

T2
T1

T4

zone de stockage de minerai à long terme (zone SMLT), Goro, Province Sud, Nouvelle-Calédonie ©IAC/L.BORDEZ

ÉTUDE D'IMPACT POTENTIEL DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES DE POUSSIÈRES SUR LA VÉGÉTATION ENVIRONNANTE DU SITE MINIER DE VALE GORO, ZONE SMLT

Laurent BORDEZ,
Charly ZONGO

COORDINATION

Laurent L'HUILLIER
Bruno FOGLIANI

Octobre 2016
Rapport n°9 - EcoRCE / 2016



INSTITUT AGRONOMIQUE
NÉO-CALÉDONIEN

**ÉTUDE D'IMPACT POTENTIEL DES ÉMISSIONS
ATMOSPHÉRIQUES DE POUSSIÈRES SUR LA VÉGÉTATION
ENVIRONNANTE DU SITE MINIER DE VALE GORO, ZONE SMLT**

Laurent BORDEZ

Charly ZONGO

COORDINATION

Laurent L'HUILLIER

Bruno FOGLIANI

Rapport d'étude

n°9 EcoRCE / octobre 2016

Convention IAC-VALE SAS N°2495/2010

Etude des milieux latéritiques et des espèces endémiques du Grand Sud

financement



VALE

Membres institutionnels de l'IAC:





LES AUTEURS

Laurent BORDEZ, docteur en microbiologie, et écologie végétale, est actuellement engagé comme post-doctorant au sein de l'équipe Ecologie de la Restauration et de la Conservation des Espèces végétales (EcoRCE) qui concentre ses recherches sur l'écologie des semences et la caractérisation des graines afin d'optimiser les méthodes de restauration des espèces végétales. Ce travail s'inscrit dans les thématiques de travail de l'Axe II "Diversités biologique et fonctionnelle des écosystèmes terrestres", à l'IAC.

Charly ZONGO, docteur en physiologie des semences et écologie végétale, a participé à la réflexion et à la mise en place des dispositifs expérimentaux ainsi qu'aux premiers suivis. Il a quitté l'IAC en juin 2015.

Bruno FOGLIANI est directeur adjoint à l'IAC depuis 2012, et chercheur en biologie et écologie végétale. Il coordonne l'ensemble des activités scientifiques de l'équipe, dont les travaux liés à ce projet.

Laurent L'HUILLIER est directeur général de l'IAC depuis juin 2011, et chercheur en écologie végétale et écologie de la restauration. Il est venu en appui à la réflexion sur le dispositif expérimental et a suivi le projet jusqu'à son aboutissement.



REMERCIEMENTS

Un grand merci à l'ensemble des membres de l'équipe du service environnement de VALE SAS pour leur accueil sur site, et leur bonne humeur permanente. Merci à Stéphane McCOY, pour sa confiance et sa disponibilité, à Julie GOXE pour la carto, à Cédric LANEY et Arnaud CUBERTAFOND pour le service de renseignement. Merci à Laurent L'HUILLIER et Bruno FOGLIANI de l'IAC, pour leur coordination et leur relecture. Merci à Casimir d'avoir partagé les étapes de terrain, sous toutes les conditions climatiques, mais toujours avec le sourire. Et plus généralement, merci aux membres IAC de l'équipe EcoRCE pour leur disponibilité de chaque instant à avoir l'œil critique et les Brainstormings constructifs. Merci aussi à Chloé ALVADO pour son appui technique.

Enfin, un grand merci à toi, l'Ami Charly. Tu as initié ce travail que j'achève ici en suivant tes traces. A l'inverse, toutes les amitiés que tu as su lier, les souvenirs que tu nous a laissés, ces moments partagés, et tout ce que tu nous a donné... Ca, ça ne s'achèvera jamais.

A Charly ZONGO,

RÉSUMÉ	1
L'ESSENTIEL A RETENIR	3
I. INTRODUCTION	5
I.1 L'impact des émissions atmosphériques de poussières par l'industrie minière de plus en plus reconnu et surveillé	5
I.2 L'impact des émissions atmosphériques de poussières en Nouvelle-Calédonie	7
I.3 L'étude VALE et objectifs de l'étude	9
II. PROTOCOLES ET MÉTHODOLOGIES	11
II.1 Site d'étude	11
II.2 Dispositif expérimental de suivi des poussières	12
II.3 Suivi des variables environnementales	13
II.4 Analyses statistiques	15
III. RÉSULTATS	17
III.1 Quantités de poussières observées sur les feuilles	17
III.2 Quantités de chloroses observées sur les feuilles	19
III.3 Quantités de nécroses observées sur les feuilles	21
III.4 Corrélations	22
III.5 Quantités de poussières observées dans les jauges Owen	24
IV. DISCUSSION	25
IV. 1 Effet global	25
IV.1.1 Observations de dépôts de poussières	25
IV.1.2 Observations de chloroses et nécroses	26
IV.2 Effet espèce	28
CONCLUSION	29
LIMITES ET PERSPECTIVES	30
Sur le suivi des effets directs, qui concernent les dépôts de poussières qui ont lieu directement sur les végétaux	30
Sur le suivi des effets indirects, qui concernent les dépôts de poussières sur le sol autour des plantes	31
VALORISATION DE L'ETUDE	32
BIBLIOGRAPHIE	33
ANNEXES	I



LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURE 1. A. LOCALISATION DE LA NOUVELLE-CALEDONIE DANS L'OCEAN PACIFIQUE SUD-OUEST. B. CARTE DES MASSIFS ULTRAMAFIQUES DE NOUVELLE-CALEDONIE ET LOCALISATION DU SITE D'ETUDE (LE PLATEAU DE GORO), C. CARTE EN RELIEF OMBRE DE LA ZONE D'ETUDE SMLT AU SEIN DU PLATEAU DE GORO, ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE SUIVI DES EMISSIONS DE POUSSIERS.	7
FIGURE 2. EXEMPLE DE FEUILLE A. SAIN, B. CHLOROSEE, C. AVEC ZONE DE NECROSE ET D. SAIN AVEC DEPOT DE POUSSIERS. (EXEMPLE SUR FEUILLE DE CHENE GOMME (<i>Arillastrum gummiferum</i>)).	9
FIGURE 3. A. ILLUSTRATIONS DU DISPOSITIF DE STATION METEO, ET B. JAUGE OWEN, SUR TRANSECT 2 (FORMATION PARAFORSTIERE)	10
FIGURE 4. A. MOYENNES DES PRECIPITATIONS ET TEMPERATURES POUR LA ZONE GORO SUR LA PERIODE 2010-2013, ET B. PERIODE DE RELEVÉ DE L'ETUDE.	11
FIGURE 5. A. QUANTITES DE POUSSIERS MOYENNES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT ET PAR PERIODE POUR L'ENSEMBLE DES ESPECES SUIVIES, ET B. QUANTITES DE POUSSIERS MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT, TOUTES ESPECES CONFONDES.	12
FIGURE 6. A. QUANTITES DE POUSSIERS MOYENNES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT ET PAR ESPECE POUR L'ENSEMBLE DE LA PERIODE DE SUIVI, ET B. QUANTITES DE POUSSIERS MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ SE) PAR ESPECE, TOUT TRANSECT CONFOND.	12
FIGURE 7. A. QUANTITES DE CHLOROSES MOYENNES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT ET PAR PERIODE POUR L'ENSEMBLE DES ESPECES SUIVIES, ET B. QUANTITES DE CHLOROSES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT, TOUTES ESPECES CONFONDES.	14
FIGURE 8. A. QUANTITES DE CHLOROSES MOYENNES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT ET PAR ESPECE POUR L'ENSEMBLE DE LA PERIODE DE SUIVI, ET B. QUANTITES DE CHLOROSES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ SE) PAR ESPECE, TOUT TRANSECT CONFOND.	14
FIGURE 9. A. QUANTITES DE NECROSES MOYENNES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT ET PAR PERIODE POUR L'ENSEMBLE DES ESPECES SUIVIES, ET B. QUANTITES DE NECROSES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT, TOUTES ESPECES CONFONDES.	16
FIGURE 10. A. QUANTITES DE NECROSES MOYENNES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT ET PAR ESPECE POUR L'ENSEMBLE DE LA PERIODE DE SUIVI, ET B. QUANTITES DE NECROSES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ SE) PAR ESPECE, TOUT TRANSECT CONFOND.	16
FIGURE 11. ANALYSE CANONIQUE DES CORRESPONDANCES DES VARIABLES DE POUSSIERS EXPLICABLES (QUANTITES DE POUSSIERS SUR INDIVIDU, QUANTITES DE CHLOROSE SUR INDIVIDU, QUANTITE DE NECROSES SUR INDIVIDU), EN FONCTION DES VARIABLES EXPLICATIVES (VARIABLES ENVIRONNEMENTALES).	19
FIGURE 12. A. QUANTITES DE POUSSIERS MOYENNES ($\pm$ SE) RECUPEREES DANS LES JAUGES OWEN PAR TRANSECT ET PAR PERIODE, ET B. QUANTITES DE POUSSIERS MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ SE) RECUPEREES DANS LES JAUGES OWEN PAR TRANSECT, TOUTES ESPECES CONFONDES.	20

L'objectif de cette étude était d'évaluer les effets potentiels d'émissions atmosphériques de poussières générées par l'activité industrielle minière, ici liée à la phase de création et de début d'exploitation d'une zone de stockage de minerai à long terme (zone SMLT) au sein de l'entreprise VALE SAS, sur la végétation environnante. Pour cela, les dépôts de poussières foliaires ont été suivis sur cinq espèces végétales, à l'intérieur de cinq transects disposés selon un gradient d'éloignement de la zone SMLT. L'effet de dépôts de poussières sur l'intégrité biologique de ces espèces a été suivi par l'évaluation des taux de chloroses et nécroses sur une année. Le travail mené ici a permis de pleinement répondre aux questions posées.

i) Les résultats obtenus lors de cette étude ont confirmé un effet anthropique des émissions atmosphériques de poussières de près de 5 fois supérieur à ce qui peut être observé en milieu naturel. Les niveaux d'émissions de poussières observés sont apparus pour être influencés par le nombre d'heures travaillées par les engins miniers. Parallèlement, il a été mis en évidence qu'une fois émises ces poussières ont tendance à être d'avantage rabattues sur la végétation et d'avantage captées par les formations végétales de type dense qui sont aussi les plus riches en espèces. Les résultats démontrent également un effet des précipitations qui tendrait à contrebalancer les dépôts de poussières par un effet lessivage, permettant un maintien à l'année de niveaux de poussières relativement stables, aux alentours de 20% d'opacité foliaire, dans le contexte de cette étude.

ii) Egalement, bien que des phénomènes de chloroses et de nécroses aient été observés, ceux-ci ne sont pas apparus comme causés par les niveaux de dépôts de poussières observés précédemment. Ces phénomènes trouvent ici une explication naturelle, dues pour les chloroses à un excès probable d'intensité lumineuse, et conjugués à des températures élevées, après lesquels semblent apparaître consécutivement des phénomènes de nécroses. Ce résultat est apparu en contradiction avec l'hypothèse de départ de l'étude, mais aussi une majorité de résultats à travers la littérature, selon laquelle *des dépôts de poussières sur la végétation ont un effet néfaste portant atteinte à l'intégrité biologique des végétaux*. Toutefois, ce résultat est à relativiser. Plusieurs auteurs rapportent qu'il existerait une valeur des dépôts de poussières en dessous de laquelle ceux-ci ne semblent pas porter atteinte à l'intégrité physique des tissus végétaux. Aussi, il faut garder en tête que l'absence, dans cette étude, de corrélation entre les dépôts de poussières observés et les phénomènes de chloroses-nécroses, pourrait s'expliquer par le fait que les valeurs des dépôts observés ici (20% en moyenne) puissent se trouver sous cette « valeur seuil » au delà de laquelle les dépôts de poussière auraient pu porter atteinte à l'intégrité biologique foliaire des végétaux, après un an. Cette information est d'autant plus importante que,

iii) les résultats de l'étude ont confirmé l'hypothèse de l'existence d'un effet espèce sur les réponses observées aux dépôts de poussières, ainsi qu'aux phénomènes de chloroses et nécroses. Ceci confirme les résultats des travaux précédents qui ont mis en exergue des sensibilités significativement différentes entre les espèces végétales face aux émissions de poussières. Aussi, il faut souligner que seules 5 espèces végétales sur les 230 recensées aux alentours de la zone SMLT ont fait ici l'objet d'un suivi. Il pourrait être envisagé d'étendre le suivi sur d'autres espèces afin de confirmer les conclusions de cette étude.

Enfin, il nous semble important de terminer en insistant sur le fait que les résultats de cette étude ne sont valables que pour les valeurs moyennes identifiées des variables influençant les phénomènes de dépôts, chloroses, ou nécroses (temps de travail journalier des engins inférieur à sept heures, dépôts de poussières, précipitations mensuelles minimums 120mm...), et qu'en cas d'une modification de valeurs d'une de ces variables, les conclusions pourraient alors évoluer. Aussi, avec la contrainte d'un arrêt total des activités en 2021 de l'activité en zone SMLT dans les prochaines années (activité de création vers activité d'exploitation), il est suggéré de poursuivre ce type d'étude au moins jusqu'à cette date afin d'évaluer l'influence que pourrait avoir un changement des variables influentes.

Cette étude, la première du genre menée sur le territoire a permis d'initier le développement d'outils de suivi des émissions atmosphériques des poussières émises par l'industrie minière sur la végétation, et de valider la robustesse des indicateurs développés. Ce travail permet d'ores et déjà, à travers les résultats obtenus, la mise en place de suivi des émissions atmosphériques de poussières issues de l'industrie minière sur la flore de Nouvelle-Calédonie à une plus large échelle.

Enfin, il est proposé que l'originalité des résultats obtenus ici fasse l'objet de valorisation sous forme d'une publication scientifique de niveau international, et également par la communication orale lors de colloque ou séminaire sur le territoire ou à l'étranger.



L'ESSENTIEL A RETENIR

- Il existe un effet anthropique de l'industrie minière sur les quantités de poussières émises dans l'atmosphère, lié directement au nombre d'heures travaillées par les engins miniers. On observe des dépôts en surface des feuilles de l'ordre de 20% dans la zone d'influence SMLT, contre 4% en milieu naturel, soit 5 fois supérieurs.
- Les poussières sont d'avantages captées par les formations végétales de types fermées denses (ex : forêt contre maquis ouvert), et les dépôts sont d'autant plus importants que la force du vent l'est également.
- La pluie semble avoir un effet « lessivage » de la végétation permettant, selon les valeurs de précipitations observées ici, un maintien des dépôts de poussières dans des niveaux relativement stables.
- Bien que des phénomènes de chloroses et nécroses aient été observés, ils ne semblent pas, pour les espèces suivies, dus aux dépôts de poussières relevés. Les phénomènes de chloroses apparaissent comme dus à un excès d'intensité lumineuse, les nécroses apparaissent consécutives aux chloroses.
- Il existe un effet espèce par rapport aux dépôts de poussières, aux taux de chloroses, ou taux de nécroses constatés. Ce résultat met en évidence une sensibilité différente des espèces face à ces menaces.
- Seul 2% de la diversité végétale identifiée aux alentours de la zone SMLT a été suivie. Il est donc suggéré d'évaluer, en lien avec la remarque précédente, ce type de suivi sur d'autres espèces communes ayant les mêmes caractères foliaires.
- Les conclusions avancées ici ne concernent que l'intégrité physiologique des tissus foliaires. Un suivi d'autres paramètres de santé des végétaux tel que floraison, fécondité, fructification... pourrait être envisagé.
- La nature chimique des poussières n'a ici pas été prise en compte, elle peut cependant avoir un effet, notamment indirect par la rhizosphère, sur la santé des végétaux. Aussi, il est conseillé de prévoir ce type d'analyse.
- Enfin, les conclusions avancées dans cette étude ne se basent que sur un an de suivi. De nombreux auteurs indiquent que les effets des poussières sur l'intégrité des végétaux peuvent prendre plusieurs années. Il est donc conseillé, soit le maintien de ce suivi sur plusieurs années, soit un suivi à intervalle de temps régulier au moins jusqu'en 2021, date prévue d'arrêt des activités en zone SMLT.



I. INTRODUCTION

I.1 L'IMPACT DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES DE POUSSIÈRES PAR L'INDUSTRIE MINIÈRE DE PLUS EN PLUS RECONNU ET SURVEILLÉ

L'impact des émissions atmosphériques des poussières¹ produites par l'industrie minière et ses risques potentiels sur la santé humaine, sont reconnus depuis longtemps, et sont aujourd'hui largement étudiés et surveillés (Farmer, 1993 ; ELAW 2010). Plus récemment, différents travaux ont également rapporté des effets significativement négatifs de ces émissions de poussières sur la flore environnante des sites miniers, et leurs impacts potentiels sur les communautés végétales (Ulrichs *et al.*, 2008 ; Prajapati, 2012). Ces effets apparaissent, à travers la littérature, comme variables en fonction de la nature des poussières (chargées de polluants ou non) (Sayyed & Sayadi, 2011), et du type d'interaction avec les végétaux, (i) indirecte ou (ii) directe (Prajapati & Tripathi, 2008 a,b). (i) Les interactions indirectes concernent les dépôts de poussières sur le sol autour des plantes, et qui peuvent alors potentiellement pénétrer les voies métaboliques des végétaux à travers la rhizosphère. Ceci présente un risque lorsque les poussières sont chargées de substances polluantes tels que des métaux lourds (fer, cuivre, chrome, nickel...) (Telesca & Lovallo, 2011). (ii) Les interactions directes concernent les dépôts de poussières qui ont lieu directement sur les végétaux. Ces dépôts, notamment en surface des feuilles, tendent à diminuer l'arrivée de lumière et ainsi réduire la photosynthèse (Leghari *et al.*, 2013), et peuvent entraver les échanges gazeux en obstruant les stomates (Gheorghe & Ion, 2011). Les dépôts sur les fleurs apparaissent également capables d'inhiber la germination du pollen (Farmer, 1993). L'ensemble de ces phénomènes pouvant alors conduire à une dégradation des tissus végétaux et impacter largement la productivité des plantes (croissance, reproduction, résistance...). Ils peuvent toucher à la fois les individus, les espèces et les communautés, et finalement menacer l'intégrité des écosystèmes miniers dans leurs structures et leurs fonctions (Kumar *et al.*, 2008 ; Prajapati, 2012).

L'impact des poussières émises par l'activité minière sur la végétation environnante est aujourd'hui de plus en plus présent dans les débats sur la gestion durable de l'environnement des sites miniers (Supe & Gawande, 2013 ; Pichhode & Nikhil, 2015). Aussi, il est maintenant reconnu la nécessité d'identifier des outils capables d'évaluer les impacts que peuvent avoir ces émissions de poussières sur l'environnement minier, afin de permettre

¹ Terme générique désignant toute particule assez fine pour être mise en suspension dans l'air, et d'un diamètre de moins de 500 micromètres (Ukpaka *et al.*, 2011).

la mise en place de mesures de protection, de conservation, et de restauration de la flore, le cas échéant (Prajapati, 2012). L'effet des émissions atmosphériques de poussières sur les végétaux est toutefois difficile à estimer, notamment en raison du fait de l'existence d'un large éventail de variables non contrôlées telles que les conditions météorologiques ou la présence de parasites, qui peuvent elles aussi influencer l'intégrité des organismes végétaux. Egalement, les effets indirects qui concernent les dépôts aux sols sont difficiles à déterminer car leur influence sur les végétaux peut prendre plusieurs années et induire des changements subtils, parfois difficilement perceptibles (Garner, 1994). Néanmoins, plusieurs travaux ont rapporté que les poussières émises par l'exploitation minière pouvaient entraîner des changements physiologiques et morphologiques significatifs des feuilles des végétations environnantes des sites miniers comme, des changements de formes, de taille et de couleur (Sayyed & Sayadi, 2011 ; Prajapati, 2012 ; Leghari *et al.*, 2013). Aussi, la feuille à travers ses divers stades de développement semble apparaître comme un bon indicateur de l'impact des poussières sur la végétation et son utilisation dans des études annuelles tend à se généraliser (Turner, 2013; Pichhode & Nikhil, 2015; Zia-Khan *et al.*, 2015). Il faut cependant souligner que de nombreux auteurs utilisent cet indicateur de façon différente, soit sur le suivi de critères physiques, soit sur le suivi de critères physiologiques ; ceci, rendant parfois la comparaison des résultats des différents travaux peu aisée. Aussi, le suivi de l'impact des émissions atmosphériques des poussières sur la végétation environnante des sites miniers est un domaine de recherche en pleine effervescence à l'échelle internationale, pour les enjeux de développement durable qu'elle représente mais aussi autour du développement d'outils de suivis standardisés et pertinents.

Ainsi, au travers de travaux de recherches de plus en plus nombreux, le suivi des émissions atmosphériques sur la végétation tend inéluctablement à faire partie intégrante dans l'avenir, des études d'impacts de l'industrie minière. Ces suivis et travaux de recherches apparaissent aujourd'hui relativement bien lancés en milieux continentaux et tempérés (Prajapati, 2012 ; Supe & Gawande, 2013 ; Pichhode & Nikhil, 2015). A l'inverse, peu de travaux peuvent être aujourd'hui recensés en milieu tropical, notamment insulaire. Ces milieux, pourtant considérés comme des « moteurs de la biodiversité » depuis au moins 250 millions d'années (Jablonski, 1993), constituent des enjeux de conservation majeurs, mais toujours paradoxalement encore peu étudiés. En effet, du fait de la mondialisation de la chute des barrières géographiques entre nos sociétés et des ressources minérales et métallifères qui s'y concentrent, les milieux tropicaux connaissent aujourd'hui une augmentation constante de l'exploitation minière et des niveaux de perturbations sans précédents de leurs écosystèmes (ELAW 2010), parfois sans que ceux-ci aient pu faire l'objet d'expertises scientifiques exhaustives. Aussi, dans ce contexte et dans ces milieux, il apparaît alors fondamental d'intégrer dès à présent, aux études d'impacts de l'activité

minière sur l'environnement déjà mises en place, cette nouvelle composante que sont les suivis d'émissions atmosphériques de poussières sur la végétation.

I.2 L'IMPACT DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES DE POUSSIÈRES EN NOUVELLE-CALÉDONIE

Archipel de l'océan Pacifique Sud-Ouest, la Nouvelle-Calédonie fait typiquement partie de ces milieux tropicaux insulaires se trouvant confrontés au challenge paradoxal d'avoir à gérer une biodiversité reconnue comme une des plus originales et des plus précieuses de la planète (Harrisson & Rajakaruna, 2011), et une ressource minière considérable. Cela, la Nouvelle-Calédonie le doit à un contexte géologique rare et particulier, lorsqu'il y a 37 millions d'années, se sont déposées sur le socle volcano-sédimentaire qui constituait alors le territoire, des roches ultramafiques d'origines sous marine lors de phénomènes de subduction/obduction (Chevillotte, 2005). Présents aujourd'hui sur un tiers du territoire, ces substrats ultramafiques représentent des habitats exceptionnels à l'échelle de la planète², de par leurs propriétés physicochimiques particulières (L'Huillier *et al.*, 2010). Ces sols présentent une pauvreté sévère en éléments nutritifs essentiels aux végétaux (N, P, K) et en matière organique, de faible capacité d'échange cationique, et de faible disponibilité en eau, mais également un ratio Ca/Mg faible, ainsi qu'un taux élevé en métaux lourds habituellement rangés dans les éléments-traces et potentiellement phytotoxiques (majoritairement Cr, Co, et Ni) (Brady *et al.*, 2005 ; Kazakou *et al.*, 2008). Ces contraintes édaphiques ont favorisé localement une importante diversification végétale résultant de processus de spéciation par radiation adaptative, d'une flore pré-adaptée aux contraintes de ces substrats (Pintaud & Jaffré 2001 ; Isnard *et al.*, 2016). La flore des terrains miniers compte 2150 espèces de plantes vasculaires autochtones et présente un taux d'endémisme de 82% (L'Huillier *et al.*, 2010). Ces phénomènes d'endémisme au sein de la flore néo-calédonienne se trouvent accentués par la fragmentation des massifs de roches ultramafiques dispersés sous formes de klippes sur l'ensemble du territoire, et par la diversification édaphiques qui résulte de différentes évolutions géomorphologiques et pédologiques (Pintaud & Jaffré 2001 ; Isnard *et al.*, 2016), ayant favorisé un micro-endémisme fort (Wulff *et al.* 2013). La flore présente sur massifs ultramafiques y est plus riche et plus originale que la flore de l'ensemble des autres substrats géologiques (2120 espèces, 61% d'endémisme, forêt sèche, forêt humide et mangrove). La flore des terrains miniers représente 35% de la flore autochtone de l'archipel et 45,5% de sa flore endémique (L'Huillier *et al.*, 2010). La flore des terrains miniers participe ainsi pour une part majeure à la richesse et à l'originalité de celle du pays, reconnue de ce fait également

² Les substrats ultramafiques représentent moins de 1% de la surface des terres émergées de la planète (Whiting *et al.*, 2004).

comme un des principaux “hotspot³” mondiaux des flores métallophytes (Myers *et al.*, 2000 ; Whiting *et al.*, 2004).

Parallèlement, les substrats ultramafiques néo-calédoniens contiennent, selon les estimations, près d’un quart des ressources mondiales connues en nickel (source INSG, 2014). Ce minerai, exploité depuis 1873, représente aujourd’hui un moteur essentiel du tissu industriel du pays (95% des exportations, 10% du PIB, 11,8% au secteur de l’emploi) (ISEE, 2010), produisant d’importants effets primaires et induits sur l’économie, il a une influence déterminante sur la démographie, l’aménagement du territoire, les modes de vie et les comportements. Aussi, avec une demande mondiale en nickel en constante augmentation (4% par an entre 2000 et 2010) (L’Huillier & Jaffré, 2010), et la montée en puissance de nouvelles unités de production, la Nouvelle-Calédonie fait face à une augmentation continue des pressions exercées par l’industrie minière sur ses écosystèmes. Les exploitations minières menées sur le territoire nécessitent en effet le décapage du couvert végétal et des horizons superficiels des sols à trop faibles teneurs (« stériles miniers ») parfois jusqu’à la roche mère, afin d’accéder aux couches inférieures riches en minerais exploitables. Outre un impact esthétique négatif résultant de l’accumulation de la destruction des sols et du couvert végétal qui ouvre de larges cicatrices sur les versants montagneux, les conséquences majeures des exploitations minières résultent potentiellement en des perturbations des régimes hydriques favorisant les phénomènes d’érosion, d’engravements des creeks et des cours d’eau inférieures des rivières générant et qui finalement représentent un risque de pollution du lagon néo-calédonien, inscrit au patrimoine mondial de l’UNESCO (UNESCO, 2008). A cela s’ajoute, une perte de la biodiversité globale, ainsi qu’un dépérissement à plus long terme des populations et même d’espèces dont les effectifs deviendraient insuffisant pour assurer le maintien de la diversité génétique en leur sein (Oostermeijer *et al.*, 2003 ; Honnay & Jacquemyn, 2006). Les risques de pertes de biodiversité sont d’autant plus prononcés qu’il s’agit déjà d’écosystèmes en situation critique en raison de leur faible étendue et des phénomènes de micro-endémismes présents sur le territoire (Wulff, 2012), de leur fragmentation ou des risques d’incendies (L’Huillier *et al.*, 2010).

Néanmoins, ces risques sont aujourd’hui bien identifiés (SERA, 2014), et nombres d’actions d’anticipations (études d’impact, recherches), et d’actions correctives (réhabilitation, restauration) sont mises en œuvre afin d’y faire face. Pourtant à ce jour, l’impact potentiel des émissions atmosphériques de poussières sur la flore est toujours largement encore sous-étudié sur le territoire. Ce risque est pourtant bien réel. En effet, avec soixantaine d’hectares de végétation qui seront défrichées pour les 5 prochaines années, l’industrie minière en Nouvelle-Calédonie présente un important potentiel, durant l’ensemble de son activité, et même après si aucune mesure de restauration de la couverture végétale n’est entreprise, de

³ Zone biogéographique, terrestre ou marine, possédant une grande richesse de biodiversité particulièrement menacée par l’activité humaine (Mittermeier *et al.*, 2004).

contribuer de manière significative à l'émission atmosphérique d'importantes quantités de poussières, capables d'impacter les écosystèmes du pays. Il est alors essentiel de développer dès maintenant des outils et études de surveillance de cette nouvelle menace, afin que la Nouvelle-Calédonie "continue" à ne pas hypothéquer ses possibilités de développement à long terme, lorsque les « ressources du vivant » devront pallier l'épuisement de la ressource minière (L'Huillier *et al.*, 2010).

I.3 L'ÉTUDE VALE EN NOUVELLE-CALÉDONIE ET SES OBJECTIFS

VALE SAS en Nouvelle-Calédonie est une entreprise d'extraction de minerai et de production de nickel et de cobalt. Situé dans le sud du territoire, le complexe industriel, dénommé « Usine du Grand Sud » totalise une empreinte de 1 900 hectares. Consciente de l'environnement unique dans lequel elle mène ses activités, VALE SAS s'est engagée dès son implantation sur le territoire en 2005, à créer et mettre en œuvre des dispositifs spécifiques pour accompagner le développement durable des activités minières en Nouvelle-Calédonie. Pour cela, une démarche de conservation de la biodiversité est appliquée à toutes les phases de développement du projet. Elle consiste à éviter et minimiser au maximum les impacts de l'activité sur son environnement, à restaurer et compenser si nécessaire tout impact résiduel. Ces engagements ont été renouvelés et pérennisés en 2009 par la signature avec la Province Sud d'une convention pour la conservation de la biodiversité en Nouvelle-Calédonie. Elle comprend deux axes majeurs : (i) des plans de suivis des milieux et (ii) des plans opérationnels d'actions. (i) L'objectif des plans de suivi des milieux est de surveiller les effets (directs comme indirects) de l'ensemble des activités du projet, sur tous les milieux « récepteurs » situés au sein de la zone d'influence du site minier. Le but étant de détecter de façon très précoce toute modification qui soit significativement supérieur aux changements saisonniers, afin d'en tirer les actions correctives en conséquence. (ii) Les plans opérationnels d'actions de conservation sont destinés à prévenir, éviter, atténuer et compenser les impacts de l'ensemble des activités de l'entreprise sur sa zone d'influence.

A ce jour, avec la montée en puissance de la production de son usine, VALE SAS doit répondre aux impératifs de son développement qui nécessite la réalisation d'une zone de stockage de minerai à long terme (zone SMLT). La mise en place d'une telle zone nécessite le défrichement de 70 hectares et le travail intensif de nombreuses équipes et de nombreux engins miniers de différents types pendant la phase de création de la zone mais aussi pendant sa phase d'exploitation. A terme, cette zone doit pouvoir recevoir 22 625 000m³ de minerais. L'ensemble des activités de création et d'exploitation d'une telle zone présente donc un important potentiel à générer des quantités élevées de particules fines facilement

dispensables par le vent (émissions atmosphériques de poussières), qui pourraient alors présenter un danger pour la végétation alentour. Aussi, toujours consciente des enjeux liés à la conservation de la biodiversité de son environnement et plus largement de celui de Nouvelle-Calédonie, mais également attentive aux nouveaux outils d'étude d'impact des activités minières, VALE SAS développe ici pour la première fois sur le territoire, un plan d'étude de ses émissions atmosphériques de poussières sur la végétation environnante de son site minier. En commun accord avec les services Provinciaux, l'Institut Agronomique néo-Calédonien (IAC), et le service environnement de VALE SAS, cette étude s'attache à l'évaluation des impacts sur la végétation que pourraient avoir l'émission atmosphérique de poussières en provenance de la zone SMLT.

Sur la base bibliographique développée en introduction, il a été fait ici les hypothèses que, (i) il existe bel et bien un effet anthropique sur l'émission atmosphérique de poussières, (ii) que les poussières ainsi émises pourraient avoir des conséquences néfastes sur l'intégrité biologique de la végétation alentour, et (iii) que ces effets varient selon les espèces observées. Pour tester ces hypothèses, un dispositif de suivi des dépôts de poussières sur les feuilles de cinq espèces végétales, a été mis en place à l'intérieur de cinq transects disposés selon un gradient d'éloignement de la zone SMLT. L'effet de dépôts de poussière en surface des feuilles étant susceptibles de se traduire par une dégradation des tissus végétaux – consécutive à une réduction de la photosynthèse ou l'entrave des échanges gazeux stomatiques par opacification des feuilles -, les taux de chloroses et nécroses ont été suivis en tant qu'indicateur physiologique durant une année (cf.I.1). Egalement, afin de discriminer les changements morphologiques foliaires causés par les activités anthropiques et les changements morphologiques naturels qui peuvent se produire sur les feuilles en raison des variations saisonnières, et afin d'identifier l'origine de l'impact potentiel que pourraient avoir les émissions atmosphériques de poussières sur les végétaux, différentes variables environnementales ont également été suivies, à travers la mise en place de station météorologique et de récupération des poussières d'eau de pluie (Jauge Owen). Ce travail, mené pour la première fois sur le territoire doit permettre d'initier le développement d'outils et d'envisager la mise en place de protocoles de suivi des émissions atmosphériques de poussières issues de l'industrie minière sur la flore de Nouvelle-Calédonie, de façon permanente ou ponctuelle, à une plus large échelle.



II. PROTOCOLES ET MÉTHODOLOGIES

II.1 SITE D'ÉTUDE (données VALE 2010-2013)

Le site d'étude (zone SMLT) est situé en Province Sud de la Nouvelle-Calédonie, sur le plateau de Goro, au Nord de l'empreinte du site minier de VALE ($22^{\circ}17'08''\text{S}$; $166^{\circ}56'33''\text{E}$) (Fig. 1A, B., C.). La zone SMLT, d'une altitude variant de 176 à 219m, est encadrée par un relief montagneux à l'Ouest (altitude 219–417m), au Nord (417–351m), et au Nord-Est (351-219m). Les précipitations annuelles moyennes sont de 3490mm (variant en moyennes par mois de 150mm à 500mm). Les températures moyennes minimums et maximums sont de 18°C et 25°C , respectivement. La zone est soumise à l'influence de vents dominants provenant du Sud-Est.

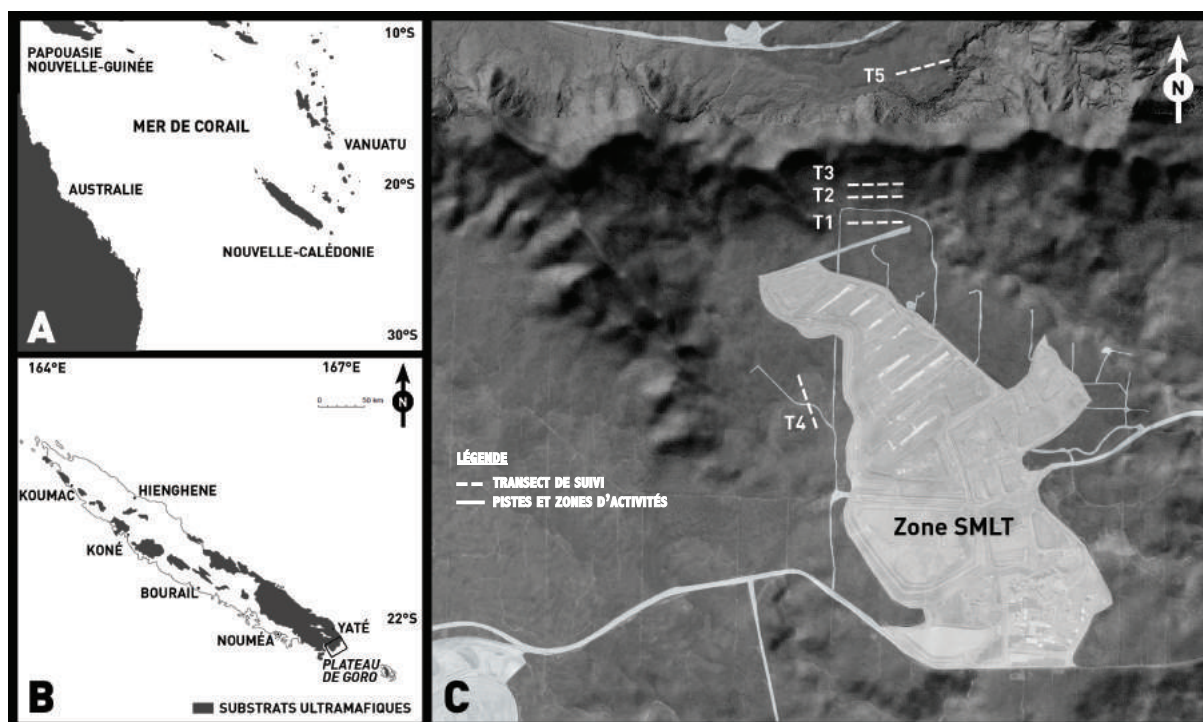


FIGURE 1. A. LOCALISATION DE LA NOUVELLE-CALEDONIE DANS L'OCEAN PACIFIQUE SUD-OUEST. B. CARTE DES MASSIFS ULTRAMAFIQUES DE NOUVELLE-CALEDONIE (EN GRIS) ET LOCALISATION DU SITE D'ETUDE (LE PLATEAU DE GORO), C. CARTE EN RELIEF OMBRE DE LA ZONE D'ETUDE SMLT AU SEIN DU PLATEAU DE GORO, ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE SUIVI DES EMISSIONS DE POUSSIÈRES. T1, transect en maquis arbustif semi-ouvert ; T2, transect en maquis paraforestier ; T3, transect en formation forestière dense humide ; T4, transect en maquis arbustif semi-ouvert à dense ; T5, transect en maquis arbustif semi-ouvert. (SOURCE : VALE SAS 2016, MODIFIEE L.BORDEZ)

II.2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE SUIVI DES POUSSIÈRES

Le dispositif choisi pour cette étude est celui déjà mis en œuvre avec succès dans des travaux similaires par Kumar *et al.* (2008) en Inde pour le suivi de poussières émanant de l'industrie cimentière, ou encore par Chang *et al.* (1999) lors de construction de route sur l'île de Taïwan. L'effet des émissions atmosphériques de poussières sur la végétation autour de la zone SMLT est suivi le long de transects placés à l'intérieur de différentes formations végétales avoisinantes. Ces transects sont disposés selon un gradient d'éloignement de la zone SMLT, considérées ici comme la principale source d'émission atmosphérique de poussières (Fig. 1C). Cinq transects ont ainsi été mis en place,

T1. Un premier transect se situe en zone de maquis arbustif semi-ouvert, formation largement ouverte (sol nu > 35%) de 50 cm à 1,5 m de hauteur. Caractérisé par une réduction de la strate herbacée.

T2. Un second transect se situe en maquis paraforestier, maquis plus dense que le précédent, et plus diversifié. La strate arbustive occupe les deux tiers de la surface, alors qu'un tiers est recouvert par une strate herbacée.

T3. Un troisième transect se situe en zone forestière de la forêt humide, milieu composé de certaines espèces de maquis associées à des espèces forestières présentes dans une strate arborescente bien développée (arbres de 8 à 10m de hauteur).

Il est à noter que ces trois premiers transect ont été ainsi placés sous l'influence des vents dominants du Sud-Est (données VALE SAS 2010-2013),

T4. Un quatrième transect a été matérialisé en zone de maquis arbustif semi-ouvert à dense, se situant au Sud-Ouest de la zone. Formation identique au T1 mais dans laquelle on trouve quelques patches isolés et sur des surfaces restreintes, de végétation pouvant être assimilé à un maquis paraforestier. Cette zone, bien que non soumise à l'influence des vents dominants de la zone, présente un intérêt de suivi puisque c'est ici qu'ont débuté les premières activités de roulage et de préparation de la zone SMLT.

T5. Enfin, un cinquième transect, situé dans le versant opposé du massif Nord surplombant la zone SMLT, considéré comme non exposé aux poussières (ou de manière négligeable) sert de témoin au suivi. Il est placé dans un maquis arbustif semi-ouvert (identique au T1).

Chaque transect a été matérialisé sur le terrain par de la rubalise, et les extrémités ont été géo-référencées. Ces coordonnées sont données en *annexe 1*.

Les quatre premiers transect ont ainsi été placés en « zone » dite « d'influence SMLT » (délimité au nord, à l'est et à l'ouest par le relief montagneux), alors que le transect témoin et lui placé, en dehors de cette « zone d'influence SMLT ».

Cinq espèces communes à chaque transect ont été sélectionnées sur la base d'un travail préliminaire d'inventaire floristique selon l'échelle d'abondance de Braun-Blanquet (Meddour, 2011). Une fois une liste d'espèces communes établie entre chaque transect, cinq espèces ont été choisies pour leur bonne représentativité au sein de chaque transect, s'agissant d'*Alphitonia neocaledonica* (AN), de *Codia spatulata* (CS), de *Gardenia aubryi* (GA), de *Guioa glauca* (GG), et d'*Hibbertia pancheri* (HP). Pour chacune de ces espèces, un total de 10 individus a été suivi par transect, comptent 5 individus adultes (taille supérieure à 1m), et 5

juvéniles (taille inférieure à 1m). Chaque individu a été géo-référencé. Ces coordonnées sont données en *annexe 1*. Pour chaque individu, il a été suivi l'impact des poussières sur les feuilles, à travers l'évaluation visuelle quantitative des dépôts de poussières estimée par l'opérateur par individu (quantité en pourcentage estimée par l'opacification de la feuille déterminée comme suit, 0 aucun dépôt – 100% les dépôts ne permettent plus de voir la feuille). Comme présenté précédemment, les dépôts de poussières sur les feuilles lorsque trop importants peuvent entraîner un déficit en lumière (étiolement), pouvant entraîner des phénomènes de jaunissement des feuilles dus à la perte de chlorophylle (chlorose) et entraîner consécutivement l'apparition de zones de nécroses. Aussi, l'effet que pourrait avoir des dépôts de poussières sur les végétaux a été suivi par l'évaluation des niveaux de chloroses, et de nécroses foliaires sur chaque individu, en terme de pourcentage de surfaces foliaires par individu (Fig. 2 A., B., C., D.). Un indicateur visuel de ces outils est donné en annexe 2.

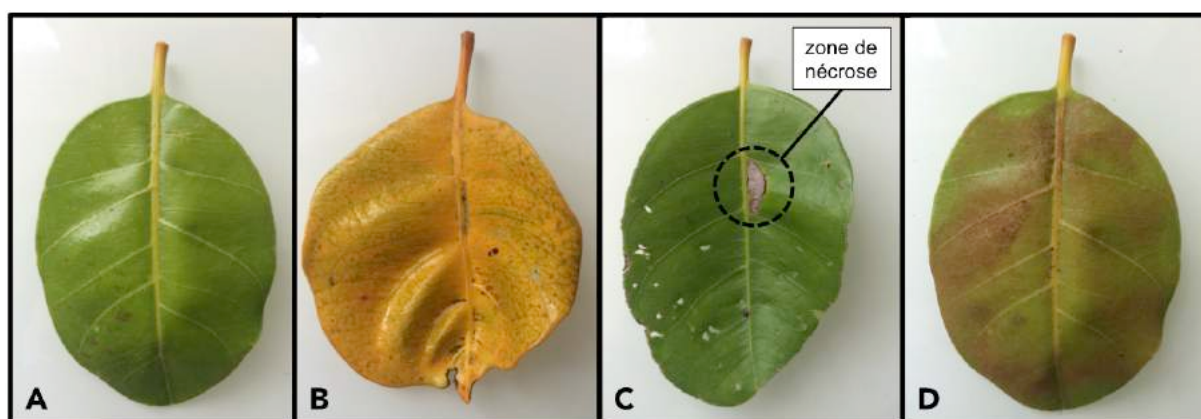


FIGURE 2. EXEMPLE DE FEUILLE A. SAINNE, B. CHLOROSÉE, C. AVEC ZONE DE NECROSE ET D. SAINNE AVEC DEPOT DE POUSSIÈRES. (EXEMPLE SUR FEUILLE DE CHENE GOMME (*Arillastrum gummiferum*), ©IAC/ L. BORDEZ).

II.3 SUIVI DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES

Les phénomènes de chloroses et nécroses peuvent également être provoqués par des carences nutritives (azote, phosphore, potassium...), des pH inadéquats, un drainage insuffisant ou un déficit hydrique, un excès de lumière... Aussi, afin de distinguer les changements morphologiques naturels qui peuvent se produire sur les feuilles en raison des variations saisonnières, et afin d'identifier l'origine de l'impact potentiel que pourrait avoir les émissions atmosphériques de poussières sur les végétaux, différentes variables environnementales ont également été suivies. L'intensité lumineuse, la température et l'humidité relative ont été mesurées par l'installation de stations météorologiques aux extrémités de chaque transect (Onset Computer Corporation, Bourne, MA, USA) (Zongo *et al.*, 2015). Chaque station se compose de deux sondes permettant de mesurer ces trois paramètres, montées à l'intérieur d'un dispositif de protection (sonde UA-002-64 pour la température et la luminosité, sonde U23-001 pour l'humidité relative). Chaque station a été installée à l'intérieur d'un dispositif de protection, fixé sur support métallique de 2m de haut (Fig. 3A.). Par ailleurs, le suivi des émissions atmosphériques de poussières ainsi que l'influence des précipitations (suivie ici pour sa capacité à rabattre la poussière sur la

végétation) ont été mesurées par l'installation de jauges Owen aux extrémités de chaque transect ainsi qu'au milieu de ceux-ci. Ces jauges ont été montées et mises en place selon les recommandations de la Norme Française NF X43-014 de Novembre 2003. Une jauge Owen est constituée principalement d'un support métallique cruciforme monté sur une tige de plus de 2m pour réduire la prise en compte de la poussière naturelle qui pourrait venir du sol. Cette tige est montée sur une platine métallique de 40×40cm fixée au sol grâce à des fers à béton. Sur ce support, s'imbrique un bidon en polypropylène, matériau chimiquement inerte pour d'éventuels analyses par la suite, très résistant, de couleur noire afin d'éviter la prolifération d'algues et d'une contenance de 20L. Ces bidons sont fixés au support grâce à des tendeurs et sont surmontés d'un entonnoir en polypropylène d'un diamètre de 216mm respectant les spécifications de la Norme NF X43-014. Un grillage a également été fixé sur l'entonnoir d'une maille de 1×1cm et d'un diamètre de fil de 1mm ayant pour objectif d'empêcher l'introduction de feuilles de surface supérieure au maillage et d'éviter ainsi à l'entonnoir d'être obstrué (Fig. 3B.). **Il est à noter que** l'installation des dispositifs d'enregistrements météorologiques et de relevés des précipitations n'a concerné que les transects 1, 2, 3 et 5 (témoin), le transect 4 étant exempt de ces dispositifs. Ceci en raison de contraintes de temps (coordination du début des relevés avec le début des travaux sur zone, mais également des contraintes de coût matériel).

Enfin, ces relevés terrains ont été complétés par le dispositif météorologique déjà mis en place par VALE autour de son site minier, et géré par l'association Scal'Air, qui fournit des relevés éoliens (sens et force des vents). Egalement, le nombre d'heures travaillées, ainsi que les types d'engins utilisés, et un descriptif du type de travaux menés en zone SMLT journalier ont été fournis par VALE, afin d'identifier l'influence directe que peut avoir l'activité sur zone, sur la production d'émissions atmosphériques de poussières.

L'ensemble des suivis (biologiques et physiques) a été mené sur une année, à compter du 20 mai 2015 jusqu'au 31 mai 2016. Ce temps de suivi a été subdivisé en 8 périodes de relevés, déterminées en fonction de la moyenne des précipitations relevés de 2010 à 2013 dans la zone de GORO (Fig. 4A. et 4B.), et en fonction de la capacité maximale en volume d'eau des jauges OWEN (de l'ordre de 500mm).



FIGURE 3. A. ILLUSTRATIONS DU DISPOSITIF METEO, ET B. DE JAUGE OWEN, SUR TRANSECT 2 (FORMATION PARAFORSTIERE; ©IAC/ C. ZONGO).

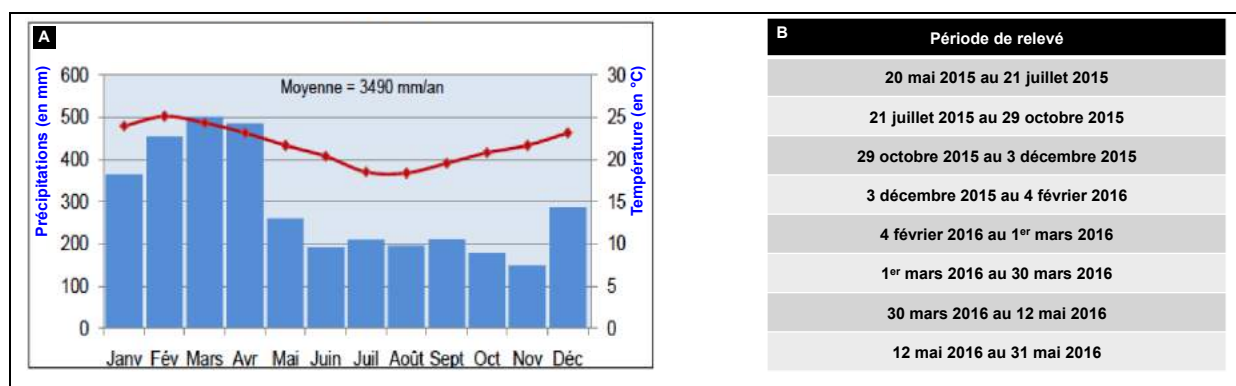


FIGURE 4. A. MOYENNES DES PRECIPITATIONS ET TEMPERATURES POUR LA ZONE GORO SUR LA PERIODE 2010-2013 (DONNEES VALE 2010-2013), ET B. PERIODES DE RELEVÉ DE L'ETUDE.

II.4 ANALYSES STATISTIQUES

Afin de tester un effet temps et un effet espèce au sein de chaque transect, deux types de modalités, à deux facteurs chacune, ont été définis selon les modèles suivants,

Modalité 1 (effet transect-période)

Facteur	Abbrev.	Type	Niveau	Model
Nom				
transect	tr	Fixé	5	tr
période	pr	Fixé	8	pr(tr)
				Residus

Modalité 2 (effet transect-espèce)

Facteur	Abbrev.	Type	Niveau	Model
Nom				
transect	tr	Fixé	5	tr
espèce	sp	Fixé	5	sp(tr)
				Residus

Pour chaque variable suivie, des analyses de variances permutacionnelles (PERMANOVA) (Anderson, 2001) ont d'abord été réalisées afin d'identifier des différences significatives globales, puis des analyses de variance permutacionnelle par paire (PERMANOVA PAIRWISE), ont été réalisées pour comparer chaque modalité 2 à 2. Les résultats obtenus ont été illustrés par des histogrammes.

Dans un second temps, nous avons testé l'existence de corrélations entre nos variables explicables (dépôts de poussières, chloroses, nécroses) et variables explicatives (variables environnementales) par l'utilisation de tests de corrélation statistiques de Spearman. Ces analyses ont été complétées par une analyse canonique des corrélations (CCA) afin de s'affranchir du modèle probabiliste précédent et d'identifier plus globalement les tendances explicatives des observations. L'ensemble des analyses a été réalisé à l'aide des logiciels PRIMER V7 (Primer-E Ltd, 239 Plymouth, Royaume-Uni) et R (R.3.1.1, R fondation) avec des paramètres par défaut. Pour l'ensemble des tests statistiques, les données ont subi une transformation racine carrée (Hellinger). La significativité statistique des tests retenus était $p < 0,05$.

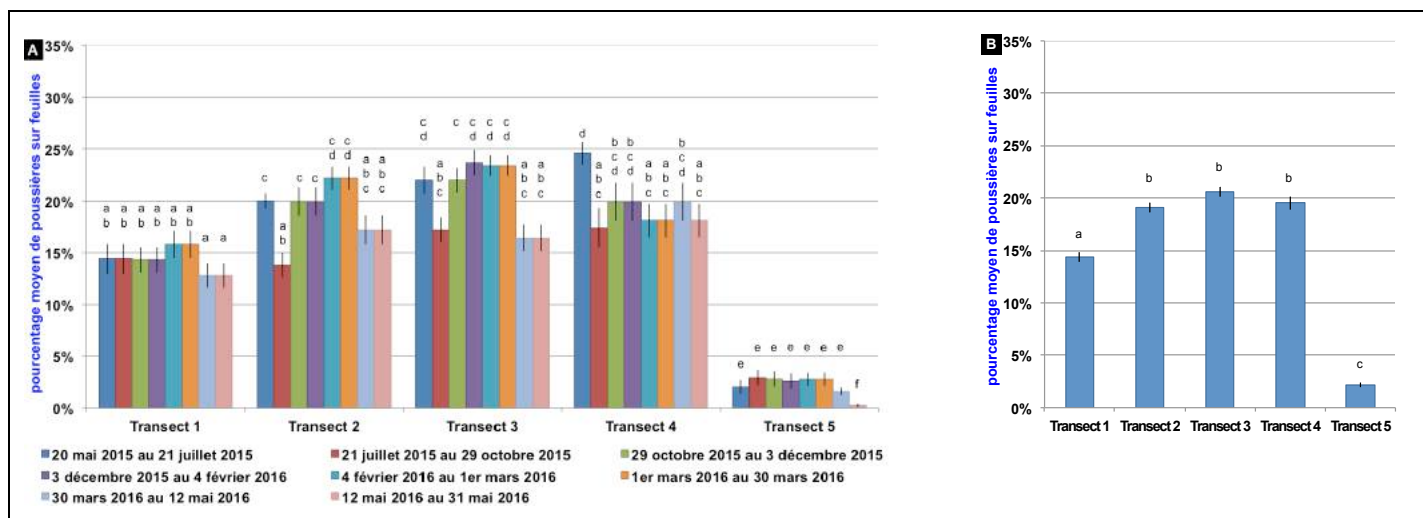


FIGURE 5. A. QUANTITES DE POUSSIÈRES MOYENNES ($\pm$ ES) PAR TRANSECT ET PAR PERIODE POUR L'ENSEMBLE DES ESPECES SUIVIES, ET B. QUANTITES DE POUSSIÈRES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ ES) PAR TRANSECT, TOUTES ESPECES CONFONDUES. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.

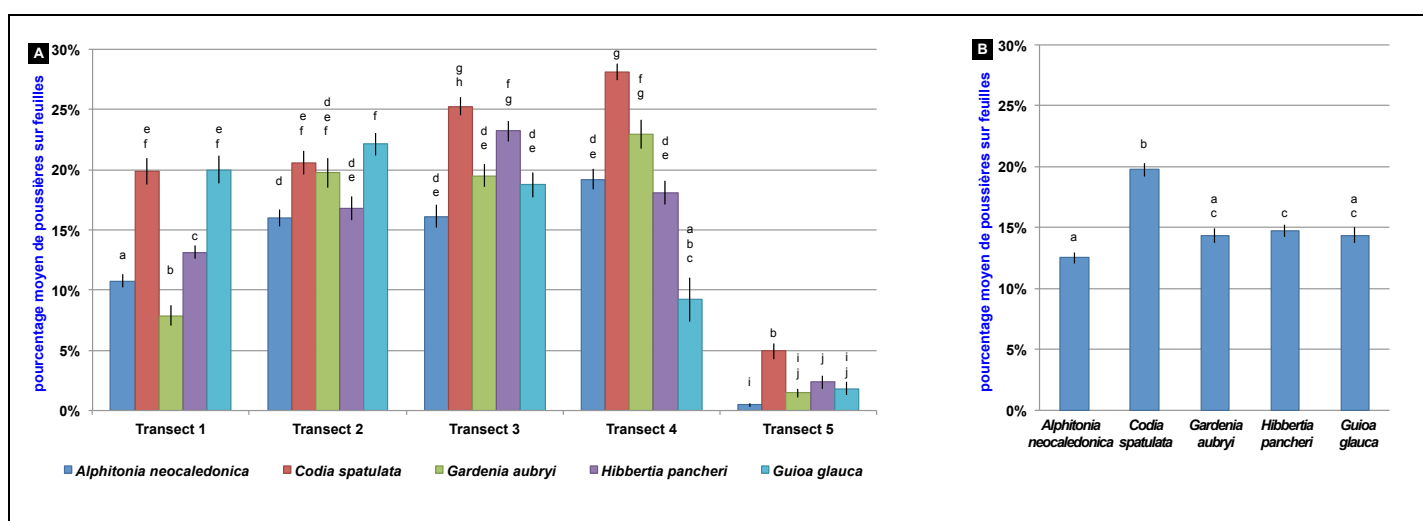


FIGURE 6. A. QUANTITES DE POUSSIÈRES MOYENNES ($\pm$ ES) PAR TRANSECT ET PAR ESPECIE POUR L'ENSEMBLE DE LA PERIODE DE SUIVI, ET B. QUANTITES DE POUSSIÈRES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ ES) PAR ESPECIE, TOUS TRANSECTS CONFONDUS. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.



III. RÉSULTATS

Afin de ne pas rendre confus l'objectif de ce travail, l'ensemble des analyses statistiques des variables environnementales, ainsi que leurs représentations graphiques sont données dans les annexes 3 à 10. Seuls sont présentés dans le corps de ce rapport, les résultats de l'analyse des variables dépôts de poussières, taux de chloroses, et nécroses, et leurs corrélations avec les variables explicatives. Egalement, il est présenté les résultats des taux de poussières observés dans les jauges Owen, jugés importants pour les conclusions de cette étude.

III.1. QUANTITÉS DE POUSSIÈRES OBSERVÉES SUR LES FEUILLES

III.1. 1. GLOBALES PAR TRANSECT

Les quantités de poussières moyennes sur les feuilles par transect, toutes espèces confondues, par période sont présentées dans la figure 5A, et à l'année dans la figure 5B. On remarque sur la figure 5A, que les dépôts moyens de poussières observés varient très peu au sein des transects entre chaque période. Toutefois, il existe un effet significatif du transect sur les niveaux de dépôts moyens à l'année ($p=0,0001$). Ainsi, à l'année, les formations végétales les plus denses (maquis paraforestier T2, formations forestières T3, et formations de maquis semi-ouvert à dense T4) montrent des valeurs moyennes de dépôts de poussières (autour de 20%) significativement plus élevées qu'au sein du maquis semi-ouvert (T1) qui présente une valeur moyenne annuelle de 14%. L'effet transect apparaît encore plus significatif en comparant ces transects au transect 5, considéré comme témoin de l'expérience, et situé en dehors de la zone d'influence SMLT. A l'année, les dépôts de poussières observés sur ce transect sont toujours inférieurs à 5%, avec une moyenne annuelle de 2,20% ($\pm 0,002se$), soit près de 7 fois inférieurs aux dépôts moyens observés au sein du transect 1, pourtant formation végétale équivalente, et près de 10 fois inférieurs à ceux des autres transects.

III.1. 2. PAR ESPECE

Les quantités de poussières moyennes par espèce, toutes périodes confondues, par transects sont présentées dans la figure dans la figure 6A, et par espèce à l'année, tous transects confondus dans la figure 6B. On remarque sur ces figures qu'il existe un effet espèce sur les niveaux de poussières observés sur individu ($p=0,001$). Dans la majorité des cas, c'est l'espèce *Cordia spatulata* qui retient le plus de poussières sur ses feuilles (Fig. 6A), avec une valeur moyenne annuelle confondue pour l'ensemble des transects de 20% ($\pm 0,005se$) (Fig.6B). A l'inverse, *Alphitonia neocaledonica* apparaît comme l'espèce retenant le moins de dépôts de poussières, avec une moyenne à l'année pour l'ensemble des transects de 13% ($\pm 0,004se$). Les trois autres espèces, *Gardenia aubreyi*, *Hibbertia pancheri* et *Guioa glauca*, apparaissent elles comme des intermédiaires avec des moyennes à l'année pour l'ensemble des transects, de l'ordre de 14% ($\pm 0,004se$). A nouveau, on remarque sur la figure 6A que l'ensemble des espèces présentes au sein du transect 5, témoin, ont toutes montré des taux de poussières significativement plus bas que leurs homologues en zone d'influence SMLT.

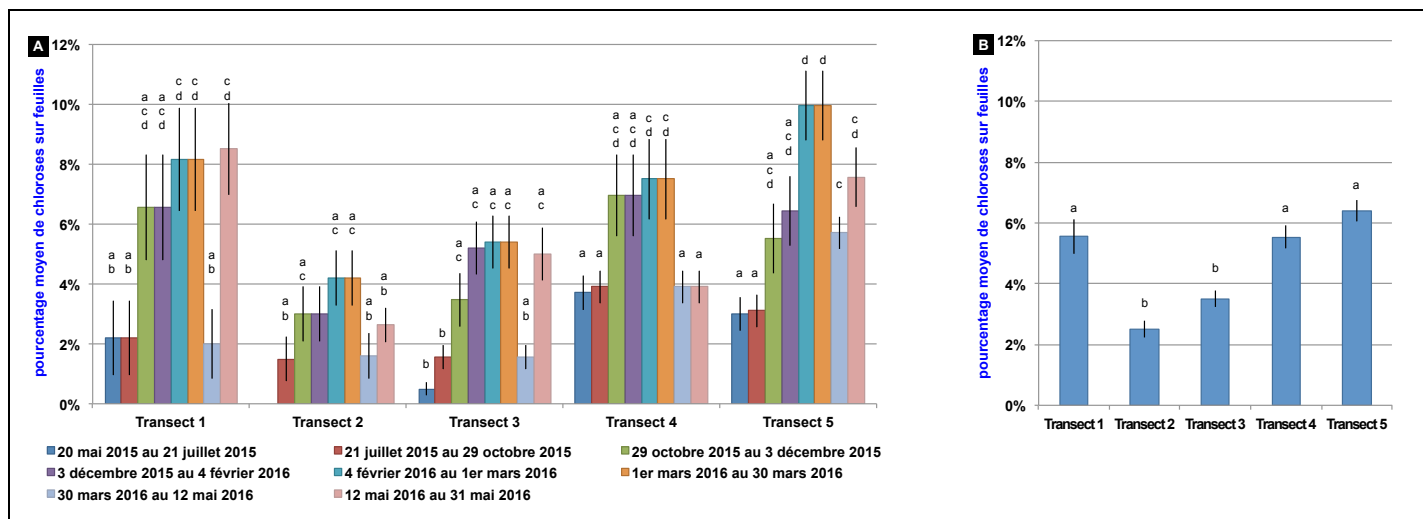


FIGURE 7. A. QUANTITES DE CHLOROSES MOYENNES ($\pm$ ES) PAR TRANSECT ET PAR PERIODE POUR L'ENSEMBLE DES ESPECES SUIVIES, ET B. QUANTITES DE CHLOROSES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ ES) PAR TRANSECT, TOUTES ESPECES CONFONDUES. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.

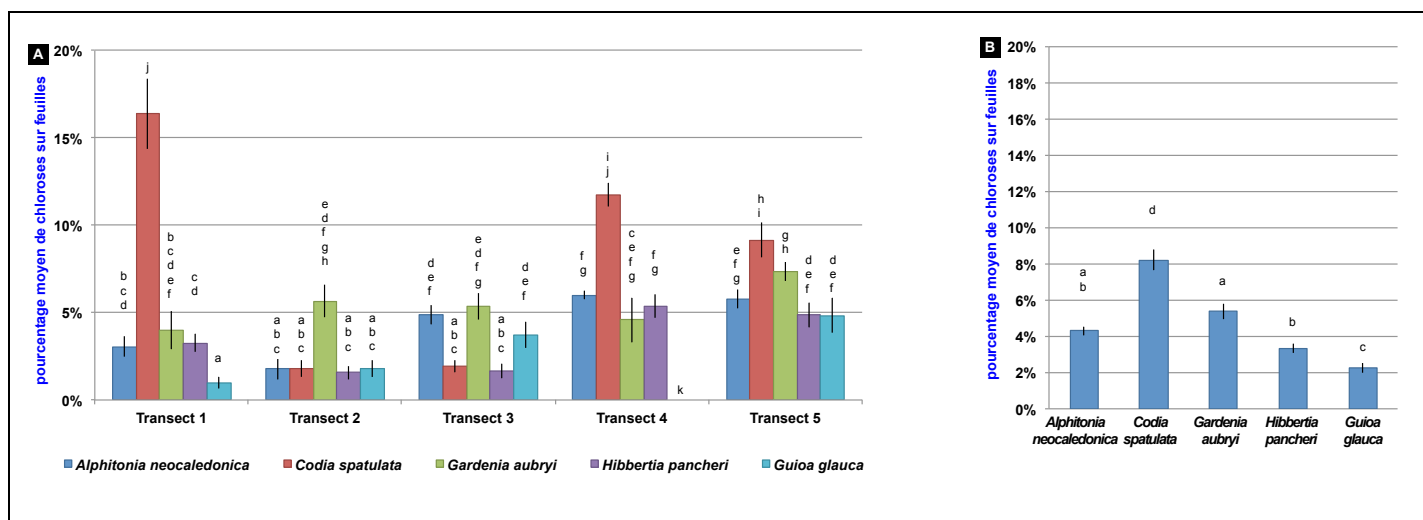


FIGURE 8. A. QUANTITES DE CHLOROSES MOYENNES ($\pm$ ES) PAR TRANSECT ET PAR ESPECE POUR L'ENSEMBLE DE LA PERIODE DE SUIVI, ET B. QUANTITES DE CHLOROSES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ ES) PAR ESPECE, TOUTS TRANSECTS CONFONDUS. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.

III.2. QUANTITÉS DE CHLOROSSES OBSERVÉES SUR LES FEUILLES

III.2. 1. GLOBALES PAR TRANSECT

Les quantités de chloroses moyennes par transect, toutes espèces confondues, par période sont présentées dans la figure 7A, et à l'année dans la figure 7B. On remarque sur la figure 7A. que les valeurs de chloroses moyennes varient significativement à l'année au sein de chaque transect, avec un pic observé pour l'ensemble des transects durant la période d'octobre à mars ($p=0,001$). A l'année, les valeurs moyennes de chloroses les plus élevées sont observées au sein des formations végétales les plus ouvertes, avec des valeurs autour de 6% (maquis arbustifs semi-ouverts T1 et T5, maquis semi-ouvert à dense T4). Ces valeurs sont significativement supérieures de près de 2 fois à celles observées au sein des formations plus denses (maquis paraforestier T2, et formation forestières T3), avec des valeurs moyennes annuelles respectives de 2,52% ($\pm 0,003se$), et 3,51% ($\pm 0,003se$).

III.2. 2. PAR ESPECE

Les quantités de chloroses moyennes par espèce, toutes périodes confondues, par transect sont présentées dans la figure 8A, et par espèce à l'année, tous transects confondus dans la figure 8B. Comme pour les taux de poussières, on remarque qu'il existe un effet espèce quand aux taux de chloroses observés au sein de chaque transect. Dans la figure 8A, on peut voir que l'espèce *Codia spatulata* présente les valeurs moyennes de chloroses significativement les plus importantes pour les transects 1, 4, et 5 ($p=0,001$), correspondant aux formations végétales les plus ouvertes (maquis arbustifs semi-ouverts T1 et T5, maquis semi-ouvert à dense T4). Ces valeurs atteignent pour cette espèce une moyenne de 16% ($\pm 0,02se$) pour le transect 1, près de 4 fois supérieure à celle des autres espèces. Cet écart diminue au sein des transect 4 et 5, avec des moyennes cependant toujours 2 fois supérieures à celle des autres espèces (environ 10%) (exception faite du transect T5, où la moyenne n'est que 0,5 fois supérieure à celle observée pour l'espèce *Gardenia aubreyi*). Au sein des formations de type plus fermées (maquis paraforestier T2, et formation forestière T3), ce sont les espèces *Gardenia aubreyi* et *Alphitonia neocaledonica* qui présentent les valeurs moyennes de chloroses les plus importantes. Les moyennes observées sont toutefois plus faibles que celles observées chez *Codia spatulata* au sein des autres transects, oscillant autour de 5%. Les autres espèces présentent, au sein de ces transects des valeurs moyennes oscillant autour de 2%.

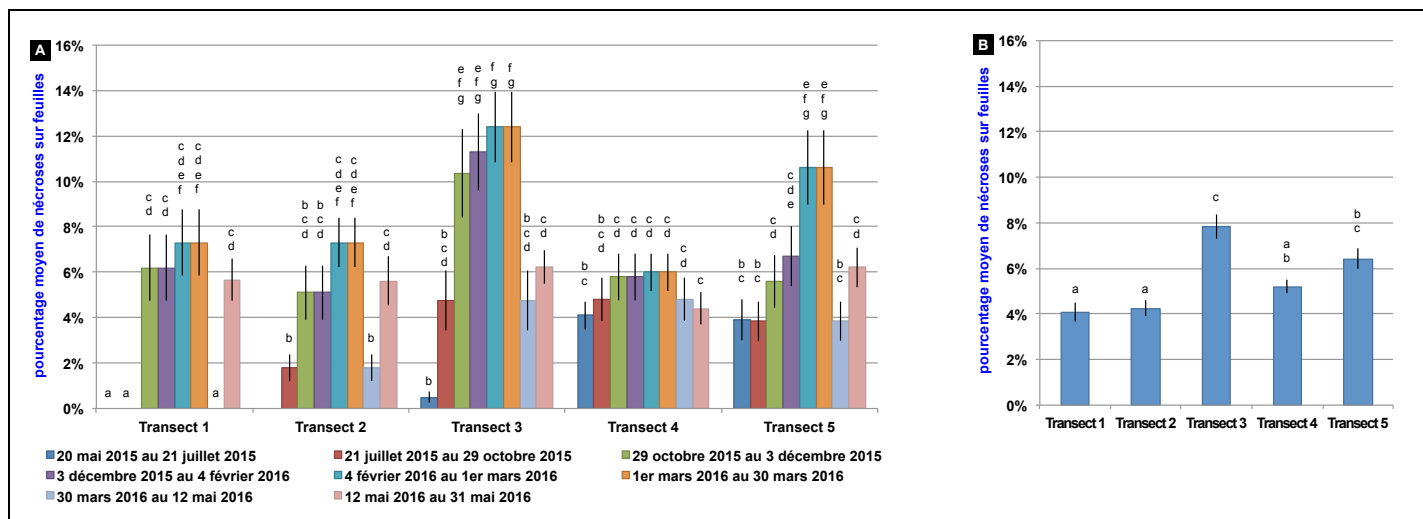


FIGURE 9. A. QUANTITES DE NECROSES MOYENNES ($\pm$ ES) PAR TRANSECT ET PAR PERIODE POUR L'ENSEMBLE DES ESPECES SUIVIES, ET B. QUANTITES DE NECROSES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ ES) PAR TRANSECT, TOUTES ESPECES CONFONDUES. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.

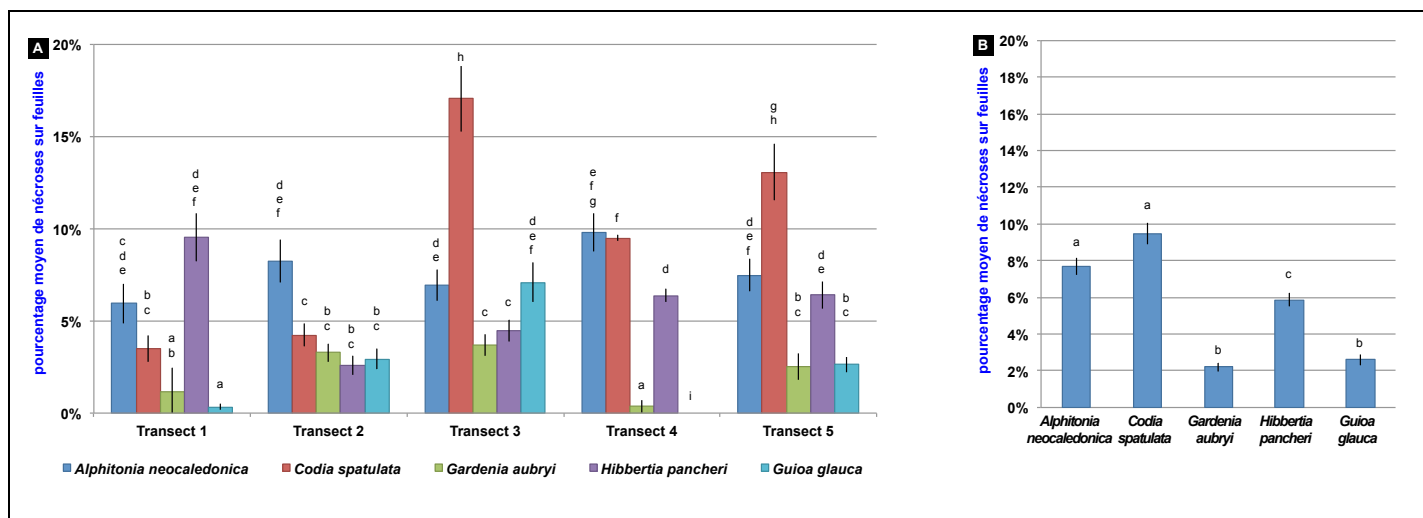


FIGURE 10. A. QUANTITES DE NECROSES MOYENNES ($\pm$ ES) PAR TRANSECT ET PAR ESPECE POUR L'ENSEMBLE DE LA PERIODE DE SUIVI, ET B. QUANTITES DE NECROSES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ ES) PAR ESPECE, TOUTS TRANSECTS CONFONDUS. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.

III.3. QUANTITÉS DE NÉCROSES OBSERVÉES SUR LES FEUILLES

III.3. 1. GLOBALES PAR TRANSECT

Les quantités de nécroses moyennes par transect, toutes espèces confondues, par période sont présentées dans la figure 9A, et à l'année dans la figure 9B. A l'inverse de ce qui a pu être observé pour les taux de chloroses, on observe ici que les taux de nécroses n'apparaissent pas liés au niveau de fermeture de la végétation (Fig. 9A). Les transects 1, 2 et 4 (correspondant respectivement aux formations maquis arbustif semi-ouvert T1, maquis paraforestier T2 et maquis semi-ouvert à dense T4), présentent à l'année des profils similaires de même que les transect 3 et 5 (correspondant respectivement à la formation forestière T3, et au témoin maquis arbustif semi-ouvert T5). Toutefois, comme pour les taux de chloroses, on remarque sur la figure 9A. qu'il existe un effet période sur les taux de nécroses observés. A l'année les taux de nécroses observés par transect sont quasiment similaires entre les transects, avec des valeurs moyennes autour de 4%. De la même façon que pour les taux de chloroses, il existe un pic pour la même période d'octobre à mars, pour l'ensemble des transects, mais néanmoins supérieurs au sein les transect 3 et 5 (formation forestière T3, et maquis témoin arbustif ouvert T5). Les valeurs moyennes de nécroses atteintes au sein de ces transects, d'environ 10 à 12%, étant alors près de 0,5 fois supérieures à celles observées à la même période pour les autres transects

III.3. 2. PAR ESPECE

Les quantités de nécroses moyennes par espèce, toutes périodes confondues, par transect sont présentées dans la figure 10A, et par espèce à l'année, tous transects confondus dans la figure 10B. Comme pour les taux de chloroses décrits précédemment, les analyses statiques ont également révélé un effet espèce sur les taux de nécroses observés ($p=0,0001$). Les espèces montrant les taux de nécroses les plus élevées varient cependant selon le transect considéré. Au sein du transect 1 (maquis arbustif semi-ouvert), c'est l'espèce *Hibbertia pancheri* qui montrent les taux de nécroses les plus élevés avec une moyenne de 10% ($\pm 0,01se$). Au sein du transect 2 (maquis paraforestier), c'est l'espèce *Alphitonia neocaledonica* qui montre les valeurs moyennes de nécroses les plus hautes (8% ($\pm 0,01se$)). Au sein des transect 3, 4 et 5 (formation forestière, maquis semi-ouvert à dense, et maquis arbustif semi-ouvert) c'est l'espèce *Codia spatulata* qui présente les valeurs moyennes de nécroses (exception du transect 4 où l'espèce *Alphitonia neocaledonica* lui est similaire), avec des valeurs moyennes respectives de 17% ($\pm 0,02se$), 9% ($\pm 0,002se$), et 13% ($\pm 0,02se$).

III.4. CORRÉLATIONS

Les analyses de corrélations de Spearman concernant 40 variables explorées, pour peu de corrélations significatives identifiées, (le tableau n'est ici pas fourni, ni dans le corps du texte, ni en annexe afin de conserver une analyse claire), font ressortir que :

- les taux de chloroses observés sont apparus fortement significativement corrélés à l'intensité lumineuse ($r=0,90$, $p<0,0001$). Ce résultat traduit que plus l'intensité lumineuse est importante, plus seront observés des taux de chloroses importants ;
- les taux de nécroses sont apparus fortement significativement corrélés aux taux de chloroses observées ($r=0,75$, $p<0,0001$). Ceci traduisant que plus seront observés des taux de chloroses importants, plus seront observés des taux importants de nécroses ;
- les quantités de poussières observées sur les individus sont apparues significativement corrélées aux taux d'humidité relative observés ($r=0,58$, $p=0,001$), traduisant que plus l'air ambiant présente un taux d'humidité important, plus les taux de poussières observés sur la végétation seront également importants ;
- enfin, les quantités de poussières observées dans les jauges Owen ont été significativement corrélées à la force et à la direction du vent, respectivement $r=0,42$, $p=0,025$ et $r=0,61$, $p<0,0001$. Ces résultats traduisant le fait que plus la force du vent est importante, et la direction adéquate, plus des taux de poussières importants seront récupérés dans les jauges Owen.

Comme présenté dans les protocoles et méthodologies (cf. II.4), une Analyse Canonique des Correspondances (CCA) a été réalisée afin de s'affranchir du modèle probabiliste mis en œuvre pour les corrélations de Spearman. Sans apporter de réponses statistiques au sens d'un seuil significatif, les CCA permettent une analyse conjointe et multivariée des données, visant à expliquer une ou des variables dites « dépendantes » (variables à expliquer) par un ensemble de variables dites « indépendantes » (variables explicatives). La CCA illustrée par une représentation graphique aide ainsi à faire ressortir les relations pouvant exister entre les différentes données et à en tirer une information statistique qui permette de décrire de façon plus succincte les principales informations contenues dans ces données. L'Analyse Canonique des Correspondances des variables de poussières explicables (dépôts de poussières, taux de chloroses et nécroses) en fonction des variables explicatives (variables environnementales) est présentée en figure 11. On peut ainsi voir que la quantité de poussières observée sur les individus (tout individu confondu) semble, sans que cela soit ici significatif au sens statistique, influencée positivement par l'activité en zone SMLT (en nombre d'heures travaillées), mais également par le niveau de fermeture de la végétation (les maquis semi-ouverts captant moins de poussières que les formations forestières), le sens et la force du vent (on retrouve

également l'influence de l'humidité relative comme déjà identifiée par les analyses de corrélations de Spearman). A l'inverse, elle semble négativement corrélées à la pluviométrie. De même que la relation négative entre les quantités de poussières observées et la distance à la zone SMLT s'explique principalement par la position du témoin de notre expérience situé sur le versant opposé de la zone. (Le résultat observable ici apparaît « déformé » par la distance, volontairement exagéré du transect 5, témoin de l'expérience).

Egalement autre résultat important, déjà souligné par les analyses de corrélations de Spearman, les quantités de chloroses observées apparaissent elles, influencées par l'intensité lumineuse journalière. Cela confirme la robustesse de la CCA quant à exprimer des modèles justes.

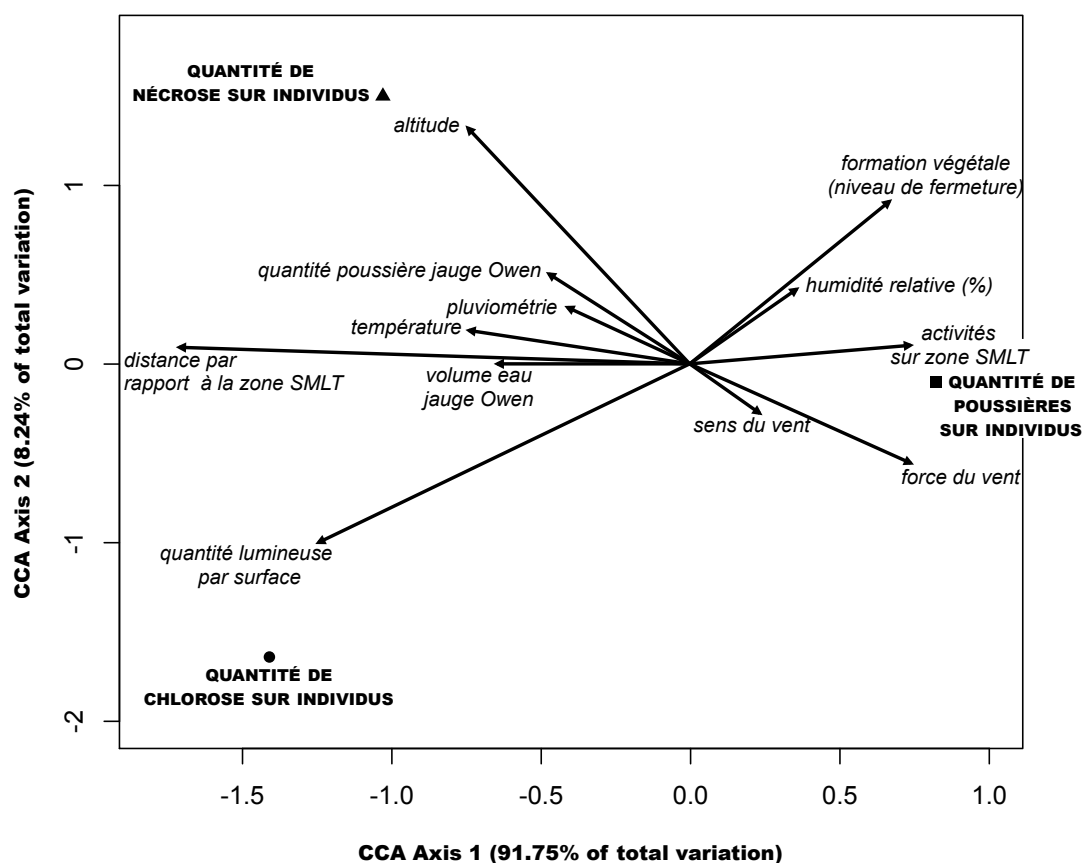


FIGURE 11. ANALYSE CANONIQUE DES CORRESPONDANCES DES VARIABLES DE POUSSIÈRES EXPLICABLES (QUANTITES DE POUSSIÈRES SUR INDIVIDUS, QUANTITES DE CHLOROSE SUR INDIVIDUS, QUANTITE DE NECROSES SUR INDIVIDUS), EN FONCTION DES VARIABLES EXPLICATIVES). STRESS-PLOT = 0,05).

CLE DE LECTURE : Sur ce type de représentation graphique sont positionnées les variables que l'on cherche à expliquer (variables explicatives : dépôts de poussières, taux de chloroses et nécroses, tous individus confondus), en fonction de leurs relations aux variables environnementales. Ces dernières sont symbolisées par des flèches. La longueur de la flèche est proportionnelle à la relation avec la variable explicative, alors que sa direction indique la nature de sa relation, positive si dans le même sens, négative si dans le sens contraires.

III.5. QUANTITÉS DE POUSSIÈRES OBSERVÉES DANS LES JAUGES OWEN

Dernier résultat présenté dans ce rapport, les quantités moyennes de poussières journalières récupérées dans les jauges Owen par période et par transect sont présentées dans la figure 12.A., et les courbes cumulées à l'année par transect sont présentées dans la figure 12.B. Sur la figure 12.A., on constate que les dépôts de poussières à l'année varient entre les périodes observées au sein de chaque transect, avec un pic pour la période de février à avril. Autre remarque importante, les taux de poussières récupérées dans les jauges Owen au sein du transect témoin 5 apparaissent, comme pour les dépôts de poussières observés sur la végétation, significativement plus bas que pour les autres transect. Ce rapport est de près de 5 fois inférieur pour la période de février à avril, et de près une 0,5 à 1 fois inférieur le reste de l'année. Enfin, on remarque que les taux de poussières récupérées montrent une accumulation de celles-ci à l'année, quelque soit le transect considéré (Fig. 12.B.).

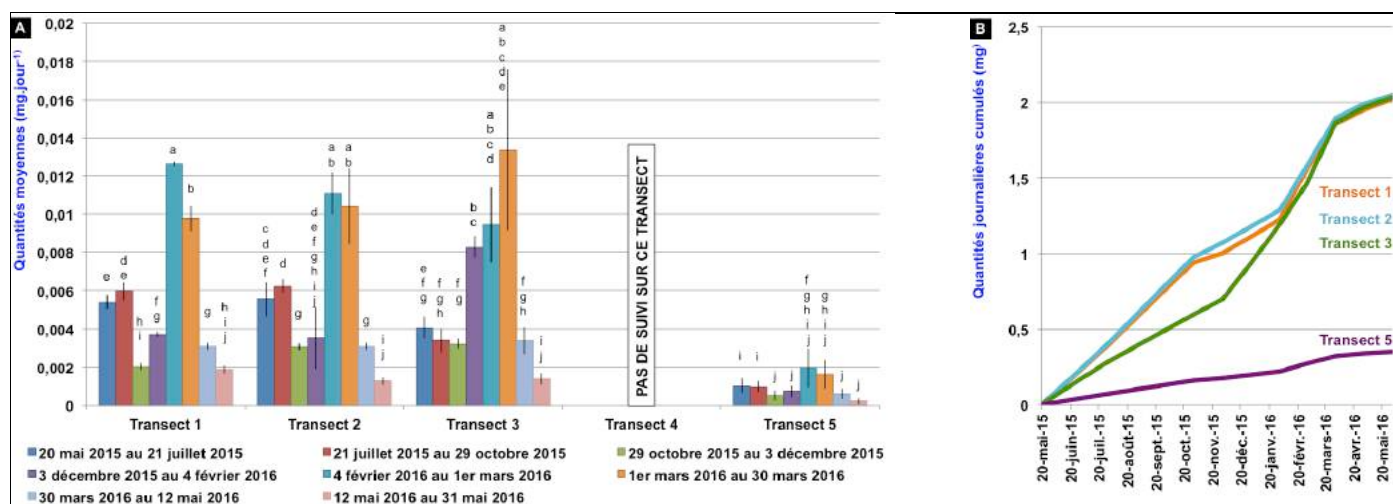


FIGURE 12. A. QUANTITES DE POUSSIÈRES MOYENNES ($\pm$ ES) RECUPERÉES DANS LES JAUGES OWEN PAR TRANSECT ET PAR PÉRIODE, ET B. QUANTITES DE POUSSIÈRES JOURNALIÈRES CUMULÉES SUR L'ANNÉE PAR TRANSECT. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRÉSENTENT LES DIFFÉRENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRÉSENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRÉSENTENT PAS DE DIFFÉRENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.



IV. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet d'émissions atmosphériques de poussières générées par l'activité industrielle minière, ici liées à la phase de création et de début d'exploitation d'une zone de stockage de minerai à long terme (zone SMLT) au sein de l'entreprise VALE SAS, sur la végétation environnante. Pour cela, les dépôts de poussières foliaires ont été suivis sur cinq espèces végétales, à l'intérieur de cinq transects disposés selon un gradient d'éloignement de la zone SMLT. L'effet de dépôts de poussière en surface des feuilles étant susceptible de se traduire par une dégradation des tissus végétaux – consécutive à une réduction de la photosynthèse ou l'entrave des échanges gazeux stomatiques, par opacification des feuilles –, Les taux de chloroses et nécroses ont été suivis en tant qu'indicateurs physiologiques durant une année.

IV.1 EFFET GLOBAL

IV.1.1. Observation de dépôts de poussière

Les premières observations menées dans cette étude ont confirmé i) la présence de dépôts de poussières sur la végétation environnante la zone SMLT, dans et en dehors de la zone d'influence SMLT, ainsi que ii) un effet anthropique sur l'origine des émissions et quantités de poussières émises dans l'atmosphère et des dépôts observés sur la végétation. En effet, les dépôts de poussières observés sur la végétation à l'intérieur de la zone d'influence SMLT sont apparus statistiquement significativement supérieurs (près de 5 fois) à ceux observés sur le transect témoin, situé hors de la zone d'influence des poussières émises par les travaux en zone SMLT. D'autre part, les dépôts de poussières sont apparus, sans toutefois être statistiquement significatifs, être le plus influencés par l'activité des engins miniers sur la zone (en nombre d'heures travaillées). Ceci signifiant que plus l'activité minière en zone SMLT est importante, plus les dépôts de poussières observées sur la végétation environnante seront importants. Ces résultats sont cohérents avec les observations des études précédentes soulignant un lien entre l'activité industrielle et l'augmentation dans l'air de poussières, ainsi que les niveaux de dépôts observés sur la végétation environnante des sites miniers (Prajapati, 2012 ; Leghari *et al.*, 2013 ; Turner, 2013 ; Pichode & Nikhil, 2015).

Autres points à souligner concernant les dépôts de poussières, ceux-ci sont également parus influencés (sans toutefois être significatifs) par la force et la direction du vent, ainsi que par le type de végétation. En effet, plus la force du vent est importante, plus les dépôts de poussières observés ont été importants. Egalement, les milieux fermés (maquis paraforestier et formations forestières) sont apparus comme les milieux qui captent le plus de poussières, alors que les milieux ouverts (maquis arbustif) apparaissent comme ceux qui en captent le moins, et ceci malgré le fait que le maquis arbustif suivi soit plus près de la zone SMLT que les autres formations végétales. Enfin, les dépôts de poussières observés sont apparus

inversement corrélés à la pluviométrie, traduisant que plus les précipitations sur zone SMLT seront importantes, moins les dépôts de poussières sur la végétation seront élevés. Ces résultats révèlent qu'une fois émises dans l'atmosphère, les poussières tendent à être d'avantage rabattues sur la végétation en cas de grand vent, mais aussi d'avantage captées par les formations végétales les plus denses. La seconde partie de ces résultats tend elle, à démontrer que les précipitations pourraient contrebalancer les dépôts par un effet lessivage, permettant un maintien à l'année de niveaux de poussières relativement stables comme observés ici. A l'année, les valeurs de ces dépôts ont en effet montré peu de variations, avec des valeurs annuelles fluctuantes autour de 20%. Cet effet lessivage a pu être confirmé par les pièges à poussières (jauges Owen) placés au sein de chaque transect, et qui bien que « vidées » à intervalle régulier, ont constamment montré des « recharges » en poussières, sans pour autant que ces poussières s'accumulent sur la végétation. A nouveau, l'ensemble de ces observations confirme celles rapportées, à travers la littérature scientifique, dans des études précédentes. Dans leur revue de travaux concernant l'impact des émissions atmosphériques de poussières à l'échelle du globe, Raupach *et al.* (2001), Kumar *et al.* (2008), Ulrichs *et al.*, (2008), ou encore Prajapati (2012), ont rapporté que les dépôts de poussières sont influencés par deux axes majeurs, i) les dépôts secs, et ii) les dépôts humides. i) les dépôts secs, résulteraient d'un effet combiné des conditions éoliennes (force et direction du vent), qui tendent à rabattre les poussières sur la végétation, et des propriétés de la végétation. Les formations végétales denses étant susceptibles de capter jusqu'à 6 fois plus de poussières que les formations moins denses pourtant moins éloignées des différentes sources d'émissions de poussières étudiées. Les dépôts humides ont quand à eux, été rapportés pour avoir deux effets distincts, dépendants directement de l'ampleur des précipitations. De faibles conditions de précipitations (assimilable à des conditions de brume, de brouillard, de rosée...), tendent à rabattre et fixer les poussières sur la végétation, alors que lorsque les précipitations deviennent plus importantes, un effet inverse de lessivage tend à être observé (Cape, 1993 ; Grantz *et al.*, 2003). Les événements importants de précipitations apparaissant ainsi pour « nettoyer » la végétation, notamment par ruissellement, et éliminer les dépôts qui peuvent se produire lors des périodes sèches ou de faibles précipitations.

IV.1.2. Observation de chloroses et nécroses foliaires

Des phénomènes de chloroses et de nécroses ont également été observés au sein de chaque transect pour l'ensemble des espèces suivies, pour chaque période. Les profils présentés par ces deux variables sont sensiblement les mêmes à l'année. Les taux de chloroses et nécroses relevés montrent des variations annuelles d'augmentation et de diminution, avec un pic pour la période de octobre-mars. A l'année, les niveaux de chloroses et de nécroses observés apparaissent relativement bas, avec des moyennes respectives ne dépassant pas les 8% et les 10% de la surface foliaire de l'individu. Il est également à noter qu'à l'inverse de ce qui avait pu être observé pour les dépôts de poussières, les taux de chloroses et de nécroses observés sur la végétation alentour de la zone SMLT, ne présentent

statistiquement aucune différence de moyennes avec le transect témoin. Pour l'un comme pour l'autre, les taux de chloroses et de nécroses observés ne sont pas apparus corrélés aux dépôts de poussières observés et décrits précédemment. Les taux de chloroses sont cependant apparus fortement corrélés significativement à l'intensité lumineuse ($r=0,90$, $p=6,98 \cdot 10^{-11}$), traduisant que plus l'intensité lumineuse est importante, plus les quantités de chloroses observées sont importantes. Confirmant ce résultat, les niveaux de chloroses sont en effet apparus les plus importants pour les milieux les plus ouverts recevant le plus de lumière (maquis arbustif semi-ouvert) et les moins importants pour les milieux les plus fermés (maquis paraforestier et formation forestière). Les taux de nécroses sont eux apparus fortement corrélés significativement aux taux de chloroses observés ($r=0,75$, $p=9,67 \cdot 10^{-05}$), traduisant que plus un individu sera chlorosé, plus il aura tendance à également montrer des signes de nécroses.

En première analyse, il apparaît que les résultats observés ici entrent en contradiction avec de nombreuses études qui rapportent un effet des dépôts de poussières foliaires sur l'intégrité physiologique des végétaux environnants les zones industrielles d'émissions (Ukpaka *et al.*, 2011, Leghari, 2013 ; Pichhoda & Nikhil, 2015). Ces auteurs, et nombre d'autres ont en effet rapporté que des dépôts de poussières en quantités trop importantes, ont entraîné par opacification des feuilles, une augmentation de température et/ou une diminution des quantités de lumière perçues entraînant une diminution des pigments chlorophylliens et consécutivement des phénomènes de chloroses, précédant eux-mêmes des phénomènes de nécroses. Il est toutefois difficile de comparer les résultats de cette étude avec les travaux précédents en terme de valeurs moyennes observées, car mettant en œuvre des outils ou unité d'évaluation différents. Toutefois, les travaux de Farmer (1993), comme ceux de (Grantz *et al.*, 2003), les seuls à notre connaissance, rapportent eux un « effet quantité » des dépôts de poussières par des valeurs de dépôts en dessous desquels ceux-ci puissent ne porteraient pas atteinte à l'intégrité physique des tissus végétaux. Aussi, nous pouvons faire l'hypothèse que dans le cadre de cette étude, les dépôts de poussières observés sur la végétation environnante n'ont pas atteint cette « valeur limite » au delà de laquelle auraient pu être causées des dégradation des tissus foliaires, tels que chloroses ou nécroses. Comme telles donc les observations réalisées ici semblent d'origine naturelle, dépendantes d'un excès d'intensité lumineuse. Ce phénomène n'est pas inhabituel et a été décrit très tôt. Dans leurs travaux, Marschner & Cakmak (1989), ou Vallée & Bilodeau (1999) rapportent que les phénomènes de chloroses et de nécroses chez les végétaux augmentent avec l'intensité lumineuse, et d'avantage pour des végétaux en situation de carences nutritives, comme cela peut être le cas sur sol ultramafique (cas de l'étude).

Ainsi, bien qu'ils puissent être observés des phénomènes de chloroses et de nécroses, ceux-ci ne sont pas apparus comme causés par les niveaux de dépôts de poussières observés. A l'inverse, l'étude des variables environnementales tend à confirmer une origine naturelle des phénomènes observés avec un excès de lumière pour cause majeur des niveaux de chloroses observés. Les niveaux de nécroses observés apparaissent quand à eux, consécutifs aux phénomènes de chloroses précédents. Il faut néanmoins souligner que l'effet

des dépôts de poussières observés puissent dépendre des quantités observées. Aussi, les conclusions de cette partie ne doivent être considérées comme valables que pour des dépôts de poussières inférieurs à 20% comme observés dans cette étude.

IV.2 EFFET ESPECE

Autre résultat important de cette étude, l'effet espèce qui est apparu pour chacune des variables observées (niveaux de poussières, taux de chloroses ou taux de nécroses observés). Pour chacune de ces variables, l'espèce *Codia spatulata* apparaît comme celle qui présente significativement les dépôts de poussières, et les taux de chloroses les plus importants ($p\text{-value} < 0,05$) et, mais sans que cela soit cette fois significatif, les taux de nécroses les plus importants. Les autres espèces montrant des sensibilités variantes selon la variable observée. Encore une fois, les observations réalisées ici rejoignent celles d'un grand nombre d'études rapportant un même effet espèce de la végétation face aux émissions atmosphérique de poussières. Turner (2013) en Australie, Supe & Gawande (2013) en Inde, Zia-Khan *et al.* (2015) en Chine rapportent que les dépôts de poussières observés varient selon les espèces végétales en fonction notamment des propriétés de surface des feuilles telles que leur géométrie, leur phyllotaxie, leur propriétés épidermiques (pubescentes, rugueuses...), leur mouillabilité, leur rugosité... Dans le cadre de cette étude, il semble que les dépôts de poussière plus élevés observés chez *Codia spatulata* s'expliquent par leur position « quasiment horizontale » et leur forme (large et ronde) qui pourrait réduire les phénomènes de lessivage (à l'inverse, les feuilles de toutes les autres espèces montrent une inclinaison).

Egalement, Farmer (1993) en Angleterre rapporte que les espèces épiphytes seraient plus sensibles que les espèces d'herbes, d'arbustes ou d'arbres, aux dépôts de poussières, et consécutivement aux phénomènes de chloroses et nécroses. Supe & Gawande (2013) rapportent encore dans leur revue, que les stomates des différentes espèces végétales, susceptibles d'avoir des diamètres variants, réagissent alors différemment selon la nature physique des poussières émises dans l'atmosphère (ici selon le diamètre des particules de poussières émises). Egalement, il a pu être observé dans cette étude et de façon spécifique pour les individus d'*Hibbertia pancheri* des zones de nécroses qui semblaient consécutives à un parasitisme par un coléoptère de l'espèce *Megatracheloides chloris* (identification C. MILLE – Chercheur IAC, Faust, 1889 / annexe 11 A. B. et C.). L'impact de cet insecte, difficilement quantifiable, pourrait cependant éventuellement interférer avec les résultats précédents. L'ensemble de ces remarques doit être considéré avec importance, car il insiste sur le fait que les résultats de cette étude ne doivent être interprétés qu'avec une certaine réserve, s'agissant de réponses spécifiques de certaines espèces et non de la communauté floristique environnante la zone SMLT. Les 5 espèces étudiées lors de ce travail ne représentent finalement que près de 2% des 230 espèces identifiées autour de la zone SMLT. Aussi, il apparaît important de poursuivre les travaux de suivis sur d'autres espèces afin de confirmer les conclusions avancées ici.

CONCLUSION

Le travail mené ici a permis de pleinement répondre aux questions posées.

i) Les résultats obtenus lors de cette étude ont confirmé un effet anthropique des émissions atmosphériques de poussières de près de 5 fois supérieur à ce qui peut être observé en milieu naturel. Les niveaux d'émissions de poussières observés sont apparus pour être influencés par le nombre d'heures travaillées par les engins miniers. Parallèlement, il a été mis en évidence qu'une fois émises ces poussières ont tendance à être d'avantage rabattues sur la végétation et d'avantage captées par les formations végétales de type dense qui sont aussi les plus riches en espèces. Les résultats démontrent également un effet des précipitations qui tendrait à contrebalancer les dépôts de poussières par un effet lessivage, permettant un maintien à l'année de niveaux de poussières relativement stables aux alentours de 20% dans le contexte de cette étude.

ii) Egalement, bien que des phénomènes de chloroses et de nécroses aient été observés, ceux-ci ne sont pas apparus comme causés par les niveaux de dépôts de poussières observés précédemment. Ces phénomènes trouvent ici une explication naturelle, dus pour les chloroses, à un excès d'intensité lumineuse, après lesquels semblent apparaître consécutivement des phénomènes de nécroses. Ce résultat est apparu en contradiction avec l'hypothèse de départ de l'étude, mais aussi une majorité de résultats à travers la littérature, selon laquelle *des dépôts de poussières sur la végétation ont un effet néfaste portant atteinte à l'intégrité biologique des végétaux*. Toutefois, ce résultat est à relativiser. Plusieurs auteurs rapportent qu'il existerait une valeur des dépôts de poussières en dessous de laquelle ceux-ci ne semblent pas porter atteinte à l'intégrité physique des tissus végétaux. Aussi, il faut garder en tête que l'absence, dans cette étude, de corrélation entre les dépôts de poussières observés et les phénomènes de chloroses-nécroses, pourrait s'expliquer par le fait que les valeurs des dépôts observés ici (20% en moyenne) puissent se trouver sous cette « valeur seuil » au delà de laquelle les dépôts de poussière auraient pu porter atteinte à l'intégrité biologique des végétaux. Cette information est d'autant plus importante que,

iii) les résultats de l'étude ont confirmé l'hypothèse de l'existence d'un effet espèce sur les réponses observées aux dépôts de poussières, ainsi qu'aux phénomènes de chloroses et nécroses. Ceci confirme les résultats des travaux précédents qui ont mis en exergue des sensibilités significativement différentes entre les espèces végétales face aux émissions de poussières. Aussi, il faut souligner que seules 5 espèces végétales (ici communes aux différents habitats suivis) sur les 230 recensées aux alentours de la zone SMLT ont fait ici l'objet d'un suivi (soit seulement 2% de la diversité végétale du site). Il serait donc prudent d'étendre le suivi sur d'autres espèces (également communes aux habitats, ou à fort recouvrement) afin de confirmer les conclusions de cette étude.

Enfin, il nous semble important de terminer en insistant sur le fait que les résultats de cette étude ne sont valables que pour les valeurs moyennes identifiées des variables influençant les phénomènes de dépôts, chloroses, ou nécroses (temps de travail journalier des engins inférieur à sept heures, dépôts de poussières, précipitations mensuelles minimums

120mm...), et qu'en cas d'une modification de valeurs d'une de ces variables, les conclusions pourraient alors évoluer. Aussi, dans le cadre de l'évolution de l'activité en zone SMLT dans les prochaines années (activité de création vers activité d'exploitation), il est suggéré de poursuivre ce type d'étude afin d'évaluer l'influence que pourrait avoir un changement des variables influentes.

Cette étude, la première du genre menée sur le territoire a permis d'initier le développement d'outils de suivi des émissions atmosphériques des poussières émises par l'industrie minière sur la végétation, et de valider la robustesse des indicateurs développés, et du protocole de terrain et de suivi. Ce type de travail tendant inéluctablement à intégrer les études d'impacts relatives à l'industrie minière, permet d'ores et déjà, à travers les résultats obtenus, la mise en place de suivi des émissions atmosphériques de poussières issues de l'industrie minière sur la flore de Nouvelle-Calédonie à une plus large échelle.

LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE

Bien que le dispositif expérimental mis en œuvre dans cette étude se soit révélé pertinent pour le suivi des émissions atmosphériques de poussières générées par l'industrie minière, et l'évaluation de leurs effets sur la végétation environnante, plusieurs points peuvent cependant être pris en compte afin d'améliorer les outils de surveillance, et les conclusions de ce type d'études.

SUR LE SUIVI DES EFFETS DIRECTS, QUI CONCERNENT LES DEPOTS DE POUSSIÈRES QUI ONT LIEU DIRECTEMENT SUR LES VEGETAUX

A nouveau, il est important de commencer par rappeler ici que les conclusions apportées dans cette étude ne sont valables que pour les seuils identifiés des variables influençant les phénomènes de dépôts, chloroses, ou nécroses (temps de travail journalier des engins inférieur à sept heures, dépôts de poussières inférieurs à 20%, précipitations mensuelles minimums 120mm...). Les valeurs observées des variables, susceptibles d'évoluer d'une année à l'autre, doivent servir, en cas d'absence de suivi permanent, d'indicateur au déclenchement de suivi des effets de poussière sur la végétation, puisqu'en cas d'une modification d'une seule valeur, les effets sur la flore pourraient alors évoluer. Par exemple, en cas de dépassement significatif des heures moyennes travaillées sur zone, ou de la force moyenne du vent influençant les dépôts de poussières, ou encore les précipitations qui sont apparues ici pour avoir un effet lessivage de ces dépôts de poussières, devraient être prises en compte dans le maintien du suivi. Pour ce dernier cas, une diminution significative des niveaux moyens de précipitations, pourraient alors ne plus être suffisants pour assurer un lessivage des feuilles, au risque même d'avoir un effet inverse, fixateur de poussières sur la

végétation comme évoqué plus haut, avec des conséquences plus négatives pour la végétation.

Il faut également souligner que les conclusions avancées ici ne sont issues que du suivi après une année. Il est possible que l'influence des dépôts de poussières, en quantités telles qu'observées ici, puissent prendre plusieurs années (5 et 10 ans au moins). Aussi, il serait prudent de faire un nouvel état de l'intégrité physiologique des tissus foliaires suivis dans cette étude afin d'écarter un effet temps.

A cela s'ajoute que seule l'intégrité des tissus foliaires a été suivie dans cette étude, aussi il sera prudent d'envisager un suivi sur d'autres paramètres de santé des végétaux telles que leur floraison, leur fécondité, leur fructification...

Par ailleurs, comme largement rapportés dans la littérature et à nouveau démontrés lors de cette étude, les résultats relevés ici ont permis de mettre en évidence un effet espèce dans la réponse des végétaux aux dépôts de poussières. Aussi, il serait prudent de poursuivre la surveillance sur d'autres espèces qui pourraient se révéler plus sensibles que celles suivies ici. Notamment, sur les épiphytes, ou encore les mousses et mêmes d'autres organismes comme les lichens qui ont été rapportés pour être parmi les groupes les plus sensibles aux émissions atmosphériques de poussières. A nouveau, il faut rappeler que l'étude menée ici n'a concerné que 5 des 230 espèces végétales identifiées dans la zone d'influence SMLT, soit seulement près de 2% de la diversité végétale du site (et moins si l'on considère la diversité végétale du Grand Sud). A noter que les résultats obtenus sur *Codia spatulata* (espèce ici apparue comme la plus réceptrice aux dépôts de poussière) pourrait être utilisée comme indicateur de l'impact des émissions atmosphériques de poussière puisqu'abondamment répandue dans le Grand Sud.

Egalement, sur la base du travail bibliographique sous jacent à cette étude, il apparaît qu'une nouvelle méthodologie de suivi des émissions atmosphériques de poussières, toujours basée sur l'utilisation de la feuille comme indicateur, tend à se développer à l'échelle internationale. On trouve ainsi de plus en plus dans la littérature, des suivis des dépôts de poussières exprimés en masse de poussières par unité de surface foliaire et par unité de temps (Afrique : Ukpaka *et al.*, 2011 ; Inde : Prajapati ; 2012 ; Australie : Turner, 2013 ; Chine : Zi-Khan *et al.*, 2015). Outre, le fait de faciliter les comparaisons entre les différents travaux, la prise en compte de cette nouvelle méthodologie permettrait une valorisation augmentée de futurs travaux lors de communication scientifique.

SUR LE SUIVI DES EFFETS INDIRECTS, QUI CONCERNENT LES DEPOTS DE POUSSIÈRES SUR LE SOL AUTOUR DES PLANTES

Ce point n'a ici pas été suivi car les effets indirects des poussières sur la végétation tendent à induire des changements plus lents (et parfois plus subtils) que les effets directs, et nécessitaient donc des temps de suivi plus longs, ce qui ne répondait pas aux objectifs de l'étude. Cependant, ce type d'effets sur la végétation ne doit pas être négligé. De nombreux travaux rapportent dans les effets indirects des poussières sur la végétation, une influence

particulière de la nature chimique de celles-ci, notamment lorsque chargées de matières polluantes (cadmium, chrome, plomb, nickel, vanadium...) (Kumar *et al.*, 2008 ; Sayyed & Sayadi, 2011 ; Prajapati, 2012)., ou de pH extrêmes (Vardaka *et al.*, 1995), pouvant causer des préjudices directs aux tissus foliaires sur lesquels ils se déposent, ou indirectement par le biais de modification de la nature chimique du sol et/ou en pénétrant les voies métaboliques des végétaux à travers la rhizosphère (Auerbach *et al.*, 1997). Egalement, Pichode & Nikhil (2015), rapportent dans les effets indirects des poussières, une influence néfaste sur les organismes du sol, capables d'entraîner des modifications des communautés édaphiques, des perturbations des cycles de la matière organiques, et finalement résulter en un impact sur les communautés végétales pour lesquelles ils sont reconnus comme essentiels⁴. Il est néanmoins probable que dans le cas de cette étude, cet impact sur les communautés édaphiques puissent être minime du fait que le substrat sur lequel ces communautés évoluent, et les matériaux déplacés en zone SMLT aient une origine géochimique commune.

Une étude analytique de la composition chimique des poussières identifiées dans cette étude permettrait de répondre aux différentes remarques évoquées ci-dessus, et de définir si la nature de celles-ci nécessite la mise en place de suivi des effets indirects des poussières à plus grande échelle.

VALORISATION DE L'ETUDE

Comme souligné en introduction de ce rapport, le suivi des émissions atmosphériques de poussières sur la végétation des sites miniers tend à s'intégrer aux études d'impacts déjà mise en place. Il s'agit actuellement d'un domaine de recherche dynamique à l'échelle internationale. Aussi, cette étude constituant la première du genre menée en Nouvelle-Calédonie, et à notre connaissance sur sol ultramafique, il est proposé que l'originalité des résultats obtenus ici fasse l'objet de valorisation sous forme de publication scientifique de niveau international, et également par la communication orale lors de colloque ou séminaire sur le territoire ou à l'étranger.

⁴ Les organismes du sol (gén. Edaphon) définissent l'ensemble des organismes vivants à la surface du sol (épiédaphon), dans la litière (hémi-édaphon), et dans les horizons supérieurs des sols (eudaphon) i.e. dans le topsoil (bactéries, champignons, algues, protozoaires, nématodes, micro-arthropodes, vers de terre, myriapode, fourmis, petits mammifères...) (Gobat *et al.*, 2010). Ils participent activement à l'écologie du sol et interviennent dans sa fertilité à travers la stabilisation des agrégats, essentiel au maintien des conditions structurelles et de porosité appropriés à la croissance des végétaux (Mummey *et al.*, 2002 ; Ghose, 2005 ; Frouz *et al.*, 2008), et notamment par leur participation aux cycles des éléments nutritifs à travers la dégradation de la matière organique et la libération consécutive d'ions nutritifs pour les plantes (Preston *et al.*, 2001 ; Ponder & Tadros, 2002). Parmi les rôles importants joués par l'édaphon, il est important de souligner celui joué par les micro-organismes symbiotiques, bactéries et mycorhizes. Leur rôle est en effet essentiel, en particulier sous climat tropical, où la majorité des écosystèmes évoluent malgré des conditions édaphiques défavorables, grâce à l'existence de ces relations symbiotiques (Amir & Ducousso, 2010). De plus, pour certaines espèces végétales, les partenariats symbiotiques sont essentiels et leur développement peut être compromis en leur absence (Strullu *et al.*, 1999).

- Amir H. & Ducouso M. **2010**. Les bactéries et les champignons du sol sur roches ultramafiques. Pages 129-146. In: Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie: les Milieux sur Substrats Ultramafiques et Leur Restauration L'Huilier L., Jaffré T., Wulff A (eds). Editions IAC, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.
- Anderson M.J. **2001**. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26, 32–46
- Auerbach N.A., Walker M.D., Walker D.A. **1997**. Effects of roadside disturbance on substrate and vegetation properties in arctic tundra. *Ecological Applications*, 7, 218–235
- Beckett K.P., Freer-Smith P.H., Taylor G. **2000**. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology*, 6, 995–1003
- Brady K.U., Kruckeberg A.R., Bradshaw H.D. **2005**. Evolutionary ecology of plant adaption to serpentine soils. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36, 243–66
- Cape J.N. **1993**. Direct damage to vegetation caused by acid rain and polluted cloud: definition of critical levels for forest trees. *Environmental Pollution*, 82, 167–180
- Chang Y.M., Chang T.C., Chen W.K. **1999**. An estimation on overall emission rate of fugitive dust emitted from road construction, *Environmental Engineering Science*, 16, 253–267
- Chevillotte V. **2005**. Morphogenèse tropicale en contexte épirogénique modéré. Exemple de la Nouvelle-Calédonie (Pacifique Sud-Ouest). Université de la Nouvelle-Calédonie. Nouméa, Nouvelle-Calédonie.
- ELAW - Environmental Law Alliance Worldwide **2010**. Guide pour l'évaluation des EIE de projets miniers. Environmental Law Alliance Worldwide. Oregon, USA.
- Farmer A.M. **1993**. The effects of dusts on vegetation – a review. *Environmental Pollution*, 79: 63–75
- Frouz J., Prach K., Pizl V., Háněla L., Stárýa J., et al. **2008**. Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites. *European Journal of Soil Biology*, 44, 109–121
- Garner J.H.B. **1994**. Nitrogen oxides, plant metabolism, and forest ecosystem response. *Plant Responses to the Gaseous Environment: Molecular, Metabolic and Physiological Aspects* (Alscher RG, Wellburn AR, eds). 301–314
- Gheorghe I.F., & Ion B. 2011. The effects of air pollutants on vegetation and the role of vegetation in reducing atmospheric pollution. The impact of air pollution on health, economy, environment and agricultural sources, consulté le 15 juin 2016. Tiré de <http://www.intechopen.com/books/the-impact-of-air-pollution-on-health-economy-environment-andagricultural-sources/the-effects-of-air-pollutants-on-vegetation-and-the-role-of-vegetation-in-reducingatmospheric-pollu>
- Ghose, M.K. **2005**. Soil conservation for rehabilitation and revegetation of mine-degraded land. *TIDEE – TERI Information Digest on Energy and Environment* 4, 137–150
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. **2010**. Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. PPUR Presses polytechniques, Lausanne, Switzerland, 519p
- Grantz D.A., Garner J.H.B., Johnson D.W. **2003**. Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29, 213–219
- Harrison S., & Rajakaruna N. **2011**. *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System*. Berkeley, CA: University of California Press, Orlando, FL, USA.
- Honnay O., & Jacquemyn H. **2006**. Susceptibility of common and rare plant species to the genetic consequences of habitat fragmentation. *Conservation Biology*, 21, 823–831
- INSG - International Nickel Study Group. **2014**. Statistics. Consulté le 16 Octobre 2014. Tiré de <http://www.insg.org/publist.aspx#>
- Isnard S., L'Huilier L., Rigault F., Jaffré T. **2016**. How did the ultramafic soils shape the flora of the New Caledonian hotspot? *Plant Soil*, 403 (1), 53–76
- Jablonski D. **1993**. The tropics as a source of evolutionary novelty: The post-Palaeozoic fossilrecord of marine invertebrates. *Nature*, 364, 142–144
- Jaffré T., & L'Huilier L. **2010**. La végétation des roches ultramafiques ou terrains miniers. Pages 45–103 In: Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie: les Milieux sur Substrats Ultramafiques et Leur Restauration L'Huilier L., Jaffré T., Wulff A (eds). Editions IAC, Noumea, Nouvelle-Calédonie.
- Kazakou E., Dimitrakopoulos P., Baker A., Reeves R., Trumbis A. **2008**. Hypotheses, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: from species to ecosystem level. *Biological Reviews*, 83, 495–508
- Kumar S.S., Singh N.A., Kumar V., Sunisha B., Preeti S., Deepali S., Nath S.R. **2008**. Impact of dust emission on plant vegetation in the vicinity of cement plant. *Environmental Engineering and Management Journal* Vol.7 (1), 31–35
- Leghari S.K., Zaid M.A., Sarangzai A.M., Faheem M., Shawani G.R., Ali W. **2013**. Effect of road side dust pollution on the growth and total chlorophyll content in *Vitis vinifera* L. (grape). *African journal of biotechnology*, vol 13(11), 1237–1242
- L'Huilier L., Jaffré T., Wulff A. **2010**. Mines et environnement en Nouvelle-Calédonie : les Milieux sur substrats ultramafiques et Leur Restauration. Editions IAC, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.
- Marschner H., Cakmak I. **1989**. High light intensity enhances chlorosis and necrosis in leaves of zinc, potassium, and magnesium deficient bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. *Journal of Plant Physiology*, Vol. 134 (3), 308–315
- Meddour R. **2011**. La méthode phytosociologique sigmatiste. Consulté le 2 février 2015. Tiré de http://www.tela-botanica.org/page:methode_phytosociologique_sigmatiste

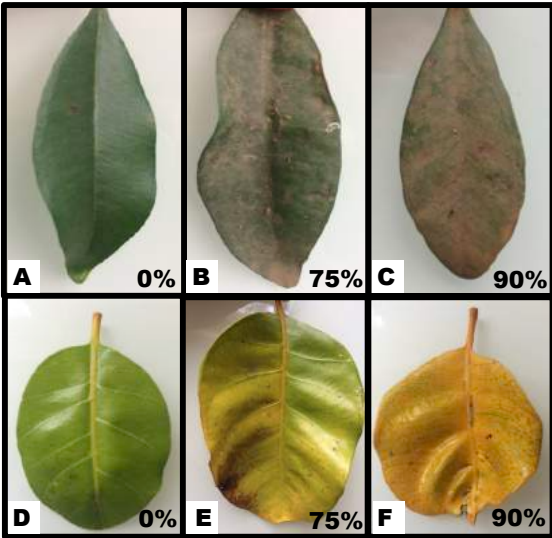
- Mittermeier R.A., Gil P.R., Hoffman M., Pilgrim J., Brooks T., Mittermeier C.G., Lamoreux J., Fonseca G. **2004**. Hotspots revisited. University of Chicago Press. 390p
- Mummey D.L., Stahl P.D., Buyer J.S. **2002**. Soil microbiological properties 20 years after surface mine reclamation: spatial analysis of reclaimed and undisturbed sites. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1717–1725
- Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., da Fonseca G.A., Kent J. **2000**. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858
- Neinhuis C., Barthlott W. **1998**. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak and ginkgo in relation to leaf micromorphology and wettability. *New Phytologist*, 138, 91-98
- Norme NF X 43-014. **2003**. Détermination des retombées atmosphériques totales. Échantillonnage - Préparation des échantillons avant analyses. l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 34p
- Oostermeijer J.G.B., Luijten S.H., den Nijs J.C.M. **2003**. Integrating demographic and genetic approaches in plant conservation. *Biological Conservation*, 113, 389-398
- Pichhode M. & Nikhil K. **2015**. Effect of copper mining dust on the soil and vegetation in india: A critical review. *International Journal of Modern Sciences and Engineering Technology (IJMSET) ISSN 2349-3755, Volume 2, Issue 2, 2015, pp.73-76*
- Pintaud J.C., & Jaffré T. **2001**. Pattern of diversification of palms on ultramafic rocks in New Caledonia. *South Africa journal of science*, 97, 548-550.
- Prajapati S.K. & Tripathi B.D. **2008a**. Anticipated performance index of some tree species considered for green belt development in and around an urban area: a case study of Varanasi City, India. *Journal of Environmental Management*, 88(4): 1343-1349
- Prajapati S.K. & Tripathi B.D. **2008b**. Biomonitoring seasonal variation of urban air Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) using *Ficus benghalensis* leaves. *Environmental Pollution*, 151: 543-548
- Prajapati S.K. **2012**. Ecological effect of airborne particulate matter on plants. *Environmental Skeptics and Critics*, 2012, 1(1), 12-22
- Preston S., Wirth S., Ritz K., Griffiths B.S., Young I.M. **2001**. 'The role played by microorganisms in the biogenesis of soil cracks: importance of substrate quantity and quality'. *Soil Biology & Biochemistry*, 33, 1851–1858
- Ponder F., & Tadros M. **2002**. Phospholipid fatty acids in forest soil four years after organic matter removal and soil compaction. *Applied Soil Ecology*, 19, 173–182
- Raupach M.R., Woods N., Dorr G., Leys J.F., Cleugh H.A. **2001**. The entrapment of particles by windbreaks. *Atmospheric Environment*, 35, 3373-3383
- Sayyed M.R.G., Sayadi M.H. **2011**. Variations in the heavy metal accumulations within the surface soils from the Chitgar industrial area of Tehran. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 1(1), 36-46
- SER – Society for Ecological Restoration **2004**. The SER International Primer on ecological restoration, Version 2. Society for Ecological Restoration Sciences and Policy Working Group, (en ligne). Consultée le 14 avril 2015. Tiré de <http://www.ser.org/resources/resources-detailview/ser-international-primer-on-ecological-restoration>
- Strullu D.G., Frenot Y., Maurice D., Gloaguen J.C., Christian Plenchette C., et al. **1999**. Première contribution à l'étude des mycorhizes des îles Kerguelen. *Compte rendu académie des sciences*, 322, 771–777
- Supé G.N., Gawande S.M. **2013**. Effects of dustfall on vegetation. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Vol. 4 (7), 2184-2188
- Telesca L., Lovallo M. **2011**. Complexity analysis in particulate matter measurements. *Computational Ecology and Software*, 1(3): 146-152
- Turner G.F. **2013**. Vulnerability of Vegetation to Mining Dust at the Jack Hills, Western Australia. Master of Science Thesis, School of Plant Biology, University of Western Australia.
- Ulrichs C., Welke B., Mucha-Pelzer T., Goswami A., Mewis I. **2008**. Effects of solid particulate matter deposits on vegetation – a review. *Functional plant science and biotechnology*, 2 (1), 56-62
- Ukpaka P. C., Eluozo S. N., Orji, C.U. **2011**. impact of road construction dust on plantain vegetation in port harcourt rivers state Nigeria. *International journal of current research* Vol. 3 (10), 092-098
- UNESCO. **2008**. Liste du patrimoine mondial. Consulté le 17 avril 2016. Tiré de <http://whc.unesco.org/fr/list/>
- Vallée C., Bilodeau G. **1999**. Les techniques de culture en multicellules. Institut québécois du développement de l'horticulture ornementale. Les presses de l'université de Laval, Québec, 400pp
- Vardaka E., Cook C. M., Lanaras T., Sgardelis S. P., Pantis J. D. **1995**. Effect of dust from a limestone quarry on the photosynthesis of *Quercus coccifera*, and evergreen sclerophyllous shrub. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 54, 414–419
- Whiting S.N., Reeves R.D., Richards D., Johnson M.S., Cooke J.A., et al. **2004**. Research Priorities for Conservation of Metallophyte Biodiversity and their Potential for Restoration and Site Remediation. *Restoration Ecology*, 12, 106–116
- Wulff A., Hollingsworth P.M., Ahrends A., Jaffré T., Veillon J.M., L'Huillier L., Fogliani B. **2013**. Conservation priorities in a biodiversity hotspot: Analysis of narrow endemic plant species in New Caledonia. *PLoS ONE* 8(9), e73371
- Zia-Khan S., Spreer W., Pengnian Y., Zhao X., Othmanli H., He X., Müller J. **2015**. Effect of Dust Deposition on Stomatal Conductance and Leaf Temperature of Cotton in Northwest China. *Water* 2015, 7, 116-131
- Zongo C., L'Huillier L., Fogliani B. **2015**. Impact potentiel des poussières sur la végétation environnante de GORO, zone SMLT. Premier rapport : état des lieux à T0, mise en place du dispositif de suivi. EcoRce, IAC.



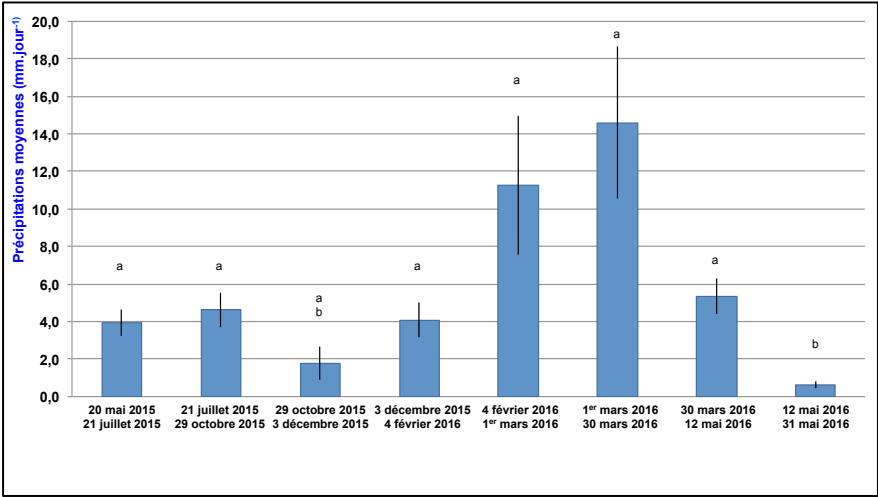
ANNEXE 1. COORDONNEES DES TRANSECT ET INDIVIDUS DE L'ETUDE. *Alphitonia neocaledonica* (AN), de *Codia spatulata* (CS), de *Gardenia aubryi* (GA), de *Guioa glauca* (GG), *Hibbertia pancheri* (HP).

individu	transect 1			transect 2			transect 3			transect 4			transect 5	
	longitude	latitude		longitude	latitude		longitude	latitude		longitude	latitude		longitude	latitude
Extrémité transect 1	166.940471	22.280476		166.942064	22.279867		166.940495	22.27897		166.939289	22.288612		166.944771	22.274221
Extrémité transect 2	166.942375	22.280182		166.940204	22.279484		166.942303	22.279199		166.938879	22.286901		166.942849	22.274832
AN1	166.942312	22.280196		166.941748E	22.279857S		166.940508E	22.279119S		166.939290	22.288555		166.942876E	22.274849S
AN2	166.942047	22.280194		166.941732E	22.279741S		166.940480E	22.279144S		166.939127	22.287644		166.942847E	22.274837S
AN3	166.941804	22.280172		166.941452E	22.279794S		166.940597E	22.279155S		166.939149	22.287615		166.943394E	22.274766S
AN4	166.941781	22.280199		166.941400E	22.279856S		166.940749E	22.279207S		166.939216	22.287576		166.943500E	22.274712S
AN5	166.941572	22.280222		166.941281E	22.279819S		166.940784E	22.279306S		166.939183	22.287540		166.943928E	22.274718S
AN6	166.941237	22.280263		166.941240E	22.279793S		166.940826E	22.279265S		166.939171	22.287581		166.944129E	22.274644S
AN7	166.941362	22.280348		166.941191E	22.279813S		166.940978E	22.279257S		166.939038	22.287367		166.944208E	22.274646S
AN8	166.941090	22.280307		166.941198E	22.279843S		166.940939E	22.279313S		166.938914	22.287002		166.944339E	22.274655S
AN9	166.940672	22.280464		166.941105E	22.279820S		166.940958E	22.279207S		166.938924	22.286952		166.944711E	22.274377S
AN10	166.940740	22.280467		166.941175E	22.279774S		166.940850E	22.279160S		166.938837	22.287018		166.944708E	22.274316S
CS1	166.941356	22.280169		166.941933E	22.279853S		166.940515E	22.279090S		166.938854	22.287157		166.943603E	22.274732S
CS2	166.941361	22.280083		166.941814E	22.279801S		166.940605E	22.279164S		166.938877	22.287154		166.943618E	22.274716S
CS3	166.941051	22.280317		166.941726E	22.279782S		166.940813E	22.279209S		166.938831	22.287167		166.944120E	22.274607S
CS4	166.941022	22.280295		166.941674E	22.279739S		166.941643E	22.279221S		166.938793	22.287219		166.944216E	22.274641S
CS5	166.940992	22.280405		166.941628E	22.279742S		166.941676E	22.279241S		166.938741	22.287148		166.944257E	22.274645S
CS6	166.941783	22.280202		166.941647E	22.279837S		166.941788E	22.279215S		166.938828	22.287128		166.944585E	22.274527S
CS7	166.940985	22.280286		166.941562E	22.279831S		166.941803E	22.279197S		166.938848	22.287173		166.944637E	22.274514S
CS8	166.940958	22.280256		166.941529E	22.279841S		166.941807E	22.279172S		166.938878	22.287160		166.944687E	22.274358S
CS9	166.940501	22.280425		166.941482E	22.279743S		166.942073E	22.279179S		166.938797	22.287193		166.944722E	22.274257S
CS10	166.940812	22.280438		166.941427E	22.279765S		166.940504E	22.279120S		166.938797	22.287193		166.944710E	22.274249S
GA1	166.942014	22.280223		166.942036E	22.279858S		166.940496E	22.279019S		166.939241	22.288469		166.942854E	22.274858S
GA2	166.941999	22.280254		166.942036E	22.279858S		166.940498E	22.279129S		166.939276	22.288424		166.942852E	22.274839S
GA3	166.941937	22.280268		166.941530E	22.279842S		166.940566E	22.279146S		166.939297	22.288365		166.942983E	22.274909S
GA4	166.941330	22.280204		166.941820E	22.279802S		166.940616E	22.279164S		166.939191	22.287593		166.943023E	22.274868S
GA5	166.941371	22.280190		166.941815E	22.279772S		166.940728E	22.279224S		166.939103	22.287584		166.943221E	22.274798S
donnée manquante				166.941772E	22.279823S		166.940907E	22.279225S		166.939082	22.287578		166.944333E	22.274689S
GA7	166.941031	22.280360		166.941736E	22.279734S		166.941069E	22.279249S		166.938954	22.287172		166.944463E	22.274714S
GA8	166.941048	22.280283		166.941656E	22.279772S		166.941133E	22.279313S		166.939155	22.287654		166.944487E	22.274576S
GA9	166.941069	22.280272		166.941547E	22.279853S		166.941206E	22.279326S		166.939353	22.288194		166.944512E	22.274575S
GA10	166.940519	22.280406		166.941436E	22.279743S		166.941356E	22.279246S		166.939361	22.288211		166.944619E	22.274516S
GG1	166.941338	22.280089		166.941817E	22.279748S		166.940496E	22.279019S		166.939321	22.288264		166.943319E	22.274837S
GG2	166.941361	22.280110		166.941692E	22.279812S		166.940498E	22.279129S		166.939240	22.288544		166.943304E	22.274858S
GG3	166.941087	22.280327		166.941692E	22.279812S		166.940653E	22.279207S		166.939271	22.288423		166.943359E	22.274844S
GG4	166.940523	22.280554		166.941562E	22.279831S		166.940687E	22.279213S		166.939349	22.288366		166.943842E	22.274719S
GG5	166.940523	22.280554		166.941468E	22.279731S		166.940750E	22.279224S		166.939331	22.288346		166.944427E	22.274724S
GG6	166.940523	22.280554		166.941541E	22.279754S		166.940805E	22.279184S		166.939381	22.288074		166.944676E	22.274244S
GG7	166.940523	22.280554		166.941462E	22.279793S		166.941601E	22.279283S		166.939152	22.287556		166.944021E	22.274668S
GG8	166.940523	22.280554		166.941342E	22.279774S		166.941687E	22.279240S		166.939421	22.288072		166.943980E	22.274675S
GG9	166.940523	22.280554		166.941248E	22.279758S		166.941885E	22.279155S		166.939034	22.287286		166.943917E	22.274609S
GG10	166.940523	22.280554		166.941175E	22.279774S		166.941955E	22.279193S		166.938911	22.287059		166.943971E	22.274741S
HP1	166.942323	22.280101		166.941820E	22.279802S		166.940778E	22.279227S		166.938869	22.286990	données manquantes	166.942862E	22.274833S
HP2	166.942286	22.280313		166.941748E	22.279857S		166.940814E	22.279208S					166.942863E	22.274851S
HP3	166.942118	22.280146		166.941678E	22.279877S		166.940907E	22.279225S					166.942982E	22.274859S
HP4	166.941801	22.280241		166.941726E	22.279782S		166.940948E	22.279227S					166.942982E	22.274859S
HP5	166.941444	22.280232		166.941748E	22.279857S		166.940969E	22.279224S					166.943210E	22.274785S
HP6	166.941454	22.280232		166.941482E	22.279743S		166.941012E	22.279251S					166.944130E	22.274660S
HP7	166.941522	22.280271		166.941400E	22.279856S		166.941100E	22.279262S					166.944316E	22.274673S
HP8	166.940684	22.280451		166.941400E	22.279856S		166.941702E	22.279227S					166.944703E	22.274261S
HP9	166.940654	22.280473		166.941281E	22.279819S		166.940634E	22.279153S					166.944655E	22.274276S
HP10	166.940509	22.280490		166.941299E	22.279809S		166.940674E	22.279199S					166.944708E	22.274357S

ANNEXE 2. INDICATEUR VISUEL D’EVALUATION **A**, **B** ET **C** DES DEPOTS DE POUSSIERS (EXEMPLE SUR CHENE GOMME (*Arillastrum gummiferum*), ET **D**, **E**, ET **F**, DES TAUX DE CHLOROSES (EXEMPLE SUR *TRISTANIOPSIS SP.*). ©IAC/ L.BORDEZ

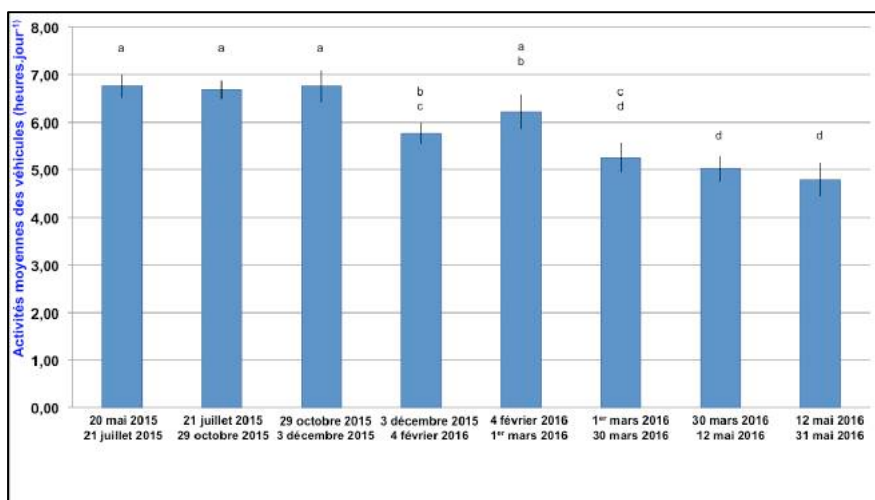


ANNEXE 3. PRECIPITATIONS MOYENNES JOURNALIERES PAR PERIODE SUR LA ZONE SMLT. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.

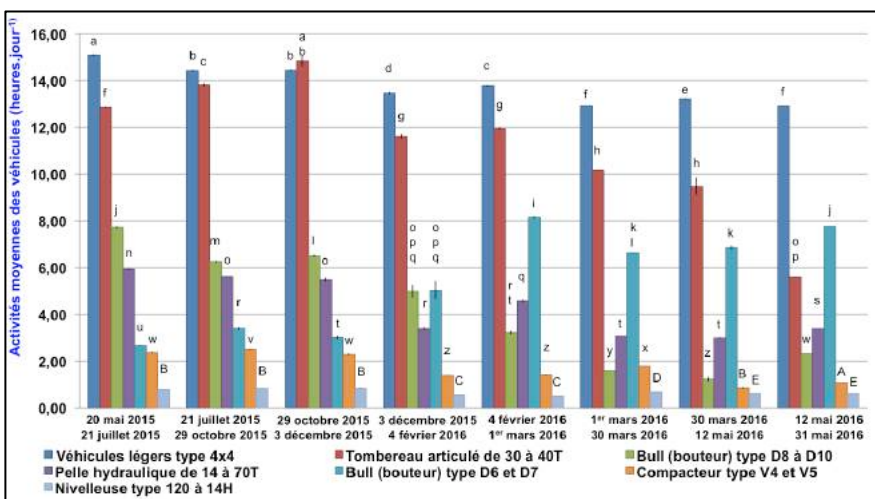


ANNEXE 4. DONNEES ANEMOMETRIQUES PAR PERIODE SUR LA ZONE SMLT. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.

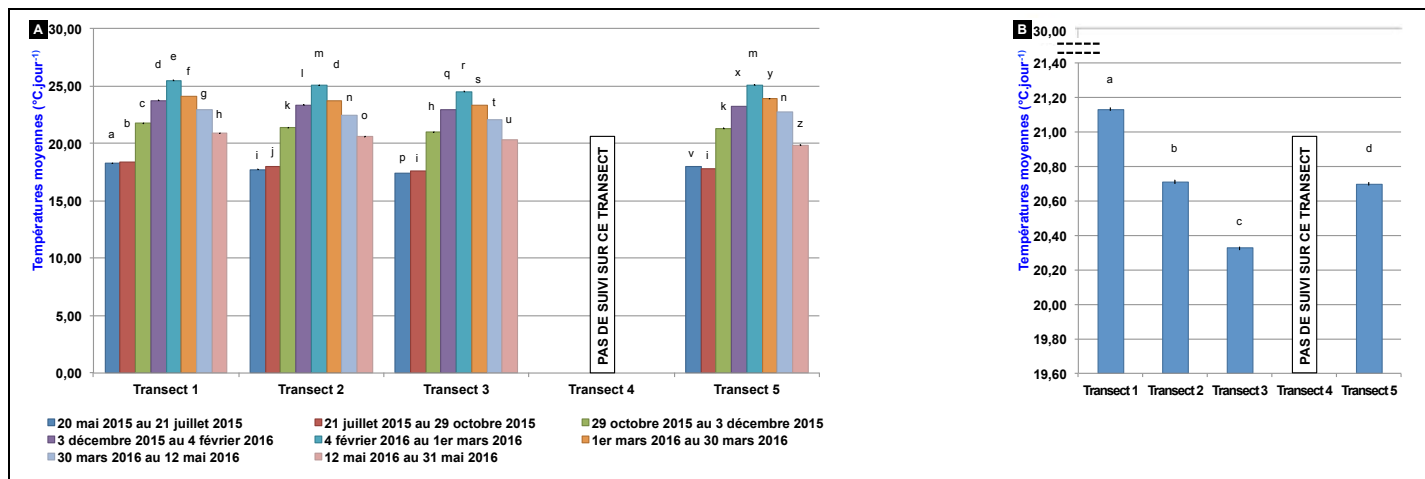
ANNEXE 5. ACTIVITES MOYENNES JOURNALIERES DES VEHICULES PAR PERIODE SUR LA ZONE SMLT. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.



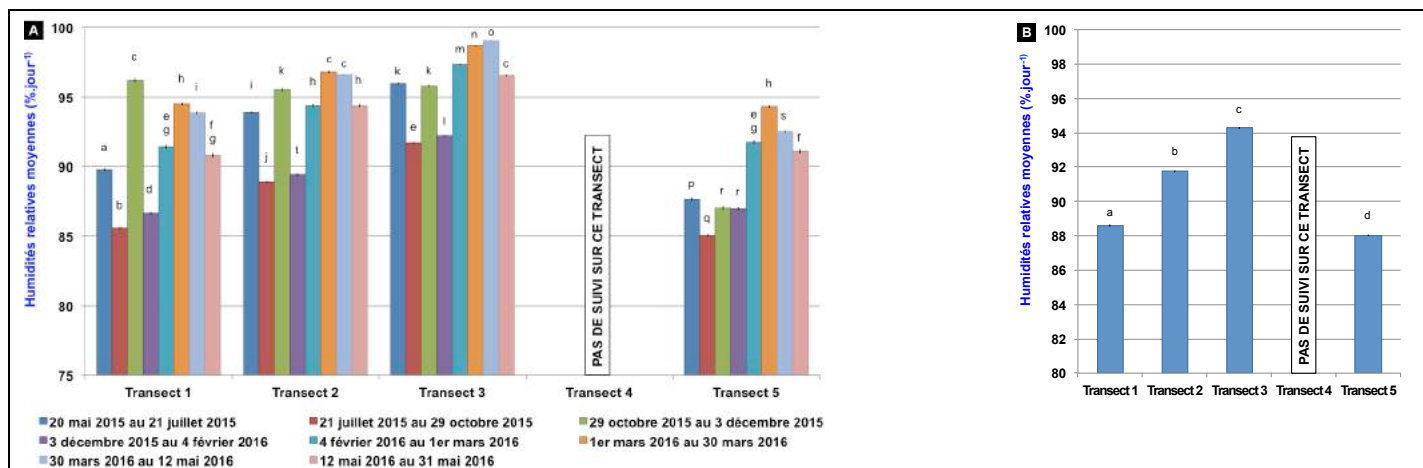
ANNEXE 6. ACTIVITES MOYENNES JOURNALIERES PAR PERIODE ET PAR TYPE DE VEHICULES SUR LA ZONE SMLT.



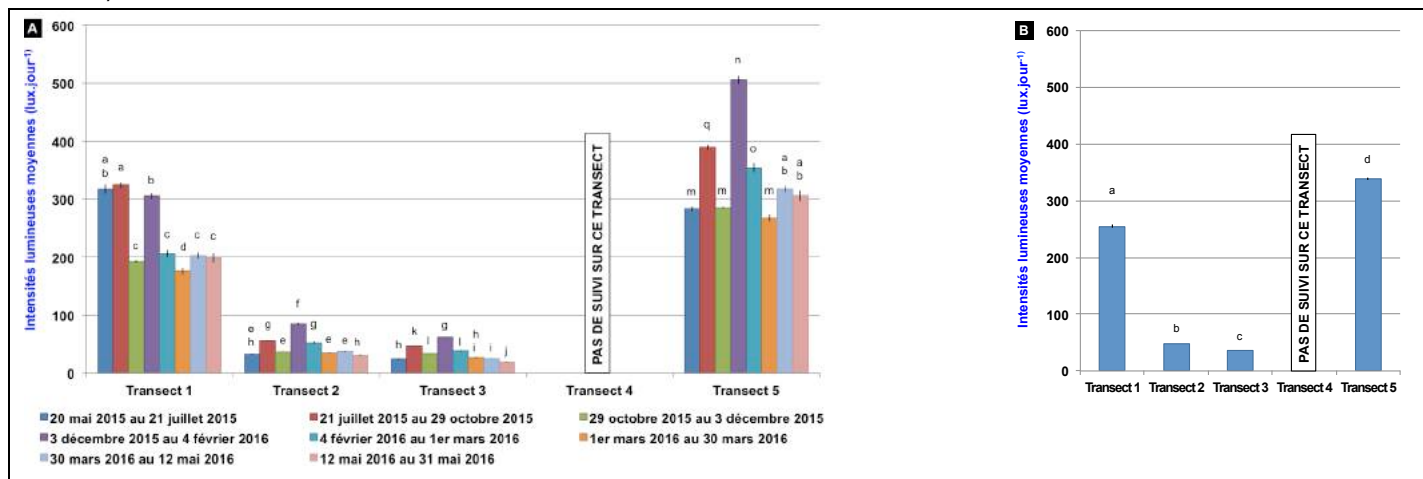
ANNEXE 7. A. TEMPERATURES MOYENNES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT ET PAR PERIODE, ET B. TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTE LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.



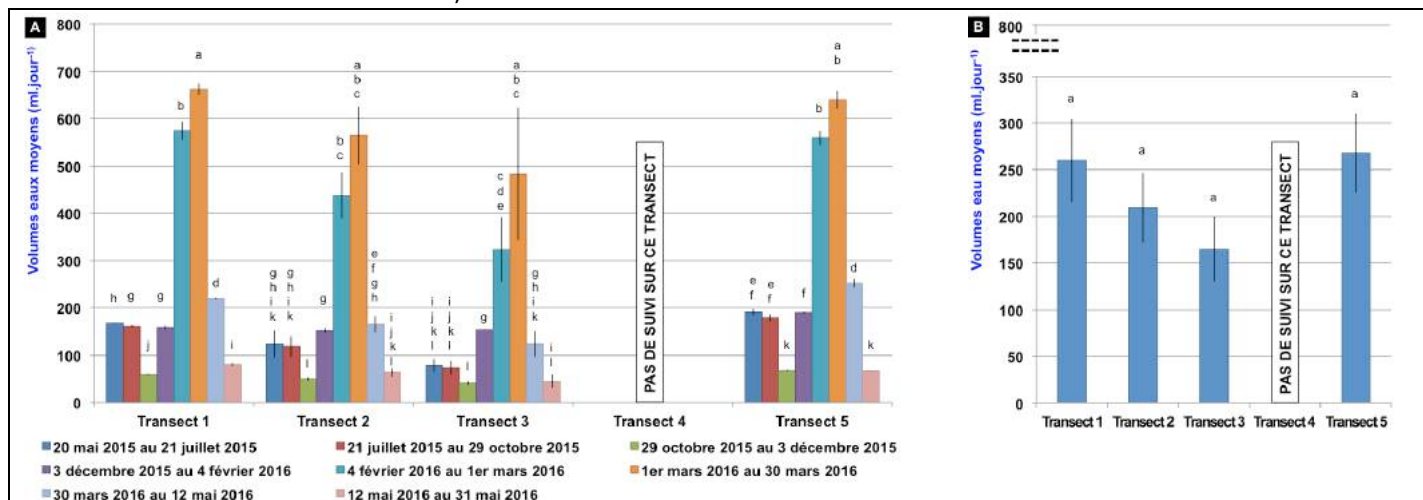
ANNEXE 8. A. HUMIDITES RELATIVES MOYENNES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT ET PAR PERIODE, ET B. HUMIDITES RELATIVES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.



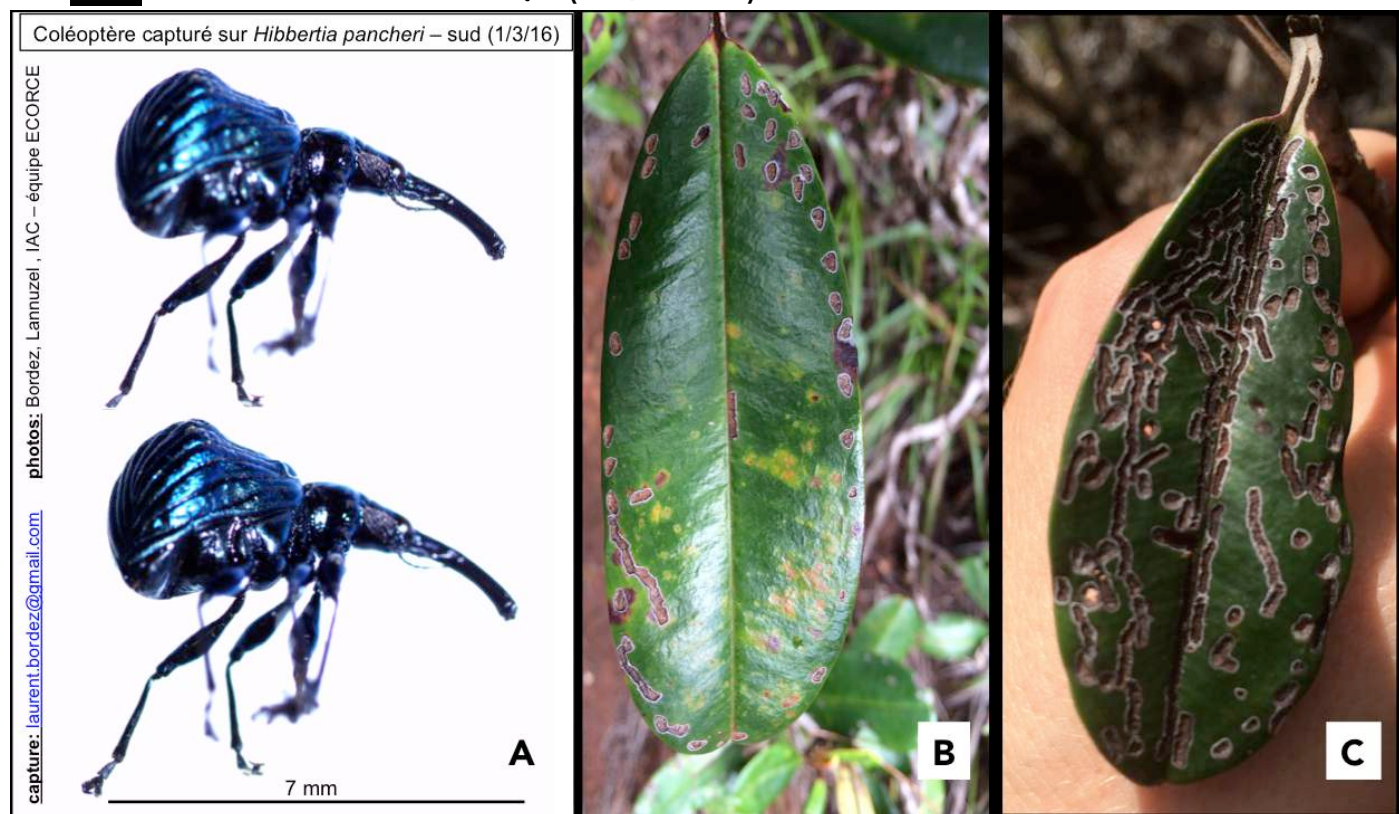
ANNEXE 9. A. INTENSITES LUMINEUSES MOYENNES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT ET PAR PERIODE, ET B. INTENSITES LUMINEUSES MOYENNES ANNUELLES ($\pm$ SE) PAR TRANSECT. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.



ANNEXE 10. A. VOLUMES D'EAU MOYENS ($\pm$ SE) RECUPERES DANS LES JAUGES OWEN PAR TRANSECT ET PAR PERIODE, ET B. VOLUMES D'EAU MOYENS ANNUELS ($\pm$ SE) RECUPERES DANS LES JAUGES OWEN PAR TRANSECT. LES LETTRES AU DESSUS DE CHAQUE HISTOGRAMME PRESENTENT LES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES 2 A 2. DEUX HISTOGRAMMES PRESENTANT UNE LETTRE COMMUNE, NE PRESENTENT PAS DE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE LEUR MOYENNE.



ANNEXE 11. A. COLEOPTERE (*Megatracheloides chloris* (IDENTIFICATION C. MILLE – CHERCHEUR IAC, FAUST, 1889) CAPTURE SUR *Hibbertia pancheri* AVANT **B. ET C.** OBSERVATION DE ZONE DE NECROSES SPECIFIQUES (©IAC/ L.BORDEZ).





RAPPORT FINAL DE CONVENTION

ÉTUDE D'IMPACT POTENTIEL DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES DE POUSSIÈRES SUR LA VÉGÉTATION ENVIRONNANTE DU SITE MINIER DE VALE GORO, ZONE SMLT

Laurent BORDEZ

Charly ZONGO

COORDINATION

Laurent L'HUILLIER

Bruno FOGLIANI

Octobre 2016 - Rapport n°9 EcoRCE / 2016

Convention IAC-VALE SAS N°2495/2010

Etude des milieux latéritiques et des espèces endémiques du Grand Sud

financement



Membres institutionnels de l'IAC:

