

Arbres montrant des signes de dépérissement dans la formation à chênes gommés de la zone creek de la baie Nord, VALE NC, Province Sud, Nouvelle-Calédonie ©VALE NC

ANALYSE CRITIQUE DU SUIVI SYMPTOMATOLOGIQUE EXISTANT DU PHÉNOMÈNE DE DÉPÉRISSEMENT OBSERVÉ SUR LA VÉGÉTATION AUX ALENTOURS DU SITE DE VALE NC

Analyse et propositions d'améliorations
VALE NC, Province Sud, Nouvelle-Calédonie

Rapport

Laurent BORDEZ

COORDINATION

Bruno FOGLIANI

Septembre 2017
Rapport n°8 / 2017

ANALYSE CRITIQUE DU SUIVI SYMPTOMATOLOGIQUE EXISTANT DU PHÉNOMÈNE DE DÉPÉRISSEMENT OBSERVÉ SUR LA VÉGÉTATION AUX ALENTOURS DU SITE DE VALE NC

Analyse et propositions d'améliorations
VALE NC, Province Sud, Nouvelle-Calédonie

Laurent BORDEZ

COORDINATION

Bruno FOGLIANI

Rapport

Septembre 2017

Convention IAC-OEIL N° DE2013/041

financement



OEIL
Observatoire de
l'environnement
Nouvelle-Calédonie

Membres institutionnels de l'IAC:



Bruno FOGLIANI directeur adjoint et chercheur HDR en bio-écologie végétale, responsable du groupe EcoRCE (Ecologie de la Restauration et de la Conservation des Espèces végétales) appartenant à l'équipe ARBOREAL (AgricultuRe BiOdiveRsité Et vALorisation) de l'IAC. Il coordonne l'ensemble des activités scientifiques de l'équipe, dont les travaux liés à ce projet.

Laurent BORDEZ, docteur en microbiologie, et écologie végétale, est actuellement engagé comme post-doctorant au sein de l'institut Agronomique néo-Calédonien, dans le groupe EcoRCE (Ecologie de la Restauration et de la Conservation des Espèces végétales) appartenant à l'équipe ARBOREAL (AgricultuRe BiOdiveRsité Et vALorisation).

CITATION DU DOCUMENT

Bordez L., Fogliani B. 2017. Analyse critique du suivi symptomatologique existant du phénomène de dépérissement observé sur la végétation aux alentours du site de VALE NC. Rapport d'expertise IAC-Oeil. N°8-ECORCE/2017. 80p.

RÉSUMÉ.....	1
L'ESSENTIEL A RETENIR.....	3
I. CONTEXTE	5
II. LES PREMIÈRES INVESTIGATIONS.....	7
II.1. RECONNAISSANCE DE LA ZONE IMPACTEE ET PREMIERE ESTIMATION DE L'IMPACT.....	7
II.2. PREMIERES INVESTIGATIONS SUR LES CAUSES DU PHENOMENE OBSERVE.....	8
II.2.1. Investigation sur la cause du dépérissement d'une formation végétale dominée par le chêne gomme en aval du site industriel de VALE Nouvelle-Calédonie » (VALE NC, 2011).....	9
II.2.1.1. Les variations de l'hydrologie du milieu.....	9
II.2.1.2. L'effet de maladies de pathogènes ou de ravageurs.....	10
II.2.1.3. L'effet de biocides.....	10
II.2.1.4. Le changement des quantités disponibles d'éléments nutritifs pour les végétaux.....	11
II.2.1.5. Les changements possibles de la qualité de eaux.....	12
<i>i. origine des émissions aqueuses capables de modifier la qualité des eaux dans la zone d'impact.....</i>	<i>13</i>
<i>ii. analyse chimique de la qualité des eaux de surface dans et hors de la zone impactée.....</i>	<i>13</i>
<i>iii. analyse chimique de la qualité des eaux souterraines dans et hors de la zone impactée.....</i>	<i>15</i>
<i>iv. analyse chimique de la qualité des eaux de pluies dans et hors de la zone impactée.....</i>	<i>15</i>
II.2.1.6. L'émission de certains gaz atmosphériques	16
<i>i. Sources d'émissions possibles.....</i>	<i>17</i>
<i>ii. La qualité et l'évolution de l'air ambiant.....</i>	<i>18</i>
II.2.2. Investigations sur les facteurs en cause du dépérissement de la végétation dans la zone d'emprise de l'activité industrielle de Vale Nouvelle-Calédonie (MURRAY, 2012).....	19
II.3. CONCLUSIONS DES PREMIERS TRAVAUX D'INVESTIGATIONS.....	20
II.4 PROPOSITIONS D'INVESTIGATIONS ET DE SUIVIS COMPLEMENTAIRES ISSUES DES PREMIERES INVESTIGATIONS.....	20
II.4.1. Proposition pour un programme de surveillance écologique ciblant les zones à risques – suivi symptomatologique : suivi des symptômes foliaires et qualité de l'air.....	20
II.4.2. Définition d'un document guide de caractérisation des symptômes par espèce.....	21
II.4.3. Etude sur la sensibilité des espèces florales locales aux polluants par la technique de fumigation.....	22
II.4.4. Etude multi-temporelle de la végétation en périphérie immédiate du site de VALE NC par photographie satellitaire.....	22
II.4.5. Revue de la modélisation de dispersion atmosphérique.....	22
II.4.6. Minimisation des incendies du stock de soufre.....	23
CRITIQUES ET PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS.....	23
III. SUIVI SYMPTOMATOLOGIQUE : SUIVI DES SYMPTOMES FOLIAIRES ET SUIVI DE LA QUALITE DE L'AIR.....	29
III.1. PREMIER PROTOCOLE DE SUIVI SYMPTOMATOLOGIQUE PROPOSE (VALE NC, 2013).....	29

III.1.1. Définition de nouvelles stations de suivi	29
III.1.2. Méthodes de suivi	31
III.1.2.1. Suivi mensuel de la qualité de l'air par échantillonnage passif	31
III.1.2.2. Suivi mensuel des symptômes foliaires	31
III.1.2.3. Echantillonnage trimestriel et analyses chimiques foliaires.....	32
III.2. SUIVI DE FEVRIER 2012 A MARS 2013 (VALE NC, 2013)	32
III.2.1. Principaux résultats	32
III.2.2. Limites et perspectives proposées	33
III.3. RAPPORT SORECO 2013 - ANALYSE CRITIQUE DU PROTOCOLES DE SUIVI SYMPTOMATOLOGIQUE FOLIAIRE EXISTANT (SORECO, 2013)	35
III.4. SUIVI DE JANVIER 2014 À DECEMBRE 2014 (VALE NC, 2015)	36
III.4.1. Modifications apportées par rapport à l'ancien protocole	36
III.4.2. Principaux résultats	36
III.4.3. Limites et perspectives proposées	37
III.5. SUIVI DE JANVIER 2015 À DECEMBRE 2015 (VALE NC, 2016)	37
III.5.1. Principaux résultats	37
III.5.2. Limites et perspectives proposées	38
III.6. NOUVEAU PROTOCOLE 2016 (VALE NC, 2016)	39
III.6.1. Définition de nouvelles stations de suivi	39
III.6.2. Critères de sélections des stations	40
III.6.3. Méthodes de suivi	42
III.6.3.1. Fréquence et durée du suivi.....	42
III.6.3.2. Paramètres de suivi.....	42
III.6.4. Présentation des avantages par rapport à l'ancien protocole	48
CRITIQUES ET PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS	49
IV. DEFINITION D'UN DOCUMENT GUIDE DE CARACTERISATION DES SYMPTOMES FOLIAIRES PAR ESPECE.....	55
CRITIQUES ET PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS	55
V. ETUDE SUR LA SENSIBILITE DES ESPECES FLORALES LOCALES AUX POLLUANTS PAR LA TECHNIQUE DE FUMIGATION.....	56
V.1. METHODE.....	56
V.1.1. Dispositif expérimental.....	56
V.1.2. Choix des espèces.....	57
V.1.3. Mesures et analyses.....	58
V.1.4. Analyses des données.....	58
V.2. PRINCIPAUX RESULTATS ET CONCLUSION APPORTES.....	58
CRITIQUES ET PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS	59
VI. ETUDE MULTI-TEMPORELLE DE LA VEGETATION EN PERIPHERIE IMMEDIATE DU SITE DE VALE NOUVELLE-CALEDONIE PAR PHOTOGRAPHIE SATELLITAIRE.....	60
VI.1. L'ÉTUDE MULTI-TEMPORELLE DE LA VEGETATION PAR PHOTOGRAPHIE SATELLITAIRE.....	60
VI.1.1. Méthodologie.....	60
VI.1.1. Principaux résultats.....	62
VI.2. VÉRIFICATION DES DONNÉES ISSUES L'ÉTUDE MULTI-TEMPORELLE DE LA VEGETATION PAR PHOTOGRAPHIE SATELLITAIRE.....	62
VI.2.1. Méthodologie.....	62
VI.2.1. Principaux résultats.....	63
COMMENTAIRES	63
VII. REVUE DE LA MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE.....	64
COMMENTAIRES	64
VIII. MINIMISATION DES INCENDIES DU STOCK DE SOUFRE.....	65
COMMENTAIRES	66

CONCLUSION GENERALE.....	67
BIBLIOGRAPHIE.....	69

LISTE 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).	7
Figure 2. Dispositif expérimental d'investigation de l'impact d'une modification hydrologique sur les populations d' <i>Arillastrum gummiferum</i> à la date du 17 février 2011 (source VALE NC, 2011).	8
Figure 3. Localisation du réseau de suivi piézométrique au niveau du site industriel (source VALE NC, 2011).	10
Figure 4. Points d'échantillonnage pour les analyses chimiques des feuilles, écorce, litières et sol (source VALE NC, 2011).	11
Figure 5. Localisation des points de suivi du creek de la Baie Nord (source VALE NC, 2011).	14
Figure 6. Localisation des stations d'observation du protocole de surveillance 2012 (source VALE NC, 2013).	30
Figure 7. Répartition des stations de suivi dans la zone impactée et des sites témoins (source VALE NC, 2016).	41
Figure 8. Zoom sur les stations de suivi par télédétection dans le bassin versant du Creek Baie Nord (Etude Vegusine, Bluecham) (source VALE NC, 2016).	42
Figure 9. Schéma succinct du dispositif expérimental proposé pour le suivi symptomatologique foliaire et de qualité de l'air (L.Bordez).	51
Figure 10. Dispositif de l'étude de fumigation sur la pépinière de Vale Nouvelle Calédonie en Décembre 2013 (source VALE NC, 2013).	58
Figure 11. Les 27 Massifs Forestier d'Intérêt Prioritaires (MFIP) de la zone d'étude satellitaire analysées par Bluecham (source Bluecham, 2013).	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Éléments analysés par type d'échantillon (source VALE NC, 2011).	12
Tableau 2. Descriptif des 29 stations d'observation du protocole de suivi symptomatologique de 2013 (source VALE NC, 2013).	30
Tableau 3. Observations qualitatives relevées sur le terrain pour les onze espèces indicatrices.	32
Tableau 4. Espèces prévues pour être suivies par station (source VALE NC, 2016).	46
Tableau 5. Descriptifs des incidents et dégagement de SO ₂ identifiés par VALE NC en 2012 (source VALE NC, 2013).	67
Tableau 6. Descriptifs des incidents et dégagement de SO ₂ identifiés par VALE NC en 2014 (source VALE NC, 2015).	68
Tableau 7. Descriptifs des incidents et dégagement de SO ₂ identifiés par VALE NC en 2015 (source VALE NC, 2016).	68

CO	Monoxyde de carbone
HAP	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
IAC	Institut Agronomique néo-Calédonien
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
MFIP	Massif Forestier d'Interet Prioritaire
NOx	Terme générique qui englobe un groupe de gaz hautement réactifs, tous contenant de l'azote et de l'oxygène dans des quantités différentes
ŒIL	Observatoire de l'Environnement Nouvelle-Calédonie
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PM10	Particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique (ou diamètre aéraulique) inférieur à 10 micromètres
SO2	Dioxyde de soufre
TAR	Tours à refroidissement
VALE NC	VALE Nouvelle-Calédonie

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 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. VALE NC a aussitôt engagé une série d'investigations afin d'identifier les causes possibles de dépérissement et mettre en place des mesures de suivi de l'évolution du phénomène. A l'issue des travaux d'investigations menés en 2011, il est conclu que les émissions atmosphériques en provenance de l'usine sont les causes majeures des phénomènes de dépérissement observés (notamment les émissions de SO₂). Les autres facteurs, tels que la présence de pathogènes ou la perturbation de la ressource en eau, aussi initialement envisagés sont alors écartés. A l'issue de ces travaux d'investigations, VALE NC a engagé cinq mesures pour compléter le travail d'investigation et assurer une surveillance de l'évolution des phénomènes de dépérissement autour du site industriel, (i) programme de surveillance écologique des zones à risques, (ii) réalisation d'un document guide de caractérisation des symptômes de dépérissement de différentes espèces, (iii) l'étude de la sensibilité de différentes espèces au SO₂ par la technique de fumigation, (iv) réalisation d'un modèle de dispersion atmosphérique, de l'étude multi-temporelle de la végétation en périphérie de l'usine par analyse de données satellitaires, et enfin (v) mise en place de mesures minimisant les émissions de SO₂.

En 2017, dans le cadre des missions qui lui sont confiées, l'Observatoire de l'Environnement Nouvelle-Calédonie (OEIL) a sollicité l'Institut Agronomique néo-Calédonien (IAC) pour la réalisation d'une analyse critique des protocoles d'investigations mis en place par VALE NC ainsi que des protocoles de suivi de l'évolution du phénomène de dépérissement. L'IAC a également été sollicité pour proposer des mesures d'amélioration du suivi. A noter que le travail d'analyse critique réalisé par l'IAC ne se base que sur les documents transmis par l'OEIL. Certains documents ont donc pu être absents de l'analyse. Il est possible que l'examen complémentaire de tels documents puisse invalider certaines critiques et recommandations qui pourraient être faites ici. Il est essentiel de tenir compte de cette information de façon à rendre optimale et juste l'utilisation du travail d'analyse ici réalisé.

En conclusion du travail réalisé, il peut tout d'abord être noté très positivement que l'ensemble des documents ici étudiés, témoigne de la volonté de VALE NC de poursuivre la réalisation de ses engagements pour la protection de son environnement direct et plus largement de l'environnement néo-calédonien. Il témoigne également de la volonté de VALE NC de sans cesse améliorer les moyens qu'elle se donne pour réaliser ces objectifs. En ce sens, les critiques faites ici se veulent pouvoir participer à cette volonté d'amélioration continue. De fait, il est entendu que lorsque les démarches mises en œuvre par VALE NC se situent hors du champ d'expertise de l'IAC, aucune critique n'a été faite, et seuls des commentaires d'ordres général ont été émis. En conséquence, les critiques et propositions d'améliorations portent ici sur les conclusions issues des travaux d'investigations, sur le suivi symptomatologique, le guide de caractérisation des symptômes et les études de fumigation. Toutefois, la construction du présent document a été souhaitée afin que celui-ci puisse servir de base à d'autres travaux. Aussi, ce rapport décrit l'ensemble des outils mis en œuvre par VALE NC autour de l'étude du phénomène observé de dépérissement d'espèces végétales.



- A l'issue des premiers travaux d'investigations menés en 2011 sur l'identification des causes des phénomènes de dépérissement de la végétation aux abords du site industriel de Vale NC, il a été conclu que les émissions atmosphériques en provenance de l'usine étaient les causes majeures des phénomènes de dépérissement observés (notamment les émissions de SO₂). Les autres facteurs aussi initialement envisagés ont alors été écartés (s'agissant de l'influence possible de changements d'ordres hydrologiques, de l'influence de pathogènes ou ravageurs, de l'influence de biocides, de l'influence de changements dans la disponibilité des éléments nutritifs pour les végétaux, de l'influence de changements de la qualité des eaux). En analysant les données présentées dans ces rapports, il s'est toutefois révélé difficile d'exclure complètement l'influence des autres facteurs étudiés et alors écartés. Cela notamment pour 2 raisons :
 - l'identification de la présence de biais possibles dans l'interprétation des données, susceptibles de pouvoir incriminer ou discriminer un facteur. Notamment en raison d'un manque d'informations sur les données relatives à Prony Energies, et de façon plus générale pour l'ensemble des documents, du manque d'information sur les méthodes d'analyses statistiques ayant mené aux conclusions, et enfin notamment par l'identification de plusieurs variations notables de la qualité chimique des eaux de la zone impactée non prises en compte dans les conclusions.
 - la possibilité qu'il puisse exister un effet combiné et/ou cumulatif de ces facteurs, aux effets engendrés par le SO₂ sur les phénomènes de dépérissement observés. Cela notamment en raison de l'identification de plusieurs variations notables de la qualité chimique des eaux de la zone impactée non prises en compte dans les conclusions comme décrit précédemment.

- Sur les protocoles de suivi symptomatologique, les principales critiques qui ont pu être faites concernent les évolutions successives des protocoles de suivi et également le dispositif expérimental pour lequel les espèces, le nombre d'espèces, ainsi que le nombre d'individus suivis par espèce au sein des stations varient sensiblement. L'hétérogénéité des méthodes ainsi mises en œuvre compliquent fortement un travail comparatif des données, et par conséquent leurs interprétations. Egalement, il a pu être identifié lors de l'analyse des rapports de suivi symptomatologique un manque 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 en remettre la véracité en cause, nécessitent alors d'être appréciées avec certaines réserves.

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 sur zone sont d'origines est et sud-est). 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 peuvent 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 afin d'identifier les causes possibles de dépérissement et mettre en place des mesures de suivi de l'évolution du phénomène.

Dans le cadre des missions qui lui sont confiées, l'Observatoire de l'Environnement Nouvelle-Calédonie (OEIL) a sollicité l'Institut Agronomique néo-Calédonien (IAC) pour la réalisation d'une analyse critique des protocoles d'investigations mis en place par VALE NC, ainsi que des protocoles de suivi de l'évolution du phénomène de dépérissement. L'IAC a également été sollicité pour proposer des mesures d'amélioration lorsque possible et apparaissant comme justifiées. A noter que le travail d'analyse critique réalisé par l'IAC ne se base que sur les documents transmis par l'OEIL. Certains documents ont donc pu être absents de l'analyse. Il est possible que l'examen complémentaire de tels documents puisse rendre injustifiée certaines critiques et propositions d'améliorations qui pourraient être faites ici. Il est essentiel de tenir compte de cette information de façon à rendre optimale et juste l'utilisation du travail d'analyse ici réalisé. La liste des documents fournis étant la suivante :

- Investigation sur la cause du dépérissement d'une formation végétale dominée par le chêne gomme en aval du site industriel de VALE Nouvelle-Calédonie » (VALE NC, 2011)
- Investigations sur les facteurs en cause du dépérissement de la végétation dans la zone d'emprise de l'activité industrielle de Vale Nouvelle-Calédonie » (Murray, 2012).
- Protocole de suivi de la végétation exposée aux émissions atmosphériques de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie » (VALE NC, 2013)
- Surveillance symptomatologique 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 (VALE NC, 2013).
- Suivi des symptômes foliaires à proximité de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie (SORECO, 2013).
- Surveillance symptomatologique 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 (VALE NC, 2015).
- Surveillance symptomatologique de la flore endémique sur 27 stations d'observation situées aux alentours de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie : Bilan de Janvier 2015 à Décembre 2015 (VALE NC, 2016).
- Protocole de suivi de la végétation – zone de dépérissement en aval de l'usine de VALE NC (VALE NC, 2016).
- Protocole expérimental : Etude symptomatologique des effets de dioxyde de

souffre par fumigation sur les espèces endémiques de Goro Vale Nouvelle Calédonie (VALE NC, 2013).

- Controlled exposures of native vegetation to sulphur dioxide at Vale New-Caledonia – Exposures 2 and 3, 4 » (Environmental impact solutions, 2015).
- Synthèse méthodologique VEGUSINE : suivi régulier de la végétation au Nord-Ouest de l'usine – résultats et suivi opérationnel » (Bluecham, 2013)
- Evaluation quantitative de l'état de santé de la strate forestière dans la zone d'étude de dépérissement des chênes gommés sur le creek de la baie Nord (Zongo et al., 2015).

Ces documents se rapportent à différentes démarches mises en œuvre par VALE NC dans ses travaux d'investigations et de suivi du phénomène du dépérissement et, bien que complémentaires, différentes thématiques y sont développées, s'agissant :

- des premières investigations sur le phénomène de dépérissement
- du suivi symptomatologique (suivi foliaire et qualité de l'air)
- du guide de caractérisation de symptômes foliaires par espèces
- des études de sensibilité d'espèces locales aux expositions de SO₂ par la technique de fumigation
- de l'étude multi-temporelle de la végétation en périphérie immédiate du site de VALE NC par photographie satellitaire
- de la révision du modèle de dispersion atmosphérique
- de la minimisation des risques d'incendies des stocks de soufre

Le rapport présenté ici fait l'analyse dans différents chapitres, de ces différentes thématiques, selon la chronologie des moyens mis en œuvre. Les 4 premières thématiques abordées se terminent par un paragraphe faisant la critique des données présentées et faisant, lorsque possible, la proposition d'améliorations. A noter que pour faciliter la compréhension des critiques qui peuvent être faites en fin de chapitre, certaines remarques ont directement été intégrées au texte. Celles-ci sont identifiées, lorsque présentes, sous l'intitulé «remarques » et apparaissent en *italique bleu*. L'étude de l'étude multi-temporelle de la végétation en périphérie immédiate du site de VALE NC par photographie satellitaire n'a pas fait l'objet de critique car en dehors du champ de compétence de l'équipe sollicitée pour le rapport. De même, les 2 dernières parties, hors du champ de compétence d'expertise de l'IAC, n'ont-elles bien entendu pas fait l'objet de critiques. Ces 3 parties se terminent néanmoins par un paragraphe de commentaires d'ordre général.

II. LES PREMIÈRES INVESTIGATIONS

II.1 RECONNAISSANCE DE LA ZONE IMPACTEE ET PREMIERE ESTIMATION DE L'IMPACT

Suite aux observations de dépérissement réalisées en décembre 2010, VALE NC lance dès février 2011, une première étude de terrain, alors effectuée par le service de Préservation de l'Environnement, afin de déterminer le périmètre exact de la zone impactée, mais aussi d'estimer l'impact sur l'espèce semblant la plus touchée : *Arillastrum gummiferum* (chênes gommés, fam. Myrtaceae).

Ce premier travail montre que la zone concernée se trouve en bordure ouest des installations industrielles aux alentours du Creek de la Baie Nord (Fig. 1). L'étendue de la zone impactée est estimée à 55 hectares à la date du 17 février 2011. L'écosystème présent dans cette zone est dominé par l'espèce *Arillastrum gummiferum* souvent nommé « forêt à *Arillastrum gummiferum* » et « maquis paraforestier à *Arillastrum gummiferum* » (cette dénomination est issue des études de caractérisation de la flore des plateaux de Prony et Goro, IRD 2004 – A noter que les dénominations « formations à chênes gommés », ou « zone impactée » seront utilisées dans la suite du document pour désigner cette formation). A l'intérieur de la zone, les symptômes de dépérissement foliaires ont été observés sur plusieurs espèces dont *Arillastrum gummiferum* (espèce semblant alors la plus touchée), et sur d'autres espèces telles que *Flindersia fourneri*, *Gymnostoma deplancheanum*, *Tristaniospis guillainii*, *Codia spatulata*, *Montrouzieria sphaeroidea*.

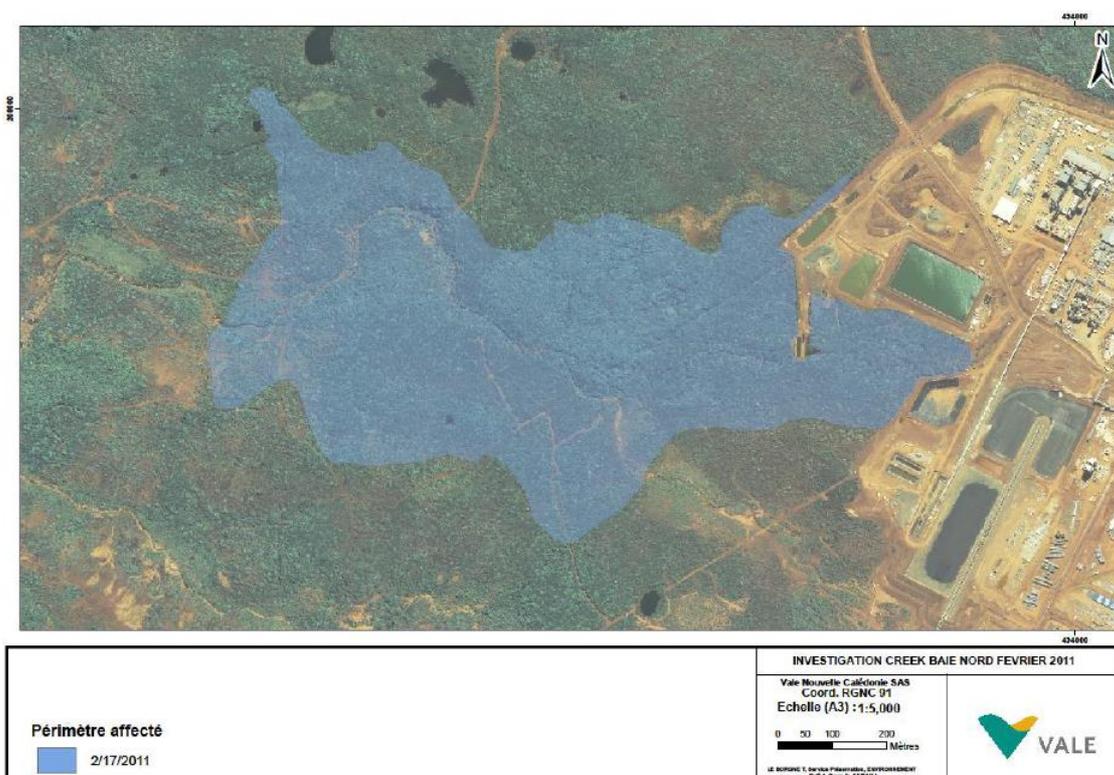


Figure 1. Localisation et étendue de la zone impactée par le dépérissement foliaire de plusieurs espèces végétales à la date du 2 février 2011 (source VALE NC, 2011).

Le travail d'estimation de l'impact sur *Arillastrum gummiferum* a été mené sur le terrain par le déploiement de transects sur des axes est-ouest à l'intérieur du périmètre de la zone

impactée et l'état de santé de 5 217 individus a été évalué en identifiant le pourcentage d'individus sains, atteints et morts (en prenant en compte différentes classes d'âge). Un total de 8 transects a ainsi été mis en place, espacés de 50m environ selon un axe nord-sud. Les relevés ont porté sur une largeur de 5 m le long de ces transects. Cette première approche du phénomène de dépérissement a permis de montrer qu'il semble exister un lien entre l'impact sur les individus de cette espèce et la proximité de l'usine (Fig.2). En effet, de façon générale, l'impact décroît avec la distance par rapport à l'usine.

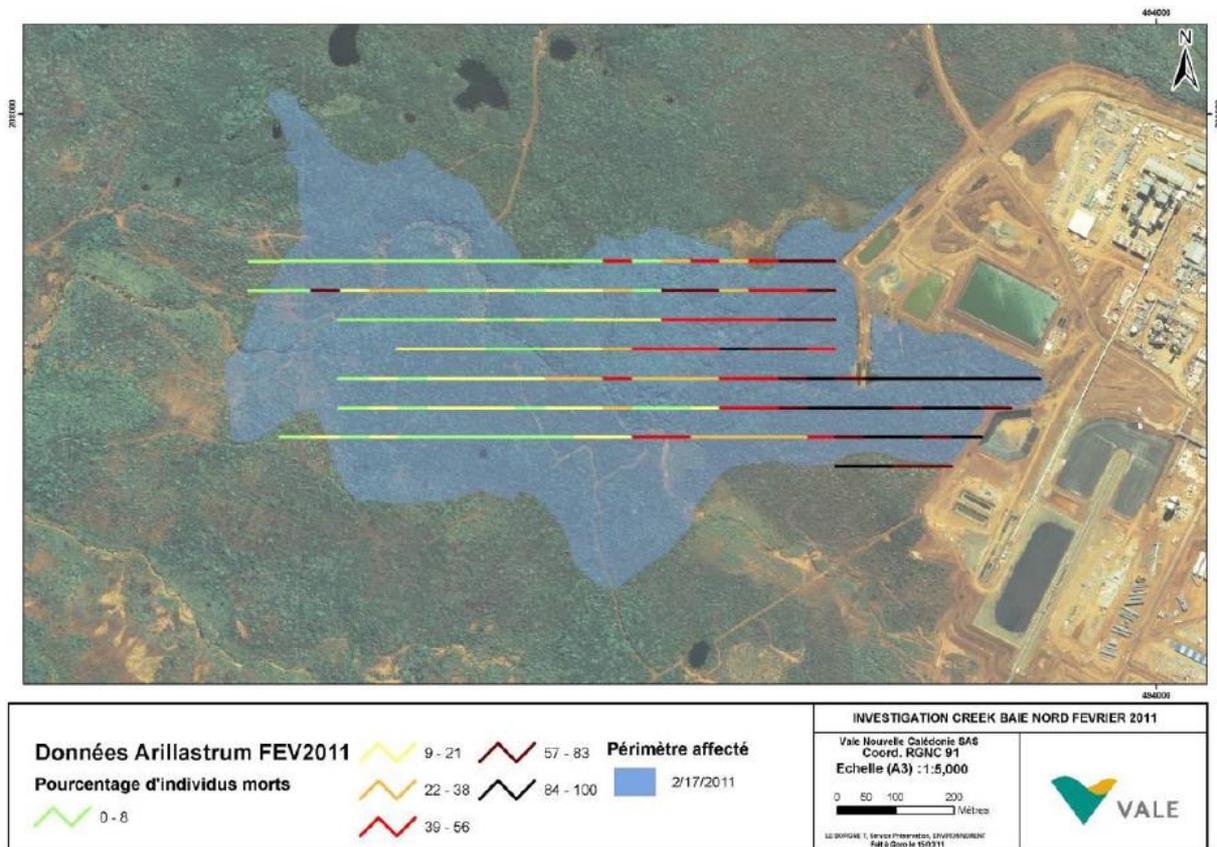


Figure 2. Dispositif expérimental d'investigation de l'impact d'une modification hydrologique sur les populations d'*Arillastrum gummiferum* à la date du 17 février 2011 (source VALE NC, 2011).

II.2 PREMIERES INVESTIGATIONS SUR LES CAUSES DU PHENOMENE OBSERVE

Sur la base des relevés précédents, VALE NC a immédiatement engagé un travail d'investigation afin d'identifier les causes possibles et les facteurs à l'origine des phénomènes de dégradation de la végétation. Ces travaux sont décrits dans deux rapports complémentaires :

- Un premier travail d'investigation est présenté dans le document intitulé « Investigation sur la cause du dépérissement d'une formation végétale dominée par le chêne gomme en aval du site industriel de VALE Nouvelle-Calédonie » (VALE NC, 2011). Dans ce document un certain nombre de facteurs ont été identifiés comme pouvant être la cause ou comme pouvant contribuer au phénomène de dépérissement de la végétation. Ceux-ci ont été analysés et discutés séparément, s'agissant:

1. Des variations de l'hydrologie du milieu

2. De maladies, de pathogènes ou de ravageurs
3. De la présence de biocides
4. Du changement de la quantité disponible d'éléments nutritifs pour les végétaux
5. De changements possibles de la qualité de l'eau
6. De l'émission de certains gaz atmosphériques pouvant impacter l'intégrité physiologique des plantes (oxydes d'azote ammoniac, dioxyde de soufre et particules soufrées...)

A noter que le travail d'investigation sur la responsabilité des facteurs cités ci-dessus a été mené par VALE NC.

- Un second travail d'investigation, complémentaire du premier, a été mené par le Pr Francis Murray, de l'université de Murdoch (Perth-Australie) auquel VALE NC a fait appel. Le Pr Murray est spécialiste en pollution atmosphérique et effet phytotoxique. Cet expert est déjà intervenu auprès de VALE NC dans le cadre du développement du projet en 2005 et précisément dans l'évaluation des impacts environnementaux liés aux émissions atmosphériques. Les résultats du travail mené par le Pr Murray sont présentés dans le rapport intitulé « Investigations sur les facteurs en cause du dépérissement de la végétation dans la zone d'emprise de l'activité industrielle de Vale Nouvelle-Calédonie » (Murray, 2012).

L'analyse de ces documents est ici réalisée de façon successive mais leur critique est faite simultanément puisque relevant de conclusions finalement uniques.

II.2.1. INVESTIGATION SUR LA CAUSE DU DEPERISSEMENT D'UNE FORMATION VEGETALE DOMINEE PAR LE CHENE GOMME EN AVAL DU SITE INDUSTRIEL DE VALE NOUVELLE-CALEDONIE » (VALE NC, 2011)

Ce document fait l'investigation des 6 causes présentées précédemment et soupçonnées de pouvoir être responsables ou de participer au phénomène de dépérissement de la végétation. Elles sont ici résumées dans l'ordre du rapport original.

1. Les variations de l'hydrologie du milieu

L'hypothèse ici testée résulte de l'identification par VALE NC d'une modification du réseau hydrologique sur la zone impactée avant observation du phénomène de dépérissement. Il s'agit notamment d'une dérivation vers l'ouest des eaux provenant du Nord de la zone d'impact. Cette hypothèse est testée grâce au suivi du niveau des eaux souterraines de l'usine déjà en place, est réalisé à une fréquence trimestrielle (Fig. 3).

Les résultats montrent qu'entre 1997 et 2011, les activités menées par VALE NC n'ont pas eu d'influence significative sur le niveau des eaux souterraines. Les variations saisonnières et interannuelles présentées sont expliquées par les variations de précipitations. Il est également ici mis en avant que la distribution de l'impact sur zone ne s'associe pas à une topographie basse, les arbres sur les hauteurs plus exposées, par exemple sur les crêtes, et parfois à plus de 300 m du creek, apparaissant comme les plus affectés ; d'avantage que les arbres situés dans les vallées à des distances équivalentes des installations industrielles. Il est conclu que ces résultats suggèrent que le dépérissement observé n'est pas associé à des changements d'ordres hydrologiques.

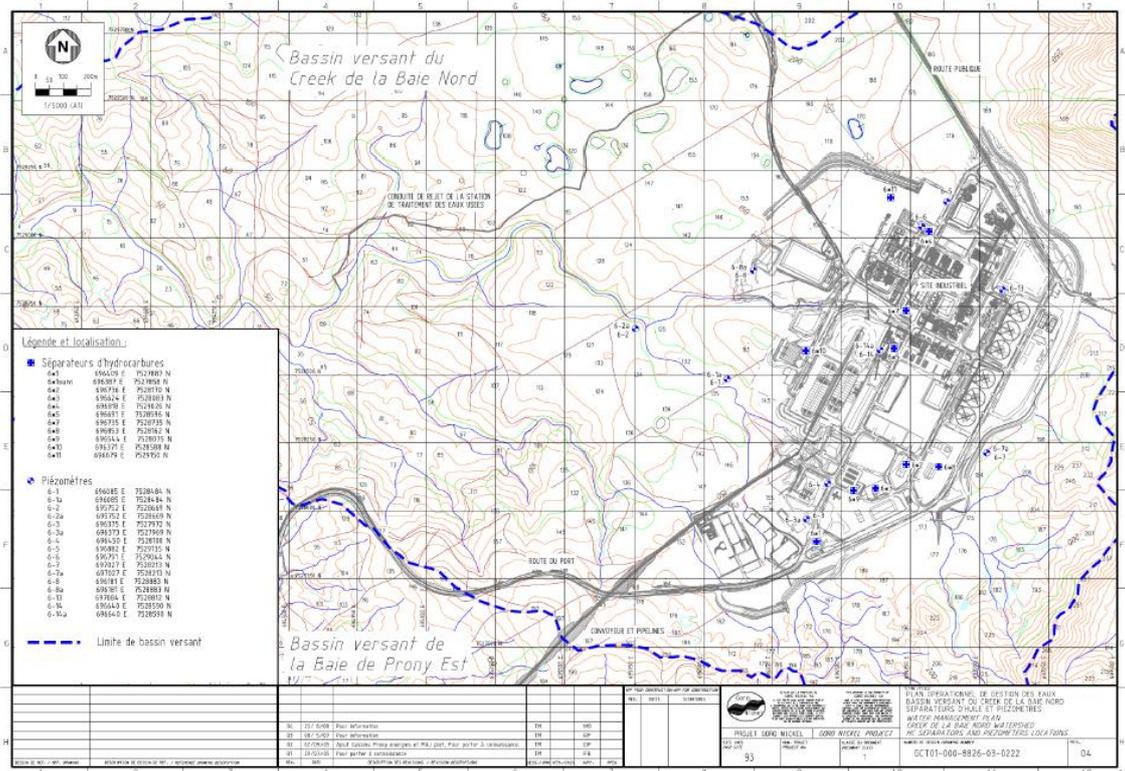


Figure 3. Localisation du réseau de suivi piézométrique au niveau du site industriel (source VALE NC, 2011).

2. L'effet de maladies, de pathogènes ou d'attaques d'insectes

Ici sont présentés les résultats d'observations terrains dans la zone d'impact par rapport à des zones témoins du sud néo-calédonien afin d'écartier ou d'incriminer l'effet possible de maladies, d'éléments pathogènes ou de ravageurs sur les phénomènes de dépérissement observés. Les résultats décrivent que les observations ne montrent aucun signe d'attaque d'insectes ou de symptômes typiques de maladies particulières liées aux plantes. La distribution de l'impact en plus de l'absence de symptômes marqués sur les autres populations visitées dans le sud calédonien (en date de février 2011), tend à exclure la responsabilité d'éléments pathogènes ou ravageurs dans ce cas.

3. L'effet de biocides

Ici est présenté l'étude de l'influence possible de biocides sur les phénomènes de dépérissement observés. Cette hypothèse relève du fait que des biocides sont utilisés dans les tours de refroidissement afin d'éviter toute contamination bactérienne et particulièrement par les bactéries du genre *Legionella*. L'hypothèse est que des biocides pourraient être transportés dans l'atmosphère par des gouttes d'eau issues des tours à refroidissement, qui pourraient alors atteindre la végétation de la zone d'impact. Il est décrit que de par leur conception les biocides utilisés dans ce cas sont non-spécifiques, ils sont destinés à être efficaces sur un large spectre et en conséquence ils peuvent affecter les organismes au travers de leurs fonctions métaboliques de base. Les résultats décrivent que les différences importantes observées dans les symptômes et donc la sensibilité différente affichée par les espèces végétales et dans une même espèce (sévérité d'effet hétérogène) permettent difficilement d'incriminer un biocide à spectre large. Celui-ci affecterait toutes les espèces et

tous les individus de façon indifférenciée. En conclusion, il est dit qu'un effet de biocides peut être écarté.

REMARQUES

La réflexion est logique. Toutefois afin de discriminer définitivement les biocides comme pouvant potentiellement jouer un rôle dans les phénomènes de dépérissement observés, une recherche sur le feuillage de différentes espèces, ou dans la litière de la zone impactée, de même que dans les eaux de surfaces ou souterraines pourrait être utile. Cette mise en œuvre n'a pas été identifiée dans les documents analysés.

4. Le changement de la quantité disponible d'éléments nutritifs pour les végétaux

Cette section présente l'analyse de la composition chimique d'échantillons de feuille, et d'écorce d'*Arillastrum gummiferum*, et de litière et de sols prélevés dans la zone impactée selon un gradient de distance par rapport à l'usine, et dans une zone témoin hors zone d'impact (Fig. 4). Les analyses effectuées sur les échantillons sont présentes dans le tableau 1. Les résultats de ce paragraphe rapportent que seuls les éléments azotés montrent une augmentation à la fois dans les feuilles, la litière, l'écorce et les sols dans la zone d'impact par rapport à la zone témoin, sans que celles-ci soient significatives. Aucune autre différence n'est observée.

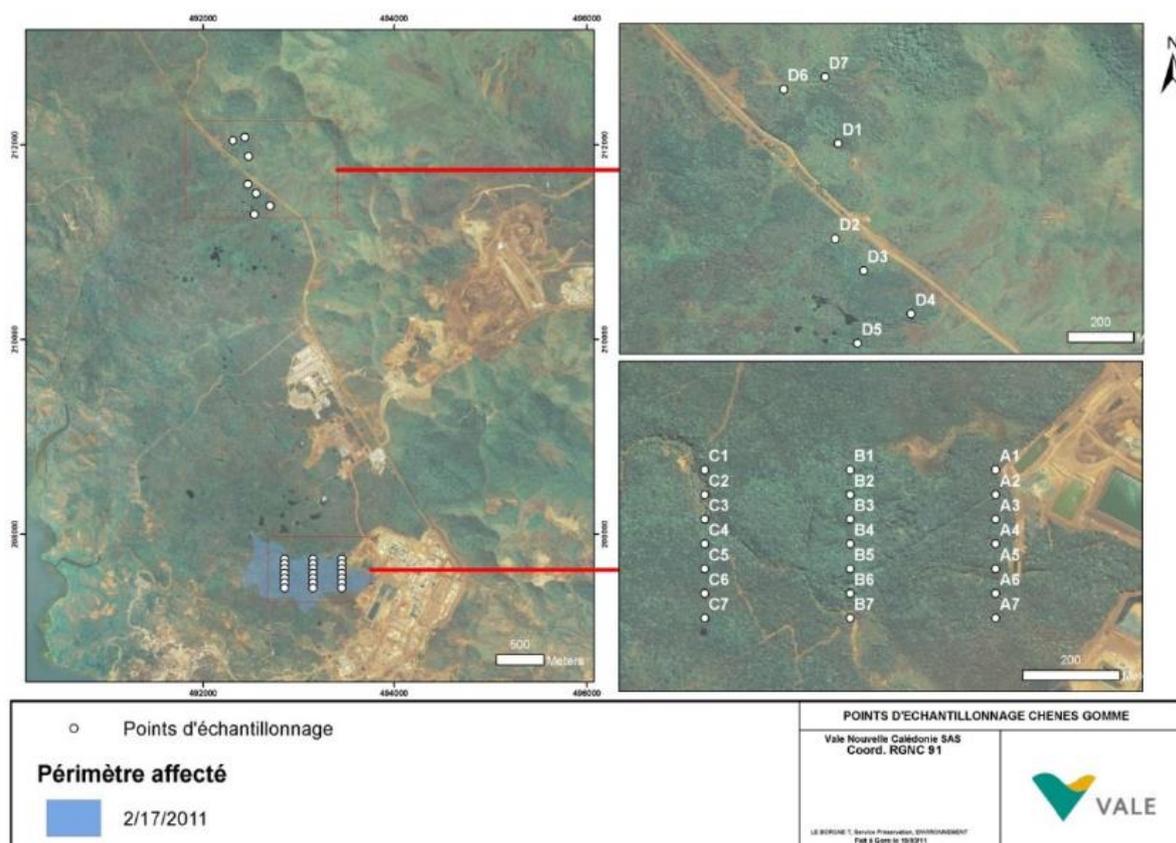


Figure 4. Points d'échantillonnage pour les analyses chimiques des feuilles, écorce, litières et sol ; « A », « B » et « C » sont les sites impactés et « D » le site témoin (source VALE NC, 2011)

Tableau 1. Éléments analysés par type d'échantillon (source VALE NC, 2011)

Données	Feuille	Litière	Ecorce	Sol
pH				+
CONDUCTIVITE (EC) @ 25°C				+
CENDRES	+	+	+	
MATIERE ORGANIQUE	+	+	+	+
C/N	+	+	+	
N TOTAL	+	+	+	+
N TOTAL Kjeldahl				+
N échangeable (NO2 & NH3)		+	+	+
P TOTAL	+	+	+	+
K TOTAL	+	+	+	
S TOTAL as SO4 2-		+	+	+
CL TOTAL				+
Na TOTAL	+	+	+	+
Ca TOTAL	+	+	+	+
Mg TOTAL	+	+	+	+
Mn TOTAL	+	+	+	
Zn TOTAL	+	+	+	
Cu TOTAL	+	+	+	
Pesticides				+
Dioxines et furanes				+

REMARQUES

Les analyses ayant portées sur l'analyse de la qualité chimique des sols semblent avoir été menées uniquement sur les teneurs en éléments totaux. Or une partie de ces éléments n'est pas disponibles pour les végétaux puisqu'immobilisée dans les sols au sein de la matrice minérale. L'évaluation des teneurs en éléments disponibles pour les plantes (éléments extractibles) semblerait plus appropriée par rapport à la question posée. Ce type d'analyse permettrait d'avoir un meilleur reflet des relations pouvant exister entre une modification de la composition chimique des sols ou de la litière et la composition chimique des feuilles et des écorces avec les phénomènes de dépérissement observés (Gobat et al., 2010). Enfin, les analyses ne concernent que des individus d'*Arillastrum gummiferum*. Il pourrait être avantageux pour l'étude de reproduire ces analyses sur d'autres espèces impactées. La comparaison des résultats espèces permettra à coup sur de discerner d'avantage les relations sol-végétation. Sur la base de ces observations, il apparaît donc difficile d'exclure l'influence de la qualité chimique des éléments.

5. Les changements possibles de la qualité de l'eau

L'hypothèse testée ici concerne une modification de la composition chimique des eaux dans la zone d'impact, qui pourraient alors porter atteintes à l'intégrité physiologique des végétaux par un effet toxique, ou de carence.

Cette hypothèse est testée par la présentation :

- i. De l'origine des émissions aqueuses capables de modifier la qualité des eaux dans la zone d'impact
- ii. De l'analyse chimique de la qualité des eaux de surface dans et hors de la zone impactée
- iii. De l'analyse chimique de la qualité des eaux souterraines dans et hors de la zone impactée
- iv. De l'analyse chimique de la qualité des eaux de pluies dans et hors de la zone impactée

i. ORIGINE DES EMISSIONS AQUEUSES CAPABLES DE MODIFIER LA QUALITE DES EAUX DANS LA ZONE D'IMPACT

Ce paragraphe présente les sources d'émissions aqueuses répertoriées par VALE NC dans le creek de la Baie Nord depuis 2009 à 2011, s'agissant :

- des rejets des eaux de ruissellement contenues dans les bassins de premier flot Nord 1 (FFPN1), Nord 2 (FFPN2) et Sud (FFPS) de l'usine contrôlés avant rejet ;
- des rejets des effluents industriels traités de Prony Energies (PPIE) (via les bassins de premier flot Nord 1 et 2 ;
- des rejets de la station de traitement des eaux de ruissellement du stock de charbon de Prony Energies (CSSW) (via le bassin de soufre depuis fin 2010 sauf en cas de remplissage du bassin) ;
- des rejets des TAR de Prony Energies directement dans le Creek de la Baie Nord (CTB) ;
- des 25 premiers millimètres des eaux de ruissellement de Prony Energies (PPSW) après traitement dans l'unité de traitement de Prony Energies.

De façon générale, les conclusions de ce paragraphe écartent tous risques de modification de la qualité des eaux en zone impactée quelque soit l'origine des émissions.

REMARQUES

Il apparaît ici difficile d'apprécier la réalité potentielle de cette conclusion. Si pour FFPN1, FFPN2 et FFPS, un contrôle strict du rejet de ses effluents par VALE NC peut écarter logiquement tous risques de modification de la qualité des eaux après rejet par les bassins de premiers flots dans le creek de la baie Nord, cela ne semble pas évident pour les autres sources d'émissions. Sur les autres sources d'émissions (PPIE, CCSW, PPSW) les données sont ici présentées pour être disponibles dans les rapports d'exploitation transmis mensuellement ou annuellement par Prony Energies, sans autres précisions quand à leur contenu. Il n'est pas évident de savoir si les résultats de ces rapports ont été pris en compte et analysés. D'autant plus qu'il est écrit que les analyses réalisées par le Service Environnement de VALE NC sur les rejets des purges des tours à refroidissement (TAR) de Prony Energies (directement dans le creek de la baie Nord) ont montré des dépassements des limites d'émissions pour le zinc. De même que ces analyses ont montré la présence de benzotriazole, et une minéralisation plus élevée des eaux rejetées par les TAR avec une conductivité 3 fois supérieure à celle des eaux du creek ($300\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ contre $100\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Difficile donc de donner pleine raison à cette conclusion sans plus de détail sur le contenu des rapports d'exploitation de Prony Energies et la façon dont ceux-ci ont été pris en compte. Plus de précisions sur ces questions permettrait de valider ou non la conclusion ici avancée.

ii. ANALYSE CHIMIQUE DE LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE DANS ET HORS DE LA ZONE IMPACTEE

Ce paragraphe présente les analyses des compositions chimiques des eaux de surfaces grâce au réseau de 5 stations de suivi présent dans le creek de la baie Nord, dans et en dehors de la zone impactée (Fig. 5).

Les résultats montrent ici que par rapport aux stations situées hors de la zone d'impact, la station 6-Q située dans la zone d'impact, en amont de la zone localisant les individus d'*Arillastrum gummiferum* les plus impactés, présente des variations. Il est ainsi rapporté : « Les résultats au niveau de la station 6-Q montrent en fin du premier semestre 2011 une tendance à la diminution pour les éléments : magnésium, sodium, soufre, silicium, et calcium. De plus, on note aussi une augmentation légère de la conductivité. Cette dernière tendance est probablement due aux rejets continus de Prony Energies et aux vidanges

temporaires des bassins de premiers flots ». Il est également rapporté que « comme en 2010, une diminution des concentrations pour les paramètres calcium, chlorure, magnésium, sodium, soufre, sulfates, silicium est notable de l'amont vers l'aval dans le creek de la Baie Nord ». Ceci révélant un gradient de diminution de ces éléments vers 6-Q située en aval du creek. La conclusion de ce paragraphe est que l'analyse de la qualité des eaux de surface dans le creek de la baie Nord ne présente pas de variation significative de leur qualité physico-chimique. Les impacts observés sur la végétation n'ont donc pas pour origine une modification de la composition physico-chimique des eaux de surface.

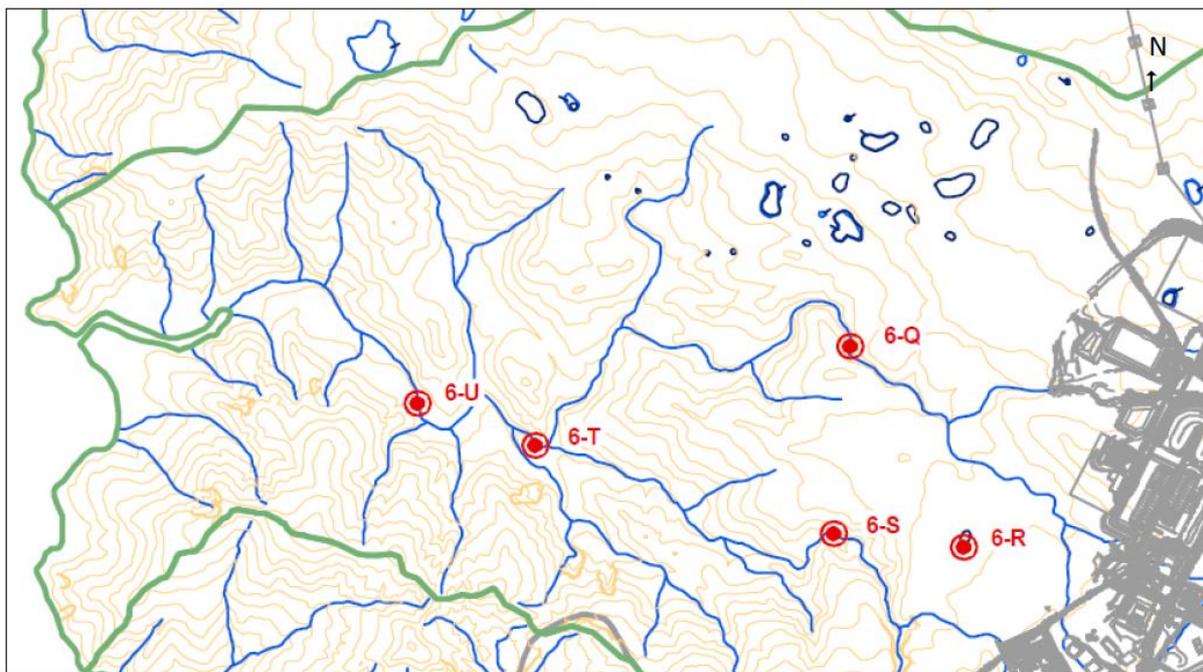


Figure 5. Localisation des points de suivi du creek de la Baie Nord (source VALE NC, 2011)

REMARQUES

Compte tenu des résultats présentés, il apparaît ici aussi difficile d'accepter pleinement cette conclusion. En effet, par rapport aux stations situées en dehors de la zone d'impact, les eaux de la station 6-Q, la seule située au cœur même de la zone impactée semble montrer des diminutions (« notables ») de certains éléments. On peut donc logiquement faire l'hypothèse qu'il puisse exister une corrélation entre ce résultat et l'impact observé. Les résultats rapportés pour la station 6-Q sont également à mettre en relation avec le fait que VALE NC pense « possible que les variations observées pour cette station puissent être dues aux rejets continus de Prony Energies et aux vidanges temporaires des bassins de premiers flots ». Si les vidanges temporaires des bassins de premiers flots ont pu être mis hors de cause au point précédent (cf. II.2.1.5.i), ce n'est pas le cas des émissions faites par Prony Energies pour lesquelles presque aucune information sur ces données (leur collecte et leur prise en compte) n'apparaissent dans le document. A nouveau, une étude des corrélations des résultats de la station 6-Q avec à la fois les données de compositions chimiques des émissions de Prony Energies et les impacts observés sur la végétation permettraient une conclusion beaucoup plus précise sur l'influence ou non de la qualité des eaux de surfaces sur les phénomènes de dégradation de la végétation observés. A noter que l'absence de différences significatives, même au sens statistiques, entre différentes

variations d'une variable mesurée en différent point n'exclue pas le fait que ces variations puissent entraîner des changements à l'échelle d'un point de mesure. De fait, les conclusions faites sur ce critère devraient être discutées et réexaminées.

iii. ANALYSE CHIMIQUE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DANS ET HORS DE LA ZONE IMPACTEE

Ce paragraphe présente les analyses des compositions chimiques des eaux souterraines grâce au réseau de suivi piézométriques du site VALE NC, présent dans le creek de la baie Nord, dans et en dehors de la zone impactée (Fig. 3). Ces données sont disponibles de 2008 à 2011. Les résultats rapportés ici font état de concentrations en chrome, chrome VI, potassium, sodium, calcium, chlorures, alcalinité et pH stables et comparables aux années de suivies les plus anciennes. La conclusion de ce paragraphe est que les variations de la qualité des eaux souterraines ne permettent pas de statuer à un impact de l'activité industrielle sur les phénomènes de dégradation de la végétation observés. Ce milieu n'a donc pas d'influence sur la zone d'impact.

REMARQUES

A nouveau, il apparait difficile de donner pleine raison à cette conclusion. Cela dû au fait que la station 6-8, située dans la zone d'impact, au niveau des individus d'Arillastrum gummiferum les plus impactés par les phénomènes de dépérissement, ont été observées des modifications significatives de la composition physico-chimique des eaux, présentés ici sous forme de graphiques, mais non abordés dans le texte. Pour cette station la composition physico-chimique des eaux souterraines montre une augmentation des sulfates à partir de juin 2010, près de 7 fois supérieurs aux autres stations dans les piézomètres longs et près de 10 fois dans les piézomètres courts avec le maintien d'un niveau près de 4 fois supérieurs aux autres stations par la suite. On note également pour cette station à la même période des augmentations des chlorures et de la DCO (demande chimique en oxygène). Il est également à noter qu'une augmentation des sulfates est visible pour le seul autre piézomètre long de la zone impactée (6-2, située plus en amont que 6-8), à la même période que pour 6-8, près de 4 fois supérieurs aux autres piézomètres. Les augmentations observées intervenant après l'événement intitulé « rupture colonne 250 ». Aussi, selon les relations géographiques des phénomènes de dégradation de la végétation et de modifications des eaux souterraines, on pourrait penser qu'il existe une corrélation significative et donc une influence significative de la modification de la qualité des eaux souterraines avec les phénomènes observés. La conclusion donnée par le rapport est donc ici à confirmer par des analyses de corrélations.

iv. ANALYSE CHIMIQUE DE LA QUALITE DES EAUX DE PLUIES DANS ET HORS DE LA ZONE IMPACTEE

Ce paragraphe présente les analyses des compositions chimiques des eaux de pluies grâce au réseau de suivi existant présent dans le creek de la baie Nord, dans et en dehors de la zone impactée. Les résultats présentés ici concernent les stations :

- pluviomètre de U-7, à proximité immédiate de la forêt rivulaire ;
- pluviomètre de l'usine
- pluviomètre de la base-vie
- pluviomètre de Ouénarou (Rivière Bleue)

Les données présentées concernent la période 2008-2011, à l'exception du pluviomètre U-7, installé en 2011, spécifiquement pour les besoins de l'étude.

REMARQUES

Les résultats sont présentés ici sous forme de graphiques sans analyse des données présentées. Les données présentées concernent les nitrates, les sulfates, les chlorures, la conductivité, le pH. Rien à signaler concernant l'analyse des eaux de pluies dans la zone d'impact pour le pH, la conductivité, les chlorures, les nitrates dont les niveaux sont soit comparables avec ceux des autres stations, soit plus faibles. Concernant les sulfates cependant, il est à noter que dès le début des mesures initiées en 2011, sont observés des taux élevés. De février à mai 2011, ces taux montrent un pic avec des valeurs près de 2 fois supérieures à celles des autres stations. On pourrait penser que ce pic n'est pas ponctuel mais ait pu apparaître avant le phénomène de dépérissement de la végétation observé en décembre 2010. Cette hypothèse devrait être conservée et les résultats obtenus à partir de 2011 mis en corrélation avec les résultats obtenus sur les eaux de surfaces et souterraines pour la même période. Cela permettrait d'évaluer d'affiner les causes de modifications de composition physico-chimique des eaux de surface et souterraine dans la zone d'impact décrites précédemment (cf. II.2.1.5.ii, cf. II.2.1.5.iii). Il est en effet possible que des eaux de pluies chargées de différents éléments, entraînent des modifications de la qualité des eaux superficielles ou souterraines lorsque gagnant celles-ci. Dernière remarque, les données présentées ne possèdent pas d'unités. Il est donc difficile d'apprécier les résultats présentés.

A noter également que la présence de biocides utilisés dans les Tours à refroidissement (TAR) pourrait également être recherché dans les eaux de la zone d'impact (cf. II.2.1.3). Ces travaux permettraient de compléter les informations capables d'écartier ou d'incriminer une influence des biocides.

6. L'émission de certains gaz atmosphériques pouvant impacter l'intégrité physiologique des plantes (oxydes d'azote, ammoniac, dioxyde de soufre et particules soufrées)

Cette hypothèse concerne une possible modification de la composition chimique de l'atmosphère par les différentes sources d'émissions de l'usine, et qui pourraient alors porter atteintes à l'intégrité physiologique des végétaux par un effet toxique, ou de carence.

Cette hypothèse est testée par la présentation :

- i. Des sources d'émissions possibles
 - a. Emissions canalisées
 - Les chaudières au fioul (unité 350) de Vale Nouvelle-Calédonie
 - L'usine d'acide sulfurique (unité 330)
 - Autres unités de VALE NC (fours à chaux)
 - La centrale électrique au charbon de Prony Energies
 - b. Emissions non canalisées
 - Les rejets des tours aéro-réfrigérées (TAR) de Vale NC
 - Les rejets des tours aéro-réfrigérées (TAR) de Prony Energies
 - Autres
 - Vapeur des décanteurs à contre-courant (unité 230)
 - Vapeur du bassin de solution mère ou PLS
 - Events de l'usine d'acide sulfurique
 - Poussières du stockage de charbon
 - Poussières du stockage de calcaire

- Poussières du stockage de soufre
 - Départ de feu au niveau du stockage de soufre et des installations annexes
 - Fuites de SO₂ au niveau de l'usine d'acide sulfurique
- ii. La qualité et l'évolution de l'air ambiant

i. LES SOURCES D'EMISSIONS POSSIBLES

a. EMISSIONS CANALISEES

Le suivi de la composition des émissions dites canalisées est présenté par les contrôles effectués en sortie des structures d'émissions. De façon majoritaire sont surveillées les émissions de SO₂, NO_x, PM₁₀, CO.

Les chaudières à fioul ont été mises en service début 2009, et aucune anomalie d'émissions n'est signalée. Il est néanmoins rapporté un dysfonctionnement du système de pulvérisation d'ammoniaque censé réduire les émissions de NO_x. Ce système n'a, à la date de l'étude, été testé que pour la période du 13 novembre 2010 au 29 décembre 2010. Il est rapporté que cela peut expliquer des non conformités sans précisions des dates de ces non conformités.

REMARQUES

Il pourrait être pertinent de tester la corrélation de cette dernière observation avec les augmentations d'azote relevés dans la litière et les écorces (cf. II.2.1.4).

L'usine d'acide sulfurique a été mise en service en décembre 2009. Les résultats des émissions de SO₂ ne montrent aucun dépassement des valeurs limites, mais il est à noter que les émissions apparaissent sous forme de pics ponctuels en décembre 2009, mars avril 2010, puis à partir de 2011 ces pics disparaissent pour laisser place à des émissions qui paraissent continues avec une moyenne de 100kg.h⁻¹.

REMARQUES

Il pourrait être pertinent de tester la corrélation de cette dernière observation avec les phénomènes de dépérissement relevés. Egalement, lorsque réalisées de tester une corrélation avec les teneurs en soufre des végétaux.

Concernant les autres unités de VALE NC (fours à chaux), il est dit qu'un suivi réalisé en novembre 2010 a montré des non-conformités pour le monoxyde de carbone et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en concentration et en flux. Les mesures prises en 2011 ont corrigées ces anomalies.

REMARQUES

Les données présentées ici ne permettent pas de tirer de conclusion définitive. Il faudrait pour cela tester les corrélations entre les données brutes et les phénomènes de dépérissement observés.

Concernant les centrales électriques à charbon de Prony Energies, les données ne sont pas présentées dans le document et sont dit disponibles dans le rapport de déclaration annuelle des émissions polluantes.

REMARQUES

Comme pour les investigations menées sur la qualité des eaux, les informations relatives à Prony Energies ne sont pas ici présentées. Impossible de savoir si ces données ont été prises en compte dans les travaux d'investigations et si oui, sous quelles formes. Sans ces informations, il est impossible d'incriminer ou d'écarter l'influence de potentielles émissions provenant de Prony Energies.

b. EMISSIONS NON CANALISEES

Sur les tours aéro-réfrigérées de VALE NC et Prony Energies sont présentés le détail des biocides respectivement utilisés et donc capables d'être émis dans l'atmosphère. Sur les autres sources d'émissions non canalisées il n'y a pas de suivi en continu et à l'heure du premier rapport d'investigation, il n'était pas possible d'intégrer ces données dans l'étude. A noter que sur les événements de l'usine d'acide sulfurique, des pics d'événements sont apparus en juillet 2009 près de 40 fois supérieurs au reste du temps observés (environ 40ppm contre 0,2). Des teneurs en H₂S à la même période près de 20 fois supérieures avec une direction du vent d'ouest ont également été relevées.

REMARQUES

Aucune information sur la prise en compte des corrélations pouvant relier ces données aux phénomènes de dépérissement n'est présentée. Sans ces informations, il est impossible d'incriminer ou d'écarter l'influence de ces émissions.

ii. QUALITE ET EVOLUTION DE L'AIR AMBIANT

Ici sont distingués les données de l'état initial et le suivi continu de la qualité de l'air ambiant

Etat initial

Ce paragraphe présente les mesures réalisées pendant la phase de construction de 2004 à 2005, ainsi que les données du milieu depuis 2007. Les résultats montrent une influence pendant la construction de la proximité du site de construction sur les retombées de poussières en forêt Nord pendant la saison humide. Et des dépôts de chrome, zinc et manganèse plus élevés dans les poussières dans la zone de port boisée pendant la saison sèche. Pendant la phase de construction il est montré une influence des activités (trafic et travaux de la base –vie, de l'usine) sur les teneurs en SO₂ (près de 2 fois supérieures au site témoin), en NO₂ (près de 1,5 supérieures au site témoin), pour 30 jours seulement. A noter que résultat est issu d'un suivi sur 30 jours cumulés non répartis équitablement sur l'année, il est donc rapporté la difficulté d'interpréter ce résultat du fait de la difficulté de faire une moyenne annuelle. Dans les poussières ont été relevés du chrome (près de 8 fois supérieur au site témoin), du manganèse (près de 2 fois supérieur au site témoin), du zinc (près de 10 fois supérieur au site témoin), idem pour le nickel (10 fois supérieur). L'interprétation des résultats est pour la même raison que précédemment, ici aussi difficile.

Suivi continu

Le suivi continu de la qualité de l'air ambiant est mesuré par 5 stations de mesures fixes et mobiles (stations AQMS), disposées en forêt nord, au village de Prony, à Port-boisé, à la base-vie, au Pic du grand Kaori. Néanmoins, les données sont indisponibles au moment des travaux d'investigations depuis 2009, suite au vieillissement du matériel et des difficultés de maintenance. Scal'Air a repris le suivi en février 2011. Dès la reprise de ce suivi, les résultats rapportent des pics d'émissions de SO₂ et de NO₂, sans toutefois aucun dépassement des valeurs limites d'émissions.

REMARQUES

Il est ici très difficile d'apprécier les résultats présentés du fait de leur fragmentation. Difficile donc de conclure sur la relation possible entre les phénomènes de dépérissement et l'évolution de la qualité de l'air.

II.2.2. INVESTIGATIONS SUR LES FACTEURS EN CAUSE DU DEPERISSEMENT DE LA VEGETATION DANS LA ZONE D'EMPRISE DE L'ACTIVITE INDUSTRIELLE DE VALE NOUVELLE-CALEDONIE (MURRAY, 2012)

Comme présenté plus haut, un second travail d'investigation, complémentaire du premier a été mené par le Pr Murray, de l'université de Murdoch (Perth-Australie) auquel VALE NC a fait appel. Le Pr Murray est spécialiste en pollution atmosphérique et effet phytotoxique.

Un premier résultat apporté par les travaux du Pr Murray découle d'un travail de diagnostic des symptômes sur la végétation alentours du site de VALE NC réalisé entre octobre 2011 et janvier 2012. Ce travail s'orientait sur l'évaluation des symptômes au sein (i) des parcelles de suivi mises en place dans le cadre du programme de surveillance écologique en 2007. Ces parcelles sont situées dans la Forêt Nord, au Pic du Pin et au Pic du Grand Kaori, et ont été sélectionnées de par leur localisation dans la zone d'influence de l'usine, mais aussi pour leur richesse biologique et leur intérêt patrimonial à l'échelle du Grand Sud, (ii) sur des parcelles situées dans et alentour du site impacté identifié en décembre 2010, et (iii) sur une parcelle considérée comme témoin non impactée, située à l'est des installations industrielles, hors de la zone d'influence des vents dominants. Il s'agissait, lorsque présents, de décrire les symptômes touchant les végétaux et d'en déterminer les causes probables. Il s'agissait également de compléter les analyses de composition chimiques foliaires, de litières, d'écorces et de sol incomplètes dans le premier travail d'investigation. Ces résultats rapportent que bien que de légères augmentations des concentrations en azote foliaire et dans la litière aient pu être identifiées dans la forêt Nord et au Pic du Grand Kaori cela n'a, à l'heure de l'étude, eu aucun effet sur la santé des végétations de ces zones (ces résultats se basent sur l'étude comparative de la chimie foliaire de 7 espèces). Il est ici cependant souligné qu'à l'époque de l'étude, il n'y aucune connaissance sur les conséquences écologiques pouvant être entraînées par une augmentation de la concentration d'azote dans ces écosystèmes. Aussi, il est conseillé de poursuivre les investigations sur l'évolution des concentrations en azote au sein des formations végétales, et l'apparition ou l'aggravation de symptômes. Malgré cette remarque, le suivi réalisé a permis de conclure qu'aucun changement n'est à signaler au sein des parcelles de suivies du programme de surveillance écologique entre 2007 et 2010.

Autre résultat important apporté par le Pr Murray, celui de l'analyse de la composition chimique foliaire qui révèle que pour les deux espèces testées dans cette étude

(*Tristaniopsis guillaumini* et *Arillastrum gummiferum*) les concentrations en soufre foliaire sont plus importantes dans les zones impactées que dans les zones témoins. *Tristaniopsis guillaumini* a une concentration presque deux fois plus élevée de soufre dans la zone impactée que pour des zones non impactées. Pour *Arillastrum gummiferum* la concentration de soufre dans les feuilles n'augmente que de 15 % dans la zone impactée. Concernant les teneurs en azote, les travaux rapportent que les deux espèces présentaient des concentrations très similaires dans les zones impactées et non impactées. En conclusion, il est donc avancé qu'il existe une plus forte probabilité que les émissions de soufre soient responsables du dépérissement de la végétation. A noter que *Tristaniopsis guillaumini* et *Arillastrum gummiferum* ont été les deux seules espèces étudiées dans ce cas, en raison de l'importance des symptômes qu'elles présentaient.

Enfin les travaux du Pr Murray rapportent l'identification d'une source de SO₂ non négligeable, et non identifiée lors des premiers d'investigations. Il s'agit de la combustion accidentelle de soufre élémentaire au niveau de la zone de stockage de soufre. Une station mobile de contrôle de la qualité de l'air a en effet permis de mettre en exergue que les concentrations en SO₂ atmosphériques suite à des incendies dans la zone de stockage du soufre pouvait engendrer des pics allant jusqu'à 7 687µg.m⁻³ (18 novembre 2011) en moyenne horaire alors que la valeur limite pour la protection de l'écosystème en NC est de 570µg. m⁻³. Il est avancé le fait qu'il existe un fort risque qu'une végétation sensible exposée à une telle concentration, même pour une durée de quelques minutes, développerait des symptômes sévères de dépérissement. Ce résultat se base sur la mise en corrélation des dates de départ d'incendies avec les niveaux de SO₂ mesurés dans l'air subséquentement.

II.3. CONCLUSIONS DES PREMIERS TRAVAUX D'INVESTIGATIONS

En conclusion de ces premiers travaux d'investigations, il est dit :

- que les informations préliminaires tendent à appuyer une ou plusieurs causes d'origine atmosphérique, et que les autres causes envisagées ont été écartées, s'agissant des changements d'ordre hydrologique, de la qualité de l'eau, de maladies ou d'attaques de ravageurs et biocides.
- que les investigations préliminaires ont permis d'identifier le dioxyde de soufre comme étant le facteur premier (sans exclure les autres polluants gazeux).

II.4. PROPOSITIONS D'INVESTIGATIONS ET DE SUIVIS COMPLEMENTAIRES ISSUES DES PREMIERES INVESTIGATIONS

Sur la base des résultats et données rapportées par les premiers travaux d'investigations, un certains nombres de mesures ont alors été proposées pour compléter les investigations et assurer une surveillance de l'évolution des phénomènes de dépérissement autour du site de VALE NC.

II.4.1. PROPOSITION POUR UN PROGRAMME DE SURVEILLANCE ECOLOGIQUE CIBLANT LES ZONES A RISQUES – SUIVI SYMPTOMATOLOGIQUE : SUIVI DES SYMPTOMES FOLIAIRES ET SUIVI DE LA QUALITE DE L'AIR

La conclusion du rapport du Pr Murray fait le bilan des actions de suivies menées dans le cadre du programme de surveillance écologique de parcelles au sein de la Forêt Nord, au Pic du Pin et au Pic du Grand Kaori. Ce programme a permis la réalisation d'une base de

référence permettant de mesurer et d'évaluer tous changements dans ces écosystèmes à forte valeur de conservation. Ce travail mené depuis 2007 et par comparaison des données acquises dans le cadre des investigations sur les causes de phénomènes de dépérissement autour de l'usine a permis de différencier les sites directement impactés par les émissions atmosphériques des autres sites affectés par des facteurs non liés à l'activité de VALE NC (cas notamment du Pic du Grand Kaori, impacté par des insectes). Aussi, le Pr Murray propose de réorienter le programme de surveillance sur les sites les plus à risques. Ces risques sont évalués par rapport à la distance au site industriel, ainsi que par l'influence des vents dominants ayant comme épïcentre l'usine de VALE NC. 27 stations de suivi sont ici proposées. Sur le suivi à proprement parler, il est proposé :

- que le nouveau programme devrait impérativement intégrer le suivi de la qualité de l'air à l'aide d'échantillonneurs passifs placés au sein de chaque station.
- une adaptation des outils de surveillance de la végétation, passant d'une surveillance des processus écologiques fondamentaux, à une évaluation des risques et symptômes les plus attendus accompagné d'analyses chimiques révélant la teneur en soufre et en azote dans les feuilles d'espèces indicatrices sélectionnées. Ainsi le programme de suivi visuel des symptômes devrait être réalisé mensuellement sur les stations, en priorisant les espèces les plus sensibles alors qu'une analyse de la teneur en soufre foliaire pour différentes espèces sera réalisée de façon trimestrielle.
- que des travaux devraient être poursuivies afin d'identifier les meilleures espèces indicatrices (*Tristaniopsis guillaumini* présentée dans ce rapport est avancée comme une de ces espèces, constituant un premier modèle de suivi possible).
- Pour des raisons logistiques, le suivi devrait se focaliser sur les individus de la strate moyenne et du sous-bois.
- Egalement et selon les premières constatations faites sur le terrain, les premiers signes du dépérissement de la strate forestière supérieure dûs à la pollution atmosphérique seraient une abscission des feuilles causant une défoliation partielle des espèces sensibles et augmentant ainsi l'intensité de la lumière dans la forêt. Dès lors, la mesure de l'intensité lumineuse au sein des formations forestières devrait aussi être prise en compte dans le suivi afin de prévenir d'un changement écologique de manière simple et précoce.

Ces modifications du programme devraient fournir une meilleure couverture géographique de la zone et se concentreront vers les signes précurseurs d'un risque d'impact permettant ainsi de gérer le problème plus rapidement.

II.4.2. DEFINITION D'UN DOCUMENT GUIDE DE CARACTERISATION DES SYMPTOMES PAR ESPECE

Ce guide devra décrire les symptômes observés sur un certains nombres d'espèces clés sélectionnées et évaluer la sévérité des impacts observés. Cet outil sera par la suite utilisé pour suivre les phénomènes sur le terrain comme proposé précédemment et permettra de mieux cartographier les symptômes. Pour cela, il est prévu qu'un certain nombre de stations soient visités à distances variables du site industriel et sous différentes orientations de vents. Sur chacune des stations un ensemble de symptômes sera enregistré (dont les chloroses marginales ou inter-vénales, les brûlures ou nécroses foliaires, les pertes prématurées de feuilles, la déformation des parties foliaires ou encore les rejets sur vieux bois...) ainsi que le nom de l'espèce touchée.

II.4.3. ETUDE SUR LA SENSIBILITE DES ESPECES FLORALES LOCALES AUX POLLUANTS PAR LA TECHNIQUE DE FUMIGATION

La priorité d'évaluer les effets du dioxyde de soufre sur la végétation endémique est orienté par le fait que celui-ci est, après les premiers travaux d'investigations, considéré comme étant le premier facteur responsable des phénomènes observés, et aussi par le fait que les seuils limites de concentration pour la protection des écosystèmes néo-calédoniens par rapport au SO₂ sont basés sur des études toxicologiques effectuées dans d'autres pays. Il est donc souligné l'importance de conduire de telles études en Nouvelle-Calédonie pour déterminer si ces seuils limites sont appropriés au climat et à la végétation endémique du territoire. Les seuils limites réglementaires journaliers utilisés pour la protection des écosystèmes terrestres pour le SO₂ sont fixés à une moyenne horaire de 570µg.m⁻³ (218ppb) et de 230µg.m⁻³ (88ppb) en moyenne journalière (OMS, 2000 ; ICPE 2008). Il s'agit de mesurer les effets de différentes concentrations de dioxyde de soufre sur une sélection d'espèces indigènes néo-calédonienne. La priorité devra porter sur l'évaluation des effets sur les espèces pour lesquelles les symptômes du dépérissement sont les plus accentués. L'objectif sera d'établir la relation concentration/réaction pour ces espèces et de définir les symptômes des dommages causés par le dioxyde de soufre.

II.4.4. ETUDE MULTI-TEMPORELLE DE LA VEGETATION EN PERIPHERIE IMMEDIATE DU SITE DE VALE NOUVELLE-CALEDONIE PAR PHOTOGRAPHIE SATELLITAIRE

Afin de préciser l'étendue et l'évolution des impacts sur la forêt en périphérie directe du complexe industriel, il a été proposé d'engager une étude multi-temporelle par télédétection. Il s'agira, à partir des données satellitaires disponibles entre 2009 et 2011, de caractériser les changements en termes (1) de modification de la radiométrie en tant qu'indicateur de l'augmentation ou de la diminution de l'activité chlorophyllienne et (2) de modifications spatiales de l'activité chlorophyllienne de la végétation. Ces changements seront replacés sur une échelle chronologique afin de déterminer les dates ou périodes temporelles clés de l'évolution de l'activité de ce type de végétation et de déterminer une dynamique (intensité de l'évolution, contagion spatiale) des évolutions constatées. Les objectifs de cette étude sont donc de :

- Mettre en évidence l'évolution de la santé de la forêt de Chêne Gomme sur la zone d'intérêt (25km²) depuis 2009 jusqu'à aujourd'hui.
- Dater l'apparition des changements remarquables sur cette espèce végétale.
- Quantifier les changements (caractéristiques radiométriques des changements, modalité spatio-temporelle, dynamique radiométriques et spatio-temporelle).
- Mettre en évidence des changements de même nature qui pourraient affecter d'autres espèces dans leur voisinage.

Il est aussi prévu que les données issues de l'analyse des images satellites soient vérifiées sur le terrain pour permettre une validation *in vivo* des informations.

II.4.5. REVUE DE LA MODELISATION DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE

Il est aussi proposé de développer un modèle de dispersion atmosphérique à partir des données d'émissions industrielles de VALE NC, des données météorologiques locale et des

concentrations en polluants dans l'air ambiant. Cela permettra d'améliorer les prédictions de la concentration au sol de polluants gazeux au sein et aux alentours des installations industrielles et également la mise en place de mesure de réponses lorsque nécessaire.

II.4.6. MINIMISATION DES INCENDIES DU STOCK DE SOUFRE

Cette proposition se base sur le fait que les caractéristiques visuelles des symptômes du dépérissement témoignent d'une importante exposition de la végétation au SO₂ caractérisée par des concentrations très élevées durant des durées d'exposition courtes. Ceci correspond aux résultats obtenus par le suivi de la qualité de l'air. En effet ce suivi a montré des fortes concentrations de SO₂ dans l'air (7687 µg.m⁻³ en moyenne horaire) pendant de courtes durées dues aux incendies de soufre élémentaire au niveau de la zone de stockage. Ces fortes concentrations dépassent de loin la valeur limite horaire pour la protection pour la végétation en NC qui est de 570 µg.m⁻³. Aussi il est fait la remarque que si des mesures ne sont pas prises pour minimiser la fréquence et l'intensité des incendies du stock de soufre alors la végétation environnante va sans aucun doute continuer à se dégrader. Le dépérissement de la forêt sera alors plus sévère et sera géographiquement plus étendu.

CRITIQUES ET PROPOSITIONS D'AMÉLIORATION

Pour rappel, la méthode mise en œuvre lors des premiers travaux d'investigations a consisté à lister l'ensemble des facteurs jugés comme capables d'être à l'origine, ou comme pouvant participer au phénomène de dépérissement observé (changement d'ordre hydrologique, présence de maladies ou de ravageurs, influence des biocides utilisés dans les tours à refroidissement, changement dans la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes, changement de la qualité de l'eau, influence des émissions atmosphériques émanant de l'usine), et sur la base des données rassemblées pour chacun de ces facteurs, de discuter de leur incrimination ou leur discrimination. A l'issue des travaux d'investigations menés, il a été conclu de ne garder qu'une ou plusieurs causes d'origines atmosphériques (avec notamment le SO₂ comme premier facteur) et d'écarter les autres causes comme facteurs possibles des phénomènes de dépérissement observés (changements d'ordre hydrologique, de la qualité de l'eau, de maladies ou d'attaques de ravageurs et biocides). Si la liste des facteurs jugés comme capables d'être à l'origine, ou de participer au phénomène de dépérissement observé apparaît exhaustive, et la conclusion d'incriminer le SO₂ atmosphérique comme premier facteur responsable du phénomène apparaît justifiée, il apparaît cependant difficile, au regard des documents analysés, d'exclure complètement l'influence des autres facteurs étudiés. Cela notamment pour 2 raisons :

1. la présence de biais possibles dans l'interprétation des données susceptibles de pouvoir incriminer ou discriminer un facteur
2. la possibilité qu'il puisse exister un effet combiné et/ou cumulatif de ces facteurs, aux effets engendrés par le SO₂ sur les phénomènes de dépérissement observés.

1. la présence de biais possibles dans l'interprétation des données susceptibles de pouvoir incriminer ou discriminer un facteur

- Sur la conclusion de non influence des biocides

L'influence des biocides (utilisés dans les tours à refroidissement pour lutter contre les bactéries de type *Legionella*) est ici écartée car ceux-ci sont reconnus comme à spectre large, et que par conséquent leur impact sur la végétation, s'il devait exister, devrait toucher de la même façon un grand nombre d'espèces végétales. Ce qui n'est pas le cas ici, les espèces montrant des degrés de dépérissement différents. Si le raisonnement apparaît logique, il est cependant possible qu'une réponse uniforme de différentes espèces végétales qui pourraient être ainsi impactées mette du temps à apparaître (notamment selon l'âge des individus, les espèces...). D'autres part, les recherches de ces biocides sur les feuilles, l'écorce d'espèces végétales, dans le sol ou la litière, ou dans les eaux de surfaces ou souterraines n'ont semble-t-il pas été menées. Ces investigations permettraient de façon significative d'incriminer ou de discriminer l'influence des biocides. Aussi sans ce travail, et sur la seule interprétation des effets que devrait avoir un biocide à spectre large, il est difficile d'exclure complètement ce facteur.

- Sur la conclusion de non influence des changements de la qualité des éléments chimiques.
Tout d'abord, les analyses ayant portées sur l'analyse de la qualité chimique des sols semblent avoir été menées uniquement sur les teneurs en éléments totaux. Or une partie de ces éléments n'est pas disponible pour les végétaux puisqu'immobilisée dans les sols au sein de la matrice minérale. Afin de discriminer un potentiel effet de la qualité chimique des sols, il est plus couramment évaluer les teneurs en éléments disponibles pour les plantes (éléments extractibles). Ce type d'analyse permet d'avoir un meilleur reflet des relations pouvant exister entre une modification de la composition chimique des sols et le métabolisme des végétaux (dans ce cas approché par la composition chimique de leurs feuilles ou de leur écorce). Enfin, les analyses ne concernent que des individus d'*Arillastrum gummiferum*. Il pourrait être avantageux pour l'étude de reproduire ces analyses sur d'autres espèces impactées. La comparaison des résultats espèces permettra à coup sur de discerner d'avantage les relations sol-végétation. Sur la base de ces observations, il apparaît donc difficile d'exclure l'influence de la qualité chimique des éléments.
- Sur la non influence des changements de la qualité des eaux
 - o Sur la conclusion de non influence de changement de qualité des émissions aqueuses
Il apparaît ici difficile d'apprécier la réalité potentielle de cette conclusion en raison principalement du manque d'informations, notamment sur les données des émissions de Prony Energies. Celles-ci sont décrites pour être présentes dans les rapports d'exploitation transmis par Prony Energies annuellement ou mensuellement mais ne sont pas autrement présentées ici. Aussi, il n'est pas évident de savoir si les résultats de ces rapports ont été pris en compte dans l'interprétation et analysés (et de quelle façon). D'autant plus qu'il est ici rapporté que les analyses réalisées par le Service Environnement de VALE NC sur les rejets des purges des tours à refroidissement (TAR) de Prony Energies (directement dans le creek de la baie Nord) ont montré des dépassements des limites d'émissions pour le zinc. De même que ces analyses ont montré la présence de benzotriazole, et une minéralisation plus élevée des eaux rejetées par les TAR avec une conductivité 3 fois supérieure

à celle des eaux du creek ($300\mu\text{S.cm}^{-1}$ contre $100\mu\text{S.cm}^{-1}$). Difficile donc de donner pleine raison à cette conclusion sans plus de détails sur le contenu des rapports d'exploitation de Prony Energies et la façon dont ceux-ci ont été pris en compte. Plus de précisions sur ces questions permettrait de valider ou non la conclusion ici avancée.

- Sur la conclusion de non influence de changement de qualité des eaux de surface

Compte tenu des résultats présentés, il apparaît ici aussi difficile d'accepter pleinement cette conclusion. En effet, par rapport aux stations situées en dehors de la zone d'impact, les eaux de la stations 6-Q, la seule située au cœur même de la zone impactée, semblent montrer des diminutions (« notables ») de certains éléments (tendance à la diminution pour les éléments magnésium, sodium, soufre, silicium, et calcium, augmentation légère de la conductivité). On peut donc logiquement faire l'hypothèse qu'il puisse exister une corrélation entre ce résultat et l'impact observé. Les résultats rapportés pour la station 6-Q sont également à mettre en relation avec le fait que VALE NC pense « possible que les variations observées pour cette station puisse être dues aux rejets continus de Prony Energies et aux vidanges temporaires des bassins de premiers flots ». Si les vidanges temporaires des bassins de premiers flots ont pu être mis hors de cause, ce n'est pas le cas des émissions faites par Prony Energies pour lesquelles presque aucune information sur ces données et leur prise en compte n'apparaissent dans le document. A nouveau, une étude des corrélations des résultats de la station 6-Q avec à la fois les données de compositions chimiques des émissions de Prony Energies et les impacts observés sur la végétation permettraient une conclusion beaucoup plus précise sur l'influence ou non de la qualité des eaux de surfaces sur les phénomènes de dégradation de la végétation observés.

- Sur la conclusion de non influence de changement de qualité des eaux souterraines

A nouveau, il apparaît difficile de donner pleine raison à cette conclusion. Cela dû au fait que la station 6-8, située dans la zone d'impact, au niveau des individus d'*Arillastrum gummiferum* les plus impactés par les phénomènes de dépérissement, ont été observées des modifications significatives de la composition physico-chimique des eaux, présentés ici sous forme de graphiques, mais non abordés dans le texte. Pour cette station la composition physico-chimique des eaux souterraines montre une augmentation des sulfates à partir de juin 2010, près de 7 fois supérieurs aux autres stations dans les piézomètres longs et près de 10 fois supérieures dans les piézomètres courts avec le maintien d'un niveau près de 4 fois supérieurs aux autres stations par la suite. On note également pour cette station à la même période des augmentations des chlorures et de la DCO (demande chimique en oxygène). Il est également à noter qu'une augmentation des sulfates est visible pour le seul autre piézomètre long de la zone impactée (6-2, située plus en amont que 6-8), à la même période que pour 6-8, près de 4 fois supérieurs aux autres piézomètres. Les augmentations observées intervenant

après l'événement intitulé « rupture colonne 250 ». Aussi, selon les relations géographiques des phénomènes de dégradation de la végétation et de modifications des eaux souterraines, il est possible de faire l'hypothèse que pourrait exister une corrélation significative (et donc une influence significative) de la modification de la qualité des eaux souterraines avec les phénomènes observés. La conclusion donnée par le rapport serait donc ici à confirmer par des analyses de corrélations complémentaires.

- Sur la conclusion de non influence de changement de qualité des eaux de pluies

A noter que les données présentées dans les rapports d'investigations sont sous forme de graphiques sans analyses de données présentées. Il est également à souligner que les données présentées dans ces graphiques montrent dès le début des mesures initiées en 2011 dans la zone impactée, des taux de sulfates près de 2 fois supérieurs entre février et mai 2011 par rapport aux autres stations. Aussi on peut faire l'hypothèse qu'il ne s'agit pas d'un « pic » ponctuel, mais que d'autres pics aient pu se produire avant le début des relevés. Cette hypothèse devrait être conservée et les résultats obtenus à partir de 2011 mis en corrélation avec les résultats obtenus sur les eaux de surfaces et souterraines pour la même période. Cela permettrait d'évaluer et d'affiner les causes de modifications de composition physico-chimique des eaux de surface et souterraine dans la zone d'impact décrites précédemment.

- Sur les méthodes d'analyses des données présentées

Il est aussi à noter que les conclusions apportées à la discrimination de chaque facteur ne semblent reposer que sur une mise en parallèle de faits, sans qu'aucunes analyses statistiques n'aient a priori été réalisées. Sans la mise en application d'analyses statistiques des données présentées, il est d'autant plus difficile de conclure de façon significative à l'influence ou non des différents facteurs étudiés. L'absence d'outil statistiques pouvant conduire à de nombreux biais d'interprétations. Il s'agirait ici pour chaque variable étudiée de réaliser d'une part, des comparaisons de moyennes entre différents points de suivi (notamment entre les points de suivi de la zone impactée et des points de suivi « témoin » considéré comme hors zone impactée), et d'autre part de tester les corrélations entre les variables soupçonnées de pouvoir participer au phénomène de dépérissement et les relevés de dépérissement. Il est important de rappeler que l'absence de différences significatives, même au sens statistique, entre différentes variations d'une variable mesurée en différents points n'exclue pas le fait que ces variations puissent entraîner des changements à l'échelle d'un point de mesure. De fait, les conclusions faites sur ce seul critère devraient être discutées et réexaminées et les analyses de corrélation peuvent permettre d'écarter ce biais d'interprétation.

2. La possibilité qu'il puisse exister un effet combiné et/ou cumulatif de ces facteurs à ceux engendrés par le SO₂ sur les phénomènes de dépérissement observés.

En conséquence du fait de ne pouvoir être complètement écartés, l'influences des facteurs décrits précédemment, devraient d'autant plus être prises en compte qu'il est souligné à

plusieurs reprises dans les rapports d'investigations que : « La sévérité des phénomènes de dépérissement des populations végétales que pourrait engendrer un polluant gazeux tel que le SO₂, peuvent résulter d'effets combinés, possiblement cumulatifs, avec d'autres facteurs. Ce polluant pouvant aggraver la réponse des végétaux face à d'autres stress environnementaux, ou dont la sensibilité des végétaux face à ce polluant peut être aggravés par des stress environnementaux préexistants du à d'autres facteurs ». Il est d'ailleurs ajouté dans les rapports d'investigations que « concernant le SO₂, celui-ci a le plus souvent tendance à aggraver les effets néfastes causés par un autre stress ». Ces remarques devraient notamment être mises en relations avec les modifications identifiées de la qualité des eaux. En effet, il est probable que d'une façon ou d'une autre, les modifications de la qualité des eaux (notamment) puissent également intervenir sur les phénomènes de dépérissement.

- les observations de changements de qualité des eaux de pluies dans la zone d'impact , notamment pour les teneurs en sulfates, peuvent trouver une corrélation avec les émissions atmosphériques industrielles. Les eaux se chargeant alors en sulfates au contact des émissions atmosphériques.
- Les eaux de pluies pouvant alors conséquemment entraîner des dépôts de sulfate sur la végétation
- De la même façon, ces eaux de pluies ainsi chargées en sulfate pourraient ensuite entraîner, par les relations hydrologiques, une modification de la qualité des eaux de surface ou souterraines, soit par lessivage des dépôts de soufre foliaire qui pourrait exister, soit par infiltration directe dans les eaux du sol.
- Il est aussi possible que les modifications des teneurs en sulfate des eaux du sol puissent aussi être liée à des rejets en zone d'impact, comme l'hypothèse est ici faite, ou encore d'événements particuliers (ex : rupture de la colonne 250 comme décrit ici).

Ces deux dernières remarques pouvant coexister.

Les modifications des eaux du sol, que ce soit de façon direct par infiltration d'eau de pluies chargées en soufre, ou du fait de rejets, ou d'événements particuliers, ou que ce soit de façon indirecte par lessivage de dépôts de soufre foliaire lors d'évènements de précipitations, peuvent alors entraîner un effet cumulatif/combiné aux dépôts foliaires (reconnus comme principale voie d'absorption du soufre atmosphérique dans les documents analysés) et seraient alors capables d'aggraver les phénomènes de dépérissement observés. Or toutes ces relations, et principalement l'influence d'un possible effet combiné/cumulatif d'autre facteurs que le SO₂ ne semblent pas avoir été examiné dans les rapports d'investigations ou dans les autres documents analysés, et concernant les travaux après 2011. L'ensemble des documents semblant après 2011, se focaliser uniquement sur les effets du SO₂.

En conséquence de toutes ces remarques, certaines réserves doivent être gardées quant à l'acceptation des conclusions présentées dans les rapports d'investigations. Aussi, pour clarifier celles-ci, il est suggéré :

- De continuer le suivi de la qualité des eaux de surface (selon le protocole mis en œuvre dans les rapports d'investigations, suffisant pour le moment) dans et hors de la zone d'impact, et de faire leur analyse comparée (analyse statistique de comparaison de moyennes pour chaque variable), afin d'identifier toutes variations

significatives.

- D'étudier statistiquement les corrélations pouvant exister entre toutes les variables étudiées :
 - o la composition chimique des différents types d'eaux (surface, souterraine, pluies),
 - o les analyses chimiques des sols (si possibles réalisées sur les éléments extractibles),
 - o les analyses chimiques des tissus végétaux,
 - o la qualité des émissions atmosphériques
 - o la qualité atmosphérique

Cela permettra d'identifier les relations entre ces différents compartiments de l'environnement, et qui sont alors susceptibles d'entraîner des variations significatives de ceux-ci. Ces analyses permettront finalement d'identifier des effets combiné/cumulatifs que ces variations pourraient alors avoir sur le métabolisme des végétaux et les phénomènes de dépérissement observés (Il devrait notamment être identifié les causes de la modification de la qualité des eaux, et testée l'influence de celles-ci sur les phénomènes de dépérissement, en plus des effets engendrés par le SO₂ atmosphérique).

- De rechercher la présence de biocides dans les eaux de surface et souterraines notamment (afin d'écartier définitivement l'influence potentielle de ce facteur).
- De clarifier la prise en compte des données relatives aux émissions de Prony Energies.

Première mesure proposée à l'issue des travaux d'investigations de 2011, la réorientation du programme de surveillance écologique, initialement mis en place par VALE NC en 2007. A l'origine ce programme de surveillance s'orientait vers le suivi de l'état de santé global d'écosystèmes à forte valeur de conservation (sélectionnées de par leur localisation dans la zone d'influence de l'usine, mais aussi pour leur richesse biologique et leur intérêt patrimonial à l'échelle du Grand Sud - forêt Nord, Pic du Pin, Pic du Grand Kaori). Cependant, les données acquises dans le cadre des travaux d'investigations sur les causes du dépérissement des végétations à chênes gommés de la baie Nord en 2011 ont permis par comparaison de différencier les sites directement impactés par les émissions atmosphériques des autres sites affectés par des facteurs non liés à l'activité de VALE NC (cas notamment du Pic du Grand Kaori, impacté par des insectes, et Pic du Pin ne semblant pas être impacté). En conséquence, une proposition de réorientation du programme de surveillance écologique a été faite afin de concentrer le suivi d'un potentiel impact environnemental d'origine industriel vers les zones dorénavant considérées comme les plus à risques. Ces risques ayant été évalués par rapport à la distance au site industriel, ainsi que par l'influence des vents dominants (vents d'est - sud est) en ayant comme épigénètre l'usine de VALE NC et en se basant sur les postulats suivants :

- Le risque d'exposition des formations végétales aux émissions de dioxyde de soufre (SO₂) diminue avec l'éloignement aux principales sources d'émissions atmosphériques (centrale électrique, usine d'acide, chaudières, stock de soufre)
- Le dioxyde de soufre de l'air est absorbé par les végétaux et les quantités excédentaires sont accumulées dans les feuilles. Cette quantité excédentaire génère des symptômes de chlorose et de nécrose foliaire qui sont observables et leur étendue quantifiable.

III.1. PREMIER PROTOCOLE DE SUIVI SYMPTOMATOLOGIQUE PROPOSÉ - 2013

Ce protocole est présenté dans le document « Protocole de suivi de la végétation exposée aux émissions atmosphériques de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie » (VALE NC, 2013).

III.1.1. DEFINITION DE NOUVELLES STATIONS DE SUIVI

Un total 29 stations de suivi ont été établies et réparties de manière à couvrir la zone d'influence de l'ensemble des activités de VALE NC. Trois catégories de stations de suivi ont été définies :

- 13 stations considérées comme les plus à risque sont situées à moins de 800 m de l'usine
- 8 stations considérées comme à risque modéré se situent entre 1 km et 2 km de l'usine
- 8 stations considérées comme à faible risque se trouvent à des distances plus éloignées entre 2,3 km et 20 km.

La localisation et la description des stations d'observation sont présentées dans la figure 6 et le tableau 2. Cette répartition des stations d'observation permet de couvrir la zone de dépérissement et les zones possédant des protections juridiques réglementaires (Forêt Nord, Pic du Grand Kaori). L'ensemble des stations d'observation est également situé au niveau de pistes, de façon à être plus accessibles pour pouvoir assurer un suivi mensuel rapide ne dépassant pas trois jours. Ces conditions d'accès facilitées doivent permettre d'assurer une surveillance optimale et ainsi signaler de manière précoce toute apparition de symptômes. La plupart de stations ont été choisies en lisière de forêt ou de maquis qui sont

en général les premiers milieux récepteurs des effets du dioxyde de soufre sur la végétation (Murray, 2003).

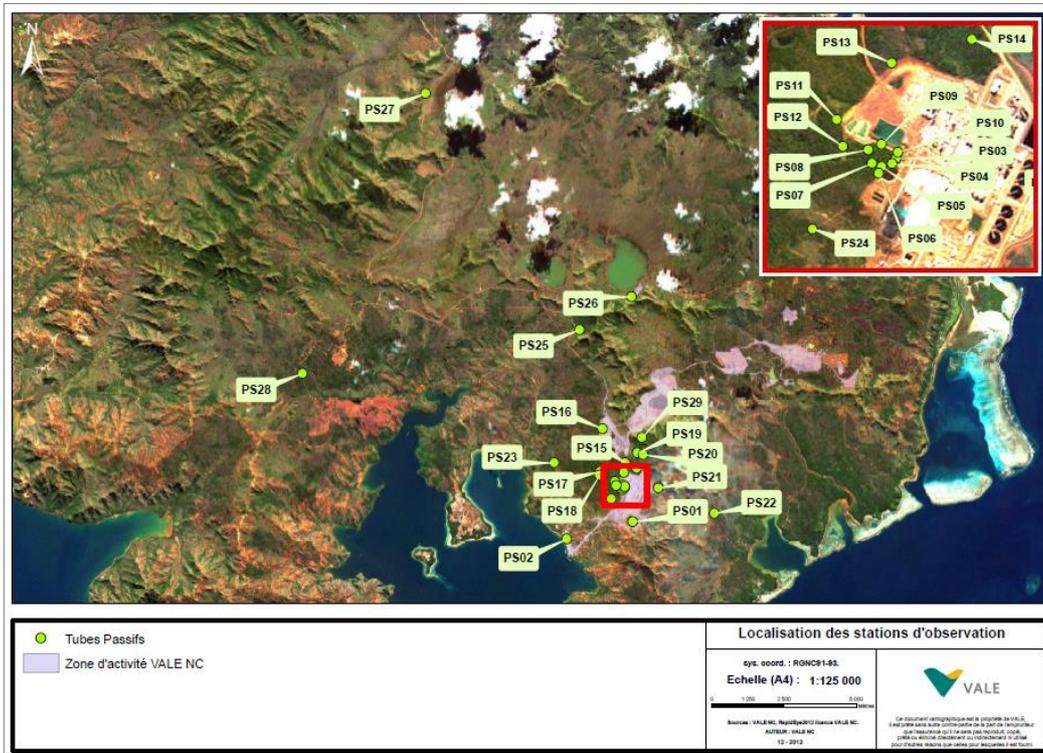


Figure 6. Localisation des stations d'observation du protocole de surveillance 2012 (source VALE NC, 2013)

Tableau 2. Descriptif des 29 stations d'observation. Les suivis symptomatologiques sont réalisés pour 24 stations (marqueur rouge) et les analyses chimiques foliaires pour 27 stations (marqueur bleu) (source VALE NC, 2013).

Station observation	Localisation	Distance à la source (m)	Orientation par rapport à la source	Végétation	Exposition	GPS RGNC 91 X Y	Classe	Remarque
PS 3	Exutoire Ck Baie Nord PE	200	W	Maquis arbustif dense	Lisière du creek	-22.33268; 166.91039	Proche	Stations à haut risque susceptible de montrer une teneur moyenne en SO ₂ pouvant engendrer des dommages sévères sur les espèces sensibles
PS 4	Bassin souffre lisière 1	200	W	Forêt Rivulaire	Lisière de l'usine	-22.33294; 166.91017		
PS 5	Bassin souffre exutoire lisière 2	250	WSW	Forêt Rivulaire	Lisière de l'usine	-22.33310; 166.90961		
PS 6	Bassin souffre lisière 3	250	WSW	Forêt Rivulaire	Lisière de l'usine	-22.33342; 166.90945		
PS 7	Forêt Rivulaire Galerie	300	WSW	Forêt Rivulaire	Fermée	-22.33293; 166.90909		
PS 8	Forêt Rivulaire Chêne gomme	350	W	Forêt à Chêne gomme	Fermée	-22.33228; 166.90889		
PS 9	Bassin eau brute lisière	300	W	Forêt à Chêne gomme	Lisière de l'usine	-22.33199; 166.90959		
PS 10	Bassin eau brute station pompage	200	W	Forêt à Chêne gomme	Lisière de l'usine	-22.33239; 166.91048		
PS 11	Exutoire Bassins Premier Flo Nord	600	WNW	Maquis arbustif dense	Lisière de l'usine	-22.33080; 166.90718		
PS 12	Piste décanteur Ck Baie Nord	500	W	Maquis para-forestier	Lisière de l'usine	-22.33212; 166.90752		
PS 13	Drain Périnéérique PE	700	NNW	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	-22.32802; 166.91013		
PS 14	Forêt McCoy	800	NNE	Forêt Humide	Lisière du creek	-22.32683; 166.91443		
PS 24	Dolène aval Usine pilote	650	WSW	Maquis arbustif dense	lisière du piste	-22.33618; 166.90590		
PS 1	Plantation parabolique	1050	S	Maquis ligno-herbacé dense	Ouvert	-22.34313; 166.91316	Moyenne	Station à risque modéré susceptible de montrer une teneur moyenne en SO ₂ pouvant engendrer des dommages légers sur les espèces sensibles
PS 15	Ligne haute tension PE Forêt McCoy	1000	NNW	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	-22.32513; 166.91046		
PS 17	Piste émissaire STEP Doline	1200	NW	Maquis arbustif dense	Lisière du piste	-22.32781; 166.90207		
PS 18	Piste émissaire STEP CDE	1150	NW	Maquis arbustif dense	Lisière du piste	-22.32894; 166.90189		
PS 19	Forêt Nord Piste forestière	1350	NNE	Forêt Humide	Lisière du piste	-22.32197; 166.91457		
PS 20	Forêt Nord Reserve	1350	NNE	Forêt Humide	Fermée	-22.32261; 166.91649		
PS 21	Col Paillard	1050	E	Maquis ligno-herbacé dense	Lisière du piste	-22.33272; 166.92174		
PS 29	Foret Nord AQMS	1900	NNE	Maquis ligno-herbacé dense	Ouvert	-22.31736; 166.91608		
PS 16	Base vie AQMS	2300	NNW	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	-22.31474; 166.90286	Loin	Faible risque et pouvant montrer une teneur moyenne en SO ₂ n'engendrant aucun dommage sur la végétation
PS 2	Port	2700	SSE	Maquis ligno-herbacé sur gabbro	Ouvert	-22.34851; 166.89102		
PS 23	Route de Ferry	2750	WNW	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	-22.32525; 166.88657		
PS 22	Paillard Entrée Camping Attiti	3050	ESE	Maquis arbustif dense	Ouvert	-22.34044; 166.94058		
PS 25	Pic du Grand Kaoni	5800	NNW	Maquis arbustif dense	Ouvert	-22.28448; 166.89494		
PS 26	Pépinière	6500	N	Maquis ligno-herbacé dense	Ouvert	-22.27429; 166.91238		
PS 28	Mine Prony	17000	WNW	Maquis arbustif ouvert	Ouvert	-22.29833; 166.80188		
PS 27	Madeleine	20000	NNW	Maquis ligno-herbacé dense	Ouvert	-22.21230; 166.84280		

III.1.2. METHODES DE SUIVI

Le suivi au sein des stations d'observations a été prévu pour comprendre

1. Un suivi mensuel de la qualité de l'air par échantillonnage passif
2. Un suivi mensuel des symptômes foliaires
3. Des analyses chimiques foliaires trimestrielles (S, N)

1. Suivi mensuel de la qualité de l'air par échantillonnage passif

Des échantillonneurs passifs ont été installés au niveau des 29 stations d'observation afin de mesurer les concentrations mensuelles en SO₂ et NO₂ de l'air et évaluer l'étendue géographique des retombées atmosphériques des installations industrielles sur l'environnement. Ces gaz ont été ciblés car l'azote et le soufre se sont révélés comme les éléments à concentrations les plus variables dans l'environnement lors des travaux d'investigations. Les échantillonneurs ont été positionnés à une hauteur voisine de 2 mètres du sol sur des supports présents dans l'environnement: arbre ou poteau de clôture. A noter que les échantillonneurs des points PS 7, PS 8, PS 14, PS 19 et PS 20 ont été positionnés à la cime d'arbre. La campagne de prélèvement est assurée par Bureau Veritas.

2. Suivi mensuel des symptômes foliaires

Un suivi mensuel des symptômes foliaires est assuré au niveau des formations végétales de 24 stations d'observation afin de détecter tout phénomène de dépérissement qui puisse être lié aux émissions atmosphériques de l'usine, déterminer son étendue géographique et de suivre son évolution dans le temps. Le présent protocole est axé sur des symptômes foliaires aigus validés comme étant dus à une exposition à des concentrations de dioxyde de soufre néfastes. Ce suivi concerne onze espèces considérées comme indicatrices car présentant des symptômes évidents en cas de forte exposition au dioxyde de soufre. Ces taxons indicateurs sont communs de manière régionale et sont donc plus facilement observables et l'échantillonnage sur les sites à moins d'incidence, s'agissant de : *Alphitonia neocaledonica*, *Arillastrum gummiferum*, *Codia spatulata*, *Garcinia sp.*, *Guioa glauca*, *Gymnostoma deplancheanum*, *Lomandra insularis*, *Machaerina deplanchei*, *Montrouziera sphaeroidea*, *Styphelia cymbulae/veillonii*, *Tristaniopsis guillainii*. Un guide des symptômes foliaires élaboré pour ces onze espèces indicatrices par le Pr Murray (Murray, 2012) sert de référence pour le relevé des symptômes sur le terrain (il décrit notamment les chloroses marginales ou inter-vénales, les brûlures ou nécroses foliaires, les pertes prématurées de feuilles, la déformation des parties foliaires ou encore les rejets sur vieux bois). Le choix des espèces suivies par station s'est basé sur leur abondance relative sur chaque station, celle-ci variant néanmoins selon les stations. Ainsi, 1 à 9 espèces sont suivies par station d'observation. Le suivi symptomatologique intègre une évaluation visuelle qualitative des symptômes (chlorose, nécrose, déformation) et une évaluation quantitative (symptôme présent sur un individu, symptôme généralisé à l'ensemble des individus). Pour chaque station, les observations qualitatives relevées pour les espèces indicatrices sélectionnées sont résumées dans le Tableau 3.

En complément, des photographies mensuelles des symptômes sont réalisées sur trois à six espèces du guide pour chaque station. Les branches photographiées sont balisées afin de suivre l'évolution des symptômes foliaires par espèce et par localité.

Tableau 3 : Observations qualitatives relevées sur le terrain pour les onze espèces indicatrices.

Type de symptôme	Etendu du ou des symptômes	Stade de croissance des feuilles atteintes
<ul style="list-style-type: none"> o Chlorose o Nécrose o Déformation 	<ul style="list-style-type: none"> o Pas de symptôme SO₂ notable o Présent de façon significative sur un individu o Présent sur tous les individus de l'espèce 	<ul style="list-style-type: none"> o Jeunes feuilles atteintes o Vieilles feuilles atteintes o Jeunes et vieilles feuilles atteintes o Pas de distinction possible

3. Echantillonnage trimestriel et analyses chimiques foliaires

Un échantillonnage de feuilles est également réalisé tous les trois mois pour 27 stations afin de suivre l'évolution des concentrations en éléments chimiques du feuillage des espèces reconnues sensibles aux émissions de SO₂ et ainsi mettre en évidence toute contamination chimique. Pour la même raison que présentée précédemment les éléments majeurs recherchés dans les analyses ont été le soufre et l'azote total. Pour chaque station, un échantillon foliaire de 50 g a été prélevé sur deux espèces sélectionnées dans le guide symptomatique. Pour un site donné, les deux espèces choisies restent les mêmes lors de chaque campagne d'échantillonnage, l'individu pouvant être différent. Pour les sites de suivi en forêt, les espèces sélectionnées sont celles accessibles, au feuillage abondant et bien représentées. Les feuilles échantillonnées doivent provenir de différents stades de croissance sur la plante de manière à éviter les risques de surreprésentation d'une catégorie (sénescence, jeune...). Les échantillons ont été mis sous poches plastiques, puis conservés en chambre froide moins de 10 jours avant d'être transportés à l'IRD pour analyse.

III.2. SUIVI DE FÉVRIER 2012 À MARS 2013

Il s'agit du premier rapport de suivi symptomatologique. Celui-ci s'est basé sur les protocoles présentés précédemment. Les résultats complets sont présentés dans le document « Surveillance symptomatologique 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 » (VALE NC, 2013).

III.2.1. PRINCIPAUX RESULTATS

- Les résultats confirment que les stations ayant relevé les teneurs moyennes annuelles les plus élevées en SO₂ et NO₂ sont proches de l'usine et sous l'influence des vents dominants. A l'inverse, les stations hors des zones d'influence des vents dominants ne semblent avoir présenté aucun symptôme.
- Les relevés indiquent que des symptômes ont pu être identifiés jusqu'à une distance de 2 750 m à l'ouest de la zone industrielle, avec une prépondérance d'espèces indicatrices touchées entre 200 et 800 m, dans le secteur correspondant à la zone de dépérissement des chênes gommés du creek baie Nord, observée en 2010.
- Les résultats issus du suivi des symptômes foliaires ont mis en évidence que neuf espèces indicatrices sur les onze suivies ont présenté des symptômes et que le nombre d'espèces indicatrices avec symptômes diminue avec la distance à l'usine.
- Il est rapporté que 2 stations de suivi de la qualité de l'air proches de l'usine ont présenté des concentrations moyennes annuelles en SO₂ de 22,8 µg.m⁻³ et 21,4 µg.m⁻³, soit des valeurs supérieures à la valeur moyenne annuelle pour la protection des végétaux et des écosystèmes (20 µg.m⁻³), s'agissant de stations situées en périphérie ouest de l'usine. Les concentrations en NO₂ relevés dans l'atmosphère sont quand à elles toujours restées bien en deçà de la valeur limite pour la

protection de la végétation et de l'environnement qui est de $30\mu\text{g.m}^{-3}$ (la moyenne la plus élevée ayant été de $9,1\mu\text{g.m}^{-3}$).

- Les stations avec symptômes ont été soumises à des fluctuations importantes de la teneur mensuelle en SO_2 de l'air. Les teneurs mensuelles en NO_2 relevées au niveau des stations avec symptômes sont, quant à elles, apparues très faibles et ont peu varié entre février 2012 et mars 2013. Il est suggéré ainsi que l'exposition au SO_2 atmosphérique est à l'origine de l'apparition des symptômes observés sur la végétation et que le NO_2 n'est pas le facteur premier à l'origine du dépérissement.
- Les résultats des analyses chimiques foliaires ont mis en évidence plusieurs tendances avec notamment une teneur en soufre foliaire plus élevée pour les stations avec symptômes (ie celles situées dans la zone à chêne gomme) que pour les stations sans symptômes. Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre la teneur moyenne en azote foliaire des stations avec symptômes et celle des stations sans symptômes.
- *Lomandra insularis*, *Arillastrum gummiferum*, *Codia spatulata* et *Styphelia cymbulae/veillonii* semblent présenter une sensibilité plus importante au SO_2 atmosphérique avec des symptômes bien remarquables pour *Codia spatulata* et *Styphelia cymbulae/veillonii*. Ces deux dernières espèces ont présenté des teneurs en soufre foliaire sur les stations avec symptômes supérieures aux teneurs relevées sur les stations sans symptômes. Il est ici conclu que ces résultats confirment que les symptômes relevés sur les espèces indicatrices sont liés à une exposition aigue au SO_2 atmosphérique.
- Il est rapporté que des jeunes feuilles ont semblé présenter une sensibilité plus marquée au SO_2 atmosphérique. Des symptômes de nécroses sont apparus occasionnellement sur les jeunes feuilles des espèces suivies alors que les vieilles feuilles ne présentaient parfois aucun symptôme. Les symptômes de nécrose observés sur les jeunes feuilles de *Codia spatulata* et *Styphelia cymbulae/veillonii* ayant parfois aboutit à une nécrose complète des jeunes feuilles. Néanmoins, certaines espèces suivies présentant des symptômes sur leurs vieilles feuilles ont produit ponctuellement de nouvelles feuilles saines indemnes de symptômes.

Notes sur la définition d'une station avec symptômes

Il a ici été considéré qu'une « station avec symptômes » est une station ayant présenté au moins deux espèces avec des symptômes généralisés (chlorose, nécrose ou déformation) sur l'ensemble de leurs individus au cours du suivi réalisé entre février 2012 et mars 2013. Le seuil de deux espèces a été pris en compte afin de limiter la prise en compte de stations qui présenteraient des symptômes non attribuables à une pollution atmosphérique.

III.2.2. LIMITES ET PERSPECTIVES PROPOSEES

Lors de cette étude, plusieurs limites au protocole de suivi mensuel des symptômes foliaires ont été mis en évidence, s'agissant de :

- l'approche utilisée, centrée sur quelques espèces indicatrices sélectionnées mais qui ne prend pas en compte l'état de santé global de la station. Il est ainsi proposé de rajouter une note descriptive de l'état de santé global de la station lors des prochains suivis.
- Le nombre d'espèces observé par station varie. De même que les espèces observées entre les différentes stations ne sont pas toujours les mêmes. Cela rend

difficile la comparaison de données car il est expliqué que chez certaines espèces la présence de symptômes pourraient n'être due qu'à des facteurs d'origines naturelles. Aussi, sans données standardisées, il apparaît difficile d'avoir une évaluation plus précise du dépérissement, et la possibilité de sous-estimer ou surestimer l'importance du dépérissement existe. Il est ainsi proposé de définir un nombre fixe d'espèces suivies par station. Le nombre proposé ici est de 3 espèces en se concentrant sur les espèces apparaissant comme les plus sensibles.

- De même le nombre d'individu par espèce suivi varie entre les différentes stations. Il est alors proposé de standardiser le nombre d'individus suivis par espèces. A l'heure de cette proposition, aucun chiffre n'est avancé.
- Des difficultés dans l'évaluation des symptômes pour certaines espèces (notamment à cause du feuillage particulier de ces espèces) pour *Gymnostanoma deplancheanum*, *Guioa glauca*, et *Machaerina deplanchei*. Il est proposé que ces espèces ne soient plus suivies mensuellement.
- Une réduction du nombre de station suivies afin d'optimiser le temps de travail. 7 stations sont proposées pour être supprimées du suivi.
- Il est proposé d'établir 2 protocoles complémentaires au protocole de suivi existant
 - o Un protocole adapté au suivi des stations forestières. Cela concerne deux stations pour lesquelles les techniques d'observations initialement prévues ne conviennent pas. Cela du au fait que les observations dans la canopée des stations concernées sont difficiles. Les investigations terrain initiées en 2011 dans la zone de dépérissement des chênes gommés ont montré que les premiers signes du dépérissement de la strate forestière supérieure due à la pollution atmosphérique seraient une abscission des feuilles causant une défoliation partielle des espèces sensibles et augmentant ainsi l'intensité de la lumière dans la forêt. Dès lors, il est proposé que la mesure de l'intensité lumineuse au sein des formations forestières pourrait être prise en compte dans le suivi afin de prévenir d'un changement écologique de manière simple et précoce. En complément, un suivi des symptômes foliaires pourrait être mis en œuvre sur les espèces du sous-bois. Les stations sélectionnées pour ce suivi des milieux forestier sont les stations PS 08, 14 et 20. Une nouvelle station d'observation sera rajoutée dans la zone de dépérissement des chênes gommés afin de mieux caractériser évaluer l'évolution du dépérissement au niveau de cette formation forestière.
 - o Un protocole complémentaire sera mis en œuvre pour six des stations ayant présenté des symptômes entre février 2012 et mars 2013 afin de mieux caractériser l'évolution du dépérissement au niveau de chacune de ces stations. Ce protocole consistera à suivre le degré de sévérité des symptômes chez une espèce indicatrice dominante ou co-dominante par station tous les trois mois. Deux transects de 20 m seront mis en place par station avec un transect en lisière et un transect à l'intérieur de la formation végétale. Six stations ont été sélectionnées pour ce protocole complémentaire : Trois stations, PS 05, 11 et 12 ont été sélectionnées en lisière de la zone de dépérissement des chênes gommés, une station PS 18 au niveau du groupe 2, ainsi que PS 13 et 23. Les espèces indicatrices suivies par station sont présentées ci-dessous :

Station	Lisière	Intérieur
5	<i>Styphelia pancheri</i>	<i>Styphelia pancheri</i>
11	<i>Codia spatulata</i>	<i>Codia spatulata</i>
12	<i>Styphelia pancheri</i>	<i>Styphelia pancheri</i>
13	<i>Tristaniopsis guillainii</i>	<i>Tristaniopsis guillainii</i>
18	<i>Codia discolor</i>	<i>Codia discolor</i>
23	<i>Tristaniopsis guillainii</i>	x

Le degré de sévérité des symptômes sera relevé sur quinze individus identifiés par transect. Cinq classes de degré de sévérité des symptômes seront prises en compte pour chaque espèce. Cinq individus présentant les différentes classes de symptômes seront photographiés par transect. Les mêmes individus seront photographiés tous les trois mois. Les classes de symptômes sont présentées ci-dessous :

Degrés de sévérité des symptômes	
A	Rien
B	Léger
C	Sévère
D	Très sévère
E	Mort

III.3. RAPPORT SORECO 2013 - ANALYSE CRITIQUE DU PROTOCOLES DE SUIVI SYMPTOMATOLOGIQUE FOLIAIRE EXISTANT

A la demande de l'OEIL le cabinet d'expertise SORECO a réalisé en mars 2013, une première analyse critique, de façon spécifique sur le protocole de suivi symptomatologique foliaire mis en place par VALE NC (SORECO, 2013). A cette occasion plusieurs remarques et propositions ont été faites afin de réduire le temps nécessaire pour réaliser le suivi tout en améliorant la robustesse de l'étude. L'ensemble des recommandations est présenté dans le document «Suivi des symptômes foliaires à proximité de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie » (SORECO, 2013).

- Le travail réalisé souligne fortement l'importance de standardiser les espèces, de même que le nombre d'espèces suivies entre les différentes stations. Il est en effet ici souligné que les emplacements des stations de suivi symptomatologique foliaire ont été calqués sur ceux des stations de mesures atmosphériques. De ce fait, le cortège d'espèces n'est pas similaire dans chaque station, allant d'une à neuf espèces suivies, rendant difficile la comparaison au sein d'une espèce et entre les stations.
- Il est aussi souligné que les différentes espèces suivies sur les stations ne font pas l'objet d'un marquage pour chaque individu, ce qui introduit un biais dans l'analyse des résultats, d'autant plus qu'aucun nombre d'individus n'est défini pour chaque parcelle. Il est aussi important de noter des difficultés opérationnelles tel que la hauteur de la canopée et le biais inter-opérateur sur l'analyse des symptômes.
- Il est également souligné l'importance de standardiser le nombre de stations de suivi en fonction du type d'habitat. En effet, le nombre de stations par habitat est très différent entre les classes de station (à haut risque, risque modéré et faible risque) allant d'une forte proportion de forêt dans les zones à haut risque à une prédominance des maquis dans les zones à faible risque. Il est rappelé que pour avoir la possibilité de faire des comparaisons entre les parcelles et les classes de

parcelles, il sera nécessaire de suivre le même nombre d'individus par espèces, le même nombre d'espèces et prendre en compte, la même proportion de formations naturelles suivies (forêt-maquis).

- Il est souligné l'importance de réfléchir à l'amélioration des outils de quantification des symptômes par individu existants pour être capable de suivre son évolution dans le temps. Pour ce faire, il est proposée qu'une observation de la quantité totale de feuilles affectées est possible en définissant plusieurs classes (Pas d'impact : 0 % ; impact faible : 1-25 % ; impact moyen : 25-50 % ; impact fort : 50-75 % ; impact extrême : >75 %).
- Il est proposé que les suivis ne soient plus réalisés tous les mois, mais tous les 3 mois.
- Enfin, il est suggéré d'étendre le suivi à d'autres espèces.

III.4. SUIVI DE JANVIER 2014 À DECEMBRE 2014

Il s'agit du second rapport de suivi symptomatologique. Les résultats complets sont présentés dans le document « Surveillance symptomatologique 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 » (VALE NC, 2015).

III.4.1. MODIFICATIONS APPORTEES PAR RAPPORT A L'ANCIEN PROTOCOLE

A noter qu'une modification du protocole a été ici apportée en cohérence avec les propositions faites à l'issue du premier suivi. Le suivi mensuel des symptômes foliaires n'est plus assuré que sur 19 stations au lieu des 24 suivies initialement, et seules 9 espèces sont encore suivies. Le protocole de suivi complémentaire trimestriel des symptômes foliaires a été ajouté. Egalement l'échantillonnage foliaire n'est plus réalisé que sur 21 stations.

III.4.2. PRINCIPAUX RESULTATS

- Les suivis réalisés en 2014 montrent que la zone impactée reste localisée au secteur identifié en 2012. Cette zone se situe entre 200 et 2 750 m à l'ouest de la source de SO₂ sous l'influence des vents dominants, s'agissant de la formation à chênes gommés.
- Huit espèces sur les neuf espèces indicatrices suivies sur l'ensemble des stations ont présenté des symptômes avec une prépondérance d'espèces indicatrices touchées entre 200 et 1200 m par rapport à la source de SO₂.
- Aucun cas de mortalité n'a été relevé durant la période de surveillance.
- Malgré l'apparition de nouveaux symptômes en 2014, il n'a pas été observé de dégradation de l'état de santé des individus suivis. La majorité des individus suivis ont produit un nouveau feuillage en bonne santé et/ou pu assurer leur floraison et fructification.
- Globalement, les résultats des suivis par transects réalisés depuis 2013 montrent une légère augmentation du nombre d'individus présentant des symptômes et du degré de sévérité des symptômes entre octobre 2013 et octobre 2014. Le phénomène semble par la suite se stabiliser voire s'améliorer entre octobre 2014 et janvier 2015 avec un nombre d'individus présentant des symptômes qui se stabilise et une reprise de la végétation se traduisant par une diminution du degré de sévérité des symptômes. Le phénomène est apparu plus marqué pour les stations localisées entre 200 et 1200 m qui ont présentées sur une faible proportion d'individus des

symptômes de type «Fort». Le phénomène est resté stable au niveau de la station la plus éloignée localisée à 2 750 m depuis le début des suivis en 2013.

III.4.3. LIMITES ET PERSPECTIVES PROPOSEES

Suite aux suivis réalisés sur la période 2012-2014, et les résultats apportés, il a été proposé de concentrer le suivi symptomatologique sur la zone impactée, localisée entre 200 et 1 200 m à l'ouest de l'usine, c'est à dire dans la formation à chênes gommés. Un nouveau protocole semble être à cette date en cours de rédaction. L'objectif est de permettre une meilleure cartographie de la distribution du degré de sévérité des symptômes dans la formation à chênes gommés, et de mieux préciser leur évolution dans le temps.

- il est ainsi proposé qu'un suivi trimestriel soit réalisé sur un maillage de sites localisés au sein de cette formation. Ce maillage proposé intègre les données issues des résultats d'analyses de données satellitaires ayant identifiées cette zone comme d'intérêt prioritaire (cf. VI.1.1)
- La fréquence du suivi proposée sera trimestrielle et le nombre de station sera redéfini de manière à pouvoir assurer une surveillance sur 4 jours maximum.
- Le suivi sera resserré avec un nombre plus important de sites suivis en lisière car facilitant les relevés.
- Le suivi portera sur un nombre d'espèces indicatrices plus restreints, et dont les symptômes sont connus. Le nombre de 6 espèces par station est ici avancé.
- L'évaluation de l'impact portera sur 3 niveaux :
 - o Evaluation du degré d'impact au niveau de la station d'observation selon une évaluation quantitative exprimant le pourcentage d'espèce impacté (ex : 2 espèces indicatrices impactées sur 6 suivies).
 - o L'évaluation de l'état de santé des espèces selon une méthode quantitative correspondant au pourcentage d'individus impactés par espèces (ex : 2 individus impactés sur les 5 individus suivis pour une même espèce).
 - o L'évaluation du degré d'impact sur les individus selon une méthode semi-quantitative consistant à évaluer le degré de sévérité des symptômes sur les individus suivis selon des classes prédéfinies. (ex : 3 individus présentent des symptômes de classe X).

Il est proposé de poursuivre le suivi des symptômes foliaires sur les 19 stations utilisées dans l'étude de 2014 de façon annuelle. Cela pour détecter une éventuelle apparition de symptômes foliaires sur de nouvelles localités. Des analyses chimiques foliaires seraient également maintenues sur ces stations une fois par an.

III.5. SUIVI DE JANVIER 2015 À DECEMBRE 2015

Il s'agit du troisième rapport de suivi symptomatologique. Les résultats complets sont présentés dans le document « Surveillance symptomatologique de la flore endémique sur 27 stations d'observation situées aux alentours de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie : Bilan de Janvier 2015 à Décembre 2015 » (VALE NC, 2016). Le protocole est resté similaire à celui développé dans le second rapport faisant état du bilan de janvier 2014 à décembre 2014, malgré les recommandations qui avaient été faites en fin de ce dernier.

III.5.1. PRINCIPAUX RESULTATS

- Les suivis réalisés en 2015 montrent que les symptômes d'exposition aigüe au SO₂ continuent à apparaître au niveau de la formation à chênes gommés.

- Sept espèces indicatrices sur les neuf utilisées ont présentées des symptômes apparus courant 2015, avec une prépondérance d'individus dans la formation à chênes gommés.
- La station la plus éloignée du site industrielle n'a présenté que des symptômes de chlorose.
- Il est cependant constaté que les individus impactés semblent montrer une bonne reprise par la production régulière d'un nouveau feuillage en bonne santé.
- Aucun cas de mortalité n'a été observé pendant la période de surveillance.
- Il est rapporté que, globalement, les résultats de suivi par transect réalisés depuis 2013 montrent une légère augmentation du nombre d'individus présentant des symptômes et du degré de sévérité des symptômes.
- Il est rapporté que les résultats des analyses chimiques foliaires en soufre montrent une légère augmentation des teneurs moyennes en soufre des espèces indicatrices au niveau des sites avec symptômes depuis 2012. Spécifiquement, ce résultat est comparé aux résultats obtenus dans le cadre des essais de fumigation (cf. V). Il est ainsi expliqué que « Les teneurs en soufre foliaire restent toutefois relativement basses si l'on compare les résultats obtenus dans le cadre du suivi symptomatologique avec ceux obtenus lors de l'étude de fumigation pour *Alphitonia neocaledonica*. En effet, la concentration moyenne maximale en soufre foliaire enregistrée pour *Alphitonia neocaledonica* lors du suivi symptomatologique atteint 1642 mg.kg^{-1} contre 3049 mg.kg^{-1} enregistrée lors de l'étude fumigation sous un régime d'exposition en SO_2 maximal de 1482 ppb ($3882 \mu\text{g.m}^{-3}$) pendant 2 heures, 4 jours par semaine pendant 80 jours de fumigation. »
- Enfin, il est rapporté que le suivi par télédétection indique une forte progression de la végétation sur une grande partie des massifs forestiers depuis mai 2015.

III.5.2. LIMITES ET PERSPECTIVES PROPOSEES

Comme en fin du rapport de 2014, il est ici proposé la mise en place d'un nouveau protocole de suivi symptomatologique pour 2016. Il s'agit en fait de compléments apportés aux propositions déjà faites fin 2014.

- celui serait quadrimestriel sur un maillage de stations localisées au sein de la formation à chênes gommés, ainsi qu'en périphérie afin d'affiner l'évaluation spatio-temporelle du phénomène.
- Des paramètres de suivi supplémentaires ont été proposés pour être ajoutés au nouveau protocole de suivi tel 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 SO_2 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.

Il est proposé que le protocole de suivi engagé depuis 2012 sur lequel se base le rapport de 2015 sera maintenu selon une fréquence annuelle avec un maintien des analyses chimiques foliaires afin de valoriser les données obtenues depuis 2012 et maintenir une surveillance aux alentours du complexe industriel et ainsi assurer la détection précoce de nouveaux symptômes dans la zone d'influence potentielle des émissions issues de l'activité de l'usine.

III. 6. NOUVEAU PROTOCOLE - 2016

A partir des données obtenues dans le cadre du suivi symptomatologique (symptômes foliaires et qualité de l'air) depuis 2012, il a été proposé de recentrer le suivi sur la zone dite « impactée » de chênes gommés. Ce nouveau protocole fait suite aux perspectives proposées précédemment en fin des rapports de suivi de 2014 et 2015 (VALENC, 2014 ; 2015). Il est présenté dans le document intitulé « Protocole de suivi de la végétation – zone de dépérissement en aval de l'usine de VALE NC » (VALE NC, 2016). La volonté de réorienter le suivi sur cette zone se base sur le constat suivant : « 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 d'évaluer l'évolution des phénomènes de dépérissement au sein de la zone impactée. Les résultats de ces suivis 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 de trois ans. Les tubes passifs des stations utilisés pour le suivi de qualité atmosphérique, et localisés 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 a conduit à la proposition de mise en place d'un nouveau dispositif d'évaluation afin de quantifier plus précisément l'évolution des phénomènes dans la zone impactée ». (VALE NC, 2016).

L'objectif de ce nouveau protocole de 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 impactée » dans le temps par une qualification et quantification du degré de sévérité des symptômes sur des espèces indicatrices. L'évaluation proposée 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 ».

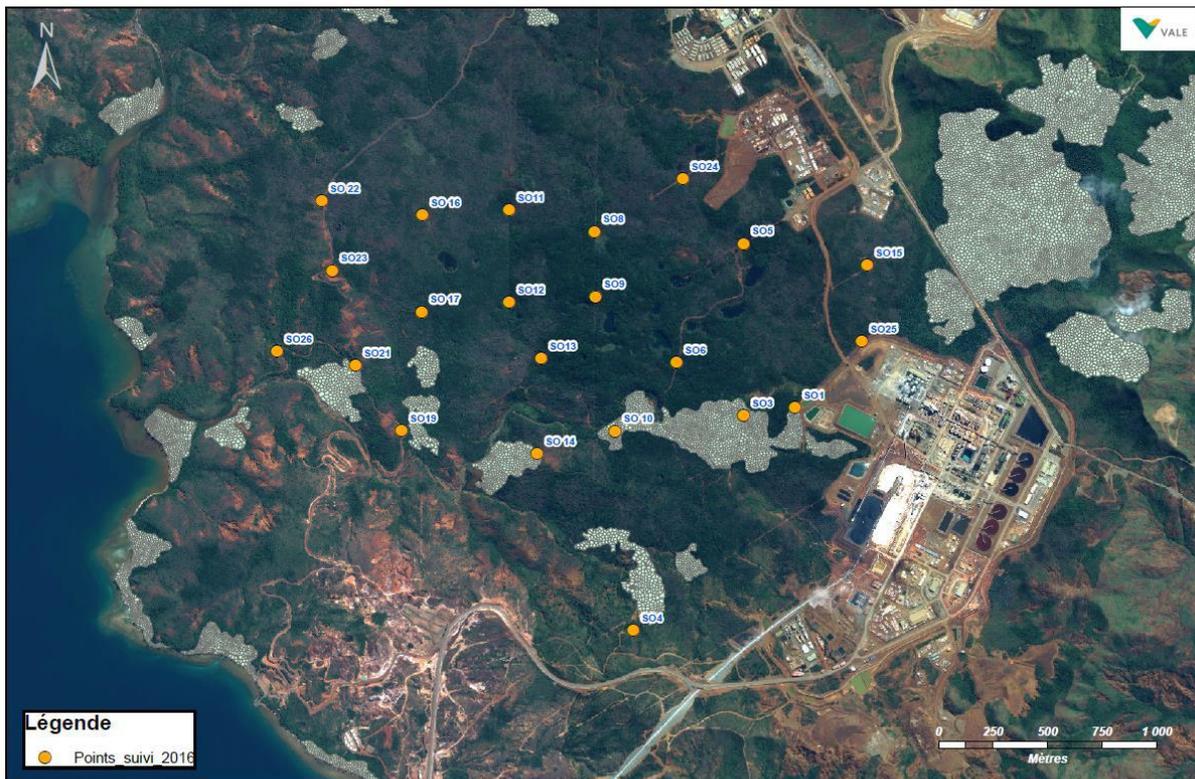
III.6.1. DEFINITION DE NOUVELLES STATIONS DE SUIVI

25 stations localisées au sein et en périphérie de la zone d'impact, espacées sur une maille de 200 m, établies en novembre 2015 sont ainsi proposées (Fig. 7, Fig. 8). Les 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 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 Kué 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, PS 18 et PS 23 de l'ancien protocole de suivi symptomatologique. 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 » (cf.VI). Une description des habitats de chaque station est donnée dans le document (VALE NC, 2016).

III.6.2. CRITERES DE SELECTION DES STATIONS

- 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 (cf. VI).
- 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 zones 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.
- 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.
- 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.
- Les stations ont été sélectionnées si un minimum de 4 individus appartenant à 3 espèces indicatrices se trouvaient dans un rayon de 10 m.
- 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.
- 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.



Suivi symptomatologique semestriel 2016

Figure 8. 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) (cf. VI) (source VALE NC, 2016).

III.6.3. METHODES DE SUIVI

1. Fréquence et durée du suivi

Sur la base des résultats obtenus à partir des anciens rapports, il est proposé de mettre en place un suivi symptomatologique quadrimestrielle pour les mois d'avril, d'aout et de décembre. 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 durée impartie pour la réalisation du suivi des 25 stations a été estimée à 5 jours (sans intempérie).

2. Paramètres de suivi

Les paramètres évalués par station sont :

- La météo
- Les odeurs des émissions atmosphériques soufrées (SO₂, H₂S)
- Les teneurs ponctuelles en SO₂ ambiant avec un détecteur portatif (Polytron précision 2ppb)
- L'orientation du vent
- La présence d'espèces exogènes végétales ou animales
- La présence de la rouille des myrtacées et espèces impactées

- L'observation de coupes de bois
- La présence de cendres et/ou de poussières (Indice)
- La qualité de la station (indice)
- La reprise de la végétation (indice)
- L'évaluation de l'état de santé des lichens terrestres (dénombrement et photographie)
- La phénologie (floraison et fructification des espèces communes)
- L'état phytosanitaire (indice)
- Les symptômes foliaires (indice et photographie)
- La teneur mensuelle en SO₂ atmosphérique par tubes passifs.
- L'analyse chimique des sols
- L'analyse chimique en soufre foliaire

Sur l'indice de qualité de la station :

Il est proposé qu'un indice permettant d'évaluer la qualité du milieu soit 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.

Sur l'indice de reprise de la végétation :

Il est proposé 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 : 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.

Sur l'indice de présence de poussières et/ou de cendres :

Il est proposé un indice permettant d'évaluer la présence et l'abondance de poussières ou de cendres sur la végétation est attribuée 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.

Sur l'évaluation de l'état de santé des lichens terrestres :

Il est proposé d'utiliser les lichens terrestres comme bioindicateur car utilisés 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. Aucunes 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 porte 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.

Sur la phénologie :

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

Sur l'état phytosanitaire :

Il est proposé une évaluation de l'état phytosanitaire, réalisée pour chaque espèce indicatrice suivie par station avec le relevé de la présence de champignons, d'insectes, carences, sécheresse, brûlures... 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, sécheresse, brûlures...) sont relevés sur une faible surface foliaire sur une partie des individus suivis pour chaque espèce.

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

Sur le suivi des symptômes foliaires :

Il est proposé un suivi quadrimestriel des symptômes foliaires, assuré sur les 25 stations d'observation et qui concerne neuf espèces indicatrices présentant des symptômes évidents en cas de forte exposition au dioxyde de soufre (Tableau 4). 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 symptomatologique 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 symptomatologique 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.
- Leger : 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 localisée 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.

Tableau 4. Espèces prévues pour être suivies par station (source VALE NC, 2016).

3 espèces suivies par station et 4 individus par espèce											
Nom station	<i>Arillostrum gum miferum</i>	<i>Styphelia cymbulæ</i>	<i>Gymnostoma deplancheanum</i>	<i>Codia spathulata</i>	<i>Tristanlopsis 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

- Moyen : Symptômes détectables 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 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 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 localisée sur l'individu (une branche). Mais l'état de santé global de l'individu ne semble pas impacté malgré la présence de symptôme.
- Sévère : Symptômes évidents 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.

Sur les prélèvements 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.

Sur les analyses chimiques des sols : S, pH et conductivité

Il est proposé de réaliser des prélèvements de sols sur l'ensemble des 25 stations situées 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.

Sur les 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. 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, chloroses, 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.

Sur le suivi de la concentration mensuelle en SO₂ de l'air

10 tubes passifs seront installés au niveau de la zone d'étude afin de mesurer la concentration moyenne mensuelle en SO₂ de l'air. Cinq tubes passifs seront 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 seront 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.

Sur le suivi photographique des milieux dans la zone impactée

A noter qu'il ne s'agit pas ici d'une mesure par station mais globale. Quatre photographies de la zone impactée sont prises sur des points hauts au même emplacement à chaque suivi quadrimestriel. 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.

III.6.4. PRESENTATION DES AVANTAGES PAR RAPPORT A L'ANCIEN PROTOCOLE

En conclusion de ce protocole, il est présenté les avantages suivants de ce nouveau protocole par rapports aux anciens :

- 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 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
- Une fréquence quadrimestrielle plus adaptée (selon le 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.

CRITIQUES ET PROPOSITIONS D'AMÉLIORATION

Une première critique qui peut être faite par rapport aux suivis symptomatologiques mis en place depuis 2011 (foliaire et de qualité de l'air) concerne les multiples évolutions des protocoles, dues aux corrections qui ont été apportées à différents moments afin d'améliorer l'efficacité générale du suivi. Malgré le fait que ces évolutions et corrections témoignent d'une volonté de développer des outils de suivi performants, elles rendent néanmoins difficiles un travail de suivi comparatif sur le long terme (notamment entre années) du fait de l'hétérogénéité des méthodes mises en œuvre. D'autre part, l'analyse comparative des résultats de suivi des symptômes foliaires est elle aussi rendue difficile par le fait que les protocoles de suivi déployés ont mis en œuvre des stations de suivi présentant des cortèges floristiques différents, au sein desquelles les espèces suivies, de même que le nombre d'espèces, ainsi que le nombre d'individu suivi par espèce, ont pu différer. Cela semble expliqué dans les documents analysés par le fait que le choix des stations de suivi de symptômes foliaires se soit calqué sur ceux des stations de suivi de la qualité atmosphérique. La principale conséquence est de rendre très difficile la comparaison des résultats relevés, notamment car des variations peuvent exister entre espèces (variabilité du à l'espèce), peuvent aussi être dues aux caractéristiques de l'association végétale environnante, ou encore de l'âge des individus. Aussi, selon les rapports de suivi produits, majoritairement de façon annuelle, les résultats apparaissent finalement critiquables du point de vue de leurs interprétations. De même que l'ensemble des résultats rapportés dans les différents rapports ne semblent pas avoir fait l'objet d'analyses statistiques, essentielles pour incriminer ou discriminer des effets potentiels de facteurs de dépérissements. Sans analyses statistiques corrélatives, les conclusions qui ont pu être faites nécessitent alors d'être appréciées avec une certaine réserve. A noter que l'ensemble des remarques qui viennent d'être faites ne concerne pas la véracité des conclusions présentées, mais bien de leur capacité à être définitives et non plus soumises à discussion. En conséquence la principale proposition d'amélioration concerne la mise en place d'un protocole de suivi relativement « stable » dans le temps (au moins sur 3 années, plus si possible), afin de mieux appréhender le suivi du phénomène de dépérissement sur le long terme. Egalement, grâce aux retours d'expériences acquis par les suivis réalisés depuis 2011, il est possible de faire plusieurs suggestions qui permettraient notamment de réduire le temps nécessaire pour réaliser le suivi tout en améliorant la robustesse de l'étude. A noter que la mise en place d'un protocole standardisé sur plusieurs années permettrait également des relevés « routiniers » plus commodes pour les équipes de suivi, qui pourraient alors développer une appréciation personnelle de l'évolution du phénomène, souvent pertinente et efficace lors de l'interprétation des résultats. Il est ainsi proposé de :

1. Repenser les parcelles de suivi et leur positionnement

Problème identifié précédemment, la mise en évidence du fait que les espèces suivies diffèrent entre les stations, de même que le nombre d'espèces ou d'individu suivis par espèces et par station. Aussi, le premier point de vigilance à mettre en place devrait être de sélectionner des stations maximisant les similitudes dans la composition floristique de celles-ci. Une fois les sites sélectionnés, il conviendrait alors de suivre les mêmes espèces et le même nombre d'espèces, ainsi que le même nombre d'individus par espèces (si possible en tenant compte de l'âge des individus – sans faire l'objet d'une attention particulière, cette information pourra être utilisée dans les analyses statistiques afin d'améliorer l'interprétation des résultats). Cinq individus pour cinq espèces identiques peuvent suffire (Le suivis de deux

espèces tel que mené actuellement pouvant apparaître insuffisant). A noter qu'à chaque relevé un état global de la station devrait également être relevé afin de prendre en compte tout changement potentiel d'ordre global de la station. **Il est important de souligner que le suivi des phénomènes de dépérissement doit avant toute chose se construire autour de stations présentant des composantes floristiques communes, et qui permettront des analyses comparatives. Cela est essentiel à l'interprétation des résultats d'investigations et de suivis. Aussi, c'est à partir de ce choix que doivent s'effectuer le choix de l'emplacement des autres suivis (qualité de l'air, suivi par télédétection, météo...).**

2. Réduire le nombre de stations de suivi

A noter que le nombre de stations suivies dans le protocole de 2016 est de 25. En tenant compte des facteurs d'influence (distance de l'usine, influence des vents dominants...), il est proposé de réduire ce nombre comme suit :

- Un total de neuf stations devrait être réparti par groupe de trois suivant un gradient de distance par rapport à l'usine et placé dans la zone impactée (trois stations proches de l'usine, trois stations moyennement éloignées, et trois stations pratiquement à la limite ouest de la zone impactée).
- Un autre groupe de trois stations devrait être situé derrière la limite ouest de la zone impactée afin de suivre l'évolution de l'étendue du phénomène.
- Trois autres stations devraient être placées dans les formations végétales situées à l'est de l'usine, hors de la zone d'influence des vents dominants, selon un gradient de distance au moins équivalent à celui mis en place dans la zone impactée. A noter que dans le protocole 2016, cette zone a été délaissée du suivi. Il est ici proposé de la réintégrer, au moins momentanément, compte tenu du fait qu'il est présenté dans les rapports d'investigations que les vents ont déjà été identifiés comme susceptibles de souffler vers l'est, et que des pics de SO₂ atmosphériques sur de courtes périodes pourraient suffire à engendrer des symptômes de dépérissement. Aussi, bien que moins à risques, cette zone devrait pour le moment toujours être considérée comme « présentant un risque ». Un suivi de ces stations sur plusieurs années (au moins 3) selon le protocole standardisé permettrait le cas échéant d'écarter définitivement ce risque, et ces stations de suivies pourraient alors être définitivement abandonnées.
- Trois stations de suivies sont proposées pour être situées au nord de l'usine, puisque toujours sous l'influence des vents.
- Enfin trois dernières stations sont proposées pour être situées hors zones d'influence de l'usine, et pour servir de témoin négatifs aux suivis. Les zones géographiques accueillant les témoins du protocole 2016 semblent toujours ici parfaitement convenir (s'agissant de zone située à plus de 5km du complexe industriel au niveau du Pic du Grand Kaori, de la plaine des lacs, ou de la Kue Nord).

Cette proposition de dispositif est illustrée succinctement dans un schéma présenté Fig. 9. A noter que conjointement avec la remarque précédente, il peut être envisagé de réduire le nombre de stations en augmentant alors la surface de celles-ci si cela peut permettre d'avoir une meilleure homogénéité de leur composition floristique et donc du suivi.

Par ailleurs et en comparaison au protocole de 2016, il est important que des suivis plus au cœur de la forêt puissent être réalisés. La facilité d'accès au site d'étude ne doit pas être un critère de choix du positionnement des stations, qui doit pouvoir être représentatif de la zone.

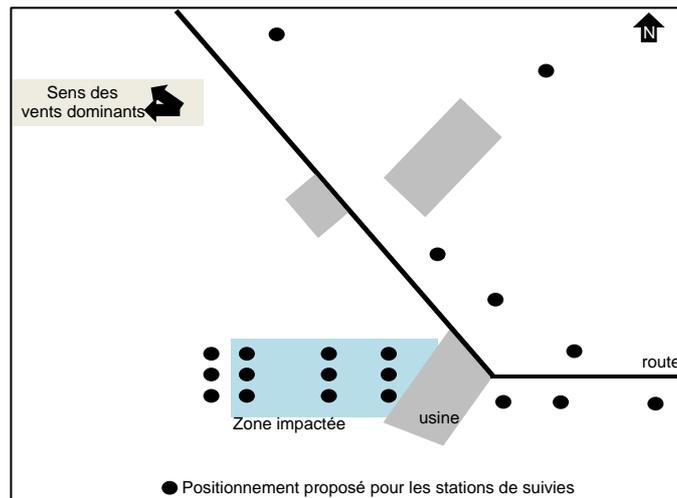


Figure 9. Schéma succinct du dispositif expérimental proposé pour le suivi symptomatologique foliaire et de qualité de l'air (L. Bordez).

3. Fréquence de suivi

Concernant la fréquence de suivi, celle proposée dans le dernier protocole (VALE NC, 2016) apparaît tout à fait pertinente et devrait être conservée. Pour rappel, il s'agit d'un suivi quadrimestriel pour les mois d'avril, aout, et décembre. Ces trois périodes correspondant aux saisons climatiques qui influencent les cycles de croissance des végétaux.

4. Paramètres suivis

a. Choix des espèces suivies

Sur le choix des espèces à suivre, il est tout à fait pertinent de continuer à suivre les espèces déjà listées comme indicatrices en sélectionnant les espèces identifiées comme les plus sensibles. Cela en tenant toujours compte des commodités de suivi (il peut ainsi être exclu les espèces dont le feuillage particulier rend le suivi peu évident, ex : *Gymnostoma deplancheanum*). A noter que pour faciliter le suivi, les individus devraient être impérativement marqués.

b. Sur le suivi des symptômes foliaires

Sur les outils de suivi des symptômes foliaires, il est proposé de mettre en place un outil semi-quantitatif, d'appréciation par classe. Ces outils faciliteront les analyses statistiques des résultats et par conséquent leurs interprétations. A noter qu'il devrait être possible de distinguer un suivi de l'évolution de l'état de santé global de l'individu d'un suivi de l'évolution des symptômes sur les feuilles des individus afin que la chute des feuilles les plus impactées n'entraînent pas une perte d'information. Ces deux données permettront de nuancer les appréciations des symptômes et donneront une bonne idée de la répartition des symptômes sur l'individu ainsi que de l'ampleur des symptômes sur les feuilles. Il est ainsi proposé pour les individus les classes suivantes :

- 0% individu sain
- 1-25%, individu impacté sur une légère partie de celui-ci
- 25-50% individu touché pratiquement dans sa moitié
- 50-75% individu touché sur plus de la moitié
- au delà de 75% , individu pratiquement touché dans son ensemble

pour les feuilles, les classes proposées peuvent largement être rapprochées de celles proposés dans le protocole de 2016 (cf. VALE NC, 2016).

- 0% pas d'impact

- 1-25% impact faible
- 25-50% impact moyen
- 50-75% impact fort
- au delà de 75% , impact extrême

A noter que pour faciliter les analyses, le suivi des symptômes foliaires devrait être réalisé par les mêmes personnes lors d'un même temps de suivi. Cela évitera les variations d'estimations entre observateurs. Si les observateurs devaient changer entre deux périodes de suivis, cela devrait alors être signalé et les résultats rapportés par les différents observateurs comparés statistiquement afin d'identifier un éventuel rapport d'estimation variant entre observateurs. Le cas échéant, les résultats pourraient alors être facilement pondérés, évitant alors toutes surestimations ou sous estimation des phénomènes de dépérissement. Il est recommandé pour chaque opérateur de s'exercer à "étalonner son appréciation visuelle". Cela peut être réalisée à partir du guide symptomatologique par test-correction. Enfin, il devrait être distingué dans ces relevés sans que cela fasse pour le moment l'objet d'une quantification précise, la présence de symptômes sur les jeunes feuilles des individus. Cette information renseignera quand à l'état de santé global de l'individu. L'observation de symptômes sur les jeunes feuilles pouvant alors orienter des investigations vers l'hypothèse d'une perturbation du métabolisme des végétaux concernés. A noter qu'un impact de ce type, sur de jeunes feuilles, a été décrit lors du suivi de l'année 2012 (VALE NC, 2013), mais plus décrit par la suite.

c. Sur le suivi météo

Proposition présentée dans le protocole de suivi de 2016, cette mesure très pertinente n'est pourtant pas détaillée. Aussi sans disposer de plus d'informations, il est conseillé d'intégrer le suivi de la luminosité, des précipitations, et de la température. Les précipitations renseigneront sur un possible effet de lessivages de dépôts de poussières foliaires (potentiellement chargées en SO₂), ou leur fixation sur les feuilles lors d'événements pluvieux. La température et la luminosité permettront de discriminer les effets naturels qui peuvent engendrer des symptômes foliaires de nécroses et chloroses (température, lumière...) des effets anthropiques (émissions de SO₂ industrielles) (Bordez, 2015). Egalement le suivi de la luminosité sous couvert végétal est d'autant plus important qu'il est signalé dans les rapports d'investigation de 2011 que les premiers signes du dépérissement de la strate végétale supérieure due à la pollution atmosphérique seraient une abscission des feuilles causant une défoliation partielle des espèces sensibles et augmentant ainsi l'intensité de la lumière au sein de la formation végétale.

d. Sur les analyses chimiques de sol et foliaires

Comme proposé dans le protocole de suivi de 2016, il est suggéré de maintenir des analyses chimiques des sols et des tissus foliaires selon la méthode initialement proposée (il est conseillé d'évaluer préférentiellement les teneurs en éléments extractibles pour les échantillons de sol). A noter cependant que si à chaque période de suivi, sont évalués les teneurs en soufre, ainsi que le pH et la conductivité pour les sols, il est suggéré d'étendre la liste des éléments recherchés au moins une fois par an, afin de ne pas passer à côté d'un éventuel stress causé par d'autres facteurs que le SO₂ ou renforcé par celui-ci (cf. II. critiques et propositions d'améliorations). A noter qu'il est important de veiller à ce que les analyses foliaires soient réalisées sur les mêmes individus à chaque période. Ceci afin d'éviter d'introduire un biais « individu » dans les analyses.

e. Sur le suivi des lichens

A noter qu'à la différence du protocole proposé par VALE NC en 2016, il est suggéré de ne pas réaliser le suivi des lichens dans le cadre du suivi symptomatologique mais d'y consacrer un temps de suivi à part. Cela afin d'alléger le suivi symptomatologique, et de ne focaliser le travail des opérateurs que sur une tâche thématique à la fois. D'autant plus que comme décrit dans le protocole de 2016, il est énoncé que

- l'évaluation visuelle des symptômes sur lichen est difficile car les parties actives et inactives sont difficilement distinguables et que la bibliographie rapporte que l'analyse de l'activité photosynthétique du lichen se fait normalement en laboratoire après prélèvement sur le terrain (non prévus ici)
- que peu de données existent en Nouvelle-Calédonie sur la sensibilité du lichen par rapport aux retombées atmosphériques.

Néanmoins, si un autre temps de recherche pouvait être consacré à ce travail, le suivi des lichens se révélerait sans doute très pertinent.

f. Les autres paramètres de suivis

Le protocole de suivi VALE NC de 2016 fait la proposition d'autres paramètres de suivis, qu'il est proposé de garder, ceux-ci apparaissent tout à fait pertinent tant du point de vue de leur suivi que de la méthodologie de leur mise en œuvre (cf. VALE NC, 2016), s'agissant :

- d'un indice de la qualité de la station
- d'un indice de reprise de la végétation
- d'un indice de présence de poussières et/ou de cendres
- d'un suivi phénologique des espèces suivies
- d'un indice de l'état phytosanitaire des espèces suivies
- d'analyses chimiques des sols (à noter qu'il est ici conseillé d'évaluer les éléments extractibles)
- d'analyses chimiques en soufre foliaire
- du suivi de la concentration mensuelle de l'air

A noter cependant, de façon spécifique sur les analyses chimiques de sols et foliaires, que les méthodologies actuellement mises en place ne permettront pas de comparaisons statistiques avec les stations témoins car soit sous échantillonnées (cas des analyses de sol, 1 seule station témoin échantillonnée ne permettra pas de faire de moyenne), ou soit parce que les stations témoins sont non échantillonnées (cas des analyses foliaires).

A noter que pour le suivi de la concentration mensuelle de l'air, il pourrait être pertinent de comparer les résultats fournis par les dispositifs de suivis installés à 2m du sol et ceux au niveau des cimes.

A noter également qu'à la différence du protocole proposé par VALE NC, en 2016, il est suggéré de veiller à transformer les indices proposés pour être qualitatifs, en classe semi-quantitative (en se basant sur les valeurs proposées pour le suivi foliaire par exemple) avec un nombre de classes identiques pour chaque indice. Cela permettra une intégration bien plus aisée de ces informations dans des analyses statistiques et donc leurs interprétations. Cela facilitera également le travail des opérateurs par une standardisation des méthodes. Il est suggéré un maximum de 5 classes par indices, de type : rien 0%, léger 1-25%, moyen 25-50%, fort 50-75%, sévère >75%.

Enfin, non évoqué dans le protocole, il est conseillé de standardiser le suivi par l'utilisation de fiche de renseignement standardisées à compléter par station et par espèce lors des relevés de terrain. Cela facilitera d'autant les relevés ainsi que leurs traitements informatiques, mais aussi leur archivage si nécessaire.

g. Sur l'analyse de la qualité des eaux

Comme évoqué au point I. critiques et proposition d'amélioration, les eaux (pluies, surface, souterraine) à travers leur composition chimique peuvent avoir des effets directs ou indirects sur l'apparition de symptômes. Non prévu dans le protocole 2016, il est ici à nouveau conseillé de mettre en place un dispositif de suivi de la composition chimique des eaux dans la zone, sans que celui-ci soit forcément présent sur chaque station.

5. Sur l'analyse statistique des résultats

Enfin, une attention particulière doit être portée à l'interprétation des résultats sur la base d'analyses statistiques, de comparaison de moyennes entre les différentes stations pour chaque variable suivie (symptômes foliaires, température, indice de reprise de la végétation...), et d'analyses corrélatives pour tester les liens entre les variables étudiées. L'utilisation d'outils statistiques permettra fortement de valider les conclusions qui découleront de l'analyse des données. A noter qu'il est conseillé de travailler sur les moyennes quadrimestrielles dans le cas de relevés mensuels (données météo par exemple) lors des analyses corrélatives avec une variable pour laquelle n'est réalisée qu'un suivi ponctuel tous les 4 mois (suivi foliaire par exemple).

En conclusion, le protocole proposé ici présente plusieurs avantages :

- il permet tout d'abord une bonne robustesse statistique
- il allège le dispositif de suivi actuel, facilitant le suivi, le raccourcissant d'autant ou favorisant le temps passé sur chaque station.
- Il permet le maintien du dispositif de suivi sur le long terme car capable d'évoluer selon les situations qui pourraient être rencontrées dans les années à venir, sans changer les méthodes de suivi ou les outils statistiques mis en œuvre. Ainsi les résultats resteront comparables sur le long terme. Seules les stations de suivis auraient alors
 - o à être supprimées (cas par exemple des stations des formations végétales de l'est de l'usine si tout risques venaient à être complètement écartés)
 - o à être ajoutées si nécessaire pour répondre à un besoin particulier (apparition ou renforcement des symptômes dans une zone...). A noter que dès à présent le nombre de stations de suivi proposé est inférieur au nombre de stations suivies actuellement (20 contre 25). Ce nombre laisse donc les moyens humains et matériels de rajouter si le besoin apparaissait, au moins 8 nouvelles stations dans des zones où il serait jugé intéressant de renforcer le suivi.

A nouveau, il est possible de rappeler qu'il existe une possibilité de réduction du nombre de stations en augmentant alors la surface de celles-ci si cela peut permettre d'avoir une meilleure homogénéité de leur composition floristique et donc du suivi.



IV. DEFINITION D'UN DOCUMENT GUIDE DE CARACTERISATION DES SYMPTOMES FOLIAIRES PAR ESPECE

Autre mesure proposée à l'issue des travaux d'investigations de 2011, la réalisation d'un guide de caractérisation des symptômes foliaires par espèce. Ce guide était pensé pour décrire les symptômes observés sur un certain nombre d'espèces clés sélectionnées et évaluer la sévérité des impacts observés. Cet outil devait par la suite être utilisé pour suivre les phénomènes sur le terrain et permettre de mieux cartographier les symptômes. Sur différentes stations un ensemble de symptômes devait être enregistré (dont les chloroses marginales ou inter-vénales, les brûlures ou nécroses foliaires, les pertes prématurées de feuilles, la déformation des parties foliaires ou encore les rejets sur vieux bois...) ainsi que le nom de l'espèce touchée.

CRITIQUES ET PROPOSITIONS D'AMÉLIORATION

Ce guide a bien été réalisé (Murray, 2012) et son utilisation abordée dans la partie précédente. Néanmoins, les documents analysés ici laisse penser qu'il n'a pas été enrichi depuis. A noter qu'un total de 177 espèces au total a pu être identifiée au sein des 21 stations de suivi symptomatologique lors du travail réalisée par l'IAC (Zongo, 2015). Il serait intéressant de voir comment est gérée cette information car même si les 166 autres espèces apparaissent moins, ou nettement moins abondantes que les 11 indicatrices choisies pour le suivi (ce qui est peu probable), nombre d'entre elles sont à coup sur d'intérêt patrimonial, et une approche des symptômes de ces espèces pourrait également se révéler intéressante pour le suivi.



V. ETUDE SUR LA SENSIBILITE DES ESPECES FLORALES LOCALES AUX POLLUANTS PAR LA TECHNIQUE DE FUMIGATION

Il s'agit de la troisième mesure proposée à l'issue des travaux d'investigations menés en 2011. La priorité d'évaluer les effets du dioxyde de soufre sur la végétation endémique a été orientée par le fait que celui-ci est, d'après les premiers travaux d'investigations, considéré comme étant le premier facteur responsable des phénomènes de dépérissement observés sur la végétation, et aussi par le fait que les seuils limites de concentration pour la protection des écosystèmes néo-calédoniens pour les émissions de SO₂ étaient à l'heure de l'étude, basés sur des études toxicologiques effectuées dans d'autres pays. Ces seuils limites réglementaires journaliers utilisés pour la protection des écosystèmes terrestres de SO₂ sont alors fixés à une moyenne horaire de 570µg.m⁻³ (218ppb) et de 230µg.m⁻³ (88ppb) en moyenne journalière (OMS, 2000 ; ICPE 2008). L'intérêt de mener des études de fumigation était alors principalement de déterminer si ces seuils limites étaient appropriés au climat et à la végétation endémique du territoire, mais également d'établir la relation concentration/réaction et de définir les symptômes des dommages causés par le dioxyde de soufre. Les essais de fumigation ont consisté en la mesure des effets de différentes concentrations de dioxyde de soufre sur une sélection d'espèces indigènes néo-calédoniennes. Un des objectifs de ces travaux était également de pouvoir ensuite proposer une liste de plantes indicatrices sensibles à l'exposition au SO₂ et qui pourraient être utilisées pour surveiller l'évolution des impacts des émissions atmosphériques sur la végétation avoisinantes de VALE NC. L'ensemble des résultats a été rapporté dans les documents « Controlled exposures of native vegetation to sulphur dioxide at Vale New-Caledonia – Exposures 1, 2 and 3, 4 » (Environmental impact solutions, 2014, 2015, 2016).

V.1. METHODE

L'étude a été menée sous l'encadrement du Pr Murray, installée et réalisée sur la partie supérieure de la pépinière VALE NC, sur une plateforme éloignée des autres zones de travail par une distance de 20 m. Les protocoles mis en place ont été tirés d'autres essais déjà éprouvés par la publication de résultats (Murray, 2003).

V.1.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Des plants de différentes espèces étaient placés dans des chambres de fumigation à ciel ouvert afin de reproduire des conditions des terrains réalistes et proches de l'environnement naturel. Les chambres mesuraient 3m de diamètre et 2,4m de hauteur, et leur structure était composée d'un cadre en aluminium enveloppé sur les façades d'un plastique anti-UV de 200 microns (Fig. 9). Un total de 10 chambres a été utilisé. L'atmosphère à l'intérieur des chambres était créé par un ventilateur aspirant l'air extérieur alors filtré puis injecté dans les chambres. Le dioxyde de soufre était délivré aux entrées des chambres de fumigation après avoir été mélangé à l'air aspiré précédemment. Les concentrations de SO₂ délivrées étaient contrôlées par un système de régulation et une série de vannes. L'essai a été mené du 10 décembre 2013 au 4 décembre 2015 et découpé en 4 étapes différentes pour des raisons logistiques, suspendu pendant les périodes cycloniques. Les essais ont toujours été réalisés durant des saisons de météorologie stable et relativement sèches. Les injections de SO₂ avaient lieu 2h par jour (de 10:00 à 14:00 heures), 4 jour par semaine et testaient différents temps d'exposition (en jour) variant de 10 à 80 jours d'exposition au total sur l'ensemble de

l'essai. Les concentrations testées (une par chambre à chaque étape de l'essai) allaient de $86\mu\text{g.m}^{-3}$ (33ppb) à $3882\mu\text{g.m}^{-3}$ (1466ppb). Les concentrations en SO_2 libérées dans les chambres ont été sélectionnées sur la base des valeurs moyennes et maximales mesurées par les stations de suivi de la qualité de l'air de l'usine, ainsi qu'à partir des seuils légaux pour le SO_2 comme décrit dans l'arrêté ICPE de 2008 (ICPE 2008).



Figure 10: Dispositif de l'étude de fumigation sur la pépinière de Vale Nouvelle Calédonie en Décembre 2013 (source VALE NC, 2013).

V.1.2. CHOIX DES ESPECES

Dix espèces ont été testées dans cette étude. Le choix des espèces s'est orienté prioritairement vers des espèces natives présentes dans la zone d'impact et pour lesquelles les symptômes du dépérissement observés étaient les plus accentués. Les espèces utilisées dans cette étude ont été : *Alphitonia neo-caledonica*, *Agathus lanceolata*, *Araucaria nemarosa*, *Arillastrum gummiferum*, *Deplanchea speciosa*, *Flindersia fourrierii*, *Grevillea exul rubiginosa*, *Gymnostoma deplancheanum*, *Planchonella wakere*, *Syzygium macranthum*. L'ensemble des plants a été produit par culture en pépinière VALE NC. L'objectif était de fournir des plants en bonne santé et bonne taille (>50cm) avec des feuilles « adultes » pour pouvoir réaliser les mesures nécessaires à l'étude. Des plants issus de la production en pépinière ont ainsi été rempotés en mars 2012 en sac de 5 litres contenant un mélange de substrat composée de 30% terreau universel, 20% bourre de coco, 50% latérite (topsoil tamisé) et engrais enrobée (Nutricote tropicale 270). Jusqu'au début de l'expérience les plants ont fait l'objet d'une fertilisation bimensuelle à l'aide d'un engrais foliaire (combo) afin d'assurer une bonne croissance avant le démarrage de l'étude. Les plantes ont ensuite été placées dans les chambres sur une grille de support selon leur hauteur avec les plus grandes au milieu et les plus petites sur les bords. Cette disposition des plantes était faite pour s'assurer que toutes les plantes soient exposées aux mêmes diffusions de SO_2 et ne soient pas masquées par des plantes plus grandes. 6 répétitions de chaque plant ont été utilisées afin d'assurer une fiabilité statistique minimum des résultats obtenus. A noter que les chambres d'essais étaient réparties sous 3 tonnelles. L'arrosage des plants étant alors réalisé durant l'ensemble de l'essai par le matériel d'aspersion aérien déjà présent dans ces tonnelles.

V.1.3. MESURES ET ANALYSES

Au début et à la fin de l'expérience un lot témoin de chaque plant a été sacrifié pour réaliser des mesures de masses fraîches et sèches. Ces données ont été comparées avec les mêmes mesures faites sur les plants après expérience. Au début de l'expérience puis à intervalle régulier (prescrit par le Pr Murray) ont été réalisées par les équipes VALE NC des photos ainsi que plusieurs mesures : des mesures de hauteur, du diamètre au collet, du nombre de feuilles, de l'état de santé visuel des feuilles (apparences chlorose, nécroses, superficie de recouvrement des nécroses et chloroses), de la durée de vie des feuilles, de l'état de santé des systèmes photosynthétique (mesuré avec un PEA Meter – Hansatech systems), de la présence/absence de ravageurs et pathogènes. Egalement pour ces mêmes intervalles de temps, le pH, la conductivité ainsi que des analyses chimiques (N, P, K, S, Ca) des substrats ont été réalisées. Ces analyses chimiques (N, P, K, S, Ca) ont également été réalisées sur les feuilles, aux mêmes intervalles de temps, en distinguant les jeunes feuilles des vieilles feuilles.

V.1.4. ANALYSES DES DONNEES

Les données ont été analysées statistiquement par le Pr Murray, par des comparaisons de moyennes (ANOVA) afin d'identifier les différences significatives et les seuils d'impact par espèce.

V.2. PRINCIPAUX RÉSULTATS ET CONCLUSIONS APPORTEES

- Presque toutes les espèces testées ont présenté des symptômes de dépérissement lorsqu'elles ont été exposées à $3882 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (1466ppb moyenne horaire) de SO_2 (dose maximale testée) pendant 2h par jour pendant 4 jours pendant 23 jours de fumigation. L'ensemble des espèces n'a montré aucun symptôme de dépérissement pour des concentrations de $1275 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (488ppb) (moyenne horaire). Entre ces deux concentrations, les réponses symptomatiques varient selon les espèces, les concentrations et les temps d'exposition. A noter que pour les espèces qui se sont révélées les plus sensibles pendant l'essai, des symptômes de dépérissement étaient visibles à partir de $1275 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (488ppb) de SO_2 injectés pendant 2h, pendant 4 jours, pendant plus de 23 jours d'exposition. Les espèces les plus sensibles au SO_2 ont été *Arillastrum gummiferum*, *Araucaria nemarosa*, *Flindersia fournerii*, *Planchonella wakere*. Les moins sensibles ont été *Alphitonia neo-caledonica*, *Grevillea exul*, *Gymnostoma deplancheanum*, *Syzygium macranthum*.
- A noter qu'il a été choisit de tester dans cet essai des expositions à des concentrations de SO_2 (de fortes à faibles concentrations) sur de courtes périodes de temps, simulant des expositions aigües ponctuelles. Ces conditions peuvent facilement être rapprochées des augmentations rapides de concentrations de SO_2 dans l'atmosphère autour de l'usine, et qui ont pu être observées notamment suite à des incendies dans les zones de stockage du soufre. Aussi, les résultats tendent à confirmer des expositions aigües ponctuelles comme une cause majeure des phénomènes de dépérissement observés sur la végétation, et par extension donc, les incendies des stocks de soufre comme facteur majeur de ces augmentations. En effet, les résultats rapportés par cet essai tendent à confirmer que les phénomènes de dépérissement de la végétation observée correspondent à des taux de SO_2 très élevés sur de courtes périodes de temps plutôt que des expositions continues à de

faibles concentrations.

- Il a également été relevé une augmentation des concentrations en soufre foliaire avec l'exposition au SO₂ ainsi qu'une augmentation de la conductivité à 3071µg.m⁻³ (1160ppb) et 3924µg.m⁻³ (1482ppb) et une diminution du pH à une exposition à 1840µg.m⁻³ (695ppb), 3071µg.m⁻³ (1160ppb) et 3924µg.m⁻³ (1482ppb) de SO₂. Les effets écologiques, le cas échéant, de ces petits changements dans la conductivité du sol d'environ 120 à 170 µS.cm⁻¹ et du pH d'environ 5.85 à 5.6 ne sont pas connus, mais ils se trouvent dans la moyenne naturelle des écosystèmes autour du Grand Sud.
- En principale conclusion, il est présenté que le seuil horaire réglementaire d'émission de SO₂ alors en vigueur en Nouvelle-Calédonie 570µg.m⁻³ (218ppb moyenne horaire) permet une bonne protection de l'environnement avec une bonne marge de prévention.

CRITIQUES ET PROPOSITIONS D'AMÉLIORATION

Cette étude, encadrée par le Pr Murray, a été très bien pensée en amont de sa mise en œuvre et sa réalisation semble avoir été parfaitement effectuée, les méthodes mises en œuvre se basant sur des outils déjà éprouvés et validés. Aussi les résultats obtenus apparaissent très robustes. La conclusion quant aux seuils limites utilisés en Nouvelle-Calédonie pour la réglementation des émissions de SO₂, est très rassurante. Pour rappel, les premiers symptômes observés pendant l'essai sont apparus à des expositions moyennes horaires de 1275µg.m⁻³ (488ppb), quand les seuils réglementaires sont de 570µg.m⁻³ (218ppb) moyenne horaire). On peut cependant souligner que dans le cadre de cet essai, ont été conduits des tests de sensibilisation de différentes espèces végétales soumises à des concentrations élevées de SO₂ sur de courtes périodes de temps. Aussi, les résultats de cet essai ne doivent pas occulter d'autres effets potentiels que pourraient avoir de petites émissions de SO₂ en continu. Cette remarque est d'autant plus justifiée qu'il est décrit dans les rapports d'investigations de 2011, que « des concentrations élevées en dioxyde de soufre peuvent engendrer de sévères dommages sur la plante... Cependant, les dommages les plus critiques pour la plante sont les dommages chroniques résultants d'une exposition à de faibles concentrations de SO₂ mais sur du long terme ». A noter également que l'émission de petites concentrations en continu (tout comme l'émission de concentrations élevées sur de courtes périodes) est également susceptible d'avoir un effet indirect sur la végétation en impactant d'autres compartiments de l'environnement dont dépendent directement les végétaux (qualité physico-chimique du sol, des eaux de surface et souterraines...) (cf. II. critiques et propositions d'améliorations). Aussi, sans avoir à reproduire l'expérience de fumigation, une attention particulière pourrait être donnée au suivi des modifications des autres compartiments de l'environnement qui pourraient résulter des ces différents types d'émissions, toujours en parallèle du suivi symptomatique de la végétation. A noter aussi que les concentrations en SO₂ testées dans cette étude, bien qu'une valeur seuil où presque tous les individus montrent des symptômes ait été atteintes, sont restées inférieures au pic de concentration en SO₂ identifiée *in situ* en 2012 (7687 µg.m⁻³ =939ppb moyenne horaire).



VI. ETUDE MULTI-TEMPORELLE DE LA VEGETATION EN PERIPHERIE IMMEDIATE DU SITE DE VALE NOUVELLE-CALEDONIE PAR PHOTOGRAPHIE SATELLITAIRE

Quatrième mesure proposée à l'issue des travaux d'investigations de 2011, celle d'une étude multi-temporelle spatiale du site de VALE NC par photographie satellitaire. Dans le but de préciser l'étendue et l'évolution des impacts sur la forêt en périphérie directe du complexe industriel, il a ainsi été proposé d'engager une étude multi-temporelle par télédétection. Il s'agissait, à partir des données satellitaires disponibles entre 2009 et 2011, de caractériser les changements en terme (1) de modification de la radiométrie en tant qu'indicateur de l'augmentation ou de la diminution de l'activité chlorophyllienne, et (2) de caractériser les modifications spatiales de l'activité chlorophyllienne de la végétation. Ces changements devaient être replacés sur une échelle chronologique afin de déterminer les dates ou périodes temporelles clés de l'évolution de l'activité de ce type de végétation et de déterminer une dynamique (intensité de l'évolution, contagion spatiale) des évolutions constatées. Les objectifs de cette étude devaient être de :

- Mettre en évidence l'évolution de la santé de la forêt de Chênes Gommés sur la zone d'intérêt (25km²) depuis 2009 jusqu'à aujourd'hui.
- Dater l'apparition des changements remarquables sur cette espèce végétale.
- Quantifier les changements (caractéristiques radiométriques des changements, modalité spatio-temporelle, dynamique radiométriques et spatio-temporelle).
- Mettre en évidence des changements de même nature qui pourraient affecter d'autres espèces dans leur voisinage.

En complément de ce premier travail, il a été prévu que les données issues de l'analyse des images satellites soient ensuite vérifiées sur le terrain pour permettre une validation *in vivo* des informations transmises.

A noter que bien que pensé initialement, la comparaison des données à partir de 1998, date d'implantation de l'usine, a été abandonnée du fait de l'hétérogénéité des données ou d'un manque partielle de certaines données. C'est pourquoi dans un souci de comparaison les données sont analysées ici à partir de 2009, date antérieure à l'impact observé sur la végétation de chênes gommés.

VI.1. L'ÉTUDE MULTI-TEMPORELLE DE LA VEGETATION PAR PHOTOGRAPHIE SATELLITAIRE

Vale NC a mandaté la société Bluecham pour analyser les données satellitaires (Bluecham, 2011). Les données acquises dans cette étude ont fait l'objet d'un rapport remis à VALE NC intitulé « Synthèse méthodologique VEGUSINE : suivi régulier de la végétation au Nord-Ouest de l'usine – résultats et suivi opérationnel » (Bluecham, 2013).

VI.1.1. METHODOLOGIE

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

- suivre l'activité photosynthétique de la végétation
- suivre la structure de la canopée et le couvert de feuilles
- suivre le stress hydrique de la végétation

Le rapport transmis par Bluecham détaille que l'ensemble des méthodes mis en œuvre dans le travail d'analyses des données satellitaires a largement été éprouvé depuis de nombreuses années dans de multiples publications, notamment en milieu tropical. L'analyse

des données satellitaire est estimée pour chaque pixel des images inspectées, et qui ont été disponibles pour l'analyse. Le suivi global de l'état de la végétation a été réalisée à l'aide de l'indicateur ISEV. A partir des changements mesurés pour chaque paramètres caractérisant la végétation, l'indicateur ISEV permet de mettre en évidence 3 états de la végétation :

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

Cet indicateur a été calculé par ajustement des indices de changements de chaque paramètre à la végétation spécifique du Grand Sud en liaison avec les experts botanistes de VALE NC.

L'analyse des données satellitaires s'est concentrée sur 27 Massifs Forestiers d'Intérêt Prioritaire (MFIP) de superficie supérieure à 1Ha (Fig. 10). Les MFIP ont été quadrillés par la mise en œuvre de stations de surveillance qualifiées de « virtuelles », c'est à dire sans matériel ni opérations sur le terrain, opérées par analyses des données satellitaires. Ces stations ont été comparées à des secteurs semblables hors influence du site industriel (stations témoins) afin de détecter toute anomalie d'évolutions de la végétation. Le suivi mis en place a été individuel pour chaque MFIP à partir des mesures des indices relevés pour chaque station. Les indicateurs quantitatifs d'évolution globale pour chaque paramètre mesuré ont été fournis pour informer de la tendance de l'évolution constatée entre deux dates d'observations. Un travail préliminaire de calibration radiométrique a été effectué, avant l'analyse propre, par la comparaison d'observations photographiques d'individus géoréférencés par VALE NC et définis comme sains, d'autres définis comme atteints, et enfin d'individus morts.



Figure 11. Les 27 MFIP de la zone d'étude satellitaire analysées par Bluecham (source Bluecham, 2013).

VI.1.2. PRINCIPAUX RESULTATS

- En juillet 2009, l'activité de la végétation à chêne gomme se situe dans la moyenne observées, correspondant à une végétation active et en bonne santé.

- En juin 2010, l'activité de la végétation à chêne gomme se situe au dessus des tendances moyennes observées pour l'ensemble de la végétation indiquant une végétation particulièrement active.
- Des individus touchés sont observés dès juin 2010. Les impacts seraient donc apparus avant juin 2010.
- En aout 2010, l'activité de la végétation à chêne gomme diminue vers des valeurs indiquant une diminution anormale de l'activité photosynthétique. Cette chute de l'activité de la végétation est caractéristique de l'ensemble de la végétation du groupement à chêne gomme et peut indiquer un marqueur de changement important dans l'activité de cette végétation.
- En 2011 (mars et juin), les valeurs de l'activité de la végétation à chêne gomme restent largement en dessous des valeurs enregistrées avant juin 2010 bien que celles-ci remontent légèrement, semblant toujours indiquer un ralentissement de l'activité de la végétation par rapport à avant aout 2010.
- Les individus touchés se localisent majoritairement dans les attitudes comprises entre 0 et 150m
- Deux directions d'impacts se dégagent très nettement des résultats. La première à l'Ouest de l'usine, la seconde au Nord-Ouest de l'usine.
- Les travaux ont permis de distinguer 3 catégories de zones :
 - o les zones dites atteintes (ZA), (50-100% d'impacts)
 - o les zones dites modérément impactées (ZI), (30-50% d'impacts)
 - o les zones dites saines non impactées (ZS), (0-30% d'impacts)

VI.2. VÉRIFICATION DES DONNÉES ISSUES L'ÉTUDE MULTI-TEMPORELLE DE LA VEGETATION PAR PHOTOGRAPHIE SATELLITAIRE

Vale NC a mandaté l'IAC pour effectuer les vérifications sur le terrain des résultats apportés par Bluecham. En plus de la vérification des données acquises par Bluecham lors de l'étude multi-temporelle de la végétation par photographie satellitaire, l'étude mis en œuvre par l'IAC avait pour objectif de dresser un état des lieux, à la date de l'étude (juillet-octobre 2014), du cortège floristique. Il a consisté à dénombrer et évaluer de manière quantitative l'état de santé de la strate forestière dans la formation à chêne gomme sur la creek baie Nord. Les données acquises dans cette étude ont fait l'objet d'un rapport remis à VALE NC intitulé « Evaluation quantitative de l'état de santé de la strate forestière dans la zone d'étude de dépérissement des chênes gommés sur le creek de la baie Nord » (Zongo et al., 2015).

VI.2.1. METHODOLOGIE

L'étude a été réalisée de juillet à octobre 2014. Elle a porté sur l'inspection de 21 parcelles (20x20m) situées à l'intérieur des MFIP définis précédemment dans les travaux de Bluecham (Bluecham, 2013). 7 parcelles ont été suivies dans chacune des trois catégories de zones définies après les travaux de Bluecham (*ibid*), en zones dites atteintes (ZA), en zones dites modérément impactées (ZI) et en zones dites saines non impactées (ZS). Outre l'état de santé global au sein de ces parcelles, des inventaires floristiques d'abondance ont également été réalisés (Meddour, 2011). Cela a permis d'établir un indice semi-quantitatif de la fréquence et de distribution de chaque espèce répertoriée.

VII.2.2. PRINCIPAUX RESULTATS

- De manière globale, les catégories de zones impactées définies par Bluecham (ZA, ZI et ZS) sont apparues correctes.

- Néanmoins, il a été relevé des impacts globaux sur l'ensemble des parcelles y compris sur les zones définies par Bluecham comme « non impactées » (ZS). Ce constat a été expliqué ici par le fait que l'analyse de télédétection peut ne pas suffire à prendre en compte certains paramètres qui ne semblent pouvoir être appréhendés que sur le terrain (tel que l'observation de rejets complétant les analyses d'activité de la végétation). En conséquence, une proposition de redéfinition de la classe dite « saine non impactée » a donc été ici proposée en tant que « faiblement impactée ». La prise en compte de cette observation permet de rendre les propositions faites par Bluecham plus justes.
- Cette étude a pu confirmer que les parcelles les plus impactées se distribuent le long d'un gradient de distance par rapport à l'usine (effet proximité de l'usine) et selon la direction du vent dominant d'est en ouest.
- L'étude a révélé une activité de l'ensemble des parcelles de régénération naturelle (sans différences significatives entre les trois catégories de parcelles néanmoins). Cela semble indiquer une certaine vitalité de l'écosystème. Il est également précisé qu'il restera important de bien apprécier les effets indirects du dépérissement des chênes gommés par un suivi dans le temps.

COMMENTAIRES

La vérification terrain des résultats présentés par l'analyse de données satellitaires tend à démontrer l'intérêt de cet outil de suivi. Utilisé en complément de vérification terrain (vérification, calibration...) celui devrait permettre sur le long terme de disposer d'une méthode fiable de surveillance des phénomènes de dépérissement dans des zones où des moyens humains n'auraient pas été, ou ne pourraient pas être déployés. En conclusion il est ici repris cette remarque faite par le Pr Murray au sujet de ce travail d'étude combinant l'analyse de données satellitaires et la vérification sur le terrain et qui nous apparaît tout à fait justifiée : « Une étude aussi complète ne mérite pas forcément d'être reproduite tous les ans, car elle demande une importante quantité de travail sur le terrain ainsi qu'un temps d'analyse des données conséquent. Cela en plus du fait que l'évolution de santé global au sein des parcelles suivies est probablement lente. Tous les 3 ans semblent être un bon compromis. Il reste intéressant de garder des parcelles en correspondance avec Bluecham, afin de permettre le maintien d'un outil calibré de façon constante, répondant à des besoins ponctuels ». On peut également avancer l'idée qu'une meilleure superposition des données satellitaires et des stations suivies au sol favoriserait possiblement une meilleure interprétation des résultats et donc progression de l'outil de télédétection.



VII. REVUE DE LA MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

Cinquième mesure proposée à l'issue des travaux d'investigations de 2011, la réalisation d'une revue de la modélisation de dispersion atmosphériques. En se basant sur les outils alors déjà disponibles, il a été proposé de développer un modèle de dispersion atmosphérique à partir des données d'émissions industrielles de VALE NC, des données météorologiques locales et des concentrations en polluants dans l'air ambiant. Cela a été imaginé pour permettre d'améliorer les prédictions de la concentration au sol de polluants gazeux au sein et aux alentours des installations industrielles et également la mise en place de mesure de réponses lorsque nécessaire.

COMMENTAIRES

Aucun des documents transmis pour ce travail d'analyse ne mentionne la mise en œuvre de cette mesure proposée en 2011. Il faudrait vérifier l'existence de documents relatifs à ce travail. A noter que cet outil pourrait être un bon complément des outils déjà proposés. En effet, la modélisation des phénomènes de dispersion atmosphérique autour de VALE NC permettrait d'orienter les travaux de surveillance lorsque les émissions atmosphériques sont dirigées vers des zones non suivies (car à très grande distance du site, ou hors zone d'influence des vents dominants un jour où le vent tourne par exemple...).

A noter également que tel que prévue dans le rapport 2012 (Murray 2012), la modélisation atmosphérique semble ne pas prendre en compte les émissions passives (comme celles provenant du stock de soufre, le trafic routier...). Cette information a d'ailleurs été soulignée dans le cadre d'une synthèse des connaissances sur la qualité de l'air et des pluies, produites par l'OEIL en 2013. Aussi, il conviendrait de vérifier que ces données puissent être ou aient été intégrées dans les schémas de modélisation atmosphérique.



VIII. MINIMISATION DES INCENDIES DU STOCK DE SOUFRE

Dernière proposition issue des travaux d'investigations menés en 2011, celle de porter une attention particulière à la minimisation des incendies du stocks de soufre. Cette proposition se base sur le fait que les caractéristiques visuelles des symptômes du dépérissement témoignent d'une importante exposition de la végétation au SO₂ caractérisée par des concentrations très élevées durant des durées d'exposition courtes. Cela semble à l'heure où cette proposition a été faite, lié aux résultats obtenus par le suivi de la qualité de l'air suite aux incendies ou départ de feu en provenance du stock de soufre. Ce suivi a en effet montré des fortes concentrations de SO₂ dans l'air (7687 µg.m⁻³ en moyenne horaire) pendant de courtes durées dues aux incendies de soufre élémentaire au niveau de la zone de stockage de celui-ci. Ces fortes concentrations dépassent de loin la valeur limite horaire pour la protection pour la végétation en NC qui est de 570 µg.m⁻³. Aussi il est fait la remarque que si des mesures ne sont pas prises pour minimiser la fréquence et l'intensité des incendies du stock de soufre alors la végétation environnante va sans aucun doute continuer à se dégrader. Le dépérissement de la forêt sera alors plus sévère et sera géographiquement plus étendu. Mais plus généralement la mesure de réduction ici proposée a été étendue à l'ensemble des activités autres que les incendies, susceptibles de venir augmenter les concentrations atmosphérique en SO₂. Pour cela, VALE NC fournit un détail exhaustif des activités de ce type dans ses différents rapports. Les principales sources de dioxyde de soufre ainsi identifiées au sein des installations industrielles de Vale NC sont la centrale électrique, l'usine d'acide, les chaudières et la combustion accidentelle du soufre élémentaire au niveau de l'aire de stockage du soufre (Vale, 2011). Les événements susceptibles d'avoir eu un impact direct sur les concentrations en SO₂ dans l'air ambiant durant la période 2012-2015 ont été fournis par VALE NC dans les différents rapports annuels. Ils sont ici présentés dans les tableaux, 5, 6 et 7.

Tableau 5. Descriptifs des incidents et dégagement de SO2 identifiés par VALE NC en 2012 (source VALE NC, 2013).

Date	Descriptif incident et dégagement de SO ₂
22/01/2012	Fuite de gaz après le démarrage de l'usine d'acide sulfurique (Unité 330)
03/01/2012	Départ d'un feu de soufre au niveau d'une cuve (Unité 330)
08/02/2012	Dégagement de SO ₂ détecté dans les salles des soufflantes (Unité 330)
09/02/2012	Départ incendie au niveau de la zone de stockage de soufre (zone 545)
06/04/2012	Fuite de SO ₂ au niveau de l'unité de liquéfaction lors de la purge d'une conduite (unité 330)
14/04/2012	Départ de feu au niveau du stockage de soufre (unité 545)
23/04/2012	Fuites de SO ₂ /SO ₃ au niveau de l'unité 330
08/05/2012	Fuite de SO ₂ au niveau de l'unité 330
14/07/2012	Départ de feu de soufre à l'intérieur de la cuve TNK-104 (Unité 330).
04/08/2012	Léger dégagement de fumée sur zone de rejet de soufre au 545
03/10/2012	Départ de feu à la 330, déclenchement d'alarme SO ₂
05/10/2012	Emmanation de SO ₂ à la 330
11/11/2012	Depart de feu à la 330 dans la TNK-101 fusion/filtration . Déclenchement de l'alarme SO ₂
13/11/2012	Fuite mineure de SO ₂ sur SKID1 (unité 330)
19/11/2012	Départ de feu à l'intérieur du filtre - presse 101 (unité 330)
24/11/2012	Fuite de SO ₂ au niveau des sondes d'analyseur oxygène de la 330
27/11/2012	Emission de SO ₂ au niveau des four à chaux. (unité 310)
28/11/2012	Détection de SO ₂ par un détecteur de zone (zone 330).
24/01/2013	Départ de feu au niveau du stockage du gateau de soufre (zone 545).
24/01/2013	Dépassement du seuil de rejet au niveau de la cheminée de l'usine d'acide sulfurique,pic à 546 ppm (zone 330).
31/01/2013	Dépassement du seuil de rejet au niveau de la cheminée de la 330.
15/02/2013	Dégagement d'une fumé blanche au niveau de la cuve de fusion TNK-101 (zone 330).

Tableau 6. Descriptifs des incidents et dégagement de SO2 identifiés par VALE NC en 2014 (source VALE NC, 2015).

Date	Unité	Descriptif incident et dégagement de SO ₂
21/01/2014	330	Départ de feu sur 330-FIL-101
12/02/2014	545	Départ de feu sur la zone 545
22/02/2014	330	Départ de feu dans la cuve de soufre 330-TNK-103
06/03/2014	330	Emission élevées de SO ₂ en sortie de cheminées de l'usine d'acide
27/03/2014	330	Plusieurs feux successifs se sont déclarés à l'intérieur du filtre
05/04/2014	545	Départ de feu soufre sous le contrepoids convoyeur 545-CVB-003.
24/04/2014	330	Emission élevées de SO ₂ en sortie de cheminées de l'usine d'acide
11/06/2014	330	Incendie sur la bande du convoyeur 330-CVB-101
16/06/2014	330	Départ de feu de soufre
18/06/2014	330	Départ de feu dans la cuve de fusion de soufre
30/07/2014	330	Départ de feu sur pompe de soufre de la Fusion-Filtration
12/08/2014	330	Départ de feu sur le calorifugeage du trou d'homme du TNK-101
22/08/2014	330	Depart de feu dans la cuve de soufre liquide
29/08/2014	330	Départ de feu au niveau du calorifugeage de la 330TNK104
25/09/2014	330	Départ de feu au niveau de la fosse 330-FLP-102
29/10/2014	330	Départ de feux PPP-102 + TNK104
07/11/2014	330	départ de feu aperçut dans le filtre presse

Tableau 7. Descriptifs des incidents et dégagement de SO2 identifiés par VALE NC en 2015 (source VALE NC, 2016).

Date	Unité	Descriptif incident et dégagement de SO ₂
25/02/2015	545	une combustion lente de soufre s'est déclarée sur la zone de stockage
04/03/2015	545	une combustion dans le gateau de soufre
21/03/2015	330	Départ de feux dans la fosse du filtre 102
14/04/2015	330	Fuite de SO ₂ sur la connexion d'un assemblage boulonné sur un ballon de stockage de SO ₂ .
24/04/2015	330	Fuite de SO ₂ sur le train 1 de liquéfaction
29/05/2015	330	Départ de feu sur le toit de la cuve de fusion 330TNK101
07/07/2015	330	Départ de feu de soufre sur les parois de la cuve 330-TNK-102
23/07/2015	330	Dépassement de SO ₂ à la cheminée suite à un trip de l'usine d'acide.
02/09/2015	330	Fuite SO ₂ sur 330-HXS-125
13/11/2015	330	Depart de feu sur le 330-FIL-101
17/12/2015	330	Dégagement de SO ₂ suite à l'opération de maintenance d'un bruleur.
18/12/2015	330	Feu de Soufre 330-BUA-102
23/12/2015	545	Départ de feu sur le 545-CVB-005 (convoyeur de soufre)
26/12/2015	545	Départ de feux convoyeur 545 CVB005

COMMENTAIRES

Il est évident que cette mesure, d'essayer de diminuer les risques d'émissions accidentelles de SO₂, à des taux élevées, est une excellente proposition. Néanmoins, l'IAC ne dispose pas des compétences nécessaires pour juger de la qualité des dispositifs mis en œuvre par VALE NC pour effectivement tenter de réduire de telles émissions.

CONCLUSION GENERALE

Comme cela a été souligné précédemment, il est en conclusion important de rappeler que le travail d'analyse critique réalisé par l'IAC ne se base que sur les documents transmis par l'OEIL. Certains documents ont donc pu être absents de l'analyse. Il est donc possible que l'examen complémentaire de tels documents puisse rendre injustifiées certaines critiques et recommandations qui pourraient être faites ici. Il est essentiel de tenir compte de cette information de façon à rendre optimale et juste l'utilisation du travail d'analyse ici réalisé.

Egalement, il doit être noté très positivement que l'ensemble des documents ici étudié témoigne de la volonté de VALE NC de poursuivre la réalisation de ses engagements pour la protection de son environnement direct et plus largement de l'environnement néo-calédonien. Il témoigne également de la volonté de VALE NC de sans cesse améliorer les moyens qu'elle se donne pour réaliser ses objectifs. En ce sens, les critiques faites ici se veulent pouvoir participer à cette volonté d'amélioration continue. De fait, il est entendu que lorsque les démarches mises en œuvre par VALE NC se situent hors du champ d'expertise de l'IAC, aucune critique n'a été faite, et seuls des commentaires d'ordres généraux ont été émis. De fait, les principales critiques qui ont pu être faites concernent principalement 1. les

conclusions faites à l'issue des premiers rapports d'investigations, et 2. les protocoles de suivi symptomatologique foliaire et de qualité de l'air.

1. Pour rappel à l'issue des premiers travaux d'investigations menés en 2011, il a été conclu que les émissions atmosphériques en provenance de l'usine étaient les causes majeures des phénomènes de dépérissement observés (notamment les émissions de SO₂). Les autres facteurs aussi initialement envisagés ont alors écartés. En analysant les données présentées dans ces rapports, il est toutefois apparu difficile d'exclure complètement l'influence des autres facteurs étudiés. Cela notamment pour 2 raisons :
 - L'identification de la présence de biais possibles dans l'interprétation des données, susceptibles de pouvoir incriminer ou discriminer un facteur. Notamment en raison d'un manque d'informations sur les données relatives à Prony Energies, de façon plus générale pour l'ensemble des documents, du manque d'information sur les méthodes d'analyses statistiques ayant menées aux conclusions, et enfin par l'identification de plusieurs variations notables de la qualité chimique des eaux de la zone impactée non prises en compte dans les conclusions.
 - la possibilité qu'il puisse exister un effet combiné et/ou cumulatif de ces facteurs, aux effets engendrés par le SO₂ sur les phénomènes de dépérissement observés. Cela notamment en raison de l'identification de plusieurs variations notables de la qualité chimique des eaux de la zone impactée non-prises en compte dans les conclusions comme décrit précédemment.
2. Sur les protocoles de suivi symptomatologique, les principales critiques qui ont pu être faites concernent les évolutions successives des protocoles de suivi et également le dispositif expérimental pour lequel les espèces, le nombre d'espèces, ainsi que le nombre d'individu suivi par espèce au sein des stations varient sensiblement. L'hétérogénéité des méthodes ainsi mises en œuvre compliquent fortement un travail comparatif des données, et par conséquent leurs interprétations. Egalement, il a pu être identifié lors de l'analyse des rapports de suivi symptomatologique un manque d'informations important 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 en remettre la véracité en cause, nécessitent alors d'être appréciées avec une certaines réserves.

 **BIBLIOGRAPHIE**

Bordez L., L'Huillier L., Fogliani B. 2015 Etude d'impact potentiel des émissions atmosphériques de poussières sur la végétation environnante du site minier de VALE GORO, zone SMLT. Rapport final de convention. Institut Agronomique néo-calédonien.

Bluecham **2013** Synthèse méthodologique VEGUSINE : suivi régulier de la végétation au Nord-Ouest de l'usine – résultats et suivi opérationnel ».

Environment impact solutions **2015** Controlled exposures of native vegetation to sulphur dioxide at Vale New-Caledonia – Exposures 2 and 3, 4 ».

Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. **2010** Le Sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. PPUR presses polytechniques, Lausanne, Switzerland

ICPE **2008** Gouvernement de la NC 2008 Journal officiel de la Nouvelle-Calédonie. Arrêté ICPE N° 1466-2008/PS et N°1467-2008/PS. Ed. Gouvernement de la NC.

Murray. **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 ».

SORECO **2013** Suivi des symptômes foliaires à proximité de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie. Comte rendu de mission.

VALE NC **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 ».

VALE NC **2013** Protocole de suivi de la végétation exposée aux émissions atmosphériques de l'usine de Vale Nouvelle-Calédonie ».

VALE NC **2013** Protocole expérimentale : Etude symptomatologique des effets de dioxyde de soufre par fumigation sur les espèces endémiques de Goro Vale Nouvelle Calédonie.

VALE NC **2013** Surveillance symptomatologique 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.

VALE NC **2015** Surveillance symptomatologique 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.

VALE NC **2016** Protocole de suivi de la végétation – zone de dépérissement en aval de l'usine de VALE NC

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

Zongo C., Veà C., L'Huillier L., Fogliani B. **2015** Evaluation quantitative de l'état de santé de la strate forestière dans la zone d'étude de dépérissement des chênes gommés sur le creek de la baie Nord. Rapport d'expertise. Institut Agronomique néo-Calédonien.



INSTITUT AGRONOMIQUE
NÉO-CALÉDONIEN

ANALYSE CRITIQUE DU SUIVI SYMPTOMATOLOGIQUE EXISTANT DU PHÉNOMÈNE DE DÉPÉRISSEMENT OBSERVÉ SUR LA VÉGÉTATION AUX ALENTOURS DU SITE DE VALE NC

Analyse et propositions d'améliorations
VALE NC, Province Sud, Nouvelle-Calédonie

Laurent BORDEZ

COORDINATION

Bruno FOGLIANI

Rapport

Septembre 2017

Convention IAC-OEIL N° DE2013/041

financement



OEIL
Observatoire de
l'environnement
Nouvelle-Calédonie

Membres institutionnels de l'IAC:

