynthèse et de respiration des lichens en acidifiant leurs tissus. Aucune données n'existent en Nouvelle Calédonie sur la sensibilité des lichens par rapport aux retombées atmosphériques. Les lichens corail *Cladonia aggregata* et *Cladonia pycnoclada* sont abondants en maquis et en lisière de forêt sur les sols latéritiques (Jaffré, 1980). Ses milieux latéritiques riches en métaux ont des pH entre 4 et 6 qui nécessitent des adaptations des plantes afin de tolérer des sols acides (Jaffré, 1980).

Une évaluation visuelle des symptômes sur les lichens est difficile car les parties actives et inactives sont difficilement distinguables et l'analyse de l'activité photosynthétique du lichen se fait par des prélèvements analysés en laboratoire (Fрати & Brunialti, 2006). Cette technique n'est pas adaptée à un suivi sur des stations permanentes car des prélèvements réduiraient la quantité de *Cladonia* présents sur la station. *Cladonia aggregata* et *Cladonia pycnoclada* forment des colonies au sol sur 11 stations dans la zone de dépérissement et deux sites témoins. L'objectif sera de comparer les colonies présentes sur la zone témoin aux colonies présentes sur les stations en périphérie de la zone d'impactée et au sein de la zone d'impactée afin d'évaluer d'éventuels changements. L'évaluation portera sur une vingtaine de *Cladonia* par station et consistera à qualifier l'état santé des tissus aériens (Couleur crème/blanc = vivant ; Couleur marron = nécrosé et mort). L'évaluation porte sur une colonie balisée qui est dénombrée et photographiée sur chaque station.



Figure 3 : Une colonie de *Cladonia aggregata* en lisière du maquis para-forestier à Gymnostoma.

Phénologie :

Un relevé phénologique est réalisé pour chaque individu suivi avec le relevé de la présence de boutons floraux, fleurs et/ou fruits.

Etat phytosanitaire :

Une évaluation de l'état phytosanitaire est réalisée pour chaque espèce indicatrice suivie par station avec le relevé de la présence de champignons, d'insectes, carences, sécheresse, Brulures...Un indice est attribué à chaque espèce suivie.

Rien : Aucun symptôme relatif à une carence, un stress, une attaque d'insecte ou de champignons n'est relevé.

Léger : Quelques traces de piqures ou présence de champignons, ou encore la présence de chlorose, de nécrose ou de défoliation qui puisse être liés à un stress particulier (carences, sècheresse, brulures...) sont relevés sur une faible surface foliaire sur une partie des individus suivis pour chaque espèce.

Moyen : Des traces de piqures, le développement de champignons ou encore la présence de chlorose, de nécrose ou de défoliation qui puisse être liés à un stress particulier (carences, sècheresse, brulures...) sont relevés sur l'ensemble des individus suivis pour chaque espèce mais ne semble pas impacter leur état de santé.

Fort : Des traces de piqures, le développement de champignons ou encore la présence de symptômes de chlorose, de nécrose ou de défoliation qui puisse être liés à un stress particulier (carences, sècheresse, brulures...) sont relevés sur l'ensemble des individus suivis et semble impacter l'état de santé de ces individus, notamment, la floraison, la fructification ou le développement de nouvelles feuilles.

Symptômes foliaires :

Un suivi quadrimestriel des symptômes foliaires est assuré sur 25 stations d'observation et concerne neuf espèces indicatrices présentant des symptômes évidents en cas de forte exposition au dioxyde de soufre (Tableau 3). Un guide des symptômes foliaires intégrant ses espèces indicatrices et réalisé par Francis Murray (Murray, 2012) sert de référence pour le relevé des symptômes sur le terrain. 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'il était suffisamment représentatif sur les stations. Ce suivi symptomologique 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 permettant d'évaluer le degré de sévérité des symptômes foliaire a été défini afin d'évaluer leur évolution dans le temps. Trois espèces ont été sélectionnées sur chaque station, l'évaluation portant sur quatre individus par espèce sur un rayon maximum de 10 m. Au total, l'évaluation symptomologique porte sur 300 individus sur l'ensemble de la zone d'étude. Le tableau 3 présente les espèces sélectionnées pour chaque station. Des photographies des trois espèces indicatrices suivies par station sont réalisées à chaque suivi. Un individu par espèce est 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 réalisée en cas d'apparition de nouveaux symptômes sur un des individus suivis. Ce suivi doit permettre d'évaluer l'évolution du dépérissement dans le temps en prenant en compte l'évolution du nombre de stations, du nombre d'espèces et du nombre d'individus présentant des symptômes ainsi que l'évolution du degré de sévérité des symptômes.

- **Rien** : Aucun symptôme visible qui puisse être relié à une exposition au SO₂ atmosphérique. Symptôme pouvant être assimilés à des symptômes d'origine naturel.
- **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. Les symptômes de chloroses et/ou de nécroses foliaires sont diffus ou sont présent sur une faible surface foliaire. Ces symptômes sont repartis de manière localisés sur l'individu (une branche) ou uniformément sur le feuillage de l'individu. L'état de santé de l'individu ne semble pas impacté malgré la présence symptômes.
- **Moyen** : Symptômes détectable par un observateur inexpérimenté. Les symptômes de chloroses et/ou de nécroses foliaires sont marqués avec une surface foliaire atteinte plus importante. Ils sont répartis uniformément sur l'ensemble du feuillage de l'individu. Ils peuvent être plus marqués comme des symptômes de type fort mais dans ce cas sont répartis de manière localisés sur l'individu (une branche). L'état de santé de l'individu ne semble pas impacté malgré la présence de symptômes.
- **Fort** : Symptômes évident pouvant porter atteinte à la sensibilité d'un observateur inexpérimenté. Les symptômes de chloroses et/ou de nécroses foliaires sont particulièrement marqués. Ils sont répartis uniformément sur l'ensemble du feuillage de l'individu. Ils peuvent être plus marqués et porter atteinte à l'état de santé des feuilles (déformées, séchées...) mais dans ce cas sont répartis de manière localisés sur l'individu (une branche). Mais l'état de santé global de l'individu ne semble pas impacté malgré la présence de symptôme.

**PROTOCOLE 2016 – SUIVI SYMPTOMOLOGIQUE DE LA VEGETATION EXPOSEE AUX EMISSIONS
ATMOSPHERIQUES**

- **Sévère :** Symptômes évident pouvant porter fortement atteinte à la sensibilité d'un observateur inexpérimenté. Les symptômes de chloroses et/ou de nécroses foliaires sont particulièrement marqués 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.

3 espèces suivies par station et 4 individus par espèce											
Nom station	<i>Arillostrum gummiferum</i>	<i>Styphelia cymbulae</i>	<i>Gymnostoma deplancheanum</i>	<i>Codia spathulata</i>	<i>Tristaniopsis guillanii</i>	<i>Garcinia neglecta</i>	<i>Alphitonia neocaledonica</i>	<i>Guoia glauca</i>	Nombre d'espèces suivies	Nombre d'individus	Nomre 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 3 : Nombre d'individus évalués par espèce et nombre de photographies par station de suivi. Les stations surlignées en vert correspondent aux stations témoins.

Prélèvement et analyses chimiques des sols et des végétaux

L'objectif des analyses chimiques des sols et 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.

Analyses chimiques des sols : S, pH et conductivité :

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 atmosphériques. Les sites d'échantillonnage se trouvent sur la partie Sud de la maille sur les zones forestières dont l'impact est documenté. Les sites sur la partie Nord de la maille ne présentent pas de symptômes récents. Les analyses chimiques porteront sur le PH, le S et la conductivité afin d'évaluer un éventuel apport atmosphériques de SO₂. Les prélèvements d'échantillons de sols sont réalisés une fois par an afin de suivre l'évolution chimique des sols dans la zone impactée. Les analyses seront réalisées par le Laboratoire de VALE NC.

PROTOCOLE 2016 – SUIVI SYMPTOMOLOGIQUE DE LA VEGETATION EXPOSEE AUX EMISSIONS
ATMOSPHERIQUES



Figure 5 : Emplacement des stations avec prélèvement de sol annuel.

Analyses chimiques en soufre foliaire :

Deux espèces ont été sélectionnées : *Arillastrum gummiferum* et *Garcinia sp.* pour les prélèvements foliaires. Les prélèvements sont réalisés sur 13 sites dont un site témoin pour chacune des espèces (Figure 6 ; Figure 7). La comparaison entre les sites localisés dans la zone impactée et les sites témoins porte sur les mêmes espèces. Les feuilles sont prélevées sur la station mais sur des individus non identifiés pour le suivi afin de ne pas impacter les résultats des observations qualificatives et quantitatives sur les individus balisés suivis. Les teneurs en soufre des feuilles des arbres d'*Arillastrum* et de *Garcinia* sont utilisées pour signaler une éventuelle augmentation en soufre foliaire qui puisse être liée à un événement atmosphérique industriel. Des teneurs en soufre foliaire plus élevées peuvent permettre de valider que les symptômes foliaires (nécroses, chlorose, déformation des feuilles) soient 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. Les prélèvements de feuilles sont réalisés sur plusieurs individus par espèce et par site et sont réalisés en Décembre en saison sèche.

PROTOCOLE 2016 – SUIVI SYMPTOMOLOGIQUE DE LA VEGETATION EXPOSEE AUX EMISSIONS
ATMOSPHERIQUES



Figure 6 : Stations de prélèvement annuel de feuilles sur *Arillastrum gummiiferum* (chêne gommès).

PROTOCOLE 2016 – SUIVI SYMPTOMOLOGIQUE DE LA VEGETATION EXPOSEE AUX EMISSIONS
ATMOSPHERIQUES

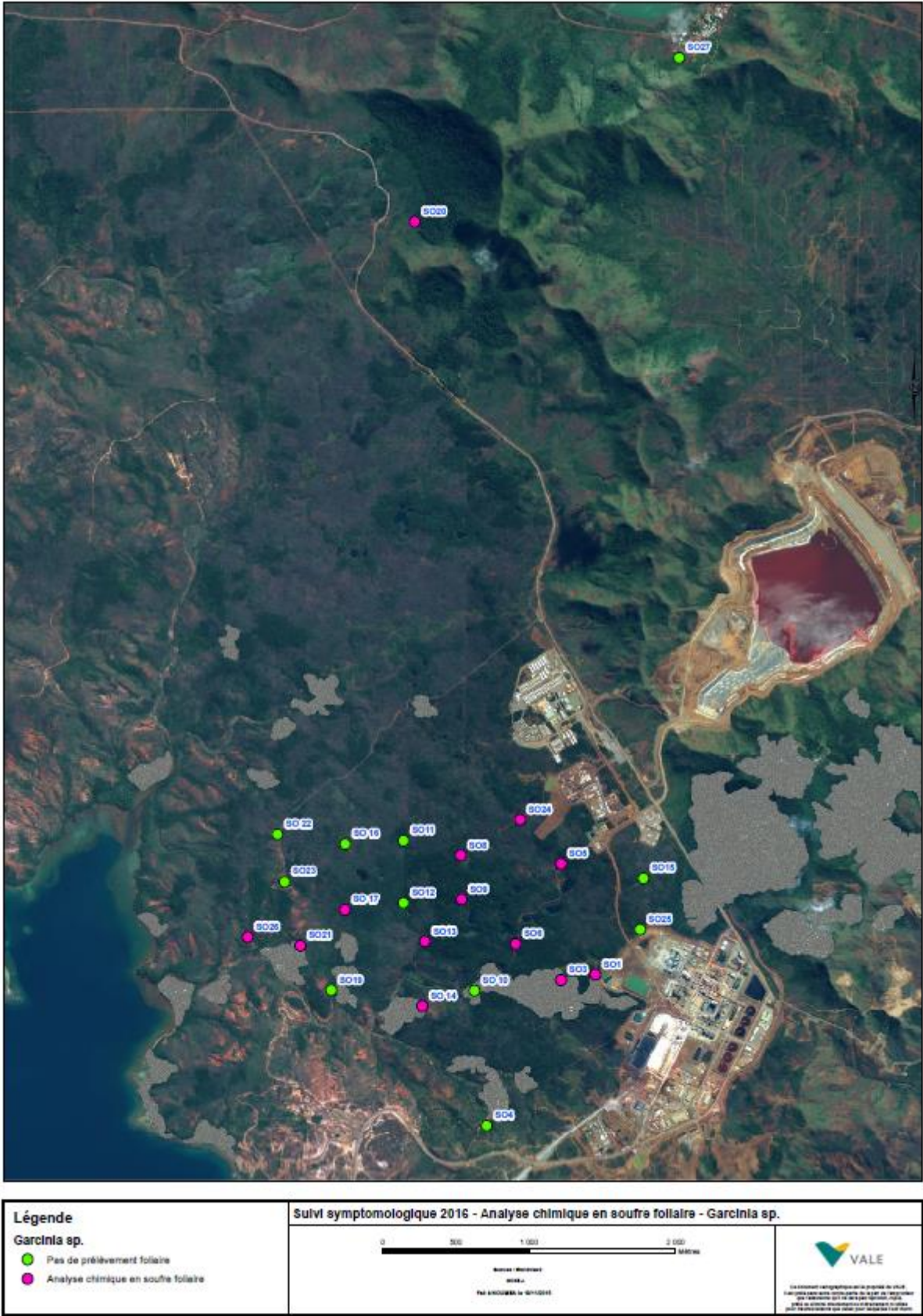


Figure 7 : Station de prélèvement annuel de feuille de *Garcinia sp.*

Mesure de la concentration mensuelle en SO₂ de l'air

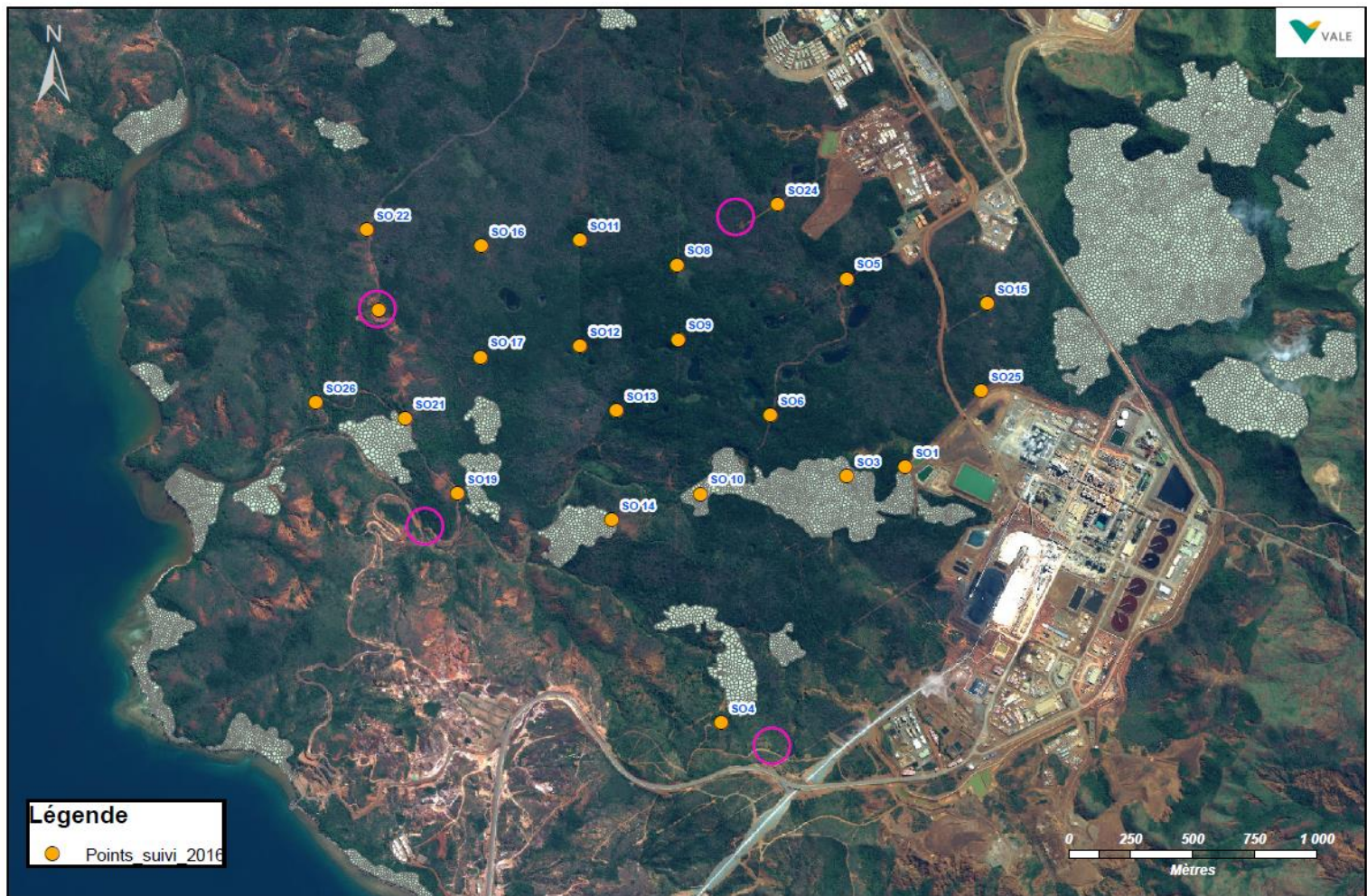
10 tubes passifs ont été installés au niveau de la zone d'étude afin de mesurer la concentration moyenne mensuelle en SO₂ de l'air (Figure 3). Cinq tubes passifs ont été installés au niveau de cinq stations de suivi : SO01, SO25, SO23, SO20, SO06 afin de couvrir au maximum la zone d'étude. En complément, cinq tubes passifs ont été 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 les sites témoins.



Figure 4 : Dispositif de suivi de la teneur mensuelle en SO₂ de l'air par tube passif.

Suivi photographique des milieux dans la zone impactée

Quatre photographies de la zone impactée sont prises sur des points hauts au même emplacement à chaque suivi quadrimestriel (Figure 8, Figure 9, Figure 10, Figure 11, Figure 12). L'emplacement pour la prise de photo est marqué d'un repère (piquet). 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.



Nouveau Suivi symptomologique - Photographies panoramiques

Figure 8 : 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.



Figure 9 : Vue d'ensemble de la zone impactée prise à proximité de SO4.



Figure 10 : Vue d'ensemble de la zone impactée à proximité de SO19.



Figure 11 : Vue d'ensemble de la zone impactée à proximité de SO24.



Figure 12 : Vue d'ensemble de la zone impactée à proximité de SO16.

Avantage par rapport à l'ancien protocole :

- Meilleur représentativité des impacts sur le chêne gomme car plus d'individus évalués à différents stade de dépérissement avec des analyses chimiques a l'appui sur une superficie plus étendue.
- Prélèvements de sol complémentaires pour les analyses chimiques (PH, S et conductivité) afin de détecter une éventuelle contamination du sol par un apport en S et son évolution temporelle
- Fréquence quadrimestrielle plus adaptée (cycle croissance des plantes) au vu de l'évolution de la zone impactée sur des pas de temps conséquent depuis le début des suivis en 2012.
- Rajout de paramètres de suivi permettant d'évaluer la reprise de la végétation, la présence de poussières et/ou de cendres, l'état phytosanitaire de la végétation, l'état de santé de peuplements de lichens comme bioindicateurs.
- Réduction du temps de travail : Réduction de 32 jours par rapport au premier protocole (=48 jours) avec 3 suivis quadrimestriels de 4 jours (=12 jours). Il convient de noter que le suivi des symptômes foliaires assuré sur les 17 stations d'observation sera maintenu annuellement en Décembre afin de détecter une éventuelle apparition de nouveaux symptômes foliaires sur de nouvelles localités autour du complexe industriel.

Bibliographie

- Jaffré T. (1980) Végétation des roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. Trav. et Doc. n° 124, ORSTOM, Paris.
- Bell JNB. 1980. Response of plants to sulphur dioxide. *Nature* 284: 399-400.
- Murray F, Wilson S., 1987. Effects of SO₂ and HF and Their Combination on Plants of Ecological or Agricultural Importance in Australia. Department of Primary Industries and Energy, Canberra.
- Krauss G. H., Weis E., 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annual review plant physiol. & mol. biol.* 42: 313-349
- Kupperts M., Timm H., Stegemann J., Stober R., Paliwal K., Karunaichamy K. S. T. K., Ortiz R., 1996. Effects of light environment and successional status on sunfleck use by understorey trees of temperate and tropical forests. *Tree physiology* 16: 69-80.
- Soudania, K., Trautmann J., Walter J.M., 2001. Comparaison de méthodes optiques pour estimer l'ouverture de la canopée et l'indice foliaire en forêt feuillue; *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie* Volume 324, Issue 4, April 2001, Pages 381–392
- Murray F., 2003. Air pollution impacts on vegetation in Australia. In: *Air pollution Impacts on crops and forests: A global assessment*. Edited by L. Emberson, M. Ashmore & F. Murray. pp.103-118. Imperial College Press, London.
- Murray F., 2004. Goro monitoring protocol. Murdoch University, Perth, Australia
- LUISA FRATI¹,* and GIORGIO BRUNIALTI (2006) Long term biomonitoring with Lichens: Comparing data from different sampling procedures. *Environmental Monitoring and Assessment* (2006) 119: 391–404
- Alignier A., 2010. Distribution des communautés végétales sous l'influence des lisières forestières dans des bois fragmentés. Thèse en vue de l'obtention du Doctorat de l'Université de Toulouse. INRA Toulouse UMR 1201 INPT/ENSAT DYNAFOR.
- Marcus Schaub, Vicent Calatayud, Marco Ferretti, Giorgio Brunialti, Gun Lövblad, G. Krause, M.J. Sanz (2010). *MANUAL on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. ICP Forests Working Group on Ambient Air Quality, 22pages.
- Murray F., 2011. Les enquêtes sur la cause du décès d'arbres sur un site industriel de Vale Nouvelle Calédonie: *Investigations et rapport d'étape*. Murdoch University, Perth, Australia
- Vale Nouvelle-Calédonie, 2011. Investigation sur la cause du dépérissement d'une formation végétale dominée par le chêne gomme en aval du site industriel de Vale Nouvelle-Calédonie: *Rapport d'étape*.
- Murray F., 2012. Investigations sur les facteurs en cause du dépérissement de la végétation dans la zone d'emprise de l'activité industrielle de Vale Nouvelle Calédonie. Murdoch University, Perth, Australia
- Bureau Veritas, 2013. Rapport de synthèse. Qualité de l'Air : Mesures des concentrations de NO₂ et de SO₂.
- Vale Nouvelle-Calédonie, 2013. Surveillance symptomologique de la flore endémique sur 27 stations d'observation situées aux alentours de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie : Bilan de Janvier 2012 à mars 2013.
- Bureau Veritas, 2014. Rapport de synthèse. Qualité de l'Air : Mesures des concentrations de SO₂.
- Bluecham SAS, 2014. VEGUSINE, Etat actuel du suivi, Septembre 2014.
- Vale Nouvelle-Calédonie, 2014. Surveillance symptomologique de la flore endémique sur 27 stations d'observation situées aux alentours de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie : Bilan de Janvier 2014 à Décembre 2014.
- Bureau Veritas, 2015. Rapport de synthèse. Qualité de l'Air : Mesures des concentrations de SO₂.
- Zongo Charly, Veà Casimir, L'huillier Laurent, Fogliani Bruno. Rapport d'expertise - Evaluation quantitative de l'état de santé de la strate forestière dans la zone d'étude de dépérissement des chênes gomme (*Arillastrum gummiferum*) sur le creek de la Baie Nord ; IAC, 2015.