



HAL
open science

L'ingénierie écologique au service de la réhabilitation des mines de nickel de Nouvelle-Calédonie : quelles actions pour quels résultats ?

Bertrand Ziegler

► To cite this version:

Bertrand Ziegler. L'ingénierie écologique au service de la réhabilitation des mines de nickel de Nouvelle-Calédonie : quelles actions pour quels résultats ?. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-02080838

HAL Id: dumas-02080838

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02080838>

Submitted on 27 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire de stage

Présenté par Bertrand ZIEGLER

Pour obtenir le diplôme d'Ingénieur en Horticulture
Dominante d'approfondissement GEEFT

Sujet :

**L'INGENIERIE ECOLOGIQUE AU SERVICE DE LA
REHABILITATION DES MINES DE NICKEL DE NOUVELLE-
CALEDONIE : QUELLES ACTIONS POUR QUELS RESULTATS ?**

Soutenu publiquement le 20 novembre 2018

À AgroParisTech,
Centre de Montpellier

Devant le jury suivant :

Dr Julien Demenois

Examineur

Dr Danielle Saintpierre

Tutrice de stage

Dr Raphaël Manlay

Enseignant-référent AgroParisTech

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je souhaite remercier Marc-Henry Delrieu, gérant de SIRAS Pacifique, de m'avoir accueilli au sein de son entreprise pendant ces six mois.

Je tiens à remercier chaleureusement mes deux tutrices de stage Danielle Saintpierre et Adeline Reck, pour leurs précieux conseils et le partage de leurs expériences qui a grandement enrichi et orienté mon projet professionnel. Merci de tout ce temps passé à répondre à mes questions.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe SIRAS Pacifique : Jean-Michel Weill, Solange Dumon, et Muriel Mathelon, pour leur bonne humeur et l'ambiance conviviale au quotidien.

Enfin, un grand merci à ma cousine Béryl et son ami Matthieu pour m'avoir si bien accueilli au sein de leur famille. Merci pour tous ces moments partagés ensemble et du soutien que vous m'avez apporté. Vous avez fait de ce stage une expérience inoubliable ! Merci !

RESUME

Dans de nombreuses régions du monde et particulièrement en Nouvelle-Calédonie, l'ingénierie écologique est un outil pour la restauration des terrains dégradés par la construction d'ouvrages de génie biologique et le développement d'une couverture végétale. En effet, l'extraction du nickel à ciel ouvert cause de nombreux dégâts environnementaux. Nous nous sommes donc intéressés à comprendre comment l'ingénierie écologique peut s'inscrire dans une démarche de réhabilitation minière afin de lutter contre l'érosion, réintégrer les mines dans leur paysage et conserver la biodiversité néo-calédonienne. L'ingénierie écologique inclut des plans de sauvegarde d'espèces en danger qui visent le maintien des populations végétales, tant de leur taille que de leur diversité génétique. De plus, les travaux de réhabilitation tentent de reconstituer au mieux ces milieux dégradés. L'attribution d'une valeur écologique, notion associée à la dynamique et au fonctionnement des écosystèmes, met en évidence les sites miniers qui répondent le mieux aux objectifs de réhabilitation. Cette évaluation permet également une meilleure gestion de la réhabilitation en focalisant les futurs travaux sur les mines où la valeur écologique est la plus faible.

ABSTRACT

In many parts of the world and especially in New Caledonia, ecological engineering is a tool for degraded land restoration based on the construction of biological engineering structures and the development of a vegetation cover. Indeed, nickel mining causes many environmental damages. Therefore we focused on how ecological engineering can be part of a mining rehabilitation process in order to fight against erosion, to enhance landscape reintegration and to conserve New Caledonian biodiversity. Ecological engineering includes strategies to preserve endangered species. They aim in the preservation of plant populations in terms of size and genetic diversity. In addition, rehabilitation tends to reconstitute in the best way possible these degraded environments. An ecological value, in relation with function and ecosystem dynamics, is assigned to mine that best meet the rehabilitation objectives. The rehabilitation management can be improved by focusing future work on mines where the ecological value is the lowest.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	1
RESUME	2
ABSTRACT	2
TABLE DES MATIERES	3
1. INTRODUCTION	5
1.1. Géographie	5
1.2. Géologie	5
1.2.1. Sols latéritiques	5
1.2.2. Sols bruns hypermagnésiens	5
1.3. Climat	6
1.4. Biodiversité	6
1.5. Impacts environnementaux	7
1.6. Règlementation minière	8
1.7. Ingénierie écologique	8
1.8. Problématique	9
1.9. Stage et contexte	9
2. MATERIEL ET METHODES	10
2.1. Ingénierie écologique et sauvegarde des espèces	10
2.1.1. Site d'étude.....	10
2.1.2. Acquisition des données.....	11
2.1.3. Analyse des données.....	12
2.2. Ingénierie écologique et valeur écologique	12
2.2.1. Sites d'étude	12
2.2.2. Acquisition des données.....	20
2.2.3. Analyse des données.....	20
2.2.3.1 Biocénose	21
2.2.3.2 Contraintes abiotiques	25
2.2.3.3 Calcul de la valeur écologique.....	27

3. RESULTATS.....	28
3.1. Ingénierie écologique et sauvegarde des espèces	28
3.1.1. Croissance (Annexes 5 & 6)	28
3.1.2. Effets de la végétation (Annexes 9 à 13)	29
3.1.3. Effet de la technique de production (Annexe 19).....	32
3.2. Ingénierie et valeur écologique	34
4. DISCUSSION	37
4.1. Ingénierie écologique et sauvegarde des espèces	37
4.2. Ingénierie écologique et valeur écologique	38
5. CONCLUSION	40
6. REFERENCES.....	41
7. LISTE DES ABREVIATIONS	44
8. TABLE DES TABLEAUX	45
9. TABLE DES FIGURES.....	46
10. ANNEXES	47

1. INTRODUCTION

1.1. GEOGRAPHIE

Ile située dans le sud-ouest de l'océan Pacifique, entre le 18^{ème} et le 23^{ème} parallèle, la Nouvelle-Calédonie est un des archipels les plus isolés au monde. L'île principale, appelée Grande Terre, de forme allongée selon un axe Nord-Ouest/Sud-Est, a une superficie d'environ 16 600 km² (Brooks *et al.*, 1998). Elle est caractérisée par une chaîne centrale et des plaines alentours.

1.2. GEOLOGIE

Morceau de la plaque australienne océanique détaché du Gondwana il y a plus de 70 millions d'années, la Nouvelle-Calédonie a connu de nombreuses transformations géologiques aux cours des différentes ères, résultant en la formation de roches ultrabasiques ou ultramafiques à l'Oligocène (Tercinier, 1962). Formées de péridotites et de serpentinites (forme hydratée), elles occupent un tiers de la surface de la Grande Terre, soit 5 500 km² (L'Huillier *et al.*, 2010). Ces roches sont essentiellement constituées de silicates ferromagnésiens et sont caractérisées par des teneurs élevées en certains métaux dont le nickel (0,3 %), le chrome (0,6 %), le cobalt (0,2 %) et le manganèse (0,3 %), qui se retrouvent normalement parmi les éléments traces des roches (Guillon, 1975). Elles sont associées à deux types de sols ; des latérites/saprolites ou des sols bruns hypermagnésiens (L'Huillier *et al.*, 2010).

1.2.1. SOLS LATÉRITIQUES

Localement appelées « terre rouge », les latérites résultent de l'altération des péridotites sous climat chaud depuis le Miocène. Elles contiennent un excès de fer et surtout d'alumine par rapport à la silice. Leur épaisseur varie d'un mètre sur pente, à plusieurs dizaines de mètres en zone plane (L'Huillier *et al.*, 2010). Les couches de latérites jaunes et rouges composent l'essentiel de l'épaisseur de ce sol, ce qui ne permet que rarement à la roche mère sous-jacente d'être visible (Tercinier, 1962).

1.2.2. SOLS BRUNS HYPERMAGNÉSIENS

Les sols bruns hypermagnésiens sont généralement peu épais, caillouteux et situés à la base des massifs. Ils sont caractérisés par une forte teneur en magnésium, mais contrairement aux sols latéritiques ou ferrallitiques. Leurs teneurs en nickel et en manganèse sont variables. Ces deux types de sol présentent toutefois des caractéristiques communes, des carences en éléments totaux (calcium, phosphore et potassium) et en base échangeable (L'Huillier *et al.*, 2010). Ce manque en éléments nutritifs joue un rôle prépondérant dans l'absence de couverture végétale des sols dégradés, car les conditions minimales requises pour la nutrition des plantes ne sont pas remplies. De même, la forte teneur en magnésium des sols bruns peut avoir un effet toxique direct sur les végétaux (Proctor, 1970). De plus, en fonction de leur biodisponibilité, certains métaux (cobalt, chrome, manganèse, nickel) peuvent devenir toxiques pour les plantes. Ces risques de toxicité varient en fonction du pH du sol et des équilibres ioniques, qui sont eux-mêmes influencés par la présence de mycorhizes et de micro-organismes et/ou de bactéries, et par les sécrétions racinaires des

plantes (Demenois *et al.*, 2018). En revanche, si ces métaux peuvent devenir toxiques pour les espèces végétales, il n'existe aucun risque pour la santé humaine (L'Huillier *et al.*, 2010).

1.3. CLIMAT

Localisée à quelques degrés du tropique du Capricorne, la Nouvelle-Calédonie connaît un climat tropical océanique chaud (température annuelle moyenne de 23 °C) et humide marqué par des variations pluviométriques saisonnières et interannuelles importantes : pluviosité moyenne de 1700 mm (entre 800 et 4 000 mm en fonction de l'exposition et de l'altitude) (L'Huillier *et al.*, 2010). Cet archipel est généralement touché par une période de sécheresse d'environ trois mois, de septembre à novembre qui, en fonction des années peut se prolonger de décembre à mars (L'Huillier *et al.*, 2010). La présence d'eau dans les sols varie donc énormément en fonction des mois de l'année. De plus, les sols ferrallitiques ont une réserve en eau très faible dans les couches gravillonnaires. Cette réserve augmente avec les horizons limono-argileux, qui possèdent une meilleure microporosité. Les sols bruns hypermagnésiens, quant à eux, présentent à pF=3 (capacité au champ), une réserve hydrique assez forte mais la quantité d'eau retenue au point de flétrissement (pF=4,2) est élevée, ce qui rend difficile son absorption par la végétation (Jaffré, 1980). Le climat et la nature des différents sols engendrent des variations non-négligeables des conditions d'alimentation hydrique des végétaux. Ce point crucial, et les contraintes liées à la disponibilité des substrats, peuvent rendre très difficile l'installation et la pérennisation d'une nouvelle couverture végétale sur sol nu (L'Huillier *et al.*, 2010).

1.4. BIODIVERSITE

Ces diversités de conditions édaphiques, de reliefs (chaîne centrale et plaine) et de variabilités des conditions météorologiques, font de la Nouvelle-Calédonie une île caractérisée par une multitude d'écosystèmes et de paysages. Cette grande diversité s'explique également par la succession de nombreuses spéciations et par l'acclimatation des espèces aux conditions singulières de l'île (Schmid, 1982 ; L'Huillier *et al.*, 2010). En effet, à chaque type de sol correspond une flore particulière complètement adaptée aux conditions physico-chimiques du substrat (Jaffré, 1980 ; L'Huillier *et al.*, 2010). Six catégories d'habitats natifs de l'archipel sont alors identifiables : les forêts sèches, les forêts denses humides, les maquis de basse et moyenne altitude (<900 m), les maquis de haute altitude (>900 m), les habitats secondaires (savanes à niaoulis, les fourrés à gaiac ou à faux-mimosa), et les mangroves des zones humides (Jaffré *et al.*, 1998). Du fait de la diversité de ses paysages, la Nouvelle-Calédonie abrite une faune et une flore riche, présentant un important taux d'endémisme. De plus, la flore des massifs ultrabasiques représente environ 40 % de la surface de la Grande Terre (Goxe, 2010 ; L'Huillier *et al.*, 2010), accueillant des écosystèmes de maquis miniers très variés, présentant un taux d'endémisme de l'ordre de 90 % (Wulff *et al.*, 2013). Ces substrats ultramafiques sont donc en partie responsables, avec la forêt dense humide sur roches acides, de la grande richesse spécifique et du fort micro-endémisme de ce territoire insulaire (Jaffré *et al.*, 2009). La Nouvelle-Calédonie a même été inscrite dans la liste des dix premiers *hotspots* de biodiversité. Elle fait maintenant partie des 35 *hotspots* mondiaux de biodiversité (Mittermeier *et al.*, 2011), les maquis miniers abritant environ 1150 espèces végétales endémiques (Jaffré *et al.*, 2009).

Bien que sa biodiversité et ses écosystèmes naturels soient reconnus mondialement pour leur originalité, la Nouvelle-Calédonie reste exposée à des menaces, dont l'ampleur ne cesse d'augmenter. En effet, depuis 1864, début de l'histoire du nickel, l'exploitation de ce minerai, du fait de sa place économique dans le pays, influence la démographie, l'aménagement des territoires, les modes de vie et les comportements de la population locale (L'Huillier *et al.*, 2010). L'exploitation de ce minerai a débuté en 1873 au Mont-Dore mais elle a connu un véritable essor en 1880 avec la création de la Société Le Nickel (SLN) et l'ouverture sur la commune de Thio de la première mine. Dès le début des années 1920, l'exploitation à ciel ouvert (Figure 1) se généralise, entraînant le décapage de la végétation et des horizons du sol à trop faible teneur en nickel.



Figure 1 : Exploitation à ciel ouvert, mine Pinpin, commune de Poya

1.5. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Cette destruction du sol et de la couverture végétale s'accompagne d'une grande érosion (production de sédiments) et d'une imperméabilisation des sols, d'un engravement et d'une pollution des rivières, des creeks et des lagons en aval (Jaffré *et al.*, 1977), ainsi que d'un effet dévastateur sur la biodiversité néo-calédonienne. En effet, cette réduction de certains écosystèmes de maquis miniers et des effectifs de nombreuses espèces végétales et animales peut conduire à un dépérissement à long terme des populations ; et même des espèces dont les effectifs deviennent insuffisants pour assurer le maintien de la diversité génétique en leur sein (Honnay & Jacquemyn, 2007). Ce danger d'extinction est aggravé par la fragmentation de ces écosystèmes spécifiques et leur faible étendue naturelle (L'Huillier *et al.*, 2010). Ainsi 32,4 % des espèces de la flore du maquis présentent un risque plus ou moins fort d'extinction (Sarrailh, 2002).

La Nouvelle-Calédonie est donc confrontée à un défi de devoir gérer à la fois une des plus précieuses biodiversités au monde et une ressource considérable en nickel (Harrison & Royal Society of Chemistry, 1996). Pour faire face à cette double problématique, il est nécessaire de développer des approches capables de gérer le devenir de ces terrains miniers dégradés.

1.6. REGLEMENTATION MINIERE

Jusqu'en 2008, en Nouvelle-Calédonie, aucun moyen juridique efficace n'existait pour garantir la protection de l'environnement. Prévu dans la loi organique de 1999, le Schéma de Mise en Valeur des Richesses Minières énonce les principes directeurs en matière de protection de l'environnement pour l'exploitation des gisements (Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, 2009c). Il a servi de fondement à l'élaboration, par le gouvernement, du Code minier applicable depuis le 1^{er} mai 2009 qui clarifie la réglementation minière (Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, 2009b). Du fait de ce texte, les compagnies minières sont dans l'obligation de fournir une étude d'impact avant exploitation, de prévoir un schéma de réhabilitation des zones dégradées. Celui-ci doit être complété par un plan de restauration et de fermeture tout en apportant au préalable des garanties financières pour assurer le rétablissement d'une couverture végétale sur la zone dénudée. De même, avec la délibération n°104 et la création du Fonds Nickel (Annexe 1), les entreprises participent à la réhabilitation des mines dites « orphelines », en versant une partie de leur impôt sur les bénéfices aux communes concernées. De plus, en 2008 et 2009 sont validés respectivement le Code de l'environnement de la province Nord et celui de la province Sud, qui instituent des dispositifs de protection des espaces naturels et les listes des espèces qu'elles soient à protéger ou envahissantes (L'Huillier *et al.*, 2010). Pour répondre à ces nouvelles réglementations, les compagnies minières mettent en place des techniques pour diminuer la production de sédiments en provenance des bassins miniers. Elles font alors appel à des opérations de revégétalisation et de génie biologique (ou génie végétal) ; deux principes de l'ingénierie écologique.

1.7. INGENIERIE ECOLOGIQUE

L'ingénierie écologique peut se définir comme la conception de projets « Par et pour le vivant » (Rey *et al.*, 2014). Les objectifs sont d'utiliser le vivant dans toutes ses composantes et niveaux d'organisation (du gène au paysage) à des fins non seulement de restauration écologique de la biodiversité des écosystèmes, mais aussi d'optimisation des fonctions rendues par ces écosystèmes. Elle combine à la fois les notions de conception et de construction des écosystèmes. Elle reste tout de même controversée au sein de la communauté scientifique. Les points de vue divergent notamment sur les questions morales et éthiques du rôle de l'Homme dans la manipulation de la nature pour produire une « néonature » (Rey *et al.*, 2014). En revanche, en Nouvelle-Calédonie, ces démarches de revégétalisation (plantations et semis) s'inscrivent dans une volonté de sauvegarder les écosystèmes de maquis mis en danger par l'exploitation minière. La trajectoire d'un écosystème n'est pas synonyme de « succession ». Elle concerne l'ensemble des itinéraires évolutifs possibles d'un écosystème (Aronson *et al.*, 1995). Le terme réhabilitation est alors employé. Il vise à réparer les fonctions (résilience et productivité), endommagées ou tout simplement bloquées, d'un écosystème en le repositionnant sur une trajectoire favorable : c'est le retour à un écosystème fonctionnel et évolutif. La réhabilitation se différencie de la restauration dans le sens où elle nécessite un démarrage, qui peut être forcé, d'une nouvelle trajectoire de l'écosystème. La restauration écologique implique que les écosystèmes soient capables de se réparer eux-mêmes. De même, la réhabilitation ne permet que le développement d'un écosystème alternatif simplifié (à court terme) alors que la restauration conduit au retour à un écosystème préexistant, proche de la composition, de la structure et de la communauté biotique d'un « écosystème de référence » (Aronson *et al.*, 1995 ; McDonald *et al.*, 2016). Actuellement, les techniques d'ingénierie écologique, aussi bien la

plantation, le semis hydraulique et le génie biologique, sont utilisés dans les projets de réhabilitation des sites miniers. Chaque mine présente des caractéristiques différentes, il est alors nécessaire d'adapter ces pratiques aux conditions particulières des zones minières (comme par exemple la localisation, l'accès à la mine, la topographie et les espèces végétales présentes sur sites). De plus, des projets de recherche en ingénierie écologique sont soutenus et financés par le CNRT (Centre National de la Recherche Technique).

1.8. PROBLEMATIQUE

L'ingénierie se présente comme une solution à la réhabilitation des mines de Nouvelle-Calédonie pour répondre aux obligations des compagnies minières après exploitation. Or, actuellement, aucun lien n'est fait entre les techniques d'ingénierie écologique utilisées et leurs rôles dans l'atteinte des objectifs réglementaires de réhabilitation : à savoir la conservation de la biodiversité, la lutte contre l'érosion et la réintégration paysagère.

La problématique de notre recherche est donc la suivante : « Dans quelles mesures l'ingénierie écologique s'inscrit-elle dans une démarche de réhabilitation des mines de nickel à ciel ouvert ? »

Pour y répondre, deux pistes de réflexion sont proposées :

- L'ingénierie écologique peut-elle être considérée comme un des piliers majeurs de la sauvegarde des espèces menacées de Nouvelle-Calédonie ?
- Quelle est la valeur écologique attribuée par l'ingénierie écologique à l'écosystème qui a été réhabilité ?

L'ingénierie écologique est en plein développement dans le monde entier (Rey *et al.*, 2014). Elle pourrait apporter des nouvelles approches dans le contexte néo-calédonien. Ce mémoire a donc pour but de faire le point sur les méthodes employées par les opérateurs et d'analyser l'intérêt de les utiliser pour la réhabilitation des terrains miniers.

1.9. STAGE ET CONTEXTE

En Nouvelle-Calédonie, quelques entreprises se sont développées pour répondre au besoin des compagnies minière en revégétalisation. Elles ont alors acquis un savoir-faire des techniques d'ingénierie écologique.

Pour clarifier l'ensemble du mémoire qui suit, il me semblait nécessaire de faire un point sur la commande du stage qui s'est articulé en deux axes principaux : le suivi d'une espèce particulière et un bilan des actions menées par la Société Internationale de Réaménagement de Sites (SIRAS) Pacifique pour Nickel Mining Company (NMC).

Dans le but de redensifier la population d'*Araucaria rulei* F.Muell (une des espèces en danger sur la mine) sur la mine Camp des Sapins, la SLN a mis en place en 2006 un programme de sauvegarde, prévoyant la réintroduction de 18 000 plants à horizon 2020. Sept campagnes de plantation ont déjà été effectuées sur site : en 2009, 2012, 2014, 2016, 2017 et la dernière cette année, en 2018. Plus de 10 000 plants ont déjà été réintroduits. Des suivis post-plantations sont réalisés afin d'acquérir des données scientifiques sur le développement de ce ligneux. En 2018, j'ai été chargé de réaliser le suivi. La SIRAS Pacifique est en charge des

plantations, des suivis et de la rédaction des rapports de plantation et de suivi des jeunes plants.

La seconde partie de ce stage s'est portée sur un bilan des actions menées par SIRAS Pacifique pour l'un de ses clients : la NMC depuis 2012. Les deux entreprises ressentaient alors le besoin de connaître l'avancée de tous les chantiers de réhabilitation réalisés par SIRAS.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. INGENIERIE ECOLOGIQUE ET SAUVEGARDE DES ESPECES

2.1.1. SITE D'ETUDE

La mine du Camp des Sapins à Thio (sur la côte est à 120 km de Nouméa) accueille une sous-population de l'*Araucaria rulei* (Annexe 2). Classée « en danger » par l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) (liste rouge), elle est protégée en Province Sud par le code de l'environnement (Direction de l'Environnement, 2017). Exploitée depuis 80 ans environ, cette mine s'est énormément étendue dans le massif montagneux, détruisant tout écosystème sur son passage. Elle met en danger le maintien de certaines populations endémiques, comme l'*A. rulei* (Figure 2). Depuis 2009, des travaux d'ingénierie écologique, plus précisément de la plantation sont entrepris afin de sauvegarder cette espèce (Rapports de suivi post-plantations 2016, SIRAS Pacifique). Les plantations suivent un cahier des charges particulier. C'est pourquoi, on parle ici d'ingénierie écologique. A chaque phase de plantation, une zone est choisie en amont afin de densifier les populations déjà présentes ou de réintervenir sur une zone où le taux de mortalité est important. Les plants sont réintroduits tous les 4-5 m (prise en compte de l'accessibilité du terrain). La trouaison se fait suivant les dimensions 30x30x30 cm. Du compost, de l'hydorétenteur et différents engrais (lent et rapide) sont ajoutés au fond du trou pour maximiser les chances de reprise des jeunes plants en milieu naturel. Chaque année, le nombre de plants réintroduits varie, dépendant du nombre de plants plantables présents à la pépinière de SIRAS (plant supérieur à 15 cm, bonne tenue de la motte de terre – bon développement racinaire)

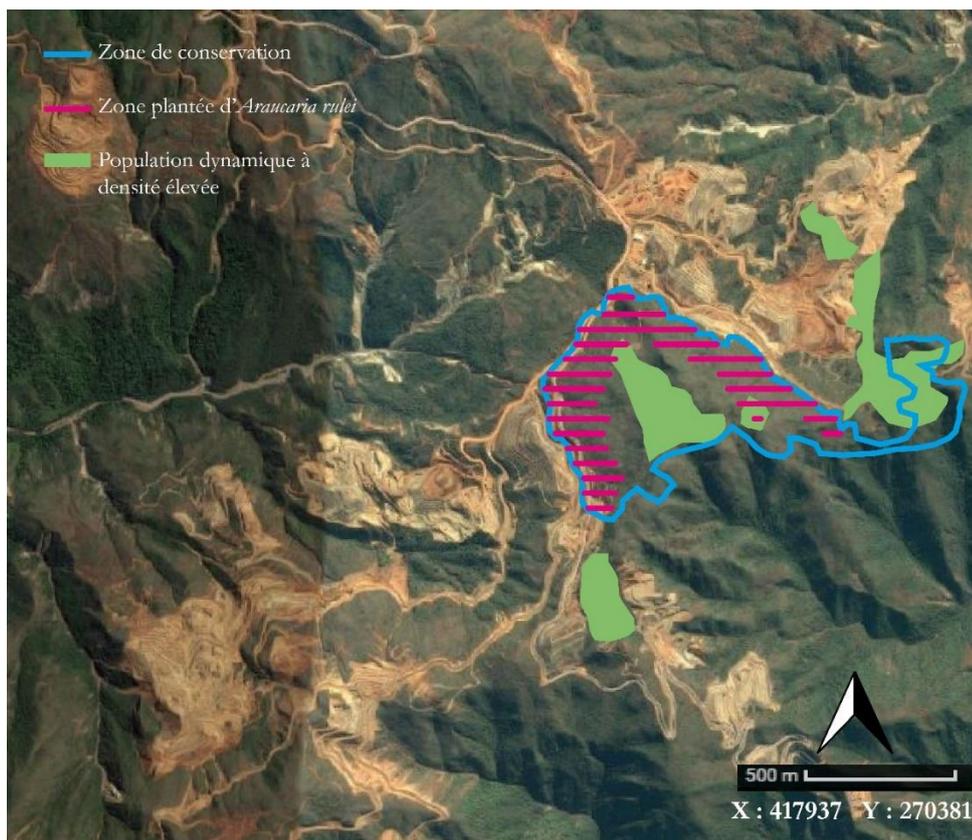


Figure 2 : Mine du Camp des Sapins (commune de Thio) (fond de carte ©2018 Google)

2.1.2. ACQUISITION DES DONNEES

Depuis 2012, à la demande de la maîtrise d'œuvre, lors des phases de plantation, 10 % des plants sont choisis aléatoirement pour être suivis post-plantation. Ils sont étiquetés et un relevé initial des mesures est effectué :

- les mesures dendrométriques (diamètre au collet et hauteur du plant)
- le nombre de ramilles
- la couleur du plant

Ensuite ces plants sont réintroduits de façon aléatoire dans la zone de conservation. Leurs coordonnées spatiales sont relevées grâce à un GPS GARMIN (GPS_{map} 64s). Avant chaque phase de relevés, les coordonnées de chaque plant marqué sont rentrées dans les appareils. Une fois sur site, l'identification du plant recherché est confirmée par lecture de l'étiquette. La hauteur et le diamètre au collet sont mesurés. Le nombre de ramilles est noté et la couleur du plant est déterminée parmi cinq possibilités (à la demande de la maître d'œuvre) : beau vert (vert plus foncé), vert, jaune, orange ou mort. De même, la densité de végétation autour du plant est caractérisée selon quatre modalités à l'œil nu : dense, moyenne, éparse ou sol nu. Les plants étant aléatoirement plantés dans le maquis minier, au moment de la plantation, aucune distinction n'est faite entre les végétations. C'est lors de la visite de fin de chantier de plantation que ces données de végétation sont prises en compte. Les résultats sont alors consignés dans le cahier de chantier puis retranscrits dans un tableau Excel.

2.1.3. ANALYSE DES DONNEES

Les possibilités de développement et de la survie de l'*Araucaria rulei* sont aujourd'hui inconnues. Il est donc important de suivre les individus réintroduits afin de déterminer quelles sont les conditions de plantation qui leur seraient les plus favorables. Mise à part la végétation autour des jeunes plants, les conditions du milieu sont considérées comme identiques dans tout le maquis. C'est pourquoi, pour chaque année de plantation, la moyenne, l'écart-type et l'intervalle de confiance à 95 % des hauteurs et des diamètres sont calculés afin d'étudier les effets des facteurs suivants :

- effet de la végétation alentour (la végétation autour du plant influe sur l'ombrage reçu par le plant et sur le taux d'humidité du sol, plus la végétation est dense, plus le plant est à l'ombre et plus l'humidité au sol est importante) sur la survie et la croissance des plants,
- effet de la technique de production des plants (c'est-à-dire si les plants sont issus de graines ou de plantules) sur leur développement après leur réintroduction en milieu naturel.

Le logiciel R (x64 3.5.1) (R Development Core Team, 2008) est utilisé pour déterminer si les résultats des analyses descriptives sont significatifs.

Différents tests statistiques sont également réalisés, afin de déterminer la significativité des données et de mettre en évidence des corrélations entre les variables relevées.

- Test du χ^2 : analyse de la relation entre deux variables qualitatives pour déterminer s'il existe une corrélation entre les variables observées avec H_0 : les deux variables sont indépendantes, H_0 rejetée si $p(H_0) < 0,05$,
- Test de Pearson : corrélation entre deux variables quantitatives (la hauteur et le diamètre) avec H_0 : les deux variables sont non-corrélées, acceptée si $p(H_0) > 0,05$,
- Analyse de la variance à deux facteurs (ANOVA) avec H_0 : le facteur végétation ou type de production n'a pas d'effet significatif sur la hauteur ou la couleur ou le diamètre, H_0 acceptée si $p(H_0) > 0,05$,
- Les différents niveaux de significativité sont notés ainsi :
* $p(H_0) < 0,05$; ** $p(H_0) < 0,01$; *** $p(H_0) < 0,001$.

2.2. INGENIERIE ECOLOGIQUE ET VALEUR ECOLOGIQUE

2.2.1. SITES D'ETUDE

Dix sites, dans cinq centres miniers, ont été étudiés sur l'ensemble du territoire néo-calédonien (Annexe 3). Ils ont tous fait l'objet de travaux d'ingénierie écologique dans le cadre de contrats de revégétalisation et de réhabilitation des terrains dégradés réalisés par la SIRAS Pacifique. On parle ici d'ingénierie écologique car le vivant est utilisé à des fins de conception de nouveaux écosystèmes (Rey *et al.*, 2014) Dans la majorité des cas, les banquettes de versées (zones planes créées par l'exploitation minière) sont plantées et les talus semés (zones pentues entre deux banquettes).

Sur l'ensemble des cartes suivantes, les zones de plantations sont représentées en couleur pleine et les zones de semis hydrauliques en pointillés. Les différentes années d'intervention sont différenciées par le choix des couleurs.

La mine Alice-Philippe est située sur le centre minier de Kouaoua. Depuis 2015, des travaux de réhabilitation ont débuté : semis en 2015 et plantations en 2015 et 2018 (Figure 3).

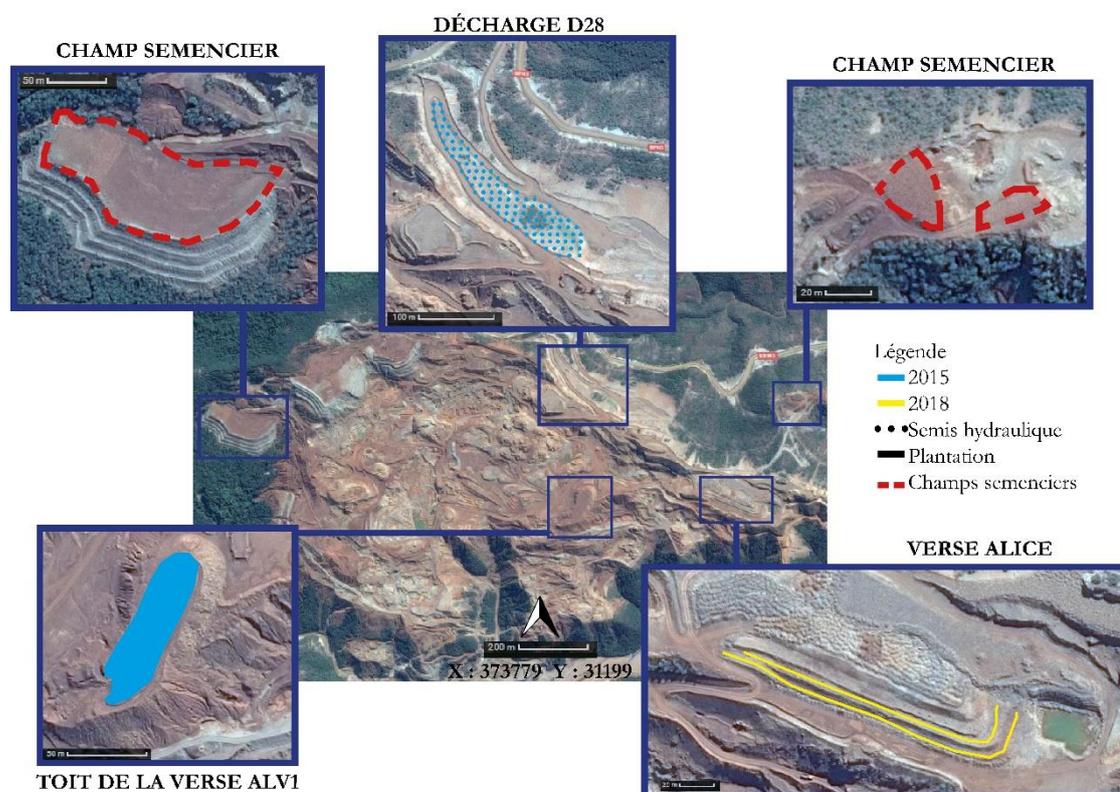


Figure 3 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Alice-Philippe – KOUAOUA (fond de carte ©2018 Google)

La mine de Kadjitra dépend également du centre minier de Kouaoua. Elle est située au Nord-Est de la mine Alice-Philippe. En 2015, des semis hydrauliques ont été effectués afin de recréer une couverture végétale sur le talus (Figure 5).

TALUS 1 ET 3 AVAL OUEST DE LA VERSE ATELIER K2D1



Figure 4 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Kadjitra – KOUAOUA (fond de carte ©2018 Google)

Le deuxième centre minier étudié est le centre de Nakéty. Il est composé de trois mines dont les plantations ont été réalisées en 2015 et 2018, sur les banquettes des talus de stabilisation des stériles latéritiques (Annexe 4) :

- La mine Circée en 2018 (Figure 5)
- La mine Edouard en 2015 et 2018 (Figure 6)
- La mine Euréka en 2018 (Figure 7)

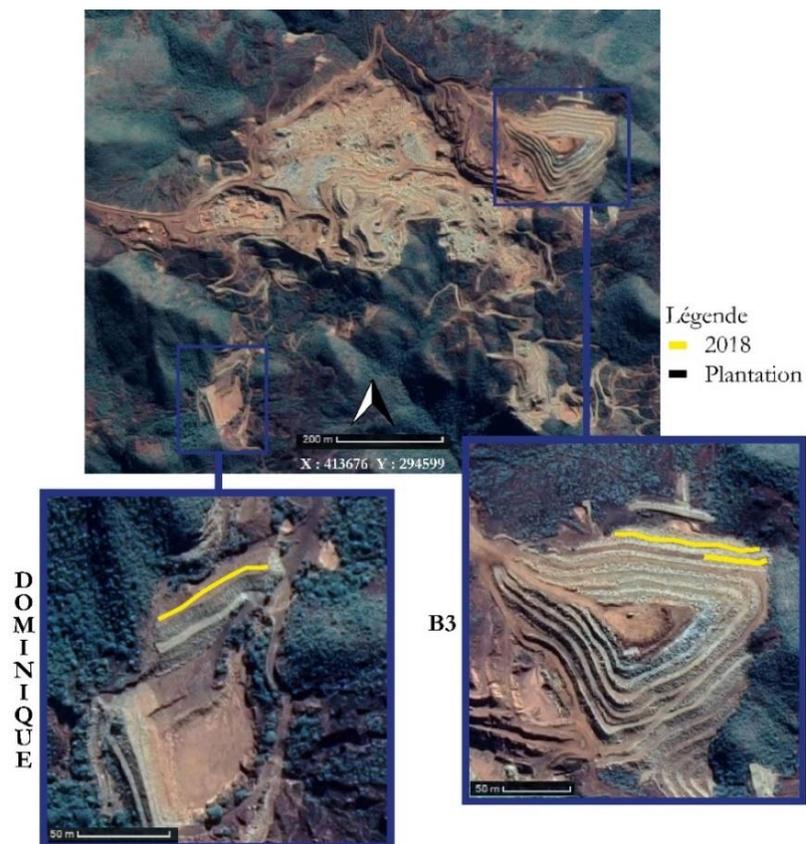


Figure 5 : Travaux de revégétalisation de versés à stériles réalisés sur la mine Circée – NAKETY (fond de carte ©2018 Google)

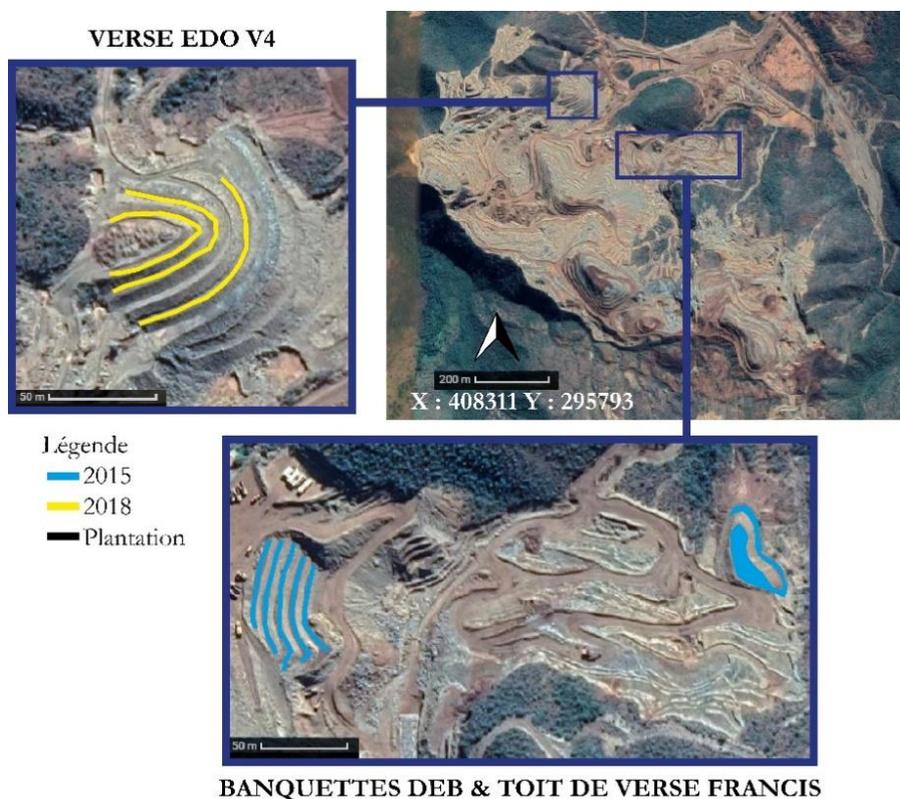


Figure 6 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Edouard – NAKETY (fond de carte ©2018 Google)

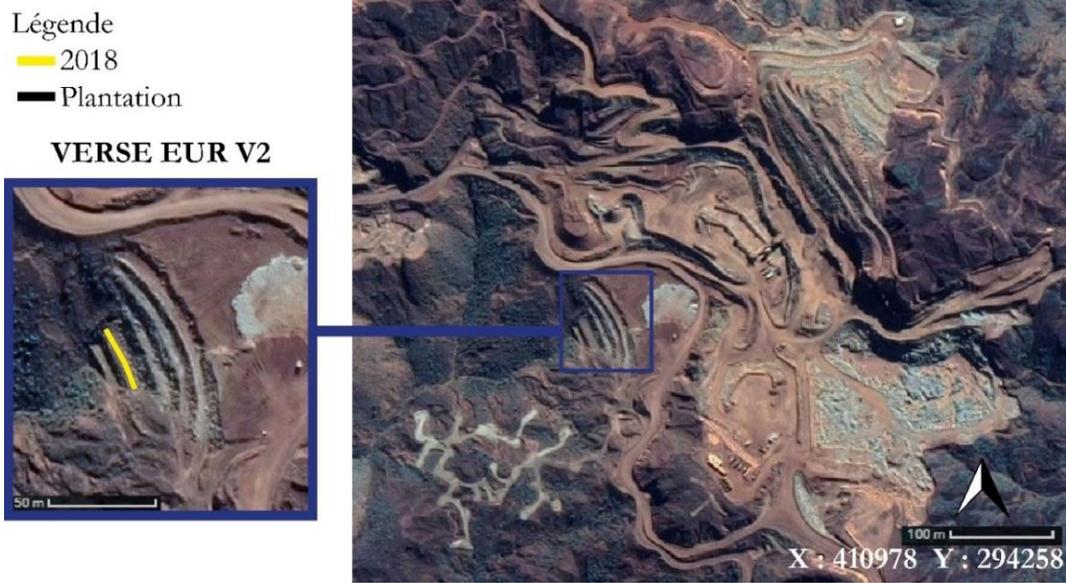


Figure 7 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Euréka – NAKETY (fond de carte ©2018 Google)

Sur le troisième centre minier de N'GO, une petite plantation en 2018 a été effectuée sur la mine PB2 (Figure 8).



Figure 8 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine PB2 – N'GO (fond de carte ©2018 Google)

Plus au Nord, au centre minier de Ouaco, deux mines ont fait l'objet de travaux de réhabilitation : plantation en 2013 et semis hydraulique en 2014 sur la mine de Ouazangou (Figure 9), et semis hydraulique uniquement en 2014 sur la mine de Taom (Figure 10).

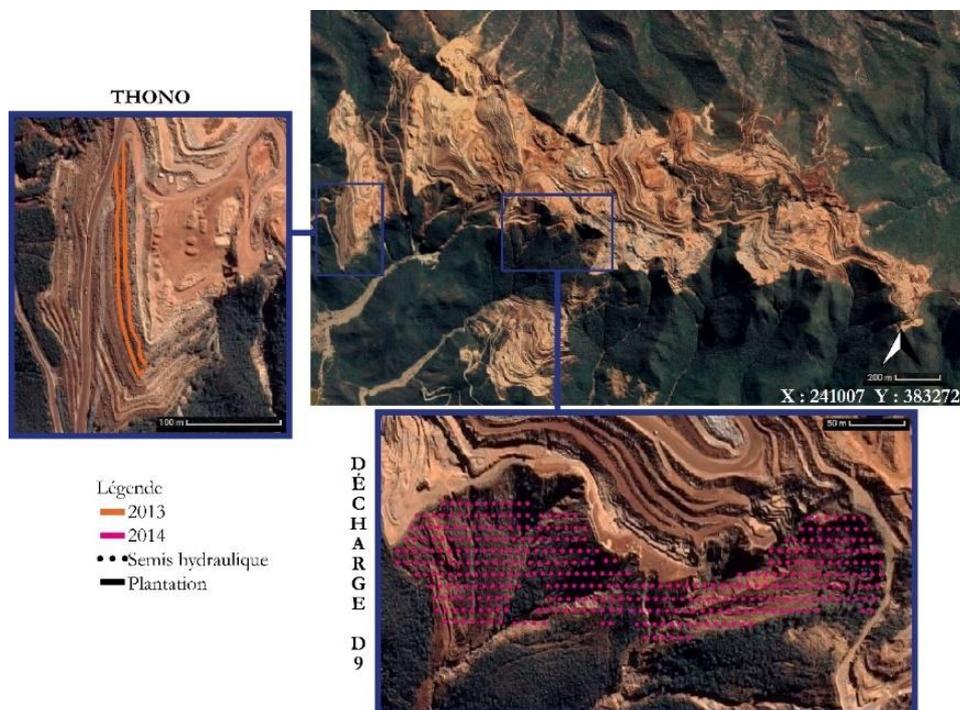


Figure 9 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Ouazangou – OUACO (fond de carte ©2018 Google)

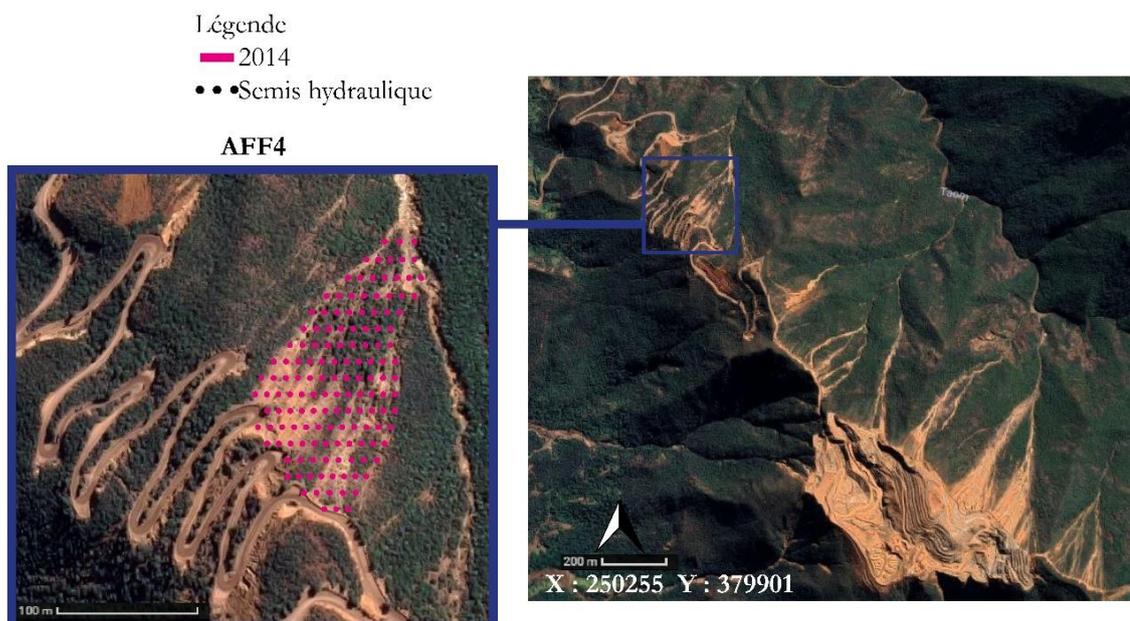


Figure 10 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Taom – OUACO (fond de carte ©2018 Google)

Les derniers travaux analysés se situent sur le centre minier de Poya. En 2015, un semis hydraulique a été réalisé sur une petite partie de la mine Dent de Poya (Figure 11).

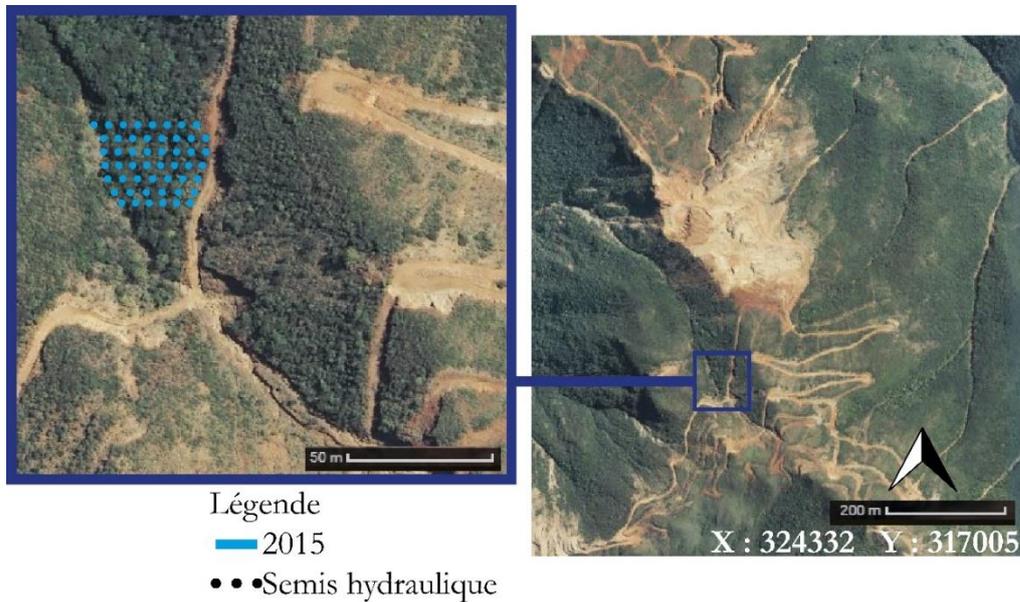


Figure 11 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Dent de Poya – POYA
(fond de carte ©2018 Google)

Enfin, c'est sur la mine de Pinpin qu'a été réalisé le plus de travaux car les impacts paysagers y étaient importants, puisqu'ils sont visibles depuis la voie rapide, route la plus empruntée en Nouvelle-Calédonie. Depuis 2012, la mine est semée tous les ans et différentes périodes

de plantation ont été effectuées : de 2015 à 2018 dans le cadre d'un contrat de revégétalisation et de sauvegarde des espèces (notamment d'orchidées) (Figure 12).

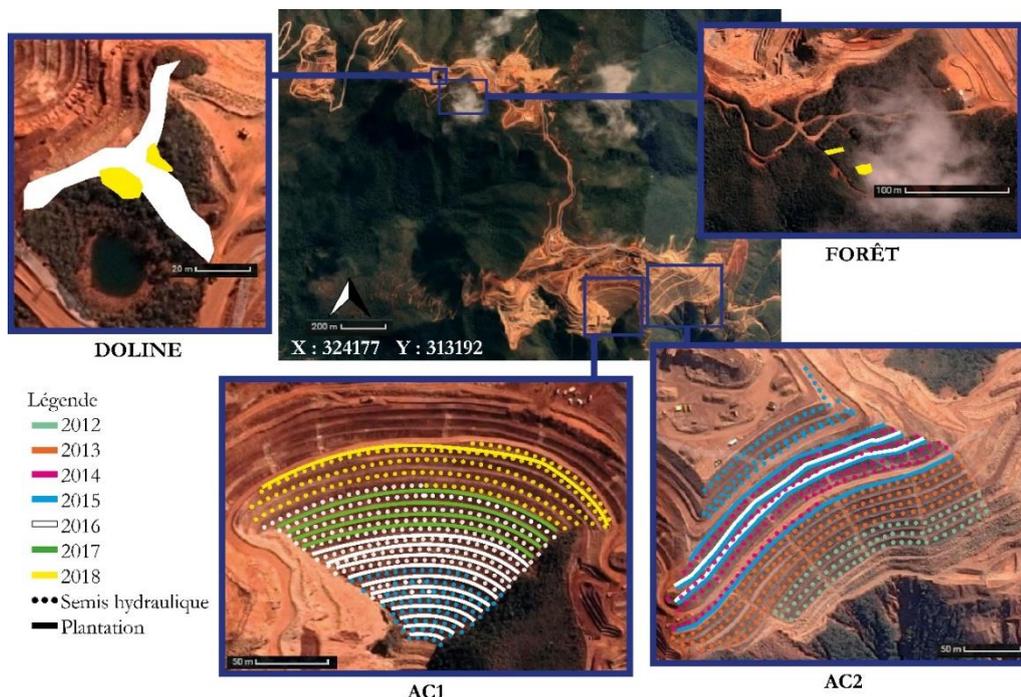


Figure 12 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Pinpin – POYA (fond de carte ©2018 Google)

Le récapitulatif des données de l'ensemble des chantiers de réhabilitation sont présentées dans le Tableau 1 et le Tableau 2 .

Tableau 1 : Récapitulatif des données concernant les travaux de plantation

Centre minier Mine	Localisation	Année	Surface à planter (en m ²)	Nombre de plants
Kouaoua	Alice-Philippe (toit de verse ALV1)	2015	6186	3137
	Alice-Philippe (Verse Alice)	2018	2985	2904
	Edouard (Banquettes DEB + toit Verse Francis)	2015	4503	3377
Nakéty	Edouard (Verse EDO V4)		1643	1600
	Circée (Verses B3 et Dominique)	2018	1440	1441
	Euréka (Verse EUR2)		324	320
N'GO	PB2 (S1 et S2)	2018	1768	1830
	Ouazangou (Thono)	2013	2870	2474
Ouaco	Ouazangou (Thono haut, DC3)	2015	4463	3999
	Taom (DTA2)	2015	7897	3713
	AC2 Bq. 7, 9, 10, 11	2015	7848	3630
	Doline, AC1 Bq. 1 à 11, AC2 Bq. 9 et 10	2016	7069	5016
Pinpin	AC1 : Bq 12 à 16	2017	3731	3631
	AC1 : Bq 19, Forêt, Doline	2018	1300	1370
		2018	/	9

à ce jour, aucun suivi des projets de réhabilitation n'est fait après les levées de garantie, essentiellement par manque de moyens alloués. C'est pourquoi notre approche ne prend en compte que des indices disponibles dès la fin des travaux de revégétalisation et lors des levées de garantie (à t+18 mois pour une plantation, à t+24 mois pour un semis hydraulique). Cette méthode ne nécessite alors aucun suivi supplémentaire. L'évaluation de cette valeur écologique permet de mettre en valeur l'état d'avancement de la réhabilitation sur chaque site d'étude, afin de comprendre quelles actions pourraient être mises en place afin d'optimiser la réparation de ces écosystèmes dégradés.

Ainsi, treize critères d'évaluation de cette valeur ont été développés ou adaptés de la méthode Vittet (2011) au contexte minier local. Huit concernent la biocénose et cinq les contraintes abiotiques. Chaque critère est subdivisé en catégorie et une cote est attribuée à chacune. Plus le critère a d'importance en réhabilitation minière, plus son analyse est fine. Enfin, une pondération est ajoutée afin de hiérarchiser les critères en fonction de leur place dans le contexte minier local.

Cette évaluation repose sur un inventaire des espèces réintroduites mais elle nécessite aussi une bonne compréhension des enjeux auxquels les mines font face (problèmes d'érosion, conservation de la biodiversité et réintégration paysagère).

2.2.3.1 Biocénose

❖ Critères 1, 2 et 3 - BIODIVERSITE

La restauration de la biodiversité est un des enjeux majeurs de la réhabilitation des mines de nickel. Ce paramètre va être évalué grâce à trois critères :

- 1 - Présence d'espèces à statut particulier réintroduites en plantations et semis hydrauliques : l'exploitation minière met en danger certaines espèces du maquis minier, dont quelques-unes sont classées par l'UICN (Annexes 19 & 20) et sont endémiques. La présence d'espèces floristiques à statut particulier est un facteur d'accroissement de la valeur de conservation d'un milieu et donc de sa valeur écologique (Warnaffe & Devillez, 2002 *in* Vittet, 2012) (Tableau 3).

Tableau 3 : Cotes attribuées en fonction du nombre d'espèces à statut particulier

Présence d'espèce à statut particulier	Cote
Plus de 25 espèces à statut particulier et/ou présence d'au moins 5 espèces en danger critique d'extinction	5
15 à 25 espèces à statut particulier et/ou présence d'au moins une espèce en danger critique d'extinction	4
10 à 15 espèces à statut particulier et/ou présence d'une espèce en danger	3
2 à 10 espèces à statut particulier (préoccupation mineure, quasi-menacée ou vulnérable)	2
1 espèce en préoccupation mineure	1
Aucune espèce à statut particulier	0

La sauvegarde des espèces endémiques et menacées fait partie des mesures obligatoires à la compensation des conséquences dommageables de projets miniers sur l'environnement (Article R. 142-10-7, Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, 2009a). On peut donc s'attendre à la création de nombreux programmes de sauvegarde de ces espèces, d'où la

création arbitraire des différents seuils (Tableau 3) pour inciter les compagnies minières à en réintroduire davantage de ces espèces pour maximiser leur note finale de valeur écologique. De plus, de nombreuses espèces en Nouvelle-Calédonie sont en danger (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2018), expliquant les valeurs élevées des différents seuils.

Les deux critères suivants s'intéressent à la biodiversité réintroduite sur site pour mesurer la stabilité des écosystèmes. La plantation est séparée du semis. En effet, au vu des facteurs influençant la germination, la composition floristique exacte d'un semis est impossible à déterminer à l'avance.

- 2 - Richesse spécifique (nombre d'espèces) réintroduite lors du semis : ce critère s'applique uniquement aux *hydroseeding*. Il s'intéresse au nombre d'espèces présentes dans le mélange, donc à la richesse spécifique potentielle de la zone semée (Tableau 4). Le plus faible seuil commence à 15 car dans l'ensemble des travaux réalisés, pas moins de 15 espèces sont toujours réintroduites. Après les seuils se font de 5 en 5, car il devient de plus en plus difficile de réintroduire de nouvelles espèces au vu du peu de connaissances écologiques et biologiques sur les espèces qui ne sont pas couramment utilisées en revégétalisation (communications SIRAS Pacifique).

Tableau 4 : Cotes attribuées en fonction de la richesse spécifique (R_s) des semis

Richesse spécifique réintroduite lors des semis	Cote
R _s >30	4
25 < R _s ≤ 30	3
20 < R _s ≤ 25	2
15 < R _s ≤ 20	1
R _s ≤ 15	0

- 3 - Diversité spécifique réintroduite lors de la plantation : ce critère s'applique aux plantations uniquement. L'indice de Shannon-Weaver H est calculé :

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i * \ln(p_i) \text{ où } p_i = \frac{n_i}{N}$$

avec N : l'effectif total des individus toutes espèces confondues et n_i l'effectif d'une espèce. Il a été choisi car il rend compte de la diversité des espèces qui composent les peuplements dans un milieu, et il établit le lien entre le nombre d'espèces et le nombre d'individus d'un même écosystème ou d'une même communauté. Plus la valeur H est forte, plus l'état écologique de l'écosystème recréé est bon.

Tableau 5 : Cotes attribuées en fonction de la diversité spécifique (H) des plantations

Diversité spécifique réintroduite lors des plantations	Cote
H > 5	4
4 < H ≤ 5	3
3 < H ≤ 4	2
1,5 < H ≤ 3	1
0 < H ≤ 1,5	0

Les seuils, présentés dans le Tableau 5, ont été choisis en fonction des résultats de cet indice pour chaque mine (Annexe 28).

❖ Critère 4 - SUCCESSIONS SECONDAIRES

Les Cyperaceae jouent un rôle important dans l'amorce des successions secondaires car ce sont des espèces pionnières (Jaffré & Rigault, 1991 ; McCoy *et al.*, 1999). De même, grâce à leur développement en touffe, leur multiplication par rhizome (formation de thalles secondaires) et leurs racines fines (Burylo & Rey, 2015), cette famille végétale protège efficacement le sol de l'érosion de surface (Tableau 6). Elle se caractérise aussi par une production rapide et importante de graines, colonisant ainsi plus rapidement les zones plantées.

Tableau 6 : Cotes attribuées en fonction du pourcentage de Cyperaceae plantées

Pourcentage du nombre de plants de Cyperaceae réintroduits (C_r) par rapport au nombre total d'espèces	Cote
$C_r > 40$	4
$30 < C_r \leq 40$	3
$20 < C_r \leq 30$	2
$10 < C_r \leq 20$	1
$0 < C_r \leq 10$	0

En réhabilitation minière, aucune famille d'espèces ne doit représenter plus de 30-40 % du cortège floristique réintroduit, aussi bien en plantation qu'en semis hydraulique. Cette obligation est demandée par les compagnies minières pour limiter au maximum le développement d'un écosystème monospécifique (communications SIRAS Pacifique). Il m'a donc paru sensé de créer des seuils de dix en dix jusqu'à 40 %. Cette règle s'applique également au Cyperaceae, malgré le fait que ces espèces n'aient pas de caractère monospécifique (Lagrange, 2009). C'est pourquoi une valeur de C_r supérieur à 40 % a une cote de quatre : ces espèces sont pionnières et apportent de nombreux bénéfices à l'écosystèmes.

❖ Critère 5 - CONNECTIVITE

La connectivité des zones revégétalisés est un critère à prendre en compte. Il permet, sur le long terme, de maintenir une certaine diversité génétique (échange de graines), et de créer des espaces néo-naturels plus conséquents (Tableau 7).

Tableau 7 : Cotes attribuées en fonction de la distance projetée sur la carte entre les zones revégétalisées

Connectivité entre les zones revégétalisées	Cote
Les zones revégétalisées sont proches	3
Les zones revégétalisées sont à une distance inférieure à 50 m	2
Les zones revégétalisées sont à une distance entre 50 et 200 m	1
Les zones revégétalisées sont distantes de plus de 200 m ou une seule zone a été revégétalisée sur la mine	0

Peu d'espèces des substrats ultramafiques sont anémochores (Suprin, 2011). La connectivité entre zones revégétalisées jouent donc un rôle dans le maintien de l'espèces (reproduction et dissémination des graines). Au vu des travaux réalisés sur les différentes mines, dans très peu de cas, les zones réhabilitées sont proches. Les différents seuils ont été choisis en fonction des distances mesurées sur les vues aériennes des travaux réalisés.

❖ Critère 6 - DIVERSITE DES TRAVAUX REALISES

La réintégration de la mine dans le paysage environnant naturel est un des objectifs de la réhabilitation. Il ne peut être atteint qu'en utilisant les deux techniques : la plantation et le semis hydraulique. En effet, ce dernier concerne de plus grandes zones que la plantation, entraînant une diminution plus rapide de l'impact paysager de la mine exploitée. Il permet également de réintroduire de la biodiversité sur de fortes pentes, là où une plantation serait infaisable. Par conséquent, il a un impact non-négligeable sur l'érosion de surface, grâce au développement de la couverture végétale (Cyperaceae). La plantation permet la réintroduction de jeunes plants et donc assure une certaine biodiversité. Pour le semis, la composition floristique après germination est très variable. Il peut donc y avoir une hétérogénéité importante dans la composition, la structure et le fonctionnement entre une zone semée et une plantée (Tableau 8).

Tableau 8 : Cotes attribuées en fonction des techniques utilisées

Méthode de revégétalisation utilisée	Cote
Plantation et semis hydraulique	2
Plantation ou semis hydraulique	1

❖ Critères 7 et 8 - OBSERVATIONS ET LEVEES DE GARANTIE

Les travaux de revégétalisation sont soumis à garantie. Pour un semis, un suivi est réalisé à t+24 mois afin de vérifier si au moins 1 plant/m² a germé. Pour la plantation, à t+18 mois, le taux de mortalité doit être inférieur à 20 %. Si ces caractéristiques ne sont pas remplies, l'entreprise se doit de remplacer les plants manquants. Il est intéressant de prendre en compte ces deux paramètres, car ce sont les seuls 'suivis' réalisés qui permettent d'évaluer le succès ou l'échec des travaux de revégétalisation (Tableau 9 & Tableau 10).

Tableau 9 : Cotes attribuées en fonction de la densité observée à t+24 mois

Semis : densité (plants/m ²) à t+24 mois	Cote
d > 15	4
10 < d ≤ 15	3
5 < d ≤ 10	2
1 < d ≤ 5	1
d ≤ 1	0

Ces seuils ont été choisis au vu des résultats des levées de garantie effectuées. Ces garanties sont levées si une densité d'un plant au m² est présente. Pour certains travaux, celle-ci s'élève à des valeurs supérieures à dix, d'où la création de tels seuils (Tableau 9).

Tableau 10 : Cotes attribuées en fonction de la mortalité observée à t+18 mois

Plantation : % de mortalité (M) à t+18 mois	Cote
$0 < M \leq 20$	4
$21 < M \leq 40$	3
$41 < M \leq 60$	2
$61 < M \leq 80$	1
$81 < M \leq 100$	0

Pour ce critère, les mortalités observées lors des différentes levées de garantie sont très variables. C'est pourquoi, les seuils sont réguliers d'une valeur de 20 %.

2.2.3.2 Contraintes abiotiques

L'évaluation de la valeur de la composante abiotique renvoie à l'intégrité chimique et physique du milieu (Vittet, 2011). Les cinq critères suivants ont été choisis dans le cadre du contexte minier nickélifère.

❖ Critère 9 - TOPOGRAPHIE ET STABILITE DES SOLS

Les zones à revégétaliser sur les mines sont le plus souvent constituées de versants (successions de banquettes et talus) et de flancs de talwegs (anciennes décharges). La revégétalisation de ces différentes surfaces n'a pas le même impact dans la lutte contre l'érosion et le maintien du sol (Tableau 11), qui est un des objectifs majeurs de la réhabilitation.

Tableau 11 : Cotes attribuées en fonction de la topographie des zones revégétalisées

Topographie et Stabilité des sols	Cote
La revégétalisation sur surface pentue (pente supérieur à 0%) a plus d'impact dans la lutte contre l'érosion	1
La revégétalisation sur surface plane (pente de 0%) a un rôle moindre dans la limitation de l'érosion	0

❖ Critères 10, 11 et 12 - SUPERFICIE REVEGETALISEE

La superficie est un paramètre important pour la diversité, la survie et le maintien de la capacité de support des fonctions écologiques d'un milieu naturel (Bernhardt, s.d.c *in* Vittet, 2011). Il existe une corrélation non linéaire entre la superficie d'un territoire et le nombre d'espèces qui le peuplent. Plus la superficie est grande, plus les types d'habitats qu'il héberge sont potentiellement variés (Vittet, 2011). Son rôle est important dans ces zones complètement anthropisées. La superficie revégétalisée joue alors un rôle crucial dans le maintien des populations réintroduites et de la stabilisation des sols (Tableau 12 & Tableau 13). Les valeurs limites de superficie ont été déterminées à la lecture des différents documents de travaux.

Tableau 12 : Cotes attribuées en fonction de la superficie semée

Superficie semée (ha)	Cote
25 ha et plus	4
10 à 24,99 ha	3
5 à 9,99 ha	2
0,5 à 4,99 ha	1
0 à 0,49 ha	0

Tableau 13 : Cotes attribuées en fonction de la superficie plantée

Superficie plantée (m ²)	Cote
5 ha et plus	4
2 à 4,99 ha	3
1 à 1,99 ha	2
0,5 à 0,99 ha	1
0 à 0,49 ha	0

De même, il est nécessaire de comparer ces surfaces à la superficie totale de la mine. Cette donnée permet une mise en perspective des zones revégétalisées par rapport à celles détruites par l'exploitation minière. Elle met en avant que malgré les efforts fournis, ces zones réhabilitées sont vraiment petites (Tableau 14). Les seuils ont été déterminés au regard des surfaces actuelles revégétalisées. Par rapport à la surface totale, celle-ci est encore faible. Fixer un objectif maximal de 25 % de la surface semble être un bon compromis entre le coût de la revégétalisation et la difficulté à réintroduire un couvert végétal.

Tableau 14 : Cotes attribuées en fonction de la superficie plantée

% de surfaces revégétalisées (S) par rapport à la surface totale	Cote
S > 25 %	4
10 % < S ≤ 25 %	3
5 % < S ≤ 10 %	2
1 % < S ≤ 5 %	1
0 % < S < 1 %	0

❖ Critère 13 - DEGRE DE PERTURBATION

La présence d'un milieu à l'état naturel, sans perturbation d'origine anthropique, est un élément positif dans l'évaluation de la valeur écologique d'un écosystème (Vittet, 2011). Les mines sont des milieux fortement anthropisés, perturbant grandement l'intégrité de l'écosystème. Il est donc intéressant d'étudier ce facteur, pour mettre en valeur les mines qui ont conservé quelques zones de végétation. Ces *patches* naturels jouent le rôle de banque de graines et de biodiversité. Ils seront le départ probable de la lente recolonisation de la mine par les espèces végétales (Tableau 15). Une zone de conservation est vouée à être conservée dans le temps alors que les *patches* naturels peuvent être dégradés si les exploitants miniers y trouvent du nickel. C'est pourquoi, une zone de conservation représente un

meilleur atout en écologie de la conservation qu'une succession de *patches* naturels, dans le cas de l'exploitation minière de Nouvelle-Calédonie.

Tableau 15 : Cotes attribuées en fonction du degré de perturbation

Degré de perturbation	Cote
Mineur : présence d'une zone de conservation au sein de la mine	2
Modéré : présence de quelques patches de végétation naturelle au sein de la mine	1
Majeur : aucune végétation naturelle au sein de la mine	0

2.2.3.3 Calcul de la valeur écologique

Après avoir attribué les cotes aux différents critères retenus, il convient de les pondérer en fonction de leur importance en réhabilitation minière. Ces notes ont été octroyées grâce aux retours d'expériences empiriques ainsi qu'aux objectifs des travaux. C'est pourquoi, une forte pondération a été attribuée aux critères concernant la biodiversité (critères 1, 2, 3), la lutte contre l'érosion (critères 4, 9) et la surface (critères 10, 11, 12). La somme des pondérations est égale à 100 si tous les critères ont été utilisés. La pondération représente l'importance relative de chaque critère retenu par rapport aux autres (Joly *et al.*, 2008, *in* Vittet, 2011). L'attribution de cette pondération s'effectue donc en fonction de l'ordre de priorité accordé à chaque critère (Vittet, 2011), dans ce contexte d'exploitation minière de nickel dont la réhabilitation répond à trois objectifs majeurs : la lutte contre l'érosion, la réintégration paysagère de la zone exploitée et la conservation de la biodiversité.

La valeur écologique s'obtient finalement grâce à la formule :

$$valeur\ écologique = \left(\frac{\sum_{i=1}^{13} \text{résultat du critère } i}{\text{résultat maximal}} \right) * 100$$

Où *résultat d'un critère* = *cote attribuée* * *pondération*

$$résultat\ maximal = \sum_{i=1}^{13} cote\ maximale\ du\ critère\ i * pondération\ du\ critère\ i$$

Dans le cas de données manquantes, le résultat du critère *i* prend une valeur nulle.

Cette valeur peut être interprétée grâce au Tableau 16.

Tableau 16 : Valeur qualitative de la valeur écologique en fonction du résultat obtenu

Valeur qualitative	Pourcentage
Exceptionnelle	de 91 à 100
Très bonne	de 76 à 90
Bonne	de 50 à 75
Moyenne	de 30 à 49
Pauvre	de 15 à 29
Très faible	de 0 à 14

3. RESULTATS

3.1. INGENIERIE ECOLOGIQUE ET SAUVEGARDE DES ESPECES

3.1.1. CROISSANCE (ANNEXES 5 & 6)

Entre 2012 et 2016, les plants de 2009 ne montrent pas de croissance significative. Les plants réintroduits en 2012 et 2014 montrent des accroissements en hauteur entre 2013 et 2016. Ils grandissent de quelques centimètres par an en moyenne. Les plants des autres phases de plantation grandissent de quelques centimètres par an. Ils présentent des coefficients de courbes similaires, exception faite de la plantation de 2017 dont la taille moyenne dépasse déjà celle des plants de 2016 (Figure 14).

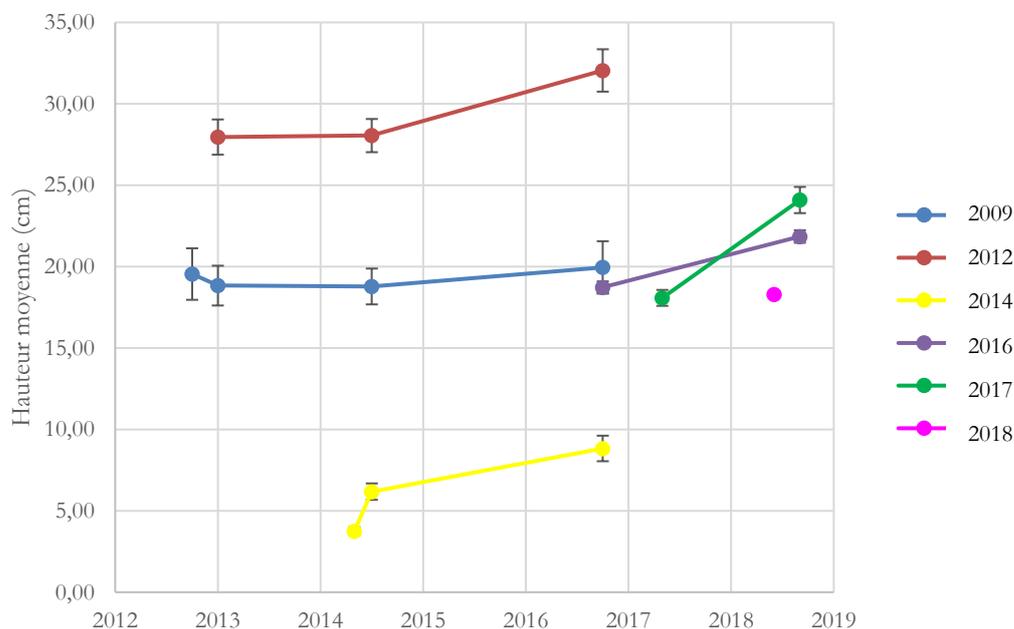


Figure 13 : Evolution de la croissance des plants – Hauteur moyenne

Les plantations de 2009 et de 2012 montrent des croissances du diamètre au collet moyen assez similaires, d'environ 0,30 cm en 2-3 ans (Figure 14). La plantation de 2014 présente la croissance la plus forte en seulement deux ans. En septembre 2016, le diamètre au collet des individus de 2009 et de 2014 est identique. Les plants de 2016 montrent une évolution similaire, de leur diamètre au collet, à ceux de 2017. Les coefficients directeurs des deux courbes sont proches ($y=0,20*a-b$).

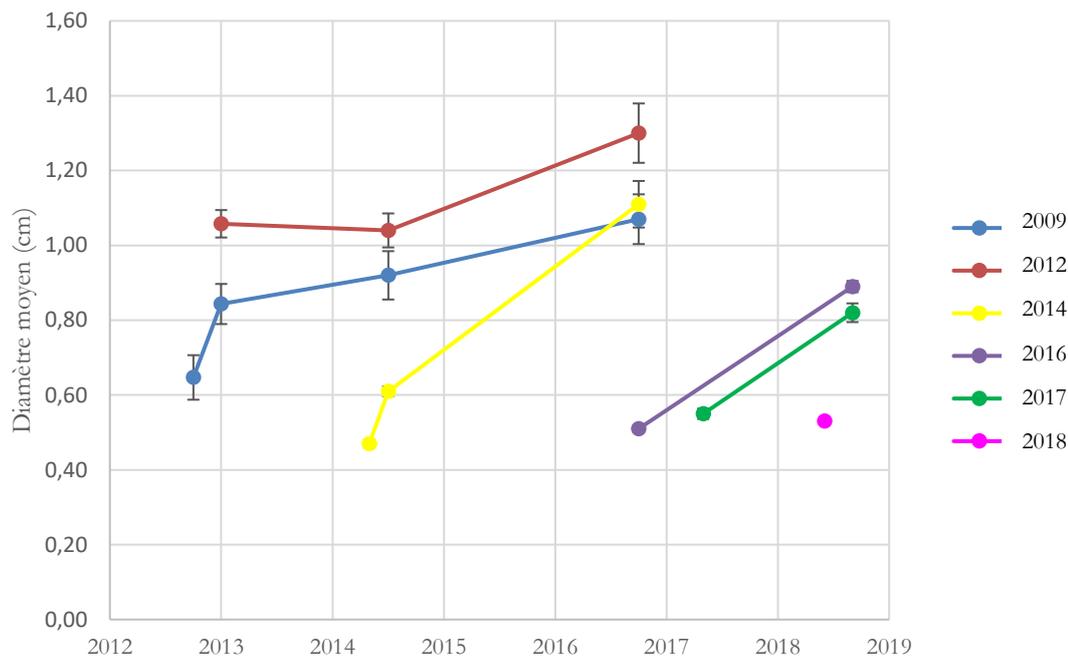


Figure 14 : Evolution de la croissance des plants - Diamètre au collet moyen

Pour les plantations de 2009, 2012, 2014 et 2018, les tests de corrélation des variables n'ont pas été réalisés car le suivi post-plantation de 2018 ne concernait que la couleur du plant et la végétation alentour, à la demande de la maîtrise d'œuvre et de la maîtrise d'ouvrage. Aucune valeur de diamètre et de hauteur n'a été relevée pour ces quatre années de plantation. Pour 2016 et 2017, ces tests ont été exécutés (Annexes 7 & 8) :

- Il existe une corrélation très significative (***) entre la hauteur et le diamètre des individus pour la plantation de 2016. Celle-ci est positive au vu du nuage de points. Ce n'est pas le cas pour la plantation de 2017 où H_0 a été acceptée (voir 2.1.3)
- La couleur est indépendante de la hauteur et du diamètre car le test du χ^2 a donné une p-valeur supérieure à 0,05 (non-significatif)

Seuls les résultats significatifs sont présentés ci-dessous. Aucune interaction entre le facteur végétation et le facteur technique de production n'est significative.

3.1.2. EFFETS DE LA VEGETATION (ANNEXE 9)

Dans le cas d'une végétation dense, entre 40 et 100 % des plants de chaque année de plantation sont beaux verts et plus de 70 % sont verts et beaux verts (Figure 16). C'est sous cette végétation que le taux de mortalité des individus est le plus faible. La plantation de 2016 présente le pourcentage de mortalité le plus fort.

Dans le cas d'une végétation moyenne, la proportion d'individus verts diminue par rapport à celle d'une végétation dense, et se situe entre 37 et 66 % pour l'ensemble des plantations. En revanche, le pourcentage d'individus morts croît pour l'ensemble des plantations. De

même, la proportion d'individus jaunes et oranges augmentent, comme par exemple pour la plantation de 2016, où elle passe de 6,67 % en végétation dense à 21,93 % en végétation moyenne.

Dans le cas d'une végétation éparse, les proportions d'individus beaux verts et verts diminuent fortement par rapport à ceux d'une végétation dense ou moyenne, excepté pour la plantation de 2009. Pour les plantations de 2014 et 2017, environ deux tiers des individus sont jaunes, oranges ou morts. La plantation de 2016 n'est constituée que de 17 % d'individus verts. La mortalité a doublé par rapport à celle en végétation moyenne, et de nombreux individus sont jaunes ou oranges. La plantation de 2012 montre des résultats mitigés puisqu'environ 50 % des individus sont encore verts. En revanche, la proportion d'individus orange est la plus forte comparée aux autres plantations. La plantation de 2017 affiche le taux de mortalité le plus important : 66,67 % des individus sont morts.

Dans le cas d'une plantation sur sol nu, les résultats sont différents en fonction de l'année de plantation. En effet, seuls les plants de 2012 ne montrent aucune mortalité sur sol nu, avec 60 % des individus toujours verts.

Les plantations de 2009 et 2014 affichent une diminution par deux du taux de mortalité entre une végétation éparse et un sol nu. Mais la proportion d'individus jaunes est élevée. La plantation de 2009 présente également une valeur plus élevée d'individus beaux verts (28,57 %), résultat supérieur à ceux des végétations moyennes et éparses. C'est également la seule année de plantation où l'on retrouve des individus beaux verts sur un sol nu.

La plantation de 2016 montre encore un pourcentage de morts plus important par rapport à une végétation éparse : 7 % des individus sont verts, le reste étant jaunes ou morts dans la plupart des cas.

Les plants de 2017 sont soit verts soit morts : le pourcentage d'individus morts reste cependant plus faible que sous une végétation éparse.

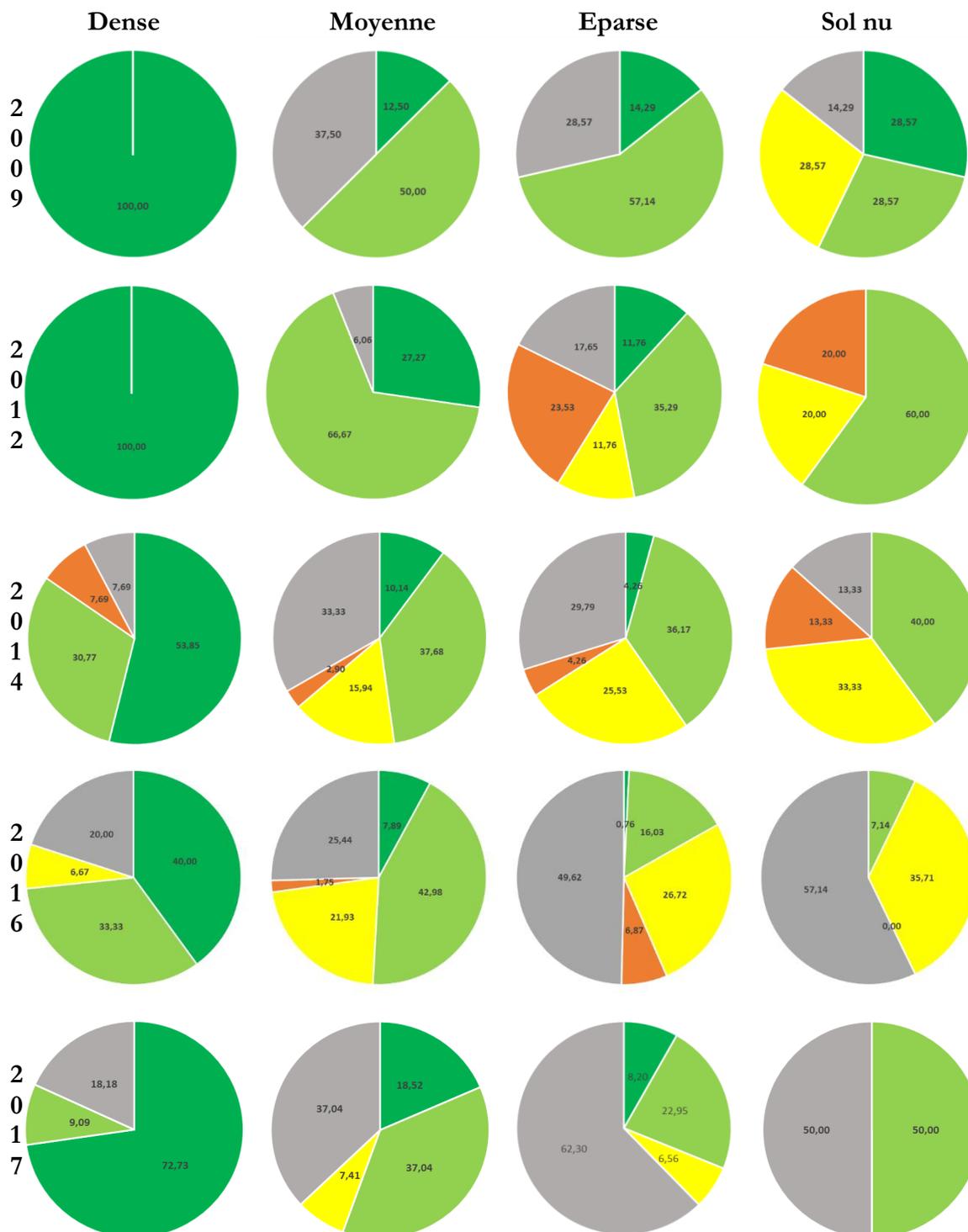


Figure 15 : Couleur des plants lors du suivi post-plantation de 2018 en fonction du faciès de végétation et de l'année de plantation (vert foncé : beau vert, vert clair : vert, jaune : jaune, orange foncé : orange, gris : mort/perdu)

La végétation dense est celle qui présente le moins de morts par rapport aux autres types de végétation (Figure 17). La grande majorité des morts observés pour les plantations de 2009 et de 2014 sont situés sous une végétation moyenne, respectivement 50 et 58 %.

les autres plantations, les morts se localisent majoritairement sous une végétation épars, allant même jusqu'à 75 % des individus morts pour la plantation de 2017.

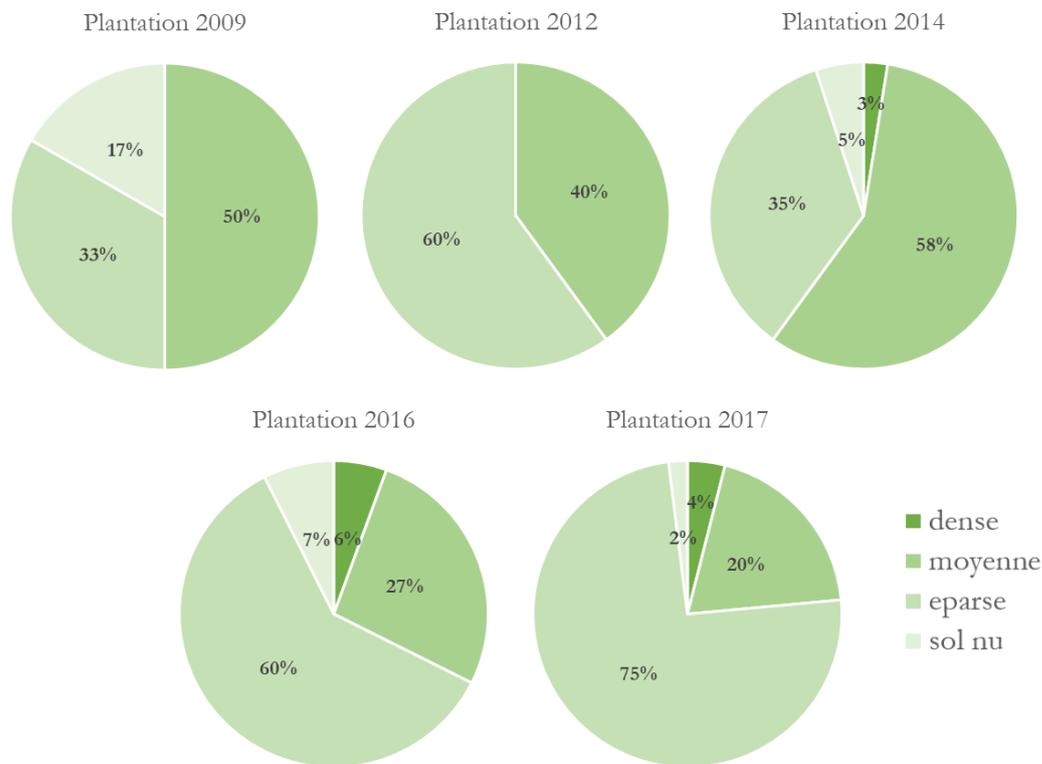


Figure 16 : Répartition des plants observés morts lors du suivi post-plantation de 2018 en fonction de la végétation

Les tests statistiques (ANOVA à deux facteurs sans interactions) montrent que la végétation a un effet très significatif sur la couleur pour les plantations de 2012, 2016 et 2017 (***) ; et un effet significatif pour la plantation de 2014 (*) (Annexes 10 à 14), c'est-à-dire qu'une végétation dense ou moyenne permet une meilleure survie des jeunes plants contrairement à une végétation épars ou un sol nu qui conduisent à des individus jaunes ou oranges et à un taux de mortalité plus fort.

3.1.3. EFFET DE LA TECHNIQUE DE PRODUCTION (ANNEXE 19)

La croissance en hauteur des plants est influencée par la technique de production. Ce constat a été significatif pour les années 2014 (***) et 2017 (***) (Annexes 16 & 17). Pour ces deux plantations, les individus issus de graines présentent une hauteur moyenne plus importante à chaque relevé que ceux issus de plantules (Figure 17 & Figure 18).

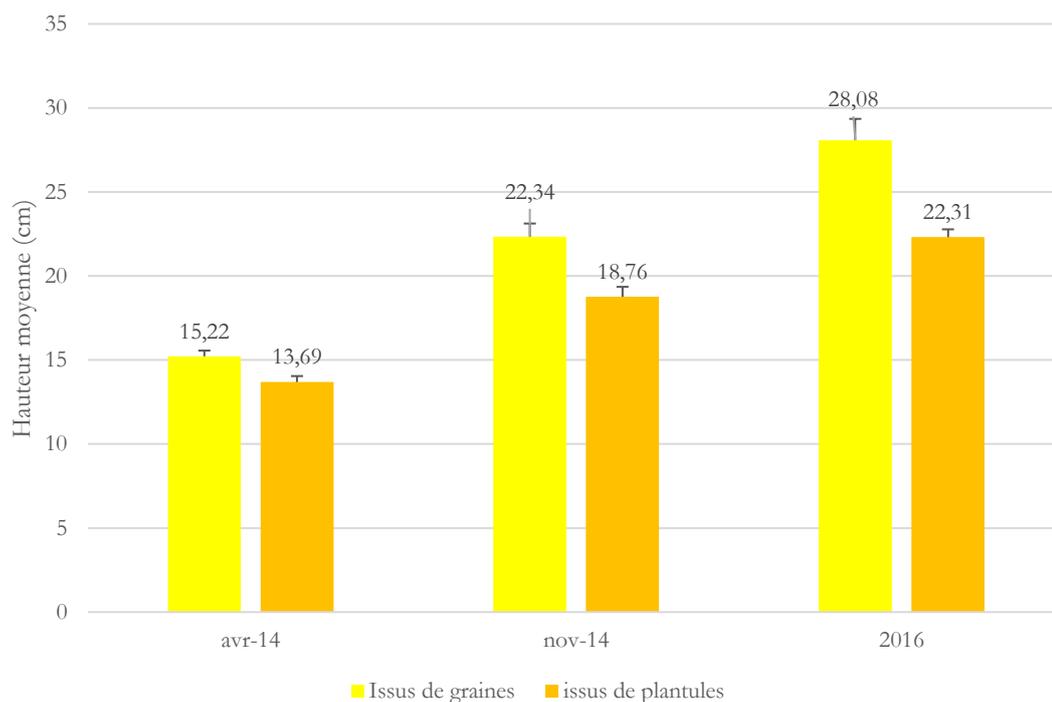


Figure 17 : Hauteur moyenne des individus de la plantation de 2014 en fonction de la technique de production

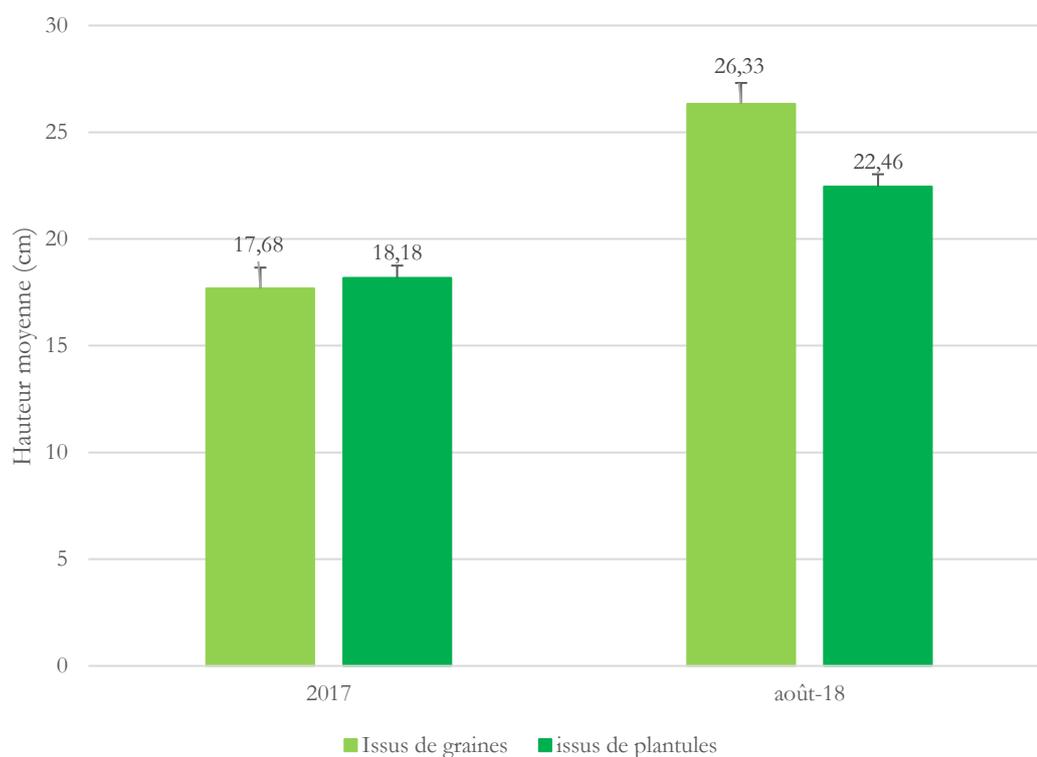


Figure 18 : Hauteur moyenne des individus de la plantation de 2017 en fonction de la technique de production

3.2. INGENIERIE ET VALEUR ECOLOGIQUE

Une fois les cotes et les pondérations attribuées, le résultat pour chaque critère et le résultat maximal sont calculés pour obtenir la valeur écologique de la mine (Tableau 17 & Tableau 18, Annexes 19 à 32).

Sur Pinpin depuis 2012, aussi bien par semis hydraulique que par plantation, plus de 8,6 ha ont été traités. Associés à une forte réintroduction d'espèces à statut particulier, notamment les orchidées et une gestion convenable de la zone minière (connectivité des zones revégétalisées et zone conservatoire), Pinpin est la mine affichant la valeur écologique la plus forte (Tableau 18). Avec ces 76 000 m² semés en 2014 et une plantation riche en Cyperaceae, dont les résultats sont probants, Ouazangou arbore une valeur écologique moyenne de 37 %. Elle se distingue de celle de Pinpin par une plus faible richesse spécifique du semis (Annexe 30). Malgré une faible surface plantée, de 324 m², la mine Euréka atteint une valeur écologique moyenne de 31 %. En effet, grâce à la réintroduction d'une espèce en danger critique d'extinction et d'une composition floristique réintroduite riche en Cyperaceae, cette mine lutte pour la conservation du *Phyllanthus bupleuroides* Baill. et pour une meilleure amorce des successions secondaires. La mine Alice-Philippe montre des résultats plus faibles pour les critères 1 et 3 mais sa valeur écologique s'approche de celle d'Euréka grâce au semis réalisé en 2015 sur 17 855 m² (Annexe 30), malgré une densité de 0,813 plants/m² lors de la levée de garantie. Elle participe de ce fait à la stabilisation des talus des verses et donc à un meilleur contrôle de l'érosion. De même, les travaux réalisés sur Circée s'apparentent à ceux d'Euréka. En revanche, la proportion de Cyperaceae et le nombre d'espèces à statut particulier sont moindres. Les travaux réalisés sur Dent de Poya affichent des résultats supérieurs aux autres levées de garantie à t+24 mois après le semis. En effet, la densité est de 27,33 plants/m² composée d'une richesse spécifique de 12 espèces du maquis. La valeur écologique résulte de l'importance de ces deux critères et atteint 19 %. N'Go présente une valeur écologique proche mais elle résulte de l'achèvement d'autres travaux. La plantation de 1 830 plants, avec une diversité spécifique de 22 (H=2,647) (Annexe 28) riche en espèces de Cyperaceae, permet aux critères 1, 3 et 4 d'obtenir un résultat moyen. Enfin, les mines Taom, Edouard et Kadjitra ont les valeurs écologiques les plus faibles, respectivement 16, 14 et 13 %. Taom et Kadjitra n'ont été que semées avec une note de richesse spécifique identique de 7. Elles ne participent donc que légèrement à la diminution de l'érosion sur mine, surtout la mine Kadjitra avec uniquement 2 307 m² revégétalisés par rapport aux 27 000 m² de Taom. La mine Edouard, quant à elle, a fait l'objet de deux phases de plantation, sur plus de 7 000 m², équivalent à 0,39 % de la superficie de la mine. Une seule espèce en préoccupation mineure a été réintroduite et trop peu de Cyperaceae.

Tableau 17 : Calcul de la valeur écologique attribuée à chaque mine (Partie 1)

Critères	Pondération	Alice-Philippe		Kadjitra		Edouard		Circée		Euréka	
		Cote	Résultat	Cote	Résultat	Cote	Résultat	Cote	Résultat	Cote	Résultat
1-Présence d'espèce à statut particulier	12	2	24	2	24	1	12	4	48	4	48
2-Richesse spécifique réintroduite lors des semis	7	1	7	1	7	/	/	/	/	/	/
3-Diversité spécifique réintroduite lors des plantations	10	1	10	/	/	1	10	1	10	1	10
4-% du nombre de plants de Cyperaceae réintroduits	14	2	28	/	/	1	14	3	42	4	56
5-Connectivité entre les zones revégétalisées	6	1	6	0	0	1	6	0	0	0	0
6-Méthode de revégétalisation utilisée	6	2	12	1	6	1	6	1	6	1	6
7-Semis : densité (plants/m ²) à t+24 mois	5	0	0	NA	NA	/	/	/	/	/	/
8-Plantation : % de mortalité à t+18 mois	5	NA	NA	/	/	NA	NA	NA	NA	NA	NA
9-Topographie et Stabilité des sols	9	1	9	1	9	0	0	0	0	0	0
10-Superficie semée (m ²)	8	1	8	0	0	/	/	/	/	/	/
11-Superficie plantée (m ²)	8	1	8	/	/	1	8	0	0	0	0
12-% de surfaces revégétalisées par rapport à la surface totale de la mine	4	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0
13-Degré de perturbation	6	0	0	1	6	0	0	1	6	1	6
VALEUR ECOLOGIQUE			28 %		13 %		14 %		27 %		31 %

Tableau 18 : Calcul de la valeur écologique attribuée à chaque mine (Partie 2)

Critères	Pondération	N'Go		Ouazangou		Taom		Pinpin		Dent de Poya	
		Cote	Résultat	Cote	Résultat	Cote	Résultat	Cote	Résultat	Cote	Résultat
1-Présence d'espèce à statut particulier	12	2	24	3	36	2	24	4	48	2	24
2-Richesse spécifique réintroduite lors des semis	7	/	/	1	7	1	7	3	21	1	7
3-Diversité spécifique réintroduite lors des plantations	10	1	10	1	10	/	/	2	20	/	/
4-% du nombre de plants de Cyperaceae réintroduits	14	2	28	2	28	/	/	2	28	/	/
5-Connectivité entre les zones revégétalisées	6	0	0	0	0	0	0	3	18	0	0
6-Méthode de revégétalisation utilisée	6	1	6	2	12	1	6	2	12	1	6
7-Semis : densité (plants/m ²) à t+24 mois	5	/	/	1	5	NA	NA	1	5	4	20
8-Plantation : % de mortalité à t+18 mois	5	NA	NA	4	20	/	/	NA	NA	/	/
9-Topographie et Stabilité des sols	9	0	0	1	9	1	9	1	9	1	9
10-Superficie semée (m ²)	8	/	/	2	16	1	8	1	8	1	8
11-Superficie plantée (m ²)	8	0	0	0	0	/	/	2	16	/	/
12-% de surfaces revégétalisées par rapport à la surface totale de la mine	4	0	0	1	4	1	4	2	8	0	0
13-Degré de perturbation	6	1	6	1	6	1	6	2	12	1	6
VALEUR ECOLOGIQUE			18 %		37 %		16 %		50 %		19 %

Dans ces tableaux, NA signifie qu'il n'y a pas encore de valeurs, c'est-à-dire que les travaux ont été réalisés mais que les levées de garantie ne l'ont pas été. Le symbole '/' indique qu'une des deux techniques d'ingénierie écologique (plantation ou semis hydraulique ; Annexe 22) n'a pas encore été effectuée sur la mine.

4. DISCUSSION

4.1. INGENIERIE ECOLOGIQUE ET SAUVEGARDE DES ESPECES

La densité de végétation existante où se fait la plantation a un effet significatif sur le taux de mortalité de l'*Araucaria rulei*. Plus la végétation est diffuse, plus le plant a du mal à s'acclimater au milieu naturel. En effet, quelle que soit l'année de plantation, plus la végétation est absente (éparse ou sol nu) autour du plant, plus la proportion d'individus morts augmente (Figure 16 & Figure 17). Au contraire, une végétation dense offre un couvert ombragé aux jeunes plants, lequel semble favoriser leur développement. La flore associée à la végétation environnante favorise probablement aussi leur installation. En 2017, juste après la phase de plantation, les *Araucaria rulei* réintroduits ont été exposés à une sécheresse pendant six mois, qui a probablement causé la mort de nombreux plants. Ces données ne concernent que le suivi post-plantation de 2018. Ces conclusions peuvent être également faites pour les différents relevés précédents. Il faut souligner que ces conditions optimales sont difficiles à retrouver sur la mine Camp des Sapins, car la majorité du maquis est de type ligno-herbacé (Annexe 32), n'offrant donc que peu d'ombre aux jeunes plants. En revanche, la végétation ne joue aucun rôle significatif dans le développement des jeunes arbres, que ce soit en hauteur ou en diamètre. En ce qui concerne la technique de production, les effets sont inverses. Ce facteur ne joue aucun rôle sur la couleur des plants et donc sur leur survie. Cependant, pour les plantations de 2014 et de 2017, les plants issus de graines sont plus grands que ceux issus de plantules. Le type de production a donc un effet sur la croissance des plants de ces deux années de plantations (Figure 17 & Figure 18). Or, les plants issus de plantules montrent une mortalité plus importante que ceux issus de graines (Annexe 33). Ce résultat pourrait s'expliquer par le double stress subi par ces plants. En effet, les plantules récupérées sur le terrain sont d'abord acheminées à la pépinière (1^{er} stress), puis replantées plus tard lors des phases de revégétalisation (2^{ème} stress).

La zone conservatoire sur la mine Camp des Sapins permet de maintenir une population d'*Araucaria rulei*. Cet arbre est localisé sur de nombreux substrats ultramafiques de la Grande Terre. Une étude (Wulff *et al.*, 2013) a montré que toutes ces populations ne sont pas équivalentes en termes de structure génétique. Une grande diversité taxonomique existe (Wulff *et al.*, 2013). La fragmentation de leur habitat par l'exploitation minière, augmente le risque de dégradation génétique des populations. Elle conduirait à une dépression de consanguinité causée par des croisements entre apparentés (résultats montrés pour *Araucaria nemorosa* de Laub., (Kettle *et al.*, 2008)). La sauvegarde de cette espèce semble alors se compliquer si le caractère génétique est pris en compte. Les travaux d'ingénierie écologique sur l'*Araucaria rulei*, sont-ils finalement en train de conserver ou de diminuer la diversité génétique de la population ? La conservation *ex situ*, ou acclimatation en pépinière dans le cadre du plan de sauvegarde, permet de maintenir une certaine diversité des populations existantes. En revanche, les méthodes utilisées d'échantillonnage aléatoire ont tendance à provoquer une perte de diversité. Elles peuvent également favoriser des plants qui n'aurait pas survécu en milieu naturel (Wulff *et al.*, 2013 ; Kettle *et al.*, 2008). Au sein d'une population naturelle, seuls quelques individus sont fructifères (communications personnelles SIRAS Pacifique). Les graines sont alors récoltées pour obtenir un nombre assez important d'individus à replanter. Cette technique pourrait alors entraîner la culture de matériel consanguin chez cette espèce ne dispersant que peu. Il est nécessaire de récolter les graines sur le plus grand nombre d'individus possible et de s'assurer de réintroduire un nombre de plants identiques pour chaque arbre récolté. Le suivi des graines est alors

essentiel. La collecte de plantules est également possible. Il a même été montré que la diversité génétique des plants est nettement plus importante lorsqu'ils sont issus de plantules que lorsqu'ils sont issus de graines, ce qui réduit la dépression génétique de la population (Wulff *et al.*, 2014). Grâce à la zone de conservation et aux populations dynamiques à densité élevée, cette population compte assez d'individus pour ne pas voir de dépression de consanguinité apparaître (Wulff *et al.*, 2014). Cette zone doit rester un conservatoire si l'on veut continuer à préserver ce pool génétique.

Une étude (Wulff *et al.*, 2014) la population d'*Araucaria rulei* du Camp des Sapins a montré qu'une faible perte de diversité génétique était observable. Les individus utilisés en revégétalisation et les juvéniles présentent à peu près le même nombre moyen d'allèles (Wulff *et al.*, 2014). Malgré un manque de données sur le développement des stades juvéniles de cette espèce (influence de la végétation et techniques de production), conduisant à de forts taux de mortalité les premières années, les travaux d'ingénierie écologique menés semblent fonctionner. Ce plan de sauvegarde ne permet pas uniquement la réintroduction de nouveaux plants dans la zone conservatoire. Il vise à un maintien de la diversité génétique à long terme du fait de la réintroduction à la fois de plants issus de graines et de plants issus de plantules. Pour cette situation, l'ingénierie écologique peut être considérée comme un pilier majeur de la sauvegarde de cette espèce menacée.

4.2. INGENIERIE ECOLOGIQUE ET VALEUR ECOLOGIQUE

L'évaluation de la valeur écologique après travaux d'ingénierie écologique permet de définir les mines où il faudrait concentrer les efforts quant aux travaux de revégétalisation. En effet, seule la mine Pinpin obtient une bonne valeur écologique au vu de l'ampleur et de la diversité des travaux réalisés. Les dégâts entraînés par le stockage de stériles sur les versants AC1 et AC2 étaient visibles de loin (communications personnelles SIRAS Pacifique). La concession minière se devait donc de revégétaliser rapidement cette zone. Les valeurs écologiques des autres sites miniers sont plus faibles car les travaux réalisés ne répondent pas assez aux objectifs fixés. Des efforts sont donc à mener pour l'ensemble des autres mines. Comme par exemple Kadjitra, Edouard et Taom qui devraient tenter de réintroduire des espèces à statut particulier et diversifier les techniques de revégétalisation (Tableau 17 & Tableau 18).

L'endémisme marqué de la Nouvelle-Calédonie se reflète énormément chez les espèces de maquis minier. Leur répartition sur le territoire se limite à des endroits géographiques très précis. C'est pourquoi, dans le cadre de projets de réhabilitation, il est parfois difficile de les réintroduire car il n'existe aucune donnée quant à leur multiplication et leur développement en pépinière. Ce frein au maintien de la biodiversité se répercute sur la valeur écologique attribuée aux mines. Néanmoins, le nombre de programmes de sauvegarde et de multiplication d'espèces sensibles proposés progresse. Il est en effet essentiel d'acquérir des connaissances scientifiques sur l'écologie et la biologie de ces espèces en vue de les réintroduire. En revanche, la diversité animale et celle des micro-organismes du maquis minier ne sont pas pris en compte dans l'évaluation de la valeur écologique, malgré le rôle crucial qu'elles jouent dans la pollinisation et l'amélioration des conditions édaphiques (L'Huillier *et al.*, 2010). Or, par manque de budget, de ressources humaines et de temps, les suivis de ces populations ne sont que peu réalisés.

Dans l'approche choisie, un lien de causalité a été supposé entre la richesse spécifique et la stabilité des écosystèmes. Or, la problématique est complexe. En effet, la richesse spécifique

ne décrit que l'aspect composition taxonomique, et ceci d'une manière synthétique et approximative. Celle-ci a, certes, un intérêt patrimonial mais pas nécessairement écologique. Elle cache des différences plus subtiles et souvent plus importante entre communautés (Du Bus de Warnaffe & Devillez, 2002). La famille des Cyperaceae constitue alors un bioindicateur pratique car leur rôle est connu pour stabiliser les sols (Lagrange, 2009) et amorcer les successions secondaires (Jaffré & Rigault, 1991 ; McCoy *et al.*, 1999).

De même, Blandin (1986) fait une distinction entre deux composantes de la valeur écologique. Il ne faut en effet pas confondre la valeur sociale, relative à la satisfaction des besoins humains, et la valeur biologique, relative aux attributs propres de l'écosystème (composition, structure et fonctionnement). Au premier abord, la réhabilitation minière pourrait reposer uniquement sur la valeur sociale. En effet, les travaux sont entrepris pour répondre à la règlementation du code minier et améliorer la gestion des ressources minières (exemple : le stockage de stériles ou la prospection des ressources présentes dans le sol (Barnaud & Chapuis, 2004). Or, actuellement, les techniques de revégétalisation se proposent de rétablir les fonctions écologiques afin de recréer des écosystèmes dynamiques. Sur l'ensemble des mines, les travaux restaurent petit à petit l'intégrité de l'écosystème en améliorant sa structure, sa composition et sa capacité de résilience (Du Bus de Warnaffe & Devillez, 2002). En effet, dans la majorité des cas, le seuil d'irréversibilité a été dépassé (Aronson *et al.*, 1995). L'écosystème est peu ou plus du tout résilient. L'action humaine est donc requise afin de permettre le développement d'un processus de résilience pour la zone dégradée (exemple : la plantation et l'apport de matière organique).

La mise en place de cette méthodologie se base sur le choix de critères, qui répondent aux trois objectifs règlementaires de la réhabilitation minière. Il existe de nombreux autres critères mais ceux-ci ont été choisis au vu des informations relevées dans les documents mis à disposition (listes de graines/plantes réintroduites, PV de fin de chantier, PV de levée de garantie, offre technique et financière, Cahier des Charges) des dix sites d'étude réalisés par SIRAS Pacifique pour la NMC depuis 2012. Des critères sur l'eau, comme par exemple, les flux hydrologiques, auraient pu être pris en compte mais par manque de données de terrains, ceux-ci n'ont pas été développés dans cette analyse. De même, chaque critère se divise en de nombreux sous-critères définis par différents seuils. Ceux-ci ont été déterminés au vu des informations présentes dans les documents fournis mais aussi des retours d'expériences empiriques de SIRAS Pacifique qui n'ont pas été retranscrits sur papier. Ils sont difficilement explicables par des recherches bibliographiques car la notion de valeur écologique est nouvelle. Il en va de même pour la pondération qui a été choisie en fonction des trois objectifs de réhabilitation, c'est-à-dire que les critères qui permettaient de répondre le mieux à ces critères se sont vu attribuer des pondérations plus élevées que les autres. On pourrait donc dire que cette méthode se base sur la mise en place de critères, de seuils et de pondérations complètement arbitraires. Mais cette méthodologie de la valeur écologique se base sur 20 ans d'expériences de SIRAS Pacifique dans ce domaine et sur mon retour d'expérience de six mois. Elle se veut donc être la plus objective possible au vu de l'état de l'avancée scientifique dans le domaine de la réhabilitation minière néo-calédonienne.

L'approche développée ici permet le classement typologique des mines en fonction de leur degré de réhabilitation. Mais, elle est pour l'heure incomplète et n'a pas de signification dynamique puisqu'aucun suivi dans le temps n'y est inclus. Elle pourrait permettre une meilleure gestion de la réhabilitation en focalisant les futurs travaux sur les mines où la valeur écologique est la plus faible.

5. CONCLUSION

Ecosystème emblématique de la Nouvelle-Calédonie par sa biodiversité et son micro-endémisme, le maquis minier est menacé par l'exploitation du nickel. Véritable moteur économique de l'archipel, ce métal est toujours au cœur des polémiques environnementales. Dès le début des années 1960, avec l'émergence d'un « mouvement vert », des programmes de réhabilitation ont été lancés. Après plus de 50 ans de mise en œuvre, l'ingénierie écologique est devenue un véritable outil aussi bien pour la conservation de la biodiversité (espèces menacées) et des services écosystémiques que pour la réintégration paysagère des zones décapées. Toutefois, au vu de la conjoncture économique actuelle et de l'entrée en vigueur assez récente des réglementations minières, peu de suivis des techniques ont été réalisés. Le manque global de données concernant la réussite ou l'échec de ces chantiers de revégétalisation est problématique. Il est difficile de mettre en œuvre un système d'évaluation au vu du nombre élevé d'indicateurs potentiels qu'il faut considérer. L'approche basée sur la valeur écologique propose alors de faire une typologie des sites réhabilités à moindre coût. Cette méthode met en avant les critères sur lesquels des efforts ont été menés pour répondre aux objectifs préalablement fixés : lutte contre l'érosion, conservation de la biodiversité et réintégration paysagère.

La réhabilitation minière a pour objet de réparer les dommages causés sur les terrains miniers grâce aux techniques d'ingénierie écologique. Or, les répercussions sur les bassins versants et les vallées situées en bas des mines sont déjà présentes. La réhabilitation ne devrait-elle pas s'effectuer du pied de mine jusqu'à son sommet ? Peut-on vraiment compenser la dette écologique causée par l'exploitation minière ? Ces questions restent en suspens. Elles sont au cœur des discussions lancées par le CNRT, qui souhaiterait faire un bilan des techniques d'ingénierie écologique et des suivis envisageables de la réussite sur le territoire. Un groupe scientifique est en train de se monter pour proposer des solutions dans les années à venir.

6. REFERENCES

- Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C., & Pontanier R. 1995. Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones arides et semi-arides. Le vocabulaire et les concepts. Dans : R. Ponranier, A. M'Hiri, J. Aronson, N. Akrimi, E. Le Floc'h (éd.). *L'Homme peut-il refaire ce qu'il a défait?* Paris : J. Libbey Eurotext, p. 11-29.
- Barnaud G. & Chapuis J.-L. 2004. Ingénierie écologique et écologie de la restauration : spécificités et complémentarités. *Ingénierie*. N°Spécial, p. 123-138.
- Blandin P. 1986. Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. 17(4), p. 215-307
- Brooks R.R., Chiarucci A., & Jaffré T. 1998. Revegetation and stabilisation of mine dumps and other degraded terrain. Dans : Brooks R.R. (éd.). *Plants that hyperaccumulate heavy metals*. Oxford ; New York : CAB International, p. 227-247.
- Burylo M. & Rey F. 2015. Effet des plantes sur les processus érosifs : de la connaissance des traits fonctionnels aux applications d'ingénierie végétale et de génie végétale. *Génie végétale et ingénierie végétale*, (3), p. 35-41.
- Delvienne Q. 2016. *Opérations de protections et de restaurations du bassin de captage de Haccinem*. Province Nord de Nouvelle-Calédonie : Communauté du Pacifique, 79 p.
- Demenois J., Rey F., Ibanez T., Stokes A., & Carriconde F. 2018. Linkages between root traits, soil fungi and aggregate stability in tropical plant communities along a successional vegetation gradient. *Plant and Soil*. 423, p. 1-16.
- Direction de l'Environnement. 2017. *Code de l'environnement de la Province Sud*.
- Du Bus de Warnaffe G. & Devillez F. 2002. Quantifier la valeur écologique des milieux pour intégrer la conservation de la nature dans l'aménagement des forêts : une démarche multicritères. *Annals of Forest Science*. 59(4), p. 369-387.
- Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie. 2009a. *Code minier de la Nouvelle-Calédonie (partie législative)*.
- . 2009b. *Code minier de la Nouvelle-Calédonie (partie réglementaire)*.
- . 2009c. *Schéma de mise en valeur des richesses minières de la Nouvelle-Calédonie*.
- Goxe J. 2010. *Comparaison de topsoils provenant de différentes formations de maquis pour la restauration écologique des sites miniers de Nouvelle-Calédonie*. Mémoire de Master option Gestion Environnementale des Ecosystèmes et Forêts Tropicales, AgroParisTech, IAC, Montpellier SupAgro, 104 p.
- Guillon J.-H. 1975. *Les massifs péridotitiques de Nouvelle-Calédonie: type d'appareil ultrabasique stratiforme de chaîne récente*. Paris : ORSTOM, 120 p.
- Harrison R.M. & Royal Society of Chemistry. 1996. *Pollution: causes, effects, and control*. Cambridge, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord : Royal Society of Chemistry, 480 p.

- Honnay O. & Jacquemyn H. 2007. Susceptibility of common and rare plant species to the genetic consequences of habitat fragmentation. *Conservation Biology*. 21(3), p. 823-831.
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. 2018. IUCN Red List of Threatened Species. Dans : *IUCN red list* [En ligne]. Disponible sur : < <https://www.iucnredlist.org/species/30988/9589036> > (Consulté le 26 novembre 2018).
- Jaffré T. 1980. *Étude écologique du peuplement végétal des sols dérivés de roches ultrabasiques en Nouvelle Calédonie*. Paris : ORSTOM, 273 p.
- Jaffré T., Bouchet P., & Veillon J.-M. 1998. Threatened plants of New Caledonia: Is the system of protected areas adequate ? *Biodiversity and Conservation*. 7, p. 109-135.
- Jaffré T., Latham M., & Schmid M. 1977. Aspects de l'influence de l'extraction du minerai de nickel sur la végétation et les sols en Nouvelle-Calédonie. *ORSTOM. sér. Biol.*, XII(4), p. 307-321.
- Jaffré T. & Rigault F. 1991. *Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur des sites miniers*. Nouméa, Nouvelle-Calédonie : ORSTOM, 83 p.
- Jaffré T., Rigault F., Dagostini G., Tinel-Fambart J., Wulff A., & Munzinger J. 2009. Input of the different vegetation units to the richness and endemism of the New Caledonian flora. , p. 1-4.
- Kettle C.J., Ennos R.A., Jaffré T., Gardner M., & Hollingsworth P.M. 2008. Cryptic genetic bottlenecks during restoration of an endangered tropical conifer. *Biological Conservation*. 141(8), p. 1953-1961.
- Lagrange A. 2009. *Études écologiques et microbiologiques des espèces du genre Costularia (Cyperaceae) pionnières des sols ultramafiques de Nouvelle-Calédonie : applications à la restauration écologique*. Ecologie, Environnement. Nouvelle-Calédonie, 244 p.
- L'Huillier L., Jaffré T., & Wulff A. 2010. *Mines et environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration*. Nouvelle-Calédonie, IAC Editions, 420 p.
- Maitre D'Hôtel E. & Pelegrin F. 2012. *Les valeurs de la biodiversité, un état des lieux de la recherche française*. Paris : Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité, 48 p.
- Marcon E. 2015. *Mesures de la Biodiversité*. Kourou, France : AgroParisTech, 282 p.
- McCoy S., Jaffré T., Rigault F., & Ash J.. 1999. Fire and succession in the ultramafic maquis of New Caledonia. *Journal of Biogeography*. (26), p. 579-594.
- McDonald T., Gann G.D., Jonson J., & Dixon K.W. 2016. *International standards for the practice of ecological restoration - including principles and key concepts*. Washington, D.C., Society for Ecological Restoration, 48 p.
- Mittermeier R.A., Turner W.R., Larsen F.W., Brooks T.M., & Gascon C. 2011. Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots. Dans : Zachos F.E., Habel

- J.C. (éd.). *Biodiversity Hotspots*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 3-22.
- Proctor J. 1970. Magnesium as a toxic element. *Nature*. 227, p. 742.
- R Development Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. Dans : *R Foundation for statistical computing*. [En Ligne]. Disponible sur : <<http://www.R-project.org>> (Consulté le 28 octobre 2018).
- Rey F. 2005. Efficacité des ouvrages de génie biologique pour le piégeage des sédiments dans des ravines incisées dans des marnes (Alpes du Sud, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. (1), p. 21-30.
- . 2012. *Génie biologique contre l'érosion torrentielle*. Quae., 101 p.
- Rey F., Gosselin F., & Doré A. 2014. *Ingénierie écologique: action par et / ou pour le vivant?* Versailles : Quae, 165 p.
- Sarrailh J.-M. 2002. La revégétalisation des exploitations minières : l'exemple de la Nouvelle-Calédonie. *Bois et Forêts des Tropiques*. 272 (2), p. 21-31.
- Schmid M. 1982. Endémisme et spéciation en Nouvelle-Calédonie. *C. R. Soc. Biogéogr.* 58 (2), p. 52-60.
- Stokes A., Douglas G.B., Fourcaud T., Giadrossich F., Gillies C., Hubble T., Kim J.H., Loades K.W., Mao Z., McIvor I.R., Mickovski S.B., Mitchell S., Osman N., Phillips C., Poesen J., Polster D., Preti F., Raymond P., Rey F., Schwarz M., & Walker L.R. 2014. Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil*. 377(1-2), p. 1-23.
- Suprin B. 2011. *Florilège des plantes en Nouvelle-Calédonie*. Nouméa : Éditions Photosynthèse, 520 p.
- Tercinier G. 1962. *Les sols de la Nouvelle-Calédonie*. Nouvelle-Calédonie : ORSTOM, 55 p.
- Vittet C. 2011. *Valeurs écologique et économique d'un ancien site minier restauré*. Montréal, Québec, Canada : Centre universitaire de formation en environnement, Université de Sherbrook, 97 p.
- Wulff A., Fogliani B., & L'Huillier L. 2014. *Etude de la diversité et de la structuration génétique des populations d'Araucaria rulei*. Nouvelle-Calédonie : IAC, SORECO-NC, 53 p.
- Wulff A.S., 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), p. e73371.

7. LISTE DES ABREVIATIONS

CNRT	Centre National de Recherche Technique
FRB	Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité
NMC	Nickel Mining Company
PV	Procès-verbal
SIRAS	Société Internationale de Réaménagement des Sites
SLN	Société Le Nickel
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature

8. TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Récapitulatif des données concernant les travaux de plantation	19
Tableau 2 : Récapitulatif des données concernant les travaux de semis hydrauliques	20
Tableau 3 : Cotes attribuées en fonction du nombre d'espèces à statut particulier	21
Tableau 4 : Cotes attribuées en fonction de la richesse spécifique (R_s) des semis	22
Tableau 5 : Cotes attribuées en fonction de la diversité spécifique (H) des plantations	22
Tableau 6 : Cotes attribuées en fonction du pourcentage de Cyperaceae plantées	23
Tableau 7 : Cotes attribuées en fonction de la distance entre les zones revégétalisées	23
Tableau 8 : Cotes attribuées en fonction des techniques utilisées	24
Tableau 9 : Cotes attribuées en fonction de la densité observée à t+24 mois	24
Tableau 10 : Cotes attribuées en fonction de la mortalité observée à t+18 mois	24
Tableau 11 : Cotes attribuées en fonction de la topographie des zones revégétalisées	25
Tableau 12 : Cotes attribuées en fonction de la superficie semée	26
Tableau 13 : Cotes attribuées en fonction de la superficie plantée	26
Tableau 14 : Cotes attribuées en fonction de la superficie plantée	26
Tableau 15 : Cotes attribuées en fonction du degré de perturbation	27
Tableau 16 : Valeur qualitative de la valeur écologique en fonction du résultat obtenu	27
Tableau 17 : Calcul de la valeur écologique attribuée à chaque mine (Partie 1)	35
Tableau 18 : Calcul de la valeur écologique attribuée à chaque mine (Partie 2)	36

9. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Exploitation à ciel ouvert, mine Pinpin, commune de Poya.....	7
Figure 2 : Mine du Camp des Sapins (commune de Thio) (fond de carte ©2018 Google)	11
Figure 3 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Alice-Philippe - KOUAOUA (fond de carte ©2018 Google)	13
Figure 4 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Kadjitra - KOUAOUA (fond de carte ©2018 Google).....	14
Figure 5 : Travaux de revégétalisation de versées à stériles réalisés sur la mine Circée - NAKETY (fond de carte ©2018 Google)	15
Figure 6 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Edouard - NAKETY (fond de carte ©2018 Google).....	15
Figure 7 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Euréka - NAKETY (fond de carte ©2018 Google).....	16
Figure 8 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine PB2 - N'GO (fond de carte ©2018 Google).....	16
Figure 9 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Ouazangou - OUACO (fond de carte ©2018 Google).....	17
Figure 10 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Taom - OUACO (fond de carte ©2018 Google).....	17
Figure 11 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Dent de Poya - POYA (fond de carte ©2018 Google)	18
Figure 12 : Travaux de revégétalisation réalisés sur la mine Pinpin - POYA (fond de carte ©2018 Google).....	19
Figure 13 : Evolution de la croissance des plants - Hauteur moyenne	28
Figure 14 : Evolution de la croissance des plants - Diamètre au collet moyen	29
Figure 16 : Couleur des plants lors du suivi post-plantation de 2018 en fonction du faciès de végétation et de l'année de plantation (vert foncé : beau vert, vert clair : vert, jaune : jaune, orange foncé : orange, gris : mort/perdu) .	31
Figure 17 : Répartition des plants observés morts lors du suivi post-plantation de 2018 en fonction de la végétation	32
Figure 17 : Hauteur moyenne des individus de la plantation de 2014 en fonction de la technique de production	33
Figure 18 : Hauteur moyenne des individus de la plantation de 2017 en fonction de la technique de production	33
Figure 20 : <i>Araucaria rulei</i> , mine du Camp des Sapins	51
Figure 21 : Présentation du site d'étude Tip Top (fond de carte ©2018, Google)	90
Figure 23 : Fascine et plantation	91
Figure 24 : Plantation (à gauche) et semis à sec (à droite)	91
Figure 24 Photographie des surfaces décapées de Tip Top	93

10. ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : CODE MINIER ET DELIBERATION FISCALE N° 104	50
ANNEXE 2 : <i>ARAUCARIA RULEI</i> F.MUELL.....	51
ANNEXE 3 : LOCALISATION DE L'ENSEMBLE DES SITES D'ETUDE SUR LE TERRITOIRE	52
ANNEXE 4 : SCHEMA DE STABILISATION DES STERILES LATERITIQUES	53
ANNEXE 5 : HAUTEUR MOYENNE DES PLANTS AU COURS DES SUIVIS POST- PLANTATION	54
ANNEXE 6 : DIAMETRE MOYEN DES PLANTS AU COURS DES SUIVIS POST-PLANTATION	55
ANNEXE 7 : TESTS STATISTIQUES - INDEPENDANCE ET CORRELATION DES VARIABLES DE 2016	56
ANNEXE 8 : TESTS STATISTIQUES - INDEPENDANCE ET CORRELATION DES VARIABLES DE 2017	57
ANNEXE 9 : COULEUR DES INDIVIDUS EN FONCTION DE LA VEGETATION.....	58
ANNEXE 10 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, COULEUR, 2012.....	61
ANNEXE 11 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, COULEUR, 2014.....	62
ANNEXE 12 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, COULEUR, 2016.....	63
ANNEXE 13 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, COULEUR, 2017.....	64

ANNEXE 14 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, COULEUR, 2018	65
ANNEXE 15 : INFLUENCE DU TYPE DE PRODUCTION SUR LA HAUTEUR DES INDIVIDUS	66
ANNEXE 16 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, HAUTEUR, 2014 SUIVI DE 2016	67
ANNEXE 17 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, HAUTEUR, 2017, SUIVI DE 2018	69
ANNEXE 18 : SEMIS HYDRAULIQUE	71
ANNEXE 19 : STATUT UICN	72
ANNEXE 20 : STATUT UICN DES ESPECES UTILISEES (IUCN, 2018)	73
ANNEXE 21 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE ALICE-PHILIPPE	75
ANNEXE 22 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE EDOUARD	76
ANNEXE 23 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE CIRCEE	77
ANNEXE 24 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE CIRCEE EUREKA	78
ANNEXE 25 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE PB2	79
ANNEXE 26 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE OUAZANGOU	80
ANNEXE 27 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE PINPIN	81
ANNEXE 28 : CALCUL DES DIFFERENTS INDICES DE BIODIVERSITE REINTRODUITE LORS DES PLANTATIONS	83
ANNEXE 29 : STATUT UICN DES ESPECES REINTRODUITES SUR LES DIFFERENTES MINES (INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE AND NATURAL RESOURCES, 2018)	84
ANNEXE 30 : DONNEES DES SEMIS REALISES	85

ANNEXE 31 : DONNEES DES PLANTATIONS	86
ANNEXE 32 : SURFACES DE L'EXPLOITATION MINIERE ET SURFACE REVEGETALISEES	87
ANNEXE 33 : TAUX DE MORTALITE OBSERVE ENTRE LES INDIVIDUS ISSUS DE GRAINES ET CEUX ISSUS DE PLANTULES.....	88
ANNEXE 34 : LES MAQUIS MINIERS (L'HUILLIER ET AL., 2010)	89
ANNEXE 35 : TIP TOP, SITE D'ETUDE	90
ANNEXE 36 : TIP TOP, OUVRAGES REALISES	91
ANNEXE 37 : TIP TOP, DIAGRAMME DE CLEWELL & ARONSON.....	92
ANNEXE 38 : REHABILITATION DE TIP TOP, UNE SUCCESSION D'ECOSYSTEMES..	93
ANNEXE 39 : ECOLOGIE DES ESPECES VEGETALES, TIP TOP.....	96
ANNEXE 40 : DATES DE FLORAISON ET DE FRUCTIFICATION DES ESPECES VEGETALES REINTRODUITES A TIP TOP.....	97
ANNEXE 41 : ARTICLE DE JOURNAL	98

ANNEXE 1 : CODE MINIER ET DELIBERATION FISCALE N° 104

Depuis 2009, le code minier de la Nouvelle-Calédonie impose les réglementations et fixe la législation de la recherche, la prospection, l'exploitation, la détention, la possession, la transformation et la circulation des minerais de nickel, de cobalt et de chrome (Article Lp 111.1). Le code minier intègre les problématiques environnementales sur les mines en cours d'exploitation. Il fait en sorte d'obliger l'exploitant minier à adopter les meilleures techniques disponibles, tout au long du cycle de vie du projet minier : depuis l'exploration jusqu'à la fermeture afin d'éviter, de minimiser et de compenser les impacts sur la biodiversité et l'environnement.

La réhabilitation des sites dégradés est obligatoire. Elle est prévue dans l'autorisation délivrée pour l'ouverture de travaux. Elle donne lieu à la production d'une pièce entière du dossier de demande d'exploitation : le schéma de réhabilitation des zones dégradées (Article R 142-10-4). Elle est en plus assujettie à la mise en place d'une garantie financière.

Concernant les anciens sites miniers, l'administration les a classés en deux catégories :

- les sites dits « orphelins » (sites sans concession minière et donc sans propriétaire)
- les sites miniers détenus (concessions minières existantes) mais dont l'exploitation s'est arrêtée avant 1975.

Pour ces deux catégories d'anciens sites miniers, leur prise en compte en termes de réhabilitation a commencé en 1989 via une délibération fiscale : la délibération n°104 du 20 avril 1989. Cette dernière permettait aux entreprises assujetties à la fiscalité minière et/ou aux entreprises dont l'activité relève de la métallurgie des minerais, à verser une partie de l'impôt sur les bénéfices sur des fonds communaux en vue de la réhabilitation de sites miniers. Le montant versé annuellement ne pouvait excéder 15% du total de l'impôt avec un maximum de 250 millions CFP. Ce financement versé sur des budgets annexes aux communes concernées par l'activité minière et ayant mis en place leur Comité de Réhabilitation des anciens Sites Miniers (CRSM), a permis la réhabilitation de nombreux anciens sites miniers (Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, 2009c)

ANNEXE 2 : ARAUCARIA RULEI F.MUELL

❖ REPARTITION ET HABITAT

L'*Araucaria rulei* se retrouve à entre 400 et 1000 m d'altitude en petites populations dispersées, souvent dégradées, sur sols ferrallitiques du nord-ouest de la Grande Terre jusque dans les régions de Thio (mine du Camp des Sapins) et de Tontouta dans le sud.

❖ DESCRIPTION

Cet arbre à port candélabre, de 20-30 m de hauteur a une cime arrondie composée de branches dirigées vers le haut (Figure 20). Elles peuvent mesurer jusqu'à 4 m de long pour 3-4 cm de diamètre. Les rameaux relevés portent un bouquet dense de ramilles épaisses, insérées en spirale, pouvant atteindre 50 cm de longueur pour un 50 cm de diamètre.

Les feuilles sont rétrécies, imbriquées, serrées, dures, luisantes, lancéolées, aigües et à pointe courbée.

Le cône mâle est cylindrique et il mesure 1 x 3 cm. Le cône femelle, de dimension 12 x 8 cm, est ovale. Les écailles à graine d'environ 3 cm, possèdent une pointe de 1 mm, divergente et légèrement penchée en avant.



Figure 19 : *Araucaria rulei*, mine du Camp des Sapins

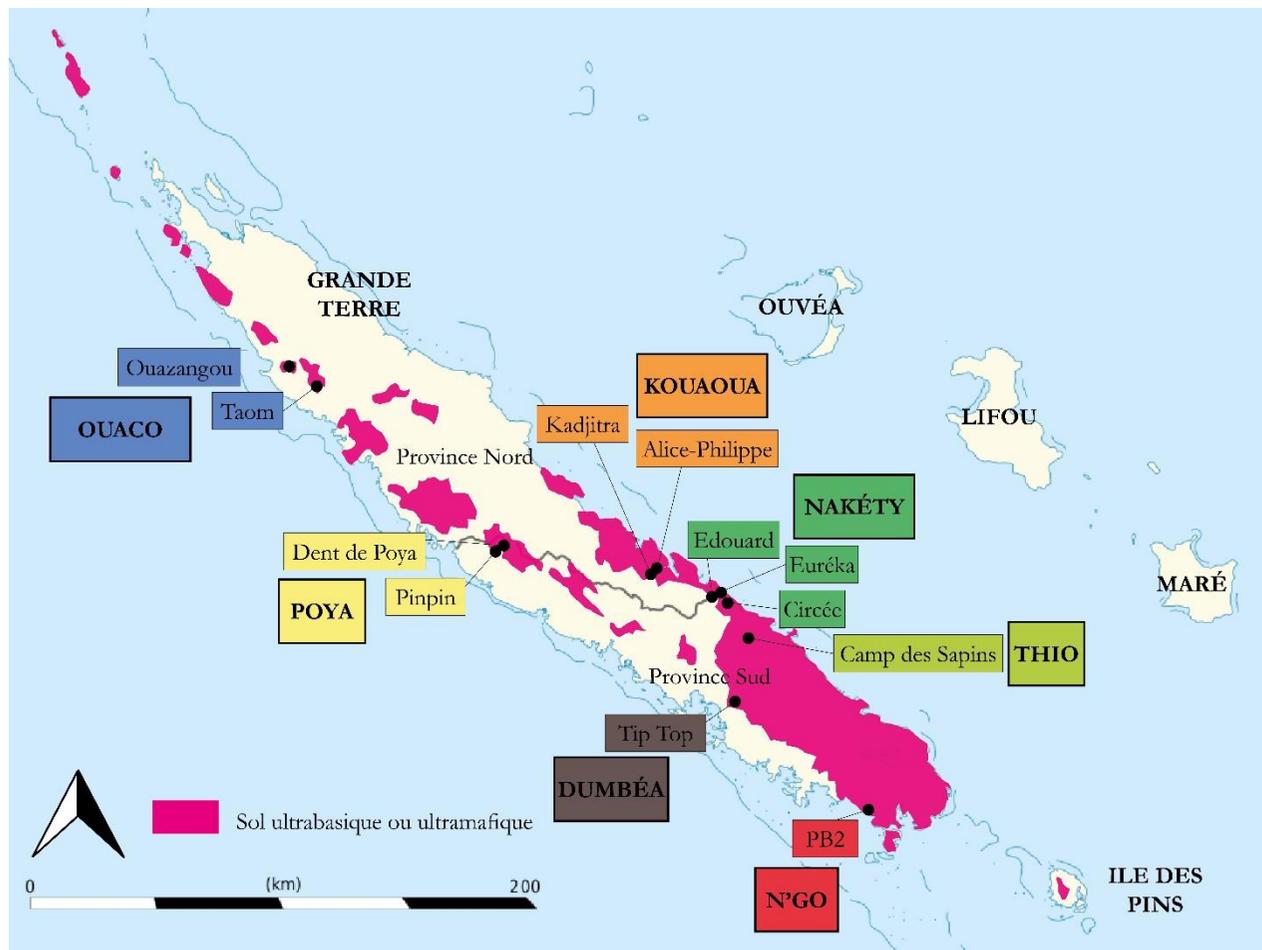
La récolte des cônes femelles a lieu de janvier à février, et la pollinisation d'août à septembre. La fructification, certes aléatoire, peut cependant être abondante.

❖ ESPECE EN DANGER

L'*Araucaria rulei* se raréfie et ses peuplements sont aujourd'hui très localisés et de plus en plus menacés. Son recul est estimé actuellement à plus de 40 % du fait de l'expansion de l'activité des exploitations des mines de nickel alors que sa régénération est aléatoire et sa croissance, lente (Suprin, 2011).

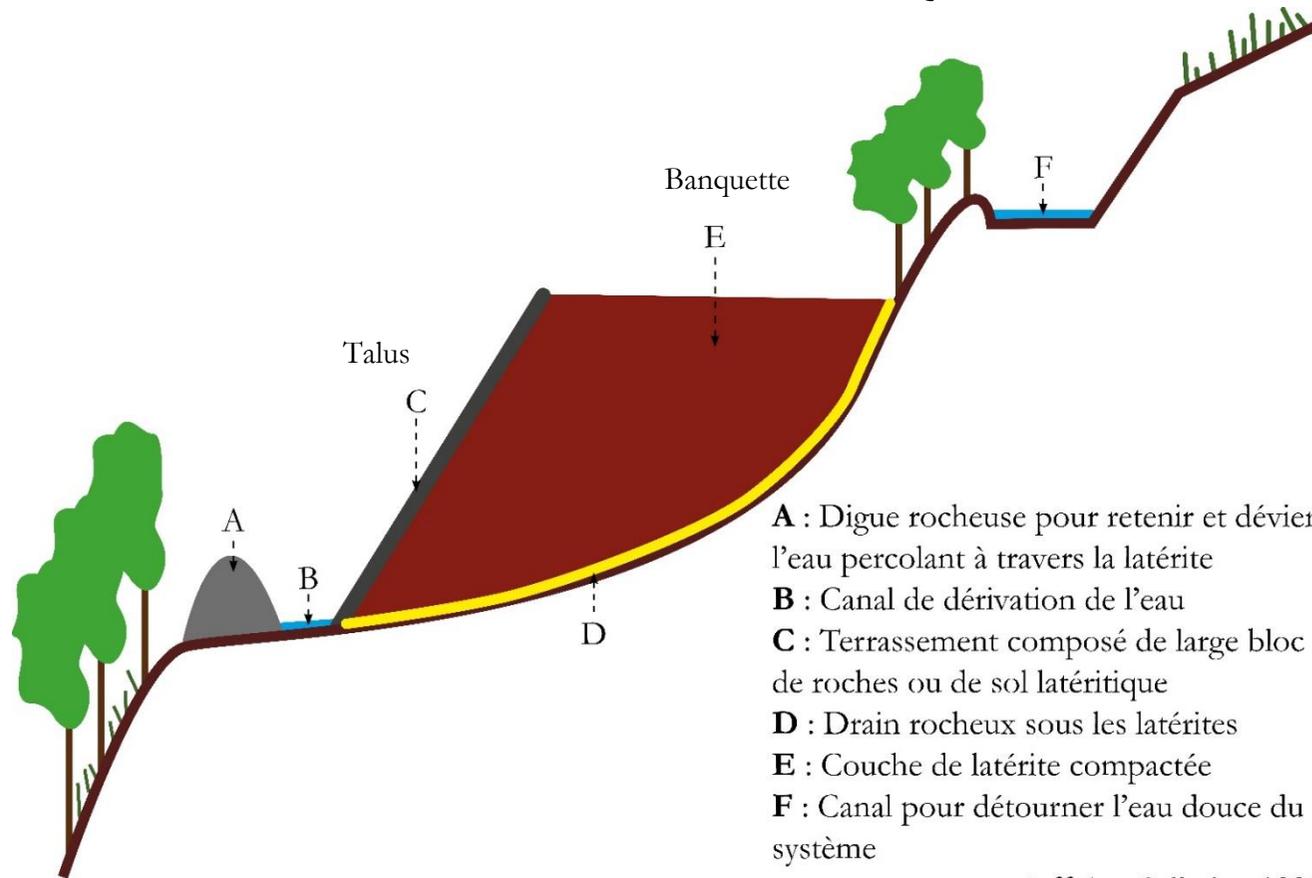
Cette espèce classée EN par l'UICN est en danger d'extinction.

ANNEXE 3 : LOCALISATION DE L'ENSEMBLE DES SITES D'ETUDE SUR LE TERRITOIRE



Fond de carte : Wikipédia, 2018

ANNEXE 4 : SCHEMA DE STABILISATION DES STERILES LATÉRIQUES



Jaffré et Pelletier, 1992

Ce schéma peut se répéter tout au long de la pente et créer des verses : successions de plusieurs talus et banquettes.

ANNEXE 5 : HAUTEUR MOYENNE DES PLANTS AU COURS DES SUIVIS POST-PLANTATION

Suivis	PL 09	PL 12	PL 14	PL 16	PL 17	PL 18
	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
<i>sept-12</i>	19,54 ± 1,58	/	/	/	/	/
<i>déc-13</i>	18,83 ± 1,22	27,96 ± 1,08	/	/	/	/
<i>avr-14</i>	/	/	14,39 ± 0,25	/	/	/
<i>nov-14</i>	18,78 ± 1,10	28,05 ± 1,02	20,52 ± 0,5	18,73 ± 0,36	/	/
<i>sept-16</i>	19,95 ± 1,61	32,05 ± 1,30	25,15 ± 0,78	/	18,08 ± 0,49	/
<i>mai-18</i>	/	/	/	/	/	18,29 ± 0,15
<i>août-18</i>	/	/	/	21,85 ± 0,39	24,09 ± 0,81	/

ANNEXE 6 : DIAMETRE MOYEN DES PLANTS AU COURS DES SUIVIS POST-PLANTATION

Suivis	PL 09	PL 12	PL 14	PL 16	PL 17	PL 18
	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
<i>sept-12</i>	0,65 ± 0,06	/	/	/	/	/
<i>déc-13</i>	0,84 ± 0,05	1,06 ± 0,07	/	/	/	/
<i>avr-14</i>	/	/	0,47 ± 0,01	/	/	/
<i>nov-14</i>	0,92 ± 0,06	1,04 ± 0,05	0,61 ± 0,01	0,51 ± 0,01	/	/
<i>sept-16</i>	1,07 ± 0,07	1,3 ± 0,08	1,11 ± 0,06	/	0,55 ± 0,01	/
<i>mai-18</i>	/	/	/	/	/	0,53 ± 0,004
<i>août-18</i>	/	/	/	0,89 ± 0,015	0,82 ± 0,05	/

ANNEXE 7 : TESTS STATISTIQUES - INDEPENDANCE ET CORRELATION DES VARIABLES DE 2016

Test d'indépendance du Chi-deux : test de l'indépendance entre Couleur et Hauteur

	Degré de liberté	Statistique de Chi-2	p-valeur
Test du Chi-2	200.000	185.976	0.753

Test d'indépendance du Chi-deux : test de l'indépendance entre Couleur et Diamètre

	Degré de liberté	Statistique de Chi-2	p-valeur
Test du Chi-2	52.000	49.780	0.562

Coefficient de Pearson : 0.379
Coefficient des rangs (Spearman) : 0.353
Tau de Kendall : 0.259

Test de corrélation :

	Statistique	p-valeur
Pearson	5.479	0.000000143
Rangs (Spearman)	639661.058	0.00000111
Rangs (kendall)	4.863	0.00000115

ANNEXE 8 : TESTS STATISTIQUES - INDEPENDANCE ET CORRELATION DES VARIABLES DE 2017

Test d'indépendance du Chi-deux : test de l'indépendance entre Couleur et Hauteur

	Degré de liberté	Statistique de Chi-2	p-valeur
Test du Chi-2	44.000	49.936	0.249

Test d'indépendance du Chi-deux : test de l'indépendance entre Couleur et Diamètre

	Degré de liberté	Statistique de Chi-2	p-valeur
Test du Chi-2	14.000	16.826	0.266

Coefficient de Pearson : 0.254
 Coefficient des rangs (Spearman) : 0.328
 Tau de Kendall : 0.231

Test de corrélation :

	Statistique	p-valeur
Pearson	1.816	0.0756
Rangs (Spearman)	13998.028	0.0201
Rangs (kendall)	2.188	0.0287

ANNEXE 9 : COULEUR DES INDIVIDUS EN FONCTION DE LA VEGETATION

Pour la plantation de 2009 :

	Dense	Moyenne	Eparsé	Sol nu	
Beau vert	1	1	1	1	2
Vert	0	4	4	4	2
Jaune	0	0	0	0	2
Orange	0	0	0	0	0
Mort	0	3	2	2	1
Nombre d'individus	1	8	7	7	7

Pourcentage

	Dense	Moyenne	Eparsé	Sol nu	
Beau vert	100,00	12,50	14,29	28,57	28,57
Vert	0,00	50,00	57,14	28,57	28,57
Jaune	0,00	0,00	0,00	28,57	28,57
Orange	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mort	0,00	37,50	28,57	14,29	14,29

Pour la plantation de 2012 :

	Dense	Moyenne	Eparsé	Sol nu	
Beau vert	9	9	2	0	0
Vert	0	22	6	3	3
Jaune	0	0	2	1	1
Orange	0	0	4	1	1
Mort	0	2	3	0	0
Nombre d'individus	9	33	17	5	5

Pourcentage

	Dense	Moyenne	Eparsé	Sol nu	
Beau vert	100,00	27,27	11,76	0,00	0,00
Vert	0,00	66,67	35,29	60,00	60,00
Jaune	0,00	0,00	11,76	20,00	20,00
Orange	0,00	0,00	23,53	20,00	20,00
Mort	0,00	6,06	17,65	0,00	0,00

Pour la plantation de 2014 :

	Dense	Moyenne	Eparsé	Sol nu	
Beau vert	7	7	2	0	
Vert	4	26	17	6	
Jaune	0	11	12	5	
Orange	1	2	2	2	
Mort	1	23	14	2	
Nombre d'individus	13	69	47	15	

Pourcentage				
	Dense	Moyenne	Eparsé	Sol nu
Beau vert	53,85	10,14	4,26	0,00
Vert	30,77	37,68	36,17	40,00
Jaune	0,00	15,94	25,53	33,33
Orange	7,69	2,90	4,26	13,33
Mort	7,69	33,33	29,79	13,33

Pour la plantation de 2016 :

	Dense	Moyenne	Eparsé	Sol nu	
Beau vert	12	9	1	0	
Vert	10	49	21	1	
Jaune	2	25	35	5	
Orange	0	2	9	0	
Mort	6	29	65	8	
Nombre d'individus	30	114	131	14	

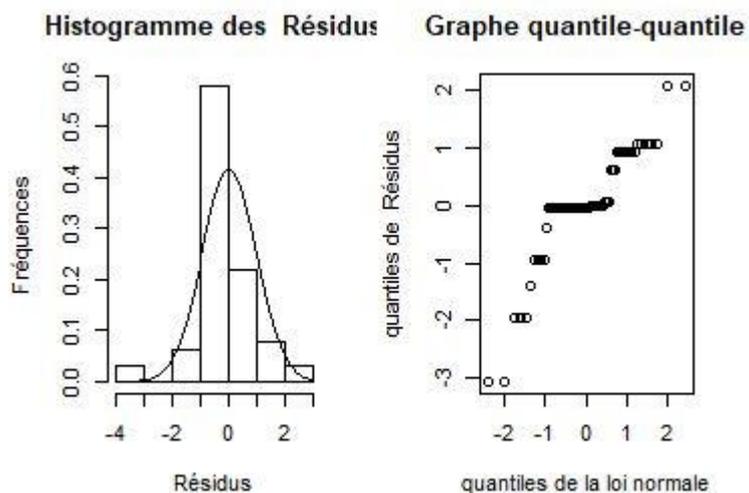
Pourcentage				
	Dense	Moyenne	Eparsé	Sol nu
Beau vert	40,00	7,89	0,76	0,00
Vert	33,33	42,98	16,03	7,14
Jaune	6,67	21,93	26,72	35,71
Orange	0,00	1,75	6,87	0,00
Mort	20,00	25,44	49,62	57,14

Pour la plantation de 2017 :

	Dense	Moyenne	Eparse	Sol nu	
Beau vert	8	5	5	0	
Vert	1	10	14	1	
Jaune	0	2	4	0	
Orange	0	0	0	0	
Mort	2	10	38	1	
Nombre d'individus	11	27	61	2	

Pourcentage					
	Dense	Moyenne	Eparse	Sol nu	
Beau vert	72,73	18,52	8,20	0,00	
Vert	9,09	37,04	22,95	50,00	
Jaune	0,00	7,41	6,56	0,00	
Orange	0,00	0,00	0,00	0,00	
Mort	18,18	37,04	62,30	50,00	

ANNEXE 10 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, COULEUR, 2012



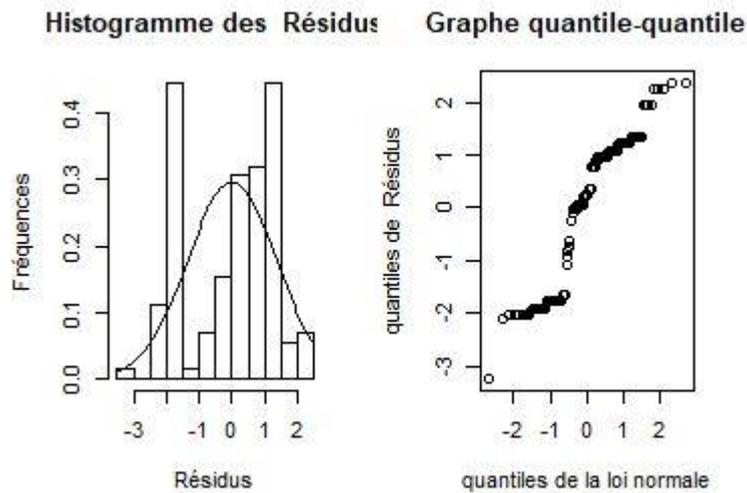
	Statistique	p-valeur
Kolmogorov-Smirnov	0.303	0.0000158
Shapiro-Wilk	0.850	0.00000164

TABLE D'ANALYSE DE LA VARIANCE

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	Statistique F
Technique.de.production	0.806	1	0.806	0.820
Végétation	28.174	3	9.391	9.550
Résidus	58.020	59	0.983	

	p-valeur
Technique.de.production	0.369
Végétation	0.0000311

ANNEXE 11 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, COULEUR, 2014

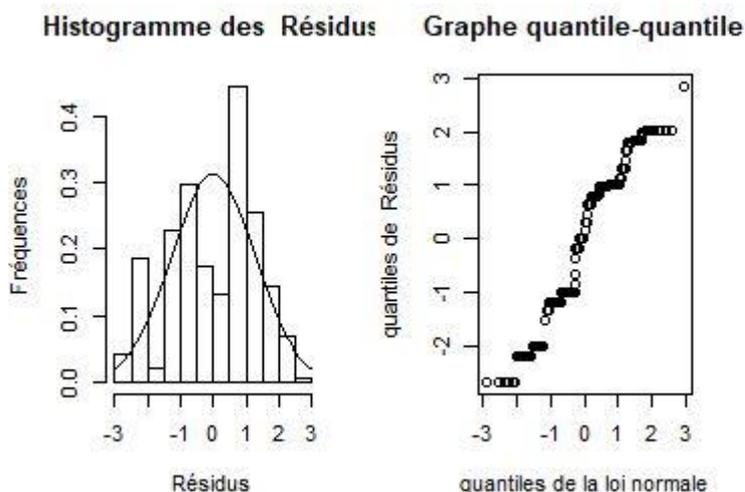
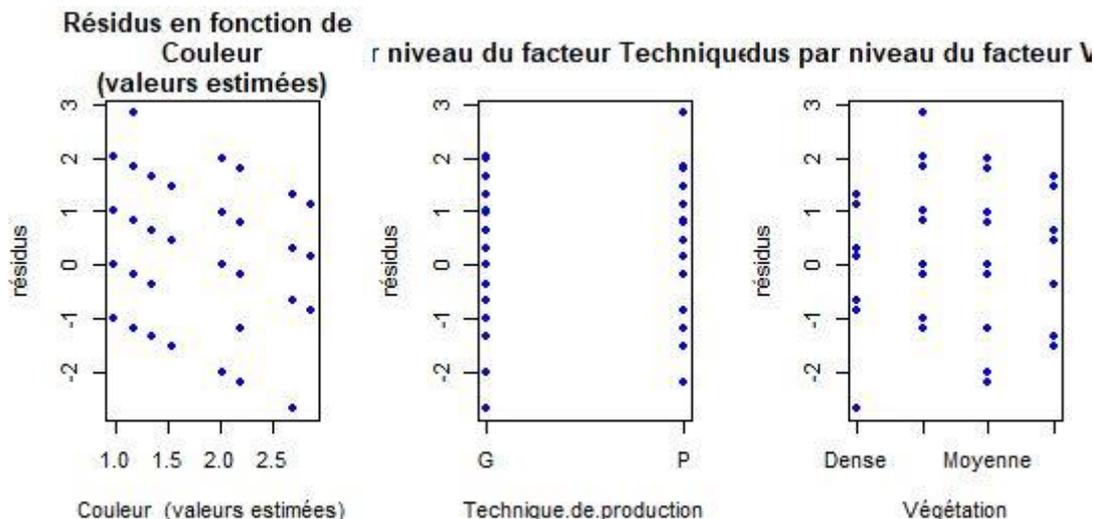


	Statistique	p-valeur
Kolmogorov-Smirnov	0.173	0.000347
Shapiro-Wilk	0.899	0.0000000206

TABLE D'ANALYSE DE LA VARIANCE

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	Statistique F
Technique.de.Production	4.733	1	4.733	2.511
Végétation	19.096	4	4.774	2.532
Résidus	260.143	138	1.885	
	p-valeur			
Technique.de.Production	0.115			
Végétation	0.0431			

ANNEXE 12 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, COULEUR, 2016

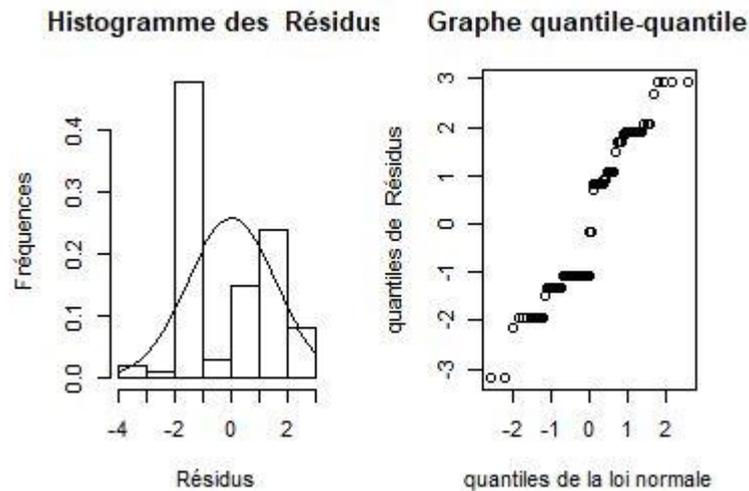


	Statistique	p-valeur
Kolmogorov-Smirnov	0.162	0.000000546
Shapiro-Wilk	0.940	0.00000000172

TABLE D'ANALYSE DE LA VARIANCE

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	Statistique F
Technique.de.production	4.171	1	4.171	2.514
Végétation	100.708	3	33.569	20.236
Résidus	471.121	284	1.659	
	p-valeur			
Technique.de.production	0.114			
Végétation	6.49e-12			

ANNEXE 13 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, COULEUR, 2017



	Statistique	p-valeur
Kolmogorov-Smirnov	0.261	0.00000206
Shapiro-Wilk	0.907	0.00000279

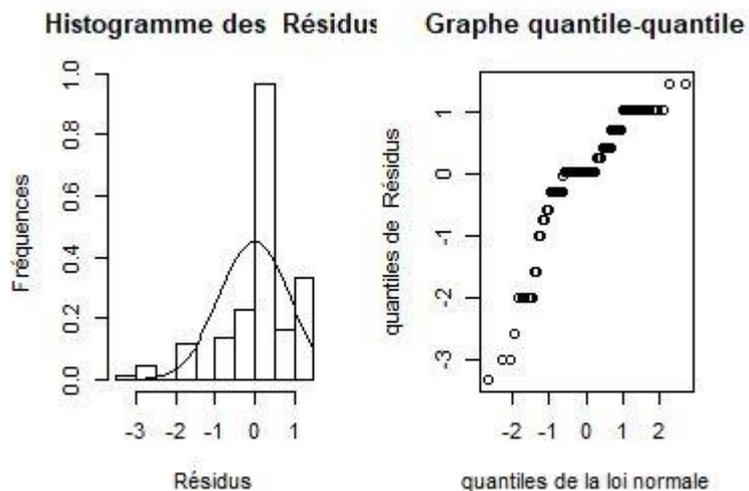
TABLE D'ANALYSE DE LA VARIANCE

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	Statistique F	p-valeur
Technique.de.production	0.0863	1	0.0863	0.0344	0.853
Végétation	45.205	3	15.068	6.006	0.000856
Résidus	240.867	96	2.509		

STATISTIQUES SUR LES PARAMETRES

	Estimation	Erreur standard	Statistique t	p-valeur
Terme constant	2.035	0.342	5.943	0.0000000449
Technique.de.production.G	0.112	0.183	0.612	0.542
Végétation.Dense	1.259	0.467	2.694	0.00832
Végétation.Eparse	-0.846	0.354	-2.391	0.0187
Végétation.Moyenne	0.0103	0.388	0.0265	0.979

ANNEXE 14 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, COULEUR, 2018



Kolmogorov-Smirnov | 0.235 | 0.000000834
 Shapiro-Wilk | 0.846 | 1.83e-10

TABLE D'ANALYSE DE LA VARIANCE

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	Statistique F
Technique.de.production	0.275	1	0.275	0.340
Végétation	10.194	3	3.398	4.206
Résidus	103.411	128	0.808	

p-valeur

Technique.de.production	0.561
Végétation	0.00711

ANNEXE 15 : INFLUENCE DU TYPE DE PRODUCTION SUR LA HAUTEUR DES INDIVIDUS

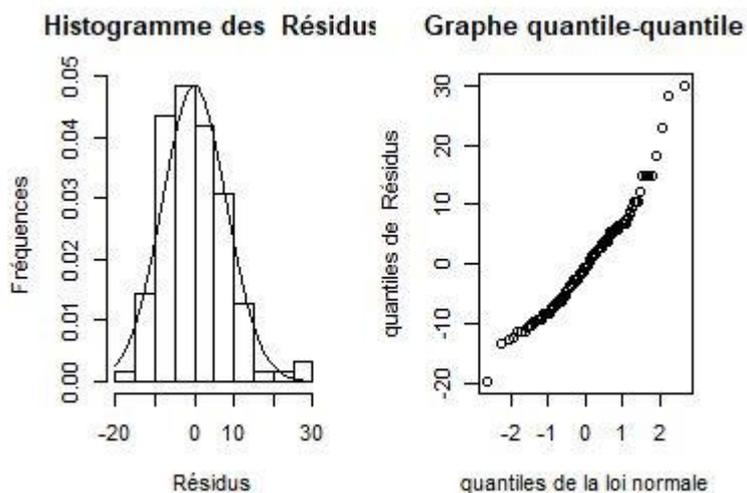
Pour la plantation de 2014

SUIVI	GRAINES			PLANTULES		
	Moyenne	Ecart-type	Int. confiance	Moyenne	Ecart-type	Int. confiance
<i>avr-14</i>	15,22 ± 0,34	3,41	0,68	13,69 ± 0,35	3,9	0,71
<i>nov-14</i>	22,34 ± 0,78	6,6	1,56	18,76 ± 0,59	5,2	1,19
<i>sept-16</i>	28,08 ± 1,27	9,83	2,54	22,31 ± 0,47	3,67	0,93

Pour la plantation de 2017

SUIVI	GRAINES			PLANTULES		
	Moyenne	Ecart-type	Int. confiance	Moyenne	Ecart-type	Int. confiance
<i>mars-17</i>	17,68 ± 0,98	4,95	1,96	18,18 ± 0,57	4,95	1,15
<i>août-18</i>	26,33 ± 1,16	5,07	2,31	22,46 ± 1,07	5,62	2,13

ANNEXE 16 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, HAUTEUR, 2014 SUIVI DE 2016



RESUME DES DONNEES, selon le facteur Technique.de.production :

Technique.de.production	Nombre d'observations	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum
G	69	28.082	96.677	10.000	58.000
P	73	22.317	44.510	9.500	39.000

RESUME DES DONNEES, selon le facteur Végétation :

Végétation	Nombre d'observations	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum
dense	48	22.883	39.995	13.500	39.000
éparse	50	26.594	96.249	10.000	58.000
moyenne	76	25.931	85.443	9.500	58.000
Sol nu	22	19.375	62.229	11.000	30.000

ETUDE DES RESIDUS :

	Nombre d'obs.	Minimum	1er quartile	Mediane	3e quartile	Maximum	Moyenne
Résidus	124	-19.700	-6.201	-0.685	4.913	29.784	0.000
		Variance	Ecart type				
Résidus		67.391	8.209				

Normalité des résidus : tests de Kolmogorov-Smirnov, et de Shapiro-Wilk

Warning in ks.test(X, pnorm, mean(X), sd(X)) :
ties should not be present for the Kolmogorov-Smirnov test

	Statistique	p-valeur
Kolmogorov-Smirnov	0.066	0.655
Shapiro-Wilk	0.957	0.000557

TABLE D'ANALYSE DE LA VARIANCE

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	Statistique F
Technique.de.production	1029.848	1	1029.848	14.785
Végétation	271.121	3	90.374	1.297
Résidus	8289.120	119	69.656	

p-valeur

Technique.de.production	0.000195
Végétation	0.279
Résidus	

STATISTIQUES SUR LES PARAMETRES

	Estimation	Erreur standard	Statistique t
Terme constant	24.146	1.208	19.983
Technique.de.production.G	2.761	0.763	3.617
Végétation.dense	-0.711	1.614	-0.440
Végétation.éparse	2.793	1.592	1.754
Végétation.moyenne	1.309	1.453	0.901

p-valeur

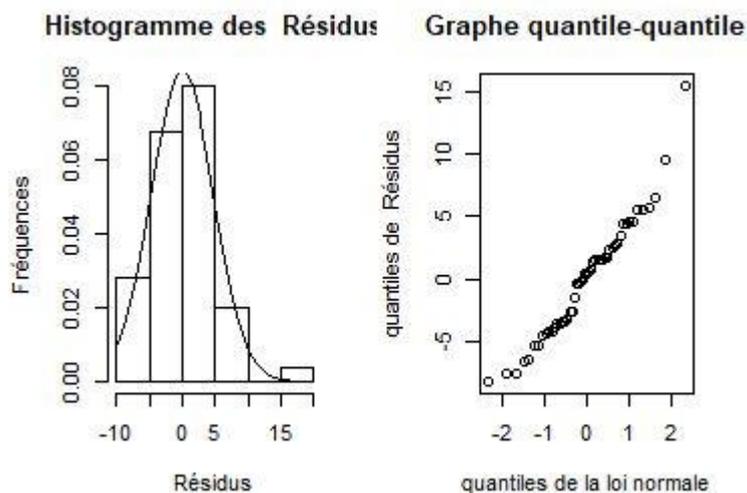
Terme constant	7.87e-40
----------------	----------

Tukey HSD (différence significative : 2.969)

Moyenne harmonique du nombre d'observations par croisement : 61.98387

	Nombre d'observations	Moyenne	Groupe
G	61	28.082	a
P	63	22.317	b

ANNEXE 17 : TESTS STATISTIQUES, ANOVA A DEUX FACTEURS SANS INTERACTION, HAUTEUR, 2017, SUIVI DE 2018



RESUME DES DONNEES, selon le facteur Technique.de.production :

Technique.de.production	Nombre d'observations	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum
G	27	28.000	28.923	22.000	39.000
P	74	22.569	25.959	14.000	41.000

RESUME DES DONNEES, selon le facteur Végétation :

Végétation	Nombre d'observations	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum
Dense	11	25.556	53.778	18.000	41.000
Eparse	61	22.326	17.037	14.000	31.000
Moyenne	27	25.765	39.816	15.000	39.000
Sol nu	2	23.000		23.000	23.000

ETUDE DES RESIDUS :

	Nombre d'obs.	Minimum	1er quartile	Mediane	3e quartile	Maximum	Moyenne
Résidus	50	-8.228	-3.612	0.416	2.570	15.444	0.000
	Variance	Ecart type					
Résidus	22.470	4.740					

Normalité des résidus : tests de Kolmogorov-Smirnov, et de Shapiro-Wilk

	Statistique	p-valeur
Kolmogorov-Smirnov	0.092	0.790
Shapiro-Wilk	0.962	0.111

TABLE D'ANALYSE DE LA VARIANCE

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	Statistique F	p-valeur
Technique.de.production	297.269	1	297.269	12.150	0.00111
Végétation	183.556	3	61.185	2.501	0.0715
Résidus	1101.021	45	24.467		

STATISTIQUES SUR LES PARAMETRES

	Estimation	Erreur standard	Statistique t	p-valeur
Terme constant	26.139	1.462	17.885	4.46e-22
Technique.de.production.G	3.080	0.825	3.734	0.000529
Végétation.Dense	2.497	1.817	1.374	0.176
Végétation.Eparse	-2.608	1.559	-1.673	0.101
Végétation.Moyenne	0.169	1.650	0.103	0.919

Tukey HSD (différence significative : 3.138)

Moyenne harmonique du nombre d'observations par croisement : 20.16

Technique.de.production	Nombre d'observations	Moyenne	Groupe
G	14	28.000	a
P	36	22.569	b

ANNEXE 18 : SEMIS HYDRAULIQUE

Techniques d'ensemencement permettant d'épandre simultanément sur le sol les semences, les fertilisants et tous les autres adjuvants nécessaires au bon fonctionnement de la couverture végétale (L'Huillier *et al.*, 2010). Ce type de semis permet d'ensemencer très rapidement des surfaces importantes. Il permet en outre l'accès à des surfaces pentues ou difficile d'accès pour lesquelles une plantation ne serait pas envisageable. Sa réussite dépend fortement des conditions du sol. Il est nécessaire de définir des mélanges de graines et de fournitures adaptés à chaque type de substrat. Sur des sols en déblais de sols latéritiques pauvres, il est associé à un épandage de compost pour apporter de la matière organique. De plus, du géofilet est utilisé pour stabiliser les graines et renforcer l'enracinement des végétaux. Il est disposé en lais.



Il s'effectue en deux passages aux périodes les plus propices à la germination et au développement des plantules. L'application du semis avant la saison des pluies évite son lessivage. Le second épandage est réalisé en sens croisé afin d'obtenir une meilleure répartition des graines sur le sol. Dans les zones les plus accidentées, il peut même se faire par hélicoptère.



ANNEXE 19 : STATUT UICN

LC	Préoccupation mineure
NT	Quasi-menacée
VU	Vulnérable
EN	En danger
CR	En danger critique

ANNEXE 20 : STATUT UICN DES ESPECES UTILISEES (IUCN, 2018)

Espèces utilisées	Ancien nom	Statut
<i>Agathis lanceolata</i> Lindl. ex Warb.		VU
<i>Agathis ovata</i> (C.Moore ex Vieill.) Warb.		EN
<i>Acacia spirorbis</i> Labill. <i>subsp. spirorbis</i>		/
<i>Acridocarpus austrocaledonicus</i> Baill.		/
<i>Alphitonia neocaledonica</i> (Schltr.) Guillaumin		/
<i>Alstonia coriacea</i> Pancher ex S. Moore		/
<i>Araucaria bernieri</i> J.Buchholz		VU
<i>Araucaria montana</i> Brongn. & Gris		VU
<i>Araucaria rulei</i> F.Muell.		EN
<i>Arillastrum gummiferum</i> (Brongn. & Gris) Pancher ex Baill.		/
<i>Austrobuxus carunculatus</i> (Baill.) Airy Shaw		/
<i>Baloghia brongniartii</i> (Baill.) Pax		NT
<i>Chamaedendron nervosa</i> (J.Raynal) Larridon	<i>Costularia nervosa</i>	/
<i>Cloezia artensis</i> (Montrouz.) P.S.Green		/
<i>Codia discolor</i> (Brongn. & Gris) Guillaumin		LC
<i>Codia montana</i> J.R.Forst. & G.Forst.		LC
<i>Comptonella drupacea</i> (Labill.) Guillaumin		/
<i>Cunonia atrorubens</i> Schltr.		LC
<i>Cunonia macrophylla</i> Brongn. & Gris		LC
<i>Dendrobium virotii</i> Guillaumin		LC
<i>Dianella adenanthera</i> (G.Forst.) R.J.F.Hend.		/
<i>Dodonaea viscosa</i> (L.) Jacq.		/
<i>Earina deplanchei</i> Rchb.f.		LC
<i>Eria kariconyensis</i> Schltr.		LC
<i>Eriaxis rigida</i> Rchb.f.		LC
<i>Gabnia novocaledonensis</i> Benl		/
<i>Garcinia balansae</i> Pierre		/
<i>Gardenia aubryi</i> Vieill.		/
<i>Geissois montana</i> Vieill. ex Brongn. & Gris		LC
<i>Geissois pruinosa</i> Brongn. & Gris		LC
<i>Grevillea exul</i> Lindl. <i>subsp. exul</i>		/
<i>Grevillea exul</i> <i>subsp. rubiginosa</i> (Brongn. & Gris) Viot		/
<i>Grevillea gillivrayi</i> Hook. & Arn. <i>var. gillivrayi</i>		/
<i>Guioa villosa</i> Radlk.		/
<i>Gymnostoma chamaecyparis</i> (J.Poiss.) L.A.S.Johnson		/
<i>Gymnostoma deplancheanum</i> (Miq.) L.A.S.Johnson		/
<i>Gymnostoma intermedium</i> (Poisson) L.A.S.Johnson		/
<i>Hibbertia deplancheana</i> Bureau ex Guillaumin		NT
<i>Hibbertia lucens</i> Brongn. & Gris ex Sebert & Pancher		LC
<i>Hibbertia vieillardii</i> (Brongn. & Gris) Gilg		NT
<i>Hibbertia pancheri</i> (Brongn. & Gris) Briquet		LC
<i>Homalium austrocaledonicum</i> Seem.		/
<i>Ixora francii</i> <i>var. angustifolia</i> Schltr. & Krause		/
<i>Joinvillea plicata</i> (Hook.f.) Newell & Stone <i>subsp. plicata</i>		/

Espèces utilisées	Ancien nom	Statut
<i>Lepidosperma perteres</i> C.B. Clarke		/
<i>Lomandra insularis</i> Schltr.		/
<i>Longetia buxoides</i> Baill.		/
<i>Machaerina deplanchei</i> (Boeckeler) T.Koyama		/
<i>Metrosideros laurifolia</i> Brongn. & Gris	<i>Carpolepis laurifolia</i>	/
<i>Myodocarpus crassifolius</i> Dubard & R.Vig.		/
<i>Myodocarpus involucratus</i> Dubard & R.Vig.		/
<i>Myrsine asymmetrica</i> (Mez) Ricketson & Pipoly	<i>Rapanea asymmetrica</i>	/
<i>Myrtastrum rufopunctatum</i> (Pancher ex Brongn. & Gris) Burret		/
<i>Myrtopsis myrtoidea</i> (Baill.) Guillaumin		/
<i>Normandia neocaledonica</i> Hook.f.		LC
<i>Oxera nerifolia</i> (Montrouz.) Beauvis.		LC
<i>Pancheria billardieri</i> (D.Don) Pamp.		LC
<i>Pancheria ferruginea</i> Brongn. & Gris		NT
<i>Peripterygia marginata</i> (Baill.) Loes.		LC
<i>Phyllanthus aeneus</i> Baill.		CR
<i>Phyllanthus bupleuroides</i> Baill.		/
<i>Phyllanthus tixieri</i> M. Schmid		/
<i>Pittosporum dzumacense</i> Guillaumin		/
<i>Polyscias dioica</i> (Vieill. ex Pancher) Harms		LC
<i>Polyscias pancheri</i> (Baill.) Harms		LC
<i>Sannantha leratii</i> (Schltr.) Peter G. Wilson		/
<i>Scaevola balansae</i> Guillaumin		/
<i>Scaevola beckii</i> Zahlbr.		/
<i>Scaevola cylindrica</i> Schltr. & K.Krause		/
<i>Scaevola montana</i> Labill.		/
<i>Schoenus juvenis</i> C.B. Clarke		/
<i>Schoenus neocaledonicus</i> C.B. Clarke		/
<i>Sphaeropteris albifrons</i> (Vieill. ex E.Fourn.) R.M.Tryon		LC
<i>Soulamea pancheri</i> Brongn. & Gris		/
<i>Stenocarpus comptonii</i> S. Moore		/
<i>Stenocarpus milnei</i> Hook. & Arn.		/
<i>Stenocarpus umbelliferus</i> (JR.& G.Forster) Druce		/
<i>Syzygium austrocaledonicum</i> (Seem.) Guillaumin		/
<i>Syzygium frutescens</i> Brongn. & Gris		/
<i>Tetralia arundinacea</i> (Sol. ex Vahl) T.Koyama	<i>Costularia arundinacea</i>	/
<i>Tetralia comosa</i> (C.B.Clarke) T.Koyama	<i>Costularia comosa</i>	/
<i>Tetralia raynaliana</i> Larridon	<i>Costularia pubescens</i>	/
<i>Tristaniopsis calobuxus</i> Brongn. & Gris		/
<i>Tristaniopsis glauca</i> Brongn. & Gris		/
<i>Tristaniopsis guillainii</i> Vieill. ex Brongn. & Gris var. <i>guillainii</i>		/
<i>Uromyrtus myrtooides</i> (Brongn.) N.Snow, comb. ined.		/
<i>Xanthostemon gugerlii</i> Merr.		/

Les données des annexes 21 à 27 proviennent de la lecture des documents des chantiers de revégétalisation, à savoir les offres techniques et les listes d'espèces réintroduites. Ces documents ne peuvent être davantage cités car ils contiennent des données confidentielles.

ANNEXE 21 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE ALICE-PHILIPPE

Espèces	Effectif de l'espèce	Fréquence de l'espèce (p _i)	ln(p _i)	p _i *ln(p _i)	p _i ²
<i>Alphitonia neocaledonica</i>	196	0,032466	-3,427548	-0,111280	0,001054
<i>Alstonia coriacea</i>	38	0,006295	-5,068076	-0,031901	0,000040
<i>Baloghia brogniartii</i>	11	0,001822	-6,307767	-0,011493	0,000003
<i>Carpolepsis laurifolia</i>	407	0,067418	-2,696849	-0,181815	0,004545
<i>Cloezia artensis</i>	524	0,086798	-2,444171	-0,212149	0,007534
<i>Codia discolor</i>	149	0,024681	-3,701716	-0,091363	0,000609
<i>Costularia comosa</i>	170	0,028160	-3,569864	-0,100526	0,000793
<i>Costularia pubescens</i>	368	0,060957	-2,797580	-0,170533	0,003716
<i>Cunonia atrorubens</i>	74	0,012258	-4,401597	-0,053954	0,000150
<i>Dodonaea viscosa</i>	50	0,008282	-4,793639	-0,039702	0,000069
<i>Geissois pruinoso</i>	177	0,029319	-3,529513	-0,103482	0,000860
<i>Grevillea exul exul</i>	29	0,004804	-5,338367	-0,025644	0,000023
<i>Gymnostoma chamaecyparis</i>	145	0,024019	-3,728929	-0,089563	0,000577
<i>Gymnostoma intermedium</i>	492	0,081497	-2,507184	-0,204329	0,006642
<i>Hibbertia pancheri/ lucens</i>	96	0,015902	-4,141314	-0,065855	0,000253
<i>Homalium austrocaledonicum</i>	71	0,011761	-4,442983	-0,052253	0,000138
<i>Lepidosperma perteres</i>	7	0,001160	-6,759752	-0,007838	0,000001
<i>Longetia buxoides</i>	102	0,016896	-4,080690	-0,068947	0,000285
<i>Normandia neocaledonica</i>	416	0,068908	-2,674977	-0,184328	0,004748
<i>Phyllanthus aeneus</i>	82	0,013583	-4,298943	-0,058392	0,000184
<i>Phyllanthus tixieri</i>	7	0,001160	-6,759752	-0,007838	0,000001
<i>Pittosporum sp.</i>	6	0,000994	-6,913903	-0,006872	0,000001
<i>Sannantha leratii</i>	486	0,080504	-2,519454	-0,202825	0,006481
<i>Scaevola balansae</i>	73	0,012092	-4,415203	-0,053389	0,000146
<i>Schoenus juvenis</i>	141	0,023356	-3,756903	-0,087746	0,000546
<i>Schoenus neocaledonicus</i>	570	0,094418	-2,360026	-0,222828	0,008915
<i>Soulamea pancheri</i>	15	0,002485	-5,997612	-0,014902	0,000006
<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	212	0,035117	-3,349076	-0,117609	0,001233
<i>Tristaniopsis guillainii</i>	34	0,005632	-5,179302	-0,029169	0,000032
<i>Xanthostemon gugerlii</i>	889	0,147259	-1,915565	-0,282083	0,021685
Effectif total	6 037				

ANNEXE 22 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE EDOUARD

Espèces	Effectif de l'espèce	Fréquence de l'espèce (p _i)	ln(p _i)	p _i *ln(p _i)	p _i ²
<i>Acacia spirorbis</i>	129	0,025919	-3,652770	-0,094677	0,000672
<i>Acridocarpus neocaledonicus</i>	133	0,026723	-3,622233	-0,096797	0,000714
<i>Aplbitonia neocaledonica</i>	167	0,033554	-3,394589	-0,113903	0,001126
<i>Carpolepis laurifolia</i>	150	0,030139	-3,501947	-0,105544	0,000908
<i>Codia discolor</i>	14	0,002813	-5,873525	-0,016522	0,000008
<i>Costularia comosa</i>	200	0,040185	-3,214265	-0,129165	0,001615
<i>Costularia pubescens</i>	15	0,003014	-5,804532	-0,017494	0,000009
<i>Cloezia artensis</i>	665	0,133615	-2,012796	-0,268939	0,017853
<i>Dodonaea viscosa</i>	140	0,028129	-3,570940	-0,100448	0,000791
<i>Ixora francii</i> var. <i>angustifolia</i>	97	0,019490	-3,937872	-0,076748	0,000380
<i>Gardenia aubryi</i>	560	0,112518	-2,184646	-0,245811	0,012660
<i>Grevillea gillivrayi</i>	10	0,002009	-6,209997	-0,012477	0,000004
<i>Gymnostoma chamaecyparis</i>	124	0,024915	-3,692301	-0,091992	0,000621
<i>Lepidosperma perteres</i>	80	0,016074	-4,130556	-0,066394	0,000258
<i>Machaerina deplanchei</i>	130	0,026120	-3,645048	-0,095209	0,000682
<i>Myodocarpus crassifolius</i>	30	0,006028	-5,111385	-0,030810	0,000036
<i>Myrtastrum rufopunctatum</i>	35	0,007032	-4,957235	-0,034861	0,000049
<i>Sannantha leratii</i>	25	0,005023	-5,293707	-0,026591	0,000025
<i>Scaevola beckii</i>	10	0,002009	-6,209997	-0,012477	0,000004
<i>Scaevola cylindrica</i>	335	0,067310	-2,698452	-0,181632	0,004531
<i>Schoenus juvenis</i>	130	0,026120	-3,645048	-0,095209	0,000682
<i>Schoenus neocaledonicus</i>	280	0,056259	-2,877793	-0,161901	0,003165
<i>Soulamea pancheri</i>	345	0,069319	-2,669038	-0,185015	0,004805
<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	4	0,000804	-7,126288	-0,005727	0,000001
<i>Syzygium austrocaledonicum</i>	292	0,058670	-2,835829	-0,166378	0,003442
<i>Syzygium</i> sp.	60	0,012055	-4,418238	-0,053264	0,000145
<i>Uromyrtus</i> sp.	296	0,059474	-2,822223	-0,167848	0,003537
<i>Xanthostemon multiflorus</i>	521	0,104682	-2,256833	-0,236249	0,010958
Effectif total	4 977				

ANNEXE 23 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE CIRCEE

Espèces	Effectif de l'espèce	Fréquence de l'espèce (p_i)	$\ln(p_i)$	$p_i * \ln(p_i)$	p_i^2
<i>Alphitonia neocaledonica</i>	125	0,084402431	-2,472159	-0,208656	0,007124
<i>Arillastrum gummiferum</i>	2	0,001350439	-6,607326	-0,008923	0,000002
<i>Machaerina deplanchei</i>	13	0,008777853	-4,735523	-0,041568	0,000077
<i>Carpolepis laurifolia</i>	177	0,119513842	-2,124323	-0,253886	0,014284
<i>Cloezia artensis</i>	181	0,12221472	-2,101976	-0,256892	0,014936
<i>Costularia comosa</i>	171	0,115462525	-2,158809	-0,249262	0,013332
<i>Costularia pubescens</i>	18	0,01215395	-4,410101	-0,053600	0,000148
<i>Dodonea viscosa</i>	124	0,083727211	-2,480191	-0,207659	0,007010
<i>Grevillea exul exul</i>	3	0,002025658	-6,201861	-0,012563	0,000004
<i>Grevillea gillivrayi</i>	26	0,017555706	-4,042376	-0,070967	0,000308
<i>Hibbertia lucens</i>	22	0,014854828	-4,209430	-0,062530	0,000221
<i>Lepidosperma perteres</i>	101	0,068197164	-2,685352	-0,183133	0,004651
<i>Longetia buxoides</i>	4	0,002700878	-5,914178	-0,015973	0,000007
<i>Phyllanthus aeneus</i>	11	0,007427414	-4,902578	-0,036413	0,000055
<i>Phyllanthus bupleuroides</i>	152	0,102633356	-2,276592	-0,233654	0,010534
<i>Scaevola balansea</i>	21	0,014179608	-4,255950	-0,060348	0,000201
<i>Scaevola cylindrica</i>	4	0,002700878	-5,914178	-0,015973	0,000007
<i>Schoenus neocaledonicus</i>	189	0,127616475	-2,058726	-0,262727	0,016286
<i>Xanthostemon multiflorus</i>	137	0,092505064	-2,380492	-0,220208	0,008557
Effectif total	1 481				

ANNEXE 24 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE CIRCEE EUREKA

Espèces	Effectif de l'espèce	Fréquence de l'espèce (p _i)	ln(p _i)	p _i *ln(p _i)	p _i ²
<i>Alphitonia neocaledonica</i>	22	0,06875	-2,677279	-0,184063	0,004727
<i>Arillastrum gummiferum</i>	1	0,003125	-5,768321	-0,018026	0,000010
<i>Machaerina deplanchei</i>	3	0,009375	-4,669709	-0,043779	0,000088
<i>Carpolepis laurifolia</i>	40	0,125	-2,079442	-0,259930	0,015625
<i>Cloezia artensis</i>	20	0,0625	-2,772589	-0,173287	0,003906
<i>Costularia comosa</i>	20	0,0625	-2,772589	-0,173287	0,003906
<i>Costularia pubescens</i>	2	0,00625	-5,075174	-0,031720	0,000039
<i>Dodonea viscosa</i>	20	0,0625	-2,772589	-0,173287	0,003906
<i>Hibbertia lucens</i>	8	0,025	-3,688879	-0,092222	0,000625
<i>Lepidosperma perteres</i>	26	0,08125	-2,510224	-0,203956	0,006602
<i>Longetia buxoides</i>	2	0,00625	-5,075174	-0,031720	0,000039
<i>Phyllanthus aeneus</i>	2	0,00625	-5,075174	-0,031720	0,000039
<i>Phyllanthus bupleuroides</i>	43	0,134375	-2,007121	-0,269707	0,018057
<i>Scaevola balansea</i>	3	0,009375	-4,669709	-0,043779	0,000088
<i>Scaevola cylindrica</i>	3	0,009375	-4,669709	-0,043779	0,000088
<i>Schoenus neocaledonicus</i>	86	0,26875	-1,313974	-0,353130	0,072227
<i>Xanthostemon multiflorus</i>	19	0,059375	-2,823882	-0,167668	0,003525
Effectif total	320				

ANNEXE 25 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE PB2

Espèces	Effectif de l'espèce	Fréquence de l'espèce (p _i)	ln(p _i)	p _i *ln(p _i)	p _i ²
<i>Alphitonia neocaledonica</i>	107	0,058470	-2,839242	-0,166010	0,003419
<i>Austobuxus carunculatus</i>	100	0,054645	-2,906901	-0,158847	0,002986
<i>Carpolepis laurifolia</i>	30	0,016393	-4,110874	-0,067391	0,000269
<i>Cloezia artensis</i>	260	0,142077	-1,951390	-0,277247	0,020186
<i>Costularia comosa</i>	180	0,098361	-2,319114	-0,228110	0,009675
<i>Dodonaea viscosa</i>	180	0,098361	-2,319114	-0,228110	0,009675
<i>Geissois pruinosa</i>	153	0,083607	-2,481633	-0,207481	0,006990
<i>Grevillea exul</i> ssp. <i>rubiginosa</i>	160	0,087432	-2,436897	-0,213062	0,007644
<i>Gymnostoma deplancheanum</i>	9	0,004918	-5,314847	-0,026139	0,000024
<i>Hibbertia lucens</i> / <i>vieillardii</i>	12	0,006557	-5,027165	-0,032965	0,000043
<i>Lepidosperma perteres</i>	26	0,014208	-4,253975	-0,060439	0,000202
<i>Lomandra insularis</i>	20	0,010929	-4,516339	-0,049359	0,000119
<i>Machaerina deplanchei</i>	210	0,114754	-2,164964	-0,248438	0,013169
<i>Normandia neocaledonica</i>	70	0,038251	-3,263576	-0,124836	0,001463
<i>Sannantha leratii</i>	50	0,027322	-3,600048	-0,098362	0,000747
<i>Scaevola cylindrica</i> / <i>montana</i>	40	0,021858	-3,823192	-0,083567	0,000478
<i>Schoenus juvenis</i>	9	0,004918	-5,314847	-0,026139	0,000024
<i>Schoenus neocaledonicus</i>	104	0,056831	-2,867680	-0,162972	0,003230
<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	10	0,005464	-5,209486	-0,028467	0,000030
<i>Xanthostemon multiflorus</i>	100	0,054645	-2,906901	-0,158847	0,002986
Effectif total	1 830				

ANNEXE 26 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE OUAZANGOU

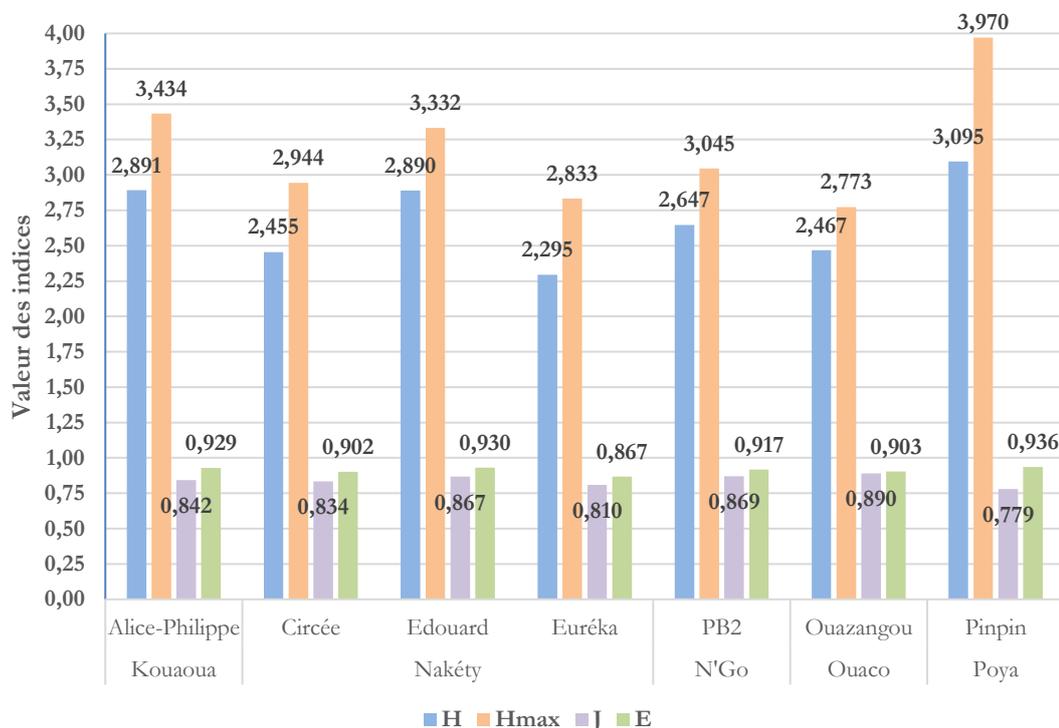
Espèces	Effectif de l'espèce	Fréquence de l'espèce (p_i)	$\ln(p_i)$	$p_i * \ln(p_i)$	p_i^2
<i>Acridocarpus austrocaledonica</i>	216	0,087308	-2,438313	-0,212884	0,007623
<i>Alphitonia neocaledonia</i>	108	0,043654	-3,131460	-0,136701	0,001906
<i>Araucaria montana</i>	216	0,087308	-2,438313	-0,212884	0,007623
<i>Austrobuxus carunculatus</i>	21	0,008488	-4,769069	-0,040481	0,000072
<i>Carpolepis laurifolia</i>	432	0,174616	-1,745166	-0,304734	0,030491
<i>Cloezia artensis</i>	41	0,016572	-4,100019	-0,067947	0,000275
<i>Codia montana</i> / <i>C. discolor</i>	16	0,006467	-5,041003	-0,032601	0,000042
<i>Costularia comosa</i>	216	0,087308	-2,438313	-0,212884	0,007623
<i>Dodonaea viscosa</i>	326	0,131770	-2,026694	-0,267058	0,017363
<i>Grevillea exul exul</i>	114	0,046079	-3,077393	-0,141804	0,002123
<i>Machaerina deplanchei</i>	218	0,088116	-2,429096	-0,214043	0,007765
<i>Sannantha leratii</i>	108	0,043654	-3,131460	-0,136701	0,001906
<i>Schoenus juvenis</i>	64	0,025869	-3,654708	-0,094544	0,000669
<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	162	0,065481	-2,725995	-0,178501	0,004288
<i>Tristaniopsis guillainii</i>	216	0,087308	-2,438313	-0,212884	0,007623
Effectif total	2 474				

ANNEXE 27 : BIODIVERSITE REINTRODUITE SUR LA MINE PINPIN

Espèces	Effectif de l'espèce	Fréquence de l'espèce (p_i)	$\ln(p_i)$	$p_i * \ln(p_i)$	p_i^2
<i>Acridocarpus austrocaledonica</i>	581	0,0579204	-2,8486848	-0,1649971	0,0033548
<i>Alphitonia neocaledonica</i>	3	0,0002991	-8,1148233	-0,0024269	0,0000001
<i>Araucaria rulei</i>	114	0,0113648	-4,4772371	-0,0508828	0,0001292
<i>Carpolepsis laurifolia</i>	102	0,0101685	-4,5884628	-0,0466577	0,0001034
<i>Cloezia artensis</i>	150	0,0149536	-4,2028003	-0,0628472	0,0002236
<i>Codia discolor</i>	206	0,0205363	-3,8855594	-0,0797952	0,0004217
<i>Codia montana</i>	19	0,0018941	-6,2689966	-0,0118743	0,0000036
<i>Comptonella drupacea</i>	60	0,0059815	-5,1190910	-0,0306196	0,0000358
<i>Costularia arundinacea</i>	6	0,0005981	-7,4216761	-0,0044392	0,0000004
<i>Costularia nervosa</i>	7	0,0006978	-7,2675254	-0,0050715	0,0000005
<i>Costularia pubescens</i>	1 134	0,1130495	-2,1799291	-0,2464400	0,0127802
<i>Dendrobium virotii</i>	25	0,0024923	-5,9945598	-0,0149401	0,0000062
<i>Dianella adenantha</i>	190	0,0189413	-3,9664115	-0,0751289	0,0003588
<i>Dodonea viscosa</i>	634	0,0632041	-2,7613866	-0,1745309	0,0039948
<i>Earina deplanchei</i>	39	0,0038879	-5,5498739	-0,0215776	0,0000151
<i>Eria karicouyensis</i>	1	0,0000997	-9,2134356	-0,0009185	0,0000000
<i>Eriaxis rigida</i>	4	0,0003988	-7,8271412	-0,0031212	0,0000002
<i>Gabnia novocaledonensis</i>	509	0,0507427	-2,9809876	-0,1512634	0,0025748
<i>Garcinia balansae</i>	150	0,0149536	-4,2028003	-0,0628472	0,0002236
<i>Geissois montana</i>	52	0,0051839	-5,2621919	-0,0272788	0,0000269
<i>Geissois pruinosa</i>	200	0,0199382	-3,9151182	-0,0780604	0,0003975
<i>Grevillea exul exul</i>	159	0,0158509	-4,1445314	-0,0656944	0,0002512
<i>Grevillea gillivrayi</i>	51	0,0050842	-5,2816099	-0,0268530	0,0000258
<i>Guioa villosa</i>	60	0,0059815	-5,1190910	-0,0306196	0,0000358
<i>Gymnostoma chamaecyparis</i>	1 162	0,1158409	-2,1555376	-0,2496994	0,0134191
<i>Gymnostoma poissonianum</i>	154	0,0153524	-4,1764830	-0,0641191	0,0002357
<i>Hibbertia deplancheana</i>	1	0,0000997	-9,2134356	-0,0009185	0,0000000
<i>Hibbertia lucens</i>	1	0,0000997	-9,2134356	-0,0009185	0,0000000
<i>Hibbertia pancheri</i>	36	0,0035889	-5,6299166	-0,0202051	0,0000129
<i>Ixora francii</i>	10	0,0009969	-6,9108505	-0,0068895	0,0000010
<i>Lepidosperma perteres</i>	182	0,0181438	-4,0094289	-0,0727461	0,0003292
<i>Machaerina deplanchei</i>	349	0,0347921	-3,3583637	-0,1168447	0,0012105
<i>Meiogyne sp.</i>	1	0,0000997	-9,2134356	-0,0009185	0,0000000
<i>Oxera nerifolia</i>	16	0,0015951	-6,4408469	-0,0102735	0,0000025
<i>Pancheria billardieri</i>	5	0,0004985	-7,6039977	-0,0037902	0,0000002
<i>Peripterygia marginata</i>	29	0,0028910	-5,8461397	-0,0169014	0,0000084
<i>Pittosporum dzumacense</i>	179	0,0178447	-4,0260498	-0,0718436	0,0003184
<i>Polycias dioica</i>	69	0,0068787	-4,9793291	-0,0342512	0,0000473

Espèces	Effectif de l'espèce	Fréquence de l'espèce (p _i)	ln(p _i)	p _i *ln(p _i)	p _i ²
<i>Polycias pancheri</i>	63	0,0062805	-5,0703009	-0,0318442	0,0000394
<i>Rapanea asymetrica</i>	1	0,0000997	-9,2134356	-0,0009185	0,0000000
<i>Myrtopsis myrtoidea</i>	12	0,0011963	-6,7285289	-0,0080493	0,0000014
<i>Normandia neocaledonica</i>	15	0,0014954	-6,5053854	-0,0097279	0,0000022
<i>Sannantha leratii</i>	951	0,0948061	-2,3559215	-0,2233557	0,0089882
<i>Scaevola montana</i>	58	0,0057821	-5,1529926	-0,0297950	0,0000334
<i>Scaevola spp.</i>	20	0,0019938	-6,2177033	-0,0123970	0,0000040
<i>Schoenus neocaledonicus</i>	363	0,0361878	-3,3190327	-0,1201086	0,0013096
<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	950	0,0947064	-2,3569736	-0,2232205	0,0089693
<i>Soulamea pancheri</i>	52	0,0051839	-5,2621919	-0,0272788	0,0000269
<i>Sphaeropteris albifrons</i>	9	0,0008972	-7,0162110	-0,0062951	0,0000008
<i>Stenocarpus milnei</i>	2	0,0001994	-8,5202884	-0,0016988	0,0000000
<i>Tristaniopsis calobuxus</i>	552	0,0550294	-2,8998875	-0,1595791	0,0030282
<i>Tristaniopsis guillainii</i>	255	0,0254212	-3,6721720	-0,0933510	0,0006462
<i>Uromyrtus myrtoidea</i>	78	0,0077759	-4,8567268	-0,0377654	0,0000605
Effectif total	10 031				

ANNEXE 28 : CALCUL DES DIFFERENTS INDICES DE BIODIVERSITE REINTRODUITE LORS DES PLANTATIONS



L'indice d'équitabilité de Pielou est calculé selon la formule :

$$J = \frac{H}{H_{max}} = \frac{H}{\ln(R_s)}$$

Il permet d'étudier la répartition des abondances des espèces du peuplements. Si $J=0$, une seule espèce est présente, si $J=1$, toutes les espèces ont la même abondance (équirépartition).

L'indice de Simpson est calculé selon la formule :

$$E = 1 - \sum_i p_i^2$$

Il peut être interprété comme la probabilité que deux individus au hasard soient d'espèces différentes (Marcon, 2015).

$E = 0$ si une seule espèce a une probabilité de 1

$E = 1 - \frac{1}{S}$ si les S espèces ont la même probabilité $p_S = \frac{1}{S}$

Les plantations présentent des indices de Pielou et Simpson proche de 1, ce qui signifie que toutes les espèces ont une abondance proche et que la diversité plantée est forte (la probabilité que deux individus soient d'espèces différentes est élevée, supérieure à 0,9).

ANNEXE 29 : STATUT UICN DES ESPECES REINTRODUITES SUR LES DIFFERENTES MINES (INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE AND NATURAL RESOURCES, 2018)

MINE	STATUT UICN					
	LC	NT	VU	EN	CR	
Alice-Philippe	4		1	1	0	0
Kadjitra	2		0	0	0	0
Edouard	1		0	0	0	0
Circée	1		0	0	0	1
Eurêka	1		0	0	0	1
PB2	2		1	0	0	0
Ouazangou	2		0	0	1	0
Taom	3		0	0	0	0
Pinpin	17		1	0	0	1
Dent de Poya	2		0	0	0	0

ANNEXE 30 : DONNEES DES SEMIS REALISES

Mine	Zones	Année	Semis hydraulique		Levée de garantie plants/m ²
			Surface (m ²)	Richesse spécifique	
Dent de Poya		2015	2034	20	27,33
	Alice-Philippe (D28)	2015	17855	19	0,813
Kouaoua	Kadjitra (Talus 1 et 3 aval ouest de la verse K2D1)	2015	2307	16	/
	Ouazangou (Décharge D9)	2014	76000	19	Ok
Ouaco	Taom (AFF4)	2014	27000	17	Ok
	AC2 Talus 1 à 3	2012	8000		
	AC2 Talus 4 à 7	2013	13202		2,06
	AC2 Talus 8 à 11	2014	15838		
	AC2 Talus 12, 13 et 14	2015	6657		
	AC1 Talus 1 à 3		1500		3,17
	AC1 Talus 4 à 8	2015	4878	28	/
Pinpin	AC1 Talus 9 à 11		3800		/
	AC1 Talus 12 et éboulis Talus 6 à 9	2016	1778 769		/
	AC1 Talus 13 à 16		6434		/
	AC1 Talus 16 bis à 18		4621		/
	AC1 Talus 19 et 19A	2018	1480		/

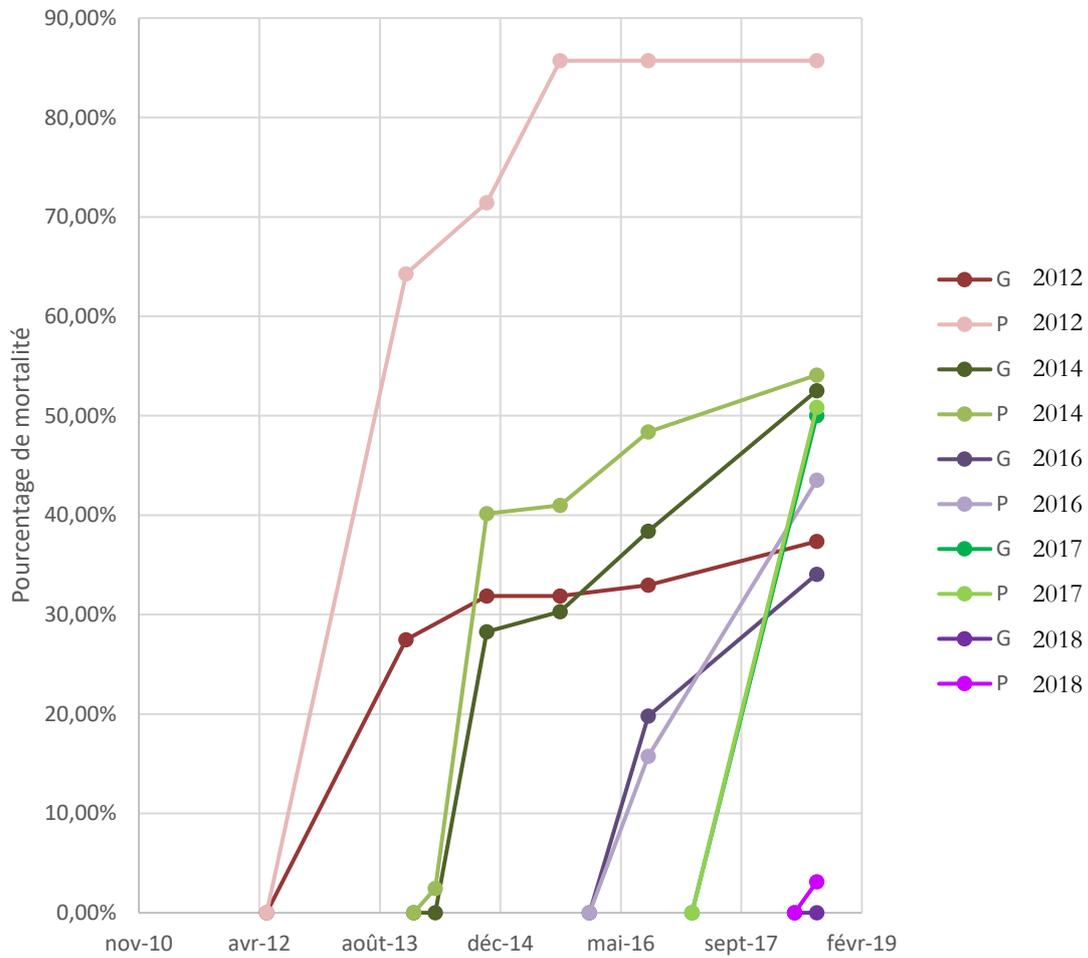
ANNEXE 31 : DONNEES DES PLANTATIONS

Mine	Zones	Année	Surface (m ²)	% de Cyperaceae	Richesse spécifique
Kouaoua	Alice-Philippe (toit de verse ALV1)	2015	6186	21	31
	Alice-Philippe (Verse Alice)	2018	2985		
Nakéty	Edouard (Banquettes DEB + toit Verse Francis)	2015	4503	33	28
	Edouard (Verse EDO V4)	2018	1643		
	Circée (Verses B3 et Dominique)	2018	1440	17	19
N'GO	Euréka (Verse EUR2)	2018	324	43	17
Ouaco	PB2 (S1 et S2)	2018	1768	27	21
	Ouazangou (Thono)	2013	2870	20	16
Pinpin	AC2 Bq. 7, 9, 10, 11	2015	7848		
	Doline, AC1 Bq. 1 à 11, AC2 Bq. 9 et 10	2016	7069	20	53
	AC1 : Bq 12 à 16	2017	3731		
	AC1 : Bq 19, Forêt, Doline	2018	1300		

ANNEXE 32 : SURFACES DE L'EXPLOITATION MINIERE ET SURFACE REVEGETALISEES

Mine	Surface (m ²)	Surface revégétalisée (m ²)	% de la mine revégétalisée
Alice-Philippe	2 433 989,00	27 026,00	1,11
Kadjitra	731 477,00	2 307,00	0,32
Edouard	1 557 383,00	6 146,00	0,39
Circée	533 849,00	1 440,00	0,27
Eureka	428 602,00	324,00	0,08
PB2	289 157,00	1 768,00	0,61
Ouazangou	3 932 420,00	78 474,00	2,00
Taom	609 193,00	27 000,00	4,43
Pinpin	1 134 682,00	86 358,00	7,61
DDP	289 157,00	2 034,00	0,70

ANNEXE 33 : TAUX DE MORTALITE OBSERVE ENTRE LES INDIVIDUS ISSUS DE GRAINES ET CEUX ISSUS DE PLANTULES



ANNEXE 34 : LES MAQUIS MINIERS (L'HUILLIER ET AL., 2010)

❖ MAQUIS ARBUSTIFS, A STRATE HERBACEE REDUITE SUR SOLS BRUNS HYPERMAGNESIENS

Ils sont situés le plus souvent à moins de 350 m d'altitude. Ils possèdent une flore spécialisée et diversifiée, formée d'espèces qualifiées de magnésicoles (adaptées à la forte teneur en magnésium des sols). C'est le type de maquis avec la flore la plus riche en espèces, la plus originale et la plus diversifiée. Ils ne sont pas directement touchés par l'exploitation minière. Ils subissent des menaces provenant de l'ouverture de route mais surtout des incendies, qui provoquent un appauvrissement floristique.

❖ MAQUIS LIGNO-HERBACES SUR SOLS FERRALITIQUES REMANIES PAR EROSION OU COLLUVIONNEMENT

Ils sont les plus communs et ont, à même altitude, une composition floristique assez homogène entre massif. Ils sont le résultat de l'impact répété de feux et s'apparentent souvent à de la « savane cypéracéenne arbustive ». Ils sont composés d'une strate herbacée développée, composée essentiellement de Cyperaceae cespiteuses des genres *Tetraria*, *Schoenus*, et *Lepidosperma*. Ils sont largement étendus sur l'ensemble de la Grande Terre.

❖ MAQUIS ARBUSTIFS A BUISSONNANTS SUR SOLS FERRALITIQUES GRAVILLONNAIRES OU CUIRASSES

Ils sont situés le plus généralement entre 400 et 900 m d'altitude. Ils sont majoritairement dépourvus de strates herbacées et peuvent être surcimés par une strate arborescente d'*Araucaria*. Sa composition floristique est influencée par sa localisation géographique et sa densité de la strate arbustive. Ils sont relativement pauvres en espèces, mais comme la composition floristique est variable, ils restent plus diversifiés que les maquis ligno-herbacs.

❖ MAQUIS PARAFORRESTIERS ET PREFORRESTIERS

Ce sont des maquis situés à plus haute altitude que les autres. Ils sont également plus denses, car le faciès y est plus développé. Du fait de leur localisation géographique, ils ne sont que peu menacés par les incendies et sont donc très diversifiés. Les maquis paraforestiers, dont l'évolution semble figée (manque d'apport de semences forestières), se distinguent des maquis préforestiers dont l'évolution vers la forêt est perceptible à l'échelle humaine.

ANNEXE 35 : TIP TOP, SITE D'ETUDE

Situé sur la commune de Dumbéa, au sein d'un parc provincial et en bordure d'une réserve naturelle, l'ancien site minier de Tip Top (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) présente une importante érosion des sols de surface et l'impact paysager y est très fort. Environ 5,5 ha ont été revégétalisés afin de réintégrer la mine dans son environnement et de lutter contre l'engravement et la pollution de la rivière Dumbéa. Ainsi, de nombreuses zones accessibles ont été replantées ou semées, soit sur terrains nus, soit sous couvert végétal déjà en place. De même, sur les zones de ravine, des fascines ont été installées.

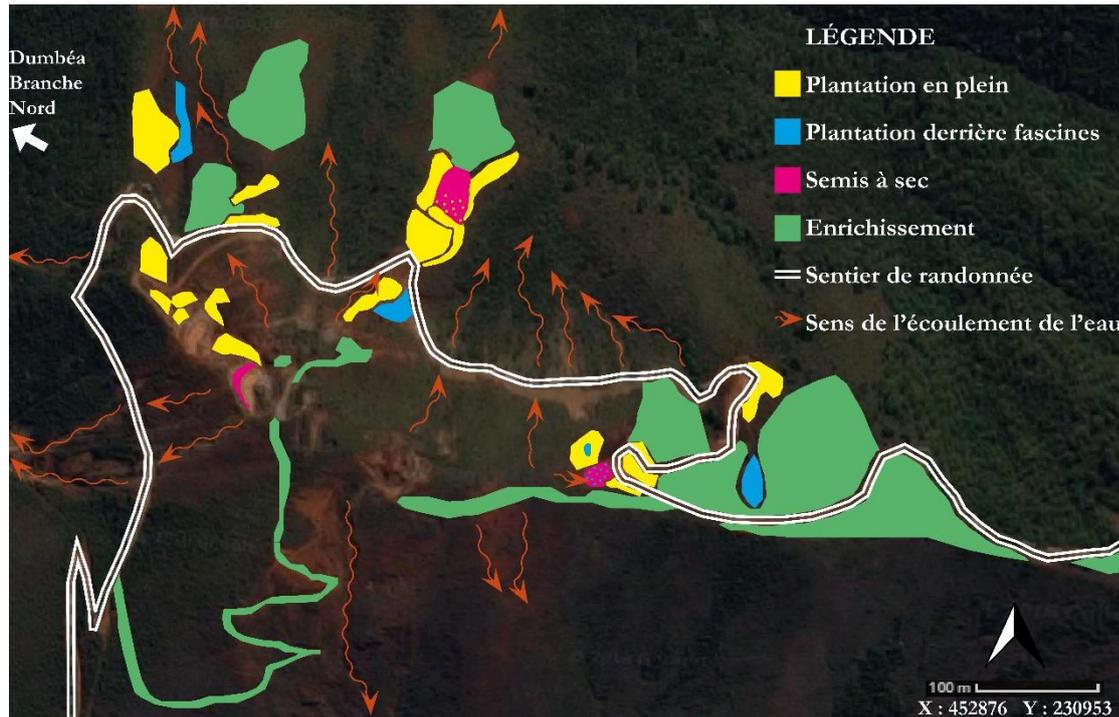


Figure 20 : Présentation du site d'étude Tip Top (fond de carte ©2018, Google)

La réhabilitation prévoit de replacer l'écosystème sur sa trajectoire « naturelle », c'est-à-dire celle qu'a eu l'écosystème à un moment de son histoire ou celle que l'Homme a choisie conduisant vers un état alternatif (Aronson *et al.*, 1995). Pour évaluer cette dernière, il est nécessaire de s'intéresser aux services écosystémiques. Les sorties réalisées sur le terrain ont permis de déterminer les services rendus par cet écosystème minier et d'en comprendre leur intérêt dans un objectif de réhabilitation. De même, la chronologie de restauration de ces services s'est basée sur les retours d'expériences empiriques de chantiers réalisés depuis plusieurs années, et la littérature scientifique.

ANNEXE 36 : TIP TOP, OUVRAGES REALISES



Figure 21 : Fascine et plantation

Les fascines, de 50 cm de hauteur environ, sont des barrières constituées de pieux (élément d'ancrage) et d'un entremêlement de branches mortes (ici du Gaïac ou *Acacia spirorbis* Labill.) afin de retenir la terre. Disposées le plus souvent le long des courbes de niveau, elles permettent une meilleure résistance du sol aux processus érosifs et hydrologiques (Rey, 2012). Associées à des plantations et/ou du semis, leur

efficacité sera renforcée grâce au développement racinaire des plantes.

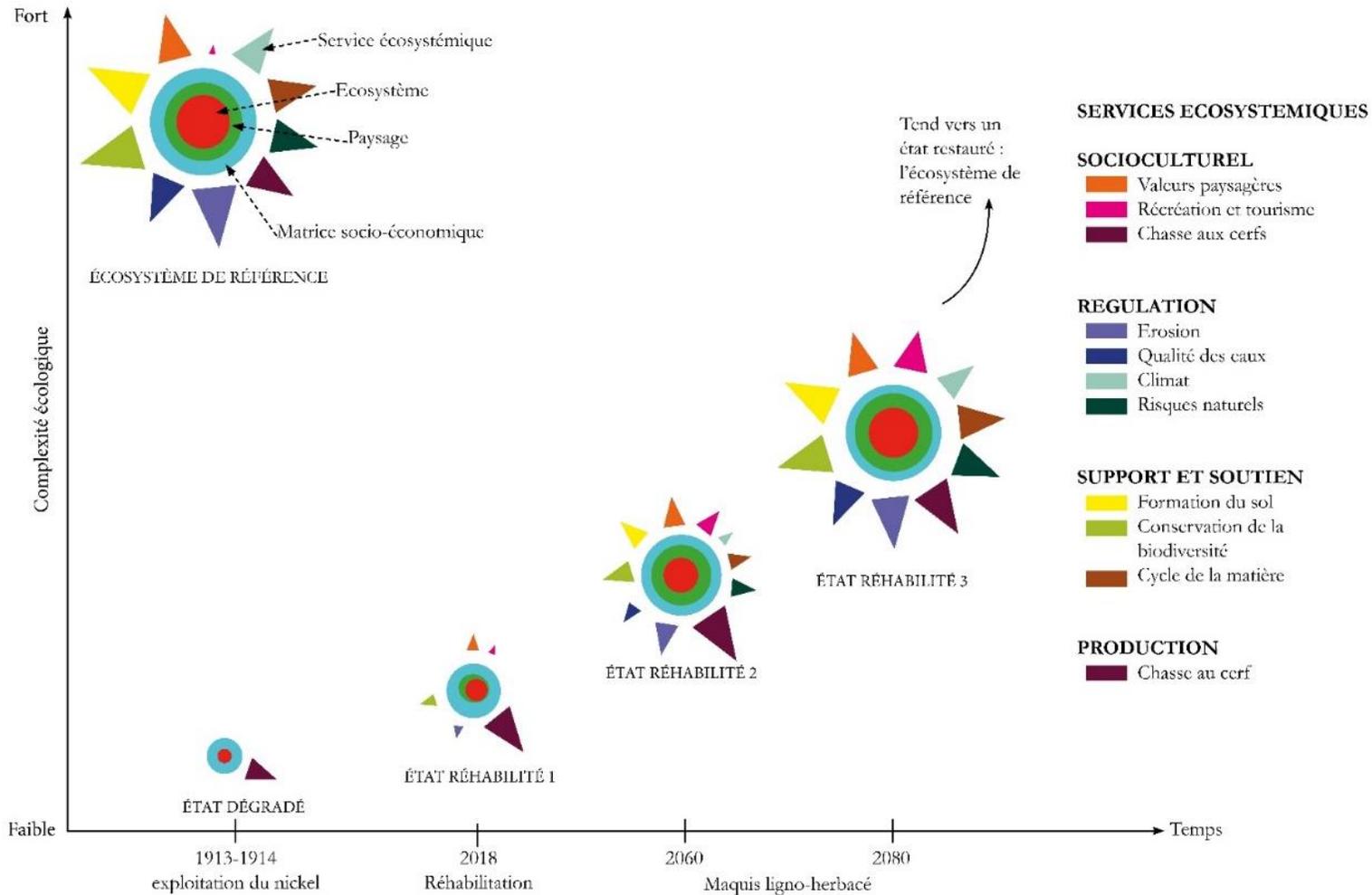
Le semis à sec est composé de mulch, graines, fixateur et engrais organique. Cette technique promet, par sa composition très élevée en graines, une couverture végétale étendue sur la zone semée. Cette protection végétale du sol permet une réduction de l'effet *splash* et un meilleur maintien du sol.

L'ensemble des zones revégétalisées présente une forte pente. Une plantation en plein a été réalisée afin de retenir le sol grâce au développement racinaire des plantes. De plus, cette technique présente un autre avantage : elle permet de réintroduire un large panel d'espèces pionnières. Tous ces ouvrages employés ont pour but de réhabiliter l'ancienne mine, c'est-à-dire de replacer l'écosystème sur sa trajectoire naturelle afin de favoriser les dynamiques de successions végétales naturelles.



Figure 22 : Plantation (à gauche) et semis à sec (à droite)

ANNEXE 37 : TIP TOP, DIAGRAMME DE CLEWELL & ARONSON



L'intensité des services écosystémiques a été choisie de façon spéculative dans le but de discuter de la difficulté de l'écosystème à retrouver son état originel après des travaux de réhabilitation.

ANNEXE 38 : REHABILITATION DE TIP TOP, UNE SUCCESSION D'ECOSYSTEMES

❖ ECOSYSTEME DE REFERENCE

L'écosystème de référence de Tip Top est un maquis ligno-herbacé composé d'une strate herbacée importante de Cyperaceae (du genre *Tetraria*, *Schoenus* et *Lepidosperma*) et d'un ensemble d'espèces ligneuses adaptées (comme par exemple du genre *Cunonia*, *Pancheria* *Tristianopsis* ou *Grevillea*).



Figure 23 Photographie des surfaces décapées de Tip Top

❖ ETAT DEGRADE

Il s'agit de l'état entre la fin de l'exploitation et le début des travaux de réhabilitation minière. L'écosystème de référence (initial) est inexistant et se limite à quelques îlots de végétation dispersés. La fragmentation est forte. Le paysage est complètement dévasté et la matrice socio-économique est faible : d'une part car l'exploitation du nickel est terminée et d'autre part car les dommages subis par les habitants sont de plus en plus ressentis et non-acceptés.

Les services écosystémiques sont réduits voire inexistants pour la majorité d'eux. Seul celui de production reste, car les cervidés constituent une réelle menace sur le maquis. C'est pourquoi, la chasse est incluse dans le plan de gestion du parc provincial.

❖ ETAT REHABILITE 1

Les travaux réalisés ont permis la réapparition de certains services écosystémiques dès lors qu'ils ont été terminés. En effet, la végétation peut former un moyen de contrôle efficace contre l'érosion de surface et la sédimentation. Elle joue soit un rôle de protection active (empêche l'érosion de se produire, augmente l'interception et l'infiltration de l'eau dans le sol, protège mécaniquement et thermiquement les sols, et fixe les sols grâce aux systèmes racinaires) (Stokes *et al.*, 2014), soit un rôle de protection passive (retient les sédiments érodés à l'amont, par filtration des écoulements et piégeage des matériaux érodés) (Nyssen *et al.*, 2000 *in* Delvienne, 2016). L'installation d'une nouvelle couverture végétale (10 223 plants réintroduits) augmente la protection active de l'érosion. Par conséquent, ce service de régulation est amélioré (Delvienne, 2016). De même, avec l'installation des fascines, les matériaux érodés sont piégés à l'amont et cet effet est immédiat dès la fin de leur construction (Rey, 2005). En revanche, la durabilité de leur action de piégeage reste toutefois limitée par le fait que ce sont des ouvrages inertes. Ainsi, une fois l'ouvrage rempli de sédiments au niveau des fagots, l'effet de piégeage deviendra nul (Delvienne, 2016). C'est pourquoi, certaines zones de fascines ont été associées à du semis à sec, dont le rôle n'est pas encore pris en compte car les graines n'ont pas germé à ce stade.

La plantation a permis la réintroduction de nombreuses espèces (33 au total), ce qui améliore grandement la biodiversité des zones replantées, puisqu'on passe d'une richesse spécifique nulle à une de 25 dans les zones de plantation en plein. De même, ces plantations permettent la réinsertion de la mine dans son paysage, ainsi que de plantes à statut particulier (comme par exemple *Agathis ovata* (C.Moore ex Vieill.) Warb. classé EN par l'UICN).

La matrice socio-économique s'améliore grâce au retour de certains services écosystémiques, impactant directement le cadre de vie des habitations situées dans la vallée.

❖ ETAT REHABILITE 2

Le choix des plantes de maquis réintroduites ne s'est pas fait au hasard. En effet, il s'agit dans la grande majorité d'espèces pionnières, qui amorcent et facilitent les processus de successions secondaires (Jaffré & Rigault, 1991 ; McCoy *et al.*, 1999). En effet, pour n'importe quel projet de réhabilitation, le cortège d'espèces choisies ne ressemble que partiellement à la composition floristique de l'écosystème objectif. La biodiversité s'enrichit donc progressivement avec l'apparition de nouvelles espèces. Dans le cas d'une recolonisation d'un maquis ligno-herbacée après passage d'un feu, la diversité spécifique varie énormément en fonction des stades de succession (McCoy *et al.*, 1999). De plus, le développement des végétaux, aussi bien leur partie aérienne que souterraine, améliore les conditions édaphiques des sols, qui étaient quasi-inexistantes au moment de la réhabilitation. Le cycle de la matière reprend tout doucement son cours grâce aux mycorhizes (inoculées en pépinière grâce à l'utilisation du *topsoil*) et au retour des micro-organismes (fixation biologique de l'azote, phosphore biodisponible). En effet, les symbioses mycorhiziennes accélèrent l'altération des minéraux et améliorent la biodisponibilité des éléments nutritifs (Griffiths *et al.*, 1999 *in* Lagrange, 2009).

L'érosion est de plus en plus contrôlée, notamment avec le développement des Cyperaceae. Elles permettent de fixer le sol en surface et limiter l'érosion aux cours des processus de colonisation primaire (Lagrange, 2009). En effet, elles sont caractérisées par la présence de nombreuses racines fines et flexibles, qui jouent un rôle important dans l'augmentation de la résistance du sol à l'érosion, diminuant ainsi les taux d'érosion liés au ruissellement

(Burylo & Rey, 2015). De plus, avec la germination du semis à sec dans les lits de ravines, l'action de piégeage des sédiments est améliorée grâce au développement racinaire des plants (Delvienne, 2016), améliorant la qualité de l'eau *in fine*.

Par le développement des végétaux, les zones revégétalisées se rapprochent de plus en plus de la composition de l'écosystème de référence : le maquis ligno-herbacée. L'impact paysager est de plus en plus faible du fait de la croissance de la couverture végétale. Cette dernière permet de stocker plus de carbone que le terrain dégradé. Elle a donc un rôle dans la régulation du climat à l'échelle du parc provincial. Les sols sont mieux maintenus, ce qui réduit les risques naturels d'éboulements de terrain et de coulées de terre rouge lors de fortes pluies. Enfin, la chasse aux cerfs se maintient pour les empêcher de détruire les nouveaux écosystèmes créés. En effet, de nombreuses jeunes plantes réintroduites sont appétentes et sont donc potentiellement broutées par ces cervidés. Le paysage est moins impacté car les plantes commencent à couvrir une bonne partie des zones revégétalisées. Enfin, la matrice socio-économique s'étend du fait des nombreux services écosystémiques rétablis.

❖ ETAT REHABILITE 3

La revégétalisation a remis en place une évolution naturelle de l'écosystème. Elle doit garantir à terme une couverture végétale permanente parfaitement intégrée dans le paysage et suffisamment diversifiée pour assurer son rôle dans la sauvegarde de nombreuses espèces végétales et animales (Jaffré & Rigault, 1991), d'où l'augmentation des services de support et soutien. De plus, les milieux revégétalisés permettent de réduire l'érosion par rapport aux milieux dégradés. Ils ne sont cependant qu'une solution intermédiaire, dont le degré de protection n'atteint pas celui offert par une végétation naturelle (Andreu et *al.*, 1995 *in* Rey et *al.*, 2005). C'est pourquoi, les services écosystémiques de régulation ont augmenté mais leurs valeurs n'ont pas atteint celles de départ. En effet, cette mine a fait l'objet de travaux de réhabilitation et non de restauration. C'est une réhabilitation qui tend, à long terme, à devenir une réelle restauration écologique. Il faut en effet au moins 45 ans pour rétablir un écosystème de maquis ligno-herbacée après incendie (McCoy et *al.*, 1999). Les dégâts de l'exploitation minière peuvent être assimilés à ceux d'un feu, dans le sens où l'écosystème est complètement détruit. En revanche, la résilience de l'écosystème après un feu est plus importante que celle de l'écosystème de terrains miniers. Cette différence réside en la capacité de certaines espèces à recoloniser après le passage d'un feu et en la présence d'un sol encore fertile. Dans le cas d'une mine, et surtout d'une mine « orpheline », les premiers horizons du sol sont absents, ce qui rend la tâche plus difficile, voire impossible, aux plantes pour recoloniser leur milieu d'origine.

ANNEXE 39 : ECOLOGIE DES ESPECES VEGETALES, TIP TOP

Espèce	Famille	Ecologie de l'espèce			Dormance	Multiplication possible	
		Sol	Altitude (m)	Distribution		Sexuée	Asexuée
<i>Costularia arundinacea</i>	Cyperaceae	F	50-1500	L		×	
<i>Costularia comosa</i>	Cyperaceae	F, B, H	50-1000	L		×	
<i>Costularia nervosa</i>	Cyperaceae	F	400-1200	S, NO	×	×	
<i>Costularia pubescens</i>	Cyperaceae	F	200-1000	S		×	
<i>Lepidosperma perterres</i>	Cyperaceae	E, C	100-1400	L	×	×	×
<i>Machaerina deplanchei</i>	Cyperaceae	F, A, B	0-1500	L	×	×	
<i>Schoenus juvenis</i>	Cyperaceae	E, C	300-1200	S, C, (NO)		×	
<i>Schoenus neocaledonicus</i>	Cyperaceae	F, B	50-1200	S, C, (NO)		×	
<i>Joinvillea plicata</i>	Joinvilleae	C	200-1300	L	×	×	×
<i>Agathis lanceolata</i>	Araucariaceae	F	300-1000	S, C		×	
<i>Agathis ovata</i>	Araucariaceae	F	150-1100	S, (E)		×	
<i>Alphitonia neocaledonica</i>	Rhamnaceae	F, B	0-1000	S, (E)	×	×	
<i>Araucaria bernieri</i>	Araucariaceae	F	300-1000	S, E, NO		×	
<i>Arillastrum gummiferum</i>	Myrtaceae	F, G	700	L, (S, E)		×	
<i>Cloezia artensis</i>	Myrtaceae	F, H	10-1000	L		×	
<i>Geissois pruinosa</i>	Cunoniaceae	A, C, F, B, E, H	30-700	S		×	×
<i>Grevillea exul</i> spp. <i>exul</i>	Proteaceae	F	0-1000	L		×	×
<i>Grevillea exul</i> spp. <i>rubiginosa</i>	Proteaceae	F	0-1400	S		×	×
<i>Grevillea gillivrayi</i>	Proteaceae	B, G	0-1000	C, S		×	×
<i>Gymnostoma deplancheanum</i>	Casuarinaceae	G	0-900	S		×	×
<i>Hibbertia lucens</i>	Dilleniaceae	F	0-1000	L	×	×	×
<i>Metrosideros laurifolia</i>	Myrtaceae	F	5-1600	L		×	×
<i>Myodocarpus involucreatus</i>	Myodocarpaceae	C, A, B	200-1200	S	?	×	
<i>Myrtastrum rufopunctatum</i>	Myrtaceae	B, E, C	100-1300	S, aL	?	×	×
<i>Normandia neocaledonica</i>	Rubiaceae	E, B	100-1300	L		×	×
<i>Pancheria ferruginea</i>	Cunoniaceae	E, B	100-900	S	?	×	
<i>Peripterygia marginata</i>	Celastraceae	F (-G), B	0-1050	L		×	×
<i>Samantha leratii</i>	Myrtaceae	F	0-1000	S		×	×
<i>Scaevola cylindrica</i>	Goodeniaceae	F, B	200-1100	L	×	×	×
<i>Soulamea pancheri</i>	Simabouraceae	B, E	100-1100	S, O, E	?	×	
<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	Proteaceae	F, B	0-1300	L		×	
<i>Syzygium frutescens</i>	Myrtaceae	F, G	0-1600	L		×	
<i>Tristaniopsis calobuccus</i>	Myrtaceae	E, C, G	10-1100	L		×	×
<i>Tristaniopsis glauca</i>	Myrtaceae	E, C, G	50-(1000)	S		×	×

Source : (L'Huillier *et al.*, 2010 ; Suprin, 2011)

Sol

- A Sol ferrallitique sur alluvions
- C Sol ferrallitique colluvial (bas de pente)
- G Sol ferrallitique gravillonnaire ou cuirassé
- F Ferrallitique (général)
- B Sol brun hypermagnésien
- E Sol ferrallitique érodé sur pente
- H Sol ferrallitique hydromorphe

Distribution

- L Large
- C Centre
- O Massifs de la côte Ouest
- S Massifs du Sud
- aL Assez large
- E Massifs de la côte Est
- N Massifs de la côte Nord

ANNEXE 40 : DATES DE FLORAISON ET DE FRUCTIFICATION DES ESPECES VEGETALES REINTRODUITES A TIP TOP

Espèce	Floraison												Fructification											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<i>Costularia arundinacea</i>																								
<i>Costularia comosa</i>																								
<i>Costularia nervosa</i>																								
<i>Costularia pubescens</i>																								
<i>Lepidosperma perteres</i>																								
<i>Machaerina deplanchei</i>																								
<i>Schoenus juvenis</i>																								
<i>Schoenus neocaledonicus</i>																								
<i>Joimillea plicata</i>																								
<i>Agathis lanceolata</i>																								
<i>Agathis ovata</i>																								
<i>Alphitonia neocaledonica</i>																								
<i>Araucaria bernieri</i>																								
<i>Arillastrum gummiferum</i>																								
<i>Cloezia artensis</i>																								
<i>Geissois pruinosa</i>																								
<i>Grevillea exul spp. exul</i>																								
<i>Grevillea exul spp. rubiginosa</i>																								
<i>Grevillea gillivrayi</i>																								
<i>Gymnostoma deplancheanum</i>																								
<i>Hibbertia lucens</i>																								
<i>Metrosideros laurifolia</i>																								
<i>Myodocarpus involucratu</i>																								
<i>Myrtastrum rufopunctatum</i>																								
<i>Normandia neocaledonica</i>																								
<i>Pancheria ferruginea</i>																								
<i>Peripterygia marginata</i>																								
<i>Sannantha leratii</i>																								
<i>Scaevola cylindrica</i>																								
<i>Soulamea pancheri</i>																								
<i>Stenocarpus umbelliferus</i>																								
<i>Syzygium frutescens</i>																								
<i>Tristaniopsis calobucxus</i>																								
<i>Tristaniopsis glauca</i>																								

Source : (L'Huillier *et al.*, 2010 ; Suprin, 2011)

Floraison

- Mois possibles
- Mois principaux

Fructification

- Mois possibles
- Mois principaux

ANNEXE 41 : ARTICLE DE JOURNAL

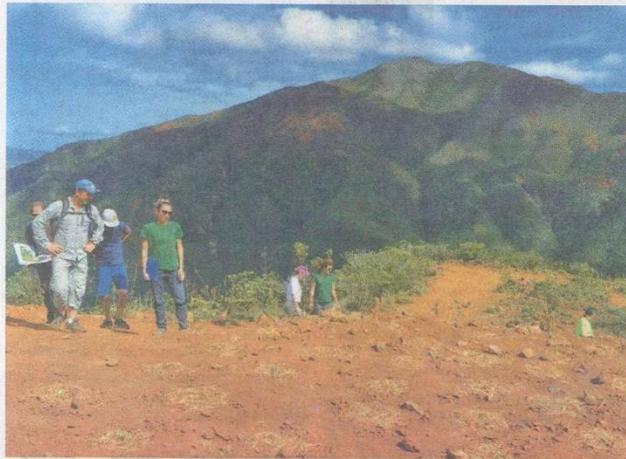
Les anciennes mines du parc provincial en voie de réhabilitation

DUMBÉA. Au cœur des montagnes de la haute Dumbéa, les programmes de réhabilitation de mines orphelines se multiplient. Un travail discret dont les résultats ne seront pas visibles avant des années. Reportage à Tip Top.

Si le spot n'est connu que des fêrus de randonnées, il est néanmoins visible à des kilomètres à la ronde depuis la vallée de la Dumbéa. Pourtant, il n'a subi les assauts des mineurs que deux ans : en 1913 et en 1914. Mais aujourd'hui, la mine orpheline Tip Top est perchée au cœur du parc provincial et bénéficie à ce titre d'une attention toute particulière. Après trois ans d'études et de travail, en pépinière, puis sur site, cette zone dégradée d'environ 3 hectares vient d'être entièrement revégétalisée.

« A l'époque, on était capable d'ouvrir une mine pour simplement une ou deux saisons tant le minerai exporté coûtait une fortune. C'est pour ça que les paysages ont tant changé, introduit Thomas Le Borgne, chargé d'études techniques au Fonds nickel. Notre mission est de réhabiliter les mines dont l'exploitation date d'avant 1975 (lire par ailleurs). La particularité de ce site, c'est qu'il se situe dans une zone protégée et ne pourra donc plus connaître d'exploitation minière. »

Voilà pourquoi 10 860 plants de maquis minier ont été mis en terre à même la latérite. « Nos travaux de gestion des eaux puis de plantation permettent de réduire l'écoulement non maîtrisé et donc l'érosion, poursuit Thomas Le Borgne. Et même si de



Une équipe du Fonds nickel et de l'entreprise Siras, en charge de la restauration de la mine Tip Top, inspectait l'état et l'évolution des plantations. Un programme lancé dès 2015.

loin, vu d'en bas notamment, le fruit de nos efforts ne se voit pas forcément, à terme, lorsque les plants auront poussé, il y aura un véritable effet bénéfique sur le paysage. »

RÉHABILITATION EN HÉLICOPTÈRE

Car le secteur nord de Dumbéa reste relativement moins sinistré que d'autres zones du Caillou. « Ici, ce sont de vieilles mines. On n'a donc pas le même passif que dans d'autres lieux, comme sur la côte Est. À titre de comparaison, la moitié des dégradations liées à la mine en Calédonie sont concentrées entre Thio et Houailou », explique Olivier Monge, responsable technique

du Fonds nickel, qui multiplie les programmes de restauration dans le bassin-versant de la Dumbéa. Ainsi, la mine des Barbouilleux, à l'entrée du parc provincial, vient également de connaître la même réhabilitation pour un montant de près de 90 millions. Un peu plus au nord, entre les Daumac et la vallée de La Couvelée, une autre opération est en passe de débiter. « Il s'agit d'une mine peu spectaculaire, mais les travaux devront être effectués par hélicoptère notamment pour transporter le matériel, poursuit Olivier Monge. On a décidé de ne pas rouvrir la piste, car cela impliquait de défricher des kilomètres de végétation, ce qui n'était pas forcément favorable en termes

d'impact et ce qui permet de préserver le site du passage de véhicules. » Enfin, un autre vaste projet est à l'étude : la réhabilitation du Mont-Pitidéré où les travaux de gestion des eaux pourraient commencer l'an prochain et où les plantations sont attendues en 2020 ou 2021. « Pour ce projet, on envisage de rouvrir l'accès si les propriétaires sont toujours d'accord, glisse Thomas Le Borgne. L'OPT souhaiterait y installer un relais téléphonique et la ville ou encore le Yala Ranch aimerait y développer les randonnées pédestres. » Ou l'art de joindre l'utile à l'agréable.

Anthony Tejero

10 860

plants

Sur la mine Tip Top, une trentaine d'espèces de maquis minier ont été mises en terre sur une surface d'environ 3 hectares.

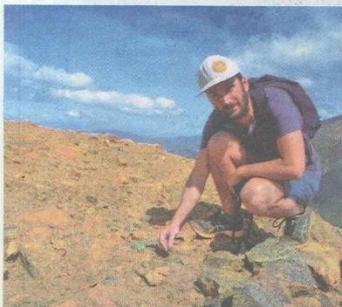
REPÈRES

Avant 1975

Le Fonds nickel réhabilite les mines exploitées avant 1975. « On considère qu'avant cette date, les torts étaient partagés entre les privés et les pouvoirs publics, explique Thomas Le Borgne. Depuis 1975, on estime que les impacts environnementaux sont suffisamment connus pour que les restaurations soient à la charge du titulaire. »

Les dégâts du cerf

Hier, lors de l'inspection de la mine Tip Top, une mauvaise surprise était au rendez-vous. Sur certaines zones fraîchement revégétalisées, des plants étaient abîmés, voire arrachés. « Si les cerfs continuent de brouter les plantes, on ne pourra plus garantir la reprise », s'inquiète Danielle, directrice technique de Siras, la société en charge de restaurer Tip Top.



Sur les cailloux ou en pente, le semis (mélange de matière organique, graines et engrais) est une alternative aux plants.



La mine Tip Top est accessible aux randonneurs et offre un superbe panorama sur la rivière, la chaîne et le lagon.



Certains plants ont été broutés, voire complètement arrachés par les cerfs, réputés pour dégrader les sous-bois du parc.