



HAL
open science

Analyse et synthèse des expérimentations et actions de restauration écologique réalisées sur sites miniers en Nouvelle-Calédonie depuis 30 ans. Rapport scientifique final.

Hamid Amir, Bruno Fogliani, Simon Gensous, Gilles Durrieu, Laurent L'Huillier, Danielle Saintpierre, Adeline Reck, Alexandre Lagrange, Thomas Gaillard

► To cite this version:

Hamid Amir, Bruno Fogliani, Simon Gensous, Gilles Durrieu, Laurent L'Huillier, et al.. Analyse et synthèse des expérimentations et actions de restauration écologique réalisées sur sites miniers en Nouvelle-Calédonie depuis 30 ans. Rapport scientifique final.. [Rapport de recherche] Programme Recosynth. Tome Nickel et Environnement, CNRT Nickel et son environnement. 2018, 282 p. ird-02154755

HAL Id: ird-02154755

<https://ird.hal.science/ird-02154755>

Submitted on 13 Jun 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Rapport scientifique

Edition 2018

RECOSYNTH

ANALYSE ET SYNTHÈSE DES EXPÉRIMENTATIONS
ET ACTIONS DE RESTAURATION ÉCOLOGIQUE
RÉALISÉES SUR SITES MINIERS
EN NOUVELLE-CALÉDONIE DEPUIS 30 ANS

Rapport Scientifique

2018

RAPPORT FINAL

PROJET RECOSYNTH

ANALYSE ET SYNTHÈSE DES EXPÉRIMENTATIONS ET ACTIONS DE
RESTAURATION ÉCOLOGIQUE RÉALISÉES SUR SITES MINIERS EN
NOUVELLE-CALÉDONIE DEPUIS 30 ANS



Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par

le CNRT « Nickel & son environnement »



Octobre 2018



Analyse et synthèse des expérimentations et actions de restauration écologique réalisées sur sites miniers en Nouvelle-Calédonie depuis 30 ans

Rapport final

Par le consortium : Université de Nouvelle-Calédonie (UNC) / Institut Agronomique néo-Calédonien (IAC) / SIRAS Pacifique / Bota Environnement

AUTEURS :

Hamid Amir : Responsable du projet (UNC – LIVE)

Bruno Fogliani : Co-responsable du projet (IAC - ARBOREAL)

Simon Gensous (UNC/IAC)

Gilles Durrieu (UNC)

Laurent L'Huillier (IAC)

Danielle Saintpierre (SIRAS Pacifique)

Adeline Reck (SIRAS Pacifique)

Alexandre Lagrange (Bota Environnement)

Thomas Gaillard (Bota Environnement)

RÉVISION DU DOCUMENT

Réf.	CSF n° 2PS2013-CNRT.UNC/RECO SYNTH/12032016			
Version	Date	Rédacteur(s)	Qualité du rédacteur(s)	Révision pour CNRT
V1	Décembre 2017	Hamid AMIR (UNC), Bruno Figliani (IAC) et coll.	Coordinateurs du programme	F. Bailly CNRT
VF	Septembre 2018	Hamid AMIR (UNC), Bruno Figliani (IAC) et coll.	Coordinateurs du programme	F. Bailly CNRT

Mots clés : opérations de revégétalisation, restauration écologique, sites miniers, Nouvelle-Calédonie, analyse, bilans synthétiques, indicateurs.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Amir H., Fogliani B. et coll., (2018) – *Rapport scientifique final*, Programme « RECO SYNTH ». CNRT « Nickel & son environnement. Edition « Nickel et environnement » 294 pages.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	16
2. DÉMARCHE GÉNÉRALE, ORGANISATION ET MÉTHODOLOGIES ADOPTÉES	18
2.1. DÉMARCHE GÉNÉRALE ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	18
2.2. DESCRIPTION DES ÉTAPES DU PROJET	19
2.3. PRÉSÉLECTION DES SITES ET ÉTABLISSEMENT DE LA LISTE DES ZONES À ÉTUDIER EN DÉTAIL	20
2.3.1. <i>Démarche de présélection des sites candidats</i>	20
2.3.1.1. Définitions des mots clefs.....	20
2.3.1.2. Démarche de présélection.....	20
2.3.2. <i>Première sélection: de 381 à 63 zones</i>	21
2.3.3.1. Choix des paramètres utilisés pour la sélection finale de 35 zones.....	23
2.3.3.2. Sélection finale des 35 zones.....	23
2.4. CONTRIBUTION DE L'ÉQUIPE DU PROJET À LA MISE EN PLACE DE LA BASE DE DONNÉES	31
2.5. TRAVAIL THÉORIQUE PRÉALABLE SUR LES INDICATEURS SUSCEPTIBLES D'ÊTRE UTILISÉS POUR ÉVALUER LA RÉUSSITE	34
2.6. ELABORATION DE LA FICHE TERRAIN	34
2.7. ELABORATION DE LA FICHE MÉMO	36
2.8. SORTIES PRÉPARATOIRES ET SORTIES POUR LES RELEVÉS DE TERRAIN	37
2.9. ÉTAT ACTUEL DE LA VÉGÉTATION DES TERRAINS REVÉGÉTALISÉS	39
2.10. PRÉPARATION ET ANALYSE DES DONNÉES	42
2.10.1. <i>Préparation des données</i>	42
2.10.2. <i>Analyse des résultats</i>	47
2.10.3. <i>TYPOLOGIE des zones étudiées et étude statistique globale</i>	49
3. COMPARAISON DES DIFFÉRENTES MODALITÉS	54
3.1. EFFET TOPSOIL	54
3.1.1. <i>Résultats</i>	54
3.1.2. <i>Conclusions</i>	59
3.2. EFFET DU GAÏAC	61
3.2.1. <i>Résultats</i>	62
3.2.2. <i>Conclusion</i>	63
3.3. EFFET DU SUBSTRAT	67
3.3.1. <i>Cas de Camps des Sapins :</i>	67
3.3.1.1. Résultats	67
3.3.1.2. Conclusion	70
3.3.2. <i>La mine A1 sur goro</i>	71
3.3.2.1. Résultats	71
3.3.2.2. Conclusion	74
3.4. DIFFÉRENCE ENTRE SEMIS HYDRAULIQUE (AVEC OU SANS TRAVAIL DU SOL) ET SEMIS MANUEL : EXEMPLE DE LA VERSE BN4	75
3.4.1. <i>Résultats</i>	75
3.4.2. <i>Conclusion</i>	78
3.5. EFFET DES INTRANTS	79
3.5.1. <i>Cas du Col de l'Antenne</i>	79
3.5.1.1. Résultats	80
3.5.1.2. Conclusion	82
3.5.2. <i>Cas de CR7</i>	83
3.5.2.1. Résultats	83
3.5.2.2. Conclusion	85
3.5.3. <i>Influence des boues de STEP avec ou sans plantation ; essai Tontouta</i>	86
3.5.3.1. Résultats	86
3.5.3.2. Conclusions.....	90

3.6.	EFFET DES INTRANTS EN SEMIS HYDRAULIQUE : EXEMPLE DE LA MINE PINPIN	90
3.6.1.	<i>Résultats</i>	92
3.6.2.	<i>Conclusion</i>	94
3.7.	INFLUENCE DE L'ORIENTATION PAR RAPPORT AU VENT	95
3.7.1.	<i>L'exemple du Mont Dore</i>	95
3.7.1.1.	Résultats.....	95
3.7.1.2.	Conclusions.....	97
3.7.2.	<i>L'exemple de Paagoumène Crête 2</i>	98
3.7.2.1.	Résultats.....	98
3.7.2.2.	Conclusion.....	100
3.8.	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	102
4.	APPROCHE MATHÉMATIQUE GLOBALE	104
4.1.	TYPLOGIE DES ZONES ÉTUDIÉES	104
4.2.	RECHERCHE D'UN INDICATEUR SYNTHÉTIQUE DE RÉUSSITE DE LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE AU SEIN DES MODALITÉS DE CHACUN DES TROIS CLUSTERS	110
4.2.1.	<i>Recherche d'un paramètre synthétique exprimant la tendance à la réussite de la restauration écologique.</i>	110
4.2.2.	<i>Analyse des 3 clusters en termes de réussite de la restauration</i>	113
4.2.2.1.	Analyse du Cluster 1	113
4.2.2.2.	Analyse du Cluster 2	117
4.2.2.3.	Analyse du Cluster 3	121
4.2.2.4.	Classement des groupes et des modalités selon l'indicateur synthétique	124
4.3.	APPLICATION DE L'INDICATEUR SYNTHÉTIQUE DE RÉUSSITE A L'ÉVALUATION D'UN SITE DE REVEGETALISATION 132	
4.3.1.	<i>Présentation générale</i>	132
4.3.2.	<i>Visualisation des indicateurs pour les sites existants</i>	132
4.3.2.1.	Téléchargement du fichier des données collectées sur le terrain.	133
4.3.2.2.	Choix de la typologie :	134
4.3.2.3.	Saisie des variables sélectionnées pour la notation :	135
4.3.	CONCLUSIONS.....	138
5.	COMPLÉMENTS D'ANALYSES ET D'OBSERVATIONS SUR LE TERRAIN.....	139
5.1.	ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES.....	139
5.2.	IMPORTANCE DES MYCORHIZES À ARBUSCULES	142
5.3.	OBSERVATIONS COMPLÉMENTAIRES.....	144
6.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	147
7.	BIBLIOGRAPHIE	154
8.	ANNEXES.....	157
8.1.	LISTE DES RÉUNIONS DE TRAVAIL EFFECTUÉES DANS LE CADRE DU PROJET	157
8.2.	LISTE DES SITES QUI ONT ÉTÉ ÉVALUÉS DANS LE CADRE DE LA SÉLECTION (TOTAL DE 381 ZONES SUR 82 SITES) 160	
8.3.	EXPOSÉ AU COMITÉ DE PILOTAGE DU 18 DÉCEMBRE 2015.....	165
8.4.	FICHE POUR RELEVÉS SUR LE TERRAIN	176
8.5.	FICHE MÉMO ASSOCIÉE À LA FICHE TERRAIN.....	180
8.6.	RÉSULTATS DES ANALYSES PAR MODALITÉS.....	192
8.6.1.	<i>Effet topsoil</i>	192
8.6.2.	<i>Effet de l'Acacia spirorbis</i>	198
8.6.3.	<i>Effet substrat</i>	202
8.6.3.1.	Cas de camps des Sapins	202
8.6.3.2.	La mine A1	206
8.6.4.	<i>Différence semis hydraulique (avec ou sans travail du sol) et semis manuel : Exemple de la verse BN4</i>	210
8.6.5.	<i>Effet des intrants</i>	214

8.6.5.1.	Cas de Col de l'antenne	214
8.6.5.2.	Cas de CR7	218
8.6.5.3.	Influence de la plantation et des boues de STEP Essai Tontouta	222
8.6.6.	<i>Effet des intrants en semis hydraulique : Exemple de la mine Pinpin</i>	227
8.6.7.	<i>Influence de l'orientation</i>	231
8.6.7.1.	L'exemple du Mont Dore	231
8.6.7.2.	L'exemple de Paagoumène Crête 2	235
8.7.	ESPÈCES UTILISÉES OU APPARUES EN FONCTION DE LEUR AFFINITÉ AVEC LE TYPE DE SUBSTRAT	239
8.8.	COMPLÉMENT À L'ANALYSE MATHÉMATIQUE GLOBALE	240
8.9.	ANNEXE 8 : BOXPLOTS CONCERNANT LES DONNÉES COMPARATIVES DES VARIABLES UTILISÉES, EN VUE DE LES COMPARER POUR LEUR ÉVOLUTION VERS LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE	243
8.10.	PHOTOS DES SOUS-ZONES (MODALITÉS) ÉTUDIÉES	249

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Carte de la Nouvelle-Calédonie montrant la répartition des zones présélectionnées sur l'ensemble de la grande terre.	22
Figure 2 : Carte montrant la répartition sur la grande terre des 35 zones sélectionnées.....	24
Figure 3 : Cartographie des différents sites montrant les zones/sous-zones étudiées	26
Figure 4 : Schéma conceptuel de la base de données	32
Figure 5 : Schéma d'imbrication des différentes entités pour la base de données RECOSYNTH.....	33
Figure 6 : Types d'indicateurs potentiels de la réussite de la restauration écologique sur terrains miniers.....	34
Figure 7 : Arbre de décision pour le choix de la taille des quadrats à réaliser sur le terrain .	37
Figure 8 : Photos de la disposition d'un quadrat sur le terrain.....	38
Figure 9 : Schéma expliquant les différentes valeurs produites dans une boxplot	47
Figure 10 : Régression médiane de l'indice de diversité (ID) de Shannon, en fonction de l'année de révégétalisation.....	48
Figure 11 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique pour l'étude de l'effet topsoil.	56
Figure 12 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces végétales communes aux différentes modalités sélectionnées pour l'étude de l'effet topsoil.	53
Figure 13 : Photos des différentes modalités utilisées pour l'effet topsoil.....	60
Figure 14 : Boxplot de la densité en mètre carré d' <i>Acacia spirorbis</i> dénombré sur chacune des modalités	61
Figure 15 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique.....	63
Figure 16 : Projection dans le plan principal engendré par les deux premières composantes principales des observations correspondant aux sous-zones en considérant la variable substrat comme variable qualitative illustrative en violet.....	65
Figure 17 : Illustrations de l'effet de la densité en <i>A. spirorbis</i> sur la productivité et la dynamique de l'écosystème (présence de recrûs).....	66
Figure 18 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique.....	68
Figure 19 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces végétales utilisées au moment de la plantation, communes aux 3 modalités, et qui persistent au moment des relevés.	70
Figure 20 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique sur la Mine A1. .	73
Figure 21 : Photos des deux modalités classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 20) sur la Mine A1	73
Figure 22 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités sur la Mine A1	74
Figure 23: Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique (Verse BN4-Goro).	76
Figure 24 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées dans le mélange et retrouvées sur l'ensemble des modalités sur la Verse BN4-Goro.....	77
Figure 25 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces apparues communes à l'ensemble des modalités	78

Figure 26 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique pour l'étude de l'effet des intrants au col de l'antenne.....	81
Figure 27 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités utilisées pour l'étude de l'effet des intrants au col de l'antenne.	82
Figure 28 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7.	84
Figure 29 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités utilisées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7	85
Figure 30 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique pour l'étude sur Tontouta Vulcain.	88
Figure 31: Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées pour les 4 modalités plantées testées sur Tontouta Vulcain	89
Figure 32 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces végétales apparues communes aux 8 modalités testées sur Tontouta Vulcain	89
Figure 33 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique menée sur les modalités de la mine Pinpin.....	93
Figure 34 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités testées sur la mine Pinpin.	94
Figure 35 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique menée sur les modalités de la mine de Rouvray.	97
Figure 36 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités testées sur la Mine de Rouvray	97
Figure 37 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique menées sur les modalités de Paagoumène Crête 2.	99
Figure 38 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités testées sur Paagoumène Crête 2.....	100
Figure 39 : A : Projection des sous-zones sur les 2 premières composantes principales (qui expliquent 14.7% de la variabilité totale observée). B : une projection en dendrogramme montrant la séparation en sous-groupes des 3 clusters.....	106
Figure 40 : Répartition (A) des types de surfaces revégétalisées (plateformes, banquettes, talus), (B) des types de substrat et (C) des techniques utilisées (PL : plantation, SH : semis hydraulique, SM : semis manuel), pour chacun des trois clusters définis par la typologie.....	108
Figure 41 : Moyenne (A) des altitudes (en m),(B) des pentes (en degré) et (C) du nombre d'espèces de maquis utilisées, pour chacun des trois clusters définis par la typologie.	108
Figure 42 : Cercle de corrélation montrant la projection des variables explicatives sélectionnées sur les deux premiers axes de l'ACP (pour le sens exact des appellations contractées, voir Tableau 30)	111
Figure 43 : Projection des individus (modalités) sur les 2 premières composantes principales (qui expliquent 40,9 % de la variabilité totale observée).	112
Figure 44 : Cercle des corrélations obtenu pour le cluster 1.	114
Figure 45 : Projection des individus (quadrats) sur les 2 premières composantes principales (qui expliquent 45,96% de la variabilité totale observée).	115

Figure 46 : Projection des individus (quadrats des modalités) sur les 3 premiers axes de l'ACP qui expliquent 62,5 % de la variabilité totale observée.....	116
Figure 47 : Cercle des corrélations obtenu pour le cluster 2.	117
Figure 48 : Projection des individus (modalités) sur les 2 premières composantes principales (qui expliquent 37,7% de la variabilité totale observée.	118
Figure 49 : A- Projection des individus (quadrats des modalités) sur les 3 premiers axes qui expliquent 49,4 % de la variabilité totale observée.	120
Figure 50 : Cercle des corrélations obtenu pour le cluster 3	122
Figure 51 : Projection des individus (modalités) sur les 2 premières composantes principales (qui expliquent 44.82% de la variabilité totale observée).	122
Figure 52 : A- Projection des individus (quadrats des modalités) sur les 3 premiers axes qui expliquent 49,4 % de la variabilité totale observée.	123
Figure 53 : Classement des groupes du Cluster 1 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.	125
Figure 54 : Classement des modalités du cluster 1 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.	125
Figure 55 : Classement des groupes du cluster 2 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.	127
Figure 56 : Classement des modalités du cluster 2 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.	127
Figure 57 : Classement des groupes du cluster 3 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.	129
Figure 58 : Classement des modalités du cluster 3 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.	129
Figure 59 : Visualisation schématique du classement de 4 modalités du cluster 3, avec les photos correspondantes montrant les différences entre les modalités se trouvant de part et d'autre de l'axe 1 de l'ACP qui traduit la réussite de la restauration.....	131
Figure 60 : Page à l'ouverture du site	133
Figure 61 : Choix entre la visualisation de la carte avec les indicateurs ou l'ajout d'un nouveau site.....	133
Figure 62 : Exemple de fichiers de diversité pour GORO_USINE_RDP_SZ01_R1. Ici sont notés les 5 quadrats constituant les répétitions statistiques demandées dans la fiche terrain.....	134
Figure 63 : Choix de la typologie (1, 2 ou 3).	134
Figure 64 : Tableaux pour rentrer les valeurs des variables sélectionnées pour les 3 typologies 1, 2 et 3.	135
Figure 65 : Exemple de saisie de valeurs respectivement pour les zones GORO_FER_KUEB_SZ01 et GORO_USINE_SMSP_SZ01 correspondant à un terrain bien classé et un autre mal classé, parmi les sites de la typologie 1.....	136
Figure 66 : Représentations spatiales des indicateurs.....	137
Figure 67 : Litière produite sous <i>Gymnostoma sp.</i>	141
Figure 68 : Vue au microscope d'une partie de racine de <i>Gymnostoma sp.</i> avec très forte mycorhization dans l'échantillon « Goro VEM7 ».....	144
Figure 69 : Nombreux plants se développant sous <i>Gymnostoma sp.</i>	145

Figure 70 : Aspect de la verse revégétalisée VEM7 à Goro.....	146
Figure 71 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet topsoil.	192
Figure 72 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet topsoil.	193
Figure 73 : Photos des différentes modalités classées en fonction de la classification hiérarchique pour l'étude de l'effet topsoil (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 11).....	197
Figure 74 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet A. spirorbis.....	198
Figure 75 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet A. spirorbis.....	199
Figure 76 : Photos des différentes modalités pour l'étude de l'effet A. spirorbis classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 15).....	201
Figure 77 : Boxplot des variables sélectionnées (Camps des Sapins).....	202
Figure 78 : Boxplot des variables sélectionnées (Camps des Sapins).....	203
Figure 79 : Photos des différentes modalités sur Camps des Sapins.classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 18).....	205
Figure 80: Boxplot des variables sélectionnées (Mine A1).....	206
Figure 81: Boxplot des variables sélectionnées (Mine A1).....	207
Figure 82 : Photos des différentes modalités sur Mine A1.classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 20).....	209
Figure 83 : Boxplot des variables sélectionnée (Verse BN4 Goro).....	210
Figure 84 : Boxplot des variables sélectionnées (Verse BN4 Goro).....	211
Figure 85 : Photos des différentes modalités sur la Verse BN4-Goro	213
Figure 86 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet intrant sur le col de l'antenne.	214
Figure 87 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet intrant sur le col de l'antenne.	215
Figure 88 : Photos des différentes modalités classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 26)	217
Figure 89 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7.	218
Figure 90 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7.	219
Figure 91 : Photos des différentes modalités pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7 classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 28)	221
Figure 92 : Boxplots des variables sélectionnées pour l'étude sur Tontouta Vulcain.	222
Figure 93 : Boxplots des variables sélectionnées pour l'étude sur Tontouta Vulcain.	223
Figure 94 : Photos des différentes modalités testées sur Tontouta Vulcain classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 30).....	226
Figure 95 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur la Mine Pinpin.....	227

Figure 96 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur la mine Pinpin.....	228
Figure 97 : Photos des différentes modalités classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 33)	230
Figure 98 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur la mine De Rouvray.....	231
Figure 99 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur la mine De Rouvray.....	232
Figure 100 : Photos des différentes modalités testées sur la mine De Rouvray classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 35)	234
Figure 101 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur Paagoumène Crête 2. .	235
Figure 102 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur Paagoumène Crête 2. .	236
Figure 103 : Photos des différentes modalités classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 37)	238
Figure 104 : Analyse factorielle de données mixtes réalisée avec 23 variables	240
Figure 105 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 1.....	243
Figure 106 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 1.....	244
Figure 107 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 2.....	245
Figure 108 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 2.....	246
Figure 109 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 3.....	247
Figure 110 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 3.....	248

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des 67 modalités (sous-zones), avec les années de revégétalisation, leur situation et leurs propriétaires	27
Tableau 2 : Présentation de l'ensemble des modalités étudiées.....	41
Tableau 3 : Présentation générale des variables estimées à partir des relevés sur terrains. Le code en première colonne est celui utilisé dans la base de données.....	45
Tableau 4 : Variables utilisées pour définir la typologie.	51
Tableau 5 : Variables écartées pour la création de la typologie.	52
Tableau 6 : Descriptif des différentes modalités pour l'étude de l'effet du topsoil (les lignes grisées correspondent aux modalités avec topsoil).	54
Tableau 7 : Variables sélectionnées pour l'étude de l'effet du topsoil	55
Tableau 8 : Descriptif des différentes modalités pour l'étude de l'effet d' <i>Acacia spirorbis</i>	61
Tableau 9 : Variables sélectionnées pour l'étude de l'effet <i>Acacia spirorbis</i>	62
Tableau 10 : Descriptif des différentes modalités sur Camps des Sapins	67
Tableau 11 : Variables sélectionnées pour l'étude des différentes modalités sur Camps des sapins.....	67
Tableau 12 : Descriptif des différentes modalités sur la Mine A1	71
Tableau 13: Variables sélectionnées pour l'étude des différentes modalités sur la Mine A1	72
Tableau 14 : Tableau descriptif des différentes modalités sur la verse BN4 de Goro	75
Tableau 15 : Variables sélectionnées pour l'étude des différentes modalités sur la verse BN4 de Goro	75
Tableau 16 : Descriptif des différentes modalités utilisées pour l'effet des intrants au col de l'antenne	79
Tableau 17 : Variables sélectionnées pour l'étude de l'effet des intrants au col de l'antenne	80
Tableau 18 : Descriptif des différentes modalités pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7	83
Tableau 19 : Variables sélectionnées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7	83
Tableau 20 : Descriptif des différentes modalités appliquées sur Tontouta Vulcain	86
Tableau 21 : Variables sélectionnées pour l'étude sur Tontouta Vulcain	87
Tableau 22 : Descriptif des différentes modalités et des intrants utilisés sur la mine Pinpin	91
Tableau 23 : Variables sélectionnées pour l'étude sur la mine Pinpin.....	92
Tableau 24 : Tableau descriptif des différentes modalités testées sur la Mine de Rouvray..	95
Tableau 25 : Variables sélectionnées pour pour l'étude sur la mine de Rouvray	96
Tableau 26 : Descriptif des différentes modalités testées sur la mine Paagoumène Crête 2	98
Tableau 27 : Variables sélectionnées pour l'étude sur la mine Paagoumène Crête 2.....	98
Tableau 28 : Variables déterminant les clusters.	107
Tableau 29 : Liste des modalités correspondant à chacun des 3 clusters produits par la Classification Hiérarchique. Le détail des appellations des sous-zones est donné dans « Matériels et méthodes	109
Tableau 30 : Variables explicatives sélectionnées pour l'ACP globale :.....	111

Tableau 31 : Variables sélectionnées pour le Cluster 1	113
Tableau 32 : Variables sélectionnées pour le cluster 2.....	117
Tableau 33 : Variables sélectionnées pour le cluster 3.....	121
Tableau 34 : Caractéristiques physico-chimiques principales des sols analysés	140
Tableau 35 : Contenu en métaux totaux et extractibles des sols analysés.	142
Tableau 36 : importance des symbioses mycorhiziennes ; intensité de mycorhization des racines des espèces ciblées et abondance des spores dans les sols correspondants	143
Tableau 37 : Espèces apparues sur les modalités avec topsoil.	194
Tableau 38 : Espèces apparues trouvées sur les modalités sans topsoil.....	195
Tableau 39 : Nombre d'espèces plantées, d'espèces plantées retrouvées dans les relevés, d'espèces composant les recrûs et nombre d'espèces composant les recrûs communes aux espèces plantées (les lignes en grisées sont les modalités ayant reçues du topsoil).	195
Tableau 40 : Espèces utilisées retrouvées uniquement sur chacune des modalités sur Camps des Sapins.	204
Tableau 41 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités sur Camps des Sapins.	204
Tableau 42 : Nombre d'espèces plantées et retrouvées sur chacune des modalités sur Camps des Sapins	204
Tableau 43 : Espèces plantées non retrouvées sur l'ensemble des modalités sur Camps des Sapins.	204
Tableau 44 : Nombre d'espèces apparues utilisées et plantées pour chacune des modalités de la Mine A1.	208
Tableau 45 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités de la Mine A1.....	208
Tableau 46 : Espèces utilisées retrouvées uniquement sur chacune des modalités de la Mine A1.	208
Tableau 47 : Nombre d'espèces apparues (absente du mélange d'origine), utilisées retrouvées (issues du mélange) et semées (composant le mélange) pour chacune des modalités et sur la totalité de la verse BN4-Goro.....	212
Tableau 48 : Espèces présentes dans le mélange de base mais non retrouvées dans les relevés sur verse BN4-Goro	212
Tableau 49 : Espèces utilisées dans le mélange retrouvées uniquement sur chacune des modalités sur verse BN4-Goro	212
Tableau 50 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités sur verse BN4-Goro.....	212
Tableau 51 : Nombre d'espèces apparues, utilisées et plantées pour chacune des modalités pour l'étude de l'effet intrant sur le col de l'antenne	216
Tableau 52 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités pour l'étude de l'effet intrant sur le col de l'antenne	216
Tableau 53 : Nombre d'espèces apparues utilisées et plantées pour chacune des modalités utilisées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7	220
Tableau 54 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités utilisées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7	220

Tableau 55 : Nombre d'espèces apparues sur chacune des modalités testées sur Tontouta Vulcain	224
Tableau 56 : Espèces végétales retrouvées uniquement sur les différentes modalités testées sur Tontouta Vulcain	224
Tableau 57 : Résultats MANOVA sur l'effet du substrat, de la technique, de l'amendement et de l'interaction des 3 sur les différentes variables sélectionnées	225
Tableau 58 : Nombre d'espèces apparues (absente du mélange d'origine), utilisées retrouvées (issues du mélange) et semées (composant le mélange) pour chacune des modalités et sur la totalité de la zone expérimentale sur la mine Pinpin.	229
Tableau 59 : Espèces apparues retrouvées (absente du mélange d'origine) uniquement sur chacune des modalités testées sur la mine Pinpin	229
Tableau 60: Liste des espèces présentes dans le mélange de base mais non retrouvées dans les relevés effectués sur la mine Pinpin	229
Tableau 61 : Nombre d'espèces apparues utilisées et plantées pour chacune des modalités testées sur la mine De Rouvray.....	233
Tableau 62 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités testées sur la mine De Rouvray.....	233
Tableau 63 : Nombre d'espèces apparues utilisées et plantées pour chacune des modalités testées sur Paagoumène Crête 2.....	237
Tableau 64 : Espèces semées non retrouvées sur l'ensemble des modalités testées sur Paagoumène Crête 2	237
Tableau 65 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités testées sur Paagoumène Crête 2	237
Tableau 66 : Liste des espèces utilisées ou apparues en fonction de leur affinité avec le type de substrat	239
Tableau 67 : Description des variables caractérisant les 3 clusters issus de l'AFDM réalisée à partir de 23 variables.....	241
Tableau 68 : Tableau de composition des clusters issus de l'AFDM réalisée à partir de 23 variables.....	242

LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

ACM	Analyse des Correspondances Multiples
ACP	Analyse en Composantes Principales
AFDM	Analyse Factorielle des Données Mixtes
AMF	Champignons mycorhiziens à arbuscules (pour Arbuscular Mycorrhizal
ANR	Agence Nationale de la recherche
BDD	Base de Données
CDS	Mine de Camps Des Sapins (centre minier de Thio – SLN)
CNRT	Centre National de Recherche Technologique Nickel et son Environnement
DDR	Direction du Développement Rural de la province Sud
DENV	Direction de l'ENVironnement de la province Sud
DIMENC	Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de la Nouvelle-Calédonie
IAC	Institut Agronomique néo-Calédonien
KNS	Koniambo Nickel Sas
SMGM	Société Minière Georges Montagnat
SMT	Société des Mines de la Tontouta
STEP	Station d'Épuration
UNC	Université de la Nouvelle Calédonie

1. INTRODUCTION

L'exploitation du nickel est une ressource économique majeure en Nouvelle-Calédonie. Cependant, elle nécessite un décapage total du sol, avec élimination de la flore et la faune qui s'y développent. Une partie des écosystèmes ultramafiques (ou miniers), d'une richesse exceptionnelle, subissent ainsi une dégradation totale, très difficile à réparer. Afin de laisser aux générations futures les mêmes paysages et les services écosystémiques correspondants, il apparaît de plus en plus évident qu'un effort considérable doit être consenti pour restaurer correctement les terrains dégradés, avec l'objectif de produire des écosystèmes si possible similaires à ceux supprimés, ou du moins stables sur le très long terme.

Les premiers essais de revégétalisation ont été réalisés, en Nouvelle-Calédonie, dans les années 1970 et 1980. On utilisait alors diverses espèces exotiques avec des résultats peu satisfaisants. Puis des essais utilisant le gaïac (*Acacia spirorbis*) et le bois de fer (*Casuarina Collina*) ont été réalisés, avec l'inconvénient de la mise en place de formations monospécifiques. Il est bien connu que les plantations mono-spécifiques ou pauvres en espèces, sont fragiles sur le long terme, car elles résistent beaucoup moins aux variations du milieu que les plantations comportant de nombreuses espèces. Les observations sur le terrain ont montré en effet plusieurs cas de mortalité brutale.

A partir des années 1990, différents travaux ont montré l'intérêt de l'utilisation d'espèces indigènes ou endémiques (Jaffré et Rigault 1991a, b ; Jaffré et Pelletier 1992 ; Jaffré et al. 1993 ; Luçon et al. 1997 ; Luçon 2009). De nombreuses études sur l'optimisation des techniques, ainsi que l'utilisation de mélanges d'espèces natives ont par la suite été menées (Sarrailh 2001 ; McCoy et al. 2002).

C'est pourquoi, la restauration des milieux miniers dégradés s'est orienté ensuite vers une restauration écologique, seule capable d'assurer une évolution vers un équilibre durable à très long terme¹. La question de savoir si l'équilibre qui s'installera sera ou non très similaire à l'état initial du milieu avant exploitation, n'est pas essentielle aujourd'hui. Par contre, l'ancienneté de certains terrains revegetalisés montre que la plupart des espèces endémiques utilisées pour la restauration survivent des dizaines d'années après revégétalisation et il n'y a aucune raison de penser qu'un milieu restauré avec diverses espèces puisse se dégrader brutalement après plus de 25 ans de développement.

Il importe de définir d'abord ce que nous appelons restauration écologique et la différence avec la notion de revégétalisation. La restauration écologique est un concept qui a commencé à se développer dans le monde à la fin des années 1970 (Bradshaw 1983) et dont l'objectif est de recréer un écosystème en équilibre, idéalement similaire à l'écosystème

¹ La restauration des milieux ultramafiques doit en effet viser le très long terme, car les écosystèmes ultramafiques existent depuis des dizaines de millions d'années. Une revégétalisation qui ne permettrait pas leur pérennité, impliquerait beaucoup d'investissement sur les plans financier et humain, pour un résultat n'assurant pas la réparation des services écosystémiques de ces milieux pour les besoins des générations futures.

initial, sinon se rapprochant autant que possible des caractéristiques de celui-ci, et ceci afin d'assurer la pérennité sur le très long terme du milieu concerné (Van Diggelen et al. 2001; Young et al. 2005; SERA 2015 ; pour le détail voir la synthèse bibliographique de Amir et al. (2016), réalisée dans le cadre de ce projet). En ce qui concerne les maquis miniers néo-calédoniens, la revégétalisation est uniquement un moyen d'initier une évolution vers cette restauration écologique, qui devrait alors pouvoir se réaliser par complexification progressive, sur un certain nombre d'années. La période de temps est nécessairement longue pour ces maquis du fait de la lenteur de croissance des espèces végétales et, plus généralement, de la dynamique d'évolution lente de ces milieux peu fertiles.

Après une quarantaine d'années d'expérience de la revégétalisation des terrains miniers dégradés en Nouvelle-Calédonie, on peut aisément constater que le chemin parcouru en termes de maîtrise de la restauration écologique est important : plus de 100 espèces végétales, essentiellement endémiques, maîtrisées en pépinière et une amélioration nette de notre savoir sur les graines, leur conservation et leurs dormances (Fogliani et al. 2004 ; L'Huillier et al. 2010 ; Zongo 2010 ; Wulff et al. 2012 ; Villegente 2013 ; Zongo et al. 2016). Les topsoils et leurs propriétés sont de plus en plus connus (Amir et al. 2014 ; Bordez 2015) et leur gestion bien maîtrisée (Bordez et al. 2016). Les moyens d'améliorer la fertilité des substrats des terrains dégradés se sont diversifiés et affinés, et la microbiologie de ces sols, notamment des symbiotes majoritaires, a atteint le stade de l'application sur terrain (Amir et Ducouso 2010 ; Amir et al. 2014). Par ailleurs, de nombreux travaux et essais de revégétalisation sur le terrain, visant la restauration écologique, utilisant diverses techniques et testant divers résultats de recherche, ont été réalisés depuis plus de 30 ans. Malheureusement, les résultats qui découlent de la majorité de ces travaux sont dispersés et ne sont pas connus ou très peu. De plus, les essais n'ont pas été suivis sur un temps suffisamment long pour en apprécier l'intérêt et l'efficacité. A part la synthèse apportée par l'ouvrage désormais incontournable de L'Huillier et al. (2010), un bilan synthétique pratique sur la revégétalisation des terrains miniers est devenu nécessaire pour clairement déterminer l'état des connaissances et savoir comment orienter les recherches à venir.

Suite à ce constat partagé par tous les acteurs intervenant dans ce domaine, le CNRT « Nickel et son environnement » a publié un appel d'offre pour effectuer un bilan des opérations et essais réalisés ces dernières décennies en revégétalisation orientée vers la restauration écologique.

Un consortium constitué de deux équipes de recherche de l'Université de la Nouvelle-Calédonie (UNC) et de l'Institut Agronomique néoCalédonien (IAC), ainsi que de deux entreprises privées travaillant dans ce domaine, SIRAS Pacifique et Bota Environnement, s'est constitué pour mener cette étude sur deux ans, de 2015 à 2017.

Le projet RECOSYNTH propose une approche à la fois analytique et synthétique visant à explorer de façon optimale le maximum de données sur les différents programmes de revégétalisation orientés vers la restauration écologique en Nouvelle-Calédonie, depuis une trentaine d'années. Pour cela, il est important de cibler un nombre suffisant de sites revégétalisés pour disposer d'un panel représentatif de la diversité des cas, à la fois sur les plans géographique, topographique, climatique, pédologique, technique et en termes d'années de remise en état.

L'approche générale consiste, dans un premier temps, à collecter toutes les données existantes sur plusieurs dizaines de sites revégétalisés, puis à retourner sur ces terrains pour y décrire, avec de nombreux paramètres, l'état actuel du site et de son évolution. L'ensemble des données est alors intégré dans une base de données spécialement dédiée, avant d'être traité par diverses méthodes statistiques, complétées par des comparaisons directes. En effet, cette étude comporte une difficulté majeure, identifiée dès l'origine du projet : la diversité des essais et travaux, réalisés à différentes époques, dispersés sur tout le territoire, à différentes altitudes, sur différents terrains, dans diverses conditions climatiques

et environnementales, avec des approches très différentes et une qualité variable des données initiales rend l'interprétation des résultats extrêmement complexe.

Les objectifs du projet ont donc été définis comme suit : i) mettre en évidence le maximum de techniques pratiques et de conditions favorables à une bonne restauration écologique de ces milieux et en déduire des recommandations pour optimiser les possibilités d'évolution vers un état de maquis minier équilibré ; ii) mettre au point un ou des indicateurs de réussite de la restauration écologique basés sur les résultats obtenus ; iii) faire des propositions pour les recherches qui doivent être faites dans les années à venir dans ce domaine.

2. DÉMARCHE GÉNÉRALE, ORGANISATION ET MÉTHODOLOGIES ADOPTÉES

2.1. DÉMARCHE GÉNÉRALE ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Le projet proposé a été guidé par trois orientations majeures :

- le regroupement des connaissances sur la restauration écologique des milieux miniers et leur diffusion auprès de l'ensemble des acteurs concernés ;
- une synthèse des travaux de revégétalisation réalisés dans une optique de restauration écologique en Nouvelle-Calédonie depuis trois décennies et leur exploitation pour orienter les recommandations dans ce domaine ;
- le développement de moyens d'évaluation et de suivi des actions de restauration écologique.

Afin de répondre à ces objectifs, cinq tâches ont été proposées :

- **Tâche 1** : Première analyse des actions de revégétalisation visant à sélectionner les sites d'étude ;
- **Tâche 2** : Construction d'une grille d'évaluation de l'état des terrains revégétalisés à étudier ;
- **Tâche 3** : Acquisition des données sur le terrain pour les 35 sites sélectionnés, par renseignement de la grille d'évaluation ;
- **Tâche 4** : Analyse statistique et interprétation des résultats obtenus ;
- **Tâche 5** : i) Coordination de l'ensemble du projet.
ii) Synthèse des résultats et valorisation des connaissances dégagées, pour l'ensemble des acteurs de la revégétalisation du territoire.

2.2. DESCRIPTION DES ÉTAPES DU PROJET

Tâche 1 : Première analyse des actions de revégétalisation

Cette étape a consisté à collecter les informations disponibles sur l'ensemble des sites candidats, en vérifiant un certain nombre de paramètres, notamment leur accessibilité et la disponibilité des informations concernant la mise en œuvre des travaux de revégétalisation, afin de sélectionner les sites d'étude.

Après plusieurs phases de sélection (voir Partie 2.3. ci-après), le nombre de zones retenues est passé de 381 à 35.

Tâche 2 : Construction d'une grille d'évaluation (production de la « fiche terrain »)

Une grille d'analyse interdisciplinaire, faisant intervenir diverses approches (biologie, écophysiologie, biologie du sol, statistiques, etc.), a été mise au point, parallèlement à la sélection des sites candidats, par catégorisation et rationalisation des données disponibles pour chacun de ces sites.

Cette grille a permis d'aboutir à la création à la fois de la « fiche terrain » et de la Base de Données RECOSYNTH (BDD), en collaboration avec une entreprise spécialisée, MELANOPUS (voir le Partie 2.4 ci-après).

Tâche 3 : Acquisition des données de terrain

Cette tâche a consisté en l'acquisition des données de terrain, selon la technique des quadrats (*cf.* paragraphe 3. pour les détails), sur les 35 sites retenus à l'issue de la tâche 1. Tous les sites ont été évalués selon les critères et paramètres de la grille d'analyse établis en tâche 2 et selon une fiche mémo (voir Partie 2.7) rédigée pour homogénéiser la méthodologie des relevés.

Toutes les données sont intégrées dans la BDD.

Il convient cependant de noter que les données existantes ont été difficiles à acquérir et très hétérogènes selon les sites, avec un nombre important de facteurs variant selon les cas. Le traitement et l'évaluation des données ont donc été particulièrement délicats et complexes.

Les équipes de travail ont été confrontées, durant toute la phase de collecte des informations, à un déficit d'archivage des protocoles de mise en œuvre et de suivis des travaux de revégétalisation. Ces difficultés, en plus de l'hétérogénéité naturelle des différentes zones, a renforcé notre décision d'associer au projet un statisticien spécialisé, afin d'élaborer avec lui les meilleurs moyens pour exploiter et interpréter l'ensemble des résultats.

Tâche 4 : Analyse et synthèse des résultats

Une fois la collecte et la saisie des données effectuée, leur analyse statistique a été réalisée *via* diverses techniques et jusqu'à arriver à des résultats cohérents.

Ainsi, une typologie définissant des groupes d'affinité des sous-zones a été créée ; puis une comparaison statistique, notamment grâce à des ACP, des diverses sous-zones au sein de chaque groupe d'affinité a permis de former des clusters et sous-clusters. Une modélisation statistique a été ensuite réalisée pour faire ressortir un indicateur global de réussite.

Tâche 5 : Coordination et rédaction des livrables

Cette étape a consisté tout d'abord en la coordination et la structuration des démarches de récupération des données existantes et des données à compléter ; puis en la coordination des travaux d'analyses des résultats obtenus lors de la tâche 4, ainsi qu'en leur synthèse.

Une seconde partie de cette tâche a consisté à valoriser les informations et les connaissances dégagées *via* divers livrables, destinés à l'ensemble des acteurs de la revégétalisation en Nouvelle-Calédonie.

La coordination technique du projet a été assurée par le VSC, épaulé par les représentants de l'UNC et de l'IAC. Cette tâche a nécessité, tout au long du projet, des contacts constants, ainsi que de nombreuses réunions entre les chercheurs et les deux entreprises privées, afin de suivre très régulièrement le travail effectué.

2.3. PRÉSÉLECTION DES SITES ET ÉTABLISSEMENT DE LA LISTE DES ZONES À ÉTUDIER EN DÉTAIL

2.3.1. DÉMARCHE DE PRÉSÉLECTION DES SITES CANDIDATS

2.3.1.1. Définitions des mots clefs

Avant d'entamer cette sélection des sites, il est apparu important de définir ensemble les différents termes utilisés, au cours du projet, afin d'éviter les confusions, notamment lorsqu'il s'agira de réaliser les relevés sur le terrain. Ainsi les termes « mine », « site », « zone », « sous-zone », « modalité », « quadrat » ont été précisés afin que tous les membres du projet parlent des mêmes choses et qu'il y ait homogénéité de leur usage au sein de la base de données.

Les termes « site » et « zone », notamment sont délicats : il a été acté que « site » désignerait une localité géographique comportant diverses surfaces revégétalisées, parfois à des époques différentes ou dans des conditions bien différentes (altitudes, pentes, etc.) ; tandis que le terme « zone » désignerait une surface revégétalisée à une même époque et dans des conditions globalement similaires (une zone est donc une sous-unité d'un site). Une zone peut comporter une ou plusieurs sous-zones (parfois revégétalisées à des périodes différentes). Les sous-zones peuvent elles-mêmes comporter une ou plusieurs modalités correspondant à des traitements différents (substrats, techniques, amendements différents, etc.) réalisés dans les mêmes conditions, à la même période, en vue de les comparer. Dans la très grande majorité des cas étudiés ici les termes modalités et sous-zones coïncident du fait que les sous-zones comportent une seule modalité. Pour chaque modalité, plusieurs relevés ou quadrats correspondant à des répétitions d'un même traitement, sont réalisés sur le terrain, afin de pouvoir effectuer les analyses statistiques sur les données acquises.

2.3.1.2. Démarche de présélection

Après une première réunion (Annexe 8.1) destinée à cadrer le lancement de l'étude, les deux entreprises Bota Environnement et SIRAS Pacifique, en collaboration avec les partenaires scientifiques, ont été chargées de collecter les informations disponibles sur l'ensemble des sites candidats, en listant :

- les sites correspondant à des expérimentations de restauration écologique ;
- les sites correspondant à des travaux de revégétalisation commandés par les entreprises minières ;
- les informations complémentaires par la réalisation d'enquêtes auprès des institutions (DIMENC, DENV, DDR, Collectivités...).

Ainsi, les sites présélectionnés correspondent :

- aux expérimentations répertoriées dans l'ouvrage "Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie" (L'Huillier et al. 2010) ;
- à ceux appartenant à des entreprises minières, telles que la SLN, NMC, SMGM, etc., pour lesquelles le bureau d'études SIRAS Pacifique a travaillé et dont les informations ont pu être rassemblées ;
- à ceux appartenant aux autres entreprises minières (SMT, VALE, KNS) pour lesquelles la société Bota Environnement avait déjà travaillé ;
- enfin, à ceux pour lesquels des institutions telles que la DIMENC, la DENV, la DDR, possédaient des données. Les enquêtes complémentaires auprès de ces collectivités ont été menées par l'équipe de Bota Environnement, afin de compléter le lot de sites candidats.

Des informations ont donc pu être récupérées sur 82 sites dispersés sur la grande terre, comprenant 381 zones (Annexe 8.2), où des opérations de revégétalisation ont été réalisées. Ces 381 zones correspondent à l'ensemble des zones potentiellement utiles à étudier dans la perspective de répondre aux objectifs du projet.

2.3.2. PREMIÈRE SÉLECTION: DE 381 À 63 ZONES

Un premier tri a été effectué en se basant sur des critères simples et indispensables pour la réalisation de l'étude :

- accessibilité de la zone et géolocalisation correcte (par exemple : la zone Monastir sur Canala et la verse Fredo sur la mine de Poum ont dû être supprimées de la liste car leurs accès étaient bloqués, durant le projet) ;
- existence et état des surfaces revégétalisées qui ne doivent pas présenter de dégradations fortes, ou avoir été réutilisées pour d'autres objectifs (par exemple : les zones Kou1 et Kou2 sur Kouaoua ont été éliminées car elles n'existent plus, ainsi que certaines des zones de Karembé, encore existantes mais qui vont être impactées par le nouveau plan d'exploitation de la mine).
- disponibilité d'un minimum de données concernant la mise en place des essais ou des travaux (technique employée, utilisation de topsoil, type de fertilisation, espèces semées ou plantées...) pour les interprétations ;
- faisabilité des relevés sur le terrain (élimination des zones avec pente excessive, terrain peu accessible ou glissant, etc.).

Cette première sélection a abouti aux choix de 61 zones éligibles pour ce projet, additionnées de 2 zones étudiées dans le cadre du projet CNRT BIOINDIC. La Figure 1 montre la répartition de ces zones sur l'ensemble de la grande terre.

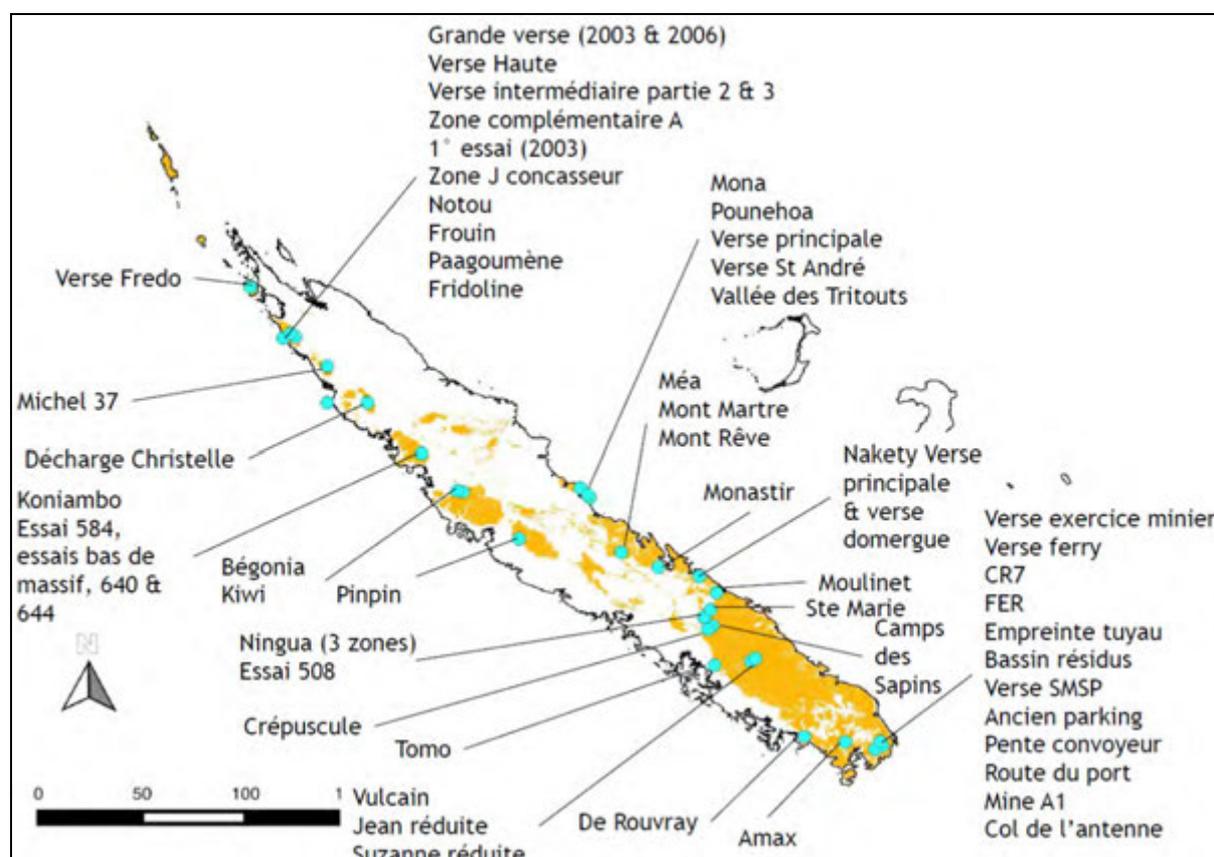


Figure 1 : Carte de la Nouvelle-Calédonie montrant la répartition des zones présélectionnées sur l'ensemble de la grande terre.

Ces 63 zones sont représentatives de la diversité des cas des travaux de revégétalisation sur plusieurs plans :

- en termes d'ancienneté de l'opération de revégétalisation, elles se situent entre 1978 et 2013,
- elles comportent différents types de techniques (plantations, semis hydraulique ou manuel, présence de géo-filets ou de fascines),
- elles comportent différents types de substrats, d'amendements minéraux ou organiques, etc...

Quelques détails sur ces aspects sont donnés en Annexe 8.3 (diaporama effectué dans le cadre du premier comité de pilotage du projet).

2.3.3. DEUXIÈME SÉLECTION : DE 63 À 35 ZONES

2.3.3.1. Choix des paramètres utilisés pour la sélection finale de 35 zones

Pour affiner le choix, les deux bureaux d'études se sont réparti le travail de repérage sur le terrain, pour les 61 sites présélectionnés hors zones du projet Bioindic (gérées dans le cadre de la thèse de Y. Ititiaty avec l'appui de S. Gensous). Ces missions sur le terrain ont permis de localiser précisément les zones (coordonnées GPS), de s'assurer des modalités d'autorisation d'accès aux sites, de repérer les pistes d'accès, de prendre des photos des zones revégétalisées. En réunion de travail, cette première prospection a permis de discuter et d'argumenter sur la sélection des zones et ainsi d'obtenir une pré-liste de sites éligibles pour ce projet.

Après la phase terrain sur les 61 zones, et afin de poursuivre la sélection cohérente des zones à étudier, un travail de récupération et de vérification de l'existence d'informations sur ces 61 zones a été effectué par les deux entreprises partenaires. Les données récoltées ont été intégrées à la BDD RECOSYNTH et concernaient notamment les points suivants :

- Revégétalisation récente et ancienne (jusqu'à 1978) ;
- Sites à différentes altitudes ;
- Pente forte ou faible ;
- Variation des techniques de revégétalisation : ensemencement hydraulique ou manuel à sec ; plantation ;
- Variations du travail du sol ;
- Utilisation de techniques de génie biologique contre l'érosion (géofilet, fascines, etc.) ;
- Utilisation ou non du topsoil ;
- Utilisation de différents traitements de fertilisation minérale ;
- Utilisation d'amendements organiques ;
- Utilisation d'un plus ou moins grand nombre d'espèces végétales ;
- Présence d'espèces fixatrices d'azote (genres *Gymnostoma*, *Casuarina*, *Serianthes*, *Storckia*, *Acacia*, etc.) ;
- Présence du Gaïac (effet bloquant ou pas à vérifier) ;
- Présence de graminées en mélange avec des espèces natives ;
- Apport ou stimulation des mycorhizes (cas rares).

A partir de la diversité et de la disponibilité de ces informations et des résultats des missions terrain de présélection, la sélection finale des sites a été établie. La méthodologie de sélection a consisté à choisir des sites présentant des variations de pratiques et de situation, tout en permettant d'avoir suffisamment de zones représentatives de chacune de ces pratiques afin d'aboutir à des traitements statistiques fiables et robustes.

2.3.3.2. Sélection finale des 35 zones

Une sortie commune (entreprises du projet, chercheurs, directrice du CNRT) sur plusieurs sites du sud (VALE NC) a été effectuée le 15/12/2015, afin de se rendre compte de la validité de la fiche de relevé terrain élaborée et de mieux maîtriser les nombreux paramètres à prendre en compte pour la sélection définitive des zones.

La sélection finale des 35 zones à étudier (Tableau 1) a été réalisée en présence de tous les membres du projet. Elle a fait l'objet d'un travail minutieux de comparaison sur la base des paramètres à prendre en compte listés précédemment, avec comme objectif de choisir des zones revégétalisées à la fois bien diversifiées (représentatives des différents cas, en termes d'altitude, d'ancienneté, de substrats, de techniques utilisées, de modalités testées, de

diversité d'espèces végétales, etc.) et présentant un certain nombre de répétition de chaque cas, afin de permettre une comparaison statistiquement correcte.

Les Figure 2 et Figure 3 montrent la répartition sur la Grande Terre et l'aspect visuel des 35 zones sélectionnées pour une analyse détaillée, permettant de répondre aux objectifs de cette étude.

Le Tableau 1 liste ces zones sélectionnées ainsi que les sous-zones étudiées et quelques-unes de leurs caractéristiques. Afin de simplifier le traitement, notamment mathématiques, des données, nous avons traité directement le niveau sous-zone plutôt que le niveau zone. Cette simplification nous permet de ne pas traiter séparément les zones qui contiennent une seule modalité, de celles qui en contiennent plusieurs. Ainsi, les modalités sont considérées ici comme étant des sous-zones ; d'où le fait que l'on obtienne au final 67 modalités à comparer pour 35 zones sélectionnées.

Une fois la sélection finale réalisée, les paramètres techniques et environnementaux, obtenus grâce aux travaux d'acquisition de données sur le terrain des 35 zones sélectionnés doivent permettre de les regrouper selon une typologie basée sur des paramètres techniques (espèces végétales, méthode de végétalisation utilisée, ...) et environnementaux (localisation, altitude, substrat, ...). Ces regroupements ont été réalisés par des méthodes statistiques qui sont développées dans la partie 2.10.

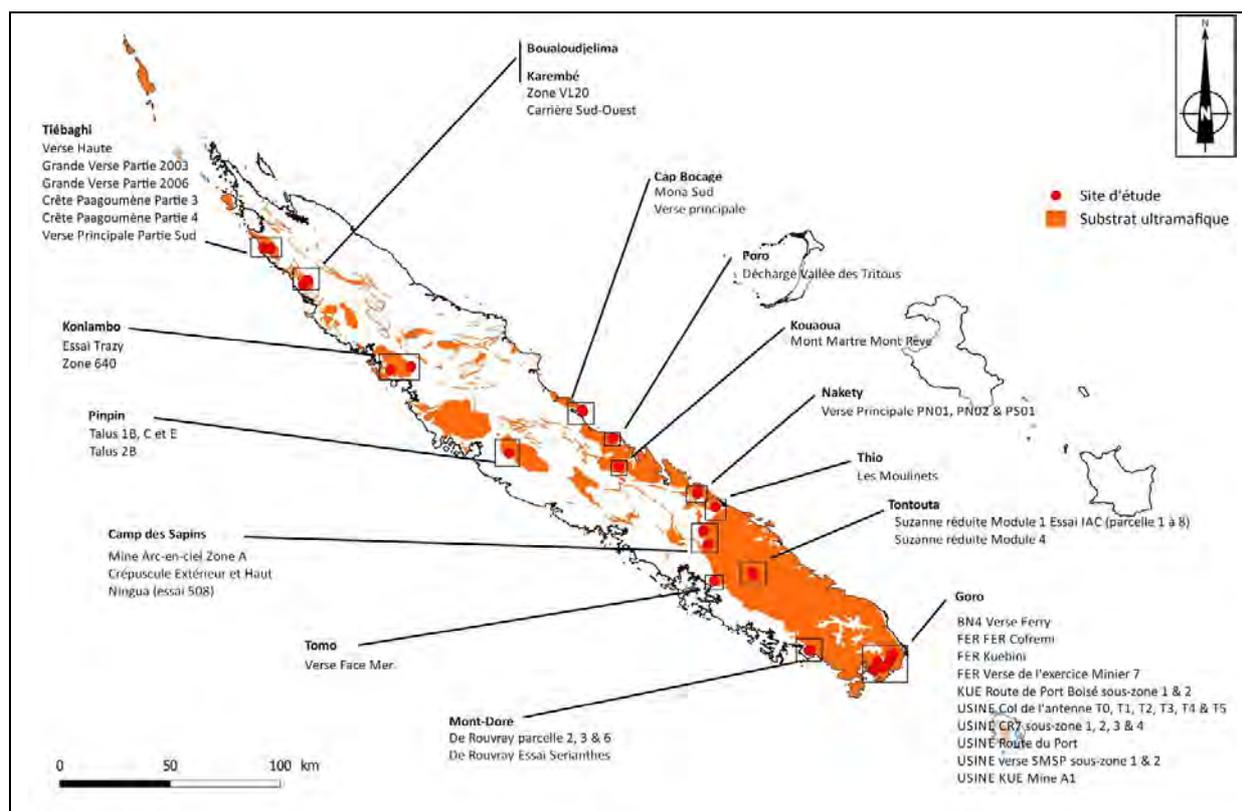


Figure 2 : Carte montrant la répartition sur la grande terre des 35 zones sélectionnées.

Bouloudjelima



Camps des Sapins



Cap Bocage



Camps des Sapins



Goro



Koniambo



Goro



Koniambo



Figure 3 : Cartographie des différents sites montrant les zones/sous-zones étudiées



Figure 4 (suite) : Cartographie des différents sites montrant les zones/sous-zones étudiées

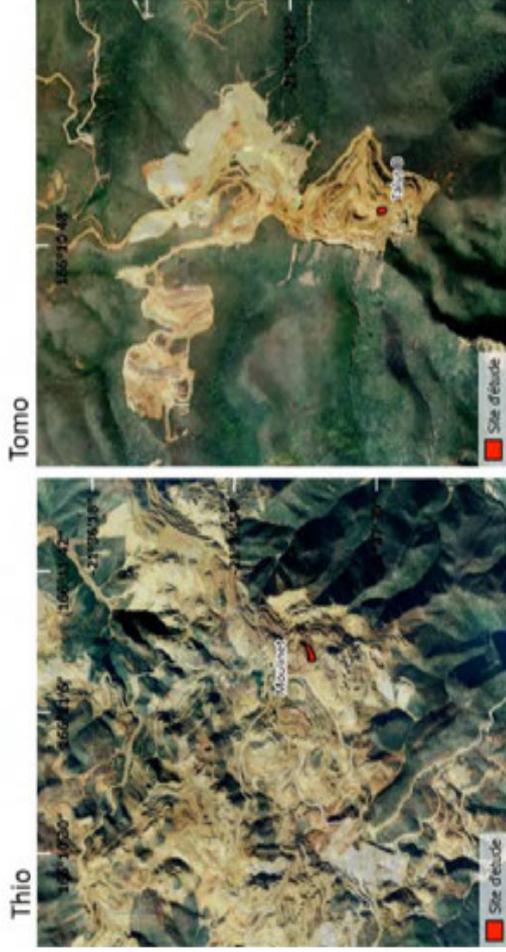


Figure 3 (suite) : Cartographie des différents sites montrant les zones/sous-zones étudiées
 Tableau 1 : Liste des 67 modalités (sous-zones), avec les années de revégétalisation, leur situation et leurs propriétaires

(les sous-zones correspondent ici aux modalités, d'où le fait que pour chacune des 35 zones, il y a parfois plusieurs sous-zones) terrain

ID-SZONE	Date	Mine	Site	Zone	Sous-zone et modalité	Propriétaire
CBG_MONA_MS_SZ01	2000	Cap Bocage	Mona	Mona sud	sous-zone 1 (avec topsoil)	Ballande
CBG_MONA_MS_SZ02	2000	Cap Bocage	Mona	Mona sud	sous-zone2 (sans topsoil)	Ballande
CBG_RED_VP_SZ01	2009	Cap Bocage	Cap Bocage Réduite	Verse principale	sous-zone 1 (avec topsoil)	Ballande
CBG_RED_VP_SZ02	2009	Cap Bocage	Cap Bocage Réduite	Verse principale	sous-zone2 (sans topsoil)	Ballande
NKY_LU_VD_SZ01	2003	Nakety	Lucienne	Verse domergue	sous-zone 1	Ballande
NKY_LU_VP_PN01	2009	Nakety	Lucienne	Verse principale	PN01 (avec topsoil)	Ballande
NKY_LU_VP_PN02	2009	Nakety	Lucienne	Verse principale	PN02 (sans topsoil)	Ballande
NKY_LU_VP_PS01	2010	Nakety	Lucienne	Verse principale	PS01	Ballande
ID-SZONE	Date	Mine	Site	Zone	Sous-zone et modalité	Propriétaire
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_2	1999	De Rouvray	De Rouvray	Essai 567	Parcelle 2	Indépendant
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3	1999	De Rouvray	De Rouvray	Essai 567	Parcelle 3	Indépendant
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_6	1999	De Rouvray	De Rouvray	Essai 567	Parcelle 6	Indépendant
MDORE_ROUV_Zser_SZ01	1993	De Rouvray	De Rouvray	Essai Serianthes	sous-zone 1	Indépendant
ID-SZONE	Date	Mine	Site	Zone	Sous-zone et modalité	Propriétaire
KNBO_S001_640_SZ01	2011	Koniambo	Koniambo	640_CON_OLC_PI	sous-zone 1	KNS
KNBO_S002_TRAZ_SZ01	2012	Koniambo	Koniambo	Trazy - Haut Massif Essais IAC	sous-zone 1	KNS
ID-SZONE	Date	Mine	Site	Zone	Sous-zone et modalité	Propriétaire
PP_AC2_T01_SZ-B	2013	Pinpin	verse AC2	talus 1	sous-zone B	NMC
PP_AC2_T01_SZ-C	2013	Pinpin	verse AC2	talus 1	sous-zone C	NMC
PP_AC2_T01_SZ-E	2013	Pinpin	verse AC2	talus 1	sous-zone E	NMC
PP_AC2_T02_SZ-B	2013	Pinpin	verse AC2	talus 2	sous-zone B	NMC

ID-SZONE	Date	Mine	Site	Zone	Sous-zone et modalité	Propriétaire
BOUA_KG_DS_SZ01	1991	Boulouljelima	Kaala-Gomen	Boulouljelima - Décharge Sud	sous-zone 1	SLN
CDS_NING_AEC_ZA1	1994	Camp des sapins	Ningua	Ningua - Concession Arc en ciel	Zone A	SLN
CDS_NING_CREP_EXT	1992	Camp des sapins	Ningua	Crépuscule	Extérieur	SLN
CDS_NING_CREP_HT	1992	Camp des sapins	Ningua	Crépuscule	Haut	SLN
CDS_NING_Z001_E508	1992	Camp des sapins	Ningua	Ningua	Essai 508	SLN
KOUA_MEA_MMMR_SZ01	2008	Kouaoua	Méa	Mont Maître Mont Réve	sous-zone 1	NMC
KRB_M37_Z001_CSO	2004	Karembé	Michel 37	Michel 37	Carrière Sud-Ouest	SLN
KRB_M37_Z001_VL20	2002	Karembé	Michel 37	Michel 37	Verse VL20	SLN
PORO_VDT_DEC_SZ01	2007	Poro	Vallée des Tritouts	Décharge 1	sous-zone 1	SLN
TBGH_S001_CR2P_P3	2009	Tiébaghi	Thiébaghi	Crête 2_Paagoumène	Partie 3	SLN
TBGH_S001_CR2P_P4	2009	Tiébaghi	Thiébaghi	Crête 2_Paagoumène	Partie 4	SLN
TBGH_S001_GV03_SZ01	2003	Tiébaghi	Thiébaghi	Grande verse-tranche 2003	sous-zone 1	SLN
TBGH_S001_GV06_SZ01	2006	Tiébaghi	Thiébaghi	Grande verse - tranche 2006	sous-zone 1	SLN
TBGH_S001_VHTE_SZ01	2003	Tiébaghi	Thiébaghi	Verse haute	sous-zone 1	SLN
TBGH_S001_VP_PS	2012	Tiébaghi	Thiébaghi	Verse principale	Partie Sud	SLN
THIO_MOUL_Z001_SZ01	2008	Thio Plateau	Les Moulinets	Les Moulinets	sous-zone 1	SLN
ID-SZONE	Date	Mine	Site	Zone	Sous-zone et modalité	Propriétaire
TOMO_S001_VFM_SZ01	2010	Tomo	Tomo	Verse face mer	sous-zone 1	SMGM
TONTT_VULC_SRED_MD01_1	2006	Tontouta	Vulcain	Suzanne Réduite	Module 1 traitement 1 (apport de topsoil)	SMGM
TONTT_VULC_SRED_MD01_2	2006	Tontouta	Vulcain	Suzanne Réduite	Module 1 traitement 2 (apport de topsoil et de boue de STEP en épandage)	SMGM
TONTT_VULC_SRED_MD01_3	2006	Tontouta	Vulcain	Suzanne Réduite	Module 1 traitement 3 (plantation avec apport de topsoil)	SMGM
TONTT_VULC_SRED_MD01_4	2006	Tontouta	Vulcain	Suzanne Réduite	Module 1 traitement 4 (plantation avec apport de topsoil et de boue de STEP en épandage)	SMGM
TONTT_VULC_SRED_MD01_5	2006	Tontouta	Vulcain	Suzanne Réduite	Module 1 traitement 5 (apport de boue de STEP en épandage)	SMGM
TONTT_VULC_SRED_MD01_6	2006	Tontouta	Vulcain	Suzanne Réduite	Module 1 traitement 6 (plantation avec apport de boue de STEP en épandage)	SMGM
TONTT_VULC_SRED_MD01_7	2006	Tontouta	Vulcain	Suzanne Réduite	Module 1 traitement 7 (plantation avec apport de topsoil et de boue de STEP en épandage)	SMGM
TONTT_VULC_SRED_MD01_8	2006	Tontouta	Vulcain	Suzanne Réduite	Module 1 traitement 8 (apport de topsoil et d'engrais chimique)	SMGM
TONTT_VULC_SRED_MD04	2011	Tontouta	Vulcain	Suzanne Réduite	Module 4	SMGM

ID-SZONE	Date	Mine	Site	Zone	Sous-zone et modalité	Propriétaire
GORO_BN4_VF_SZ01	2009	Goro	BAIE NORD 4	verse ferry	sous-zone 1 (semis hydraulique avec travail du sol)	VALE NC
GORO_BN4_VF_SZ02	2009	Goro	BAIE NORD 4	verse ferry	sous-zone 2 (semis hydraulique sans travail du sol)	VALE NC
GORO_BN4_VF_SZ03	2009	Goro	BAIE NORD 4	verse ferry	sous-zone 3 (semis manuel avec travail du sol)	VALE NC
GORO_FER_COFR_SZ01	1988	Goro	concession FER	COFREM1	sous-zone 1	VALE NC
GORO_FER_KUEB_SZ01	2002	Goro	concession FER	Kuebini	sous-zone 2	VALE NC
GORO_FER_VEM_VEM7	2008	Goro	concession FER	Verse de l'exercice minier (second passage)	Partie 7	VALE NC
GORO_KUE_RPB_SZ01	2012	Goro	KUE	Route de Port Boisé	sous-zone 1 (sans topsoil)	VALE NC
GORO_KUE_RPB_SZ02	2012	Goro	KUE	Route de Port Boisé	sous-zone 2 (avec topsoil)	VALE NC
GORO_USINE_COLA_T0	2011	Goro	USINE	Col de l'antenne	Traitement témoin	VALE NC
GORO_USINE_COLA_T1	2011	Goro	USINE	Col de l'antenne	Traitement 1 (apport de boue de STEP en trouaison)	VALE NC
GORO_USINE_COLA_T2	2011	Goro	USINE	Col de l'antenne	Traitement 2 (apport de fiente de poule en trouaison)	VALE NC
GORO_USINE_COLA_T3	2011	Goro	USINE	Col de l'antenne	Traitement 3 (apport engrais chimique à diffusion lente)	VALE NC
GORO_USINE_COLA_T4	2011	Goro	USINE	Col de l'antenne	Traitement 4 (apport de boue de STEP en épandage)	VALE NC
GORO_USINE_COLA_T5	2011	Goro	USINE	Col de l'antenne	Traitement 5 (apport de copeaux de bois et de fiente de poule en trouaison)	VALE NC
GORO_USINE_CR7_SZ01	2009	Goro	USINE	Carrière de route CR7	sous-zone 1 (apport engrais chimique à diffusion lente)	VALE NC
GORO_USINE_CR7_SZ02	2009	Goro	USINE	Carrière de route CR7	sous-zone 2 (apport d'acide humique)	VALE NC
GORO_USINE_CR7_SZ03	2009	Goro	USINE	Carrière de route CR7	sous-zone 3 (apport de boue de STEP)	VALE NC
GORO_USINE_CR7_SZ04	2009	Goro	USINE	Carrière de route CR7	sous-zone 4 (Apport de fiente de poule)	VALE NC
GORO_USINE_RDP_SZ01	2009	Goro	USINE	Route du Port	sous-zone 1	VALE NC
GORO_USINE_SMSP_SZ01	2009	Goro	USINE	Verse SMSP	sous-zone 1 (plantation sur plateforme)	VALE NC
GORO_USINE_SMSP_SZ02	2009	Goro	USINE	Verse SMSP	sous-zone 2 (plantation sur talus)	VALE NC
GORO_USINE_SMSP_SZ03	2009	Goro	USINE	Verse SMSP	sous-zone 3 (plantation sur talus)	VALE NC
GORO_USINEKUE_A1_SZ01	2011	Goro	USINE et KUE	Mine A1	sous-zone 1 (plateforme de saprolite)	VALE NC
GORO_USINEKUE_A1_SZ02	2011	Goro	USINE et KUE	Mine A1	sous-zone 2 (talus de latérite)	VALE NC

2.4. CONTRIBUTION DE L'ÉQUIPE DU PROJET À LA MISE EN PLACE DE LA BASE DE DONNÉES

La réalisation d'une base de données (BDD) n'était pas prévue dans le projet initial déposé par l'équipe. A la demande du CNRT, le consortium a accepté de contribuer à sa réalisation, à la fois dans l'intérêt du projet (facilitation de l'intégration, le partage et les analyses de données), mais aussi dans la perspective de son enrichissement au-delà du projet, à partir des futures opérations de restauration prévues sur le territoire. Cette base est prévue pour accueillir tant les données historiques recueillies dans le cadre de ce projet, que les données acquises au cours des sorties de terrain, ainsi que les futures données qui pourront y être intégrées au-delà du projet. Elle pourra aussi servir aux mineurs pour centraliser les futures données des chantiers de revégétalisation, afin d'avoir des données complètes sur leur mise en place.

Un travail régulier avec l'entreprise chargée de sa mise au point a permis d'y intégrer de façon hiérarchisée les nombreux paramètres (données générales et historiques sur les sites, caractéristiques actuelles des terrains) ; plusieurs réajustements ont ensuite été effectués. Les principales difficultés rencontrées pour la création de la BDD ont été la mise en forme des différents champs sous forme de tables cohérentes permettant la définition d'un schéma relationnel et la codification des différentes entités utilisées dans le cadre de ce projet (mine, site, zone, sous-zone,... ; Figure 4). Le but a été d'agencer la BDD d'une façon qui soit la plus logique et opératoire possible et de définir convenablement les différents champs ainsi que leur format, de façon à prévoir au mieux les différents cas de figure que l'on pourrait rencontrer sur le terrain et lors de la récupération des données historiques.

La base de données est organisée de la manière suivante : Mine, Site, Zone et Sous-zone sont des entités géographiques imbriquées. Une Modalité est un traitement (ensemencement ou plantation) réalisé sur une Sous-zone à une date donnée. (Figure 5).

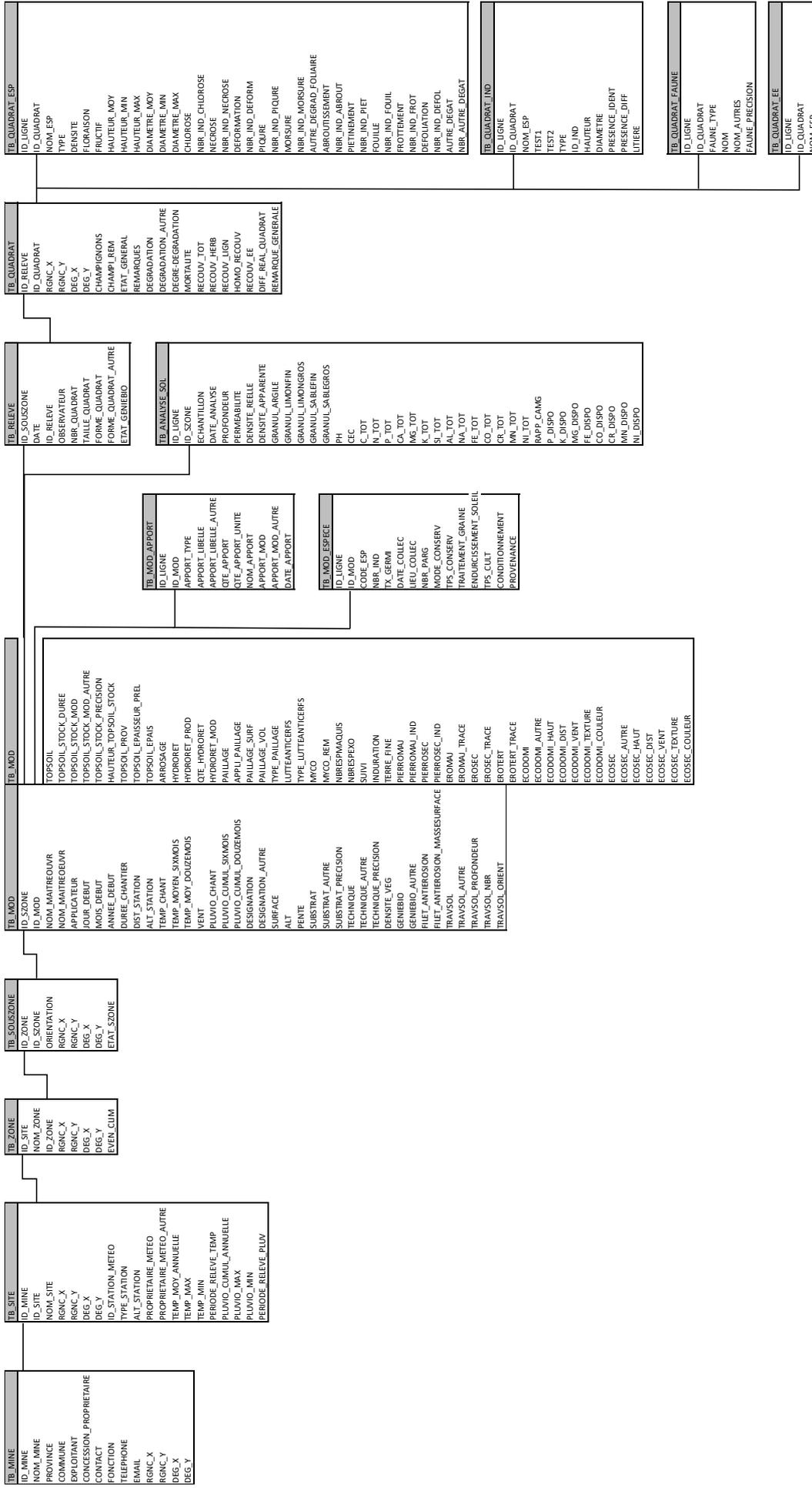
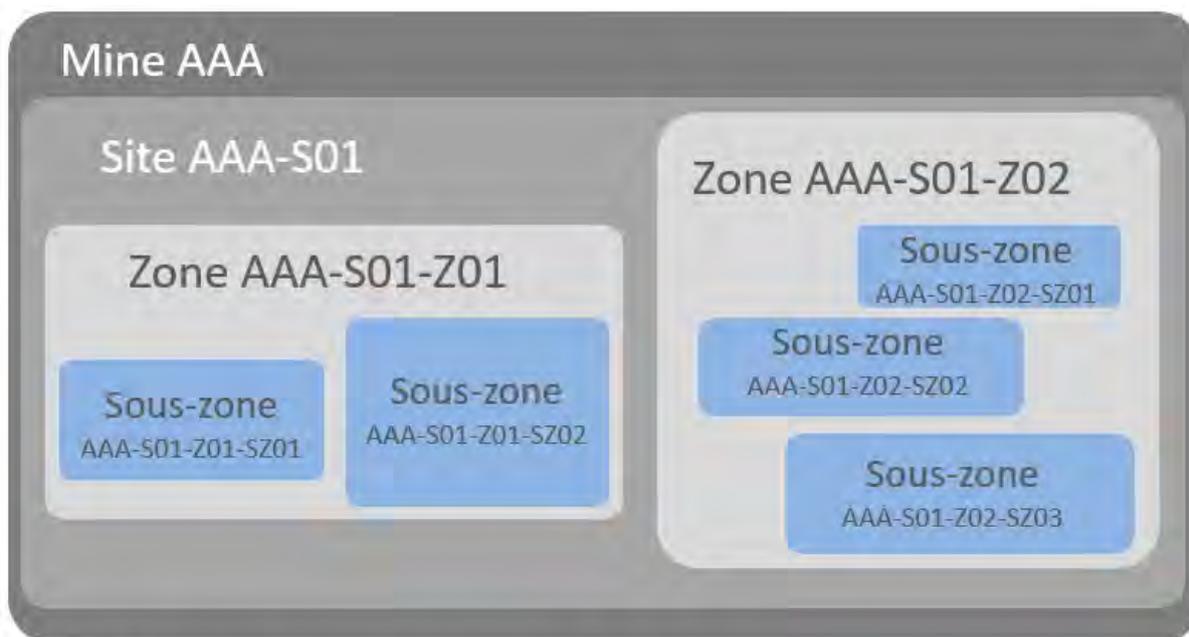


Figure 5 : Schéma conceptuel de la base de données



Cas 1

Il y a eu une seule modalité sur la sous-zone :

Modalité N°AAA-S01-Z01-SZ01-1987

Cas 2

Il y a eu plusieurs modalités sur la sous-zone :

Modalité N°AAA-S01-Z01-SZ02-1985

Modalité N°AAA-S01-Z01-SZ02-1992

Modalité N°AAA-S01-Z01-SZ02-2001

Mine, Site, Zone et Sous-zone sont des entités géographiques imbriquées.

Une Modalité est un traitement (ensemencement ou plantation) réalisé sur une Sous-zone à une date donnée. Il peut y avoir plusieurs modalités effectuées successivement sur une même Sous-zone (cas 2).



Figure 6 : Schéma d'imbrication des différentes entités pour la base de données RECO SYNTH

Il était initialement prévu que ce travail se termine fin mars 2017 (contrat MELANOPUS), mais les difficultés rencontrées ont conduit à un étalement sur plusieurs mois. La réflexion sur les éléments à intégrer à la BDD a finalement nécessité un travail important, notamment 6 réunions au sein du groupe du projet, puis 5 réunions avec l'entreprise MELANOPUS (Annexe 8.1).

Cette base est aujourd'hui fonctionnelle. Elle est accessible en ligne et hébergée par le CNRT à l'adresse : <http://recosynth.cnrt.nc/index.php>.

2.5. TRAVAIL THÉORIQUE PRÉALABLE SUR LES INDICATEURS SUSCEPTIBLES D'ÊTRE UTILISÉS POUR ÉVALUER LA RÉUSSITE

Une réflexion a été menée afin de déterminer comment exprimer au mieux le degré de réussite des opérations de revégétalisation, dans l'optique de la restauration écologique. Ce travail est résumé en Figure 6. Toute opération de revégétalisation qui suit une trajectoire de restauration écologique effective devrait se traduire par 3 niveaux de fonctionnalité :

- Sur le plan de la productivité : une bonne croissance relative et un bon recouvrement au sol des espèces végétales implantées, un taux de survie élevé des individus plantés.
- Sur le plan de la dynamique dans le temps de l'écosystème en formation : une bonne capacité de reproduction des espèces végétales apportées (floraison, fructification, recrûs), un enrichissement progressif en espèces végétales provenant de milieux avoisinants et un enrichissement du substrat en matière organique.
- Sur le plan des interactions au sein de l'écosystème en formation : des interactions de plus en plus complexes entre les compartiments et les éléments qui les composent, avec notamment une abondance des pollinisateurs (insectes, oiseaux) et une abondance de symbioses mycorhiziennes et bactériennes.

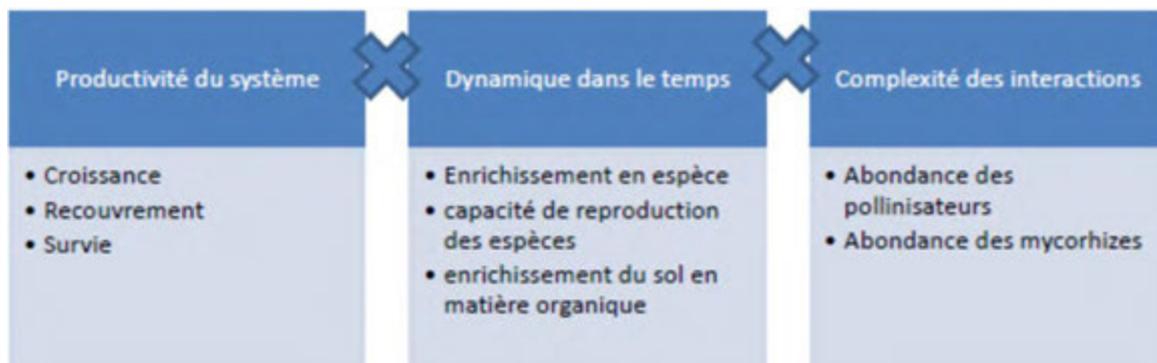


Figure 7 : Types d'indicateurs potentiels de la réussite de la restauration écologique sur terrains miniers.

Les réunions de réflexion sur les trois niveaux de fonctionnalités des écosystèmes restaurés ont permis de définir les paramètres à prendre en compte pour analyser le degré de réussite des actions de restauration.

Ces paramètres ou indicateurs à prendre en compte pour l'évaluation de la réussite d'une action de restauration écologique ont été rediscutés et organisés lors de la mise au point de la fiche des relevés sur le terrain.

2.6. ELABORATION DE LA FICHE TERRAIN

Une grille d'analyse interdisciplinaire, faisant intervenir diverses approches (biologie, écophysiole, biologie du sol, statistiques, etc.), a été mise au point parallèlement à la sélection des nombreux sites candidats.

Plusieurs réunions de travail ont été nécessaires à l'élaboration de la fiche terrain finale, dont l'objectif est de permettre d'acquérir des données normalisées sur les différents paramètres biologiques, physiques et écologiques à prendre en compte pour l'évaluation de la réussite des travaux.

Dans un premier temps, les différentes informations disponibles pour chaque site ont été répertoriées, sous format Excel. Une liste de l'ensemble des paramètres, permettant de décrire finement l'état des terrains revégétalisés, a ensuite été créée. Pour produire la fiche d'évaluation de l'état des terrains (fiche terrain), les différents paramètres ont alors été classés par catégories (informations générales, type de substrat, pierrosité, érosion, écosystèmes environnants, caractéristiques de la croissance et de la diversité végétale...). Après plusieurs réajustements suite aux tests sur le terrain, la fiche détaillée comporte au final trois parties (Annexe 8.4) : les informations générales de la zone, les informations sur la parcelle (ou modalité) et les informations sur les espèces végétales au sein de chaque quadrat (ou relevé).

Informations générales : cette partie comprend :

- le nom de la mine ;
- le nom du site ;
- le nom de la zone ;
- la date du suivi ;
- les noms des personnes réalisant le suivi ;
- les numéros de photos de la zone.

Informations et caractéristiques de la modalité (parcelle) : cette partie permet les notations sur :

- le nom de la parcelle, son orientation géographique, son altitude, sa pente,
- la technique de restauration utilisée et sa désignation physique,
- le type de substrat et son induration,
- le % de terre fine, le type de pierrosité majeure et secondaire,
- le type d'érosion dominante et secondaire et leur type de tracé,
- la nature des écosystèmes dominants et secondaires environnants, leurs pourcentages de recouvrement au sol et la hauteur des espèces dominantes, la distance à la parcelle.

Informations sur les espèces végétales au sein d'un quadrat :

Pour chacune des espèces végétales implantées, sont relevés sur les quadrat :

- la densité (nombre d'individus par quadrat),
- la hauteur moyenne,
- le diamètre moyen au collet,
- le diamètre moyen (pour les touffes de cypéracées),
- la floraison (critère binomial oui/ non),

- la fructification (critère binomial oui/ non),
- la variabilité de hauteur (critère binomial min/max),
- la variabilité de diamètre (critère binomial min/max),
- la présence de recrûs de la même espèce (au pied de l'individu),
- la présence de recrûs d'une espèce différente (au pied de l'individu),
- Nombre de recrûs, hauteur et diamètre moyen de chaque espèce apparue sur le quadrat
- l'épaisseur moyenne de la litière/ humus au pied,

Pour caractériser la végétation du quadrat sont relevés :

- l'état santé du peuplement par le relevé de signes de carence, de maladies ou de dégâts sur les espèces végétales présentes,
- le recouvrement total de la végétation sur le quadrat,
- le recouvrement en espèces végétales herbacées ou ligneuses,
- le taux de mortalité lorsque cela est possible
- les espèces exotiques envahissantes présentes et leur pourcentage de recouvrement.

Cette fiche a été utilisée pour réaliser les relevés sur l'ensemble des zones sélectionnées.

2.7. ELABORATION DE LA FICHE MÉMO

Cette fiche est un guide méthodologique permettant de normaliser les prises de données délicates (Annexe 8.5). Elle intègre les informations nécessaires à la réalisation des relevés de la fiche terrain. Elle définit les différents critères relevés et donne des exemples des différentes échelles de jugement, permettant de minimiser la prise de décision subjective des observateurs sur le terrain. Elle comprend :

- les descriptions sur les différents types de substrats pouvant être rencontrés dans les zones revégétalisées,
- les définitions des types d'induration et de pierrosité,
- les définitions des différentes figures d'érosion pouvant être rencontrées,
- la caractérisation des différents types d'écosystèmes rencontrés sur sols ultramafiques,
- la méthodologie pour la mise en place des quadrats (notamment via la définition de leur taille selon les techniques utilisées et les surfaces traitées),
- la méthodologie pour les différents relevés de végétation (mortalité, densité, hauteur, diamètre au collet, indice de braün-blancquet, santé du peuplement).

Cette fiche a été progressivement complétée et améliorée au cours des diverses séances de travail et des sorties préparatoires sur terrain.

2.8. SORTIES PRÉPARATOIRES ET SORTIES POUR LES RELEVÉS DE TERRAIN

Avant toute chose, afin de pouvoir réaliser les relevés sur terrain, la méthodologie à appliquer a été déterminée avec précision. En effet, il est rapidement apparu qu'étudier l'intégralité de chaque zone ne serait pas possible, du point de vue de la durée et de la quantité de données à relever sur chaque zone. Nous avons donc cherché dans la littérature scientifique les différentes méthodes de relevés existantes : point d'interception, ligne d'interception (transect) et méthode par quadrat (Suganuma et Durigan 2015). Bien que des relevés phyto-sociologiques soient réalisés depuis de nombreuses décennies, il n'existe pas de réel consensus sur la méthodologie à adopter, laquelle dépend des milieux et des objectifs. Ainsi, les recherches bibliographiques et les discussions avec les scientifiques du territoire ont guidé notre choix vers la méthode dite « des quadrats ». Les sous-zones sélectionnées ayant des surfaces plus ou moins variables, nous avons choisi les tailles de quadrats données en Figure 7, en fonction des types de technique de revégétalisation :

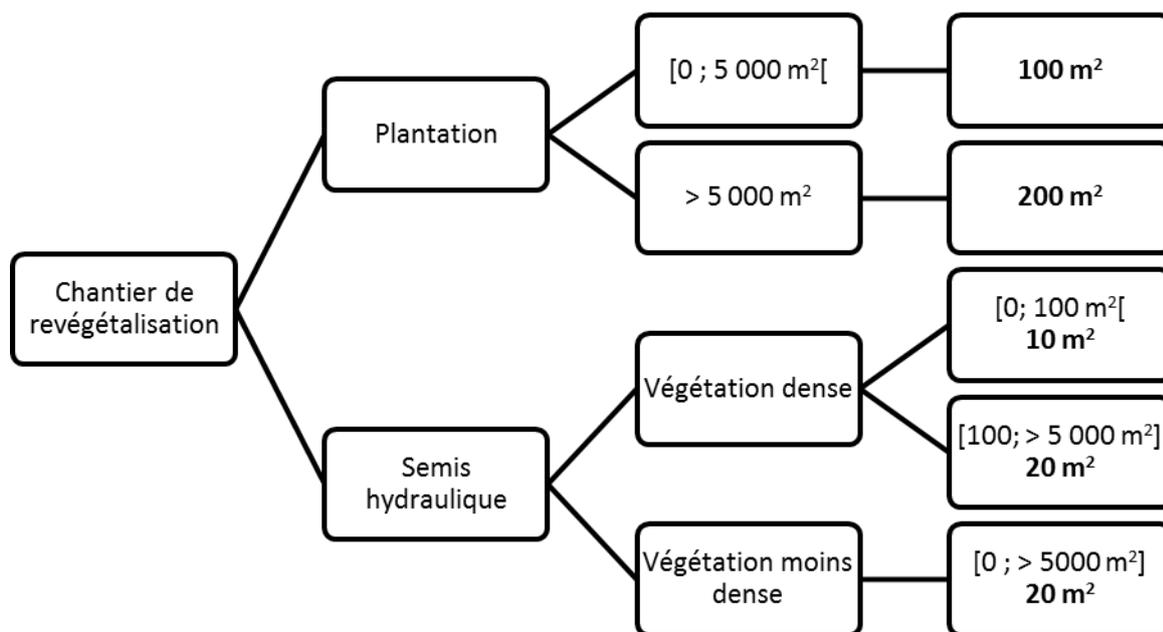


Figure 8 : Arbre de décision pour le choix de la taille des quadrats à réaliser sur le terrain

Malgré la codification permise par la fiche mémo, l'acquisition de certaines données sur le terrain comporte une part de subjectivité : le type de pierrosité, le pourcentage de terre fine, le recouvrement par les espèces dans le quadrat... Afin de pallier cette limite, des sorties communes entre les deux équipes de terrain ont été organisées sur le site de De Rouvray, afin de valider et de standardiser ensemble les prises de mesures. De plus, ces équipes de terrain, correspondant aux deux bureaux d'études, sont restées identiques tout au long la phase d'acquisition de données du projet, ce qui a limité les risques de variations importantes dans les appréciations de ces paramètres.

Sur le terrain la prise de données est réalisée comme suit :

1- Réalisation du quadrat

Le quadrat est délimité par 4 fers à béton et un mètre ruban (Figure 8). Cela nous permet d'avoir une placette de 10x10 ou 4x5 selon la taille de la zone étudiée et le type de plantation.



Figure 9 : Photos de la disposition d'un quadrat sur le terrain

Une fois le quadrat positionné (de façon aléatoire) sur la sous-zone étudiée, des photos sont prises aux quatre coins de la placette. Les coordonnées du centre du quadrat sont relevées par GPS. Ces données sont reportées dans la fiche terrain dans la partie « états des lieux » du quadrat (Annexe 8.4).

2- Informations sur la modalité

Après la mise en place du quadrat, les informations propres à la modalité sont relevées :

- Orientation
- Altitude
- Météo lors du suivi
- Vent
- Technique de restauration
- Désignation de la modalité
- Génie écologique et son état
- Caractéristiques de la modalité

Les informations relevées portant sur les caractéristiques de la modalité sont en général remplies après les prises de données sur les quadrats, afin que l'ensemble de la surface de la modalité ait pu être bien appréciée.

- Type de substrat
- Induration du substrat
- % de terre fine
- Type de pierrosité majeure et secondaire et leur indice correspondant
- Erosion dominante, secondaire et tertiaire et leur tracé correspondant
- Nature de l'écosystème environnant dominant et secondaire (écosystème environnant de moindre importance), ainsi que les données relatives aux écosystèmes : la hauteur de la canopée, la distance à la sous-zone, la position face au vent et la similarité de la modalité avec l'écosystème environnant.

2.9. ETAT ACTUEL DE LA VÉGÉTATION DES TERRAINS REVÉGÉTALISÉS

Afin d'obtenir des données suffisamment robustes pour les analyses statistiques, le consortium a décidé de réaliser 5 quadrats (répétitions) sur une même sous-zone.

Les données à renseigner à ce niveau sont multiples et concernent les espèces réimplantées. De même que pour les répétitions de quadrats, il a été décidé de mesurer 5 individus par espèce réimplantée au sein de chaque quadrat, afin de limiter les prises de mesures, mais tout en gardant une vision globale et statistiquement cohérente de leur croissance.

Ainsi, la liste des espèces utilisées est pré-remplie par les entreprises privées lors de la préparation des sorties terrain. En effet, ce sont des données « historiques » et donc disponibles en amont des sorties. Une fois sur le terrain, le nombre d'individus par espèce présents dans le quadrat est compté.

Sur 5 de ces individus, pour chacune des espèces, sont mesurés :

- La hauteur en cm (à l'aide d'un mètre ruban)
- Le diamètre au collet en cm (à l'aide d'un pied à coulisse)
- Le diamètre de la touffe pour les cypéracées
- La présence ou non de fleurs ou de fruits
- Le type de recrûs au pied de l'individu
- Le nombre de recrûs d'espèces différentes
- L'épaisseur moyenne de la litière en cm
- La présence d'humus au pied du plant suivi

Le même type de mesures est ensuite réalisé pour les espèces apparues :

- Le nombre d'individus par quadrat
- La hauteur moyenne de ces individus
- La variabilité de hauteur en cm (min – max)
- Le diamètre moyen en cm
- La variabilité de diamètre au collet ou de la touffe de cypéracées en cm (min – max)
- La présence de fleurs et/ou de fruits

Notons une des limites de la fiche terrain : en effet, ces paramètres sur les espèces apparues sont facilement mesurables dans le cas de plantation, mais impossible à obtenir dans le cas de semis hydraulique où la réimplantation des plants se fait à partir de semis. Cette partie n'a donc pas été renseignée pour les modalités concernées par les travaux de semis hydrauliques.

Après les mesures sur les individus, les données à relever sur chacun des quadrats sont les suivantes :

- Le recouvrement dans le quadrat
- La santé du peuplement
- Les types de nuisibles rencontrés et les dégradations et dégâts observés sur les espèces
- Le nom et le pourcentage de recouvrement des espèces envahissantes rencontrées

Chaque partie recense différentes informations à collecter.

La fiche terrain complète est visible en annexe 8.4

La réalisation de ces relevés terrain a été une partie importante de ce projet en termes de mise au point méthodologique et de prises de mesures sur le terrain. Bien que 35 zones aient été sélectionnées, ce sont 67 modalités qui ont été étudiées par les deux entreprises privées (Tableau 2). Chaque entreprise ayant réalisé 5 quadrats par modalité, 340 quadrats ont été étudiés lors de la durée de la phase terrain.

Au fur et à mesure des sorties terrain, les données ont été saisies dans un fichier Excel uniformisé et reprenant les différentes tables de la BDD. Ce dernier a ensuite pu être intégré dans la base de données.

Les principales difficultés rencontrées lors des relevés sur le terrain ont été les suivantes :

- La difficulté à distinguer les espèces apparues des espèces apportées pour les semis hydrauliques
- Les pentes importantes de certaines modalités étudiées rendent le travail difficile et épuisant et augmente les risques d'erreurs
- Le décompte des plants morts dans les anciennes plantations n'est pas toujours sûr

Tableau 2 : Présentation de l'ensemble des modalités étudiées

Identifiant	Année	Désignation	Altitude	Pente	Substrat	Technique	Nombre d'espèces de		Induration	Ecosystème dominant	Orientation	Pluviométrie	Alizée
							maquis						
BOUA_KG_DS_SZ01	1990	banquette	249	0	laterite	PL	2		meuble	maquis_arbustif	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
CBG_MONA_MS_SZ01	2000	plateforme	256	2	top_soil	PL	6		meuble	sol_nu	Sud-Ouest	] 1174.6 - 2093.05	oui
CBG_MONA_MS_SZ02	2000	plateforme	248	2	laterite	PL	5		meuble	sol_nu	Sud-Ouest	] 1174.6 - 2093.05	oui
CBG_RED_VP_SZ01	2009	plateforme	350	2	top_soil	PL	19		meuble	sol_nu	Nord-Est	] 1174.6 - 2093.05	oui
CBG_RED_VP_SZ02	2009	plateforme	350	2	laterite_saprolite	PL	19		meuble	sol_nu	Nord-Est	] 1174.6 - 2093.05	oui
CDS_NING_AEC_ZA	1994	talus	657	25	saprolite	SH	6		meuble	sol_nu	Sud	] 1174.6 - 2093.05	oui
CDS_NING_CREP_EXT	1992	banquette	760	0	saprolite	PL	38		meuble	maquis_arbustif	Nord-Ouest	] 1174.6 - 2093.05	non
CDS_NING_CREP_HT	1992	banquette	760	0	saprolite	PL	38		meuble	maquis_ligno-herbacee	Nord-Ouest	] 1174.6 - 2093.05	non
CDS_NING_Z001_E508	1992	talus	741	5	laterite	PL	38		meuble	sol_nu	Sud-Ouest	] 1174.6 - 2093.05	oui
GORO_BN4_VF_SZ01	2009	talus	77	12	top_soil	SH	11		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	> 2093.05	non
GORO_BN4_VF_SZ02	2009	talus	77	12	top_soil	SH	11		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	> 2093.05	non
GORO_BN4_VF_SZ03	2009	talus	77	12	top_soil	SM	7		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	> 2093.05	non
GORO_FER_COFR_SZ01	1988	plateforme	247	2	laterite	PL	5		meuble	maquis_paraforestier	Sud-Est	> 2093.05	non
GORO_FER_KUEB_SZ01	2002	banquette	241	5	laterite	PL	40		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	> 2093.05	non
GORO_FER_VEM_VEM7	2008	talus	130	45	laterite	SH	8		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	> 2093.05	non
GORO_KUE_RPB_SZ01	2012	plateforme	107	5	laterite	PL	31		indure	maquis_ligno-herbacee	Sud	> 2093.05	oui
GORO_KUE_RPB_SZ02	2012	plateforme	107	5	top_soil	PL	31		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud	> 2093.05	oui
GORO_USINE_COLA_T0	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	10		meuble	maquis_paraforestier	Nord-Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_COLA_T1	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	10		meuble	maquis_paraforestier	Nord-Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_COLA_T2	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	10		meuble	maquis_paraforestier	Nord-Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_COLA_T3	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	10		meuble	maquis_paraforestier	Nord-Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_COLA_T4	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	10		meuble	maquis_paraforestier	Nord-Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_COLA_T5	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	10		meuble	maquis_paraforestier	Nord-Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_CR7_SZ01	2009	plateforme	183	2	top_soil	PL	6		indure	maquis_ligno-herbacee	Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_CR7_SZ02	2009	plateforme	183	2	top_soil	PL	7		indure	maquis_ligno-herbacee	Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_CR7_SZ03	2009	plateforme	183	2	top_soil	PL	7		indure	maquis_ligno-herbacee	Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_CR7_SZ04	2009	plateforme	183	2	top_soil	PL	7		indure	maquis_ligno-herbacee	Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_RDP_SZ01	2009	talus	55	10	top_soil	PL	36		indure	maquis_ligno-herbacee	Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_SMSP_SZ01	2009	plateforme	19	0	top_soil	PL	20		indure	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINE_SMSP_SZ02	2009	talus	19	30	top_soil	PL	20		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	> 2093.05	non
GORO_USINEKUE_A1_SZ01	2011	plateforme	180	2	saprolite	PL	36		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	> 2093.05	oui
GORO_USINEKUE_A1_SZ02	2011	talus	180	15	laterite	PL	36		meuble	maquis_ligno-herbacee	Est	> 2093.05	oui
KNBO_S001_640_SZ01	2011	talus	200	2	laterite	PL	21		meuble	maquis_ligno-herbacee	Nord-Ouest	<= 1174.6	non
KNBO_S001_TRAZ_SZ01	2012	plateforme	710	2	top_soil	SH	7		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	<= 1174.6	oui
KOUA_MEA_MMMR_SZ01	2008	banquette	756	2	top_soil	PL	17		meuble	maquis_ligno-herbacee	Nord-Est	] 1174.6 - 2093.05	oui
KRB_M37_Z001_CS0	2004	banquette	956	2	laterite	PL	12		meuble	sol_nu	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
KRB_M37_Z001_VL20	2002	banquette	996	0	laterite	PL	4		meuble	maquis_ligno-herbacee	Nord-Est	<= 1174.6	oui
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_2	1999	plateforme	280	2	saprolite	PL	5		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	] 1174.6 - 2093.05	oui
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3	1999	plateforme	283	2	saprolite	PL	5		meuble	maquis_ligno-herbacee	Nord	] 1174.6 - 2093.05	non
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_6	1999	plateforme	378	0	saprolite	PL	5		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	] 1174.6 - 2093.05	oui
MDORE_ROUV_Zser_SZ01	1993	plateforme	280	0	saprolite	PL	9		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	] 1174.6 - 2093.05	oui
NKY_LU_VD_SZ01	2003	plateforme	480	2	top_soil	PL	12		meuble	sol_nu	Est	<= 1174.6	non
NKY_LU_VP_PN01	2009	plateforme	500	2	top_soil	PL	14		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
NKY_LU_VP_PN02	2009	plateforme	500	2	laterite	PL	14		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
NKY_LU_VP_PS01	2010	talus	500	10	top_soil	PL	14		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
PORO_VDT_DEC_SZ01	2007	talus	130	40	laterite	PL	18		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	] 1174.6 - 2093.05	non
PP_AC2_T01_SZ-B	2013	talus	664	30	laterite	SH	17		meuble	maquis_ligno-herbacee	Nord-Ouest	<= 1174.6	non
PP_AC2_T01_SZ-C	2013	talus	658	30	laterite	SH	17		meuble	maquis_ligno-herbacee	Nord-Ouest	<= 1174.6	non
PP_AC2_T01_SZ-E	2013	talus	663	30	laterite	SH	17		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	<= 1174.6	non
PP_AC2_T02_SZ-B	2013	talus	665	30	laterite	SH	16		meuble	maquis_ligno-herbacee	Nord-Ouest	<= 1174.6	non
TBGH_S001_CQ2P_P3	2009	talus	272	25	laterite	SH	10		indure	maquis_ligno-herbacee	Sud-Est	] 1174.6 - 2093.05	non
TBGH_S001_CQ2P_P4	2009	talus	280	25	laterite	SH	10		indure	maquis_ligno-herbacee	Nord-Ouest	] 1174.6 - 2093.05	non
TBGH_S001_GV03_SZ01	2003	talus	580	30	saprolite	SH	8		meuble	sol_nu	Nord-Ouest	] 1174.6 - 2093.05	non
TBGH_S001_GV06_SZ01	2006	talus	560	30	top_soil	SH	8		meuble	sol_nu	Nord-Ouest	] 1174.6 - 2093.05	non
TBGH_S001_VHTE_SZ01	2003	talus	330	30	saprolite	SH	8			maquis_paraforestier	Nord-Est	] 1174.6 - 2093.05	non
TBGH_S001_VP_PS	2012	talus	551	35	top_soil	rien	0		meuble	sol_nu	Nord-Ouest	] 1174.6 - 2093.05	non
THIO_MOUL_Z001_SZ01	2008	talus	487	30	saprolite	PL	20		meuble	sol_nu	Sud-Est	] 1174.6 - 2093.05	oui
TOMO_S001_VFM_SZ01	2010	talus	710	30	top_soil	PL	22		meuble	revegetalisation	Ouest	<= 1174.6	non
TONTT_VULC_SRED_MD01_1	2006	talus	638	25	top_soil	rien	0		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
TONTT_VULC_SRED_MD01_2	2006	talus	638	25	top_soil	rien	0		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
TONTT_VULC_SRED_MD01_3	2006	talus	638	25	top_soil	PL	3		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
TONTT_VULC_SRED_MD01_4	2006	talus	638	25	top_soil	PL	3		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
TONTT_VULC_SRED_MD01_5	2006	talus	638	25	laterite	rien	0		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
TONTT_VULC_SRED_MD01_6	2006	talus	638	25	laterite	PL	3		indure	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
TONTT_VULC_SRED_MD01_7	2006	talus	638	25	top_soil	PL	4		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
TONTT_VULC_SRED_MD01_8	2006	talus	638	25	top_soil	rien	0		meuble	maquis_ligno-herbacee	Sud-Ouest	<= 1174.6	non
TONTT_VULC_SRED_MD04	2011	talus	619	30	top_soil	PL	31		meuble	maquis_arbustif	Sud	<= 1174.6	non

2.10. PRÉPARATION ET ANALYSE DES DONNÉES

2.10.1. PRÉPARATION DES DONNÉES

En raison de la quantité importante de données utilisées dans ce projet, nous avons choisi de ne pas les intégrer totalement au sein de ce rapport, afin d'éviter une surcharge inutile, les données brutes étant disponibles sur la base de données (voir la partie concernant la base de données pour plus le détail : Partie 2.4)

Les données utilisées sont donc toutes issues de la base de données, mais nécessitent une mise en forme avant de pouvoir être analysées. Ces données sont toutes agrégées pour obtenir une valeur unique par quadrat pour chaque variable et pour chacune des modalités.

Tout d'abord les données relevées au niveau du quadrat :

- L'état général, variable qualitative, qui est transformé en un indice quantitatif (Bon = 3 ; Moyen = 2, Mauvais = 1, Très mauvais = 0)
- Le recouvrement de Braün-Blanquet qui est transformé en indice de recouvrement en valeur numérique (([0%] = 0 ;]0 à 1%]= 0,5;]1 à 5%]= 3;]5 à 25%]= 15;]25 à 50%]= 37,5;]50 à 75%]= 62,5;]75 à 100%]= 87,5)
- La mortalité : relevé de la trace d'individus utilisés morts dans le quadrat

Ensuite les données relevées au niveau des différentes espèces :

- Le nombre d'espèces permet de calculer la richesse spécifique et les indices de diversité. La richesse spécifique correspond au nombre d'espèces présentant sur un quadrat, elle est calculée pour le nombre d'espèces totales, mais aussi pour le nombre d'espèces utilisées et apparues. Les indices de Shannon et de Simpson sont eux calculés à partir du nombre d'espèces et du nombre d'individus par espèces. Pour les analyses globales, et par cluster, le nombre d'espèces et d'individus est rapporté à 20 m² (taille minimum des quadrats dans cette étude). Pour les analyses par modalités, les analyses peuvent se faire sur la taille du quadrat la plus petite.

L'indice de diversité de Shannon évalue la diversité au niveau d'un quadrat (Shannon 2001). C'est un indicateur de l'équitabilité du milieu, compris entre 0 et l'infinie (en pratique entre 0 et 5) est défini par la formule :

$$H' = \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right),$$

où n_i est l'espèce i , N l'effectif total des individus et S le nombre total d'espèces.

La valeur de H' est égale à 0, si tous les individus du quadrat appartiennent à une seule et même espèce, ou si chaque espèce est représentée par un seul individu. L'indice est maximal quand tous les individus sont répartis d'une façon égale sur toutes les espèces.

- L'indice de diversité de Simpson mesure la probabilité que deux individus sélectionnés au hasard dans un quadrat, appartiennent à la même espèce (Lande 1996). Il est défini par :

$$D = \sum_{i=1}^S \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)},$$

où n_i est l'espèce i , N l'effectif total des individus et S le nombre total d'espèces. Les valeurs de D sont comprises entre 0 et 1, où 0 représente le maximum de diversité et 1 le minimum de diversité.

Indice de Shannon : Indice de diversité spécifique d'un milieu prenant en compte le nombre d'espèces de ce milieu (richesse spécifique) et de la répartition des individus au sein de ces espèces (équitabilité spécifique). Cet indice permet de quantifier l'hétérogénéité de la biodiversité d'un milieu d'étude et donc d'observer une évolution au cours du temps. La valeur de l'indice varie de 0 (une seule espèce, ou bien une espèce dominant très largement toutes les autres) à $\log S$ (lorsque toutes les espèces ont même abondance). L'indice de Shannon doit être associé à l'indice de Simpson.

NB : Dans tous les cas, l'indice de Shannon-Weaver convient bien à l'étude comparative de communautés car il est relativement indépendant de la taille des relevés.

Indice de Simpson : C'est une formule permettant de calculer une probabilité, soit la probabilité que deux individus sélectionnés aléatoirement dans un milieu donné soient de la même espèce. L'indice variera entre 0 et 1. Plus il se rapproche de 0, plus les chances d'obtenir des individus d'espèces différentes sont élevées.

- La hauteur et le diamètre moyen pour chaque espèce végétale sont relevés et moyennés pour chaque espèce au niveau de chaque quadrat, et ensuite moyenné pour les espèces totales et les espèces apparues, mais aussi pour les espèces ligneuses et les espèces herbacées (dans lesquelles on ne comptabilise pas les espèces appartenant au groupe des Ptéridophytes) ;
- La présence de floraison ou de fructification est notée pour chacune des espèces, une somme de ce nombre d'espèces (en fleur ou en fruit) est réalisée au niveau du quadrat et moyenné au niveau de la modalité. Ceci permet d'obtenir l'indice de reproduction ;
- La présence de dégâts généraux et de dégâts foliaires est relevé pour chacune des espèces végétales. L'indice de dégradation foliaire est réalisé à partir du nombre d'espèces présentant des dégradations foliaires (c'est-à-dire des chloroses, des nécroses, des déformations, des piqûres, des morsures, présence de chenilles, de fumagines, de galles, de feuilles fanées, traces de mouches mineuses ou des défoliations). Une somme du nombre d'espèces impactées par quadrat est réalisée. On calcule ensuite une moyenne pour obtenir l'indice de dégradation foliaire par sous-zone. Ainsi l'indice varie normalement entre 0 et 13,7 au maximum. De la même manière un indice de dégâts généraux est obtenu en prenant en compte le piétinement, l'abroustissement ; la fouille et le frottement.

Enfin pour ce qui concerne les données relevées au niveau des individus utilisés on a :

- La hauteur et le diamètre des espèces végétales utilisées, relevés sur au maximum 5 individus. Pour chaque espèce ces valeurs sont alors moyennées pour chaque quadrat et pour chaque modalité, avec une distinction faite entre espèces ligneuses et herbacées ;
- Le nombre de recrûs différents représente le nombre de jeunes plantules trouvées dans un rayon d'un mètre autour d'un pied d'une espèce utilisée. On ne compte autour du pied que les individus appartenant à des espèces différentes du pied pris en compte. Le nombre de ces recrûs est ensuite sommé sur un quadrat et moyenné au niveau de la modalité pour obtenir l'indice du nombre de recrûs différents. Cet indice varie entre 0 et 132 dans cette étude. Pour les recrûs d'espèces identiques on relève le nombre de plantes par quadrat présentant des plantules de la même espèce dans un périmètre de 1 m autour du pied. C'est un critère qui est pris sur le terrain sous forme oui/non et transformé en numérique (respectivement 1/0) puis sommé par quadrat et moyenné par modalité pour créer l'indice du nombre de recrûs identiques ;
- L'épaisseur de la litière est prise au niveau des espèces qui ont été utilisées (mesure en cm). Celle-ci est ensuite moyennée par quadrat puis moyennée par modalité. On obtient ainsi un indice d'épaisseur de la litière sous les espèces utilisées dans le chantier de revégétalisation. L'indice varie entre 0 et 4 cm dans cette étude.

Le Tableau 3 donne la liste de ces variables avec les appellations contractées utilisées dans l'ensemble du document.

Tableau 3 : Présentation générale des variables estimées à partir des relevés sur terrains. Le code en première colonne est celui utilisé dans la base de données.

N°	Code Variable	Description
1	ETAT_GENERAL	Indice de l'état général (les indices relevés sur le terrain sont « Bon, Moyen, Mauvais et Très Mauvais » correspondant à l'estimation subjective de l'observateur sur l'état de l'écosystème et ces indices sont transformés en « 3, 2, 1, 0 » pour les analyses)
2	RECOUV_TOT	Indice de Braün Blanquet du recouvrement total
3	RECOUV_HERB	Indice de Braün Blanquet du recouvrement en espèce herbacée
4	RECOUV_LIGN	Indice de Braün Blanquet du recouvrement en espèce ligneuse
5	RECOUV_EE	Indice de Braün Blanquet du recouvrement en espèce exotique
6	Nbr_ind_APP_20m2	nombre d'individus d'espèce apparue
7	Nbr_ind_UTI_20m2	nombre d'individus d'espèce utilisée
8	Nbr_ESP_APP_20m2	Nombre d'espèce apparue
9	Nbr_ESP_UTI_20m2	Nombre d'espèce utilisée
10	MORTALITE	Nombre d'individus mort
11	DEGATFOLIAIRE	Indice de dégradation foliaire (L'indice de dégradation foliaire est réalisé à partir du nombre d'espèces présentant des dégradations foliaires (càd des chloroses, des nécroses, des déformations, des piqûres, des morsures, présence de chenilles, de fumagines, de galles, de feuilles fanées, traces de mouches mineuses ou des défoliations). Une somme du nombre d'espèces impactées par quadrat est réalisée. On réalise ensuite une moyenne pour obtenir l'indice de dégradation foliaire par sous-zone. Ainsi l'indice varie normalement entre 0 et 13,7 au maximum)
12	DEGAT	Indice de dégât (L'indice de dégât est réalisé à partir du nombre d'espèces présentant des dégâts (càd des traces d'abrouissement; de piétinement, de fouille ou de frottement) . Une somme du nombre d'espèces impactées par quadrat est réalisée. On réalise ensuite une moyenne pour obtenir l'indice de dégât par sous-zone. Ainsi l'indice varie normalement entre 0 et 13,7 au maximum)
13	Litiere	Indice de l'épaisseur de la litière (L'épaisseur de la litière est prise au niveau des espèces qui ont été utilisées. Celle-ci est ensuite moyennée par quadrat puis moyennée par sous-zone. On obtient ainsi une épaisseur moyenne de litière prise sous les espèces utilisées dans le chantier de revégétalisation. L'indice varie entre 0 et 4 cm.)
14	Nbr_recrus_diff	Indice du nombre de recrûs différents (Le nombre de recrûs différents représente le nombre de jeunes plantules trouvées dans un rayon d'un mètre autour d'un pied d'une espèce. On compte autour du pied que les individus appartenant à des espèces différentes du pied pris en compte. Le nombre de ces recrûs est ensuite sommé sur un quadrat et moyenné au niveau de la sous-zone. Varie entre 0 et 132.)
15	Nbr_recrus_identique	Indice du nombre de recrûs identiques (ce nombre représente le nombre de plantes par quadrat présentant des plantules de la même espèce dans un périmètre de 1 m autour du pied. C'est un critère qui est pris sur le terrain en oui/non et ne permet donc pas de quantification. (environ 13% des quadrats - soit 83/ 321).

N°	Code Variable	Description
16	MOY_HAUT_HERB_UTI	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées utilisées (en cm)
17	MOY_HAUT_LIGN_UTI	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
18	MOY_DIAM_HERB_UTI	Moyenne des diamètres des espèces herbacées utilisées (en cm)
19	MOY_DIAM_LIGN_UTI	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses utilisées (en cm)
20	MOY_HAUT_HERB_APP	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées apparues (en cm)
21	MOY_HAUT_LIGN_APP	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses apparues (en cm)
22	MOY_DIAM_HERB_APP	Moyenne des diamètres des espèces herbacées apparues (en cm)
23	MOY_DIAM_LIGN_APP	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses apparues (en cm)
24	DIV_SIMP_APP	Indice de diversité de Simpson pour les espèces apparues
25	DIV_SHANN_APP	Indice de diversité de Shannon pour les espèces apparues
26	DIV_SIMP_UTI	Indice de diversité de Simpson pour les espèces utilisées
27	DIV_SHANN_UTI	Indice de diversité de Shannon pour les espèces utilisées
28	indice_reproduction	Indice de reproduction (Cet indice est la somme du nombre d'espèces présentant une trace de floraison et/ou de fructification par quadrat. Ce nombre est ensuite moyenné par sous-zone)

2.10.2. ANALYSE DES RÉSULTATS

A partir des résultats bruts, il est possible de réaliser les boxplots des différentes variables pour chacune des modalités.

Boxplot (ou boîte à moustache) : Indique de façon simple et visuelle quelques traits marquants de la série observée :

- la médiane d'un ensemble de valeurs est la valeur $x_{1/2}$ qui permet de couper l'ensemble des valeurs en deux parties égales : 50% des valeurs inférieures à $x_{1/2}$ et 50% supérieures ;
- les largeurs des deux parties de la boîte rendent compte de la dispersion des valeurs situées au centre de la série (la boîte contient 50% (environ) de l'ensemble des observations : 25% à gauche de la médiane et 25% à sa droite) ;
- la longueur des moustaches renseigne sur la dispersion des valeurs situées au début de la série ordonnée (les valeurs les plus petites correspondant à 25% des observations) ou à la fin de celle-ci (les valeurs les plus grandes correspondant aussi à 25% des observations) ;

De façon générale, la boîte et les moustaches seront d'autant plus étendues que la dispersion de la série statistique est grande (Figure 9).

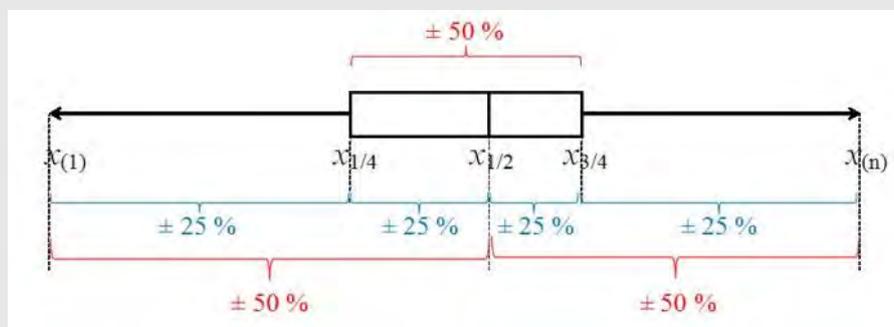


Figure 10 : Schéma expliquant les différentes valeurs produites dans une boxplot

- Correction de l'effet temps (variable ANNEE) :

Cette correction vise à supprimer l'influence du temps sur l'ensemble des paramètres étudiés, notamment sur les variables qui déterminent la réussite de la revégétalisation, comme la croissance, le nombre de plantes, la diversité des espèces, etc. En effet les valeurs de ces variables augmentent avec le temps, ce qui ne permet pas de comparer correctement des opérations de revégétalisation ayant eu lieu à des périodes très différentes (les plus récentes il y a 4 ans et les plus anciennes il y a près environ 30 ans). Cette méthode est appliquée sur l'ensemble des variables et l'ensemble des quadrats.

La méthode pour supprimer l'effet du temps sur toutes les variables sélectionnées consiste à effectuer sur chacune de ces variables une régression médiane en fonction de la variable année notée ANNEE (Durrieu et Briollais 2009, Briollais et Durrieu 2014, Durrieu et Briollais 2017) qui est une alternative robuste à l'estimation des moindres carrés. Si l'effet de la variable ANNEE est significatif au seuil de 5%, les variables réponses du modèle sont ajustées de la manière suivante :

$$\tilde{X}_k = X_k - \hat{\beta}_k A,$$

Où \tilde{X}_k est la variable k ajustée (effet du temps supprimé), X_k est la variable k mesurée et $\hat{\beta}_k$ l'estimateur de la pente par la régression médiane et A est la variable année. Dans le cas où l'effet de la variable ANNEE n'est pas significatif, aucun ajustement n'est effectué. Un exemple est donné dans la Figure 10 pour l'indice de Shannon.

Lorsque la correction est réalisée sur l'ensemble des variables pour les données globales ainsi que sur chaque cluster, on peut alors retirer la variable ANNEE.

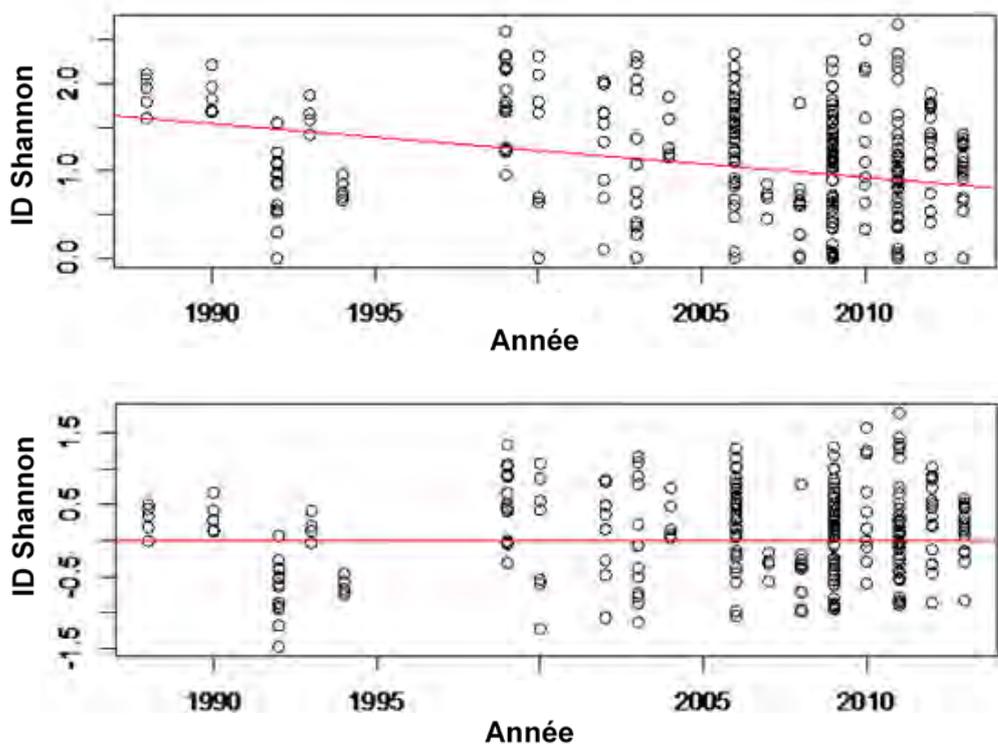


Figure 11 : Régression médiane de l'indice de diversité (ID) de Shannon, en fonction de l'année de révégétalisation

En haut, la droite de régression indique l'effet de la variable « Année » sur l'indice de diversité Shannon des espèces apparues. En bas, après ajustement mathématique, on constate qu'il n'y a plus d'effet (droite horizontale).

Ensuite les données ainsi normalisées sont centrées et réduites. Avant de réaliser une ordination, on réalise une sélection des variables grâce à un algorithme stochastique de recuit simulé. Le principe est d'identifier un sous ensemble k d'un ensemble de p variables initiales qui est optimal pour un critère donné qui évalue la corrélation entre deux matrices. Cet algorithme est un algorithme heuristique de recherche locale permettant de résoudre un problème d'optimisation combinatoire. Le principe du recuit simulé est de parcourir de manière itérative l'espace des solutions. Un sous ensemble initial de k variables S_0 de l'ensemble des p variables (solution initiale) est choisi de manière aléatoire. Puis l'algorithme sélectionne aléatoirement un sous ensemble S^* dans le voisinage du sous ensemble actuel S et décide de remplacer S^* par S si s^* , la valeur du critère RM du sous ensemble S^* est plus élevée que s, la valeur du critère RM du sous ensemble S. Dans le cas contraire, S est remplacé par S^* avec la probabilité

$$\exp\left(\frac{s^* - s}{t}\right),$$

où le paramètre t (température) décroît de 5% toutes les 20 itérations. La température initiale $t_1 = 1 - s_0$, où s_0 est la solution initiale du critère RM S_0 . Pour chaque cardinalité k, le critère d'arrêt pour l'algorithme est le nombre d'itérations (n_{iter}) qui est contrôlé par l'utilisateur (ici fixé à 1 000 dans notre cas).

Nous avons fixé à 12 le nombre de variables à considérer pour la classification. Lorsqu'on lance plusieurs fois l'algorithme avec X, l'ensemble des variables du Tableau 3, nous avons constaté que les résultats obtenus ne sont pas exactement les mêmes, c'est-à-dire que nous ne retrouvons pas exactement les mêmes variables. Ceci est dû à la solution initiale de l'algorithme qui est générée aléatoirement. Cependant, nous avons également remarqué que la fréquence d'apparition de certaines variables est plus élevée que d'autres. Donc sous le logiciel R, nous avons fixé un seuil de fréquence d'apparition à 75% puis nous avons simulé n fois la sélection de variable (n = 500) avec l'algorithme du recuit simulé et nous avons relevé les 12 variables dont la fréquence d'apparition est la plus élevée

2.10.3. TYPOLOGIE DES ZONES ÉTUDIÉES ET ÉTUDE STATISTIQUE GLOBALE

Consécutivement à la récolte des informations et leur intégration dans la base de données, leur traitement statistique a été initié ; diverses méthodes mathématiques ont été testées pour trouver les plus efficaces.

- Typologie

Comme nous l'avons déjà souligné, la difficulté majeure de cette étude est la grande diversité des sites et des conditions de revégétalisation utilisées depuis une trentaine d'années. Cette variabilité des cas rend très délicate la comparaison directe entre des sites trop différents par leurs caractéristiques générales ou leurs conditions de revégétalisation. Pour contourner cette difficulté, la démarche la plus rationnelle est de définir des groupes d'affinité permettant de rassembler en sous-ensembles plus homogènes les sites qui présentent des caractéristiques proches (typologie) et qui peuvent ensuite faire l'objet de comparaisons, avec des chances plus importantes d'aboutir à des résultats statistiquement significatifs.

Pour cette opération, la méthode utilisée est l'Analyse Factorielles des Données Mixtes (AFDM) (Pagès 2014). Cette dernière permet d'utiliser conjointement une Analyse en

Composante Principale (ACP) pour analyser les données quantitatives et une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) pour l'analyse des données qualitatives, ce qui est le cas de nos relevés de terrain. La typologie est ensuite basée sur une Classification Hiérarchique (CH) afin de définir des groupes plus ou moins homogènes.

La typologie est réalisée en travaillant directement sur le niveau « modalité ». Ce choix est lié au fait que de nombreuses zones (plus de 70%) ne présentent qu'une seule modalité de revégétalisation. Pour cette classification des modalités, seules les caractéristiques générales (et non les données descriptives des parcelles revégétalisées, selon la fiche terrain) ont été prises en compte. En effet, il ne s'agit pas pour l'instant de classer les modalités selon l'évolution du système revégétalisé, mais plutôt de classer les terrains eux-mêmes, pour pouvoir ensuite comparer les données descriptives des parcelles revégétalisées, à l'intérieur de groupes relativement homogènes.

Plusieurs essais de typologie ont été testés, avec comme objectif d'obtenir une classification équilibrée (en termes notamment de nombre de modalités par groupe) et cohérente (notamment avec rassemblement des modalités de sites proches). Dans un premier temps 22 variables ont été testées. Cependant, afin d'améliorer la cohérence des groupes, nous avons ensuite décidé de supprimer certaines variables. Ces variables présentes en effet des inconvénients importants, soit par manque de données, soit par manque de représentativité des données (par exemple le type d'érosion dominante, les techniques de génie biologique utilisée et la présence d'espèces exotiques qui comportent une majorité de « rien » (pas d'érosion significative, pas de technique de génie utilisée, pas d'espèces exotiques) les rendant trop discriminantes pour la création de groupes homogènes), soit parce qu'elles ne sont pas assez précises (par exemple le type de pierrosité et le pourcentage de terre fine qui peuvent varier sensiblement selon l'expérimentateur, malgré une méthodologie établie préalablement).

La variable « température moyenne » a été totalement supprimée, car dans de nombreux cas, les données obtenues ne correspondaient pas au site lui-même, mais à la région, souvent pour une altitude bien différente. Le Tableau 4 présente les variables finalement utilisés et le

Tableau 4 : Variables utilisées pour définir la typologie.

Type	Nom	Description
Variable qualitative	DESIGNATION	Désignation de la modalité (banquette, bord de piste, décharge, ravine, talus, verse, plateforme)
	SUB	Type de substrat sur lequel a été réalisé le chantier de revégétalisation (latérite rouge, latérite jaune, serpentinite, saprolite, péridotite, enrochement avec blocs, tout venant, tout venant latéritique, tout venant saprolitique, limonite, limonite jaune, cuirasse, gabbros, brun hypermagnésien, topsoil, autre)
	TECHNIQUE	Technique de revégétalisation utilisée (PL = Plantation; SH= Semis-hydraulique; SM= Semis-manuel)
	INDURATION	Définition de la compaction du sol par le critère suivant: sol induré = la tarière n'atteint pas 20 cm de profondeur; meuble = la tarière va au-delà de 20cm de profondeur
	ECODOMI	Nature de l'écosystème dominant environnant, les différentes formations végétales sont évaluées aux alentours et la formation végétale prédominante est notée (forêt dense humide, maquis arbustif, maquis ligno-herbacée, maquis paraforestier, sol nu, système anthropisé, autre)
	ORIENTATION	Orientation de la sous-zone par rapport aux points cardinaux (limité aux 8 principaux). L'orientation est prise avec la pente dans le dos.
	PLUVIO	Moyenne des pluviométries cumulées annuelles (exprimée en mm). Ici cette variable est transformée en variable qualitative par la création de quantiles pour obtenir différentes gammes de pluviométrie (<= 1174.6;] 1174.6 - 2093.05]; > 2093.05)
	ALIZEE	Modalité soumise aux vents dominants ou non
Variable quantitative	ALT	Altitude de la modalité (exprimée en m)
	PENTE	Pente sur la modalité (exprimée en degré)
	NBRESPMAQUIS	Nombre d'espèces végétales différentes endémiques et/ ou autochtones utilisées

Tableau 5 : Variables écartées pour la création de la typologie.

Type	Nom	Description
Variable qualitative	GENIEBIO	Type de génie biologique utilisé (ex: fascine, géofilet, mur bois, fascine+rondins de bois)
	TRAVSOL	Travail du sol réalisé avant la mise en place du chantier de revégétalisation (rippage, sous-solage, décompactage, rippage + sous-solage, rien)
	TERRE_FINE	Pourcentage de terre fine observée sur la modalité
	PIERROMAJ	Type de pierrosité majeure (blocs, grosses pierres, pierres, cailloux, graviers)
	PIERROMAJ_IND	Indice de la pierrosité majeure
	PIERROSEC	Type de pierrosité secondaire (blocs, grosses pierres, pierres, cailloux, graviers)
	PIERROSEC_IND	Indice de la pierrosité secondaire
	EROMAJ	Type d'érosion dominante (en nappe, griffes, rigoles, ravines)
	HYDRORET	Utilisation d'hydrotenteur
PAILLAGE	Utilisation de paillage	
Variable quantitative	ECODOMI_DIST	Distance de l'écosystème dominant par rapport à la modalité (exprimée en m)

- Sous-clusterisation et recherche d'indicateur synthétique de la réussite de la restauration du milieu

À partir de la typologie créée, trois clusters ont donc été formés caractérisant chacun un type de site de revégétalisation. La mise en évidence de sous-cluster a ensuite été recherchée à partir des données relevées sur le terrain afin cette fois d'étudier les résultats qui nous intéressent en termes d'évaluation de l'état biologique des terrains revégétalisés. Ces variables relevées sur le terrain sont également traitées par ACP, puis par une classification ascendante hiérarchique à partir des résultats de l'analyse factorielle. Plus précisément, nous déterminons à la fois le calcul de la matrice des distances, du dendrogramme et le partitionnement de la population en classes. Le calcul du dendrogramme est réalisé à partir du carré des distances du Φ^2 , en utilisant la méthode de Ward.

L'objectif de l'approche multivariée basée sur la projection dans le plan principal engendré par les deux composantes principales est de préciser les variables quantitatives les plus corrélées à la première composante principale (axe 1) et les variables qualitatives qui décrivent le mieux cette composante.

Dans le cas des variables quantitatives, le test est basé sur un modèle de régression linéaire, tandis que pour les variables qualitatives, un modèle d'analyse de la variance à un facteur est réalisé. Un test de Fisher permet de voir si la variable a un effet significatif sur la

première composante principale et des tests de Student sont réalisés modalités par modalités.

Cette approche peut permettre notamment de définir une orientation générale des variables qui influencent la réussite de la restauration et donc de rendre possible l'élaboration d'un indicateur de réussite dans le but d'évaluer et de valider la qualité des travaux de revégétalisation d'un site, après quelques années.

Pour cette analyse, comme pour la partie « typologie », tous les paramètres pris en compte dans la fiche terrain décrivant l'état actuel des modalités n'ont pas été sélectionnés. En effet, le nombre total de ces paramètres est élevé ; un certain nombre d'entre eux sont fortement corrélés les uns aux autres (vont dans le même sens), d'autres ne sont pas apparus pertinents en dernière analyse, du fait qu'ils n'ont pas pu être mesurés dans beaucoup de modalités (cas de la mortalité des plants). C'est pourquoi nous avons décidé là aussi de nous focaliser sur une douzaine de paramètres, bien distincts et représentatifs de l'ensemble.

Suite à une discussion approfondie, sur la détermination de cet indicateur, nous avons choisi d'opter pour une sélection mathématique de ces 12 variables, seule capable de prendre en compte la complexité de leurs liens. Après quelques essais, cette démarche s'est avérée en effet tout à fait pertinente, au regard de notre perception empirique. La sélection des variables consiste en l'extraction d'un sous-ensemble préservant la même structure que l'ensemble de ces variables initiales, c'est-à-dire qui garde les mêmes positions et dispersions des données concernant les modalités. Nous utilisons ici le critère RVM qui correspond à une mesure de similarité assimilable à un cosinus d'angle (corrélations) entre matrices (De Falguerolles and Jmel, 1993 ; Cadima, Cerdeira and Minhoto, 2004). Cette opération permet donc, sur la base des paramètres de la fiche terrain (variables explicatives), de sélectionner les variables ayant le plus de poids en éliminant celles qui n'ont pas d'influence significative, mais aussi de simplifier automatiquement certains groupes de variables trop corrélées entre elles, en gardant uniquement la plus représentative.

Pour plus de détail sur cette approche mathématique visant la recherche d'un indicateur synthétique de la réussite de la restauration du milieu, voir le mémoire de master 2 réalisé dans le cadre de ce projet (Tumahai 2017, p.29)

1. COMPARAISON DES DIFFÉRENTES MODALITÉS

Dans cette partie, l'étude de différentes zones présentant des modalités diverses est réalisée afin de tirer des conclusions utiles sur différents paramètres qui ont été testés en revégétalisation au cours de ces dernières décennies (effet du topsoil, effet de l'*Acacia spirorbis*, effet du substrat, effet des intrants...).

1.1. EFFET TOPSOIL

Quatre zones présentent des modalités avec ou sans topsoil (

Tableau 6). L'analyse statistique des données relatives à ces différentes zones permet d'évaluer l'effet de l'apport de topsoil sur la revégétalisation.

Tableau 6 : Descriptif des différentes modalités pour l'étude de l'effet du topsoil (les lignes grisées correspondent aux modalités avec topsoil).

Identifiants	Année de réalisat°	Désignation	Altitude	Pente	Type de substrat	Technique utilisée (PL= plantation)	Travail du sol	Utilisat° d'Hydro-réteneur	Utilisat° d'un paillage	Nbre d'espèces de maquis utilisées
CBG_MONA_MS_SZ01	2000	plateforme	256	2	top_soil	PL	ripage	oui	oui	6
CBG_MONA_MS_SZ02	2000	plateforme	248	2	latérite	PL	rien	oui	oui	5
CBG_RED_VP_SZ01	2009	plateforme	350	2	top_soil	PL	rien	oui	oui	19
CBG_RED_VP_SZ02	2009	plateforme	350	2	laterite_saprolite	PL	ripage	oui	oui	19
GORO_KUE_RPB_SZ01	2012	plateforme	107	5	latérite	PL	rien	oui	oui	30
GORO_KUE_RPB_SZ02	2012	plateforme	107	5	top_soil	PL	rien	oui	oui	30
NKY_LU_VP_PN01	2009	plateforme	500	2	top_soil	PL	décompactage	oui	non	22
NKY_LU_VP_PN02	2009	plateforme	500	2	latérite	PL	décompactage	oui	non	22

1.1.1. RÉSULTATS

Pour l'analyse des modalités avec ou sans topsoil, 9 variables de productivité et 3 variables de dynamique de l'écosystème ont été sélectionnées (Tableau 7).

L'analyse de l'ensemble des zones présentant des modalités avec et sans topsoil montre des différences significatives pour 11 des 12 variables sélectionnées avec des valeurs supérieures en présence de topsoil (Annexe 8.6.1: Figure 71 et Figure 72). Seul le nombre d'individus utilisés n'est pas significativement différent entre les zones avec ou sans topsoil.

Tableau 7 : Variables sélectionnées pour l'étude de l'effet du topsoil

Identifiant variables	Description
1 ETAT_GENERAL	Indice de l'état général
2 RECOUV_TOT	Indice de recouvrement total
3 RECOUV_HERB	Indice de recouvrement en espèces herbacées
4 RECOUV_LIGN	Indice de recouvrement en espèces ligneuses
5 Nbr_ind_UTI_20m2	nombre d'individus d'espèces utilisées
6 Nbr_ESP_TOT_20m2	Nombre d'espèces apparues
7 Nbr_ESP_APP_20m2	Nombre d'espèces apparues
8 MOY_HAUT_LIGN_UTI	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
9 MOY_HAUT_MOY_HERB_ESP_TOT	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
10 DIV_SHANN_APP	Indice de diversité de Shannon pour les espèces apparues
11 DIV_SIMP_UTI	Indice de diversité de Simpson pour les espèces utilisées
12 indice_reproduction	Indice de reproduction

La classification hiérarchique réalisée sur l'ACP montre l'existence de 2 clusters discriminant les modalités avec ou sans topsoil (Figure 11). Le premier cluster regroupe les modalités sans topsoil : CBG_MONA_MS_SZ02, CBG_RED_VP_SZ02, GORO_KUE_RPB_SZ01 et NKY_LU_VP_PN02. Ces dernières ont, en grande majorité, des valeurs des variables biologiques significativement inférieures aux modalités avec topsoil (CBG_MONA_MS_SZ01, CBG_RED_VP_SZ01, GORO_KUE_RPB_SZ02, NKY_LU_VP_PN01 ; Annexe 8.6.1: Figure 71 et Figure 72).

Les modalités avec topsoil présentent une plus forte densité d'individus notamment pour les familles des Dilleniaceae (*Hibbertia*), Araliaceae (*Polyscias*), Cunoniaceae (*Pancheria*), Orchidaceae (*Eriaxis*, *Caladenia*), Rhamnaceae (*Alphitonia*), Malpighiaceae (*Acridocarpus*), Lycopodiaceae (*Lycopodiella*), Araucariaceae (*Araucaria*) et Ericaceae (*Dracophyllum*, *Styphelia*).

On constate également une plus grande diversité d'espèces apparues sur les modalités avec topsoil : entre 9 et 29 espèces, par rapport aux modalités sans topsoil, présentant entre 3 et 8 espèces apparues (Annexe 8.6.1 : Tableau 37 & Tableau 38).

Entre 8 et 27 espèces sont apparues uniquement sur les modalités avec topsoil. Leur origine peut être double, elles sont soit issues de la banque de graines du topsoil, soit issues de graines des individus du milieu environnant. Certaines appartiennent aux mêmes espèces que celles plantées ajoutant de fait une troisième possibilité à leur origine, à savoir les pieds plantés (Annexe 8.6.1:

Tableau 37 & Tableau 39).

A l'inverse entre 0 et 3 espèces seulement sont apparues uniquement sur les modalités sans topsoil (Annexe 8.6.1 :Tableau 38 & Tableau 39). Certaines pourraient avoir pour origine les individus plantés comme *Casuarina collina*, *Costularia comosa* (pour CBG_MONA_MS_SZ02) ou encore *Sannantha leratii* (pour NKY_LU_VP_PN02). Les autres ne peuvent provenir que d'individus présents dans les alentours comme *Acacia spirorbis*, *Scaevola beckii* ou *Schoenus neocaledonicus*. Dans tous les cas, ces espèces ont trouvé la capacité de pousser dans des conditions sans topsoil sur un milieu de type latéritique (

Tableau 6).

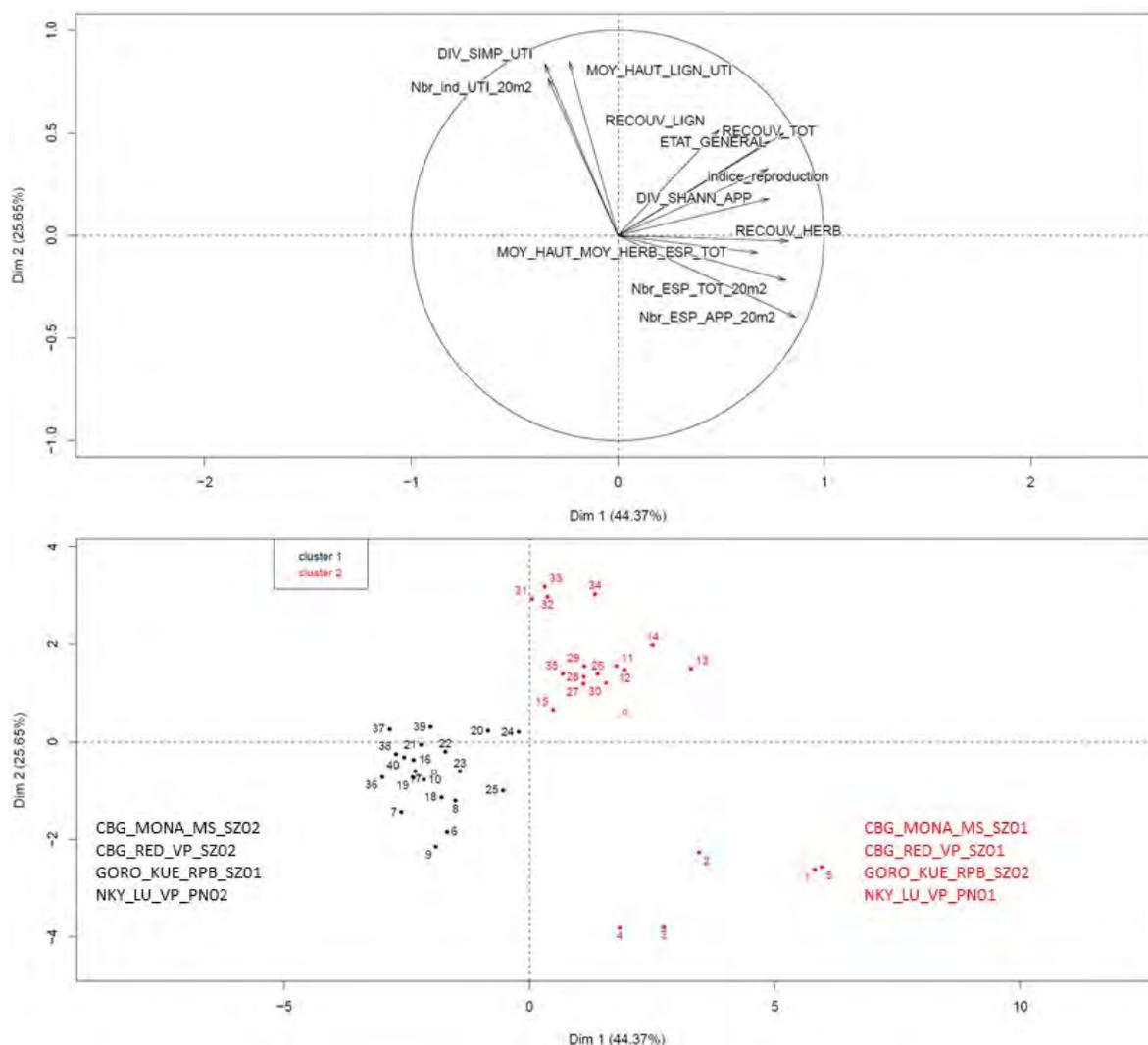
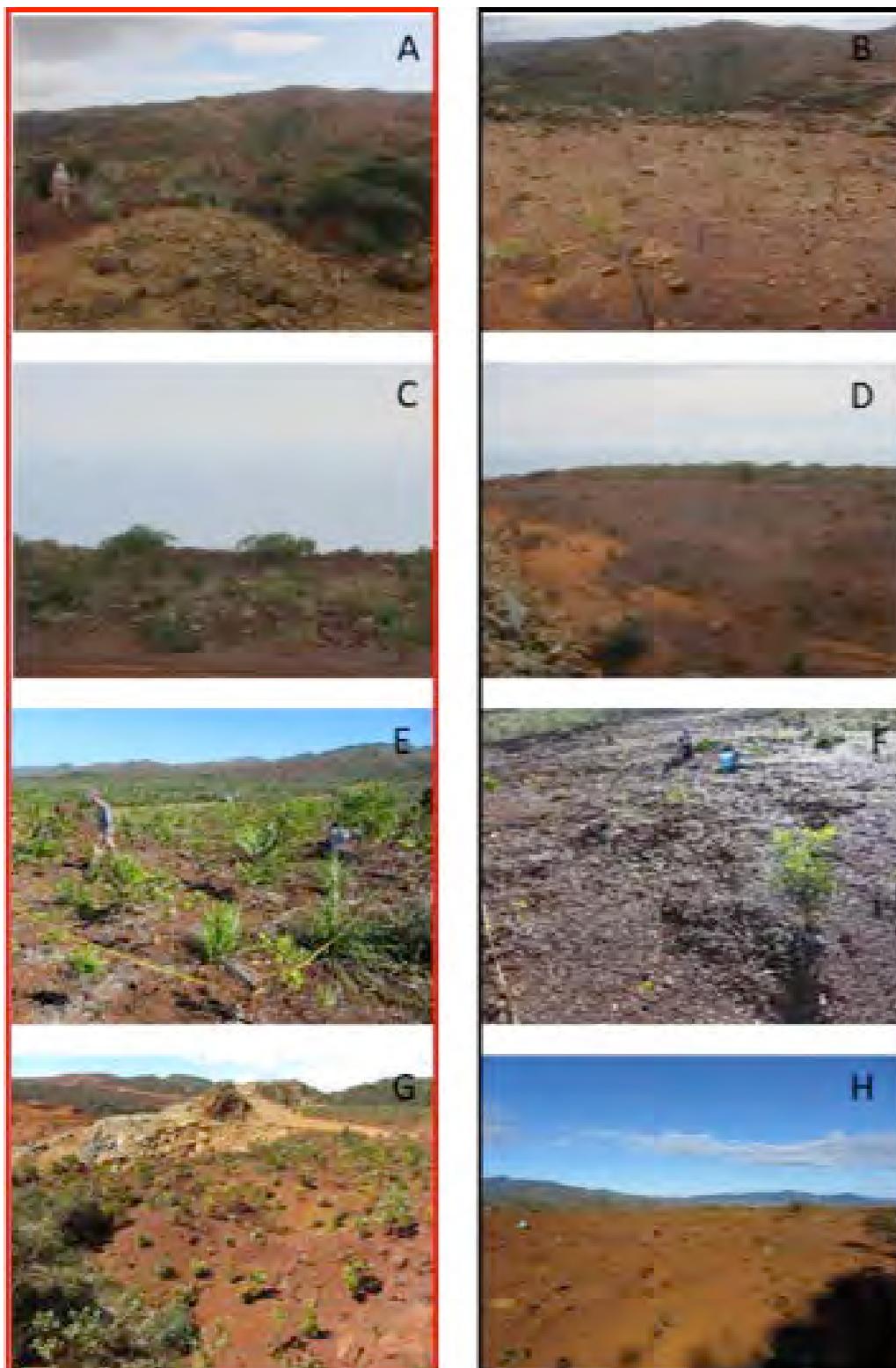


Figure 12 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique pour l'étude de l'effet topsoil.

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation et la figure du bas présente la projection des différents quadrats sur les deux premières composantes principales (en rouge les modalités avec topsoil et en noir sans)

Concernant la survie des pieds plantés, sur les modalités ayant reçu du topsoil, on retrouve en général plus de **66%** des espèces qui ont été utilisées, sauf dans le cas de CBG_MONA_MS, où seulement une espèce, présente dans la liste de départ, est retrouvée

sur le terrain : *Costularia pubescens* (Annexe 8.6.1: Tableau 39). Il est difficile d'apporter une interprétation à ce cas mais si on le soustrait du calcul, on arrive à **83%** de survie. Pour les modalités sans topsoil, on retrouve en moyenne **50%** des espèces plantées, chiffre qui baisse à **33%** sans le cas de CBG_MONA_MS (avec des disparités selon la modalité considérée - Annexe 8.6.1: Tableau 39).



En ce qui concerne la taille des individus plantés appartenant à des espèces utilisées communes aux deux modalités (avec et sans topsoil), on remarque que leurs tailles sont généralement significativement plus élevées pour les individus poussant sur topsoil (Figure 13). Dans le cas de CBG_MONA_MS, il n'y a qu'une seule espèce commune utilisée retrouvée dans les relévés dont la taille des individus ne présente pas de différence significative entre les deux modalités. Ceci réduit fortement la capacité d'interprétation.

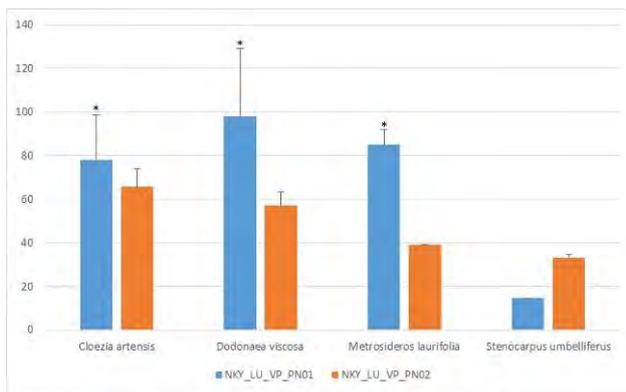
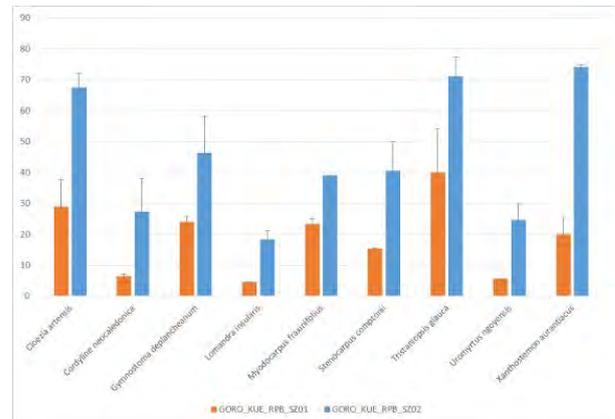
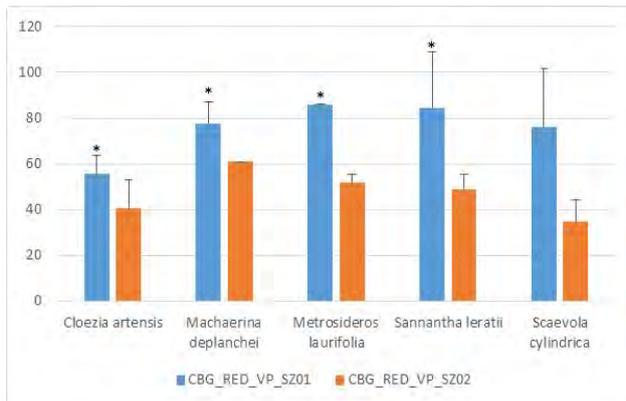


Figure 13 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces végétales communes aux différentes modalités sélectionnées pour l'étude de l'effet topsoil.

Les étoiles signifient qu'il existe des différences significatives entre les deux modalités pour une espèce donnée. En orange apparaissent les modalités sans topsoil et en bleu avec topsoil

3.3.1.2. Conclusions

Au regard des résultats présentés suite à l'étude des 4 zones de plantations (Annexe 8.6.1: Figure 73), **l'apport du topsoil sur la productivité et la dynamique des écosystèmes restaurés apparait très important**. Ainsi, sa présence :

- favorise la survie des espèces plantées (66% voire 83% contre 50% voire 33%), source potentielle de graines capables de germer et de redonner de nouveaux individus sur des distances plus ou moins longues selon le mode de dispersion propre, augmentant de fait potentiellement la densité totale de nouveaux recrûs ;
- favorise la croissance des espèces plantées (taille généralement significativement plus élevée) et leur capacité à fleurir et à fructifier ;
- favorise l'implantation de nouveaux recrûs riches en termes de densité et de diversité. Il est ainsi à souligner que le topsoil permet l'installation d'une gamme d'espèces plus large que celles plantées dont la production de certaines d'entre-elles n'est pas encore maîtrisée en pépinière. A noter que sur la verse Mona Sud de Cap Bocage dont la plantation est la plus ancienne (année 2000), la quasi totalité des espèces plantées ont disparu à l'exception de *Costularia pubescens* sur la modalité avec topsoil. De fait la quasi totalité des recrûs présents sur cette modalité proviennent soit de la banque de graines du topsoil, soit des individus environnants. Il est à noter que sur la même zone sans topsoil seules deux nouvelles espèces (non issues des individus plantés) ont réussi à s'implanter contre 28 sur la modalité avec topsoil. Une tendance identique à moindre niveau est retrouvée pour les autres zones.

Sur l'ensemble des modalités avec topsoil, les recrûs peuvent être issues :

- soit de graines provenant des individus plantés ;
 - soit de la banque de graines du topsoil. Ces dernières sont soit non dormantes et germent dans les premiers temps (ex : *Gymnostoma deplancheanum*), soit dormantes (ex : *Alphitonia neocaledonica*, *Machaerina deplanchei*) et germent plus tardivement et de manière plus étalée dans le temps comme montré par Amir et al. (2014) ;
 - soit de la dispersion de graines à partir des individus d'espèces présentes dans le milieu environnant à plus ou moins longue distance.
- favorise la croissance des nouveaux recrûs. Cet effet, largement décrit (L'Huillier et al. 2010 ; Richardson et al. 2012 ; Amir et al. 2014 ; Van Etten et al. 2014) est lié (1) à l'apport de matière organique disponible pour les plantes, (2) la présence de nutriments en quantité plus importante, et (3) à la présence de microorganismes bénéfiques présents dans le topsoil.

Il est à noter par ailleurs que si l'on compare les modalités topsoil entre-elles, le taux de recolonisation tant en densité qu'en diversité par des recrûs est variable. Diverses hypothèses peuvent expliquer ce phénomène. L'âge de l'expérimentation ou encore la « qualité » du topsoil et la façon dont il a été utilisé. Ainsi, il nous semble important de rappeler que ce dernier doit être utilisé de manière continue, c'est à dire étalé dans la suite de son prélèvement avec une période de stockage la plus courte possible (Amir et al. 2014). Une autre explication pourrait provenir aussi de la proximité des végétations alentours, il est conseillé de laisser à proximité des ouvrages de restauration des patches de végétation, comme source potentielle de propagules.

Malgré tout et quel que soit le cas de figure, l'ensemble de ces données montre que **les effets importants du topsoil tant sur la productivité que sur la dynamique de l'écosystème en font aujourd'hui un outil incontournable pour assurer une réussite de la restauration pérenne dans le temps**.

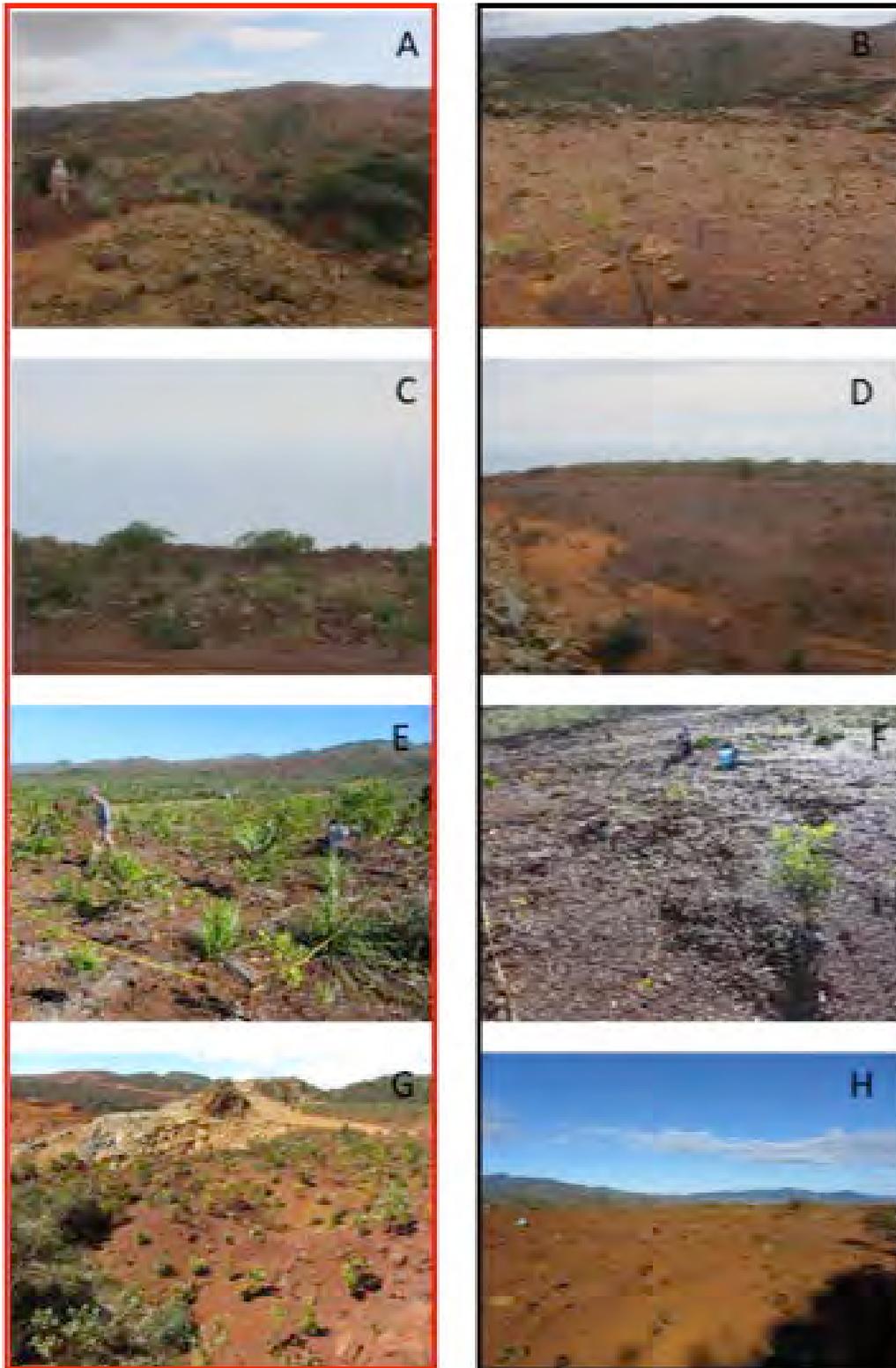


Figure 14 : Photos des différentes modalités utilisées pour l'effet topsoil

Avec A-B : Cap Bocage Mona Sud respectivement sous-zone 1 (avec topsoil) et 2 (sans topsoil) ; C-D : Cap Bocage vers Principale respectivement sous-zone 1 (avec topsoil) et 2 (sans topsoil) ; E-F : Goro – Route de Port Boisé respectivement 2 (avec topsoil) et 1 (sans topsoil) ; G- H : Nakéty Mine Lucienne Vers Principale respectivement 1 (avec topsoil) et 2 (sans topsoil) (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 11)

1.2. EFFET DU GAÏAC

Les analyses statistiques de l'effet du Gaïac (*Acacia spirorbis*) ont été réalisées à partir de l'étude de 9 zones pour un total de 11 modalités (Tableau 8).

Il est à noter que les différentes modalités ont été choisies car elles présentaient toutes des *A. spirorbis* dans le mélange d'espèces plantées au départ. Cependant, les densités d'*A. spirorbis* utilisées au moment des plantations ont été différentes selon les modalités. L'information exacte sur cette densité de départ n'étant pas disponible, les comparaisons ce sont faites sur les densités en *A. spirorbis* relevées sur le terrain (Figure 14) dans le cadre de ce projet RECO SYNTH. Ces dernières révèlent des différences importantes, en effet KNBO_S001_640_SZ01 présente la densité la plus élevée, avec en moyenne plus de 2 pieds au mètre carré d'*A. spirorbis* retrouvés. BOUA_KG_DS_SZ01 et NKY_LU_VD_SZ01 présentent des densités moindres considérées comme élevées avec respectivement une densité proche de 0,5 et proche de 1 pied/m². Les autres modalités présentent des densités inférieures à 0,2 pied/m² (Annexe 8.6.2: Figure 73).

Tableau 8 : Descriptif des différentes modalités pour l'étude de l'effet d'*Acacia spirorbis*

Identifiant	Année	Désignation	Altitude	Pente	Type de substrat	Technique utilisée (PL= plantation)	Nombre d'espèces de maquis utilisées
BOUA_KG_DS_SZ01	1990	banquette	249	0	latérite	PL	2
CDS_NING_CREP_HT	1992	banquette	760	0	latérite	PL	38
GORO_FER_COFR_SZ01	1988	plateforme	247	2	latérite	PL	5
KNBO_S001_640_SZ01	2011	talus	200	2	latérite	PL	21
KRB_M37_Z001_VL20	2002	banquette	996	0	latérite	PL	4
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_2	1999	plateforme	280	2	saprolite	PL	5
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3	1999	plateforme	283	2	saprolite	PL	5
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_6	1999	plateforme	378	0	saprolite	PL	5
NKY_LU_VD_SZ01	2003	plateforme	480	2	top_soil	PL	12
PORO_VDT_DEC_SZ01	2007	talus	130	40	latérite	PL	18
THIO_MOUL_Z001_SZ01	2008	talus	487	30	saprolite	PL	20

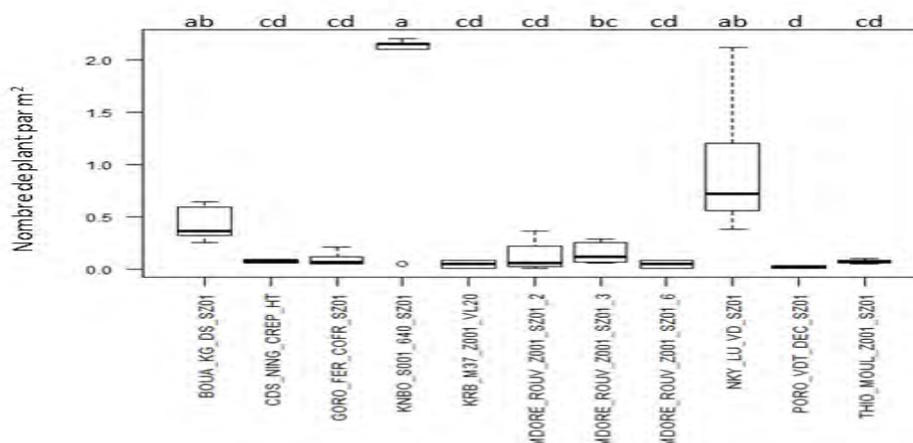


Figure 15 : Boxplot de la densité en mètre carré d'*Acacia spirorbis* dénombré sur chacune des modalités

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les modalités qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes

1.2.1. RÉSULTATS

Les 12 variables sélectionnées (Tableau 9) comprennent 9 variables de productivité et 3 variables de dynamique de l'écosystème

Tableau 9 : Variables sélectionnées pour l'étude de l'effet *Acacia spirorbis*

Identifiant variables	Description
1 RECOUV_TOT	Indice de recouvrement total
2 RECOUV_LIGN	Indice de recouvrement en espèces ligneuses
3 Nbr_ind_TOT_20m ²	Nombre d'individus d'espèces totales
4 Nbr_ind_APP_20m ²	Nombre d'individus d'espèces apparues
5 Nbr_ESP_TOT_20m ²	Nombre d'espèces totales
6 Nbr_ESP_UTI_20m ²	Nombre d'espèces utilisées
7 MOY_HAUT_HERB_UTI	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées utilisées (en cm)
8 MOY_HAUT_LIGN_UTI	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
9 MOY_DIAM_LIGN_UTI	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses utilisées (en cm)
10 MOY_HAUT_LIGN_APP	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses apparues (en cm)
11 DIV_SHANN_APP	Indice de diversité de Shannon pour les espèces apparues
12 DIV_SHANN_UTI	Indice de diversité de Shannon pour les espèces utilisées

La classification hiérarchique appliquée sur l'ACP des différentes modalités montrent qu'il existe 6 groupes (Figure 15).

Le premier groupe est composé des modalités CDS_NING_CREP_HT, PORO_VDT_DEC_SZ01 et THIO_MOUL_Z001_SZ01. Il est caractérisé par des valeurs élevées du nombre d'espèces utilisées, de la hauteur moyenne des espèces herbacées utilisées et de l'indice de Shannon pour les espèces utilisées (Annexe 8.6.2 : Figure 74, Figure 75 & Figure 76).

Le second groupe est composé par KRB_M37_Z001_VL20, MDORE_ROUV_Z001_SZ01_2 et MDORE_ROUV_Z001_SZ01_6. Ce groupe est caractérisé par de faibles valeurs pour plusieurs variables notamment l'indice de recouvrement total et en espèces ligneuses, le nombre d'individus totaux et le nombre d'individus apparus et la croissance des espèces ligneuses utilisées.

Ces deux premiers groupes présentent les plus faibles valeurs de densité en plants d'*A. spirorbis*.

Le troisième groupe comprend la modalité MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3 et il est caractérisé par des valeurs significativement plus élevées pour l'indice de Shannon des espèces apparues.

Le quatrième groupe composé de KNBO_S001_640_SZ01 est caractérisé par des valeurs élevées pour l'indice de recouvrement total, pour l'indice de recouvrement en espèces ligneuses et pour le diamètre des espèces ligneuses utilisées.

Le cinquième groupe comprend la modalité GORO_FER_COFR_SZ01 caractérisé par un nombre élevé d'individus totaux et d'individus apparus, par un nombre élevé d'espèces totales, ainsi que par de fortes valeurs de la hauteur moyenne des espèces ligneuses apparues.

Le dernier groupe est composé par les modalités BOUA_KG_DS_SZ01 et NKY_LU_VD_SZ01. Il est caractérisé par des valeurs importantes de l'indice de recouvrement total, de l'indice de recouvrement en espèces ligneuses, de la hauteur des ligneux utilisés, du diamètre des ligneux utilisés et de la hauteur des ligneux apparus.

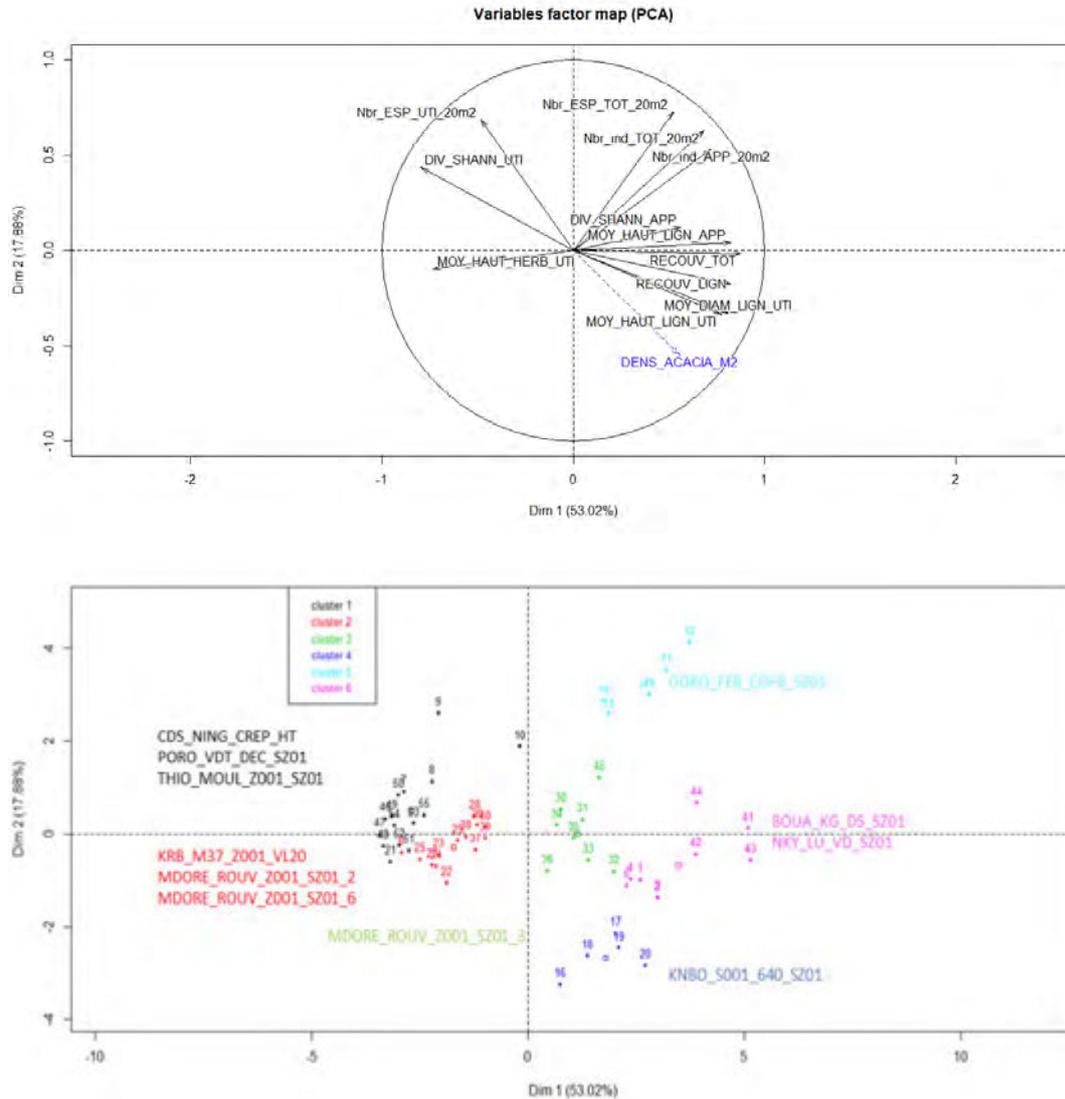


Figure 16 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique.

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation et la figure du bas présente les différents individus (ici les quadrats) projetés sur les deux premières composantes.

1.2.2. CONCLUSION

Pour rappel, dans cette analyse ont été prises en compte différentes modalités, certaines présentant une faible densité en *A. spirorbis*, inférieure à 0,2 individu/m², deux présentant des densités considérées comme fortes, entre 0,43 et 1 individu/m² (Bouadjelima-BOUA_KG_DS_SZ01 et Nakety- NKY_LU_VD_SZ01) et une à très forte densité sur le Koniambo-KNBO_S001_640_SZ01 avec près de 2 individus/m².

Le résultat des analyses permet de faire ressortir divers éléments :

- Globalement, les zones qui présentent les plus fortes densités en *A. spirorbis* sont plus largement caractérisées par des valeurs hautes de productivité de l'écosystème définies par un meilleur indice de recouvrement et une meilleure croissance des espèces ligneuses utilisées incluant bien entendu l'*A. spirorbis* lui-même. Ainsi, l'*A. spirorbis*

représente 26%, 32% et 96% du nombre d'individus totaux et 39%, 39% et 96% du nombre d'individus de type ligneux respectivement sur Bouadjelima, Nakety et Koniambo, ce qui révèle son caractère dominant. Ce ne sont pas non plus les zones qui présentent les plus grande diversité et densité d'individus apparus ;

- Sur les zones de trop forte densité en *A. spirorbis* comme sur le Koniambo, ceci joue en défaveur de la dynamique de l'écosystème dont les variables ne présentent pas de bonnes valeurs, notamment le nombre d'individus totaux, le nombre d'individus apparus et la diversité spécifique. Ainsi, sur Koniambo, le nombre d'espèces apparues et le nombre d'individus apparus sont respectivement de 0,4 et 32 pour 20 m² en moyenne. Fait marquant 99% de ces individus sont représentés par de l'*A. spirorbis* alors que ce sont 21 espèces différentes qui ont été plantées (seules 4 espèces ont été retrouvées vivantes). Ainsi à l'exception d'*A. spirorbis*, quasiment aucune autre espèce n'a pu recoloniser l'espace.

Une comparaison avec Bouadjelima qui présente des conditions comparables en altitude et en substrat, même si l'expérimentation est plus ancienne (1990), permet de montrer que pour une densité plus faible en *A. spirorbis*, même si elle reste importante, le nombre d'espèces apparues et le nombre d'individus apparus sont meilleurs avec respectivement 2,2 et 30 pour 20 m². A noter que dans ce cas, seul 26% des individus apparus sont des *A. spirorbis*. Qui plus est, cette zone n'ayant fait l'objet que de plantations de gaïac et bois de fer, la recolonisation n'a pu se faire que par le milieu environnant, ces deux espèces ayant créé des conditions favorables à l'implantation de recrûs et à la complexification de l'écosystème.

La même analyse menée sur Nakety, plantation plus récente (2003), mais réalisée sur du topsoil, révèle, malgré une densité de l'ordre de 1 individu d'*A. spirorbis*/m², que le nombre d'espèces apparues et le nombre d'individus apparus, avec respectivement 6 et 59 pour 20m² (dont 32% sont des *A. spirorbis*), sont favorables à une dynamique de recolonisation. Cependant, il est trop tôt aujourd'hui pour affirmer que la densité en gaïac et son recouvrement, sa croissance pouvant encore se poursuivre, ne conduira pas à un blocage ou à un ralentissement de la succession écologique. La présence du topsoil peut expliquer comme nous l'avons montré dans le paragraphe précédent la diversité spécifique et la densité en espèces apparues qui peuvent être issues de la banque de graines de ce dernier ;

- Lorsque la modalité contient une densité faible en *A. spirorbis* comme dans le cas de COFREMI sur Goro (plantation de 1988 sur substrat latéritique), l'écosystème apparaît comme plus dynamique (Figure 17), caractérisé par un nombre d'individus totaux et apparus plus importants que pour Boualoudjelima et Nakéty, ces deux derniers présentant à l'inverse une meilleure productivité et un recouvrement important à relier à l'*Acacia spirorbis*.
- Certaines conditions sont défavorables à une réussite de la restauration même si la densité d'*A. spirorbis* utilisée est faible. Ce sont les plantations représentées en rouge et en noir sur la Figure 15 à gauche de l'axe vertical. En effet, ces dernières présentent tant une productivité qu'une dynamique faible. Les éléments pouvant expliquer ces résultats sont divers et doivent pris au cas par cas :
 - Pour PORO_VDT_DEC_SZ01, la pente de l'ordre de 40° semble être le facteur défavorable non seulement à l'implantation de l'*A. spirorbis* mais aussi des autres espèces plantées, même si le sol en présence est identifié comme de la latérite (plutôt favorable, cf. plus bas);
 - Pour KRB_M37_Z001_VL20, l'altitude de 996 mètres peut expliquer ce résultat, en effet il est connu que la zone de répartition naturelle du Gaïac est situé en dessous de 500m, son installation semble être difficile à cette altitude ;
 - Pour THIO_MOUL_Z001_SZ01 et MDORE_ROUV_Z001_SZ01-2 & 6, le substrat peut expliquer ce résultat. En effet, toutes ces plantations ont été réalisées sur saprolite. Ce substrat apparaît défavorable à l'installation de l'*A. spirorbis* (Figure 16)

et plus généralement aux espèces utilisées en plantation au regard du nombre élevées de 22 espèces plantées pour THIO_MOUL_Z001_SZ01 qui ne ce sont que très peu maintenues. A noter que MDORE_ROUV_Z001_SZ01-3 présente une meilleure réussite alors qu'elle a aussi été réalisée sur saprolite, ceci peut être attribué en partie à son exposition (cf Partie 3.7.1).

La Figure 16 montre une discrimination significative ($p=0.0003$) des trois types de substrats majeurs saprolite, latérite et topsoil selon la première composante principale (axe des abscisses) qui est associée à la réussite de la restauration. Ainsi l'usage de topsoil sur la droite (valeurs les plus élevées des variables prises en compte) donne de meilleurs résultats qu'avec un substrat de type latérite ou saprolite qui est associé aux moins bons résultats.

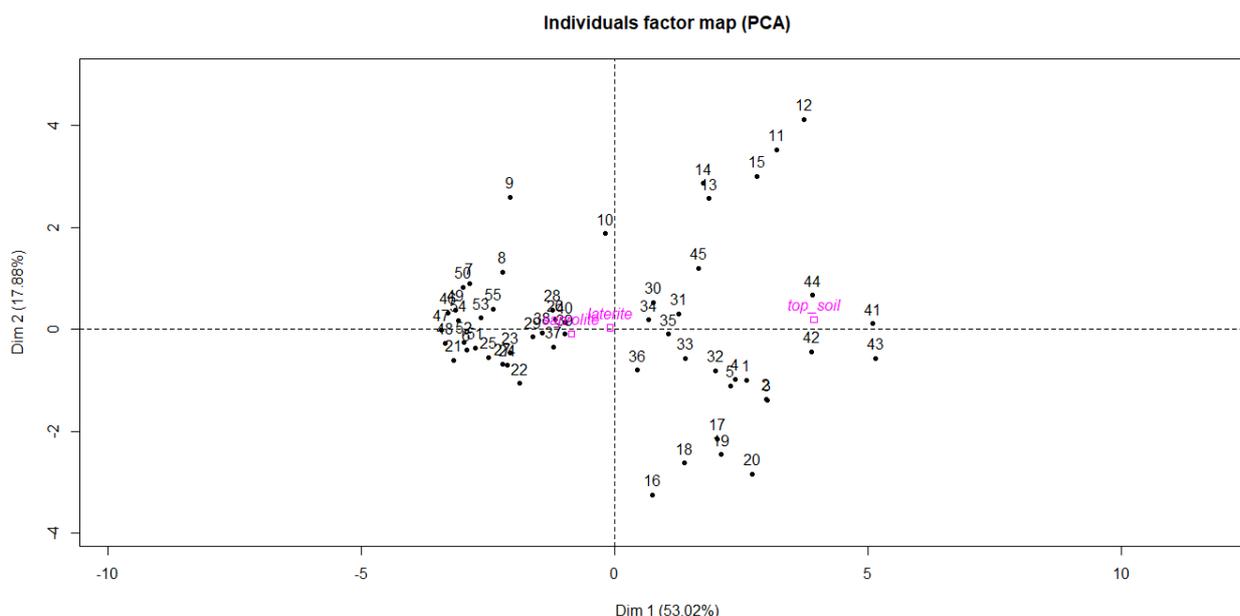


Figure 17 : Projection dans le plan principal engendré par les deux premières composantes principales des observations correspondant aux sous-zones en considérant la variable substrat comme variable qualitative illustrative en violet.

Les deux premières composantes principales expliquent 70.9% de la variabilité totale.

Ainsi, comme cela a déjà été montré, le comportement grégaire de l'*A. spirorbis* (L'Huillier et al. 2010) ne favorise pas l'implantation de nouvelles espèces **lorsqu'il est utilisé à trop forte densité**, car il crée un écosystème fermé et monospécifique, avec un recouvrement au sol important, peu favorable à l'implantation naturelle d'espèces autochtones variées sous leur couvert. Cela permet cependant d'avoir une zone revégétalisée avec un recouvrement relativement rapide de la zone et une bonne productivité.

Par contre, **à une densité plus faible et avec du temps, et à des altitudes moyennes à basses, l'installation de nouvelles espèces se fait au-dessous des *A. spirorbis*** et permet un amorçage de la dynamique de succession écologique.

L'effet de la densité en *A. spirorbis*, mise en évidence par nos analyses, **est donc fondamental à prendre en compte** puisqu'elle influence la dynamique de l'écosystème : une plantation à forte densité permettra un maintien du sol mais qui ne constitue pas une restauration écologique (pas ou peu de succession secondaire), une plantation à faible densité permettra une restauration attendue (succession secondaire possible).

Sur ce dernier point, l'utilisation d'*A. spirorbis* à des densités moyennes à faibles (moins de 0,5 pied au mètre carré) pourrait permettre de conserver une bonne productivité de l'écosystème tout en permettant la mise en place d'une dynamique satisfaisante de recolonisation du milieu par les espèces avoisinantes ou par les graines contenues dans la banque de graines. Il convient cependant de signaler que les analyses que nous avons menées ne permettent pas d'affirmer que le recouvrement des gaïacs n'aura pas un effet bloquant à long terme et qu'il ne faudrait pas intervenir pour éliminer les plants de gaïacs dominants pour permettre aux recrûs présents sous ces plants de se développer (Figure 17). Sur certaines zones comme celle de GORO_FER_COFR_SZ01, on constate qu'un dépérissement voire la mort d'individus adultes de gaïacs laisse place à une végétation diversifiée avec un bon développement (Figure 17).

Il nous semble essentiel ici d'insister sur le fait que les grandes tendances obtenues ici permettent d'ores et déjà d'orienter les décisions concernant l'utilisation du gaïac, mais il conviendrait de lancer très vite des expérimentations d'ordre scientifique sur un projet spécifique afin de répondre de manière définitive à la problématique posée par cette espèce.



Figure 18 : Illustrations de l'effet de la densité en *A. spirorbis* sur la productivité et la dynamique de l'écosystème (présence de recrûs).

A gauche, Nakéty – Verse Domergue ; A droite : Goro – FER COFREMI.

1.3. EFFET DU SUBSTRAT

1.3.1. CAS DE CAMPS DES SAPINS :

Les analyses statistiques des données relatives aux substrats (saprolite ou latérite) sur la réussite des travaux de revégétalisation/restauration sur le site du Camp Des Sapins (CDS) concernent 3 modalités (Tableau 10).

Tableau 10 : Descriptif des différentes modalités sur Camps des Sapins

Identifiant	Année de réalisat°	Désignat°	Altitude	Pente	Type de substrat	Nbre d'espèces de maquis utilisées	% de Terre fine	Orientation par rapport à la pente
CDS_NING_CREP_EX T	1992	banquette	760	0	saprolite/ latérite	38	[5-15[	Nord-Ouest
CDS_NING_CREP_HT	1992	banquette	760	0	latérite	38	[15-30[	Nord-Ouest
CDS_NING_Z001_E508	1992	talus	741	5	saprolite	38	[>50[	Sud-Ouest

1.3.1.1. Résultats

Neuf variables de productivité et trois variables de dynamique de l'écosystème ont été sélectionnées pour l'analyse de ces trois modalités (Tableau 11).

Tableau 11 : Variables sélectionnées pour l'étude des différentes modalités sur Camps des sapins

Identifiant variables	Description
1 ETAT_GENERAL	Indice de l'état général
2 RECOUV_TOT	Indice de recouvrement total
3 RECOUV_HERB	Indice de recouvrement en espèces herbacées
4 RECOUV_LIGN	Indice de recouvrement en espèces ligneuses
5 Nbr_ind_TOT_20m2	nombre d'individus d'espèces apparues
6 Nbr_ind_APP_20m2	nombre d'individus d'espèces apparues
7 Nbr_ESP_TOT_20m2	Nombre d'espèces apparues
8 Nbr_ESP_APP_20m2	Nombre d'espèces apparues
9 DEGAT	Indice de dégât
10 MOY_DIAM_LIGN_UTI	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses utilisées (en cm)
11 MOY_HAUT_HERB_TOT	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées totales (en cm)
12 indice_reproduction	Indice de reproduction

Les plantations sur Camps des sapins ont été réalisées par le CTFT/ORSTOM en 1992, et comportent 3 modalités différentes par leur emplacement (une sur le Ningua et deux au niveau de Crépuscule), leur orientation et le type de sol. Sur Crépuscule, les modalités sont des banquettes de latérite (CREP_HT) ou latérite/sparolite (CREP_EXT) situées à 760 m d'altitude entourées de maquis arbustifs ou ligno-herbacées et de sol nu. On peut noter que le sol comporte une quantité moyenne voire faible de terre fine (inférieur à 30%), et est constitué de particules de taille plus importante comme des cailloux, des graviers ou des pierres. Sur le Ningua, la modalité est une plantation sur un talus saprolitique à faible pente (5°) située à 740 m d'altitude entourée par du sol nu et du maquis ligno-herbacée. Cette modalité présente un pourcentage de terre fine important (> à 50%), représentant la majorité des particules du sol.

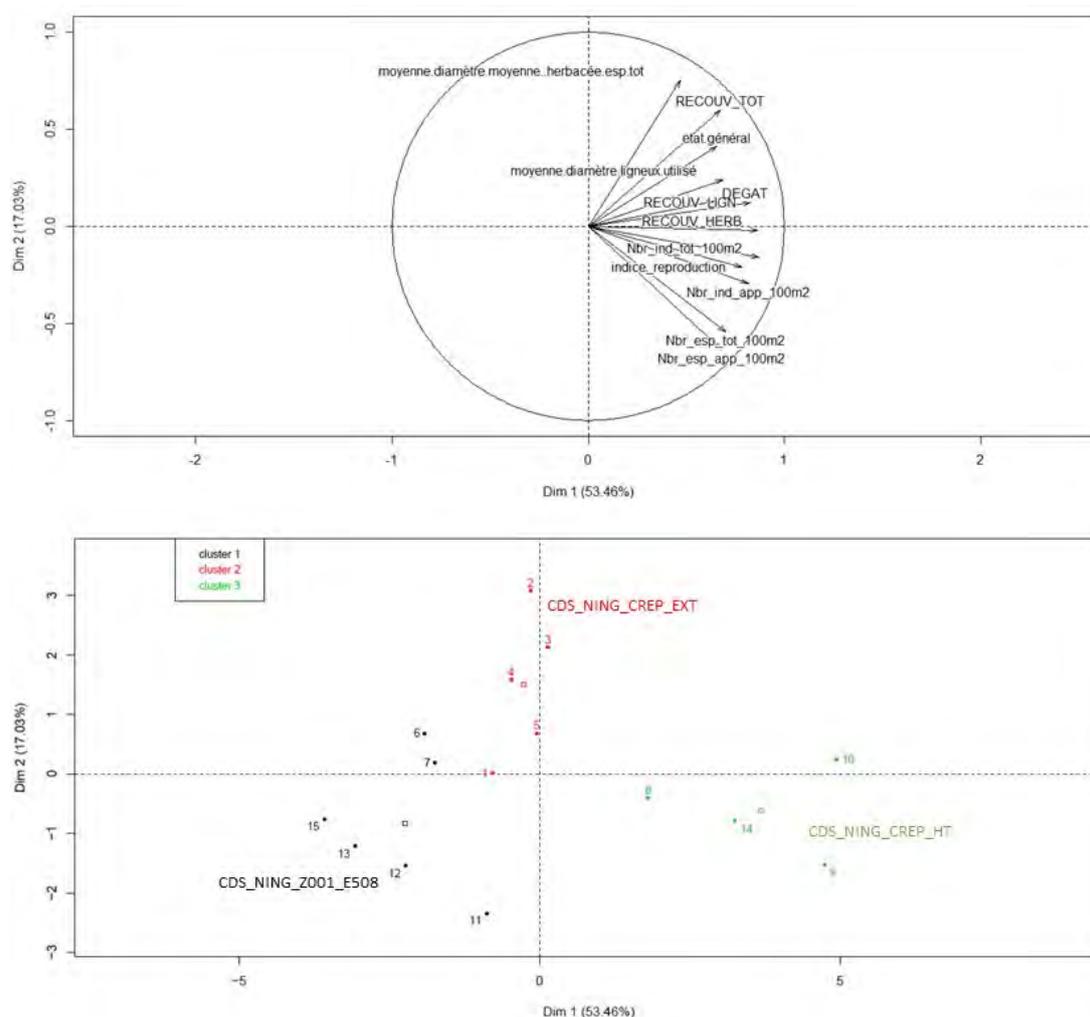


Figure 19 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique.

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation et la figure du bas présente les différents individus (ici les quadrats) projetés sur les deux premières composantes.

La classification hiérarchique montre qu'il existe une différence entre les trois modalités qui constituent l'essai 508 du CTFT/ORSTOM (Figure 18). La première modalité située sur le Ningua CDS_NING_Z001_E508 présente les valeurs les plus faibles pour l'indice de recouvrement total en espèces ligneuses et en espèces herbacées, pour l'indice de reproduction et pour le diamètre moyen des espèces herbacées totales (Annexe 8.6.3.1: Figure 77 & Figure 78). La seconde modalité CDS_NING_CREP_EXT est quant à elle caractérisée par des valeurs plus importantes de l'indice de l'état général, du recouvrement total et du diamètre moyen des espèces herbacées totales que CDS_NING_Z001_E508. La troisième modalité CDS_NING_CREP_HT est caractérisée par des valeurs plus importantes pour l'indice de l'état général, l'indice de recouvrement total, en espèces herbacées et ligneuses, le nombre d'espèces totales et apparues, l'indice de reproduction, le nombre d'individus totaux et apparus.

Au niveau des espèces végétales totales retrouvées au moment des relevés, la modalité CDS_NING_Z001_E508 est caractérisée par une plus forte densité de Proteaceae (*Grevillea*), de Rubiaceae (*Normandia*) et une densité moins importante de Casuarinaceae (*Casuarina* et *Gymnostoma*). La modalité CDS_NING_CREP_EXT est caractérisée par la plus forte densité en Casuarinaceae (présence de *Casuarina* et 5 espèces de *Gymnostoma*). Enfin, CDS_NING_CREP_HT est caractérisée par la présence de Cyperaceae (forte densité de *Costularia* et *Schoenus*), d'Ericaceae (*Dracophyllum*) et de Fabaceae (seule zone à présenter des *Acacia sprirorbis*).

Si l'on s'intéresse maintenant aux espèces apparues (nouveaux recrûs), retrouvées uniquement sur l'une des modalités, c'est CDS_NING_CREP_HT qui présente le plus grand nombre d'espèces, 6 contre 3 pour chacune des autres modalités (Annexe 8.6.3.1: Tableau 41).

Concernant les espèces utilisées au moment de la plantation, communes aux 3 modalités, et qui persistent au moment des relevés, seules quelques différences significatives apparaissent (Annexe 8.6.3.1:

Tableau 40) : *Gymnostoma chamaecyparis* et *G. leucodon* présentent des hauteurs significativement plus importantes sur CDS_NING_Z001_E508 (Figure 19). Une espèce de *Xanthostemon* a, quant à elle, une hauteur significativement plus élevée sur CDS_NING_CREP_EXT et CDS_NING_CREP_HT.

Parmi les 38 espèces végétales plantées, seule une vingtaine est retrouvée sur l'ensemble des modalités (Annexe 8.6.3.1: Tableau 42). Il est à noter que la modalité CDS_NING_CREP_HT présente 4 espèces utilisées qui ne sont retrouvées que sur cette modalité et 6 espèces apparues uniques à cette modalité (Annexe 8.6.3.1: Tableau 41).

Enfin il est à noter qu'un certain nombre d'espèces utilisées ne sont pas retrouvées dans nos relevés (Annexe 8.6.3.1: Tableau 43).

Dans cette étude de cas, l'effet banquette/talus est complexe à évaluer car plusieurs facteurs, dont le substrat, la situation ou encore la pierrosité, ne permettent pas une comparaison aisée. Cependant et sans tirer de conclusions fermes, il semblerait que les deux essais menés sur banquette donnent globalement de meilleurs résultats que celui mené sur talus.

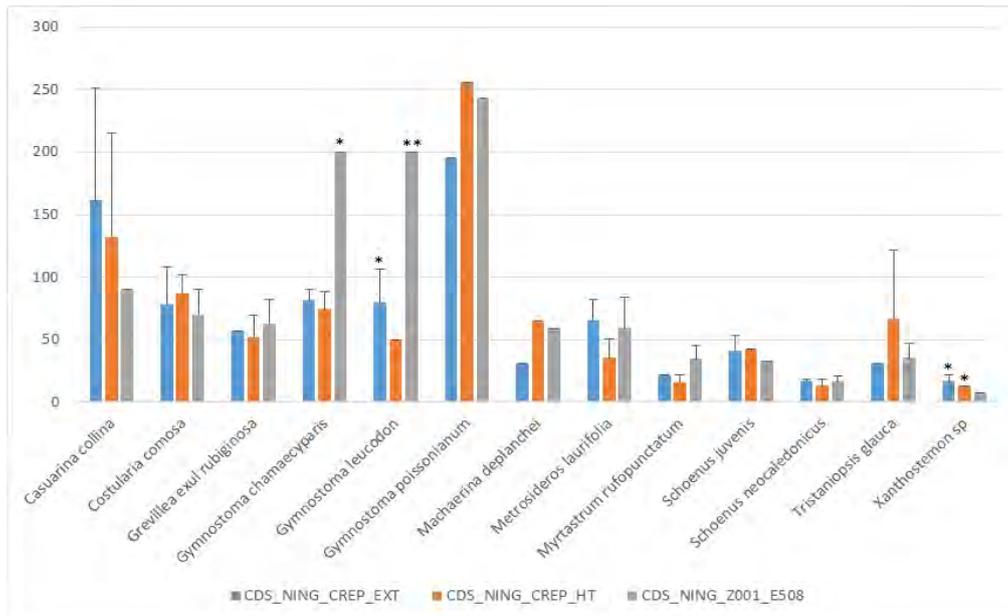


Figure 20 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces végétales utilisées au moment de la plantation, communes aux 3 modalités, et qui persistent au moment des relevés.

1.3.1.2. Conclusion

Les différentes modalités étudiées sur le CDS permettent une mise en évidence de différences de comportement en fonction du type de substrat, mais aussi de l'orientation géographique du site. De manière globale, la modalité présentant la meilleure revégétalisation semble être la modalité Haut sur Crépuscule (CDS_NING_CREP_HT), bien que peu de différences significatives apparaissent entre les modalités. Cette modalité présente de meilleures valeurs de productivité et de dynamique que les deux autres. De plus, cette modalité est la plus fournie en termes de diversité spécifique.

Ce résultat conforte ceux déjà présentés dans le paragraphe « effet du topsoil » et « effet de l'*Acacia spirorbis* », avec les meilleures valeurs biologiques obtenues sur la modalité avec latérite prédominante (CDS_NING_CREP_HT) puis sur CDS_NING_CREP_EXT avec un mélange latérite/saprolite un peu moins favorable. De plus ces deux modalités présentent toutes les deux de plus fortes densités en espèces capables de fixer l'azote atmosphérique (Casuarinaceae ou Fabaceae). Enfin, le pourcentage de terre fine étant plus faible et la pierrosité plus forte, ceci serait favorable à l'implantation des espèces. Il a en effet déjà été montré par exemple que des particules plus grossières du sol permettent la création de micro-habitats plus favorables à l'implantation de certaines espèces (Wagner et al, 2015 ; Peck et al, 2016).

A l'inverse, dans le cas de CDS_NING_Z001_E508, la présence d'un sol saprolitique renforcée par un pourcentage de terre fine élevé est très défavorable. Ceci peut être relié à la tendance des substrats trop fins à s'indurer et à créer de l'anaérobiose peu propice aux plantes.

Aussi, l'analyse des différences entre les espèces plantées que l'on retrouve ou non sur les différentes modalités au moment de nos relevés permet d'émettre des hypothèses sur leur affinité avec le substrat. Par exemple pour les *Gymnostoma*, *G. chameacyparis*, *G. leucodon*

et *G. poissonianum* sont retrouvées sur tous les types de substrats mais seuls *G. chameacyparis* et *G. leucodon* présentent de meilleures croissances sur saprolite. Concernant *Arillastrum gummiferum*, *Cloezia artensis* et *Serianthes calycina*, ces espèces ne semblent pas pouvoir survivre sur la latérite additionnée ou non de saprolite alors que *Dodonaea viscosa*, *Geissois pruinosa*, *Peripterygia marginata* et *Xanthostemon multiflorus* sont uniquement retrouvées sur ce type de substrat.

Si l'on regarde les espèces nouvellement apparues, *Costularia nervosa* semble une espèce adaptée au substrat saprolitique, alors que *C. arundinacea* se retrouve plutôt sur substrat latéritique. Il en est de même pour *Dracophyllum ramosum*, *Eriaxis rigida*, *Longetia buxoides* et *Polyscias sp* qui sont uniquement retrouvées sur substrat latéritique.

Malgré tous ces éléments, il est à noter que les plantations du Camps des sapins de 1992 ne peuvent être considérées comme un bon exemple de réussite au regard de la productivité et de la dynamique des écosystèmes (Annexe 8.6.3.1: Figure 73).

1.3.2. LA MINE A1 SUR GORO

L'analyse de l'effet substrat (saprolite ou latérite) sur la réussite des travaux de revégétalisation/restauration sur la Mine A1 à Goro concerne 2 modalités (Tableau 12).

Tableau 12 : Descriptif des différentes modalités sur la Mine A1

Identifiant	Année	Désignation	Altitude	Pente	Type de substrat	Technique utilisée (PL=plantation)	Utilisation d'hydro-rétenteur	Utilisation de paillage	Nombre d'espèces de maquis utilisées
GORO_USINEKUE_A1_SZ01	2011	plateforme	180	2	saprolite	PL	oui	oui	36
GORO_USINEKUE_A1_SZ02	2011	talus	180	15	latérite	PL	oui	oui	36

1.3.2.1. Résultats

Les variables sélectionnées (Tableau 13) sont composées de 8 variables de productivités (indice de l'état général, de recouvrement et de croissance des espèces ligneuses utilisées et totales) et 2 variables de dynamique (croissance des espèces apparues). Ici les 10 variables conservées sont les seules qui montrent un effet significatif sur la constitution des groupes dans la classification hiérarchique.

Tableau 13: Variables sélectionnées pour l'étude des différentes modalités sur la Mine A1

Identifiant variables	Description
1 état.général	Indice de l'état général
2 RECOUV_TOT	Indice de recouvrement total
3 RECOUV_LIGN	Indice de recouvrement en espèces ligneuses
4 RECOUV_EE	Indice de recouvrement en espèces exotiques
5 moyenne.hauteur.ligneux.utilisé	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
6 moyenne.diamètre.ligneux.utilisé	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses utilisées (en cm)
7 moyenne.hauteur.ligneux.apparue	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses apparues (en cm)
8 moyenne.diamètre.ligneux.apparue	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses apparues (en cm)
9 moyenne.hauteur.moyenne.ligneuse.esp.tot	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses totales (en cm)
10 moyenne.diamètre.moyenne.ligneuse.esp.tot	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses totales (en cm)

La classification hiérarchique sur les 2 modalités de la mine A1 permet de différencier les deux modalités sur plusieurs variables (Figure 20). Ainsi la modalité 2, zone de plantation sur un talus latéritique, présente des valeurs plus élevées que pour la modalité 1, en ce qui concerne l'indice de l'état général, l'indice de recouvrement total, l'indice de recouvrement en espèces ligneuses et en espèces exotique, la hauteur et le diamètre moyen des ligneuses utilisées, apparues et totales (Figure 21 ; Annexe 8.6.3.2: Figure 80 & Figure 81).

La modalité 2 est aussi caractérisée par une plus forte densité de Casuarinaceae (*Gymnostoma deplancheanum*) que dans la modalité 1.

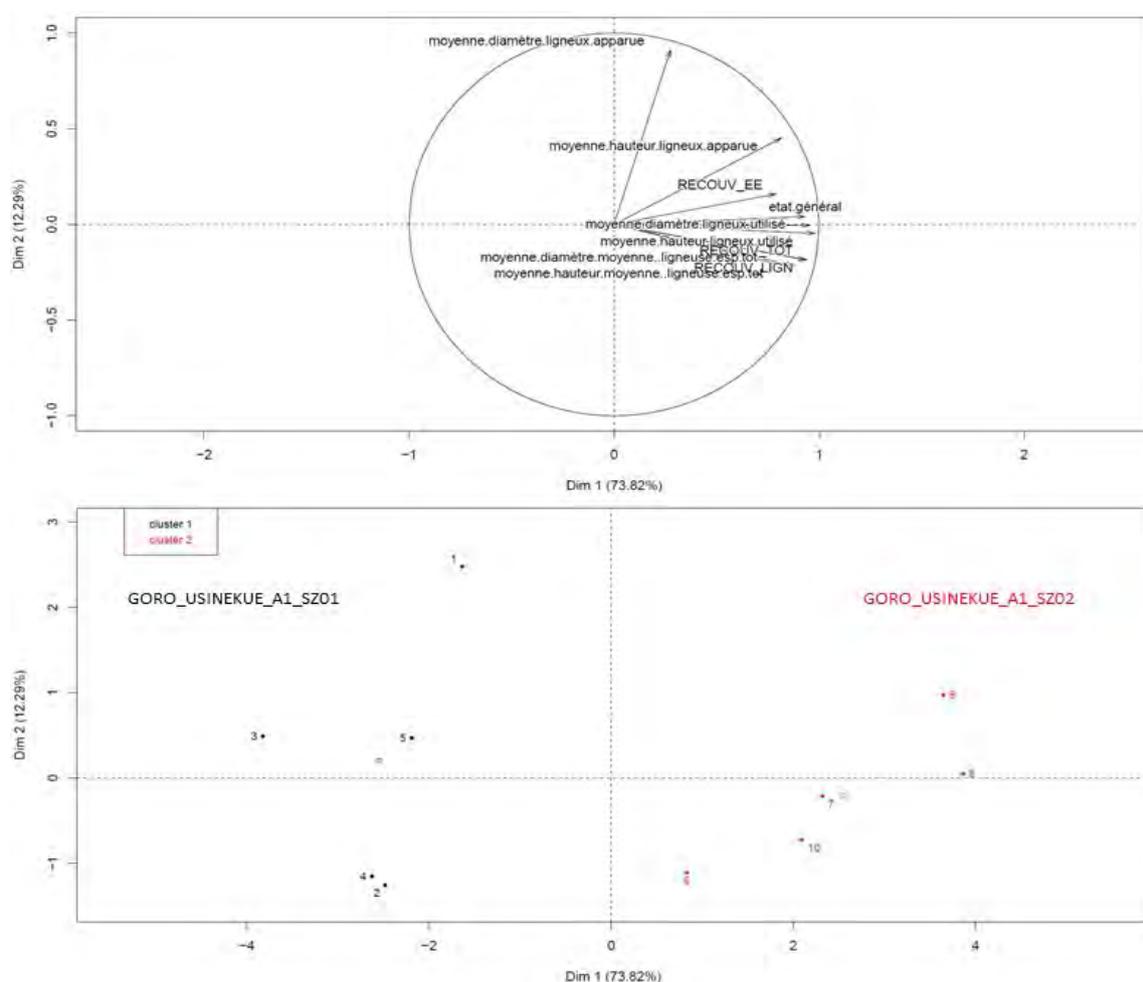


Figure 21 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique sur la Mine A1.

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation et la figure du bas présente les différents individus (ici les quadrats) projetés sur les deux premières composantes principales



Figure 22 : Photos des deux modalités classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 20) sur la Mine A1

Au niveau de la taille des différentes espèces végétales utilisées, seules *Cordyline neocaledonica* et *Gymnostoma deplancheanum* présentent des hauteurs significativement plus élevées sur la modalité 2 (latérite). Les autres espèces végétales ne présentent pas de différences significatives au niveau de leur taille moyenne (Figure 22).

Il est aussi à noter qu'on retrouve plus d'espèces végétales apparues sur la modalité 2 (6 espèces dont 5 sont apparues uniquement sur cette modalité) que sur la modalité 1 (4 espèces dont 3 sont apparues uniquement sur cette modalité -Annexe 8.6.3.2 : Tableau 44 & Tableau 45).

Enfin, sur les 38 espèces plantées, 29 ont été retrouvées dans nos relevés, dont 26 sur la modalité 1 contre 21 sur la modalité 2 certaines étant exclusives de l'une ou l'autre des modalités (Annexe 8.6.3.2 : Tableau 46).

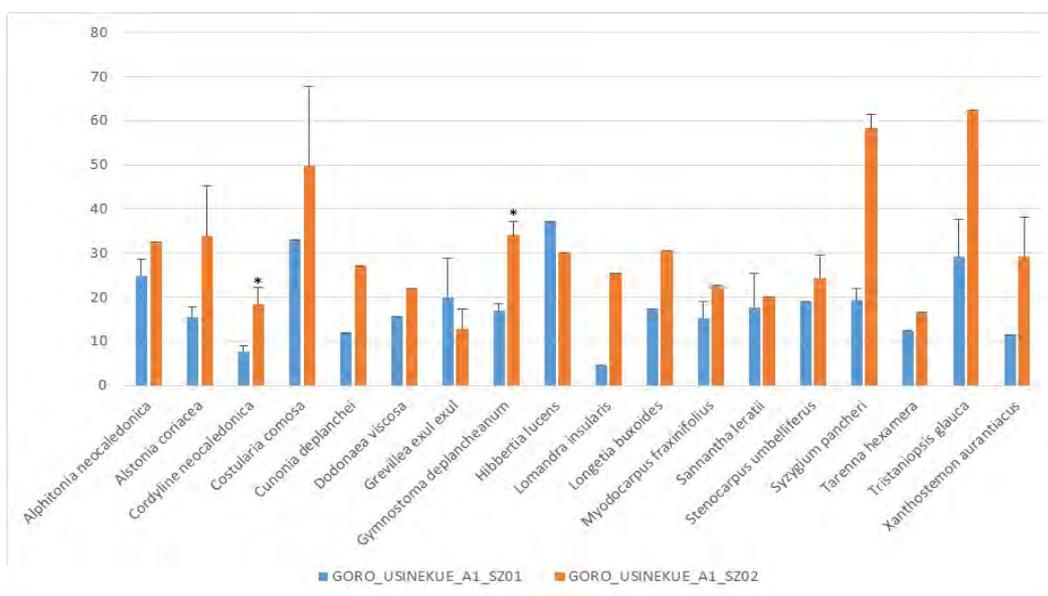


Figure 23 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités sur la Mine A1

La projection dans le plan principal des variables substrats (latérite vs saprolite) et désignation (talus vs banquette) sur l'ACP de la Figure 20, montre une discrimination significative, $p=0.0027$ et $p=0.0027$, pour ces deux variables. Il est impossible dans ce cas d'attribuer ce résultat plus à une variable qu'à l'autre. Cependant, au regard des résultats déjà obtenus sur l'effet du substrat dans les paragraphes précédents, il semblerait que cette variable soit la plus explicative.

1.3.2.2. Conclusion

Deux modalités ont été prises en compte dans nos relevés de la mine A1. La première modalité est une plantation sur une plateforme saprolitique. La seconde est une plantation sur talus latéritique. Ces deux modalités, situées à 180 m d'altitude, sont sur un substrat qualifié de meuble ; elles présentent la même composition en termes de tailles de particules du sol, entre 15 et 30% de terre fine, entre 30 et 50% de graviers et 15 à 30% de pierres.

Ici pour une même charge caillouteuse, le substrat latéritique apparaît comme plus favorable que le substrat saprolitique, ce qui conforte les résultats précédents. Ceci tend également à conforter notre hypothèse sur le rôle de la piérosité pour les modalités de Camps des Sapins, seules modalités où la saprolite apparaît comme plus favorable.

Tout comme pour le Camps des Sapins, il semble possible de distinguer des espèces qui se développent préférentiellement sur l'un ou l'autre des substrats. Par exemple sur latérite, parmi les espèces utilisées au moment de la plantation, il est à noter *Costularia pubescens*, *Gardenia aubryi* et *Stenocarpus comptonii* ne sont retrouvées que le talus latéritique qui semble favorable à leur développement. A l'inverse, certaines espèces utilisées ne se retrouvent que sur saprolite comme *Cloezia artensis* (idem sur CDS), *Codia albifrons*, *Flagellaria indica*, *Joinvillea plicata*, *Oxera neriifolia*, *Scaevola cylindrica*, *Storckiella pancheri* et *Syzygium ngoyense*. Ces données pourraient être intéressantes pour appliquer un mélange d'espèces plus spécifique en fonction du type de substrat.

1.4. DIFFÉRENCE ENTRE SEMIS HYDRAULIQUE (AVEC OU SANS TRAVAIL DU SOL) ET SEMIS MANUEL : EXEMPLE DE LA VERSE BN4

L'analyse de la différence entre semis hydraulique et semis manuel en termes de réussite de la restauration a été menée sur la zone de la verse BN4 à Goro présentant 3 modalités (Tableau 14). Il est à noter que le travail du sol par griffage a consisté à travailler le sol avant épandage du topsoil.

Tableau 14 : Tableau descriptif des différentes modalités sur la verse BN4 de Goro

Identifiant	Année	Désignation	Altitude	Pente	Type de substrats	Technique utilisée (SH = semis hydraulique ; SM = semis manuel)	Génie biologique	Travail du sol effectué	Nbre d'espèces de maquis utilisées
GORO_BN4_VF_SZ01	2009	talus	77	12	top_soil	SH	geofilet	griffage	11
GORO_BN4_VF_SZ02	2009	talus	77	12	top_soil	SH	geofilet	rien	11
GORO_BN4_VF_SZ03	2009	talus	77	12	top_soil	SM	geofilet	griffage	6

1.4.1. RÉSULTATS

Les variables sélectionnées se répartissent entre 9 variables de productivités et 3 variables de dynamique de l'écosystème (Tableau 15).

Tableau 15 : Variables sélectionnées pour l'étude des différentes modalités sur la verse BN4 de Goro

Identifiant variables	Description
1 moyenne.diamètre.moyenne..herbacée.esp.tot	Moyenne des diamètres des espèces herbacées totales (en cm)
2 moyenne.diamètre.herbacée.apparue	Moyenne des diamètres des espèces herbacées apparues (en cm)
3 moyenne.hauteur.herbacée.apparue	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées apparues (en cm)
4 moyenne.hauteur.moyenne..herbacée.esp.tot	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées totales (en cm)
5 div.simpson.uti.tteszones	Indice de diversité de Simpson pour les espèces utilisées
6 moyenne.hauteur.herbacée.utilisé	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées utilisées (en cm)
7 div.simpson.app.tteszones	Indice de diversité de Simpson pour les espèces apparues
8 div.simpson.tot.tteszones	Indice de diversité de Simpson pour les espèces totales
9 moyenne.hauteur.ligneux.utilisé	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
10 Nbr_esp_tot_20m2	Nombre d'espèces total
11 Nbr_ind_uti_20m2	nombre d'individus d'espèces utilisées
12 moyenne.hauteur.moyenne..ligneuse.esp.tot	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses totales (en cm)

Les analyses statistiques menées sur BN4 ne montrent pas de différences significatives (Annexe 8.6.4.: Figure 83 & Figure 84). La classification hiérarchique permet cependant de distinguer 3 groupes (Figure 23). Le premier groupe est composé par un quadrat des modalités 2 et 3, c'est-à-dire respectivement un semis hydraulique sans travail du sol et un semis manuel avec travail du sol. Le second groupe est constitué par des quadrats appartenant aux trois modalités, avec 2 de la modalité 3 et 1 pour chaque modalité 1 et 2. Le troisième groupe est aussi constitué par des quadrats appartenant aux trois modalités, avec 3 de la modalité 1, 2 de la modalité 2 et 1 de la modalité 3.

Le premier 1 est caractérisé par des croissances plus importantes des espèces herbacées totales, utilisées et apparues. Par contre, ce groupe présente les plus faibles valeurs de l'indice de diversité de Simpson pour les espèces apparues. Le second groupe est quant à lui caractérisé par un nombre d'individus utilisés qui se sont maintenus important, et par une plus forte densité de Cyperaceae. Enfin le troisième groupe est caractérisé par des indices de diversité de Simpson pour les espèces totales, utilisées et apparues, ainsi qu'un nombre d'espèces totales et une hauteur moyenne des espèces ligneuses utilisées et totales, plus importants.

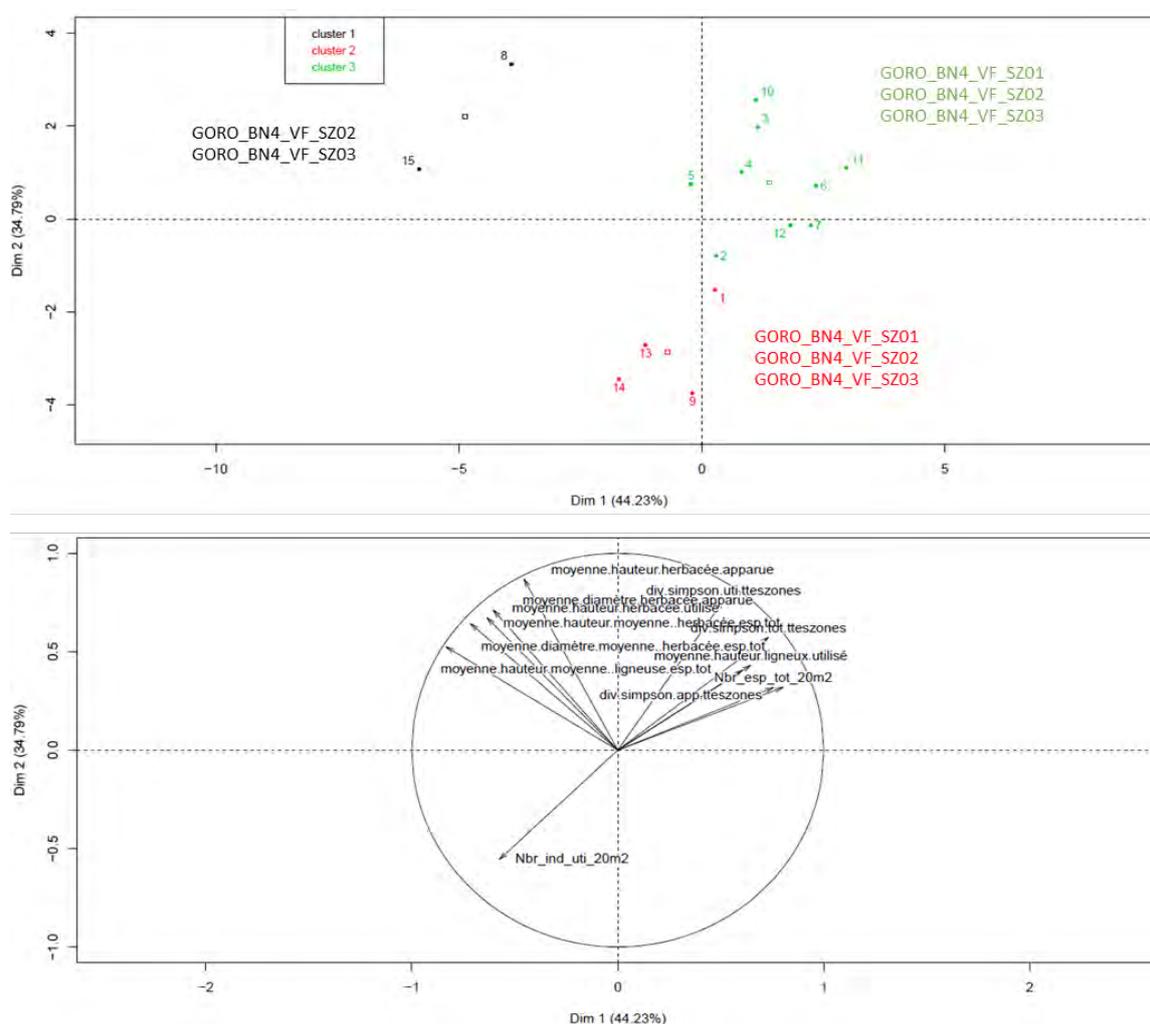


Figure 24: Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique (Verse BN4-Goro).

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation et la figure du bas présente les différents individus (ici les quadrats) projetés sur les deux premières composantes principales

Si l'on s'intéresse au niveau spécifique, on constate globalement que sur les 11 espèces utilisées dans le mélange seules 8 se sont développées avec une certaine disparité en nombre et en espèce selon les modalités (Annexe 8.6.4. ; Tableau 47).

Parmi les espèces présentes dans le mélange de départ, 3 ne sont pas retrouvées dans nos relevés (Annexe 8.6.4. : Tableau 48).

A ces dernières s'ajoutent de nouvelles espèces absentes du mélange d'origine et qui ont colonisé l'espace sur les différentes modalités là encore avec une certaine spécificité selon la modalité en nombre et en espèce (Annexe 8.6.4. Tableau 47).

Ainsi, on constate que deux herbacées, qui faisaient parties du mélange de départ, sont retrouvées sur toutes les modalités, à savoir *Costularia comosa* et *Machaerina deplanchei* (Figure 24). Leurs hauteurs moyennes ne montrent pas de différences significatives en fonction de la modalité.

Par ailleurs, certaines des espèces utilisées et retrouvées ne se sont développées de manière spécifique que sur certaines modalités. Ainsi la modalité 2 présente deux espèces qui lui sont spécifiques, alors que les modalités 1 et 3 n'en présentent qu'une chacune (Annexe 8.6.4.: Tableau 49).

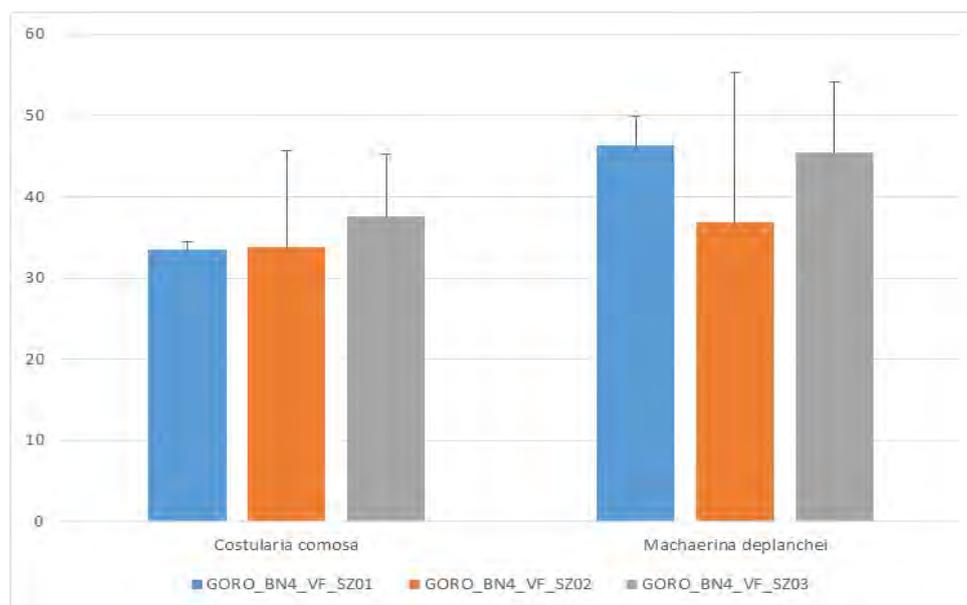


Figure 25 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées dans le mélange et retrouvées sur l'ensemble des modalités sur la Verse BN4-Goro.

En ce qui concerne les espèces apparues qui ont colonisé le milieu, une orchidée, une cypéracée, trois fougères et une espèce ligneuse ont été identifiées comme présentes sur toutes les modalités. Il n'existe pas de différences significatives au niveau des valeurs de leurs hauteurs (Figure 25).

Enfin, les modalités 1 et 3 présentent toutes les deux des espèces apparues qui leur sont spécifiques respectivement au nombre de 1 et 2 (Annexe 8.6.4.: Tableau 50).

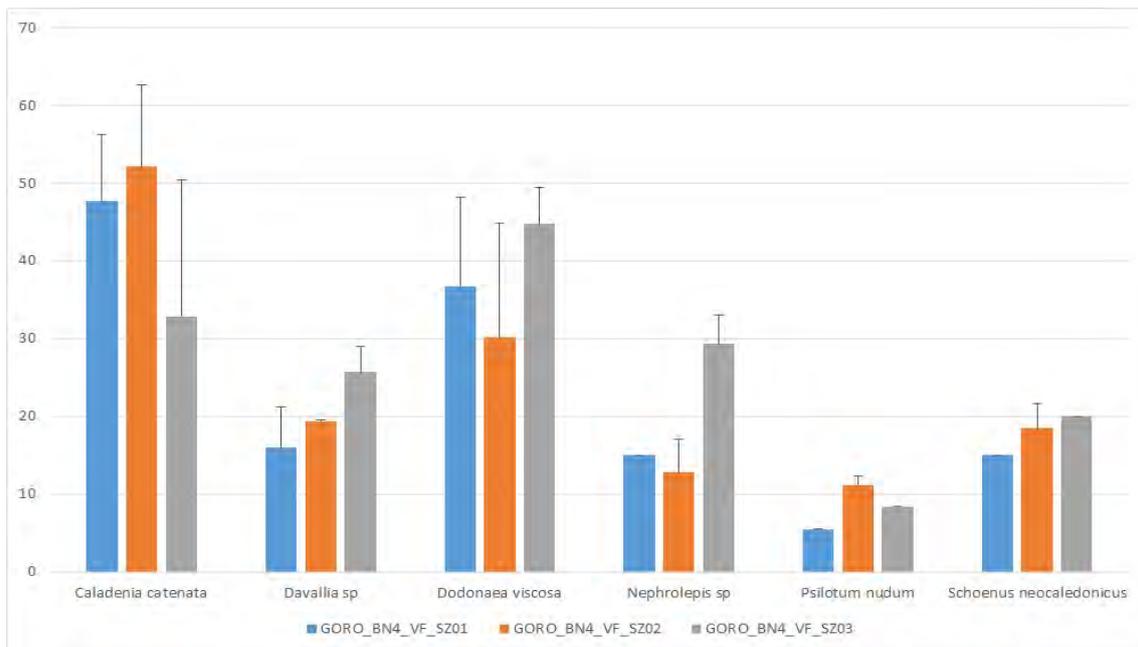


Figure 26 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces apparues communes à l'ensemble des modalités

1.4.2. CONCLUSION

Ce sont trois modalités, appliquées sur la verse BN4, que nous avons choisi comme référence pour réaliser non seulement la comparaison de l'effet du semis hydraulique et du semis manuel, mais aussi l'effet du travail du sol avant semis hydraulique.

Aucune différence significative n'est apparue entre les traitements, ce qui ne permet pas de conclure sur tel ou tel effet. Cependant, des tendances peuvent être établies du fait de certaines différences observables entre les différents quadrats des modalités. En effet, il existe une plus grande variabilité entre les quadrats des modalités 2 et 3 (différence dans la croissance des espèces herbacées par exemple) alors que ceux de la modalité 1 sont plus uniformes, avec une plus grande diversité d'espèces et notamment des croissances importantes des espèces ligneuses.

Ces résultats tendent à montrer qu'un semis hydraulique effectué sur une zone recouverte de topsoil après griffage permet d'avoir un écosystème restauré plus diversifié (plus grand nombre d'espèces total), et surtout le développement plus important d'espèces ligneuses, espèces moins présentes et moins développées dans les deux autres modalités.

A l'inverse, le semis hydraulique sans préparation du sol, tout comme le semis manuel avec préparation du sol d'ailleurs, aurait plus tendance à favoriser l'implantation d'une strate herbacée relativement dense.

Au niveau spécifique, l'utilisation du topsoil et du contenu de sa banque de graines peut expliquer de nouveau l'apparition d'espèces non contenues dans le mélange de départ.

Quant aux espèces présentes dans le mélange de départ et qui ne sont pas retrouvées dans les relevés, plusieurs hypothèses peuvent être émises :

- soit ces dernières connues pour avoir des graines à dormance physiologique (*Scaevola montana* ; Wulff et al. 2012, Amir et al. 2014) et morphophysiologique

(*Hibbertia pancheri*, *Joinvillea plicata* ; L'Huillier et al. 2010, Wulff et al. 2012) sont encore dans un stade quiescent ;

- soit les lots utilisés présentaient des taux de viabilité faible ;
- soit les deux à la fois.

1.5. EFFET DES INTRANTS

1.5.1. CAS DU COL DE L'ANTENNE

L'analyse statistique des données relatives aux différents intrants utilisés (fertilisation minérale ou organique) et leur mode d'utilisation afin d'en déterminer un effet sur la réussite des travaux de revégétalisation/restauration a été menée sur la zone de Goro Usine Col de l'Antenne présentant 6 modalités, témoin inclus (Tableau 16).

Tableau 16 : Descriptif des différentes modalités utilisées pour l'effet des intrants au col de l'antenne

identifiant	Année	Désignation	Altitude	Pente	Type de substrat	Technique utilisée (PL= plantation)	Intrants utilisés	Quantité	Mode d'apport de l'intrant
GORO_USINE_COLA_T0	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	Rien	0	-
GORO_USINE_COLA_T1	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	Boues de STEP de la station VALE NC	45 g/plant	En trouaison
GORO_USINE_COLA_T2	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	Fiente de poule	50 g/plant	En trouaison
GORO_USINE_COLA_T3	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	Engrais chimique à diffusion lente	10g/plant	En trouaison
GORO_USINE_COLA_T4	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	Boues de STEP de la station VALE NC	29013 kg/ha	En épandage
GORO_USINE_COLA_T5	2011	banquette	186	5	top_soil	PL	Copeaux de bois + Fiente de poule	5 L/plant 50 g/plant	En trouaison

1.5.1.1. Résultats

Les 12 variables sélectionnées (Tableau 17) regroupent 8 variables de productivité et 4 variables de dynamique.

Tableau 17 : Variables sélectionnées pour l'étude de l'effet des intrants au col de l'antenne

Identifiant variables	Description
1 Nbr.de.recrûs.identique	Indice du nombre de recrûs identiques
2 Nbr_ind_app_20m2	nombre d'individus d'espèces apparues
3 Nbr_ind_tot_20m2	nombre d'individus d'espèces totales
4 Nbr_esp_uti_20m2	Nombre d'espèces utilisées
5 div.shannon.tot.tteszones	Indice de diversité de Shannon pour les espèces totales
6 RECOUV_HERB	Indice de recouvrement en espèce herbacée
7 Nbr_esp_tot_20m2	Nombre d'espèces totales
8 div.shannon.app.tteszones	Indice de diversité de Shannon pour les espèces apparues
9 Nbr_esp_app_20m2	Nombre d'espèces apparues
10 div.simpson.uti.tteszones	Indice de diversité de Simpson pour les espèces utilisées
11 MORTALITE	Nombre d'individus mort
12 etat.général	Indice de l'état général

L'analyse des différentes modalités de la zone du Col de l'Antenne permet de discriminer 2 groupes (Figure 26). Le premier est composé par les modalités T0, T1, T2 et T3. Ce groupe est caractérisé par des valeurs importantes pour l'indice de Shannon des espèces totales, pour le nombre d'individus morts et pour l'indice de Simpson des espèces utilisées (Annexe 8.6.5.1 : Figure 86 & Figure 87).

Le second groupe est composé par les modalités T4 et T5, et il est caractérisé par des valeurs importantes pour le nombre d'espèces (totales, utilisées et apparues), ainsi que pour le nombre d'individus totaux et apparus.

Le premier groupe est caractérisé par des densités plus forte en espèces de la famille des Proteaceae (*Grevillea exul rubiginosa*, *Stenocarpus comptonii*), des Myodocarpaceae (*Myodocarpus fraxinifolius*), Picrodendraceae (*Austrobuxus carunculatus*, *Longetia buxoides*), Araucariaceae (*Agathis ovata*) et Asparagaceae (*Cordyline neocaledonica*).

Le second groupe est lui caractérisé par une plus forte densité en Casuarinaceae (*Gymnostoma deplancheanum*).

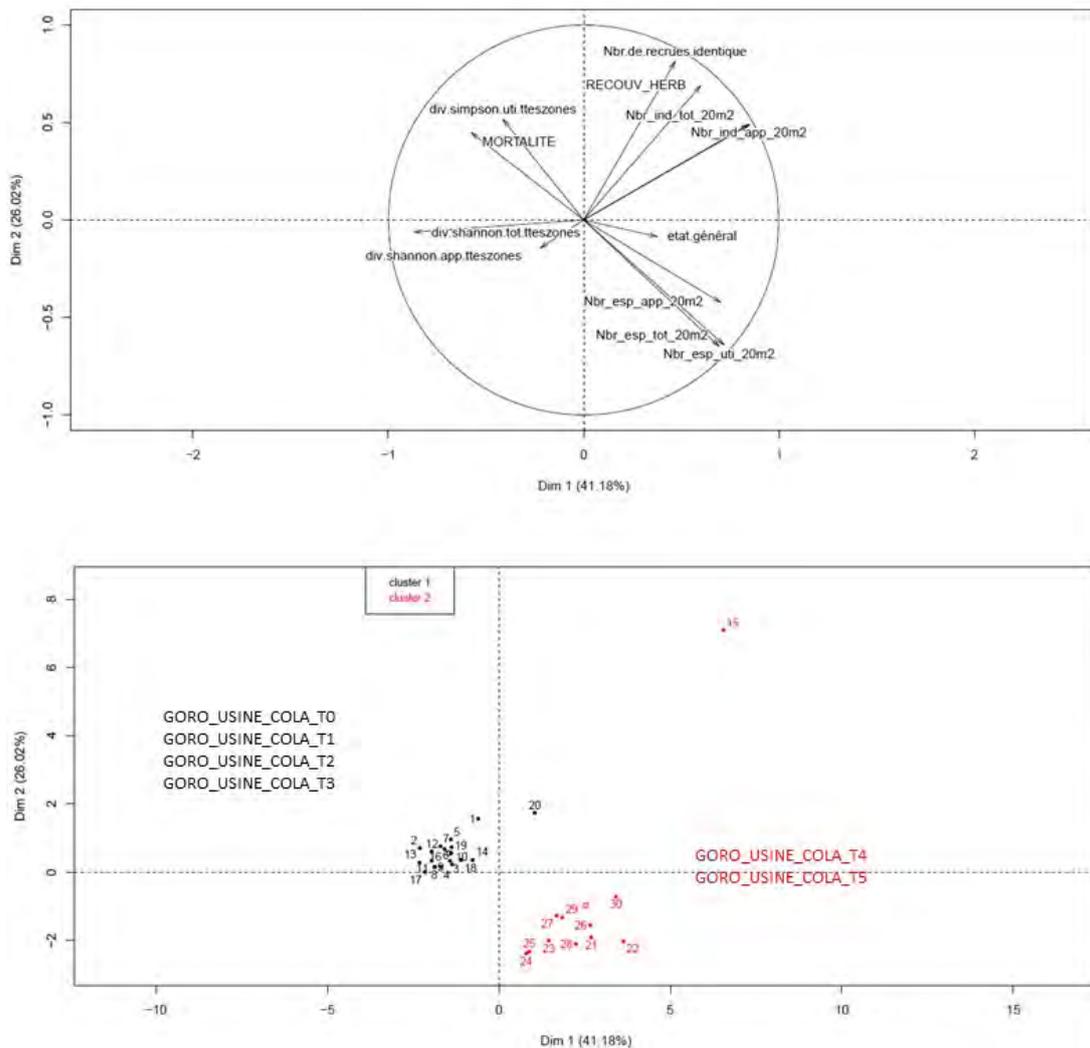


Figure 27 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique pour l'étude de l'effet des intrants au col de l'antenne.

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation et la figure du bas présente les différents individus (ici les quadrats) projetés sur les deux premières composantes principales

Au niveau des hauteurs des espèces utilisées, les croissances sont significativement plus faibles pour *A. ovata*, *A. neocaledonica*, *A. carunculatus*, *G. deplancheanum*, *L. buxoides*, *M. fraxinifolius* et *S. comptonii* au niveau de la modalité T0. *A. ovata* présente les meilleures croissances sur les modalités T2, T3 et T5, *A. neocaledonica* pour les modalités T2, T3, T4 et T5, *A. carunculatus* pour les modalités T2, T3, T4 et T5, *G. deplancheanum* pour les modalités T2 et T3, *L. buxoides* pour les modalités T2, T3, T4 et T5, *M. fraxinifolius* pour la modalité T3 et *S. comptonii* pour les modalités T1, T2 et T5 (Figure 27).

Enfin les traitements T2, T3 et T4 présentent les nombres d'espèces différentes apparues les plus importants, avec respectivement 11, 14 et 11 espèces (Annexe 8.6.5.1 : Tableau 51). A noter que la modalité T3 présente le plus d'espèces apparues uniquement sur cette modalité, soit 3 espèces (Annexe 8.6.5.1 :Tableau 52).

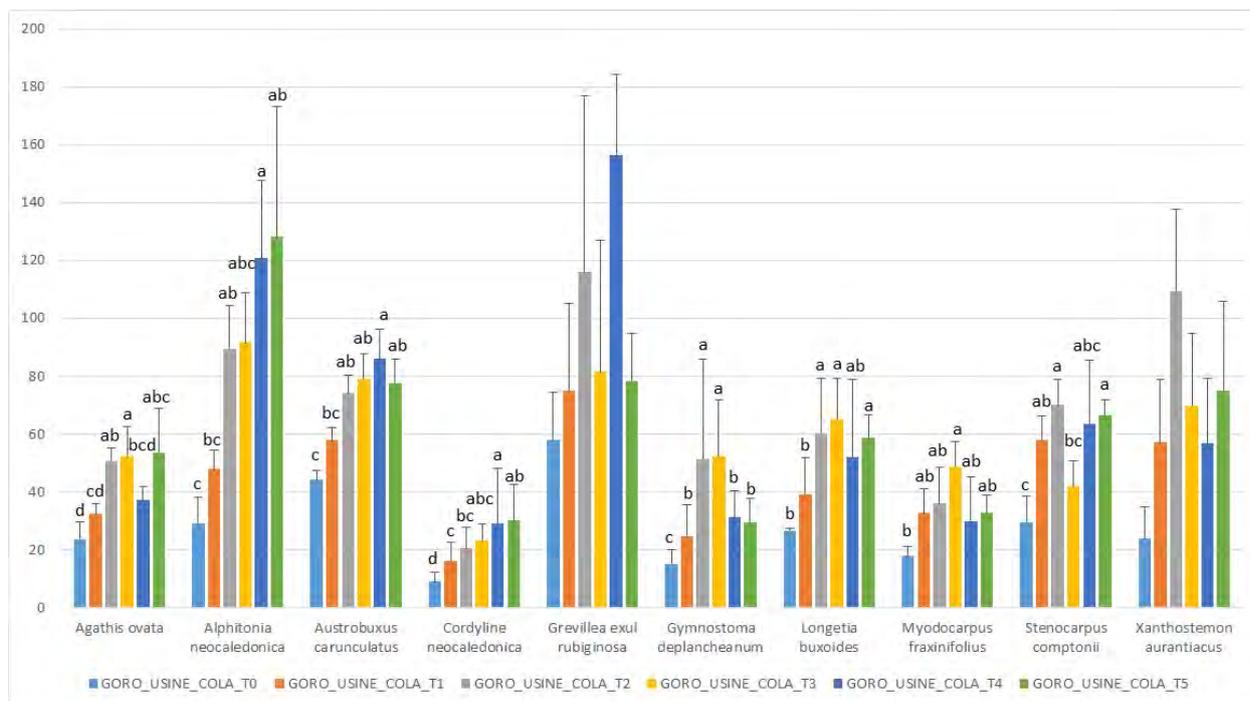


Figure 28 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités utilisées pour l'étude de l'effet des intrants au col de l'antenne.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives

1.5.1.2. Conclusion

L'analyse des variables de productivité et de dynamique de l'écosystème montre que les modalités qui ont reçu en trouaison de la boue de STEP, de la fiente de poule ou de l'engrais chimique à diffusion lente, ne présentent pas de différences avec la modalité sans intrants après 6 ans (Annexe 8.6.5.1 : Figure 88). Tiavouane et al. (2012) avait montré qu'après un an, le traitement « fiente » donnait les meilleurs résultats sur la productivité. Il semblerait donc que cet effet s'estompe avec le temps. Par contre, une étude à l'espèce montre des différences qui peuvent avoir un intérêt dans le choix de telle ou telle espèce plantée dans telle ou telle condition.

Par ailleurs, les zones ayant reçu soit un épandage de boues de STEP, soit un mélange copeaux de bois et fientes de poule présentent des résultats similaires. Ces traitements ont tendance à conduire à un plus grand nombre d'espèces implantées par quadrat, mais avec la dominance de certaines espèces notamment des *Gymnostoma*, espèce représentée par un grand nombre d'individus sur ces deux modalités. Tiavouane et al. (2012) indiquait déjà que cette espèce était l'une de celles qui présentait l'un des taux de mortalité les plus faibles. Ils indiquaient aussi que si le traitement boues de STEP en épandage était intéressant sur la productivité mais que l'apport constaté d'espèces exogènes conduisait à proscrire son utilisation sous cette forme. Ce résultat est ici confirmé après 6 ans car cette modalité est celle présentant le pourcentage le plus fort en espèces exogènes (15% de recouvrement).

1.5.2. CAS DE CR7

L'analyse statistique des données relatives aux différents intrants utilisées afin d'en déterminer un effet sur la réussite des travaux de revégétalisation/restauration a également été menée sur la zone de Goro_CR7 présentant 4 modalités (Tableau 18). A noter qu'il n'y avait pas de témoin sans intrants dans cette expérimentation, il n'y a donc la possibilité de comparer qu'entre intrants.

Tableau 18 : Descriptif des différentes modalités pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7

Identifiant	Année	Désignation	Altitude	Pente	Type de substrat	Technique utilisée (PL= plantation)	Type d'intrants	Nom
GORO_USINE_CR7_SZ01	2009	plateforme	183	2	top_soil	PL	engrais chimique diffusion lente	Nutricote
GORO_USINE_CR7_SZ02	2009	plateforme	183	2	top_soil	PL	Acide humique	
GORO_USINE_CR7_SZ03	2009	plateforme	183	2	top_soil	PL	boues de STEP	Boues de STEP de la station VALE NC
GORO_USINE_CR7_SZ04	2009	plateforme	183	2	top_soil	PL	Fiente de poules	Fientes de poules de Paddock Creek

1.5.2.1. Résultats

Les 12 variables sélectionnées (Tableau 19) regroupent 8 variables de productivité et 4 variables de dynamique.

Tableau 19 : Variables sélectionnées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7

Identifiant variables	Description
1 etat.général	Indice de l'état général
2 div.simpson.tot.tteszones	Indice de diversité de Simpson pour les espèces totales
3 DEGATFOLIAIRE	Indice de dégradation foliaire
4 Litière	Indice de l'épaisseur de la litière
5 RECOUV_HERB	Indice de recouvrement en espèces herbacées
6 moyenne.diamètre.ligneux.utilisé	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses utilisées (en cm)
7 indice_reproduction	Indice de reproduction
8 moyenne.hauteur.ligneux.utilisé	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
9 div.simpson.app.tteszones	Indice de diversité de Simpson pour les espèces apparues
10 Nbr_ind_app_100m2	Nombre d'espèces apparues
11 Nbr_ind_tot_100m2	nombre d'individus d'espèce totale
12 Nbr_esp_app_100m2	Nombre d'espèces apparues

L'analyse des différentes modalités montre l'existence de 3 groupes (Figure 28). Le premier composé par les modalités 3 et 4, est caractérisé par des valeurs élevées pour l'indice d'épaisseur de litière, l'indice de reproduction, pour la hauteur et le diamètre des espèces ligneuses utilisées et pour le nombre d'espèces apparues (Annexe 8.6.5.2 : Figure 90 & Figure 91).

Le second groupe est composé par la modalité 2 et il est caractérisé par l'indice de Simpson total significativement le plus élevé.

Enfin le dernier groupe est constitué par la modalité 1. Cette modalité présente des valeurs plus élevées pour l'indice de l'état général, l'indice de dégât foliaire, le nombre d'individus totaux et apparus et l'indice de recouvrement en herbacées.

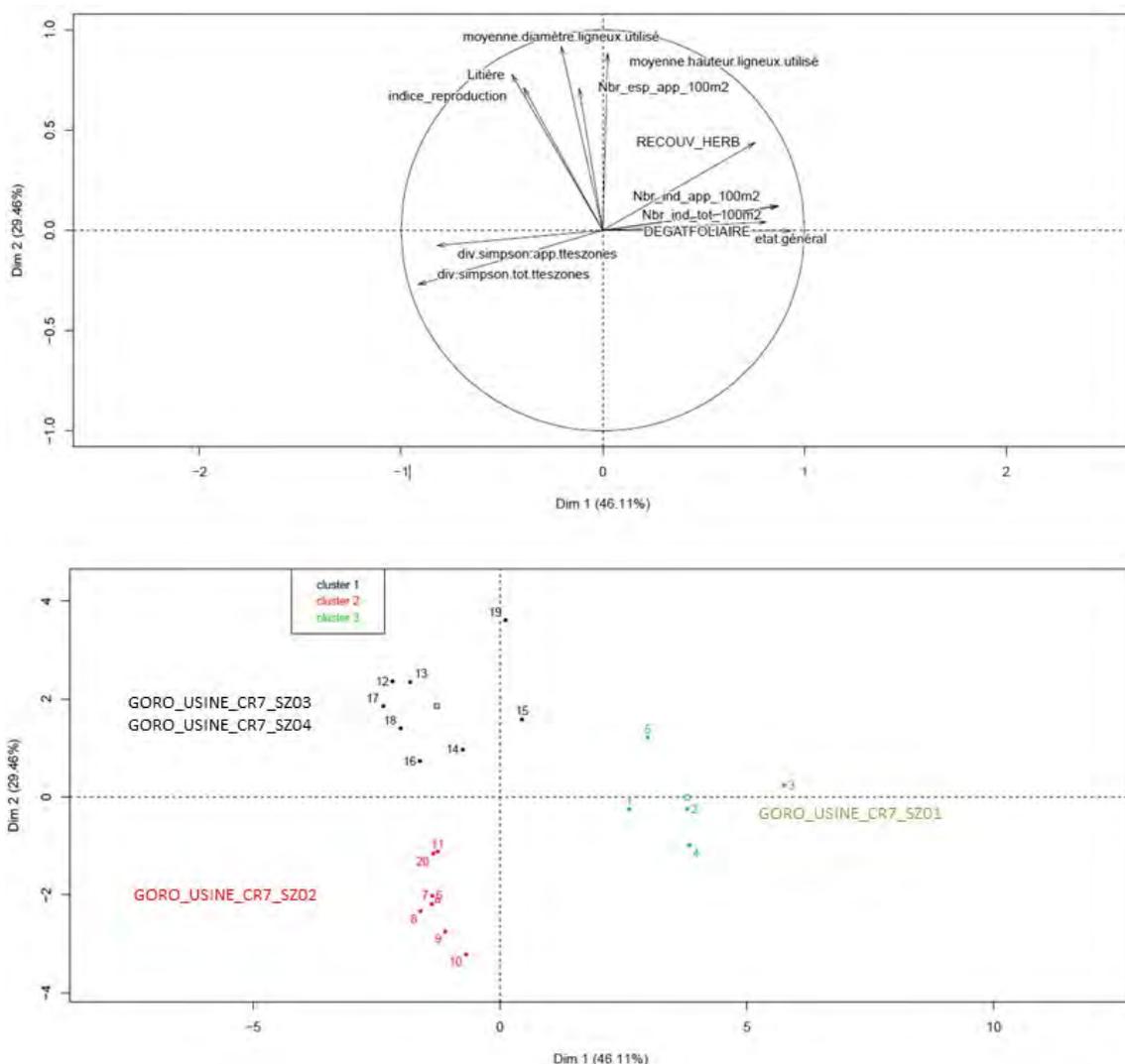


Figure 29 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7.

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation et la figure du bas présente les différents individus (ici les quadrats) projetés sur les deux premières composantes principales

Le premier groupe est caractérisé par des densités plus importantes pour les espèces de la famille des Orchidaceae (*Spathoglottis plicata*), des Asparagaceae (*Cordyline neocaledonica* et *Lomandra insularis*) et des Casuarinaceae (*Gymnostoma deplancheanum*). Le second groupe est caractérisé par des densités plus importantes pour la famille des Podocarpaceae (*Dacrydium araucarioides*), Picrodendraceae (*Austrobuxus carunculatus* et *Longetia buxoides*) et des Goodeniaceae (*Scaevola spp.*). Enfin, le dernier groupe est caractérisé par des densités en espèces plus importantes pour les espèces de la famille des Clusiaceae

(*Garcinia* sp), Cyperaceae (*Costularia comosa*), Celastraceae (*Peripterygia marginata*), Flagellariaceae (*Flagellaria indica*) et Proteaceae (*Grevillea exul rubiginosa* et *Stenocarpus*).

Au niveau de la croissance des espèces utilisées, *A. neocaledonica* et *S. cylindrica* ont des croissances significativement plus élevées sur la modalité 3, *A. carunculatus*, *G. exul rubiginosa* et *G. deplancheanum* ont des croissances significativement plus élevées sur les modalités 3 et 4 (Fig. 29).

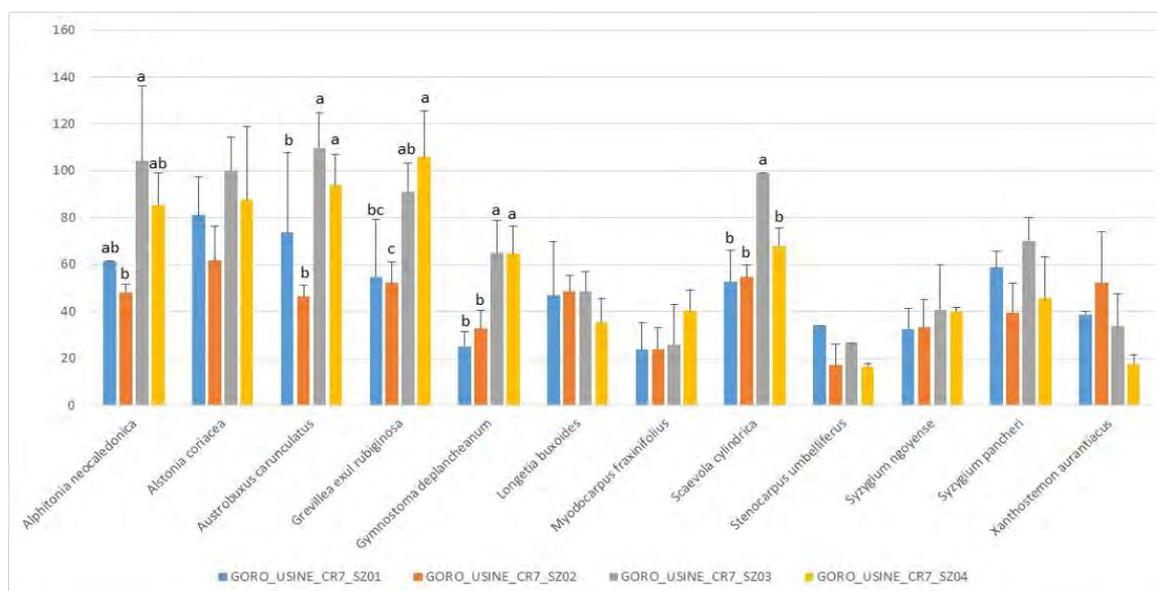


Figure 30 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités utilisées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7

Le plus grand nombre d'espèces apparues est de 20 sur la modalité 4 et le plus grand nombre d'espèces utilisées retrouvées dans nos relevés est de 32 pour la modalité 1 (Annexe 8.6.5.2 : Tableau 53).

Enfin, il est à noter que l'ensemble des modalités présentent des espèces qui leurs sont spécifiques (Annexe 8.6.5.2 : Tableau 54). C'est sur la modalité 4 que l'on retrouve le plus grand nombre d'espèces apparues uniquement sur cette modalité, avec 7 espèces.

1.5.2.2. Conclusion

Ici l'apport de boue de STEP ou de fiente de poule permet à l'écosystème d'avoir une meilleure productivité (notamment au niveau de la croissance des ligneux utilisés) mais aussi au niveau de la dynamique de recolonisation (avec des effets significatifs pour l'indice de reproduction et le nombre d'espèces apparues), par rapport à l'utilisation d'engrais à diffusion lente ou d'acide humique (Annexe 8.6.5.2 : Figure 91).

L'ajout d'engrais à diffusion lente quant à lui permet une augmentation du nombre d'individus et du coup un indice de recouvrement plus important, notamment au niveau de la strate herbacée (Cyperaceae et Flagellariaceae). L'utilisation d'engrais à diffusion lente a donc un effet sur la productivité, mais moins sur la dynamique.

En termes d'espèces apparues les traitements avec boue de STEP et fiente de poule semblent un peu plus favorables, par contre en termes d'individus, c'est l'apport d'engrais à diffusion lente qui semble plus favorable.

L'apport d'acide humique ne permet pas d'amélioration de la productivité ou de la dynamique par rapport aux autres modalités. De plus, pour cette modalité l'indice élevé de Simpson pour les espèces totales montre que les espèces sont toutes réparties de manière égale. A l'inverse l'indice de Simpson proche de 0 pour la modalité 1 montre qu'il existe une surdominance de certaines espèces (notamment de la famille des Cyperaceae).

1.5.3. INFLUENCE DES BOUES DE STEP AVEC OU SANS PLANTATION ; ESSAI TONTOUTA

Une troisième analyse statistique a été menée intégrant à la fois l'impact des différents intrants utilisés et les modalités de la plantation (apport de topsoil ou non et plantation ou non d'espèces) afin d'en déterminer un effet sur la réussite de la restauration, sur la zone Tontouta Vulcain présentant 8 modalités (Tableau 20). A noter que la boue de STEP et les engrais chimiques ont été apportés en épandage.

Tableau 20 : Descriptif des différentes modalités appliquées sur Tontouta Vulcain

Identifiant	Année	Désignation	Type de substrat	Technique utilisée (PL=plantation)	Nombre d'espèces de maquis utilisées	Type d'intrants	Quantité d'intrants apportée
TONTT_VULC_SRED_MD01_1	2006	talus	top_soil	rien	0		
TONTT_VULC_SRED_MD01_2	2006	talus	top_soil	rien	0	Boue de STEP	8000 kg/ha
TONTT_VULC_SRED_MD01_3	2006	talus	top_soil	PL	3		
TONTT_VULC_SRED_MD01_4	2006	talus	top_soil	PL	3	Boue de STEP	8000 kg/ha
TONTT_VULC_SRED_MD01_5	2006	talus	latérite	rien	0	Boue de STEP	8000 kg/ha
TONTT_VULC_SRED_MD01_6	2006	talus	latérite	PL	3	Boue de STEP	8000 kg/ha
TONTT_VULC_SRED_MD01_7	2006	talus	top_soil	PL	4	+ engrais chimique diffusion lente	8000 kg/ha + 1600 kg/ha
TONTT_VULC_SRED_MD01_8	2006	talus	top_soil	rien	0	Engrais chimique	300 kg/ha

1.5.3.1. Résultats

Les 12 variables sélectionnées (Tableau 21) regroupent 10 variables de productivité et 2 variables de dynamique.

Tableau 21 : Variables sélectionnées pour l'étude sur Tontouta Vulcain

Identifiant variables	Description
1 ETAT_GENERAL	Indice de l'état général
2 RECOUV_TOT	Indice de recouvrement total
3 RECOUV_LIGN	Indice de recouvrement en espèces ligneuses
4 RECOUV_EE	Indice de recouvrement en espèces exotiques
5 Nbr_esp_tot_20m2	Nombre d'espèces totales
6 Nbr_esp_app_20m2	Nombre d'espèces apparues
7 DEGATFOLIAIRE	Indice de dégradation foliaire
8 moyenne.hauteur.moyenne..herbacée.esp.tot	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées totales (en cm)
9 moyenne.hauteur.moyenne..ligneuse.esp.tot	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses totales (en cm)
10 moyenne.diamètre.moyenne..herbacée.esp.tot	Moyenne des diamètres des espèces herbacées totales (en cm)
11 DIV_SHANN_TOT	Indice de diversité de Shannon pour les espèces totales
12 DIV_SHANN_APP	Indice de diversité de Shannon pour les espèces apparues

La classification hiérarchique nous permet de distinguer 3 groupes dans lesquelles se répartissent les différentes modalités (Figure 30). Le premier groupe est composé par les modalités 2 et 5 qui sont toutes deux sans plantation avec épandage de boues de STEP. La modalité 2 est avec topsoil et la modalité 5 directement sur latérite seule. Ce groupe est caractérisé par des valeurs significativement plus importantes pour l'indice de recouvrement en espèces exotiques (principalement due à la présence de fougère aigle et de poaceas envahissantes – Annexe 8.6.5.3 : Figure 92 & Figure 93). A noter que la modalité 2 se partage entre ce groupe et le groupe suivant (2 quadrats dans ce groupe et 2 quadrats dans le suivant).

Le second groupe est composé par les modalités 1 (tous les quadrats), 2 (2 quadrats), 3 (tous les quadrats), 4 (2 quadrats) et 8 (tous les quadrats). La modalité 2 se partage de façon égale entre ce cluster et le précédent, et de la même manière la modalité 4 se partage entre ce groupe et le suivant. Ce groupe est composé par des modalités sans plantations mais avec du topsoil (1, 2 et 8) mais aussi des modalités avec plantation sur topsoil (3 et 4). Au niveau intrants, les modalités 2 et 4 ont reçu des boues de STEP et la modalité 8 a été amendée par des engrais chimique (starter et à diffusion lente). Ce groupe est caractérisé par un nombre important d'espèces totales et apparues et par un indice élevé de diversité Shannon pour les espèces totales et apparues. Il est aussi caractérisé par une plus forte densité d'Orchidaceae (*Eriaxis*), d'Araliaceae (*Polyscias*), de Dileniaceae (*Hibbertia*) et d'Apocynaceae (*Marsdenia* et *Parsonsia*).

Enfin, le dernier groupe est composé par les modalités 4 (2 quadrats), 6 (tous les quadrats) et 7 (tous les quadrats) qui sont toutes des plantations ayant reçu des boues de STEP. Il y a une différence entre la modalité 4 et 7, la première est une plantation de 3 espèces et la modalité 7 une transplantation d'espèces. Cependant, ces deux modalités sont sur topsoil alors que la modalité 6 est sur latérite seule. Ce groupe est caractérisé par des valeurs importantes des indices de recouvrement total et en espèces ligneuses, de l'état général, de la hauteur moyenne des espèces ligneuses et des herbacées totales, ainsi que par celui du diamètre moyen des herbacées. Ce groupe est aussi caractérisé par une plus forte densité d'espèces de la famille des Picrodendraceae (*Austrobuxus* et *Longetia*).

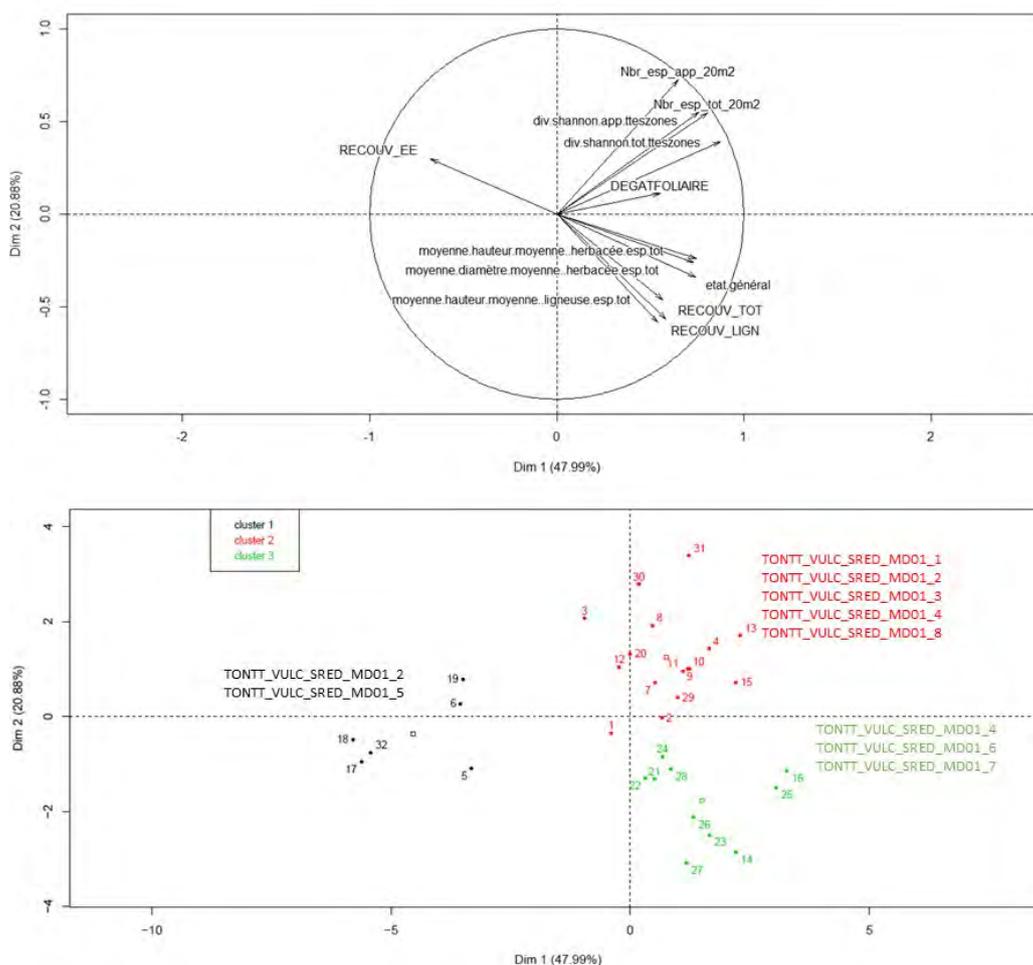


Figure 31 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique pour l'étude sur Tontouta Vulcain.

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation, et la figure du bas présente les différents individus (ici les quadrats) projetés sur les deux premières composantes principales.

Le plus grand nombre d'espèces apparues est pour les modalités 3, 4 et 8, avec 20 ou plus d'espèces apparues, chacune ayant reçu du topsoil (Annexe 8.6.5.3 Tableau 55). Les plus faibles nombres d'espèces apparues sont pour les modalités 5, 6 et 7 (entre 12 et 14 espèces apparues). Les modalités 5 et 6 sont sur latérite, alors que la 7 est sur topsoil.

Il est aussi à noter que parmi les espèces apparues certaines sont apparues uniquement sur une des modalités (Annexe 8.6.5.3 : Tableau 56). Le nombre le plus élevé d'espèces apparues uniquement sur une modalité est trouvé pour les modalités 2, 3, 7 et 8 (qui compte respectivement 4, 6, 4 et 8 espèces uniques à chaque modalité) qui sont toutes des modalités ayant reçu du topsoil. Les modalités présentant le moins d'espèces apparues uniquement sur une modalité sont celles qui sont sur latérites (la 5 et la 6).

Les résultats sur les tailles en espèces sont difficiles à interpréter (Figure 31). En effet, les espèces plantées ne permettent de comparer que 3 modalités entre elles, la quatrième modalité étant composée de transplants.

Quant aux espèces communes aux différentes modalités, l'effectif trop réduit d'individus au sein d'une espèce et d'une modalité ne permet pas une analyse statistique robuste. Il est donc difficile de mettre en évidence des différences de croissance significatives (Figure 32).

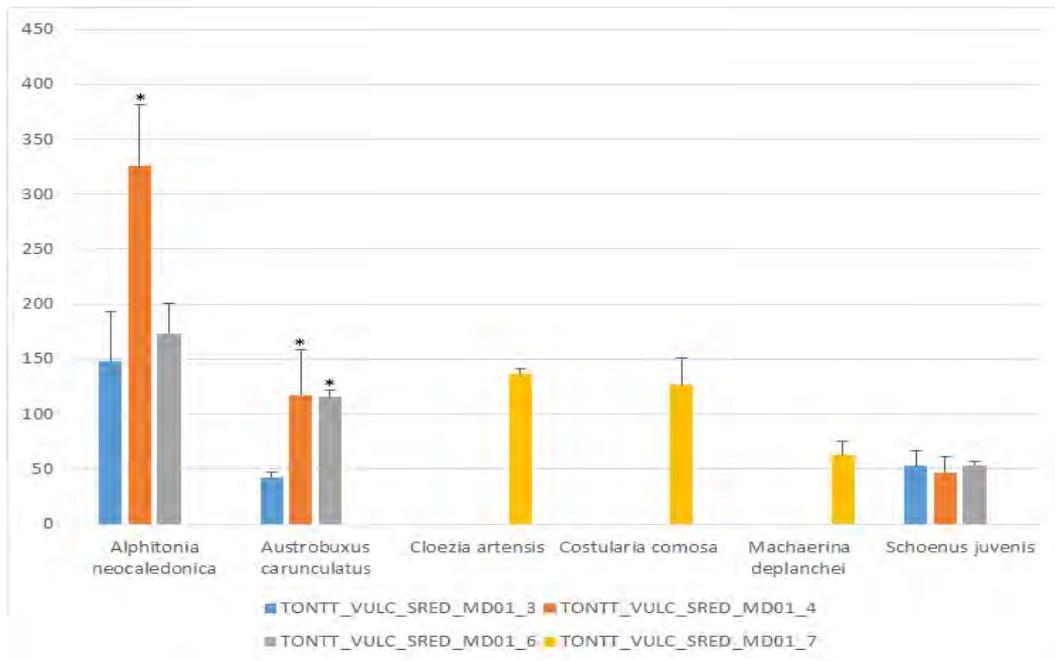


Figure 32: Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées pour les 4 modalités plantées testées sur Tontouta Vulcain

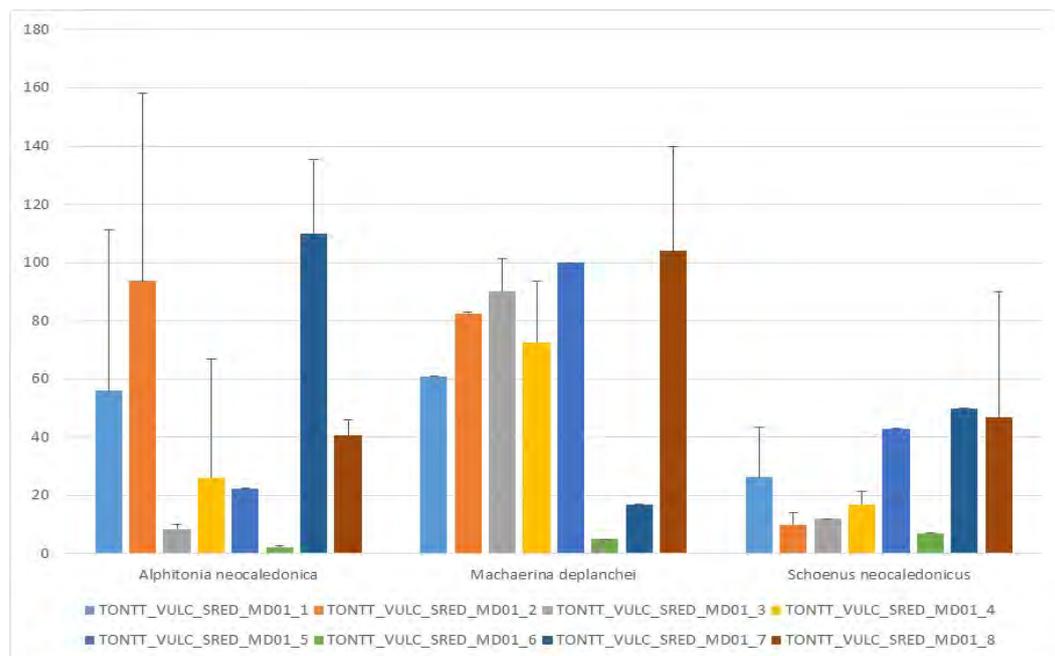


Figure 33 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces végétales apparues communes aux 8 modalités testées sur Tontouta Vulcain

Enfin une analyse de variance sur les effets de la plantation (par rapport à l'absence de plantation), des intrants et des substrats, montre que la plantation va avoir un effet significatif sur l'état général, les hauteurs des espèces totales, ainsi que sur le diamètre des espèces herbacées et l'indice de recouvrement (total, en espèces exotiques et ligneuses – Annexe 8.6.5.3 : Tableau 57). Le substrat montre des effets significatifs sur le nombre et la diversité en espèces totales, ainsi que sur le diamètre des espèces herbacées et la hauteur des espèces ligneuses.

1.5.3.2. Conclusions

La modalité qui a le moins bien fonctionné est celle sans plantation, sans topsoil et avec épandage de boue de STEP (Annexe 8.6.5.3 : Figure 94). Elle présente les indices de recouvrement total et en espèces ligneuses les plus faibles, et par contre un indice de recouvrement en espèces exotiques élevé. Ainsi l'apport seul de boue de STEP sur un substrat latéritique n'est pas suffisant pour mettre en place un écosystème productif et dynamique. En effet, on peut considérer que le substrat latéritique ne possède pas de caractéristiques biologiques permettant l'apparition de recrûs dont la croissance aurait pu être favorisée par les boues de STEP au regard des résultats obtenus sur les autres modalités. L'apport de topsoil au minimum est donc essentiel.

Les modalités sans plantation mais avec topsoil présentent une réussite meilleure que la modalité sans topsoil ce qui confirme l'apport essentiel de ce dernier montré tout au long de ce document. L'ajout du topsoil permet l'obtention d'un écosystème plus productif et plus dynamique. L'apport en sus de boue de STEP au topsoil semble être favorable, mais l'hétérogénéité des résultats obtenus sur cette modalité ne permet pas de le confirmer clairement.

Par contre, l'épandage de boue de STEP (avec ou sans plantation, avec ou sans topsoil) favorise malheureusement toujours l'implantation d'espèces exotiques.

Une bonne réussite est aussi observée sur la modalité sur latérite avec plantation et épandage de boues de STEP.

La technique de transplantation couplée avec le topsoil et les boues de STEP donne des résultats satisfaisants, avec une bonne productivité observée. Elle peut donc être préconisée même si le taux de réussite en transplantation est assez souvent faible.

Enfin, la technique de plantation combinée à l'ajout de topsoil permet d'obtenir un effet très significatif sur la diversité et le recouvrement des espèces.

1.6. EFFET DES INTRANTS EN SEMIS HYDRAULIQUE : EXEMPLE DE LA MINE PINPIN

Une analyse statistique a été menée afin d'évaluer l'impact des intrants utilisées en condition de semis hydraulique afin d'en déterminer l'effet sur la réussite de la restauration sur la mine Pinpin avec 4 modalités sans témoin (Tableau 22).

Le semis hydraulique réalisé sur la verse AC2 sur la mine Pinpin présente 4 modalités, dans lesquelles les quantités en conditionneurs de sol et en engrais chimiques (17.17.17 et 0.32.16) ont varié. Les semis sont réalisés sur un talus avec une pente à 30°, avec utilisation de 17 espèces du maquis et 3 espèces exotiques (Poaceae).

Tableau 22 : Descriptif des différentes modalités et des intrants utilisés sur la mine Pinpin

Identifiant	Type d'apports	Quantité d'apport	Nom du produit	Liste des espèces contenues dans le mélange de semis
PP_AC2_T01_SZ-B_2013	engrais chimique	600kg/ha	0.32.16	<p><i>Natives :</i></p> <p><i>Alphitonia neocaledonica</i> <i>Machaerina deplanchei</i> <i>Costularia comosa</i> <i>Dodonaea viscosa</i> <i>Grevillea exul exul</i> <i>Scaevola cylindrica</i> <i>Scaevola montana</i> <i>Schoenus juvenis</i> <i>Schoenus neocaledonicus</i> <i>Cloezia artensis</i> <i>Costularia pubescens</i> <i>Cordia discolor</i> <i>Cordia montana</i> <i>Geissois pruinosa</i> <i>Joinvillea plicata plicata</i> <i>Myrtastrium rufopunctatum</i> <i>Tristaniopsis calobuxus</i> <i>Tristaniopsis guillainii</i> <i>Xanthostemon laurinus</i> <i>Xanthostemon multiflorus</i></p> <p><i>Exotiques :</i></p> <p><i>Bracharia decumbens</i> <i>Chloris gayana</i> <i>Setaria sphacelata</i></p>
	engrais chimique	1000kg/ha	17.17.17	
	mulch	6900kg/ha	MO commerce	
PP_AC2_T01_SZ-C_2013	conditionneur du sol	450kg/ha	conditionneur du sol 1	
	conditionneur du sol	140kg/ha	conditionneur du sol 2	
	conditionneur du sol	11260kg/ha	conditionneur du sol 3	
PP_AC2_T01_SZ-E_2013	engrais chimique	8319kg/ha	conditionneur du sol 3	
	engrais chimique	600kg/ha	0.32.16	
	engrais chimique	1000kg/ha	17.17.17	
PP_AC2_T01_SZ-B_2013	mulch	6900kg/ha	MO commerce	
	conditionneur du sol	450kg/ha	conditionneur du sol 1	
	conditionneur du sol	140kg/ha	conditionneur du sol 2	
PP_AC2_T02_SZ-B_2013	conditionneur du sol	11260kg/ha	conditionneur du sol 3	
	engrais chimique	300kg/ha	0.32.16	
	engrais chimique	500kg/ha	17.17.17	
PP_AC2_T02_SZ-B_2013	engrais chimique	6900kg/ha	MO commerce	
	mulch	450kg/ha	conditionneur du sol 1	
	conditionneur du sol	140kg/ha	conditionneur du sol 2	
PP_AC2_T02_SZ-B_2013	conditionneur du sol	11260kg/ha	conditionneur du sol 3	
	engrais chimique	300kg/ha	0.32.16	
	engrais chimique	500kg/ha	17.17.17	
PP_AC2_T02_SZ-B_2013	mulch	6900kg/ha	MO commerce	
	conditionneur du sol	450kg/ha	conditionneur du sol 1	
	conditionneur du sol	140kg/ha	conditionneur du sol 2	

1.6.1. RÉSULTATS

Les 12 variables sélectionnées (Tableau 23) regroupent 6 variables de productivité et 6 variables de dynamique.

Tableau 23 : Variables sélectionnées pour l'étude sur la mine Pinpin

Identifiant variables	Description
1 Nbr.de.recrûs.identique	Indice du nombre de recrûs identiques
2 div.shannon.app.tteszones	Indice de diversité de Shannon pour les espèces apparues
3 Nbr_esp_app_20m2	Nombre d'espèces apparues
4 RECOUV_EE	Indice de recouvrement en espèces exotiques
5 div.shannon.tot.tteszones	Indice de diversité de Shannon pour les espèces totales
6 div.shannon.uti.tteszones	Indice de diversité de Shannon pour les espèces utilisées
7 Nbr_ind_app_20m2	nombre d'individus d'espèces apparues
8 Nbr_ind_tot_20m2	nombre d'individus d'espèces totales
9 indice_reproduction	Indice de reproduction
10 Nbr.recrûs.diff	Indice du nombre de recrûs différents
11 RECOUV_TOT	Indice de recouvrement total
12 moyenne.hauteur.herbacée.utilisé	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées utilisées (en cm)

La classification hiérarchique partage les différentes modalités en 3 groupes (Figure 33).

Le premier groupe composé par les modalités PP_AC2_T01_SZ-B (1 quadrat) et PP_AC2_T01_SZ-E (2 quadrats) et PP_AC2_T02_SZ-B (1 quadrat). Ces quadrats sont caractérisés par des valeurs élevées pour l'indice du nombre de recrûs différents, l'indice de Shannon pour les espèces utilisées, l'indice de reproduction et la hauteur moyenne des herbacées utilisées (Annexe 8.6.6 : Figure 95 & Figure 96).

Le second groupe est composé par une partie des modalités PP_AC2_T01_SZ-B (2 quadrats) et PP_AC2_T01_SZ-E (3 quadrats). Ce groupe est caractérisé par des valeurs plus importantes pour l'indice de recouvrement total et de recouvrement en espèces exotiques.

Le troisième groupe est composé par les modalités PP_AC2_T02_SZ-B (2 quadrats) PP_AC2_T01_SZ-C (tous les quadrats) et PP_AC2_T02_SZ-B (4 quadrats). Ce groupe est caractérisé par des valeurs plus importantes de l'indice de Shannon pour les espèces totales et apparues, du nombre d'espèces apparues et du nombre d'individus totaux et apparus.

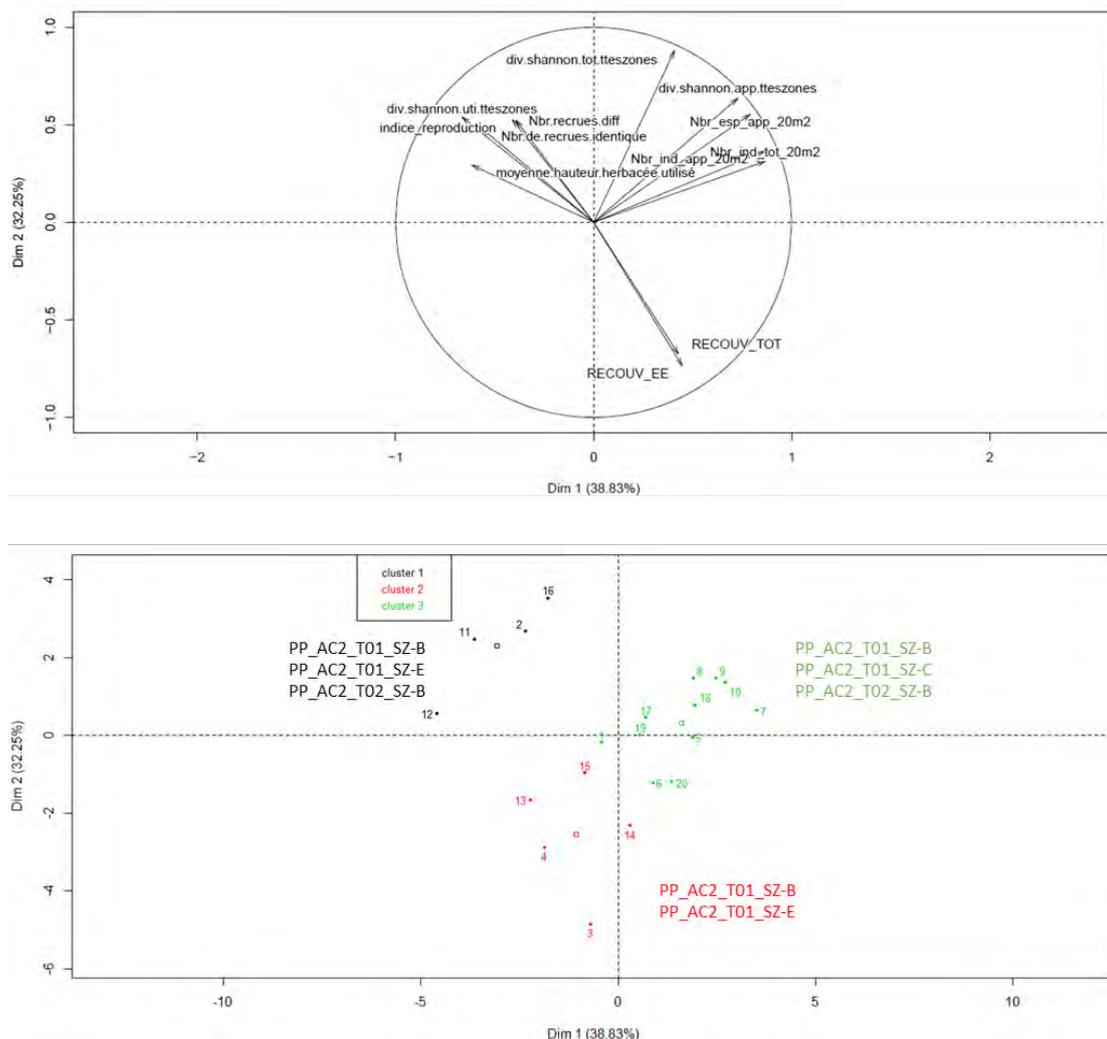


Figure 34 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique menée sur les modalités de la mine Pinpin.

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation et la figure du bas présente les différents individus (ici les quadrats) projetés sur les deux premières composantes principales

Su 20 espèces utilisées pour l'ensemencement seulement 7 sont retrouvées sur l'ensemble des relevés, avec 6 espèces présentes sur la modalité PP_AC2_T01_SZ-E (Annexe 8.6.6 : Tableau 58). Un même nombre d'espèces apparues (5) sont présentes sur l'ensemble des modalités.

Il est aussi à noter que parmi les espèces apparues certaines ne le sont que sur une des modalités (Annexe 8.6.6 : Tableau 59).

Enfin, certaines espèces appartenant au mélange ne sont pas du tout retrouvées dans les relevés effectués sur la zone (Annexe 8.6.6 : Tableau 60).

Au niveau des tailles des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités peu de différences significatives sont à noter, seule *Alphitonia neocaledonica*, présente une croissance significativement plus élevée pour la modalité PP_AC2_T01_SZ-B (mais ces différences ne sont relevés que sur de petits individus entre 1 et 5 cm en moyenne - Figure 34).

La présence d'exotiques est uniquement le fait de *Chloris gayana*, Poaceae, présente dans le mélange de départ. Elle recouvre entre 40 et 60% des surfaces en moyenne. A l'inverse on ne

semble pas retrouver de *Brachiaria decumbens* et *Setaria sphacelata* présentes dans le mélange.

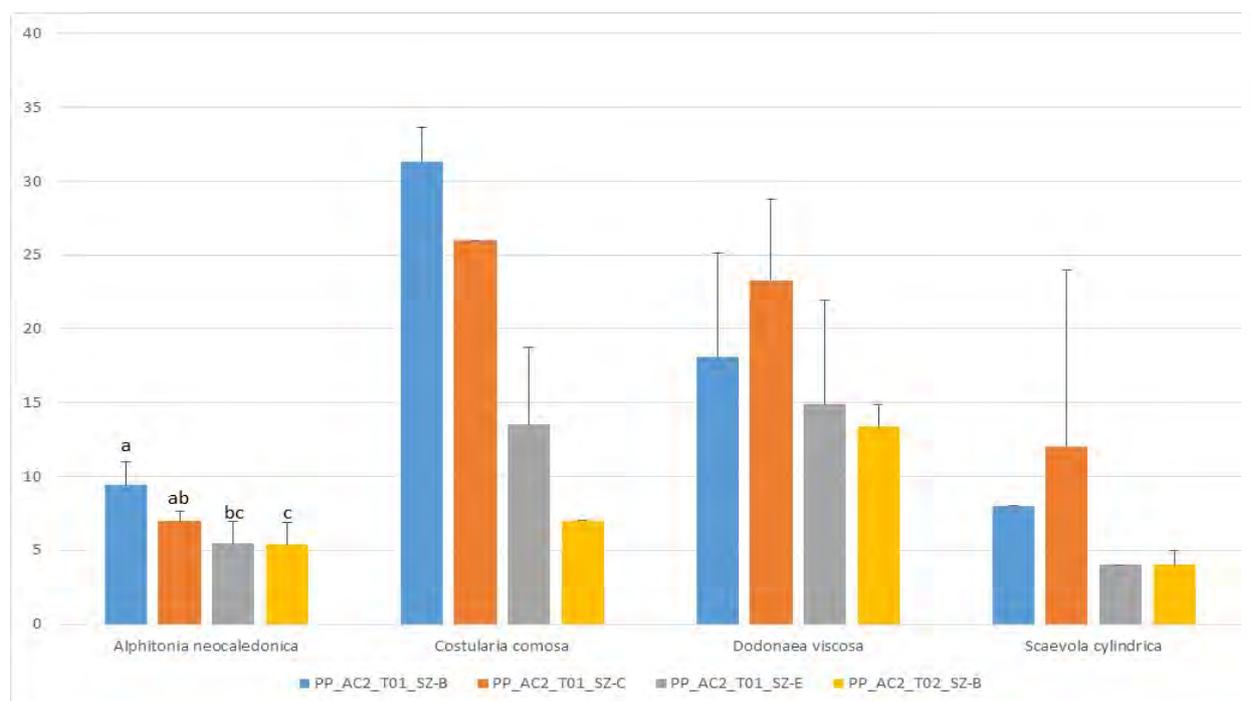


Figure 35 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités testées sur la mine Pinpin.

1.6.2. CONCLUSION

La modalité, qui donne a priori les résultats de réussite les plus hétérogènes, correspond à une modalité avec les apports en engrais chimiques les plus faibles (modalité E du talus 1). Cette modalité présente une moitié des quadrats avec une productivité et dynamique de l'écosystème intéressante, mais une autre moitié des quadrats caractérisée uniquement par la présence d'espèces exotiques.

La modalité qui a le mieux réussi est celle qui a reçu une quantité de conditionneur de sol n°3 moins importante que les autres (modalité C du talus 1). Dans cette modalité, les résultats sont les plus homogènes avec notamment une dynamique de l'écosystème restauré meilleure que celle des autres modalités (en termes de nombre d'individus totaux et apparus et nombre d'espèces apparues).

Parmi les espèces utilisées beaucoup ne sont pas retrouvées dans nos relevés, il s'agit notamment de graines ne présentant pas de dormance. Il est possible que les graines n'aient pas trouvé les conditions adéquates à leur germination ou que les lots de graines utilisés présentaient une mauvaise viabilité (problème lors de la récolte ou de la conservation par exemple).

Enfin, la présence d'exotiques dans le mélange conduit inexorablement à leur présence et leur domination (jusqu'à 60% de recouvrement) qui peut avoir un impact néfaste sur une restauration. Leur utilisation reste à proscrire sauf dans des cas extrêmes (forte pente, besoin d'un maintien rapide et sur des zones vouées à être retravaillées mais en aucun cas dans un objectif de restauration écologique. Par ailleurs, il serait à préconiser dans le cas d'utilisation d'espèces d'herbacées exotiques, de tester des espèces stériles polyploïdes non OGM pour

éviter sur le long terme la capacité d'adaptation qui pourrait conduire à un envahissement du milieu naturel par une espèce exotique.

1.7. INFLUENCE DE L'ORIENTATION PAR RAPPORT AU VENT

1.7.1. L'EXEMPLE DU MONT DORE

Afin d'évaluer l'influence de l'orientation par rapport au vent sur la réussite de la restauration, la zone de la Mine De Rouvray au Mont Dore a été sélectionnée pour l'analyse statistique (Tableau 24).

Tableau 24 : Tableau descriptif des différentes modalités testées sur la Mine de Rouvray

Identifiant	Année	Désignation	Altitude	Pente	Type de substrat	Technique utilisée (PL=plantation)	Génie biologique	Travail du sol	Nbre d'espèces de maquis utilisées	Orientation
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_2	1999	plateforme	280	2	saprolite	PL	Brise_vent_naturel	sous-solage	5	Sud-Est
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3	1999	plateforme	283	2	saprolite	PL	Brise_vent_naturel	sous-solage	5	Nord
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_6	1999	plateforme	378	0	saprolite	PL	Brise_vent_naturel	sous-solage	5	Sud-Est

1.7.1.1. Résultats

Les trois modalités sont des plantations en plein, sur saprolite sous-solée, avec la mise en place de brise-vent naturel (plants de *Casuarina collina*). Les modalités 2 et 3 sont des plantations où a été réalisé un apport d'engrais starter (15.15.15) à raison de 200 g par plant, un apport de fientes de poule fraîches à raison d'1,6 L par plant et un paillage avec du film plastique noir. Pour la modalité 6, les apports sont un peu différents, avec toujours un apport d'engrais starter mais à raison de 80 g par plant, et à cela on ajoute un apport d'engrais poisson (CPA3) à raison de 10 g par plant, un apport d'hydrorétenteur (à raison de 4 g par plant, incorporé sec) et un paillage avec du blé. La position des modalités est différente, les modalités 2 et 6 sont orientées Sud-Est face à la baie du Mont-Dore respectivement à 280 et 378 m d'altitude et la modalité 3 est, elle, exposée au Nord à une altitude de 283 m.

Les 12 variables sélectionnées (Tableau 25) regroupent 8 variables de productivité et 4 variables de dynamique. L'analyse des modalités réalisées sur le Mont Dore permet de distinguer 2 groupes (Figure 35). Le premier groupe est constitué par les modalités 2 et 6 et le second groupe est constitué par la modalité 3.

Tableau 25 : Variables sélectionnées pour pour l'étude sur la mine de Rouvray

Identifiant variables	Description
1 etat.général	Indice de l'état général
2 RECOUV_TOT	Indice de recouvrement total
3 RECOUV_HERB	Indice de recouvrement en espèces herbacées
4 Nbr_ind_tot_100m2	nombre d'individus d'espèces totales
5 Nbr_ind_app_100m2	Nombre d'individus d'espèces apparues
6 Nbr_esp_app_100m2	Nombre d'espèces apparues
7 DEGAT	Indice de dégât
8 Nbr.recrûs.diff	Indice du nombre de recrûs différents
9 moyenne.hauteur.ligneux.utilisé	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
10 moyenne.hauteur.moyenne..ligneuse.esp.tot	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses totales (en cm)
11 div.simpson.uti.tteszones	Indice de diversité de Simpson pour les espèces utilisées
12 div.shannon.app.tteszones	Indice de diversité de Shannon pour les espèces apparues

Ainsi, la modalité 3 présente des valeurs significativement plus importantes pour l'indice du nombre de recrûs différents, du nombre d'espèces apparues, de l'indice de recouvrement en espèces totales, de l'indice de l'état général, du nombre d'individus totaux et apparus, de la hauteur moyenne des ligneux utilisés et pour l'indice de Shannon pour les espèces apparues (Annexe 8.6.7.1 : Figure 98 & Figure 99). Dans ce groupe, on retrouve aussi en plus forte densité des espèces de la famille des Casuarinaceae (*Gymnostoma*), Dilleniaceae (*Hibbertia*), Fabaceae (*Acacia spirorbis*), Ericaceae (*Styphelia* et *Dracophyllum*) et Cunoniaceae (*Pancheria* et *Codia*).

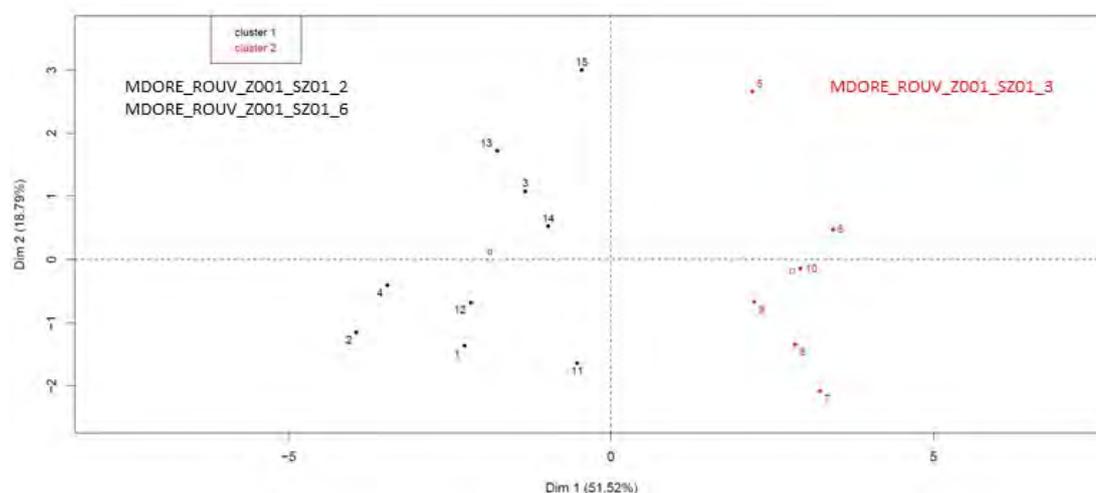
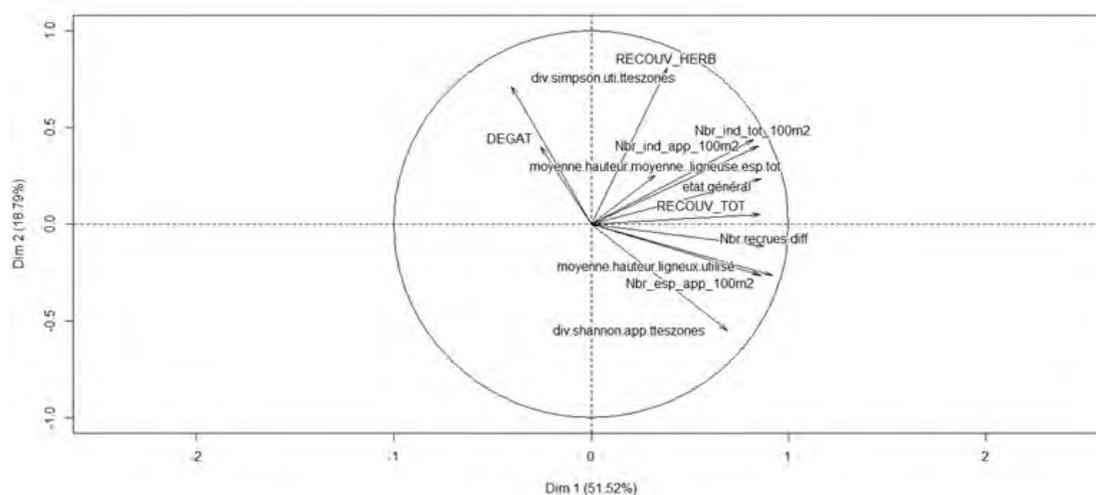


Figure 36 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique menée sur les modalités de la mine de Rouvray.

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation et la figure du bas présente les différents individus (ici les quadrats) projetés sur les deux premières composantes principales

Les espèces *Acacia spirorbis*, *Dodonaea viscosa*, *Grevillea exul rubiginosa* et *Gymnostoma deplancheanum* ont une croissance significativement plus importante au niveau de la modalité 3 (Figure 36). Sur cette modalité on retrouve aussi un plus grand nombre d'espèces apparues et notamment un plus grand nombre d'espèces apparues uniques à cette modalité (12) par rapport aux deux autres (2 et 5 espèces respectivement pour la modalité 2 et la modalité 6 - Annexe 8.6.7.1 : Tableau 61 & Tableau 62).

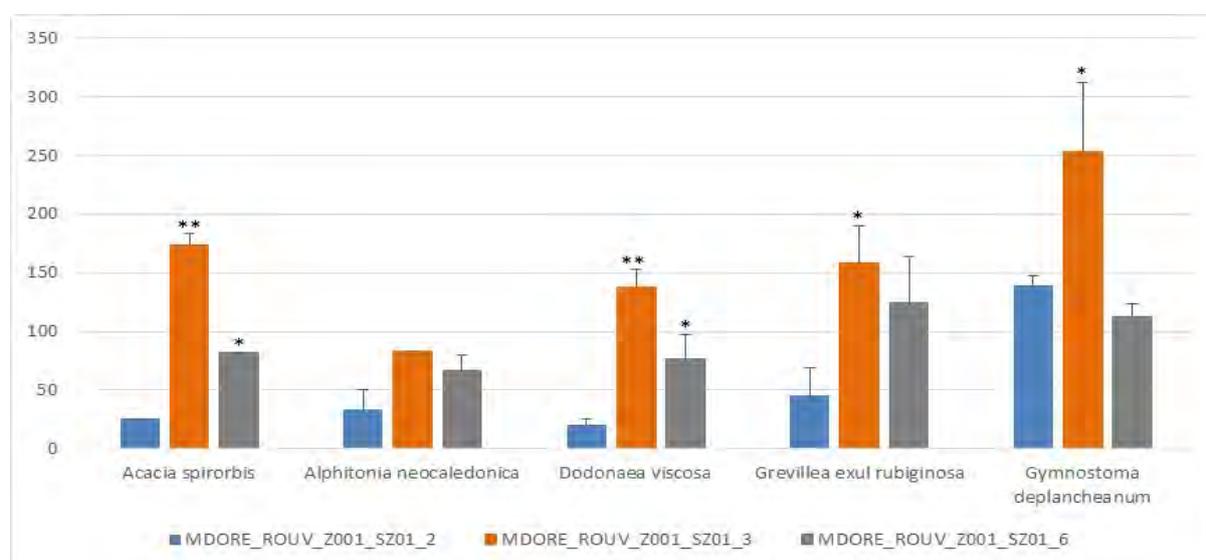


Figure 37 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités testées sur la Mine de Rouvray

1.7.1.2. Conclusions

Pour rappel, les 3 modalités choisies au sein des essais de l'ancienne mine de De Rouvray au Mont Dore ont été sélectionnées pour leurs positions différentes sur le massif, mais aussi les différences de traitement (Annexe 8.6.7.1 : Figure 100).

Les résultats sur ces modalités montrent que les zones exposées aux vents (2 et 6-exposition Sud-Est) ont des brise-vents qui se sont peu développés et qui ne permettent donc pas de créer des conditions propices au développement des espèces végétales implantées.

En effet, la modalité 3, qui n'est pas exposée directement aux vents (orientation Nord-Ouest), présente des brise-vents bien développés, et aussi des espèces végétales plantées qui se développent bien. Cette modalité présente 4 paramètres de productivité de l'écosystème et 3 paramètres de dynamique qui sont significativement plus importants que pour les deux autres modalités. De plus, de nombreuses espèces végétales sont apparues sur la modalité 3 aussi bien des herbacées type fougères (tel que *Nephrolepis* ou *Psilotum*) ou des espèces ligneuses.

La croissance des espèces plantées initialement est, en général, significativement plus importante que pour les autres modalités.

On peut estimer que les zones exposées au vent sont moins favorables à une réussite de la restauration. Nous n'avons pas pu comparer l'effet du brise vent mais l'on peut penser que sans la présence de ce dernier au niveau des modalités 2 et 6, les résultats auraient été encore moins bons. Par contre, **il semble essentiel sur les zones exposées que les brises-vents soient d'abord bien développés avant toute implantation d'espèces pour la restauration (les planter éventuellement déjà grands)**.

Bien que les différences soient moins importantes, il semble tout de même que les apports réalisés pour la modalité 6 soient meilleurs que ceux de la modalité 2, avec notamment un effet sur la croissance des plantes ligneuses utilisées (meilleure croissance pour *Acacia spirorbis* et *Dodonaea viscosa*), des ligneuses totales en général. Ainsi on peut conclure que l'apport d'engrais starter d'engrais poisson et un paillage avec du blé semble plus favorable que l'engrais starter, les fientes de poules et le paillage plastique.

1.7.2. L'EXEMPLE DE PAAGOUMÈNE CRÊTE 2

Une seconde zone sur Paagoumène (Crête 2) a été sélectionnée pour une analyse statistique afin d'évaluer l'influence de l'orientation par rapport au vent sur la réussite de la restauration (Tableau 26).

Tableau 26 : Descriptif des différentes modalités testées sur la mine Paagoumène Crête 2

Identifiant	Année	Désignation	Altitude	Pente	Type de substrat	Technique utilisée (PL= plantation)	Nombre d'espèces de maquis utilisées	Nombre d'espèces exotiques utilisées	Orientation
TBGH_S001_CR2P_P3_R1_Q1	2009	talus	272	25	latérite	SH	13	4	Sud-Est
TBGH_S001_CR2P_P4_R1_Q1	2009	talus	280	25	latérite	SH	13	4	Nord-Ouest

1.7.2.1. Résultats

Les 12 variables sélectionnées (Tableau 27) regroupent 8 variables de productivité et 4 variables de dynamique.

Tableau 27 : Variables sélectionnées pour l'étude sur la mine Paagoumène Crête 2

Identifiant variables	Description
1 RECOUV_HERB	Indice de recouvrement en espèces herbacées
2 RECOUV_LIGN	Indice de recouvrement en espèces ligneuses
3 moyenne.diamètre.moyenne..ligneuse.esp.tot	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses totales (en cm)
4 div.shannon.uti.tteszones	Indice de diversité de Shannon pour les espèces utilisées
5 div.simpson.app.tteszones	Indice de diversité de Simpson pour les espèces apparues
6 div.shannon.tot.tteszones	Indice de diversité de Shannon pour les espèces utilisées
7 moyenne.diamètre.ligneux.utilisé	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses utilisées (en cm)
8 Nbr_esp_app_20m2	Nombre d'espèces apparues
9 Nbr_ind_app_20m2	nombre d'individus d'espèces apparues

10	moyenne.hauteur.moyenne..ligneuse.esp.tot	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses totales (en cm)
11	moyenne.diamètre.herbacée.apparue	Moyenne des diamètres des espèces herbacées apparues (en cm)
12	moyenne.diamètre.herbacée.utilisé	Moyenne des diamètres des espèces herbacées utilisées (en cm)

La classification hiérarchique montre ici qu'il existe des différences entre les deux modalités (Figure 37). La modalité TBGH_S001_CR2P_P3 est caractérisée par un indice de recouvrement en herbacées significativement plus élevés que la modalité TBGH_S001_CR2P_P4 (Annexe 8.6.7.2 : Figure 101 & Figure 102).

La modalité TBGH_S001_CR2P_P4 est quant à elle caractérisée par des indices de Shannon en espèces totales et de Simpson en espèces apparues significativement plus élevés. Il en est de même pour les hauteurs et diamètres des ligneux totaux et les diamètres des ligneux utilisés. Le nombre d'espèces et d'individus apparus est quant à lui significativement plus important. Cette modalité est aussi caractérisée par un indice de Shannon en espèces utilisées plus important.

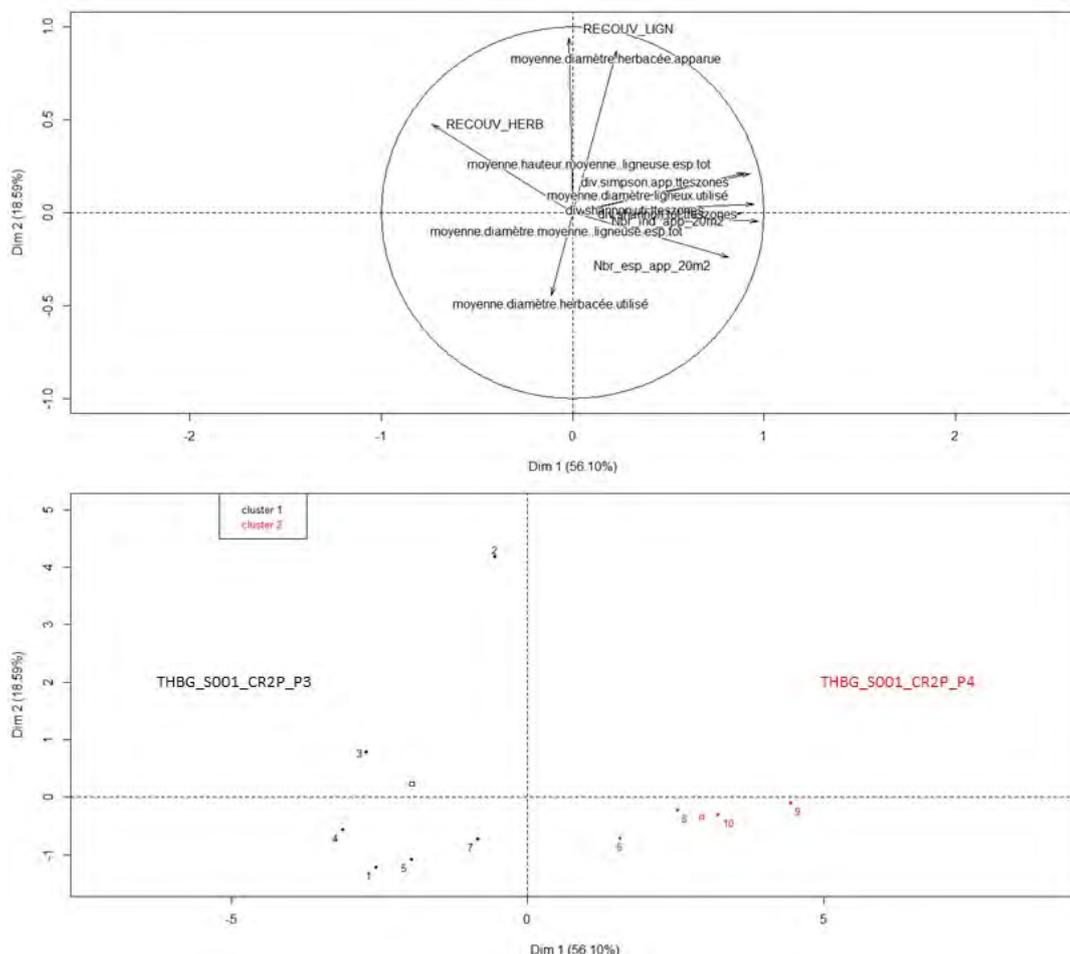


Figure 38 : Résultats de l'analyse ACP et de la classification hiérarchique menées sur les modalités de Paagoumène Crête 2.

La figure du haut présente les différentes variables projetées sur le cercle de corrélation et la figure du bas présente les différents individus (ici les quadrats) projetés sur les deux premières composantes principales

La modalité TBGH_S001_CR2P_P3 est caractérisée par une plus forte densité en Cyperaceae, alors que la modalité TBGH_S001_CR2P_P4 est caractérisée par une plus forte densité en Orchidaceae et en Ptéridophytes notamment des Lomariopsidaceae.

Parmi les espèces végétales utilisées en semis et communes aux deux modalités, il n'existe pas de différence significative au niveau de la croissance de ces espèces (Figure 38).

Au niveau des espèces utilisées sur les 17 présentes dans le mélange initial, seulement 8 sont retrouvées dans nos relevés (Annexe 8.6.7.2 :

Tableau 63). Sur la modalité TBGH_S001_CR2P_P3 on retrouve les 8 espèces, alors que pour modalité TBGH_S001_CR2P_P4 seules 6 sont retrouvées. Il est à noter que 5 espèces présentent dans le mélange de départ ne sont pas retrouvées dans nos relevés (Annexe 8.6.7.2 :

Tableau 64).

Par contre, on retrouve un nombre important d'espèces apparues (8) sur les modalités avec ce maximum obtenu sur la modalité TBGH_S001_CR2P_P4 qui présente de plus 5 espèces qui lui sont spécifiques (Annexe 8.6.7.2 :

Tableau 65).

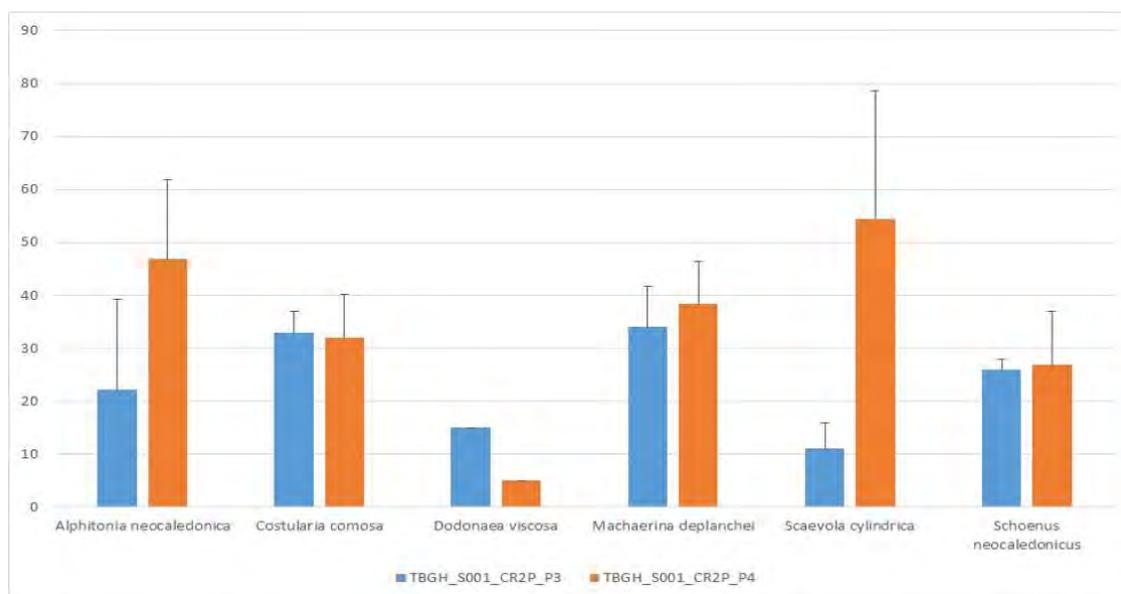


Figure 39 : Hauteur moyenne (en cm) des espèces utilisées communes à l'ensemble des modalités testées sur Paagoumène Crête 2

1.7.2.2. Conclusion

Ici les deux modalités sont deux semis hydrauliques réalisés sur des versants différents (Annexe 8.6.7.2 : Figure 103), avec respectivement une orientation Sud-Est (exposée aux vents dominants) et Nord-Ouest pour les modalités P3 et P4.

Cette différence d'orientation a un effet significatif sur la dynamique de l'écosystème mais aussi sur la productivité notamment des espèces ligneuses.

Ainsi, une zone exposée aux vents dominants aura des résultats de réussite globaux plus faibles que celle protégée, avec un impact plus important sur le développement des ligneux. A l'inverse elle présentera une prédominance d'herbacée et en particulier de Cypéracées plus importante.

A noter que des Poaceae exotiques avaient été utilisées dans ce semis hydraulique mais ne sont retrouvées qu'en quantité négligeable (avec des indices de recouvrement en espèces exotique inférieurs à 15%).

1.8. CONCLUSION GÉNÉRALE

Au travers de l'analyse de différentes modalités, il est possible d'établir un certain nombre de conclusions.

Tout d'abord concernant les 4 zones possédant des modalités avec ou sans ajout de topsoil, il a été possible d'analyser l'effet du topsoil sur les écosystèmes restaurés. L'ajout du topsoil montre un effet positif sur la productivité des espèces implantées, mais aussi sur la dynamique de recolonisation par de nouvelles espèces. **L'utilisation d'un outil tel que le topsoil pour la revégétalisation des anciens sites exploités est essentiel afin de d'obtenir rapidement un écosystème résilient et qui tend vers un stade naturel tel que l'avait indiqué Amir et al. (2014).**

Au niveau de l'utilisation du gaïac pour la revégétalisation des sites miniers, ici les modalités étudiées semblent montrer qu'une forte densité permet d'obtenir rapidement un bon recouvrement de la zone avec cette espèce, mais par contre ne permet pas la mise en place d'une dynamique de recolonisation, ni par les espèces alentours, ni par celles présentes dans le topsoil. **Une utilisation à une densité plus faible permet d'obtenir à priori un écosystème qui reste productif, mais surtout avec une dynamique de recolonisation plus intéressante dans un objectif de restauration écologique.** Ces données confirment celles présentées par L'Huillier et al. (2010), mais des expérimentations plus cadrées prenant en compte divers facteurs restent nécessaires pour conclure définitivement sur l'utilisation de cette espèce en restauration écologique.

Plusieurs modalités réalisées sur des types de substrats différents ont permis d'une part de voir les différences de comportement des espèces en fonction du type de substrat, mais aussi plus généralement les différences de réussite de la restauration. **Un substrat latéritique est plus approprié pour une bonne productivité et une bonne dynamique de recolonisation des écosystèmes.** Les résultats obtenus sur un substrat de type saprolitique sont beaucoup plus faibles et encore plus mauvais si ce dernier présente une forte concentration en particules fines (cas de modalités sur Camps des Sapins). Par contre son mélange avec de la latérite compense cette défaiance tout en restant bine inférieur à un substrat latéritique. Aussi, **l'apport de topsoil renforce fortement cette réussite sur latérite** de par sa structure physico-chimique et biologique (apport en matière organique, richesse en microorganismes, banque de graines, etc.) qui permet l'installation de nouvelles espèces issues des zones alentours. Amir et al. (2014) ou encore Bordez (2015) ont également montré que l'origine du topsoil (végétation décapée) et sa période de collecte avaient un impact sur cette réussite. Aussi, au travers de ces différentes modalités, il est possible de sortir une liste d'espèces qui seraient plus appropriées à utiliser en fonction du type de substrat en présence (Annexe 8.7 : Tableau 66).

L'analyse de la différence de réussite entre semis hydraulique et semis manuel a été possible sur une zone. En termes de réussite, il existe peu de différence entre les deux techniques. Il est tout de même à noter que le semis hydraulique avec un travail du sol réalisé en amont de l'ensemencement semble donner des résultats plus homogènes que le semis manuel ou le semis-hydraulique réalisé sans travail du sol.

Au niveau des effets des intrants utilisés, le cas des modalités sur Goro au niveau de Col de l'antenne et CR7 montre que l'ajout de Boues de STEP (épandues ici à 3 tonnes par hectare) ou de fiente de poules couplé à un paillage de copeaux de bois permettent une amélioration significative de la dynamique de recolonisation.

Par contre l'utilisation en épandage de cette boue entraîne un développement d'espèces exotiques qui peut être très important, que ce soit dans le cadre d'une plantation ou d'un semis hydraulique. **Ainsi il est préconisé l'utilisation des boues de STEP dans les trous de**

plantations. Et dans le cas d'épandage sur zone à hydroseeder, une utilisation en quantité faible.

Au travers des modalités sur CR7, il semble que l'utilisation d'engrais à diffusion lente permette de favoriser le recouvrement en espèces herbacées (par rapport à l'apport de boues de STEP ou de fiente de poule).

Les modalités sur Tontouta permettent notamment de mettre en évidence que **l'utilisation couplée de Boues de STEP, de topsoil et de technique de plantation reste parmi les plus favorables pour permettre une recolonisation optimale par des espèces végétales locales.**

Au niveau d'un semis hydraulique, les modalités sur la verse AC2 de la mine Pinpin montre peu de différence. On est ici en présence de modalités qui sont relativement jeunes et qui pourrait être intéressant de suivre dans le temps. Sur ces modalités, l'utilisation de poaceae dans le mélange de départ se traduit par un développement assez important de ces espèces (avec des indices de recouvrement entre 40 et 60%). Cependant, il semble qu'un apport moins important d'engrais chimiques (type 17.17.17 ou 0.32.16) donne des résultats plus hétérogènes, avec une partie qui montre une bonne productivité et dynamique de recolonisation, mais une autre caractérisé uniquement par la présence d'espèces exotiques. Aussi l'utilisation d'espèces exotiques reste à proscrire sauf dans des cas très particuliers (forte pente, zone transitoire, etc.) et l'idée d'utiliser des variétés stériles (non OGM) reste à creuser.

Enfin au niveau de l'influence de l'orientation, les zones non soumises aux vents dominants montrent de meilleurs taux de réussite. Elles sont donc à favoriser. Dans le cas des zones exposées au vent, les brise-vents végétaux, encore trop peu développés, n'ont pas réussi à jouer leur rôle afin de permettre de créer les conditions optimales au développement de l'écosystème restauré (cas des modalités sur le Mont Dore). Ici, **il semble clair que la mise en place de brise vents naturels et leur développement préliminaire pour des zones soumises aux vents est essentielle pour permettre d'apporter des conditions convenables au développement des espèces végétales.**

2. APPROCHE MATHEMATIQUE GLOBALE

Pour compléter la comparaison des modalités au sein des zones revégétalisées, une approche mathématique globale visant à analyser la diversité des données biologiques obtenues a été réalisée, afin notamment de comprendre quelles sont les tendances qui déterminent la réussite de la restauration écologique et d'en tirer un indicateur synthétique de cette réussite.

2.1. TYPOLOGIE DES ZONES ÉTUDIÉES

Comme nous l'avons déjà souligné, la difficulté majeure de cette étude est la grande diversité des sites et des conditions de revégétalisation utilisées depuis une trentaine d'années. Cette variabilité des cas rend très délicate la comparaison directe entre des sites trop différents par leurs caractéristiques générales ou leurs conditions de revégétalisation. Pour contourner cette difficulté, la démarche la plus rationnelle est de définir des groupes d'affinité permettant de rassembler en sous-ensembles plus homogènes les sites qui présentent des caractéristiques proches et pouvant donc faire l'objet de comparaisons, avec des chances plus importantes d'aboutir à des résultats statistiquement significatifs.

La typologie est définie à un niveau d'imbrication le plus fin, c'est-à-dire au niveau des modalités (sous-zones). Bien que de nombreuses zones ne présentent qu'une seule modalité (plus de 70%), les zones présentant des modalités différentes peuvent présenter aussi des caractéristiques assez différentes (type de sol, de topographie, de technique utilisée, etc.).

Pour cette classification des modalités, seules les caractéristiques générales (et non les données descriptives des parcelles revégétalisées, selon la « fiche terrain ») ont été prises en compte. En effet, il ne s'agit pas pour l'instant de classer les modalités selon l'évolution du système revégétalisé, mais plutôt de classer les terrains eux-mêmes, pour pouvoir ensuite comparer les données descriptives des parcelles revégétalisées, à l'intérieur de groupes relativement homogènes.

Plusieurs essais de typologie ont été testés, avec comme objectif d'obtenir une classification équilibrée (en termes notamment de nombre de sous-zones par groupe) et cohérente (notamment avec faible dispersion des modalités de sites proches).

Une première typologie a été réalisée avec l'ensemble des 23 caractéristiques ou variables générales étudiées, listées dans les **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** & 5 (voir détail dans la partie 2.10 « préparation et analyse des données »).

Une vue avec les deux composantes principales de l'AFDM correspondant à ce premier essai est donnée en Annexe 8.8 : Figure 104, ainsi que le résultat obtenu fixant trois clusters et les variables qui les caractérisent (Annexe 8.8 :

Tableau 67) et leur composition (Annexe 8.8 :

Tableau 68).

Afin d'améliorer la cohérence des groupes, nous avons ensuite décidé de supprimer certaines variables qui nous paraissaient peu fiables ou qui représentaient trop peu de cas, tout en déterminant fortement la disposition des nuages de points. Ainsi, la variable « température moyenne » a été supprimée, car dans de nombreux cas, les données obtenues ne correspondaient pas au site lui-même, mais à la région, souvent pour une altitude bien différente. Les variables liées à la pierrosité des terrains, à l'érosion et à la présence d'espèces

exotiques, ont été également supprimées, car elles ont été mesurées pour trop peu de cas, les autres cas (majoritaires) ayant des niveaux de pierrosité, d'érosion et d'espèces exotiques trop faibles pour être mesurés.

Nous avons donc refait deux essais de classification, un avec 14 variables, un autre avec 11 variables.

C'est finalement la typologie obtenue avec les 11 variables majeures et fiables qui apparaît la plus équilibrée et la plus cohérente. Les 11 variables utilisées sont les suivantes :

-Variables qualitatives :

(1) La désignation (banquette, plateforme ou talus) (2) le type de substrat (saprolite, latérite ou topsoil), (3) la technique utilisée (Plantation, Semis Hydraulique ou Semis Manuel), (4) l'induration du sol (Meuble ou Induré), (5) l'écosystème alentour dominant, (6) l'orientation de la parcelle (par rapport à la pente définit selon la combinaison des 4 points cardinaux), (7) pluviométrie (moyenne sur 3 ans des pluviométries cumulées, en mm/ an), et (8) exposition aux alizées (oui ou non, la parcelle est exposée aux vents dominants Est, Sud-Est).

-Variables quantitatives :

(9) Altitude (en m) ; (10) pente (en degré) et (11) nombre d'espèces de maquis utilisées.

L'AFDM correspondant à cette analyse (Figure 39) montre qu'on peut distinguer 3 sous-ensembles bien distincts ou clusters, qui se distinguent sur la base de plusieurs variables (significativement différents). Une expression de type dendrogramme en 3 dimensions (Figure 39) indique que les clusters comportent eux-mêmes des groupes relativement distincts.

Le Tableau 28 résume les caractères dominants qui déterminent chacun des clusters par leur contribution. On peut ainsi remarquer que le cluster 1 caractérise les sous-zones à forte pluviosité, peu ventées et revégétalisées par plantation, avec topsoil. Le cluster 2 correspond aux sous-zones de pluviosité moyenne, le plus souvent étalées et peu pentues, mais ventées, revégétalisées par plantation, avec un substrat meuble. Le cluster 3 correspond aux sous-zones à faible pluviosité, en talus avec pente, peu soumises aux vents, avec du maquis ligno-herbacés comme écosystème proche.

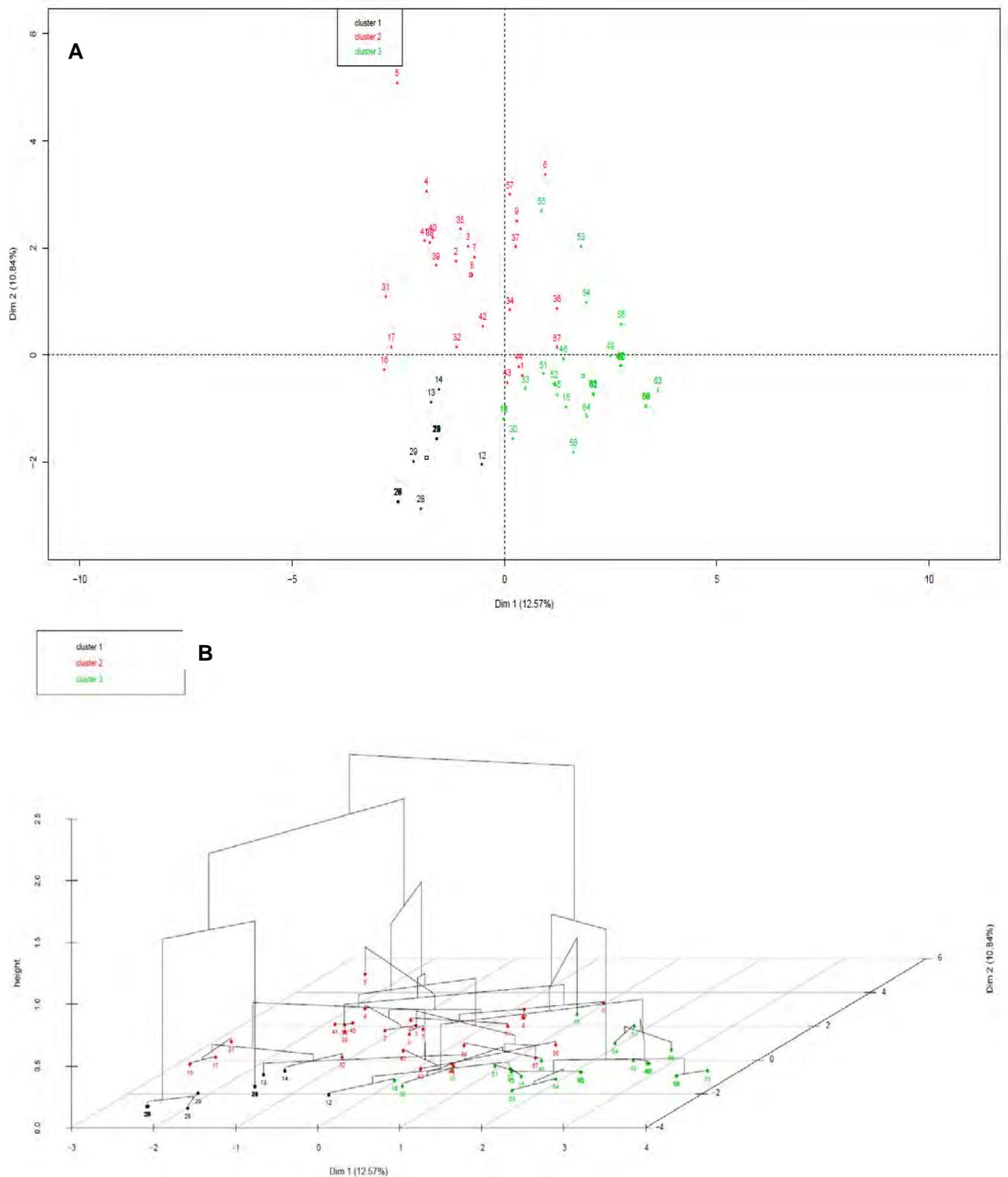


Figure 40 : **A** : Projection des sous-zones sur les 2 premières composantes principales (qui expliquent 14.7% de la variabilité totale observée). **B** : une projection en dendrogramme montrant la séparation en sous-groupes des 3 clusters.

Tableau 28 : Variables déterminant les clusters.

En rose, les modalités des variables qualitatives qui présentent un pourcentage de présence élevée (variables caractéristiques des clusters). En bleu, ce sont les modalités dont le pourcentage de présence dans le cluster est proche de 0 et en rouge le résultat pour les variables quantitatives, avec une corrélation positive synonyme de valeurs élevées et une corrélation négative synonyme de valeur faible dans le cluster

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
PLUVIO=> 2093.05	ALIZEE=où	DESIGNATION = talus
SUB=top_soil	DESIGNATION=plateforme	ALIZEE = non
ALIZEE=non	TECHNIQUE=PL	PLUVIO=<= 1174.6
TECHNIQUE=PL	PLUVIO=] 1174.6 - 2093.05]	ECODOMI = maquis_ligno-herbacee
ECODOMI=soil_nu	INDURATION=meuble	DESIGNATION = banquette
TECHNIQUE=SH	ORIENTATION=Ouest	ALIZEE = oui
ALT = CORREL.NEG	ECODOMI=maquis_paraforestier	DESIGNATION = plateforme
PENTE = CORREL.NEG	PENTE = CORREL.NEG	PENTE = CORREL.POSI
	NBRESPMAQUIS = CORREL.POSI	NBRESPMAQUIS = CORREL.NEG

- Variables dont le pourcentage est très élevé
- Variables dont le pourcentage est nul
- Interprétation des variables quantitative

Le cluster 1 contient principalement des plantations sur topsoil (Figure 40) situées à faible altitude et avec l'emploi d'un nombre important d'espèces de maquis utilisées (en moyenne 13 par modalités). Les terrains ne sont pas soumis aux alizés et sont situés dans une région à forte pluviosité.

Le cluster 2 contient principalement des plantations, réparties sur différents types de substrats, en moyenne situées au-dessus de 400 m d'altitude, et avec un grand nombre d'espèces de maquis utilisées (17 en moyenne). La quasi-totalité des modalités de ce cluster présentent un substrat meuble (25 sur 26) et une grande majorité est soumise aux alizés.

Ces deux premiers clusters présentent des terrains à pente faible (corrélation négative avec la pente) (

Figure 41).

Le cluster 3 contient un nombre équivalent de plantations et de semis-hydrauliques, réalisés tous sur talus, avec une pente moyenne de l'ordre de 25°. Les terrains ne sont pas soumis aux alizés ; les écosystèmes dominant à proximité de ces terrains sont le plus souvent des maquis ligno-herbacés et plus de la moitié sont situés dans des régions à pluviosité moins importantes.

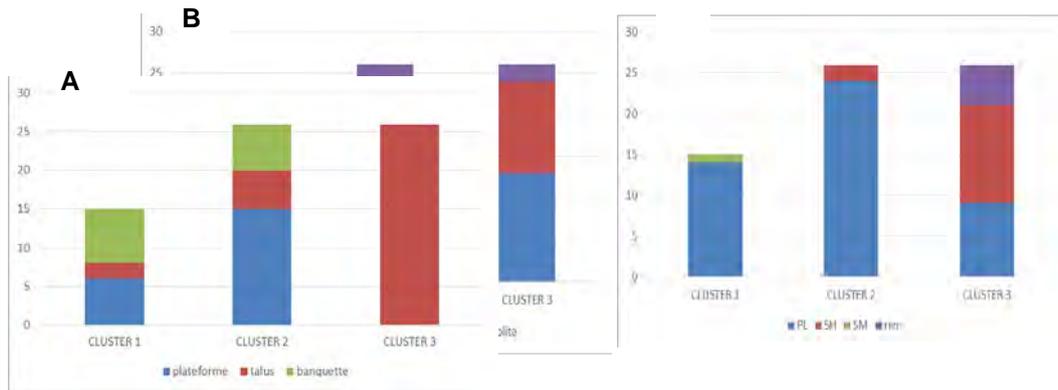


Figure 41 : Répartition (A) des types de surfaces revégétalisées (plateformes, banquettes, talus), (B) des types de substrat et (C) des techniques utilisées (PL : plantation, SH : semis hydraulique, SM : semis manuel), pour chacun des trois clusters définis par la typologie.

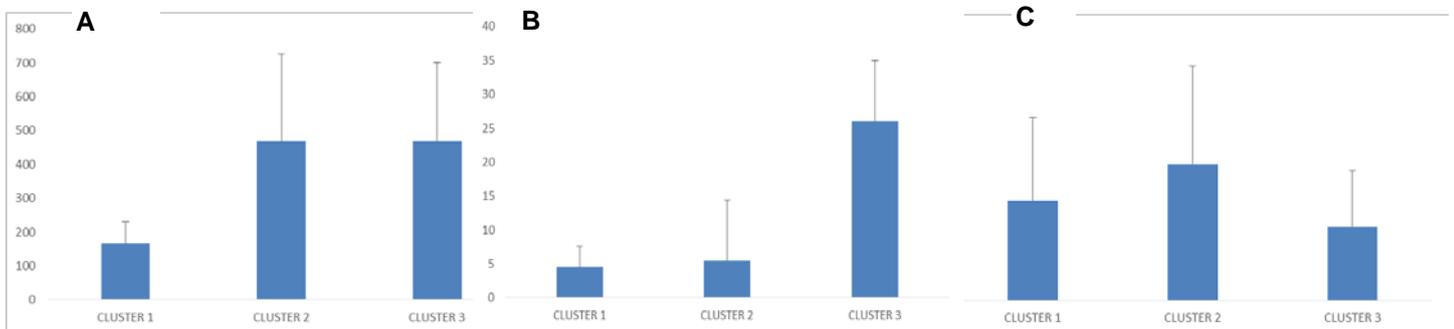


Figure 42 : Moyenne (A) des altitudes (en m), (B) des pentes (en degré) et (C) du nombre d'espèces de maquis utilisées, pour chacun des trois clusters définis par la typologie.

Le Tableau 29 donne la liste des modalités appartenant à chacun des trois clusters obtenus. On peut remarquer que la distribution des modalités est cohérente en termes de sites et que les nombres de modalités par cluster sont globalement équilibrés.

Cette classification va nous permettre maintenant d'analyser chaque cluster afin de faire ressortir notamment les sous-zones pour lesquelles l'évolution vers une véritable restauration écologique est la plus vraisemblable.

Tableau 29 : Liste des modalités correspondant à chacun des 3 clusters produits par la Classification Hiérarchique. Le détail des appellations des sous-zones est donné dans « Matériels et méthodes

Cluster 1			Cluster 2			Cluster 3		
N°	Nom	Localisation	N°	Nom	Localisation	N°	Nom	Localisation
12	Verse Ferry 3	Goro	1	Decharge Sud	Bouloudjelima	10	Verse Ferry 1	Goro
13	Cofremi	Goro	2	Mona Sud 1	Cap Bocage	11	Verse Ferry 2	Goro
14	Kuebini	Goro	3	Mona Sud 2	Cap Bocage	15	Verse Exercice Minier	Goro
18	Col de l'antenne T0	Goro	4	Verse principale 1	Cap Bocage	30	Verse SMSP 2	Goro
19	Col de l'antenne T1	Goro	5	Verse principale 2	Cap Bocage	33	Zone 640	Koniambo
20	Col de l'antenne T2	Goro	6	Ningua Zone A	Camp des Sapins	45	Verse Principale PS01	Nakety
21	Col de l'antenne T3	Goro	7	Ningua Crepuscule exterieur	Camp des Sapins	46	Decharge Vallee des Tritouts	Porro
22	Col de l'antenne T4	Goro	8	Ningua Crepuscule haute	Camp des Sapins	47	Verse AC2 Talus 1 B	Pimpin
23	Col de l'antenne T5	Goro	9	Ningua Essai 508	Camp des Sapins	48	Verse AC2 Talus 1 C	Pimpin
24	CR7 1	Goro	16	Route Port Boise 1	Goro	49	Verse AC2 Talus 1 E	Pimpin
25	CR7 2	Goro	17	Route Port Boise 2	Goro	50	Verse AC2 Talus 2 B	Pimpin
26	CR7 3	Goro	31	Usine A1 1	Goro	51	Paagoumene Partie 3	Tiebaghi
27	CR7 4	Goro	32	Usine A1 2	Goro	52	Paagoumene Partie 4	Tiebaghi
28	Route du Port	Goro	34	Essai Tracy	Goro	53	Grande verse 2003	Tiebaghi
29	Verse SMSP 1	Goro	35	Mont Matre Mont Reve	Koniambo	54	Grande verse 2006	Tiebaghi
			36	Carrieres Sud Ouest	Kouaboua	55	Verse Haute	Tiebaghi
			37	Verse L20	Kareme	56	Verse principale Partie Sud	Tiebaghi
			38	Rouvray parcelle 2	Mont Dore	58	Verse Face Mer	Tomo
			39	Rouvray parcelle 3	Mont Dore	59	Essai IAC 1	Tontouta
			40	Rouvray parcelle 6	Mont Dore	60	Essai IAC 2	Tontouta
			41	Rouvray Zone Serianthes	Mont Dore	61	Essai IAC 3	Tontouta
			42	Verse Domergue	Nakety	62	Essai IAC 4	Tontouta
			43	Verse Principale PN01	Nakety	63	Essai IAC 5	Tontouta
			44	Verse Principale PN02	Nakety	64	Essai IAC 6	Tontouta
			57	Moulinets	Thio plateau	65	Essai IAC 7	Tontouta
			67	Module 4	Tontouta	66	Essai IAC 8	Tontouta

2.2. RECHERCHE D'UN INDICATEUR SYNTHÉTIQUE DE RÉUSSITE DE LA RESTAURATION ECOLOGIQUE AU SEIN DES MODALITÉS DE CHACUN DES TROIS CLUSTERS

Comme décrit dans la partie « méthodologies », une difficulté particulière de l'analyse des données recueillies est le fait que les années de revégétalisation des terrains étudiés sont très différentes, la plus ancienne datant de 1988 et la plus récente de 2013. Ainsi, on se retrouve avec des écosystèmes avec un temps d'évolution différent qu'il convient de comparer entre eux. Afin de mettre en évidence les conditions et techniques qui influencent le plus la réussite de la restauration, il est donc impératif de corriger au préalable cet effet du temps sur les différentes opérations de revégétalisation. Les données utilisées ont donc été traitées pour à les rendre indépendantes de cette variable (voir parag. 2.10.2.).

2.2.1. RECHERCHE D'UN PARAMÈTRE SYNTHÉTIQUE EXPRIMANT LA TENDANCE À LA RÉUSSITE DE LA RESTAURATION ECOLOGIQUE.

Nous avons noté dans la partie « méthodologies » (10.2.), que le nombre total de paramètres produit dans la fiche terrain est élevé. Parmi l'ensemble de ces variables, certaines présentent des corrélations entre elles et certaines montrent peu de significativités et d'influence pour comparer les différentes modalités entre-elles. Ainsi, le recours à une sélection mathématique des variables les plus pertinentes pour décrire les différences les plus significatives a été choisi, méthode permettant de mieux appréhender la complexité de ces analyses. Cette opération a donc permis, sur la base des paramètres de la fiche terrain (variables explicatives), de sélectionner les variables les plus pertinentes en général, et ensuite pour chaque cluster.

La sélection est réalisée d'abord sur l'ensemble des données afin de pouvoir mener une analyse globale sur les 3 clusters par AFDM. Cette analyse traduit à travers ses axes (composantes) les principales tendances de la variabilité du nuage de points et met en évidence les variables qui déterminent ces tendances. Or dans le cas précis qui nous concerne ici, les tendances principales sont celles choisies pour exprimer au mieux la réussite de la restauration écologique (celles de la « fiche terrain »). Il faut donc s'attendre à ce que certains de ces axes expriment cette réussite.

Les 12 variables sélectionnées sont listées dans le Tableau 30. Il y a 9 variables décrivant la productivité et la diversité initiale (croissance, recouvrement, nombre d'individus par unité de surface, diversité des espèces utilisées et indice de dégradation) et 3 composantes liées à la dynamique du système (indice de diversité des espèces apparues, nombre d'espèces apparues et croissance des espèces apparues).

Tableau 30 : Variables explicatives sélectionnées pour l'ACP globale :

Variables sélectionnées	
1	RECOUV_TOT Indice de recouvrement total
2	Nbr_ind_TOT_20m2 nombre total d'individus (plants) sur 20 m ²
3	Nbr_ind_APP_20m2 nombre d'individus des espèces apparues
4	Nbr_ESP_TOT_20m2 Nombre d'espèces apparues
5	DEGAT Indice général de dégât sur les plantes
6	MOY_HAUT_HERB_UTI Moyenne des hauteurs des espèces herbacées utilisées (en cm)
7	MOY_HAUT_LIGN_UTI Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
8	MOY_DIAM_LIGN_UTI Moyenne des diamètres des espèces ligneuses utilisées (tronc, en cm)
9	MOY_DIAM_LIGN_APP Moyenne des diamètres des espèces ligneuses apparues (tronc, n cm)
10	MOY_DIAM_MOY_HERB_ESP_TOT Moyenne des diamètres des espèces herbacées utilisées (touffe, en cm)
11	DIV_SHANN_APP Indice de diversité de Shannon pour les espèces apparues
12	DIV_SHANN_UTI Indice de diversité de Shannon pour les espèces utilisées

L'ACP réalisée avec l'ensemble des modalités étudiées et les variables explicatives sélectionnées donne le cercle de corrélation suivant (Figure 42)

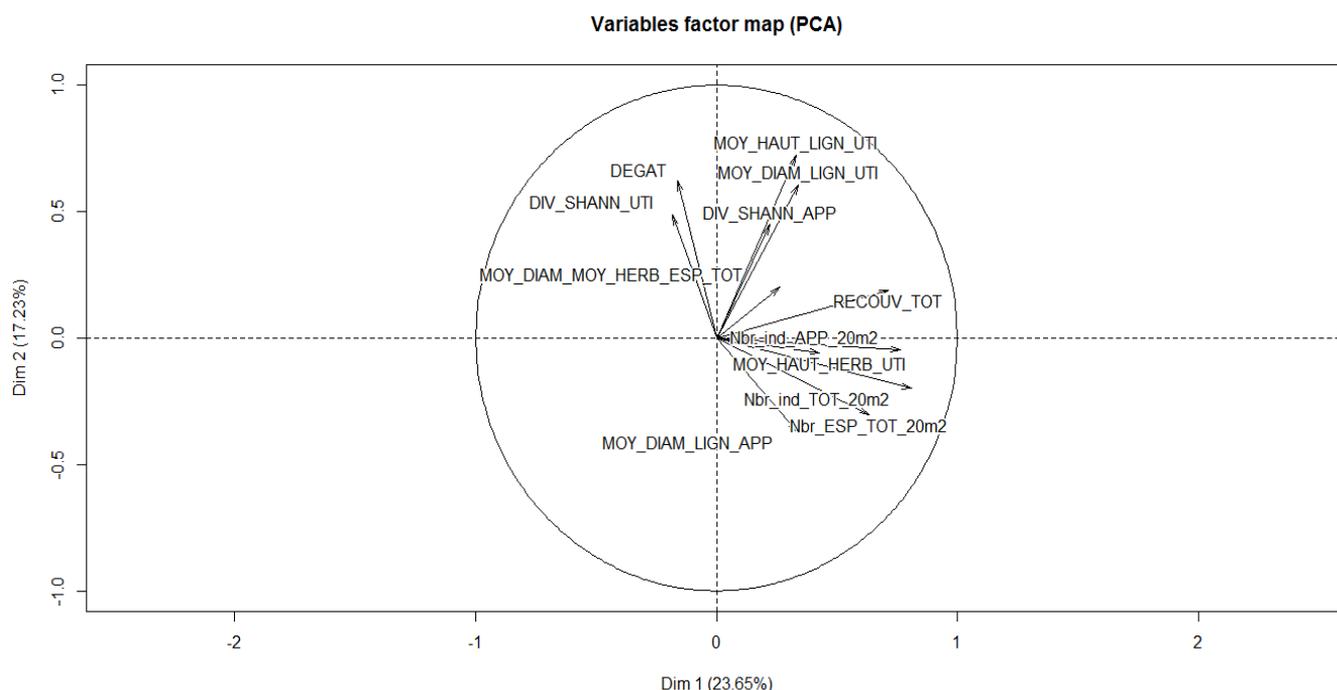


Figure 43 : Cercle de corrélation montrant la projection des variables explicatives sélectionnées sur les deux premiers axes de l'ACP (pour le sens exact des appellations contractées, voir Tableau 30)

Les axes d'une ACP traduisent les principales tendances de la variabilité des données. L'axe 1 de cette figure explique 23,6 % de la variabilité ; et l'axe 2 explique 17,2 %. On peut constater que la majorité des variables explicatives positives (favorables à une bonne évolution des terrains revégétalisés) est orientée dans le sens positif de l'axe 1, puis de l'axe 2 et que la projection orthogonale de ces variables sur ces axes illustre correctement le cumul de leurs effets. Cependant, pour l'axe 2, les variables positives se répartissent également des côtés positif et négatif de l'axe. Cet axe traduit donc des tendances complexes non assimilables à une indication de réussite. **C'est donc l'axe 1 seul qui doit être considéré comme l'indicateur synthétique de la réussite de la restauration.**

Les variables qui sont orientées dans le sens inverse de l'axe 1 ont peu de contribution sur l'axe 1. La variable « dégât » (indice des dégâts causés sur les plantes) est une variable négative qui corrobore donc l'idée que le sens positif de l'axe 1 illustre les aspects positifs de l'évolution du système revégétalisé en devenir. Toutes les variables qui traduisent la productivité du système et sa diversité ont globalement une contribution significative sur l'axe 1.

Suite à cette constatation mathématique permettant de poser que l'axe 1 illustre synthétiquement la réussite de la revégétalisation dans l'optique d'une restauration écologique, nous avons utilisé ce modèle pour vérifier si cette conclusion mathématique est bien validée par la réalité objective sur le terrain. Les exemples que nous présentons ci-dessous, avec des modalités d'aspects très différents, montrent que le modèle fonctionne bien.

L'ACP présente le positionnement des groupes internes aux 3 clusters issus de la typologie créés par les analyses statistiques (Figure 43).

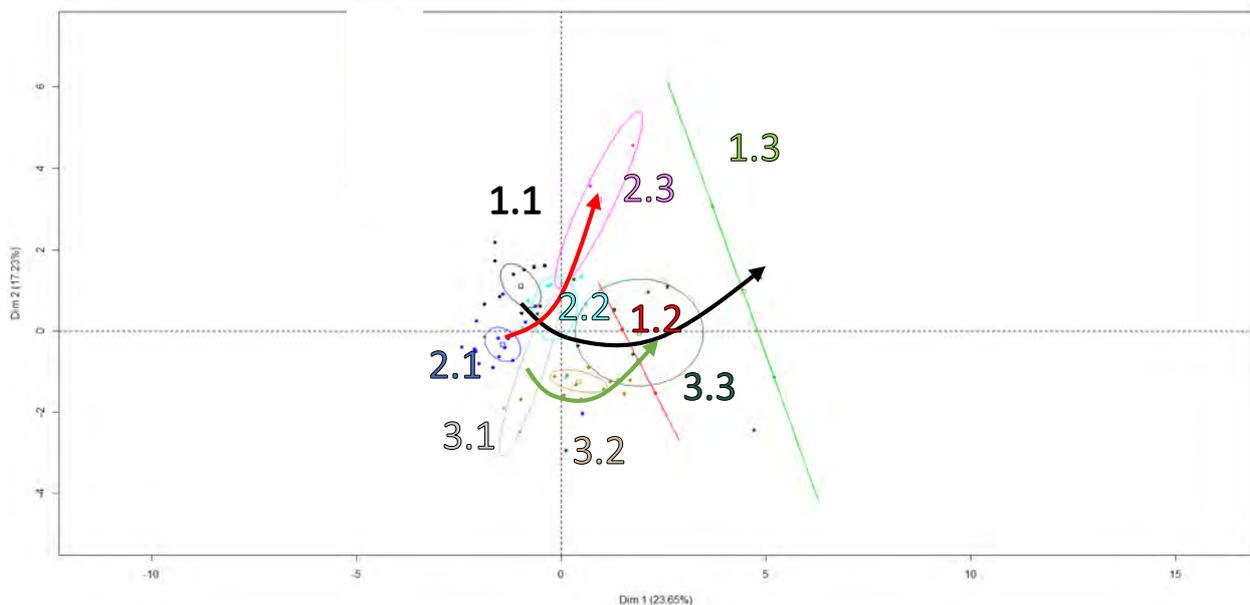


Figure 44 : Projection des individus (modalités) sur les 2 premières composantes principales (qui expliquent 40,9 % de la variabilité totale observée).

Les couleurs correspondent aux différents clusters et groupes issus de la typologie et des classifications hiérarchiques. Les groupes 1-1, 1-2 et 1-3 correspondent aux trois groupes définis par la classification hiérarchique du cluster 1. Les groupes 2-1, 2-2 et 2-3 correspondent aux trois groupes définis par la classification hiérarchique du cluster 2. Les groupes 3-1, 3-2 et 3-3 correspondent aux trois groupes définis par la classification hiérarchique du cluster 3

On note que chacun des 3 clusters se divise en 3 groupes qui se placent différemment le long des axes 1 et 2. Bien que cette figure soit complexe (elle sera décomposée de façon plus simple lors de l'analyse par cluster), nous pouvons remarquer que la majorité des modalités se trouvent vers le centre ou vers la partie négative de l'axe 1, ce qui signifie que la proportion de sites pouvant être considérés comme ayant bien réussi est assez faible (moins d'un tiers). Le cluster 1 comporte les modalités globalement les plus performantes. Cette première approche est cependant très générale. En raison des différences importantes entre les 3 clusters, il apparaît plus précis d'utiliser ce modèle d'indicateur de réussite au sein de chaque cluster séparément, ce que nous développons ci-dessous.

2.2.2. ANALYSE DES 3 CLUSTERS EN TERMES DE RÉUSSITE DE LA RESTAURATION

2.2.2.1. Analyse du Cluster 1

Les 12 variables sélectionnées pour le cluster 1 (Tableau 31) comprennent 9 composantes qui caractérisent la productivité et la diversité du système (croissance, recouvrement, état général, diversité des espèces utilisées et indice de dégradation) et 3 composantes caractéristique de sa dynamique (indice du nombre de recrûs, indice de diversité des espèces apparues et nombre d'espèces apparues).

Tableau 31 : Variables sélectionnées pour le Cluster 1

Variables sélectionnées		
1	MOY_DIAM_HERB_UTI	Moyenne des diamètres des espèces herbacées utilisées (en cm)
2	MOY_HAUT_HERB_UTI	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées utilisées (en cm)
3	DEGATFOLIAIRE	Indice de dégradation foliaire
4	DIV_SHANNON_UTI	Indice de diversité de Shannon pour les espèces utilisées
5	ETAT_GENERAL	Indice de l'état général
6	DEGAT	Indice de dégât
7	MOY_DIAM_LIGN_UTI	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses utilisées (en cm)
8	NBR_RECRÛS_IDENTIQUES	Indice moyen du nombre de recrûs de chaque espèce (sous plante mère)
9	RECOUV_LIGN	Indice de recouvrement en espèces ligneuses
10	Nbr_ESP_APP_20m2	Nombre d'espèces apparues
11	DIV_SIMP_APP	Indice de diversité de Simpson pour les espèces apparues
12	MOY_HAUT_LIGN_APP	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses apparues (en cm)

Le cercle des corrélations de l'ACP réalisée pour le cluster 1 (Figure 44) indique que toutes les variables positives (la variable « dégâts » est négative) sont orientées dans le sens positif de l'axe 1. Leur projection sur l'axe 1 permet donc d'obtenir un bon indicateur global de réussite, comme proposé précédemment.

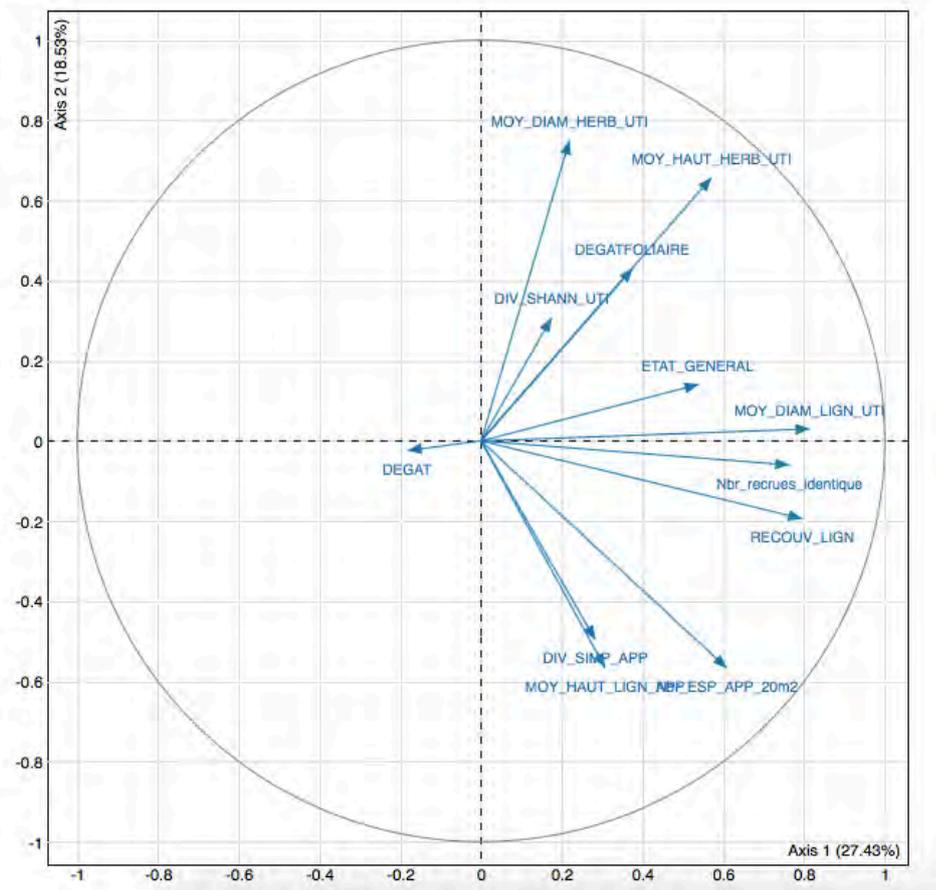


Figure 45 : Cercle des corrélations obtenu pour le cluster 1.

Le cercle des corrélations obtenu pour le cluster 1 montre la projection des variables explicatives sélectionnées sur les deux premiers axes de l'ACP qui expliquent 45,9% de la variabilité totale observée (pour le sens exact des appellations contractées, voir Tableau 31

Le cluster 1 comporte 3 groupes statistiquement distincts (Figure 44 & Figure 45). La grande majorité des modalités (13) appartiennent cependant à un seul groupe (points en noir). Les 2 autres groupes comportent uniquement 2 modalités chacun. Il faut préciser que les points projetés ici correspondent aux quadrats mesurés pour chaque modalité (cela ne change rien en termes de résultats, mais permet de mieux appréhender la dispersion des résultats). Les sous zones appartenant à chacun des 3 groupes sont listées directement dans la Figure 45

Les 3 groupes se classent différemment par rapport à l'axe 1 (indicateur de réussite), le groupe de droite (en vert) représentant donc les modalités les plus performantes en termes de réussite de la restauration, puisqu'il est orienté dans le sens du faisceau des variables positives (axe 1), tandis que le groupe de gauche, en noir, correspond aux modalités les moins performantes.

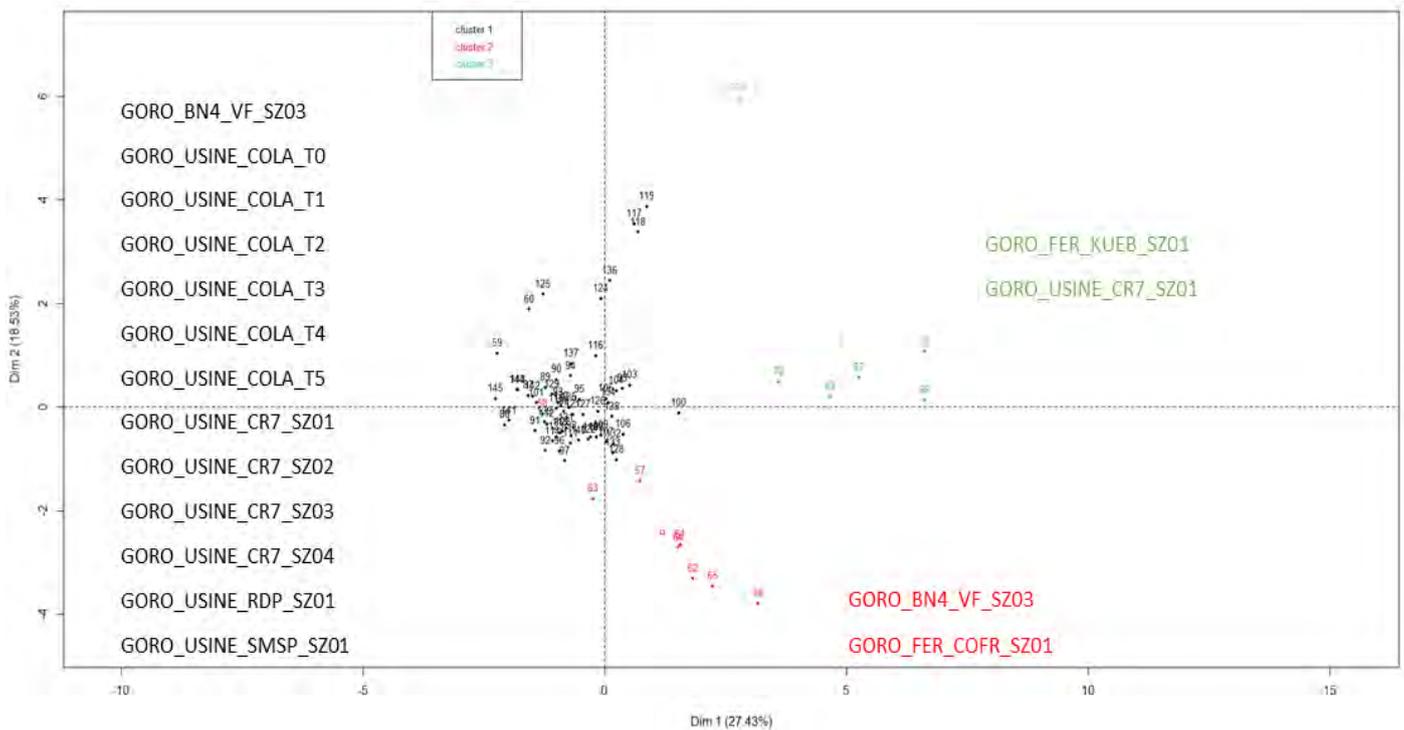


Figure 46 : Projection des individus (quadrats) sur les 2 premières composantes principales (qui expliquent 45,96% de la variabilité totale observée).

Les couleurs correspondent aux groupes définis par la classification hiérarchique. La liste en modalités de chaque cluster créé est listée dans la même couleur.

La Figure 46 permet de visualiser en 3 dimensions, sur 3 axes, la disposition des 3 groupes en relation avec l'orientation des variables.

Le premier groupe (13 modalités) regroupe des zones de plantations sur topsoil, en faible altitude (moyenne 158 m) une faible pente (4°) et un nombre d'espèces de maquis utilisées moyen (12). Ces zones présentent des corrélations positives avec l'indice de dégradation significativement supérieur aux modalités des autres sous-clusters (sauf pour GORO_USINE_RDP, GORO_USINE_SMSP_SZ01).

Le second groupe est composé des 2 modalités GORO_BN4_VF_SZ03, GORO_FER_COFR_SZ01, respectivement un semis manuel et une plantation. Ce groupe est caractérisé par des valeurs importantes pour l'indice de recouvrement en ligneux (significatif pour GORO_FER_COFR_SZ01), le nombre d'espèces apparues (significatif pour GORO_FER_COFR_SZ01) et pour la hauteur moyenne des espèces ligneuses apparues.

Le troisième groupe est constitué par GORO_FER_KUEB_SZ01 et GORO_USINE_CR7_SZ01 deux plantations sur latérite et topsoil respectivement. Ce groupe est caractérisé par des valeurs élevées pour l'indice de l'état général, l'indice de recouvrement en ligneux, l'indice de Shannon des espèces utilisées, le nombre d'espèces apparues, la hauteur et le diamètre des herbacées utilisées, le diamètre des espèces ligneuses utilisées, l'indice du nombre de recrûs identiques et l'indice de dégradation foliaire (Annexe 8.9 : Figure 105 & Figure 106).

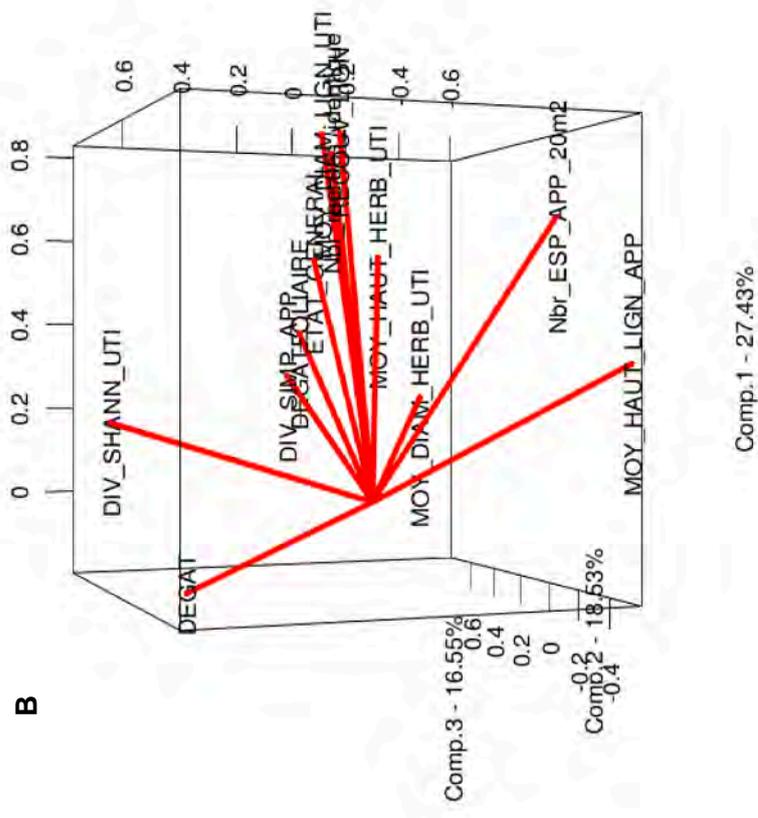
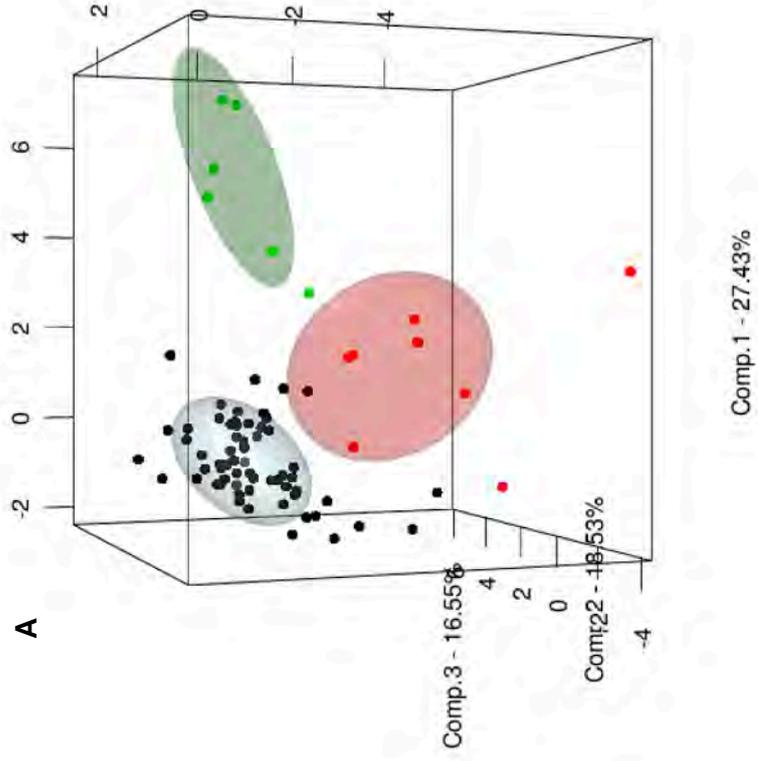


Figure 47 : Projection des individus (quadrats des modalités) sur les 3 premiers axes de l'ACP qui expliquent 62,5 % de la variabilité totale observée. Les couleurs correspondent aux différents groupes issus de la typologie et des classifications hiérarchiques. B- projection des variables permettant d'interpréter les tendances des groupes d'individus (la différence de forme avec les 2 précédents graphiques est liée uniquement à une perspective différente, l'axe 2 étant ici à l'arrière)

2.2.2.2. Analyse du Cluster 2

Les 12 variables sélectionnées pour le cluster 2 (Tableau 32) comprennent 10 composantes de la productivité et de la diversité (croissance, recouvrements, diversité des espèces utilisées, nombre d'individus utilisés et indices de dégradations) et 2 composantes de sa dynamique (indices du nombre de recrûs, indice de diversité des espèces apparues).

Tableau 32 : Variables sélectionnées pour le cluster 2

Variables sélectionnées		
1	Nbr_ind_UTI_20m2	nombre d'individus d'espèce utilisée
2	DIV_SHANN_UTI	Indice de diversité de Shannon pour les espèces utilisées
3	MOY_HAUT_LIGN_APP	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses apparues (en cm)
4	MOY_DIAM_MOY_LIGN_ESP_TOT	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses utilisées (en cm)
5	DIV_SHANN_APP	Indice de diversité de Shannon pour les espèces apparues
6	RECOUV_TOT	Indice de recouvrement total
7	MOY_HAUT_LIGN_UTI	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
8	DIV_SIMP_TOT	Indice de diversité de Simpson pour les espèces apparues
9	Nbr_recrûs_diff	Indice du nombre de recrûs différents
10	MOY_HAUT_HERB_UTI	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées utilisées (en cm)
11	DEGATFOLIAIRE	Indice de dégradation foliaire
12	MOY_DIAM_HERB_APP	Moyenne des diamètres des espèces herbacées apparues (en cm)

Le cercle des corrélations (projection des variables explicatives) montre comme précédemment, que la contribution des variables est expliquée en grande partie par l'axe 1 et l'axe 2 (Figure 47).

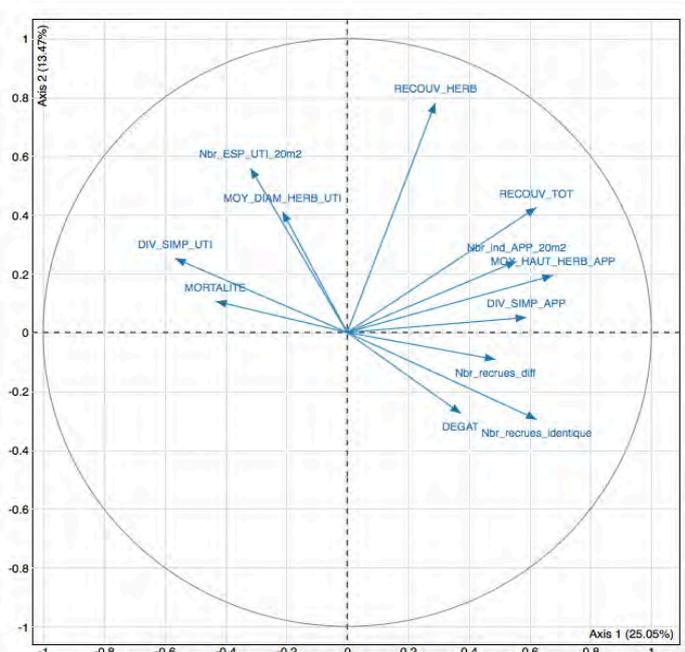


Figure 48 : Cercle des corrélations obtenu pour le cluster 2.

Le Cercle des corrélations obtenu pour le cluster 2 montre la projection des variables explicatives sélectionnées sur les deux premiers axes de l'ACP qui expliquent 38,5% de la variabilité totale observée (pour le sens exact des appellations contractées, voir Tableau 32).

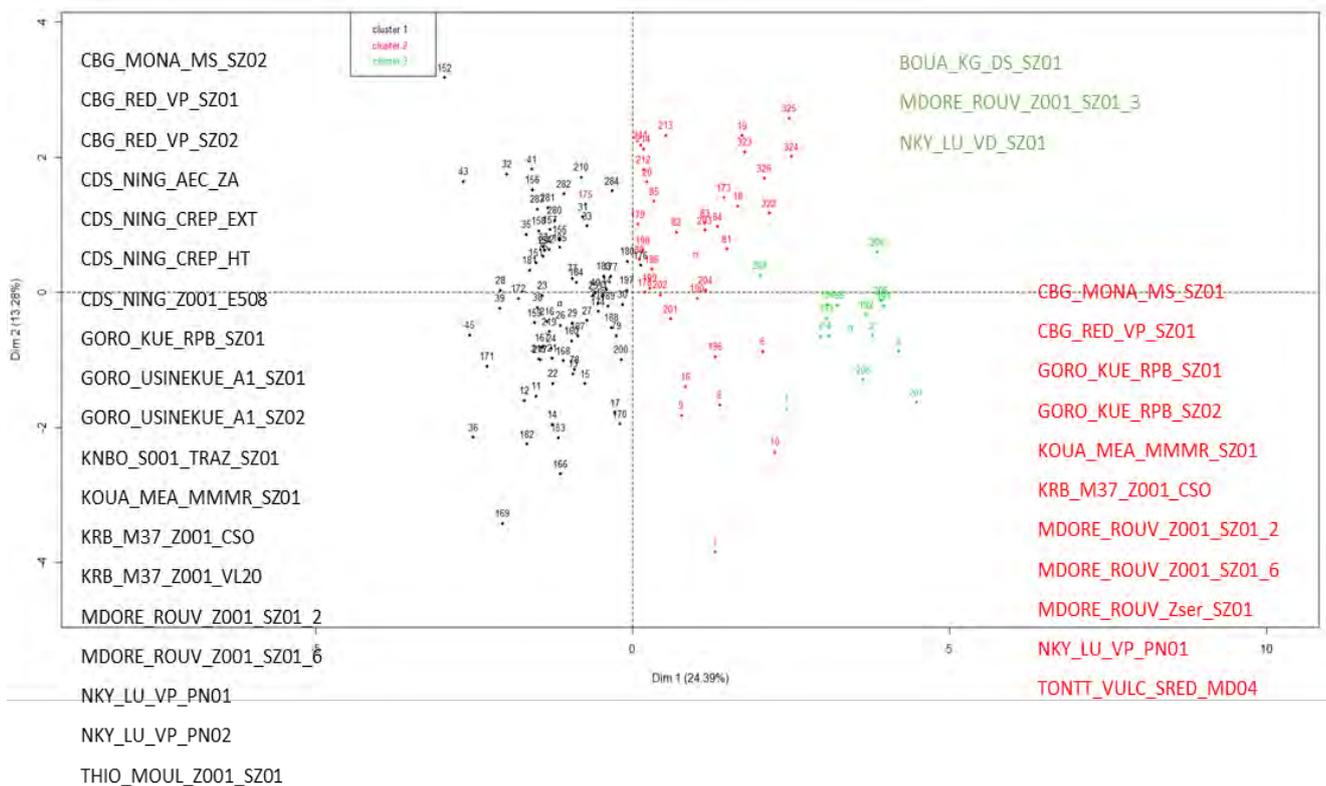


Figure 49 : Projection des individus (modalités) sur les 2 premières composantes principales (qui expliquent 37,7% de la variabilité totale observée).

Les couleurs correspondent aux groupes définis par la classification hiérarchique effectuée. La liste des modalités de chaque groupe créé est listée dans la même couleur

Trois groupes sont également individualisés dans ce cluster (Figure 48). Trois modalités apparaissent comme les plus performantes en termes d'évolution vers une restauration écologique (BOUA_KG_DS_SZ01 ; MONTDORE_ROUV_Z001_SZ01_3 et NKY_LU_VD_SZ01). 11 Modalités apparaissent comme intermédiaires avec quelques-unes assez performantes (celles qui sont hautes dans l'axe 2) et 19 apparaissent plutôt peu performantes. Les modalités appartenant à chacun des 3 groupes sont listées directement dans la Figure 48. Là encore, les modalités listées en vert à droite sont les plus performantes. Celles en noir à gauche sont les moins performantes.

Les 3 groupes se classent différemment par rapport à l'axe 1 (indicateur de réussite), le groupe de droite (en vert) représentant donc les modalités les plus performantes en termes de réussite de la restauration, puisqu'il est orienté dans le sens du faisceau des variables positives (axe 1), tandis que le groupe de gauche correspond aux modalités les moins performantes.

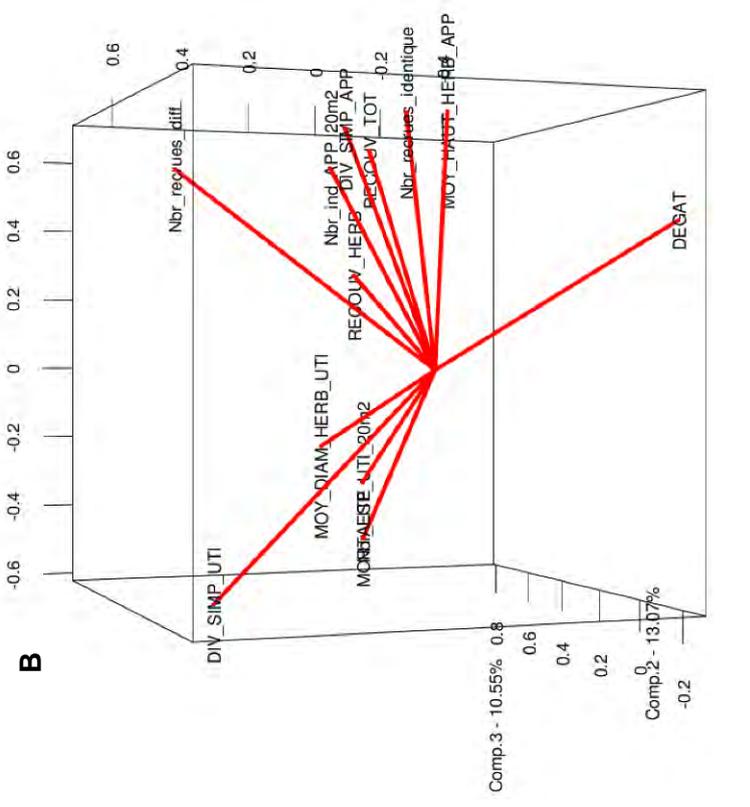
Le premier groupe contient des zones comprises entre 107 et 996 mètres (avec une moyenne à 530 mètres). La pente va elle de 0 à 30° (mais avec une moyenne à 6). Ce groupe présente 4 talus et 12 plateformes. Il y a deux semis hydrauliques dans ce sous-cluster CDS_NING_AEC_ZA et KNBO_S001_TRAZ_SZ01, respectivement sur talus et plateforme, et 14 plantations, dont 3 sur talus (CDS_NING_Z001_E508, GORO_USINEKUE_A1_SZ02 et THIO_MOUL_Z001_SZ01). Ce groupe est ainsi composé par les modalités CBG_MONA_MS_SZ02 (tous les quadrats), CBG_RED_VP_SZ01 (1 quadrat), CBG_RED_VP_SZ02 (tous les quadrats), CDS_NING_AEC_ZA (tous les quadrats), CDS_NING_CREP_EXT (tous les quadrats), CDS_NING_CREP_HT (tous les quadrats), CDS_NING_Z001_E508 (tous les quadrats), GORO_KUE_RPB_SZ01 (4

quadrats), GORO_USINEKUE_A1_SZ01 (tous les quadrats), GORO_USINEKUE_A1_SZ02 (tous les quadrats), KNBO_S001_TRAZ_SZ01 (tous les quadrats), KOUA_MEA_MMMR_SZ01 (3 quadrats), KRB_M37_Z001_CSO (3 quadrats), KRB_M37_Z001_VL20 (tous les quadrats), MDORE_ROUV_Z001_SZ01_2 (3 quadrats), MDORE_ROUV_Z001_SZ01_6 (2 quadrats), NKY_LU_VP_PN01 (1 quadrat), NKY_LU_VP_PN02 (tous les quadrats), THIO_MOUL_Z001_SZ01 (tous les quadrats). Ce premier groupe est caractérisé par des valeurs importantes pour le nombre d'individus utilisées (significatif pour CDS_NING_AEC_ZA, GORO_USINEKUE_A1_SZ01 et GORO_USINEKUE_A1_SZ02). Ce groupe présente aussi des valeurs généralement plus faibles pour 7 variables (indice de recouvrement total, indice du nombre de recrûs différents, indice de Simpson total, indice de Shannon la hauteur des ligneux utilisés et apparus et le diamètre des espèces herbacées apparues)

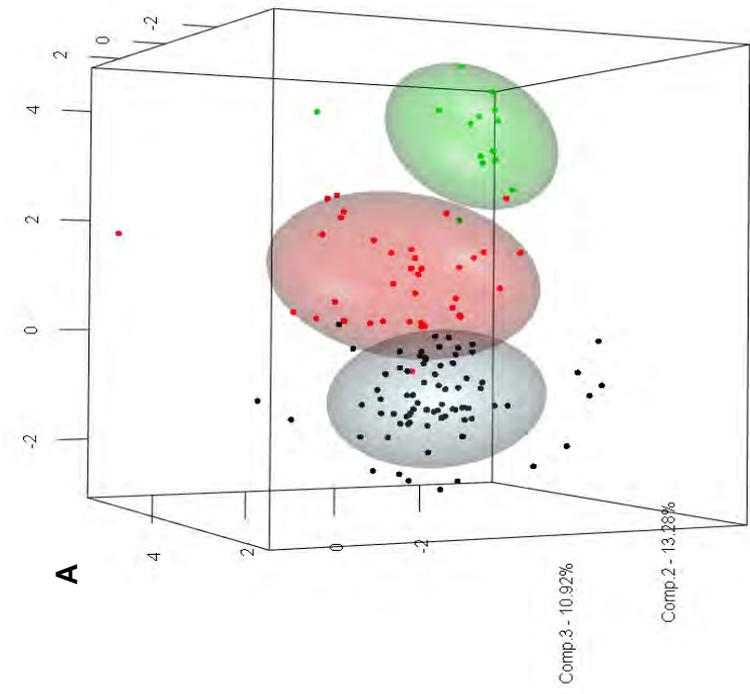
Le second groupe est caractérisé par des modalités allant de 107 m à 956 m d'altitude (moyenne à 438 m), avec une pente comprise entre 0 et 30° (en moyenne 6°), et avec l'utilisation en moyenne de 17 espèces de maquis (entre 6 et 31), toutes plantées. Les modalités se répartissent entre 5 plateformes, 1 banquette et un talus et entre 5 plantations sur topsoil, une plantation sur latérite et une plantation sur saprolite. Ce groupe est composé par CBG_MONA_MS_SZ01 (tous les quadrats), CBG_RED_VP_SZ01 (4 quadrats), GORO_KUE_RPB_SZ01 (1 quadrat), GORO_KUE_RPB_SZ02 (tous les quadrats), KRB_M37_Z001_CSO (2 quadrats), MDORE_ROUV_Zser_SZ01 (tous les quadrats), NKY_LU_VP_PN01 (4 quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD04 (5 quadrats). Il est caractérisé par des valeurs élevées pour l'indice de Simpson total (significatif pour l'indice de Shannon des espèces apparues (significatif pour CBG_MONA_MS_SZ01, CBG_RED_VP_SZ01, GORO_KUE_RPB_SZ02), la hauteur moyenne des espèces ligneuses apparues (significatif pour NKY_LU_VP_PN01, CBG_MONA_MS_SZ01, CBG_RED_VP_SZ01, MDORE_ROUV_Zser_SZ01, NKY_LU_VP_PN01, TONTT_VULC_SRED_MD04) et le diamètre moyen des espèces herbacées apparues.

Le dernier groupe est constitué par 3 modalités BOUA_KG_DS_SZ01, MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3, NKY_LU_VD_SZ01, trois plantations sur banquette ou plateforme, situé en moyenne à 337 d'altitude et sur une pente de 1° en moyenne, avec l'utilisation d'en moyenne 6 espèces de maquis. Ce groupe est caractérisé par des valeurs importantes pour la hauteur moyenne des espèces ligneuses utilisées et apparues (significatif pour les 3 modalités), l'indice de recouvrement total (significatif pour BOUA_KG_DS_SZ01 et NKY_LU_VD_SZ01), l'indice de recrûs d'espèces différentes (significatif pour BOUA_KG_DS_SZ01 et MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3) et l'indice de Shannon des espèces apparues (significatif pour MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3 - Annexe 8.9 :Figure 107 & Figure 108).

La Figure 49 permet de visualiser en 3 dimensions, sur 3 axes, la disposition des 3 groupes en relation avec l'orientation des variables.



Comp.1 - 24.39%



Comp.1 - 25.79%

Figure 50 : A- Projection des individus (quadrats des modalités) sur les 3 premiers axes qui expliquent 49,4 % de la variabilité totale observée. Les couleurs correspondent aux différents groupes issus de la typologie et des classifications hiérarchiques. B- projection des variables permettant d'interpréter les tendances des groupes d'individus (la différence de forme avec les 2 précédents graphiques est liée uniquement à une perspective différente, l'axe 2 étant ici à l'arrière)

2.2.2.3. Analyse du Cluster 3

Les 12 variables sélectionnées (Tableau 33) comprennent 8 composantes de la productivité et de la diversité (croissance, recouvrements, diversité des espèces utilisées, nombre d'individus utilisées et indices d'épaisseur de litière), 4 composantes sur la dynamique (indice de diversité des espèces apparues et croissance des espèces apparues).

Tableau 33 : Variables sélectionnées pour le cluster 3

Variables sélectionnées		
1	Nbr_ind_UTI_20m2	nombre d'individus d'espèce utilisée
2	Nbr_ESP_TOT_20m2	Nombre d'espèce apparue
3	Litiere	Indice de l'épaisseur de la litière
4	MOY_DIAM_LIGN_UTI	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses utilisées (en cm)
5	MOY_HAUT_HERB_APP	Moyenne des hauteurs des espèces herbacées apparues (en cm)
6	MOY_HAUT_LIGN_APP	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses apparues (en cm)
7	MOY_DIAM_LIGN_APP	Moyenne des diamètres des espèces ligneuses apparues (en cm)
8	MOY_HAUT_MOY_HERB_ESP_TOT	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
9	MOY_HAUT_MOY_LIGN_ESP_TOT	Moyenne des hauteurs des espèces ligneuses utilisées (en cm)
10	DIV_SIMP_TOT	Indice de diversité de Simpson pour les espèces apparues
11	DIV_SIMP_APP	Indice de diversité de Simpson pour les espèces apparues
12	DIV_SHANN_UTI	Indice de diversité de Shannon pour les espèces utilisées

Le cercle des corrélations (projection des variables explicatives) montre comme précédemment, que la contribution des variables est expliquée en grande partie par l'axe 1 et l'axe 2 (Figure 50).

Trois groupes sont également individualisés dans ce cluster (Figure 51). Quinze modalités sont dans le groupe le plus performant en termes d'évolution vers la restauration écologique, 20 dans le groupe intermédiaire et 9 modalités apparaissent comme peu performantes. Les modalités sont listées directement dans la figure. Là encore, les modalités listées en vert à droite sont les plus performantes. Celles en noir à gauche sont les moins performantes.

La Figure 52 permet de visualiser en 3 dimensions, sur 3 axes, la disposition des 3 groupes en relation avec l'orientation des variables.

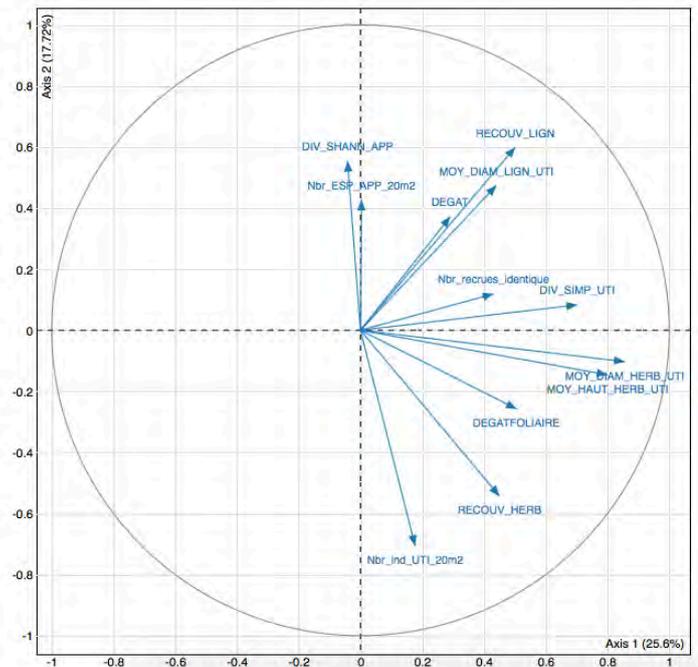


Figure 51 : Cercle des corrélations obtenu pour le cluster 3

Le cercle des corrélations obtenue pour le cluster 3 montre la projection des variables explicatives sélectionnées sur les deux premiers axes de l'ACP qui expliquent 43,3% de la variabilité totale observée (pour le sens exact des appellations contractées, voir Tableau 33

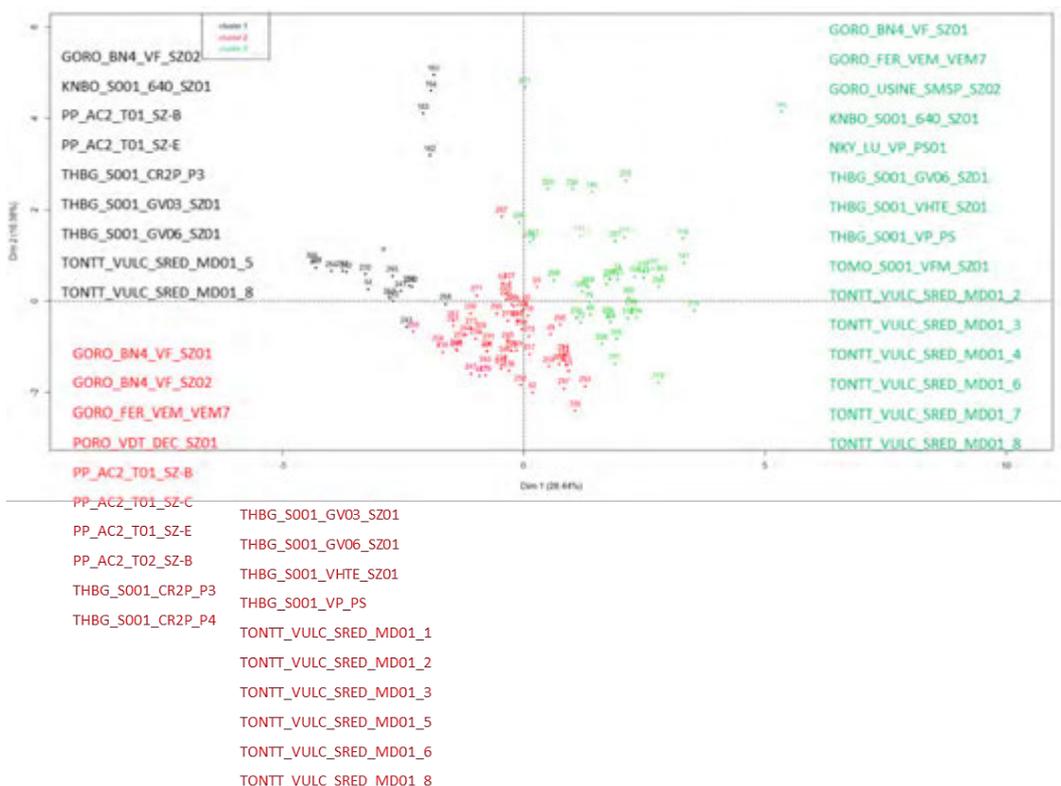


Figure 52 : Projection des individus (modalités) sur les 2 premières composantes principales (qui expliquent 44.82% de la variabilité totale observée).

Les couleurs correspondent aux groupes définis par la Classification Hiérarchique effectuée sur la projection

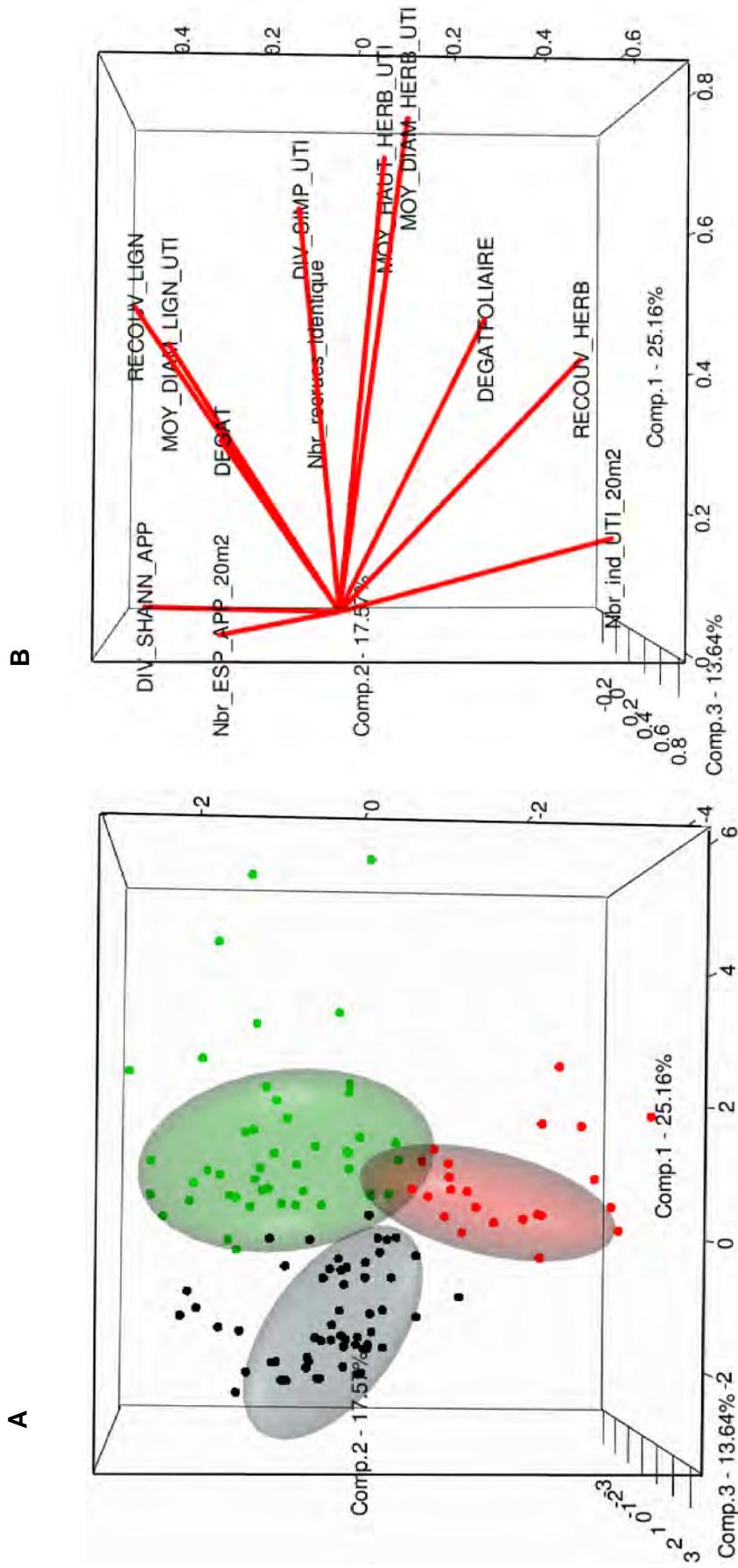


Figure 53 : A- Projection des individus (quadrats des modalités) sur les 3 premiers axes qui expliquent 49,4 % de la variabilité totale observée.

Les couleurs correspondent aux différents groupes issus de la typologie et des classifications hiérarchiques. B- projection des variables permettant d'interpréter les tendances des groupes d'individus (la différence de forme avec les 2 précédents graphiques est liée uniquement à une perspective différente, l'axe 2 étant ici à l'arrière)

La classification hiérarchique permet de former trois groupes.

Le premier se compose GORO_BN4_VF_SZ02 (1 quadrat), KNBO_S001_640_SZ01 (4 quadrats), PP_AC2_T01_SZ-B (2 quadrats), PP_AC2_T01_SZ-E (3 quadrats), THBG_S001_CR2P_P3 (2 quadrats), THBG_S001_GV03_SZ01 (3 quadrats), THBG_S001_GV06_SZ01 (2 quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_5 (2 quadrats) et TONTT_VULC_SRED_MD01_8 (1 quadrat). Ce groupe est caractérisé par des valeurs plus faibles pour 8 des 12 variables (6 de productivité et 2 de dynamique)

Le second groupe est composé par GORO_BN4_VF_SZ01 (4 quadrats), GORO_BN4_VF_SZ02 (4 quadrats), GORO_FER_VEM_VEM7 (1 quadrats), PORO_VDT_DEC_SZ01 (tous les quadrats), PP_AC2_T01_SZ-B (3 quadrats), PP_AC2_T01_SZ-C (tous les quadrats), PP_AC2_T01_SZ-E (2 quadrats), PP_AC2_T02_SZ-B (tous les quadrats), THBG_S001_CR2P_P3 (3 quadrats), THBG_S001_CR2P_P4 (tous les quadrats), THBG_S001_GV03_SZ01 (2 quadrats), THBG_S001_GV06_SZ01 (1 quadrats), THBG_S001_VHTE_SZ01 (4 quadrats), THBG_S001_VP_PS (4 quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_1 (tous les quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_2 (2 quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_3 (1 quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_5 (2 quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_6 (2 quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_8 (1 quadrats). Ce groupe est caractérisé par des valeurs plus importantes pour l'indice de diversité de Simpson total (significatif pour PORO_VDT_DEC_SZ01, THBG_S001_VHTE_SZ01, THBG_S001_VP_PS, TONTT_VULC_SRED_MD01_1, TONTT_VULC_SRED_MD01_2 et TONTT_VULC_SRED_MD01_3) et apparu, le nombre d'individus utilisés (significatif pour GORO_BN4_VF_SZ01, GORO_BN4_VF_SZ02, PP_AC2_T01_SZ-C, THBG_S001_CR2P_P3 et THBG_S001_CR2P_P4) et le nombre d'espèces totales (significatif pour GORO_FER_VEM_VEM7, PP_AC2_T01_SZ-C, THBG_S001_CR2P_P4, THBG_S001_VP_PS et TONTT_VULC_SRED_MD01_3).

Le dernier groupe est constitué par GORO_BN4_VF_SZ01 (1 quadrat), GORO_FER_VEM_VEM7 (4 quadrats), GORO_USINE_SMSP_SZ02 (tous les quadrats), KNBO_S001_640_SZ01 (1 quadrat), NKY_LU_VP_PS01 (tous les quadrats), THBG_S001_GV06_SZ01 (2 quadrats), THBG_S001_VHTE_SZ01 (1 quadrat), THBG_S001_VP_PS (1 quadrat), TOMO_S001_VFM_SZ01 (tous les quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_2 (2 quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_3 (3 quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_4 (tous les quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_6 (2 quadrats), TONTT_VULC_SRED_MD01_7 (tous les quadrats) et TONTT_VULC_SRED_MD01_8 (2 quadrats). Ce groupe est caractérisé par des valeurs importantes pour l'indice de diversité de Simpson total et apparu et l'indice de Shannon utilisé, le nombre d'espèces totales, l'indice de l'épaisseur de la litière, le diamètre des ligneux utilisés, la hauteur des ligneux et herbacées totaux et apparus et le diamètre des ligneux apparus (Annexe 8.9 : Figure 109 & Figure 110).

2.2.2.4. Classement des groupes et des modalités selon l'indicateur synthétique

L'indicateur de réussite défini par l'axe 1 de l'ACP par cluster permet de classer les groupes de modalités et les modalités elles-mêmes à l'intérieur de chaque cluster. Il est important de préciser que, compte tenu de la forte hétérogénéité au sein des quadrats de chaque modalité, mais aussi de la variabilité générale des données, ce classement n'est pas très précis et seules les différences fortes doivent être prises en compte.

- Pour le cluster 1, les 3 groupes sont significativement différents les uns des autres (Figure 53).

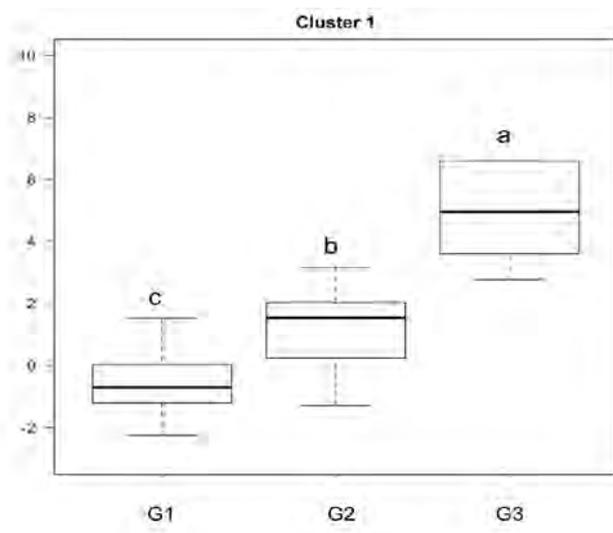


Figure 54 : Classement des groupes du Cluster 1 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.

Les lettres de significativité ont été calculées par une analyse de variance de type ANOVA, les individus présentant des lettres différentes ont des valeurs significativement différentes

Figure 55 : Classement des modalités du cluster 1 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.

Les lettres de significativité ont été calculées par une analyse de variance de type ANOVA, les individus présentant des lettres différentes ont des valeurs significativement différentes

Un classement par modalité est donné en Figure 54. Il ressort que dans ce groupe la modalité GORO_FER_KUEB_SZ01 (Kuebini) est la plus performante, suivi par

GORO_FER_COFR_SZ01 (Cofremi) et GORO_USINE_CR7_SZ01. La moins performante semble être GORO_USINE_SMSP_SZ01. Toutes les autres modalités sont assez basses.

Kuebini est une plantation de 2002 sur laquelle a été réalisée un travail du sol avant plantation (sous-solage), mais surtout avec l'utilisation d'une forte diversité végétale (40 espèces). De plus cette modalité est entourée par du maquis ligno-herbacée qui semble favoriser la recolonisation du milieu.

Cofremi est la modalité la plus ancienne étudiée dans cette étude (mise en place en 1988), elle présente de bonnes caractéristiques de productivité et de dynamique de l'écosystème. Peu d'espèces végétales ont été plantées au départ (5), mais aujourd'hui une bonne diversité est retrouvée. Cette recolonisation a pu se faire du fait de la présence de maquis para-forestier bien développés à proximité. De plus sur cette modalité, il y a eu une utilisation de gaïac mais en faible densité (aujourd'hui moins de 0,5 individus par m²) qui a pu participer à l'amélioration des conditions du sol. Aujourd'hui ces gaïacs présentent d'importants signes de dépérissement.

La modalité 1 de CR7 présente aussi des paramètres de réussite intéressants. Cette modalité est une plantation de 2009 sur topsoil avec apport de nutricote, de paillage et d'hydrorétenteur. Ces apports (notamment d'engrais chimique) permettent d'obtenir un recouvrement (notamment en herbacées) plus importante dans les premières années.

Goro BN4 est une modalité de semis manuel récente, avec utilisation de topsoil, qui a été mise en défens. Sept espèces ont été utilisées dans le mélange de départ, un travail du sol a également été réalisé en amont de l'épandage de topsoil et des graines.

Ainsi, les caractéristiques principales des meilleures sous-zones de ce cluster permettent de souligner quelques conditions favorables à la réussite de la restauration :

- La présence d'écosystèmes alentours développés qui peuvent avoir un effet important sur la recolonisation d'espèces locales (cas de Kuebini et Cofremi).
- Le travail du sol et la mise en défens (ici cas d'un semi-manuel, sur la modalité de la verve BN4).
- Une grande diversité des espèces utilisées à la base (cas de Kuebini)
- Un apport de fertilisants, de paillage et d'hydrorétenteurs peut permettre une meilleure croissance et un meilleur recouvrement sur les premières années, notamment par les cyperacées (cas de la modalité 1 de CR7).

La comparaison des données des modalités pour chacune des variables prises en compte dans ces ACP n'étant pas nécessaire pour la discussion du classement des modalités, les figures correspondantes sont données en 8.1.

- Pour le cluster 2, le premier groupe est significativement supérieur aux deux autres en termes de réussite de la restauration (Figure 55).

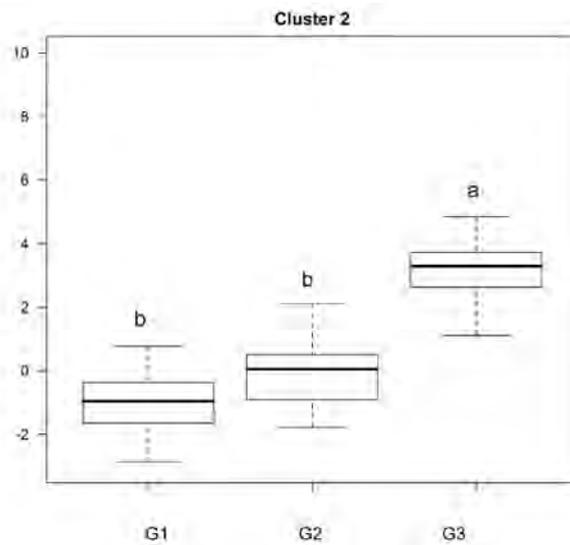


Figure 56 : Classement des groupes du cluster 2 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.

Les lettres de significativité ont été calculées par une analyse de variance de type ANOVA, les individus présentant des lettres différentes ont des valeurs significativement différentes

Figure 57 : Classement des modalités du cluster 2 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.

Les lettres de significativité ont été calculées par une analyse de variance de type ANOVA, les individus présentant des lettres différentes ont des valeurs significativement différentes.

Ce groupe comporte plusieurs modalités qui ont bien réussi (Figure 58), notamment NKY_LU_VP_SZ01 (verse Domergue, Nakéty); MDORE_ROUVRAY_Z001_SZ01_3 (Mont Dore De Rouvray), Boua_KG_DS_SZ01 et CBG MONA_MS_SZ01 (Boualoudjelima). Les autres sous-zones se dispersent autour de la moyenne générale (zéro sur l'ordonnée).

La modalité Verse Domergue de Nakéty est une plantation de 2003 sur topsoil avec utilisation d'engrais liquides et d'hydrorétenteurs. Cette modalité bénéficie aussi de brise vents. Enfin, le sol présente des blocs en quantité assez importante, pouvant favoriser la recolonisation par des espèces par la création de micro-habitats

La modalité 3 de Mont Dore De Rouvray est une plantation sur saprolite de 1999, avec utilisation de paillage. Un travail du sol a été réalisé en amont de la plantation. Cette modalité présente des brise-vents qui sont bien développés. Enfin, elle est aussi entourée par du maquis ligno-herbacée à proximité pouvant aider à la recolonisation par des espèces locales.

Enfin, Boualoudjelima est une plantation ancienne (1990), où seules 2 espèces ont été utilisées au départ (gaïac et bois de fer), un travail du sol a été réalisé avant plantation. Cette modalité est entourée par du maquis arbustif pouvant favoriser la recolonisation par des espèces locales. On peut aussi noter ici la présence de pierres au niveau du sol, pouvant créer des micro-habitats qui sont favorables à l'implantation de nouveaux recrûs.

Dans le second groupe de ce cluster, on trouve également des modalités montrant de l'hétérogénéité en termes de réussite de la restauration selon les différents quadrats. Il s'agit de Cap Bocage Mona Sud sous-zone 1, Goro Route de Port Boisé sous-zone 1, Mont Dore De Rouvray essai Serianthes et Tontouta module 4. Trois de ces modalités sont des plantations sur topsoil. Cap Bocage est une plantation de 2000, avec travail du sol et utilisation d'hydrorétenteurs et de paillage. Goro et Tontouta sont des plantations respectivement de 2012 et 2011, avec utilisation d'hydrorétenteurs et de paillage et l'implantation d'une trentaine d'espèces différentes. Enfin, l'essai Serianthes sur Mont Dore est une plantation sur saprolite avec un travail du sol réalisé en amont et l'utilisation de paillage au moment de la plantation. Sur cette dernière modalité, il est à noter l'utilisation d'un grand nombre de *Serianthes calycina*, espèce fixatrice d'azote atmosphérique.

Ainsi dans le cas du cluster 2, la réussite de la restauration semble assurée notamment par :

- Le travail du sol (BN4 et Mont Dore pour le premier groupe et Cap Bocage Mona Sud pour le second)
- L'utilisation de brises-vent (Mont Dore et Nakéty)
- La présence d'écosystèmes développés proches (pour les 3)
- L'utilisation de paillage (Mont Dore)
- L'utilisation de topsoil (Nakéty)

La comparaison des données des modalités pour chacune des variables prises en compte dans ces ACP n'étant pas nécessaire pour la discussion du classement des modalités, les figures correspondantes sont données en 8.1

- Pour le cluster 3, les deux premiers groupes sont significativement supérieurs au groupe 3 en termes de réussite de la restauration (Figure 57)

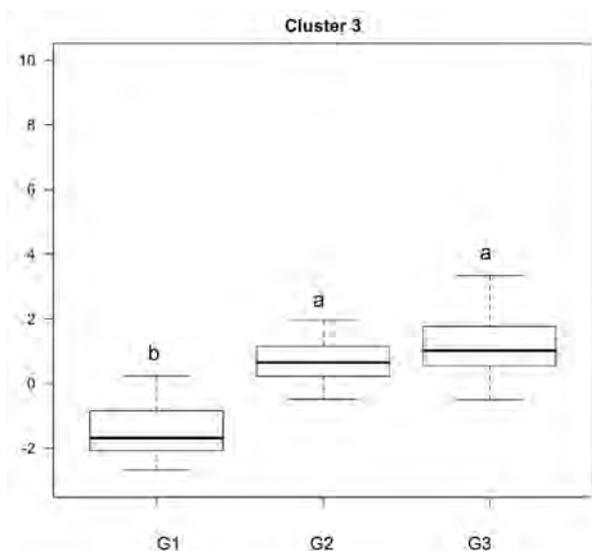


Figure 58 : Classement des groupes du cluster 3 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.

Les lettres de significativité ont été calculées par une analyse de variance de type ANOVA, les individus présentant des lettres différentes ont des valeurs significativement différentes

Figure 59 : Classement des modalités du cluster 3 selon l'indicateur de réussite de la restauration défini précédemment.

Les lettres de significativité ont été calculées par une analyse de variance de type ANOVA, les individus présentant des lettres différentes ont des valeurs significativement différentes

La Figure 58 montre que les différentes modalités du groupe 3 sont fortement dispersées sur l'échelle de la réussite : NKY_LU_VP_PS01 (Nakéty PS01) donne la meilleure valeur de réussite, mais avec une forte hétérogénéité liée à la topographie variable et la présence de rochers sur les pentes de ce terrain. Trois autres modalités se situent bien au-dessus de la moyenne générale : TONT_VULC_SRED_MD01_7 (Tontouta, Vulcain, module 1), TONT_VULC_SRED_MD01_4 et TONT_VULC_SRED_MD01_3. Les essais sur Tontouta comportent également les modalités les moins bonnes correspondant essentiellement à celles qui ne sont pas plantées : TONT_VULC_SRED_MD01_5, TONT_VULC_SRED_MD01_6 et TONT_VULC_SRED_MD01_2. Les autres modalités se dispersent autour de la moyenne.

Les modalités présentant les meilleures réussites dans ce cluster sont Nakéty PS01, Goro verse SMSP modalité 2, Tontouta module 1 modalités 4 et 7. Les autres modalités présentent dans ce troisième groupe se répartissent entre les groupes 1 et 2, montrant ainsi que certains quadrats présentent de bons taux de réussite et d'autres non.

La modalité Nakéty PS01 est une plantation sur talus avec ajout de topsoil sur laquelle a été appliqué un travail du sol en amont et des brise-vents.

Sur Tontouta Vulcain, les modalités 4 et 7 présentent les meilleurs résultats de réussite et les plus homogènes. Ces deux modalités sont des plantations, respectivement de plants de serre et transplantation de plants présents dans la zone, avec utilisation de topsoil et de boue de STEP.

La modalité 2 de Goro verse SMSP est une plantation sur talus avec ajout de topsoil, avec une forte présence de pierres (entre 30 et 50%), entourée de maquis ligno-herbacée.

Parmi les autres modalités présentes dans le groupe 3, on retrouve en majorité des modalités où a été utilisé le topsoil. Dans le cas de VEM, on est en présence d'un semis hydraulique, avec utilisation de géofilet et d'espèces de Fabaceae exotiques (principalement des trèfles). Pour la modalité 6 de Tontouta, on est dans le cas d'une plantation réalisée sur latérite avec ajout de boue de STEP.

Ainsi, pour le Cluster 3, la réussite de la restauration apparaît comme liée notamment à :

- L'utilisation du topsoil (pour Goro la verse SMSP modalité 2, Nakéty PS01 et Tontouta module 1, modalités 4 et 7)
- L'utilisation de boue de STEP (pour Tontouta module 1 modalités 4, 6 et 7)
- Le travail du sol (Goro BN4) notamment avant la mise en place du topsoil (Nakéty PS01 et Tontouta, modalités 4 et 7)

La comparaison des données des modalités pour chacune des variables prises en compte dans ces ACP n'étant pas nécessaire pour la discussion du classement des modalités, les figures correspondantes sont données dans la Partie 8.1.

La Figure 59 permet d'illustrer avec des images le classement de 4 modalités du cluster 3. Les modalités GORO_FER_VEM_VEM7 (Goro Verse de l'Exercice Minier) et NKY_LU_VP_PS01 (Nakéty, Lucienne, verse Principale PS01) sont considérées empiriquement comme les deux sites les mieux restaurés. Ils sont clairement placés bien à droite sur l'axe 1 de l'ACP. A l'opposé, la modalité TONTT_VULCAIN_SRED_MD01_5 est considérée empiriquement comme l'une des moins réussies (on y voit essentiellement des fougères *Pteridium esculentum*). La modalité GORO_USINE_SMSP_SZ02 se trouve dans la moyenne, comme de nombreuses autres modalités. La photo indique une végétation peu diversifiée et peu recouvrante.

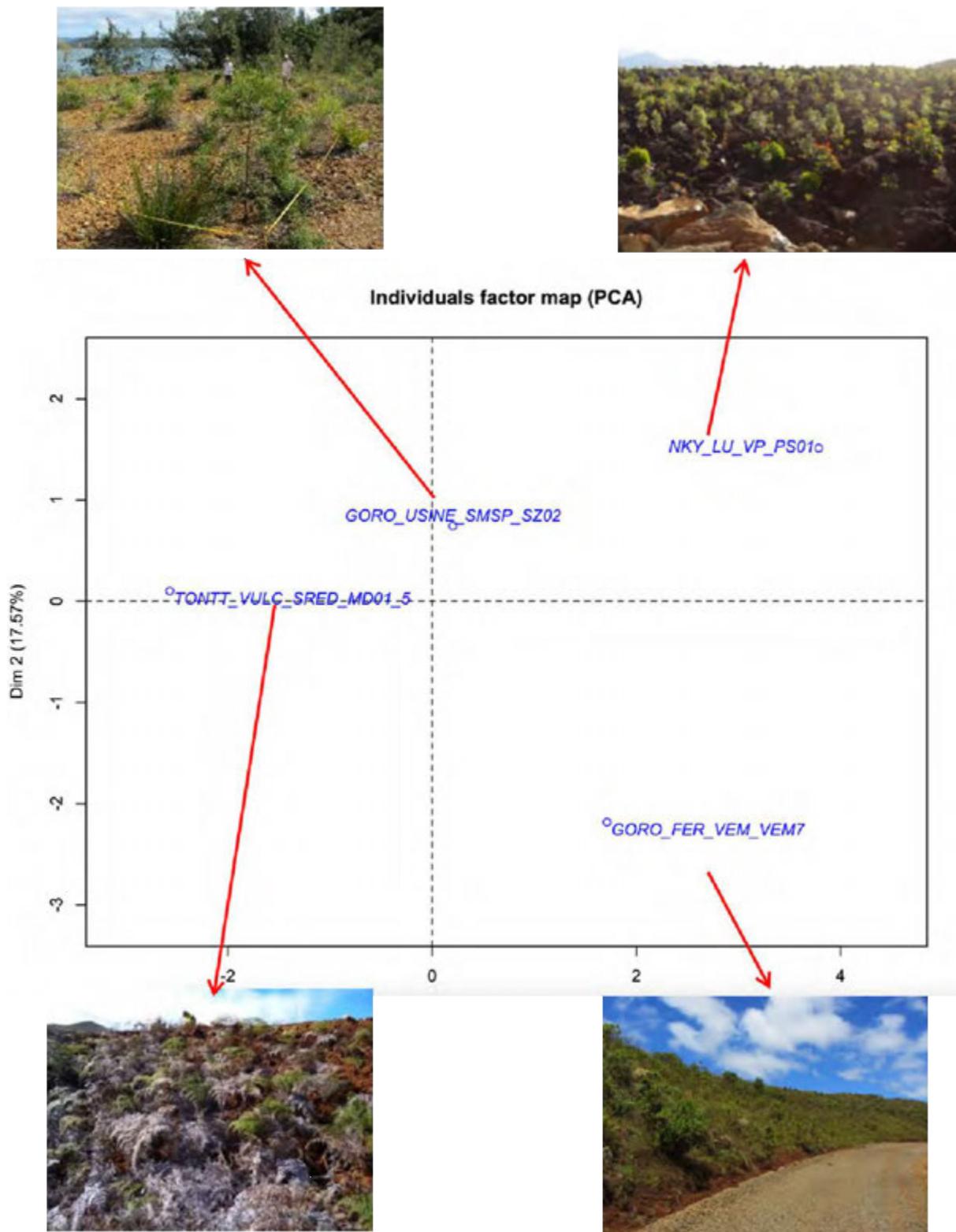


Figure 60 : Visualisation schématique du classement de 4 modalités du cluster 3, avec les photos correspondantes montrant les différences entre les modalités se trouvant de part et d'autre de l'axe 1 de l'ACP qui traduit la réussite de la restauration.

2.3. APPLICATION DE L'INDICATEUR SYNTHÉTIQUE DE RÉUSSITE A L'EVALUATION D'UN SITE DE REVEGETALISATION

Lorsqu'un site a été revégétalisé, il importe de pouvoir vérifier après quelques années si l'opération va aboutir à une restauration écologique effective du milieu. Un indicateur global de réussite a été mis au point dans le cadre du projet RECOSYNTH. Nous préconisons qu'une telle évaluation soit effectuée au minimum après 5 ans, mais de préférence 2 fois entre 5 ans et 10 ans ; et cela bien sûr indépendamment du suivi de la survie des plants qui doit être plus fréquent, notamment au cours des premières années.

2.3.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

IndicRest (Indicateur de Restauration) est une interface web permettant, à partir de données collectées sur une trentaine d'années dans les mines de Nouvelle-Calédonie, de déterminer un indicateur de réussite ou de performance de la restauration écologique du milieu. Cette interface a été réalisée en utilisant Shiny, un outil développé par R Studio qui permet de créer des applications dynamiques pour le Web sans avoir à écrire des codes HTML. Shiny est disponible sous la forme d'un package R. Une application Shiny se décompose en deux parties. On dispose de 2 scripts, un script nommé ui.R (user-interface) qui permet de contrôler l'apparence et la mise en page de l'application et un script server.R qui contient les instructions qui seront interprétées par le serveur.

L'objectif d'IndicRest est de permettre facilement :

- de saisir les données relevés sur le terrain directement sur un écran simple.
- de calculer et visualiser spatialement l'indicateur statistique de réussite sans avoir aucune connaissance du logiciel R.

Les différentes étapes d'utilisation de cette interface sont décrites ci-dessous.

2.3.2. VISUALISATION DES INDICATEURS POUR LES SITES EXISTANTS

Depuis votre navigateur, aller sur le site web : <https://indicrest.shinyapps.io/indicrest/>.

La page ci-dessous apparaîtra à l'écran (Figure 60) :

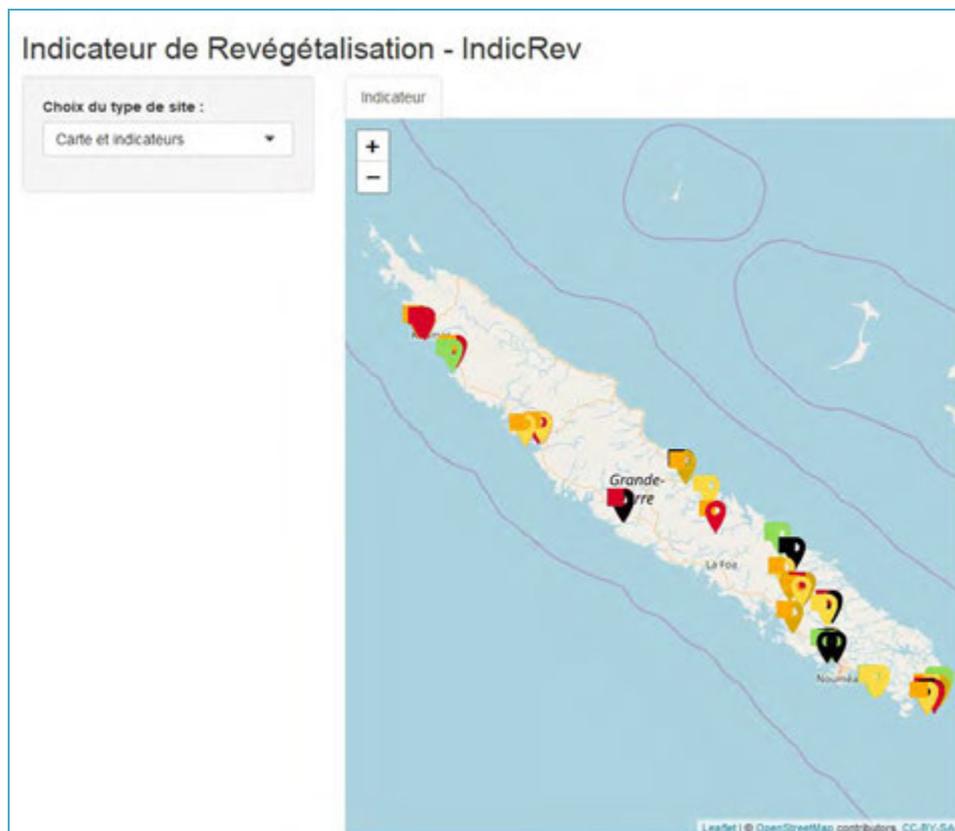


Figure 61 : Page à l'ouverture du site

Une fois la fiche de relevé du site étudié réalisée, on peut intégrer les valeurs nécessaires pour la notation.

Pour cela cliquer sur l'option "Ajouter un nouveau site" (Figure 61).



Figure 62 : Choix entre la visualisation de la carte avec les indicateurs ou l'ajout d'un nouveau site.

2.3.2.1. Téléchargement du fichier des données collectées sur le terrain.

La première étape consiste à rentrer la liste des espèces relevées dans chacun des quadrats ainsi que la densité de chacune de ces espèces (soit le nombre d'individus par espèce). Ce fichier de relevés se présente sous forme d'un tableur excel à 2 entrées, avec les différents quadrats en ligne et les différentes espèces en colonnes (cf Figure 62). Il doit être réalisé à la fois pour les espèces utilisées et pour les espèces apparues. Ces fichiers créés doivent être

enregistrés au format CSV (visible sur Excel lorsque l'on utilise la commande « enregistrer sous ») en spécifiant pour chaque quadrat les données demandées dans la fiche terrain. Il ne faut pas de cellules sans valeurs. Cette saisie permet un calcul automatique des indices de diversité (Shannon et Simpson) pris en compte comme variable pour le calcul de l'indicateur de réussite quelle que soit la typologie.

Choix du type de site :

Ajouter un nouveau site ▼

Fichier de données de diversité des espèces utilisées (format csv)

Browse... No file selected

Fichier de données de diversité des espèces apparues (format csv)

Browse... No file selected

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	QUAD	Costularia comosa	Costularia pubescens	Davallia sp	Machaerina deplanchei	Nephrolepis sp	Psilotum nudum	Schoenus neocaledonicus
2	GORO_USINE_RDP_SZ01_R1_Q1	18	0	0	24	0	0	39
3	GORO_USINE_RDP_SZ01_R1_Q2	23	0	0	20	0	1	27
4	GORO_USINE_RDP_SZ01_R1_Q3	56	0	1	37	17	0	54
5	GORO_USINE_RDP_SZ01_R1_Q4	37	0	0	17	0	0	31
6	GORO_USINE_RDP_SZ01_R1_Q5	37	1	0	29	0	0	23

Figure 63 : Exemple de fichiers de diversité pour GORO_USINE_RDP_SZ01_R1. Ici sont notés les 5 quadrats constituant les répétitions statistiques demandées dans la fiche terrain.

2.3.2.2. Choix de la typologie :

La

Figure 63 montre le contenu de l'écran permettant de choisir la typologie (type de terrain). Cet écran apparaît automatiquement après le téléchargement des données.

Typologie : typologie 1 si pluviométrie annuelle > 2093 l/m², altitude < 247 m, pente <= 22° et sans alizée, typologie 3 si pente > 22° et sans alizée, typologie 2 sinon.

1 | ▲

1

2

3

Figure 64 : Choix de la typologie (1, 2 ou 3).

La typologie 1 (choix par défaut) est associée aux zones non soumises aux alizés, avec une pluviométrie élevée, à des altitudes faibles et des pentes de terrain également faibles. La typologie 2 est caractéristique de zones soumises aux alizés, avec une pluviométrie moyenne et un sol ou substrat de type non induré. Finalement, la typologie 3 correspond à des zones non-soumise aux alizés, avec une pluviométrie faible et un écosystème dominant aux alentours du terrain comportant principalement des maquis ligno-herbacées. La typologie 2 est choisie comme le complémentaire des typologies 1 et 3. Les seuils limites des valeurs de pluviométrie, altitude et pente pour chaque typologie sont notifiés sur l'écran (Figure 63).

2.3.2.3. Saisie des variables sélectionnées pour la notation :

Une fois le choix de la typologie effectué, d'après les caractères généraux du terrain, un des 3 tableaux ci-dessous apparaît (

Figure 64); il permet de remplir les valeurs des variables sélectionnées pour cette typologie. Il faut alors rentrer les données indiquées. Les données implémentées à ce niveau sont les moyennes des différents quadrats réalisés sur la zone. Il sera donc important que l'utilisateur ait rentré l'ensemble de ces données relevées sur le terrain et ait réalisé le traitement adapté à chaque variable (cf 2.10.1, et fiche mémo du guide méthodologique intitulée : « Fiche mémo associée à la fiche terrain pour le suivi »).

Figure 65 : Tableaux pour rentrer les valeurs des variables sélectionnées pour les 3 typologies 1, 2 et 3.

Les indicateurs peuvent alors être calculés et projetés géographiquement sur la carte (Figure 60) avec une couleur reflétant la qualité de la restauration du milieu. A titre d'exemple, les valeurs des variables correspondant à la typologie 1 pour un bon et un mauvais résultat sont données ci-dessous (

Figure 65). La note finale apparaît dans la case « indicateur » et va de 1 (mauvaise note) à 5 (meilleure note) et correspond en même temps à des marqueurs de couleurs respectivement noire, rouge, orange, jaune et vert du point de coordonnées GPS (

Figure 66). Il est possible de zoomer et de se déplacer sur la carte à l'aide de votre souris.

Typologie : typologie 1 si pluviométrie annuelle > 2093 l/m ² , altitude < 247 m, pente <= 22° et sans alizée, typologie 3 si pente > 22° et sans alizée, typologie 2 sinon.	Typologie : typologie 1 si pluviométrie annuelle > 2093 l/m ² , altitude < 247 m, pente <= 22° et sans alizée, typologie 3 si pente > 22° et sans alizée, typologie 2 sinon.
1	1
Longitude 166.97412398	Longitude 166.8837424
Latitude -22.289494856	Latitude -22.342368
Année 2002	Année 2009
Valeur de ETAT_GENERAL 2.8	Valeur de ETAT_GENERAL 1.2
Valeur de RECOUV_LIGN 47.5	Valeur de RECOUV_LIGN 3
Valeur de Nbr_ESP_APP_20m2 2.96	Valeur de Nbr_ESP_APP_20m2 0.68
Valeur de DEGATFOLIAIRE 8.4	Valeur de DEGATFOLIAIRE 5.2
Valeur de DEGAT 0	Valeur de DEGAT 0
Valeur de Nbr_recrués_identique 9.4	Valeur de Nbr_recrués_identique 1.4
Valeur de MOY_HAUT_HERB_UTI 91.24	Valeur de MOY_HAUT_HERB_UTI 0
Valeur de MOY_DIAM_HERB_UTI 28.31	Valeur de MOY_DIAM_HERB_UTI 0
Valeur de MOY_DIAM_LIGN_UTI 27.3	Valeur de MOY_DIAM_LIGN_UTI 1.2320
Valeur de MOY_HAUT_LIGN_APP 20.91	Valeur de MOY_HAUT_LIGN_APP 15.57
Actualiser	Actualiser

Figure 66 : Exemple de saisie de valeurs respectivement pour les zones GORO_FER_KUEB_SZ01 et GORO_USINE_SMSP_SZ01 correspondant à un terrain bien classé et un autre mal classé, parmi les sites de la typologie 1.

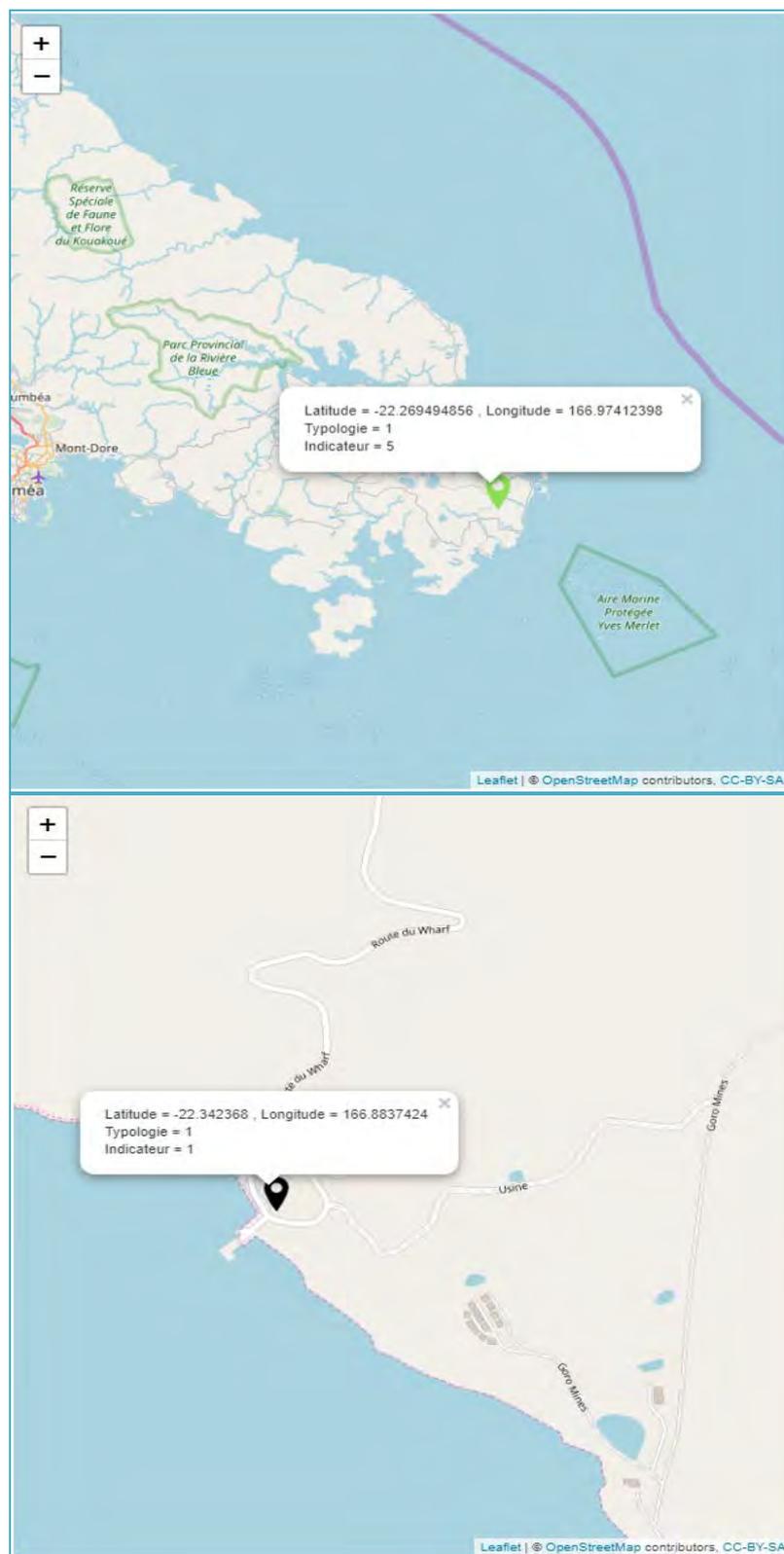


Figure 67 : Représentations spatiales des indicateurs

Respectivement pour les zones GORO_FER_KUEB_SZ01 et GORO_USINE_SMSP_SZ01 correspondant à un bon et un mauvais résultat respectivement, parmi les sites de la typologie 1. La note est donnée dans la ligne « Indicateur ».

2.3. CONCLUSIONS

Les 35 sites étudiés lors du projet RECOSYNTH représentent une grande diversité de cas de revégétalisation, qui diffèrent au niveau des dates de réalisation, des conditions environnementales et des conditions de réalisation du chantier lui-même. Ainsi, afin d'évaluer la pertinence de certaines pratiques de revégétalisation plus ou moins favorables à la restauration écologique, une première étape dans le traitement statistique a été la création d'une classification des différentes zones (typologie). Sur la base des caractéristiques du terrain et des travaux réalisés, il a été possible, à partir des zones étudiées, de différencier trois ensembles de terrain revégétalisés (appelé clusters). La définition de cette typologie des terrains permet des comparaisons directes entre différentes zones tout en diminuant les effets de distorsion liés à la grande hétérogénéité des cas étudiés.

Par la suite, pour chaque cluster une analyse des différentes variables quantitatives relevées sur le terrain permet de juger de la bonne évolution du système revégétalisé. Après projection sur une ACP, il apparaît que que les tendances qui caractérisent une bonne évolution des systèmes revégétalisés vers une restauration écologique sont exprimées par une projection orthogonale sur l'axe 1, axe qui dès lors représente un bon indicateur synthétique de la réussite de la restauration. Cependant, cette estimation de la réussite, pour être assez précise, doit être réalisée au sein de chacun des 3 clusters produits par la typologie. Ces 3 clusters sont définis par quelques caractères faciles à préciser.

En utilisant cet indicateur synthétique, nous avons pu montrer qu'une douzaine de terrains (modalités), parmi les 67 étudiées, montrent une évolution positive vers une véritable restauration écologique. Une trentaine environ se situent dans la moyenne, tandis que les autres semblent nécessiter plus de temps, voire parfois une nouvelle intervention, pour aller vers une restauration écologique du milieu.

Une interface simple (IndicRest) permettant d'obtenir une notation, en termes de réussite de la restauration du milieu a été mise au point. Il est donc doré et déjà possible de l'utiliser pour évaluer un terrain quelques années après sa revégétalisation.

Cette approche globale a aussi permis de conforter l'importance de certaines pratiques soulignées comme favorables dans la partie précédente : l'utilisation du topsoil et de brises-vent (dans les sites soumis aux alizées), ainsi que la fertilisation organique et/ou minérale du substrat, ou encore le type de substrat sans sol favorable (latérite rouge > latérite jaune > saprolite) et sa structure caillouteuse (ni trop caillouteux, ni trop fin).

Mais l'approche globale a aussi permis de faire ressortir d'autres conditions favorables à la réussite de la restauration, conditions souvent retrouvées dans des modalités bien classées :

- La présence d'écosystèmes naturels proches et en bon état : cette condition est en effet essentielle à la diversification rapide des systèmes revégétalisés, grâce à l'apport de graines par le vent ou les animaux (notamment oiseaux).
- Comme on peut s'y attendre, lorsque le nombre d'espèces initiales apportées lors de la revégétalisation est élevé, la montée en diversité et l'évolution vers un écosystème complexe est plus rapide.
- Le travail du sous-sol, lorsqu'on apporte du topsoil sur un substrat plus ou moins induré et le griffage du sol lorsque celui-ci est lui-même plus ou moins induré sont des pratiques également clairement favorables à la restauration du milieu.
- L'utilisation d'hydro-rétenteur et le paillage sont également des pratiques qui ressortent comme favorables et qu'il importe de généraliser notamment dans les milieux à pluviosité non régulière.
- Enfin la mise en défens peut être particulièrement utile dans les sites fréquemment visités par des herbivores envahissants (cerfs et cochons notamment).

3. COMPLÉMENTS D'ANALYSES ET D'OBSERVATIONS SUR LE TERRAIN

Les différents résultats traités précédemment ne permettent pas d'inclure les approches partielles qui ont été faites en vue notamment de clarifier certains aspects que les analyses statistiques ne permettent pas de faire ressortir. Ainsi trois aspects distincts ont été complétés par le partenaire UNC en fin de projet pour répondre à des questions précises.

- Des analyses physico-chimiques d'un certain nombre d'échantillons de sols ont été réalisées, essentiellement pour comprendre : i) l'influence de certains genres végétaux fréquents (*Gymnostoma sp.*, *Alphitonia neocaledonica*, *Grevillea exul*, *Xanthostemon sp.*, *Dodonea viscosa*, *Metrosideros laurofolia* et Cypéracées) sur les principaux caractères du sol; ii) l'influence de l'érosion et de l'induration sur ces caractères ; iii) l'influence de la pente sur la fertilité du topsoil.
- Des analyses de mycorhization des plantes et de densité des spores endomycorhiziennes sous diverses espèces végétales permettent de saisir les liens existants entre les paramètres cités ci-dessus et l'importance de cette symbiose mycorhizienne à arbuscules.
- Des observations directes sur quelques terrains complètent les informations analytiques précédentes.

3.1. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

Vingt trois échantillons de sols (chacun étant constitué d'un mélange de 3 prélèvements proches pour être représentatifs) ont été prélevés dans 4 sites revégétalisés correspondant à 5 modalités différentes. Parmi ces modalités, 2 correspondent à des modalités classées parmi les meilleures en termes d'évolution vers une restauration écologique du milieu (Goro Kuebini et Verse de l'Exercice Minier ou Goro VEM7); trois autres correspondent à des modalités moyennes à faible (Mont Dore Rouvray 3, Goro Route de Port Boisé, Mont Dore Rouvray 2).

Les Tableau 34 & Tableau 35 donnent les caractéristiques physico-chimiques principales des 23 échantillons.

Tableau 34 : Caractéristiques physico-chimiques principales des sols analysés

Echantillons		pH		Azote total Kjeldahl (mg/g)	Carbone Organique C (mg/g)	P total mg/kg	P assimilable mg/kg	Autres éléments totaux (mg/kg)			
		H ₂ O	KCl					Ca	Mg	Na	K
Kuebini (Topsoil)	Sous <i>Xanthostemon</i>	5,52	4,78	2,32	61,94	54	3	1 835	3 258	82	95
	Sous <i>Gymnostoma</i> + <i>Alphitonia</i>	5,31	4,51	4,11	129,81	73	3	4 225	3 982	151	134
	Sous <i>Gymnostoma</i>	6,15	5,39	7,13	213,98	89	4	13 500	2 558	204	280
Rouvray 2 (saprolite) venté	Sous petit <i>Gymnostoma</i>	7,41	6,84	0,10	6,04	59	5	735	59 317	175	185
	Sous <i>M. laurifolia</i>	7,68	6,76	0,11	6,32	24	4	1 191	130 594	201	101
	Sous + grand <i>Gymnostoma</i>	7,44	6,70	0,14	7,72	0	1	968	141 103	230	97
	Sous <i>Grevillea</i>	7,53	7,20	0,03	3,76	0	0	615	43 003	169	87
Rouvray 3 (saprolite + latérite) non venté	Sous <i>Dodonea</i>	6,96	6,21	0,36	7,49	14	1	2 034	58 842	334	140
	Sous <i>Grevillea</i>	6,89	6,32	0,50	14,62	34	2	1 275	48 106	435	181
	Sous <i>A. spirorbis</i> + <i>Gymnostoma</i>	6,72	6,40	0,39	11,06	0	1	1 190	30 262	230	133
	Sous <i>Gymnostoma</i>	6,58	6,37	0,67	16,74	50	2	683	31 728	358	154
Goro de Port Boisé (RPB) Topsoil plus ou moins érodé	Erodé, induré sous <i>Gymnostoma</i>	5,69	5,92	0,02	5,10	0	0	17	5 693	36	49
	Peu érodé, sous <i>Gymnostoma</i>	7,00	6,88	0,33	11,13	41	1	208	10 069	62	65
	Erodé, induré sous <i>M. laurifolia</i>	5,59	5,83	0,01	4,63	67	1	16	3 364	40	94
	Erodé, sous <i>Alphitonia</i>	6,92	6,71	0,32	10,54	87	3	178	10 700	68	58
	Assez érodé sous <i>Grevillea</i>	7,06	6,90	0,32	14,02	61	3	337	10 437	35	44
	Peu érodé sous <i>Dodonea</i>	7,13	7,02	0,29	10,62	19	2	324	15 712	139	37
Goro VEM7 Topsoil	Plateau, sol gravillonnaire	6,74	5,97	1,72	49,86	101	2	1 089	6 227	67	47
	Pente avec légumineuses	5,80	5,81	0,44	13,41	234	6	103	3 425	69	79
	Pente sous cypéracées	5,54	5,76	0,11	7,36	9	0	33	2 804	16	53
	Plat sous <i>Grevillea</i>	5,86	5,59	1,66	34,29	278	9	479	4 619	205	155
	Plat sous <i>Gymnostoma</i>	5,90	5,07	1,65	59,65	88	1	1 558	4 087	173	56
	Pente diverses plantes	5,59	5,57	0,40	11,92	72	3	80	3 916	115	102

Quelques conclusions ressortent assez clairement de ces analyses :

- Effet *Gymnostoma* important : L'effet d'amélioration des sols et substrat dû aux *Gymnostoma* est très net, avec surtout une amélioration des taux de carbone et d'azote du sol (Tableau 34). On le voit très clairement pour Kuebini sur topsoil où les taux de N et C ont été multipliés par 2 à 3 par rapport à *Xanthostemon*. Il apparaît également sur substrat saprolitique à Rouvray 3 où les taux de N et C sont supérieurs à toutes les autres plantes. A Goro VEM7 enfin, sur topsoil, les taux de N et C sous *Gymnostoma* sont également supérieurs à tous les autres échantillons. Ces effets positifs d'une part par la capacité fixatrice d'azote de cette Casuarinacée, liée à la présence dans les racines de nodules

bactériens du genre *Frankia*, d'autre part par la litière importante produite par cet arbuste (Figure 67).



Figure 68 : Litière produite sous *Gymnostoma sp.*

Les taux de métaux extractibles sont du coup souvent plus élevés sous *Gymnostoma*, notamment pour Ni (Tableau 35), ce qui s'explique probablement par l'augmentation de l'activité bactérienne globale qui participe à la libération des métaux (Amir et Pineau, 2003).

Les autres espèces ne montrent pas de tendances nettes en termes d'effet sur les sols. On peut toutefois relever l'amélioration assez forte des taux de Ca sous *Metrosideros laurifolia* et *Dodonea viscosa* ;

- Effet de l'érosion et de l'induration : Au niveau du site de Goro RPB, les parties érodées et indurées sont caractérisées globalement par des valeurs basses des taux de N et C et de certains minéraux.
- Comparaison entre pentes et parties plates : Au du site de Goro VEM7, les parties plates apparaissent plus riches en N, C et Ca que les parties en pente. Cette tendance assez nette peut s'expliquer par l'érosion sur les pentes et à l'inverse l'accumulation de matière organique dans les parties plates. Pour les mêmes raisons, les teneurs en métaux extractibles sont souvent plus élevées sur le plat.

Tableau 35 : Contenu en métaux totaux et extractibles des sols analysés.

Echantillons		Extrait DTPA (mg/kg)					ICP autres éléments (mg/kg)					
		Fe	Co	Cr	Ni	Al	Fe	Co	Cr	Ni	Al	P
Kuebini (Topsoil)	Sous <i>Xanthostemon</i>	87,01	5,86	0,05	8,43	6,16	390 277	74	20 314	3 064	17 319	54
	Sous <i>Gymnostoma</i> + <i>Alphitonia</i>	168,80	4,07	0,06	12,40	2,35	347 396	76	24 382	2 382	15 566	73
	Sous <i>Gymnostoma</i>	144,32	15,66	0,25	42,23	0,48	219 229	82	13 212	2 222	9 688	89
Rouvray 2 (saproлите) venté	Sous <i>Gymnostoma</i>	39,37	19,57	0,10	153,00	39,36	212 730	1 205	11 749	13 490	15 804	59
	Sous <i>M. laurifolia</i>	79,70	23,60	0,06	323,88	46,07	114 282	448	5 548	16 915	8 356	24
	Sous <i>Gymnostoma</i>	95,18	21,89	0,05	323,54	32,59	107 051	700	5 535	15 621	6 377	0
	Sous <i>Grevillea</i>	63,81	64,02	0,00	176,23	64,29	233 977	698	7 032	11 660	17 998	14
Rouvray 3 (saproлите + latérite) non venté	Sous <i>Dodonea</i>	51,26	76,91	0,03	163,27	41,18	252 597	635	11 378	9 518	21 696	34
	Sous <i>Grevillea</i>	35,39	62,37	0,00	68,96	36,61	265 197	727	11 567	8 368	22 528	0
	Sous <i>A. spirorbis</i> + <i>Gymnostoma</i>	34,07	51,53	0,07	81,89	33,39	258 657	689	9 923	6 954	30 804	50
	Sous <i>Gymnostoma</i>	32,52	33,84	0,56	94,29	28,48	265 453	979	12 549	11 584	17 910	0
Goro Route de Port Boisé (RPB) Topsoil plus ou moins érodé	Erodé, induré sous <i>Gymnostoma</i>	5,70	6,73	1,06	0,23	5,04	415 539	2 019	19 013	6 661	24 215	0
	Sous <i>Gymnostoma</i>	17,93	67,82	0,14	27,83	4,74	450 618	768	17 728	6 112	24 840	41
	Erodé, induré sous <i>M. laurifolia</i>	3,86	2,90	1,26	0,15	5,68	444 073	1 131	14 365	8 156	22 304	67
	Erodé, sous <i>Alphitonia</i>	41,40	62,93	1,04	32,09	9,24	448 195	738	14 013	4 696	25 853	87
	Assez érodé sous <i>Grevillea</i>	22,70	55,44	0,35	30,59	5,89	449 461	740	15 188	4 919	26 261	61
	Peu érodé sous <i>Dodonea</i>	19,84	65,75	0,09	31,51	5,74	473 140	729	20 040	4 587	27 830	19
Goro VEM7 Topsoil	Plateau, sol gravillonnaire	137,08	8,33	0,17	22,34	7,26	436 232	180	21 742	1 360	22 542	101
	Pente avec légumineuses	16,95	24,02	0,61	3,90	6,04	419 082	468	16 424	2 708	20 004	234
	Pente sous cypéracées	6,24	6,33	0,42	0,37	3,95	427 862	511	14 526	2 673	19 929	9
	Plat sous <i>Grevillea</i>	49,96	86,97	0,29	26,50	15,69	398 491	703	15 403	3 746	18 891	278
	Plat sous <i>Gymnostoma</i>	137,01	3,37	0,12	9,60	7,84	415 207	175	25 390	1 190	22 011	88
	Pente diverses plantes	15,58	36,70	0,78	5,07	17,17	373 406	2 075	14 432	8 549	23 205	72

3.2. IMPORTANCE DES MYCORHIZES À ARBUSCULES

L'interprétation de la mycorhization des plantes et de l'abondance des spores de champignons endomycorhiziens (AMF) est complexe. L'intensité de mycorhization exprime le volume exploré par les champignons mycorhiziens au sein du système racinaire des plantes. Les spores d'AMF sont à la fois des organes de résistance et de dispersion de ces symbiotes. Ces deux paramètres varient beaucoup en relation avec divers facteurs dont l'affinité des espèces ciblées avec ces symbiotes, les fluctuations environnementales (notamment l'humidité), les concentrations en éléments minéraux tels que le phosphore, etc. Toutefois, les résultats permettent de souligner quelques conclusions intéressantes

Le Tableau 36 montre d'abord globalement que la mycorhization est plus importante dans les zones avec topsoil ; même si la sporulation et même la mycorhization peut parfois être élevée sur un autre substrat, notamment à Rouvray 3, en relation avec un développement important des plantes, le site étant bien abrité et plus souvent humide que Rouvray 2.

Tableau 36 : importance des symbioses mycorhiziennes ; intensité de mycorhization des racines des espèces ciblées et abondance des spores dans les sols correspondants

Echantillons		Intensité de mycorhization (M%)	Nombre de spores d'AMF Pour 100 g de sol
Kuebini (Topsoil)	Sous <i>Xanthostemon</i>	85,5	2500
	Sous <i>Gymnostoma</i> + <i>Alphitonia</i>	91,9	6500
	Sous <i>Gymnostoma</i>	81,2	1000
Rouvray 2 (saprolite) venté	Sous <i>Gymnostoma</i>	8,3	250
	Sous <i>M. laurifolia</i>	0,33	0
	Sous <i>Gymnostoma</i>	17,0	2000
	Sous <i>Grevillea</i>	1,1	5
Rouvray 3 (saprolite + latérite) non venté	Sous <i>Dodonea</i>	26,5	1750
	Sous <i>Grevillea</i>	13,5	6500
	Sous <i>A. spirorbis</i> + <i>Gymnostoma</i>	37,8	1750
	Sous <i>Gymnostoma</i>	61,2	5000
Goro Route de Port Boisé (RPB) Topsoil plus ou moins érodé	Erodé, induré sous <i>Gymnostoma</i>	11,1	2000
	Sous <i>Gymnostoma</i>	35,0	20
	Erodé, induré sous <i>M. laurifolia</i>	77,9	25
	Erodé, sous <i>Alphitonia</i>	25,0	395
	Assez érodé sous <i>Grevillea</i>	4,6	30
	Peu érodé sous <i>Dodonea</i>	49,4	20
Goro VEM7 Topsoil	Plateau, sol gravillonnaire	23,5	110
	Pente avec légumineuses	50,4	1130
	Pente sous cypéracées	39,6	75
	Plat sous <i>Grevillea</i>	65,1	78015
	Plat sous <i>Gymnostoma</i>	21,5	530
	Pente diverses plantes	65,9	4500

Kuebini et Goro VEM7 globalement les plus riches en mycorhizes, sont en même temps les mieux classées en terme de réussite parmi les modalités testées. Les milieux qui n'ont pas permis un bon développement des plantes (ici Rouvray 1) montrent les plus faibles taux de mycorhization. Nous avons montré ailleurs (Lagrange et al. 2013) que les substrats très pauvres, notamment ceux fortement déficients en phosphore, ne permettent pas un bon développement des champignons mycorhiziens dans les racines des plantes, en raison du fait que le rendement de la photosynthèse est faible dans ces conditions, et qu'ainsi la plante ne synthétise pas assez de sucres pour nourrir une biomasse importante de symbiotes fongiques. Par ailleurs, les échantillons prélevés sous *Gymnostoma* sont généralement bien mycorhizés

comme le montre la Figure 68. *Gymnostoma*, *M. laurifolia* et *Xanthostemon* sont, parmi les plantes ciblées ici, celles qui ont les meilleures affinités avec les AMF.

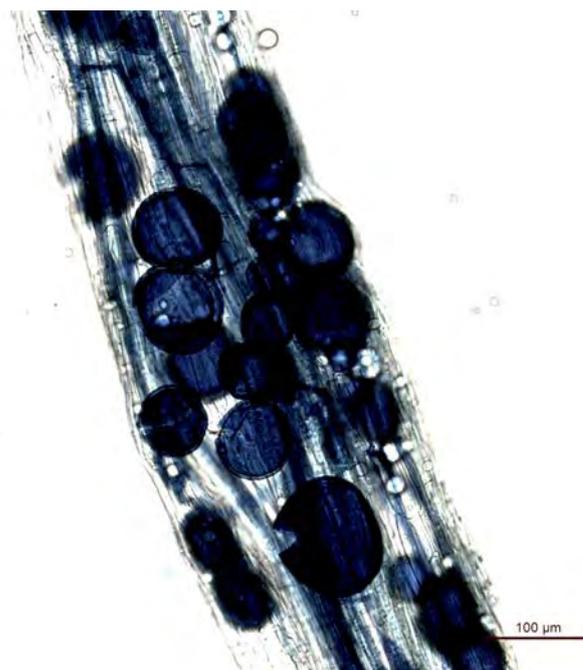


Figure 69 : Vue au microscope d'une partie de racine de *Gymnostoma* sp. avec très forte mycorrhization dans l'échantillon « Goro VEM7 ».

Les formations colorées en bleu foncé correspondent aux champignonx symbiotiques.

3.3. OBSERVATIONS COMPLÉMENTAIRES

Les diverses sorties sur le terrain ont permis, en plus des résultats traités précédemment, de réaliser quelques observations intéressantes. Beaucoup sont confortées par les résultats statistiquement vérifiés ; mais certaines ne peuvent pas être traitées statistiquement. Il est donc utile de les discuter rapidement ici.

L'effet positif des *Gymnostoma*, également traité dans le paragraphe 5.1., apparaît nettement dès que l'on s'y intéresse de près. Ce genre a diverses influences importantes : c'est l'une des plantes qui produit le plus de litière sur les terrains revégétalisés et cela dès les premières années de développement. Ceci a pour effet d'enrichir le sol en matière organique, comme le montrent les analyses physico-chimiques (Tableau 34 : augmentation très nette du taux de carbone organique du sol). Cette litière favorise clairement le développement des plantules, notamment d'autres espèces (

- Figure 69). Cette plante possède par ailleurs des nodules bactériens de *Frankia* souvent observés sur le terrain au niveau des racines, notamment en présence de topsoil, et qui contribuent fortement à l'enrichissement en azote du sol permettant aux plants voisins d'en profiter.



Figure 70 : Nombreux plants se développant sous *Gymnostoma* sp.

- Diverses symbioses peuvent être appréciées directement sur le terrain. C'est le cas des nodules fixateurs d'azote de *Frankia* présent chez les casuarinacées, comme soulignés précédemment. C'est également le cas des nodules de bactéries de la famille des *Rhizobium* qui ont été souvent trouvés chez les Fabacées comme le Gaïc et *Serianthes*. Enfin chez les casuarinacées (notamment *Gymnostoma*) et les Araucaria, il est également facile de vérifier la présence de myconodules racinaires très petits (environ 0,5 à 1 mm). Ces myconodules sont formés par des champignons mycorhiziens à arbuscules, exceptionnellement chez quelques espèces de plantes seulement (habituellement ces symbiotes ne sont détectables qu'au microscope, après coloration spécifique).

Les diverses observations qui ont été réalisées au cours de ce projet indiquent que les 3 types de nodules cités ci-dessus sont beaucoup plus fréquents dans les terrains revégétalisés avec topsoil. On les trouve en moindre quantité dans les terrains sans topsoils assez anciens lorsque les plants sont bien développés et ont enrichi le substrat en humus ; par contre ils sont absents ou très rares sur les terrains où le substrat n'est pas enrichi en humus du fait d'un faible développement des plants. La présence de ces nodules est donc également un bon indicateur de l'enrichissement de l'écosystème en cours d'évolution.

- Parmi les zones revégétalisés qui ont particulièrement réussi, certaines méritent qu'on s'y attache particulièrement. C'est notamment le cas de la Verse de l'Exercice Minier à Goro (Goro FER VEM7). Cette verse (Figure 70), recouverte de topsoil et revégétalisée en 2008 par semis hydraulique, montre une forte densité de végétation, une croissance importante sur une dizaine d'années et une diversité relativement importante bien qu'insuffisante (une douzaine d'espèces). Quel enseignement peut-on en tirer ? Le Tableau 34 montre que le topsoil n'y est pas particulièrement très fertile. Cette réussite serait due essentiellement à différents paramètres importants :

- une richesse biologique du topsoil ayant permis le développement d'une large partie des espèces présentes (plus de 50% des espèces n'étaient pas présentes dans le mélange d'hydroseeding et sont apparues)
- une probable bonne viabilité des graines utilisées qui explique la forte densité des plantes provenant du mélange d'hydroseeding (les espèces présente dans le mélange représentent en moyenne plus de 25% du nombre d'individus dénombrés sur les quadrats)
- et la pluviosité élevée qui caractérise la région et qui aurait permis aux plantules de survivre.

Ces remarques permettent d'insister sur l'importance de la qualité et du traitement des graines qui nécessite une véritable expertise et donc le développement d'une entreprise spécialisée dans ce domaine.

Par ailleurs, une étude de l'impact des fluctuations de la pluviosité sur la réussite de la revégétalisation par semis hydraulique paraît aujourd'hui indispensable pour mieux gérer cette difficulté.



Figure 71 : Aspect de la verse revégétalisée VEM7 à Goro.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La Nouvelle-Calédonie est aujourd'hui un des pays où les études sur la restauration écologique des milieux extrêmes dégradés sont les plus avancées. Sur le terrain, de nombreux essais et opérations de revégétalisation dans une optique de restauration écologique ont été réalisés depuis une trentaine d'années environ. L'expérience empirique accumulée par les techniciens et les chercheurs sur le terrain est importante, mais reste difficile à synthétiser. De même, il est difficile de tirer des conclusions sur la validité ou la performance des nombreuses techniques et pratiques testées durant ces trois décennies dans ce domaine, en raison de la diversité des cas et de l'hétérogénéité des terrains. Plus globalement, il est très difficile de connaître le degré de réussite à long terme des opérations de revégétalisation réalisées depuis longtemps, en observant directement l'état actuel des sites.

Le projet RECOSYNTH, mis en place suite au souhait des collectivités et des entreprises minières de faire un bilan synthétique de la revégétalisation des sites miniers en Nouvelle-Calédonie, propose une démarche comportant plusieurs niveaux, afin de maîtriser la complexité des réalités sur le terrain des systèmes revégétalisés depuis 4 à 30 ans.

L'étude est donc réalisée en plusieurs étapes successives qui permettent d'appréhender peu à peu la diversité des cas et de tirer un certain nombre de conclusions et d'enseignements utiles dans ce domaine :

- 1- Une base de données spécifique permettant d'intégrer un grand nombre de valeurs et de caractéristiques des sites revegetalisés a été préparée avec l'aide d'une entreprise spécialisée dans ce domaine ; base qui pourra servir bien après le projet.
- 2- Sur 381 sites miniers revégétalisés inventoriés, une préselection a conduit à 63 sites comportant toute la diversité des cas et en état de permettre une étude sur le terrain.
- 3- Sur les 63 sites, une sélection plus rigoureuse sur des critères de diversité, de disponibilité de données générales et d'intérêt pour l'étude, a été réalisée aboutissant à la sélection de 35 sites à étudier dans le détail.
- 4- Une fiche permettant de faire un relevé complet de l'état actuel des terrains revégétalisés, leur situation, leur climat, leur productivité et leur évolution par rapport à l'état initial a été mise au point.
- 5- Les relevés complets sur le terrain ont été effectués pour les 35 sites sélectionnés, avec leurs diverses modalités, selon une démarche à la fois statistiquement valide et objectivement réalisable en un temps convenable (6 mois).
- 6- Ces données ont été intégrées dans la base de données, puis diverses opérations de synthèse et de traitements de ces données ont suivi.
- 7- Tous les sites comportant des modalités différentes (traitements différents) avec des conditions générales similaires ont été traités séparément, afin de vérifier si certains traitements donnent des résultats significativement meilleurs. Plusieurs conclusions intéressantes sont ainsi ressorties à cette étape.

- 8- Une étude plus globale a été ensuite réalisée afin de faire ressortir de la variabilité générale des données les aspects les plus saillants, avec là aussi des conclusions complémentaires utiles.
- 9- Cette approche globale a finalement servi à rechercher un indicateur synthétique de la réussite à long terme de la restauration écologique du milieu.
- 10- Enfin une approche empirique, par observation sur le terrain, visant soit à conforter des tendances apparaissant dans les résultats chiffrés, soit à compléter ceux-ci pour des aspects qui n'ont pas pu être pris en compte dans les relevés, a permis également de souligner des points à prendre en compte.

D'une façon générale, parmi les nombreuses opérations et essais de revégétalisation sur terrains miniers réalisées depuis une trentaine d'année, les résultats en termes d'évolution vers une bonne restauration écologique sont très variés et ceci sans lien évident avec des caractéristiques générales des sites concernés. **Certains sites, anciens ou plus récents ont peu évolué en termes de croissance/recouvrement et de diversité** (ex : KRB_M37_Z001_VL20 et TONTT_VULC_SRED_MD01_5) ; **d'autres au contraire montrent une évolution relativement rapide et très positive en moins de 10 ans sur ces deux plans** (ex : NKY_LU_VP_PSO1 et GORO_FER_VEM_VEM7). D'une façon plus générale, **une douzaine de terrains (ou modalités de revégétalisation), parmi les 67 étudiées montrent une évolution positive vers une véritable restauration écologique**. Pour ces terrains, on peut considérer qu'un retour à l'état de maquis proche de l'état initial est très probable d'ici 15 à 30 ans selon les cas. Une trentaine sont plutôt dans la moyenne et nécessiteront probablement un peu plus de temps. Les autres évolueront encore plus lentement sauf à les enrichir de nouveau.

Il est important de noter que la majorité des modalités qui ont bien réussi sont celles où les techniques et protocoles utilisés correspondent bien aux recommandations issues de la recherche. Autrement dit, une amélioration de la prise en compte correcte des recommandations techniques devrait permettre dans l'avenir un taux de réussite élevé de la restauration des sites miniers.

Les facteurs qui influencent cette réussite sont nombreux et agissent au travers d'interactions complexes. L'analyse mathématique a permis dans un premier temps de classer les modalités revégétalisées en trois ensembles distincts, puis de synthétiser l'influence de douze variables prépondérantes, aboutissant ainsi à la mise au point d'un indicateur synthétique de réussite, en termes d'évolution vers une restauration écologique satisfaisante du milieu.

Une interface simple permettant d'obtenir une notation globale, en termes de réussite de la restauration du milieu a été mise au point. Il est donc doré et déjà possible de l'utiliser pour évaluer un terrain quelques années après sa revégétalisation.

Une telle évaluation devrait être effectuée au minimum après 5 ans, mais de préférence 2 fois entre 5 ans et 10 ans.

Il n'est pas possible de mettre en évidence, dans une étude sur 2 ans, l'ensemble de ces facteurs et interactions. Cependant les diverses approches réalisées permettent de faire ressortir l'importance d'un certain nombre de facteurs.

Ainsi, parmi les effets mis en évidence qui méritent d'être soulignés, il faut retenir notamment les suivants :

- **Effet topsoil** : comme on pouvait s'en douter, **l'utilisation du topsoil apparaît essentielle à la réussite de la restauration écologique des milieux revégétalisés**. Très important à souligner : les différences sont très nettes malgré une grande variabilité des résultats et ressortent à travers plusieurs approches, ce qui conforte clairement l'idée que **le topsoil doit être l'objet d'un soin particulier**. Il est d'ailleurs fort probable que les différences auraient été encore plus grandes si le topsoil avait été utilisé toujours dans son état frais (non stocké, ou très peu), ce qui n'était pas généralement le cas jusqu'à présent. Cette importance du topsoil apparaît à trois niveaux dans les résultats analysés : **le topsoil a favorisé la croissance des plantes, ainsi que leur reproduction (floraison, fructification)** ; ceci est lié notamment aux microorganismes symbiotiques qu'une fertilisation du substrat ne peut remplacer ; **le topsoil a également augmenté fortement la diversification des espèces végétales** du fait notamment de la banque de graines (nombre d'espèces apparues, indice de diversité) **et donc la complexification garante d'une stabilité à long terme (résilience)**.
- **Différences entre les substrats sans sol** : En ce qui concerne les substrats sans sol, **les latérites semblent donner globalement de meilleurs résultats que les saprolites**. Cette supériorité paraît cohérente par rapport à notre expérience empirique, les latérites étant souvent les couches qui se trouvent juste sous le topsoil et donc plus ou moins influencées chimiquement par ce dernier.

Cependant une autre comparaison, basée sur la pierrosité des substrats, montre que les latérites fines sans charge caillouteuse sont moins favorables que le même substrat comportant des cailloux et qu'un substrat saprolitique (l'ensemble étant fertilisé de la même façon). Il est probable que cet effet soit lié à la tendance des substrats trop fins à s'indurer et à créer de l'anaérobiose peu propice aux plantes. Il faut par ailleurs préciser que des substrats sans sol trop pauvres en particules fines (par exemple des saprolites grossières) peuvent aussi être mauvais pour le développement des plantes du fait d'une trop faible rétention de l'eau et des éléments minéraux (faible adsorption). Ce résultat a des conséquences pratiques intéressantes : **lorsqu'on a affaire à un substrat sans sol trop fin (notamment latéritique), il peut être intéressant de le mélanger avec un substrat plus grossier ou (bien mieux) de lui apporter suffisamment de matière organique pour l'aérer et éviter l'induration. A l'inverse, un substrat trop pauvre en particules fines nécessite d'être mélangé, lorsque c'est possible, avec un substrat riche en particules fines.**

- **Effets des intrants apportés** : L'analyse statistique montre, même sur topsoil, une différence entre les sols amendés en matière organique et ceux non amendés. **L'apport de Boue de STEP ou de Fientes de poules (avec et sans copeau de bois) donne les meilleurs résultats en termes de croissance des plantes**. Ce résultat confirme d'autres expérimentations, réalisées par l'IAC et l'UNC, ou celle du projet CNRT ECOMINE BIOTOP, qui toutes démontrent l'importance d'un amendement organique. L'intérêt de cet amendement paraît clair et essentiel pour des substrats sans sol (latérite, saprolite, stériles divers), car le manque de matière organique induit une très faible capacité d'échange cationique et, d'une façon plus générale, un retour assez rapide à un état de carence en minéraux essentiels dès que les effets des engrais minéraux apportés sont épuisés (deux ans environ). Cet apport de matière organique apparaît également important lorsque le

topsoil est réinstallé, en raison de la faible teneur en carbone des sols ultramafiques néo-calédoniens. Il faut préciser que les débris végétaux qu'on mélange avec le topsoil ne participent à l'enrichissement de celui-ci que tardivement, car ils ne sont pas assez fins et ne s'humifient que très lentement.

Il importe de rajouter ici que la plupart des amendements organiques utilisés actuellement sont porteurs de graines de plantes exotiques. Afin de maîtriser l'élimination de ces espèces exotiques (graminées, solanacées, etc.), **en condition de plantation, l'apport de la matière organique dans les trouaisons est préférable à un épandage général, ceci permettant en même temps d'économiser une matière organique précieuse. Ainsi, un bon nettoyage sous les plants des espèces natives, avant la fructification des exotiques devrait suffire à minimiser fortement leurs effets négatifs.**

En ce qui concerne la fertilisation minérale, les engrais à diffusion lente, utilisés ici donnent également de bons résultats. Cependant, l'apport d'engrais minéraux ne dispense pas nécessairement d'un apport de matière organique, notamment lorsqu'on a affaire à des sols pauvres, ou plus encore à des substrats sans sol, car l'effet des minéraux s'exerce sur un temps assez court (1 à 2 ans), alors que l'effet d'un amendement organique de type boue de STEP ou fientes de poule dure plus longtemps.

Un autre aspect à souligner est l'importance d'éviter des apports trop importants aussi bien de matière organique que d'engrais minéraux. Un tel apport, non seulement augmente la quantité d'exotiques, mais aussi inhibe la fonction mycorhizienne.

- **Exposition aux vents** : l'analyse statistique démontre clairement ici que les terrains très exposés aux vents sont moins productifs que les autres. Il en résulte que **les terrains fortement soumis aux vents doivent être préalablement plantés en bordure, avec des espèces pouvant faire fonction de brise-vent comme le bois de fer. Ces arbres pourront être coupés lorsque le système revégétalisé est suffisamment développé pour être résistant et résilient. Ces brises-vents doivent cependant être déjà assez grand au moment de la revégétalisation.**
- **Effet du Gaïac (*Acacia spirorbis*)** : Les analyses sur un certain nombre de terrains comportant des densités plus ou moins importantes de cette espèce montrent que **le gaïac a globalement un effet positif sur la réussite de la restauration.** Ceci apparaît lorsque l'on compare les zones sans gaïac aux zones avec des densités plutôt faibles de cette espèce.

Les analyses réalisées indiquent également que les zones à faible densité en Gaïac sont mieux classées en réussite de la restauration que celles à forte densité. Ceci conforte notre perception empirique de cette question : **une forte densité de cette espèce dans les plantations est défavorable à l'augmentation de la diversité, c'est-à-dire notamment à l'installation d'espèces non apportées initialement**, et ceci en raison notamment du caractère grégaire du Gaïac (L'Huillier et al, 2010). Par contre, lorsqu'il est planté à faible densité, il n'a pas d'effet négatif sur la diversité. Il est même vraisemblable, comme l'ont montré d'autres travaux récents (Houlès 2017 ; Vincent, 2018), qu'en tant que plante fixatrice d'azote, l'enrichissement du sol qu'il induit, favorise les autres espèces.

Les observations directes sur le terrain montrent également que le Gaïac a du mal à persister sur le long terme en milieu minier revégétalisé, notamment à forte densité,

puisque nous avons constaté, en particulier dans la mine de Cofrémi que de nombreux arbres dépérissaient après un certain nombre d'années. Par contre, comme l'ont constaté aussi d'autres observateurs, nous avons noté que ces arbres, mélangés à d'autres espèces, favorisent le développement de plantules de diverses espèces. Il est donc possible aujourd'hui de répondre à la question longtemps controversée de l'intérêt d'utiliser le Gaïac en restauration écologique des sites miniers : **on peut prévoir éventuellement une utilisation du Gaïac, mais uniquement à faible proportion, dispersé au milieu d'autres espèces**. Il faut cependant rester prudent sur l'évolution des systèmes et il convient de vérifier sur le long terme qu'il ne bloque pas ce dernier dans son évolution. Aussi, il conviendrait de maintenir un suivi régulier des zones ayant fait l'objet de ce projet Recosynth, mais aussi de soutenir des travaux de recherche avec l'application de différentes modalités d'utilisation du Gaïac dans des conditions bien définies. Il faut préciser que cette espèce possède trois types de symbiotes bien différents : des bactéries du groupe des Rhizobium, produisant des nodules de quelques millimètres très facile à voir sur les racines, et caractérisé par une forte activité de fixation de l'azote (Vincent 2018), des ectomycorhizes et des endomycorhizes à arbuscules intervenant dans la nutrition minérale et l'adaptation au milieu. Les travaux réalisés dans le cadre de l'ANR Adaspir (non publiés) ont démontré l'importance de chacun de ces groupes symbiotiques, ce qui explique la capacité de cette espèce à s'implanter dans presque tous les milieux. **Sa capacité à enrichir le sol peut être un atout s'il est utilisé à faible densité, dans les régions où il existe naturellement.**

- Il n'a pas été possible de comparer directement la technique d'hydroseeding à celle de la plantation, en raison des conditions trop différentes entre les sites où les deux techniques ont été utilisées. Toutefois les résultats montrent que les modalités qui ont bien réussi ont utilisé indifféremment l'une ou l'autre de ces deux techniques, ce qui conforte l'intérêt d'utiliser l'une ou l'autre des techniques, voire les deux à la fois, selon les conditions des terrains.

Les analyses globales, confortées par les observations sur le terrain, soulignent par ailleurs l'intérêt de certaines pratiques retrouvées souvent dans les modalités de revégétalisation les mieux classées en termes d'évolution positive vers une restauration effective. Ces pratiques méritent d'être prises en compte le plus souvent possible :

- La présence d'écosystèmes naturels proches des zones à revégétaliser est un point important : cette condition favorise la diversification rapide des systèmes revégétalisés, grâce à l'apport de graines provenant de plantes fructifiées. **Les entreprises minières doivent laisser des îlots de maquis ou forêt à proximité de chaque zone décapée.**
- L'utilisation d'un nombre élevé d'espèces initiales apportées lors de la revégétalisation favorise la montée en diversité et l'évolution rapide vers un écosystème complexe plus résilient.
- Le griffage du sol lorsqu'il est plus ou moins induré et le sous-solage du substrat induré avant l'apport du topsoil accélèrent également la réussite de la restauration écologique
- Les pratiques d'utilisation d'hydro-rétenteur et de paillage ressortent également comme favorables et leur généralisation, notamment dans les milieux à pluviosité non régulière, est préconisée

- Enfin la mise en défens peut être particulièrement utile dans les sites fréquemment visités par des herbivores envahissants.
- **Effet des *Gymnostoma*** : L'analyse statistique des données de l'enquête n'a pas permis de faire ressortir l'importance de ce genre, car il n'a pas été ciblé spécifiquement au cours de l'enquête. **Cependant, les analyses physico-chimiques des sols ainsi que les observations fines sur le terrain, démontrent clairement le grand intérêt des espèces de ce genre.** Il faut rappeler de nouveau que les casuarinacées, dont fait partie cet arbre, sont des plantes fixatrices d'azote grâce aux bactéries du genre *Frankia* produisant des nodules racinaires de plusieurs millimètres. Par ailleurs ces plantes portent très souvent de tous petits nodules (moins d'un millimètre en général), les myconodules formés par des champignons mycorhiziens à arbuscules en forte densité. Les observations de terrain montrent notamment **que les *Gymnostoma* produisent une litière consistante qui héberge très souvent une importante quantité de plantules de la même espèce et d'espèces différentes. Son influence favorable sur les autres plants alentour apparaît aussi à l'observation.**

En termes de recommandations pour ce point, il faut d'abord préciser qu'en raison de la carence en azote des sols miniers, la présence de plantes fixatrices d'azote grâce à des bactéries symbiotiques est essentielle. D'une façon générale, il est donc important de mettre dans les listes d'espèces végétales de revégétalisation une ou deux espèces végétales fixatrices d'azote (légumineuse ou casuarinacée). **Le genre *Gymnostoma* étant sur maquis miniers le plus abondant parmi les plantes fixatrices d'azote et étant par ailleurs parmi les plus adaptés, il convient de l'inclure dans ces listes à chaque fois qu'il est présent dans le milieu initial. Il importe de l'intercaler entre les autres espèces, car il est bien connu que la fixation d'azote liée aux symbiotes bactériens d'une plante profite assez rapidement aux plantes non fixatrices alentour.**

- Sur le terrain, il apparaît **assez nettement un lien entre la réussite en termes de restauration du milieu et l'abondance des symbioses microbiennes détectables** grâce aux nodules racinaires bactériens (*Rhizobium*, *Frankia*) et fongiques (myconodules). La richesse en nodules symbiotiques paraît également liée à l'enrichissement en matière organique du sol (litière, humus). **Ces points peuvent donc aussi constituer des indicateurs que les techniciens peuvent apprendre à vérifier.**
- Les observations réalisées sur certains terrains revégétalisés par semis hydraulique confortent clairement un point de vue déjà souligné dans d'autres travaux : **la maîtrise de la qualité et du traitement des graines est essentielle pour la réussite des semis. Les responsables concernés par la restauration des milieux miniers doivent penser à favoriser la création d'une filière graine efficace ou d'une entreprise spécialisée dans toutes les étapes de cette filière** (obtention, conservation, traitement des dormances, etc.).

Perspectives :

Un certain nombre de données recueillies dans cette étude n'ont pas pu être correctement traitées, d'abord parce que certaines données ne sont pas assez fréquentes pour être traitées correctement sur le plan statistique. Elles nécessiteraient donc d'être complétées. Ensuite, il est difficile pour un projet mené sur 2 ans d'exploiter de manière très fine la totalité des données obtenues correspondant à des milliers de valeurs. Ainsi, par exemple, nous n'avons pas recherché pour l'instant de liens entre la pluviosité et la réussite de l'ensemencement hydraulique ou l'effet de la pente sur les variables biologiques traitées. De telles questions pourront être traitées ultérieurement, notamment lorsque d'autres données seront rajoutées, permettant d'avoir une plus grande fiabilité des tests statistiques.

C'est le grand intérêt de la base de données de permettre une exploitation des résultats bien au-delà d'un projet et donc de permettre une amélioration constante des conclusions et des recommandations produites grâce à son exploitation régulière.

La fiche terrain, permettant le relevé des données sur l'état des terrains revégétalisés après quelques années de développement du système en évolution, peut encore être améliorée, notamment en standardisant plus les modes de relevés et les techniques de mesures. Cette amélioration est en effet importante pour aboutir à des mesures fiables de l'indicateur de réussite. Il n'en reste pas moins que l'utilisation des aujourd'hui de cette fiche pour les suivis imposés réglementairement devrait être envisagée afin d'uniformiser les données collectées et ainsi enrichir les connaissances pour les années futures. Il convient également d'obtenir de la part des acteurs de la revégétalisation des données fiables des protocoles mis en place car sans les données de départ, l'interprétation reste toujours complexe. Ainsi, il est intéressant de saisir dans la base de données du projet Recosynth les données relevées sur les prochaines opérations de revégétalisation, ou au minimum sur les essais comportant des modalités différentes.

Un travail de recherche plus approfondi que les données empiriques récupérées ici, sur l'importance du genre *Gymnostoma* en restauration écologique des milieux miniers doit être engagé dans les prochaines années, afin notamment de quantifier l'apport de ce genre au sol et au développement sur quelques années des espèces végétales qui l'entourent. Ce travail pourra commencer par un complément d'enquête concernant les effets de ces plantes sur la dynamique générale de l'écosystème naissant, sur quelques sites revégétalisés à diverses périodes.

Il en est de même pour le Gaïac pour lequel une étude plus approfondie, notamment de son effet à long terme sur la diversité des nouveaux écosystèmes, devrait permettre de fixer définitivement les modalités d'utilisation, même si les éléments apportés ici donnent déjà des orientations importantes sur son emploi.

Un autre travail de recherche important à réaliser dans les prochaines années est l'étude de l'impact des fluctuations de la pluviosité sur la réussite de la revégétalisation par semis hydraulique. Une meilleure connaissance de ces aspects permettrait de mieux maîtriser cette difficulté majeure dans la réussite de cette technique de revégétalisation.

Enfin, la production de matières organiques pour enrichissement des sols des écosystèmes naturels devra faire l'objet d'expérimentations visant à améliorer leur conditionnement en vue de réduire au maximum la quantité de graines exotiques viables en leur sein.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Amir H., Ducouso M. 2010. Les bactéries et les champignons du sol (chap. 5). *In* : Mine et Environnement en Nouvelle-Calédonie. Les milieux sur substrat ultramafiques et leur restauration. Ed. by L. L'Huillier, T. Jaffré, A. Wulff; IAC Ed.; Nouméa; pp 129-145.
- Amir H., L'Huillier L., Fogliani B., et al. 2014. Caractérisation et fonctionnement du système sol/plante/microorganismes dans les maquis miniers. Perspectives d'application à la restauration écologique. Rapport Final- Projet ECOMINE BIOTOP – CNRT « Nickel et son environnement. 315 p.
- Amir H., L'Huillier L., Fogliani B., et al. 2016. Restauration écologique des sites miniers. Rapport bibliographique – Projet « RECOSYNTH » – CNRT « Nickel et son environnement. 57 p.
- Amir H., Pineau R., 2003. Release of Ni and Co by microbial activity in New Caledonian ultramafic soils. *Canadian Journal of Microbiology*, 49 : 288-293.
- Bordez L. 2015. Stratégies de revégétalisation des maquis miniers nickélifères de Nouvelle-Calédonie : étude sur les potentiels biologiques des topsoils et leur gestion en vue de leur utilisation pour la restauration écologique du milieu dégradé. Thèse de doctorat. Université de la Nouvelle-Calédonie.
- Bordez L., Jourand P., Ducouso M., Carriconde F., Cavaloc Y., Santini S., Claverie J.M., Wantiez L., Leveau A., Amir H. 2016. Distribution patterns of microbial communities in ultramafic landscape: a metagenetic approach highlights the strong relationships between diversity and environmental traits. *Molecular Ecology* **25** : 2258–2272
- Bradshaw A.D. 1983. The reconstruction of ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, **20**, 1–17. doi.0021-8901/0400-0001
- Briollais L., Durrieu G. 2014. Application of quantile regression to recent genetic and omic studies, *Human Genetics*, **133**, 951-966.
- Cadima J., Cerdeira J.O. Minhoto M. 2004. Computational aspects of algorithms for variable selection in the context of principal components. *Computational statistics and data analysis*, **47(2)**, 225-236.
- Durrieu G., Briollais L. 2017 Some recent statistical methods applied in genetics/genomics, Chapman & Hall/CRC Handbooks of Modern Statistical Methods, eds: Roger Koenker, Victor Chernozhukov, Xuming He, Limin Peng, 463 pages.
- Durrieu G., Briollais L. 2009. Sequential determination of sample size for robust linear regression: application to microarray experimental designs. *Journal of the American Statistical Association*, **104(486)**, 650-660.
- Falguerolles A.D., Jmel S. 1993. Un critere de choix de variables en analyse en composantes principales fonde sur des modeles graphiques gaussiens particuliers. *Canadian Journal of Statistics*, **21(3)**, 239-256.
- Fogliani B., Bouraïma-Madjèbi S., Medevielle V., Pineau R. 2004. Methods to promote germination of two Cunoniaceae species, *Cunonia macrophylla* and *Geissois pruinosa* from New Caledonia. *Seed Science and Technology* **32(3)**, 703-715.
- Houlès A. 2017. Principe de facilitation appliqué à la restauration écologique des sites miniers dégradés. Suivi des communautés ectomycorhiziennes au cours de successions végétales assistées par *Acacia spirorbis*. Thèse doctorat, Univ. Montpellier.

- Jaffré T., Pelletier B. 1992. *Plantes de Nouvelle-Calédonie permettant de revégétaliser des sites miniers* (Vol. 1). doi.10.1017/CBO9781107415324.004
- Jaffre T., Rigault F. 1991a. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur déblais miniers. ORSTOM/SLN, Nouméa, Sci. Vie, Bota Convention, n°5, 77 p.
- Jaffre T., Rigault F. 1991b. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur déblais miniers. ORSTOM/SLN, Nouméa, Sci. Vie, Bota Convention, n°4, 43 p.
- Jaffre T., Rigault F., Sarrailh J.M. 1993. Essais de revégétalisation par des espèces locales d'anciens sites miniers de la région de Thio. ORSTOM – CIRAD – Province Sud – SLN, Nouméa, Sci. Vie, Bota, Convention, n°7, 31 p.
- Lagrange A., Amir H., L'Huillier L., 2013. Mycorrhizal status of Cyperaceae from New Caledonian ultramafic soils: effects of phosphorus availability on arbuscular mycorrhizal colonisation of *Costularia comosa* in field conditions, *Mycorrhiza*, 23:655-661
- L'Huillier L., Jaffré, T., Wulff A. (2010). Mines et environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration (IAC Editio). Nouméa, Nouvelle-Calédonie.
- Lande R. 1996. Statistics and partitioning of species diversity, and similarity among multiple communities. *Oikos*, pages 5–13.
- Luçon S. (2009). Bilan des travaux de végétalisation par semis-hydraulique sur mines : Synthèse des résultats et préconisations. Nouméa, Nouvelle-Calédonie.
- Luçon S., Marion F., Nielk J.F., Pelletier B. 1997. Réhabilitation des sites miniers sur roches ultramafiques en Nouvelle-Calédonie. Ecologie des milieux sur roches ultramafiques et sols métallifères (eds Jaffré T., Reeves R.D., Becquer T.), Doc. Sci. Tech. IIIé, ORSTOM, Nouméa, pp. 297-303.
- McCoy S., Kurpisz D., Newedou S. 2002. *Species selection for revegetation of the Goro Nickel Project area in New Caledonia*. 213- 225 In : Proceedings of the 26th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium. Dawson Creek.
- Pagès J. 2014. Multiple Factor Analysis by Example Using R. Chapman & Hall/CRC The R Series London 272 p
- Peck V., Quiza L., Buffet J.P., Khdhiri M., Durand A.A., Paquette A., Thiffault N., Messier C., Beaulieu N., Guertin C., Constant P. 2016. Towards the development of multifunctional molecular indicators combining soil biogeochemical and microbiological variables to predict the ecological integrity of silvicultural practices. *Microbial Biotechnology*, **9(3)**, 316–329. doi.10.1111/1751-7915.12348
- Richardson P.J., Macdougall A.S., Larson D.W. 2012. Fine-scale spatial heterogeneity and incoming seed diversity additively determine plant establishment. *Journal of Ecology*, **100(4)**, 939–949. doi.10.1111/j.1365-2745.2011.01948.x
- Sarrailh J.M. 2001. Bilan des recherches menées par l'IAC sur la revégétalisation des sites miniers.
- SERA. 2015. National Standards for the Practice of Ecological Restoration in Australia.
- Shannon C. E. 2001. A mathematical theory of communication. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, **5(1)**, 3–55.

- Tiavouane J., Kurpisz D., L'Huillier L., Fogliani B. 2012. Etude sur la reconstitution d'une couverture forestière endémique en milieu de maquis sur le grand massif du Sud : Mise en place des essais en milieu naturel, cartographie et suivi des populations. Rapport d'étape à 1 an. Convention de partenariat IAC/VALE-NC/SAS, n°2495, 22 pp.
- Van Etten E.J.B., Neasham B., Dalgleish S. 2014. Soil seed banks of fringing salt lake vegetation in arid Western Australia - density, composition and implications for postmine restoration using topsoil. *Ecological Management and Restoration*, **15(3)**, 239–242. doi.10.1111/emr.12119
- Van Diggelen R., Grootjans A.P., Harris J.A. 2001. Ecological restoration: State of the art or state of the science? *Restoration Ecology*, **9(2)**, 115–118. <http://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2001.009002115.x>
- Villegente M. 2013. Caractérisation Biochimique et Moléculaire de Mécanismes de la Germination d'Espèces Endémiques de Nouvelle-Calédonie. Thèse de doctorat de l'Université de la Nouvelle-Calédonie, 244 pp.
- Vincent B. 2018. Contribution de la symbiose fixatrice d'azote dans l'adaptation d'une légumineuse à des sols contrastés : le modèle *Acacia spirorbis* et les contraintes édaphiques extrêmes rencontrées en Nouvelle-Calédonie. Thèse doctorat, Univ. Montpellier.
- Wagner M., Bullock J.M., Hulmes L., Hulmes S., Peyton J., Amy S.R., Savage J., Tallowin J.B., Heard M.S., Pywell R.F. 2015. Creation of micro-topographic features: A new tool for introducing specialist species of calcareous grassland to restored sites? *Applied Vegetation Science*, **19**, 89–100. doi.10.1111/avsc.12198
- Wulff A., Turner S.R., Fogliani B., L'Huillier L. 2012. Smoke stimulates germination in two divergent Gondwanan species (*Hibbertia pancheri* and *Scaevola montana*) endemic to the biodiversity hotspot of New Caledonia. *Seed Science Research* **22 (4)**, 1-6.
- Young T.P., Petersen D.a., Clary J.J. 2005. The ecology of restoration: historical links, emerging issues and unexplored realms. *Ecology Letters*, **8(6)**, 662–673. <http://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00764.x>
- Zongo C. 2010. Données biologiques et physiologiques sur les semences de quelques espèces de milieux ultramaïques néo-calédoniens. Thèse de doctorat de l'Université de la Nouvelle-Calédonie, 228 pp.
- Zongo C., Sabourin M., Démaret L., Gâteblé G., Fogliani B., Marmey P. 2016. Seed characterization for propagation and conservation of *Oxera pulchella* subsp. *grandiflora* (Dubard) De Kok, a new caledonian ornamental endemic. *Propagation of Ornamental Plants*, 16(4): 137-145.

6. ANNEXES

6.1. LISTE DES RÉUNIONS DE TRAVAIL EFFECTUÉES DANS LE CADRE DU PROJET

Réunion de démarrage le 20 mars 2015 : Exposé et discussion sur le projet RECO SYNTH. Cette réunion organisée par le CNRT Nickel et son Environnement s'est faite en présence de nombreux invités, notamment des personnes du Fonds Nickel, des services de revégétalisation de différentes entreprises minières et des collectivités.

Réunion du 22 avril 2015 : Les différents critères d'évaluation à relever sur le terrain ont été listés. Certains critères sont basés sur des choix multiples qu'il est nécessaire de choisir.

Réunion du 26 mai : Réunion avec Bluecham pour la construction d'une base de données (BDD). Finalement notre demande pour une BDD ne sera pas acceptée par Bluecham.

Réunion du 5 juin : Définition de la marche à suivre pour la récupération des données. Une définition des termes importants utilisés dans le projet est également précisée (notamment : mine, site, zone, modalité). Les paramètres qui devront servir pour la sélection des différentes zones de revégétalisation à étudier ont également été décidés.

Réunion du 16 juin : Une première ébauche de la fiche de terrain (servant pour les relevés futurs) a été discutée et validée (notamment sur les différents paramètres qui doivent être relevés) ; une réflexion est également entamée sur une fiche mémo, liée à cette fiche terrain, et permettant de préciser qualitativement et quantitativement certains paramètres à relever.

Réunion du 2 juillet : Les fiches terrain et mémo sont revues rapidement (avec les modifications conseillées lors de la dernière réunion) ; une première étape de pré-sélection des différentes zones est réalisée à partir des données de la SIRAS Pacifique.

Réunion du 8 juillet : Une pré-sélection des zones citées dans le livre « Mines et Environnement » : (données IAC) est réalisée (données récupérées par Bota Environnement).

Réunion du 22 juillet : Une pré-sélection des zones de Vale, de la SMT et de la SMSP est réalisée (données récupérées par Bota Environnement).

Réunion du 8 septembre : Une pré-sélection des sites de KNS, de la NMC est réalisée (données récupérées par Bota Environnement).

Réunion du 23 octobre : Suite de la phase de pré-sélection des sites ; un certain nombre de listes présélectionnés sont repassés en revue, afin de réduire le nombre. Suite à une première réunion, réalisée la semaine précédente avec l'entreprise MEANOPUS choisit pour la construction de la BDD, une synthèse sur cette réunion a été réalisée. Une première discussion sur le comité de pilotage qui doit se tenir en décembre est engagée.

Réunion du 18 novembre : Cette réunion marque la fin de la première phase de pré-sélection des sites de revégétalisation. Ainsi 61 zones ont été présélectionnées. Une discussion est engagée sur la méthodologie des relevés terrain (type de relevés, nombre et adaptation en fonction des différentes conditions). Des discussions sont ensuite menées sur la première sortie terrain, prévue en décembre et la préparation du comité de pilotage.

Réunion du 27 novembre : Un premier bilan les zones présélectionnées est réalisé. Une première ébauche des différentes données à prendre en compte pour la BDD a été envoyée à MELANOPUS qui a fait un certain nombre de remarques qui sont passées en revues.

Réunion du 2 décembre : Des discussions sont réalisées sur la BDD (mises en formes des données, différentes tables à créer pour la fonctionnalité pour lier les données entre elles, etc.).

Sortie terrain du 15 décembre : Visite, sur une journée, de chantiers de revégétalisation réalisés par Vale NC, en présence du responsable de la pépinière de Vale NC et de la directrice du CNRT Nickel et son Environnement, afin de valider certains aspects de la fiche terrain, notamment la définition des quadrats.

Réunion du 16 décembre : Des discussions sont menées sur la sortie terrain de la veille et sur la présentation pour le comité de pilotage.

Réunion du 17 décembre : Une discussion sur la BDD est réalisée en présence des deux entreprises privées et de l'entreprise MELANOPUS qui réalise cette base. Différents ajustements sont encore à réaliser sur les données.

Réunion du 18 décembre : Comité de pilotage du projet RECOSYNTH et du projet BIOINDIC fait en présence de nombreux invités, notamment du Fonds Nickel, des services de revégétalisation de différentes entreprises minières et des collectivités.

Réunion du 6 janvier 2016 : Des réflexions sur la BDD sont menées, notamment pour harmoniser l'ensemble des données, des choix possibles pour les critères à choix multiples. De nombreuses heures sont passées à réfléchir à l'intégrité des données.

Réunion du 7 janvier 2016 : Une journée de travail est réalisée sur la BDD. De nombreuses remarques et modifications sont réalisées.

Réunion du 11 janvier 2016 : Travail sur la BDD. De nombreuses remarques et modifications sont réalisées.

Réunion du 12 janvier 2016 : Travail sur la BDD. De nombreuses remarques et modifications sont réalisées.

Réunion du 18 février 2016 : Des modifications sont faites sur la fiche terrain et sont discutées en réunion. Une discussion est engagée sur la première sortie terrain entre les entreprises privées pour tester la fiche terrain et les conditions de réalisation des relevés. Une première discussion est réalisée sur la sélection définitive des zones.

Sortie terrain du 26 février 2016 : Sortie permettant de tester la fiche terrain et la méthodologie des relevés. De nombreux ajustements sont réalisés à cette occasion.

Réunion du 5 avril 2016 : Les 61 zones présélectionnées ont été prospectées par les entreprises privées et un premier retour sur ces sorties est réalisé. Ce travail marque le début de la sélection définitive des zones de revégétalisation à étudier en détail dans le cadre de ce projet (35 zones).

Réunion du 13 avril 2016 : Fin de la sélection des 35 zones.

Réunion du 21 avril 2016 : Une présentation de la BDD est réalisée par MELANOPUS aux membres du projet RECOSYNTH.

Réunion du 13 mai 2016 : Les premiers relevés sur les zones sélectionnées commence sur le Mont-Dore au niveau de l'ancienne mine De Rouvray. Ces premiers relevés sont réalisés avec l'ensemble des entreprises privées afin d'harmoniser la méthodologie entre les différents acteurs. Quelques ajustements sont encore réaliser sur la fiche terrain.

Réunion du 9-décembre 2016 : point sur les sorties sur terrains et organisations des travaux qui restent à faire.

Réunion du 9-février 2017 : bilan final des sorties sur terrain, discussion sur l'analyse statistique des données et sur le plan du rapport final.

Différents points étaient à l'ordre du jour de la réunion :

Réunion du 16-mai 2017 : discussion de l'avancée des traitements statistiques.

Réunion du 6-octobre 2017 : synthèse sur la fin de la rédaction du rapport final

6.2. LISTE DES SITES QUI ONT ÉTÉ ÉVALUÉS DANS LE CADRE DE LA SÉLECTION (TOTAL DE 381 ZONES SUR 82 SITES)

Site SIRAS

	Sites	Informations zones et modalités	Informations générales
1	Camps des Sapins – Ningua 1994	3 zones avec 12 modalités chacune (entre 40 et 72 m2 par modalités)	Semis Hydraulique / Différents types de substrats en fonction des zones / Différents types d'amendements en fonction des modalités
2	Kopéto – Décharge et verse col 440 1995	Une grande zone (1200m2)	Semis hydraulique / Utilisation d'espèces végétales endémiques et du commerces
3	Camps des Sapins – Glissement 2 et toue du Crépuscule 1996 - 1997	2 zones (400 et 2600 m2)	Semis Hydraulique / Différents types de substrats / Utilisation d'espèces endémique et espèces du commerces
4	Thiébaghi – Grande Verse, Verse Haute, Verse intermédiaire partie 1, 2 et 3, Secteur "Virage à Deg au premier cassis" 2003	6 zones (différentes tailles entre 600 et 24 000 m2)	Selon les zones, Semis Hydraulique ou Semis Hydraulique sur plantation / Différents types de substrat / Utilisation d'espèces endémiques et sur certaines zones utilisation d'espèces du commerces / Différentes altitudes et pentes
5	Thiébaghi – Zone Complémentaire A, 1° essai sur semis 2003, 3° essai sur semis 2003-2005	3 zones (5000 m2 pour la première et 500 m2 pour chacune des deux autres)	Semis Hydraulique / Utilisation d'espèces endémiques / Utilisation d'espèces endémiques / Différentes altitudes et pentes
6	Thiébaghi – Grande verse, Tuyau hydraulique, Zone J du concasseur broyeur, Zone K du concasseur broyeur 2006	4 zones (entre 800 et plus de 5 000 m2)	Semis Hydraulique / Utilisation d'espèces endémiques et du commerces
7	Kopéto – Bégonia BN3 2005	1 zone de 3 000 m2	Plantation sur saprolite / utilisation de 13 espèces endémiques
8	Sainte Marie – Mine Andrée (Secteur A) 2007	1 zone de plus de 2 000 m2	Plantation / utilisation de 18 espèces endémiques
9	Vallée des Tritouts – Décharge 1 2007	1 zone	Plantation avec utilisation de fascines, rondins de bois / utilisation de 18 espèces endémiques
10	Poum – Verse Fredo 2008	1 zone (2710 m2)	Plantation sur topsoil et sur banquette de verse / Utilisation de 10 espèces endémiques
11	Kopéto – Kiwi 2008	1 zone (7750 m2)	Semi Hydraulique / Utilisation d'espèces endémiques et du commerces
12	Thiébaghi – Notou et Carrière Frouin 2008	2 zones (de plus de 8 000 m2 pour la première et 1 000 m2 pour la seconde)	Semi Hydraulique sur topsoil grossier / Utilisation d'espèces endémiques et du commerces
13	Kouaoua – Mont Martre / Mont rêve 2008	1 zone (de plus de 4 000 m2)	Plantation sur topsoil avec uniquement espèces de maquis
14	Thio Plateau – Les Moulinets 2008	1 zone	Plantation espèces de maquis uniquement
15	Thiébaghi – Crête 2 – Paagoumène et Fridoline 2009	2 zones	1° zone : Semis hydraulique avec graminées 2° zone : Plantation d'espèces du maquis
16	Nakéty – Verse St André 2009	1 zone (de 1000 m2)	Plantation sur latérite d'espèces du maquis
17	Cap Bocage – Grande verse 2009	1 zone	Plantation en bosquet
18	Pinpin – Verse AC2 2012	7 zones (avec 2 à 4 modalités par zone)	Semis hydraulique sur latérites avec utilisation de graminée et sur semis en 2013 (pour certaines modalités)
19	Mine Française – Verse Houaïou	1 zone (avec 3 modalités)	Semis Hydraulique mélange espèces maquis et espèces du commerce

	2009		
20	Goro – Verse de l'exercice minier 2008	1 zone (avec 7 modalités avec des surfaces entre 500 et 1500 m2)	Semis Hydraulique mélange espèces maquis et espèces du commerce
21	Goro – Port de Prony – Convoyeur hydraulique 2008	1 zone (avec 4 modalités avec des surfaces entre 350 et 1450 m2)	Semis Hydraulique mélange espèces maquis et espèces du commerce
22	Goro – Port de Prony – Route du port 2008	1 zone (avec 8 modalités avec des surfaces entre 500 et 2500 m2)	Semis Hydraulique mélange espèces maquis et espèces du commerce
23	Goro – Verse ferry 2008	1 zone (avec 18 modalités avec des surfaces entre 500 et 3500 m2)	Semis Hydraulique mélange espèces maquis et espèces du commerce
24	Goro – Digue verse minière 2008	1 zone (avec 6 modalités avec des surfaces entre 500 et 1500 m2)	Semis Hydraulique mélange espèces maquis et espèces du commerce

Sites IAC / CTFT / CIRAD/ ORSTOM

	Sites	Informations zones et modalités	Informations générales
25	Mine Amax – Campement INCO 1971	1 zone (2 modalités de 800 m2)	Plantation espèces du maquis, Pinus
26	Mine Amax – Prony capture (Essai 85) 1973	1 zone (5 modalités de 100 m2)	Plantation d'espèces du maquis et Pinus
27	Poros – Décharge de Néaki 1973	1 zone (4 modalités)	Plantation et ensemencement
28	Mine Amax – Prony Essai 127-1 1975	1 zone (16 modalités de 100 m2 chacune)	Semis manuel d'engazonnement
29	Mine Amax – Prony Essai 127-2 1977	1 zone (3 modalités entre 1 600 et 3 600 m2)	Plantation espèces du maquis et espèces du commerce
30	Camps des Sapins – Ouenghi Essai 228 1978	1 zone (4 modalités entre 500 et 3 300m2)	Plantation d'espèces de maquis et d'espèces du commerce
31	Mine Amax – Prony Essai 235 1978	1 zone (2 modalités de 2 850 et 1 680 m2)	Plantation d'espèces de maquis et d'espèces du commerce
32	Kongouhaou – Essai 277 1979	1 zone (4 modalités environ 7 000 m2 au total)	Plantation sur 3 modalités d'espèces du maquis et du commerce et semis manuel d'une espèce du commerce
33	Poros – Décharge Borangui et Mecorouma Essai 291 1981	1 zone (8 modalités entre 4 m2 et 8 m2)	Plantation à priori principalement d'espèces du commerce
34	Thio – Ningua Crépuscule Essai 508 1992	2 zones (avec 7 modalités entre 100 et 250 m2)	Plantation ou semis hydraulique avec de nombreuses espèces de maquis
35	Mont Dore – De Rouvray Essai Serianthes 1993	1 zone	Plantation espèces du maquis

36	Kouaoua – Méa 1993	2 zones avec 2 modalités chacune (de 200 m2 chacune)	Semis manuel avec des espèces du maquis
37	Gomen – Décharge Christelle Essai 542 1997	1 zone avec 8 modalités (répétées 3 fois chacune) sur une surface totale de 2700m2	Plantation espèces du maquis et du commerce
38	Mont Dore – De Rouvray Essai 567 1999	1 zone avec 7 modalités (répétées 3 fois ou non)	Plantation espèces du maquis
39	Canala – Monastir Essai 569 1999	1 zone sur 1800 m2	Plantation espèces du maquis
40	Koniambo – Essais 584 2002 - 2003	1 zone avec 13 modalités (répétées 4 ou 6 fois)	Plantation espèces du maquis
41	Tontouta – Vulcain – Galiéni 2006	1 zone avec 9 modalités (répétées 4 fois) sur des parcelles de 30 m2 chacune	Plantation espèces du maquis ou régénération à partir du topsoil
42	Koniambo – Haut de massif 2010	1 zone	Semis hydraulique espèces du maquis sur topsoil

Site VALE

	Sites	Informations zones et modalités	Informations générales
43	Baie de Prony – Route du port 2007	1 zone (de plus de 7 000 m2)	Semis hydraulique plus plantation d'espèces du maquis sur topsoil
44	Carrière CR7 2009	1 zone (de plus de 20 000 m2)	Plantation espèces du maquis sur latérite indurée avec ajout de topsoil
45	FER – VSEM Banquette 2012	1 zone (de 12 000 m2)	Plantation espèces du maquis sur verse à stérile
46	CPKE 2011	1 zone (de 11 000 m2)	Semis Hydraulique plus plantation d'espèces du maquis sur péridotites avec ajout de topsoil
47	Prony St Label – Empreinte du tuyau 2010	1 zone (de 55 000 m2)	Plantation d'espèces du maquis sur latérite indurée avec ajout de topsoil
48	KUE – piste d'exploration 2008	1 zone (de 7 600 m2)	Plantation d'espèces du maquis sur latérite indurée avec ajout de topsoil
49	Usine – Bassin à résidus de l'usine pilote 2008	1 zone sur 700m2 (avec 4 modalités)	Plantation sur résidus amendé en topsoil
50	Usine – Verse SMSP 2009	1 zone (sur plus de 2 700 m2)	Plantation d'espèces de maquis sur verse à stérile
51	Usine – Ancien parking de la gendarmerie 2009	1 zone (sur 10 000 m2)	Semis hydraulique plus plantation d'espèces du maquis sur topsoil dans un but de sylviculture
52	Usine – Verse de l'usine 2010	1 zone (sur 7 900 m2)	Plantation d'espèces du maquis sur verse à stérile avec ajout de topsoil
53	Baie Nord – Route du port 2009	1 zone (sur plus de 11 200 m2)	Plantation d'espèces du maquis sur gabbros avec ajout de topsoil
54	Usine Kwé – Mine A1 2011	1 zone (sur 6 hectares)	Plantation d'espèces de maquis sur latérite indurée avec ajout de topsoil

Site SMT

	Sites	Informations zones et modalités	Informations générales
55	Cap bocage – Balise 13 2009, 2010, 2011	3 zones (les deux premières de plus de 9 000 m ² au total et la dernière de presque 3 000 m ²)	Plantation d'espèces du maquis avec ou sans topsoil
56	Cap Bocage – Verse Comoro 2010	1 zone	Plantation d'espèces du maquis
57	Cap Bocage – Verse principale 2009	1 zone	Plantation d'espèces du maquis
58	Cap Bocage – Kinou 2001	1 zone	Plantation d'espèces du maquis
59	Cap Bocage – Mona centre 2003	1 zone	Plantation d'espèces du maquis
60	Cap Bocage – Mona Sud 2000	2 zones	Plantation d'espèces du maquis (avec ou sans ripage du sol)
61	Cap Bocage – Verse C4 2007	1 zone	Plantation d'espèces du maquis
62	Cap Bocage – Toronto 2001	1 zone	Plantation d'espèces du maquis
63	Karembé – Michel 37 2002 et 2003	2 zones	Plantation d'espèces du maquis (avec ou sans ripage)
64	Nakéty – Lucienne 1995, 2007, 2012	3 zones	Plantation d'espèces du maquis

Site SMGM

	Sites	Informations zones et modalités	Informations générales
65	Tomo – Tomo réduite 2010	2 zones (de 600 et 800 m ²)	Plantation d'espèces du maquis
66	Vulcain – Jean réduite 2011	1 zone	Plantation d'espèces du maquis
67	Vulcain – Suzanne réduite 2013	3 zones	2 plantations d'espèces du maquis et 1 semis manuel d'espèces du maquis sur topsoil

Site NMC

	Sites	Informations zones et modalités	Informations générales
68	Kouaoua – Philippe 2014	1 zone	Plantation espèces du maquis
69	Kouaoua – Alice 18 2015	1 zone (surface de plus de 3 000m ²)	Plantation espèces du maquis
70	Nakéty – Edouard	2 zones (surface de 1 400 et 1 900m ²)	Plantation espèces du maquis
71	Ouaco – Ouazangou 1 & 2	4 zones (surface entre 1 600 et 3 400m ²)	Plantation espèces du maquis
72	Ouaco - Gomen	1 zone (surface de 3 700m ²)	Plantation espèces du maquis
73	Pinpin – Verse AC2	4 zones (entre 200 et plus de 4 000m ²)	Plantation espèces du maquis

Site KNS

	Sites	Informations	Informations générales
--	-------	--------------	------------------------

		zones et modalités	
74	Koniambo – MAR 2012	38 zones (entre 400 et plus de 7 000m ²)	Semis Hydraulique
75	Koniambo – MIA 2012	8 zones (entre 400 et 1 900m ²)	Semis Hydraulique
76	Koniambo – MASSIF 2012	8 zones (entre 200 et 7 000m ²)	Semis Hydraulique
77	Koniambo - EX-MAR 2012	3 zones (entre 1 000 et 2 300m ²)	Semis Hydraulique
78	Koniambo – MHR 2012	2 zones (environ 1 000m ²)	Semis Hydraulique
79	Koniambo – OLC 2012	6 zones (entre 1 200 et 6 000m ²)	Semis Hydraulique
80	Koniambo – Chantier 98, 177, 10012, 10021, 10033, 10145 2012	8 zones	Plantation
81	Koniambo – Chantier 2013	58 zones (entre 100 et 10 000m ²)	Plantation ou Semis Hydraulique avec espèces de maquis
82	Koniambo – Chantier 2014	35 zones (entre 200 et 12 000m ²)	Plantation ou Semis Hydraulique avec espèces du maquis sur topsoil

6.3. EXPOSÉ AU COMITÉ DE PILOTAGE DU 18 DÉCEMBRE 2015



Réunion comité de pilotage du projet RECOSYNTH

Analyse et synthèse des expérimentations et actions de
restauration écologique réalisées sur sites miniers en
Nouvelle-Calédonie depuis 20 ans

Hamid AWIR, Simon GENSOUS (UNC)
Bruno FOGLIANI, Laurent L'HUILLIER (IAC)
Danielle SAINTPIERRE, Bertrand BLANCHARD, Adeline RECK (SIRAS Pacifique)
Alexandre LAGRANGE, Auriane GUILLAMAUD, Thomas GAILLARD (Bota Environnement)

Date de démarrage du projet : 23 avril 2015 Présentation du 18/12/2015

Plan de présentation

- * Présentation du projet
- * Travail bibliographique ébauché
- * Travaux des premières réunions
- * Sélection des sites
- * Répartition des zones choisies selon différents paramètres
- * Présentation de la fiche terrain et de la fiche mémo
- * Travaux préliminaires pour la base de donnée
- * Première sortie terrain
- * Travail réalisé et suite des actions à mener

Présentation du projet

Objectif

Faire le bilan synthétique sur 34 opérations de revégétalisation à but de restauration écologique par l'analyse des paramètres obtenus et des relevés sur terrain

Emettre des recommandations sur les pratiques de la restauration
Mise en place d'indicateurs synthétiques de réussite de la restauration

Tâche 1:

Bibliographie & Collecte d'informations

Tâche 2:

Construction d'une grille d'analyse interdisciplinaire

Tâche 3

Acquisition de données sur le terrain (34 sites)

Tâche 4

Analyse, Interprétation et Synthèse des résultats.

Tâche 5

Coordination et valorisation du rendu final

Travail bibliographique ébauché

78 rapports IAC, CTFT

93 articles scientifiques sur la restauration écologique et les méthodologies de relevés et de suivis sur terrain

Textes récupérés et archivés, à partir des archives de l'IAC et des revues scientifiques

Encore à étudier dans le détail

Rapport bibliographique à rendre en avril 2016 (fin de la première année)

Travaux des premières réunions

7 réunions

lister les données de mise en place des chantiers et à acquérir par des relevés

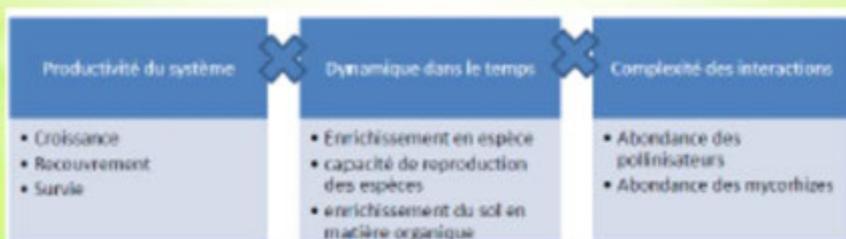
schéma relationnel pour la base de données

définition des termes utilisés (site, zone, modalité/ parcelle)

choix des paramètres de sélection des sites

mise en place fiche terrain et mémo technique

discussion des différents indicateurs de réussite de la restauration



Sélection des sites

Paramètres à prendre en compte dans le choix des sites pour en tirer le maximum :

- Chantier avec ou sans top soil
- L'effet de l'utilisation de différents fertilisants
- L'effet des amendements organiques
- L'influence des différentes altitudes
- L'utilisation de peu ou d'un grand nombre d'espèces végétales différentes
- L'effet des différentes techniques : ensemencement / plantation / combinaison
- L'effet du travail du sol
- Différence entre ajout ou non de mycorhizes
- L'effet de la présence du Galac (effet bloquant ou pas)
- L'effet des espèces fixatrices d'azote (genres *Gymnostoma*, *Casuarina*, *Serianthes*, *Storckiaella*, *Acacia*,...)
- L'effet de la présence de graminées en mélange avec des espèces natives
- Revégétalisation ancienne ou récente
- Pente forte ou faible

Sélection des sites : Bilan

6 réunions

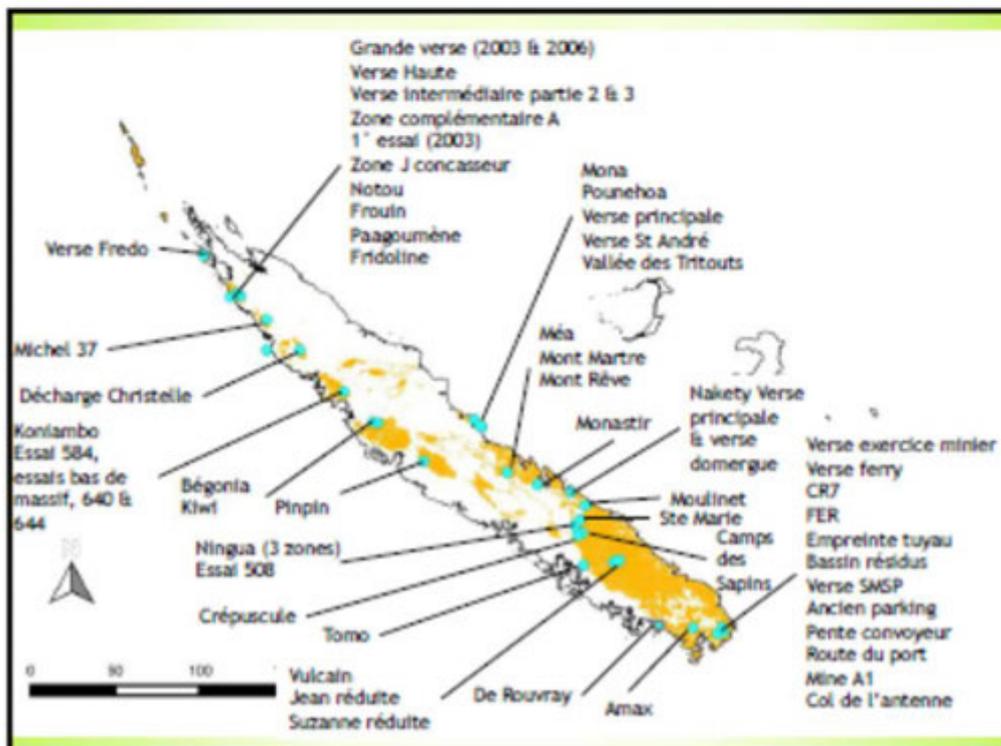
• Sélection des sites

150 zones réalisées par la SIRAS (SLN, NMC, SMCB)	28 conservées
18 zones essais (IAC, ORSTOM, CTFT)	8 conservées
13 zones sur Vale	10 conservées
12 zones SMT	8 conservées
5 zones SMGM	2 conservées
160 zones KNS	2 conservées
13 zones NMC	0 conservées

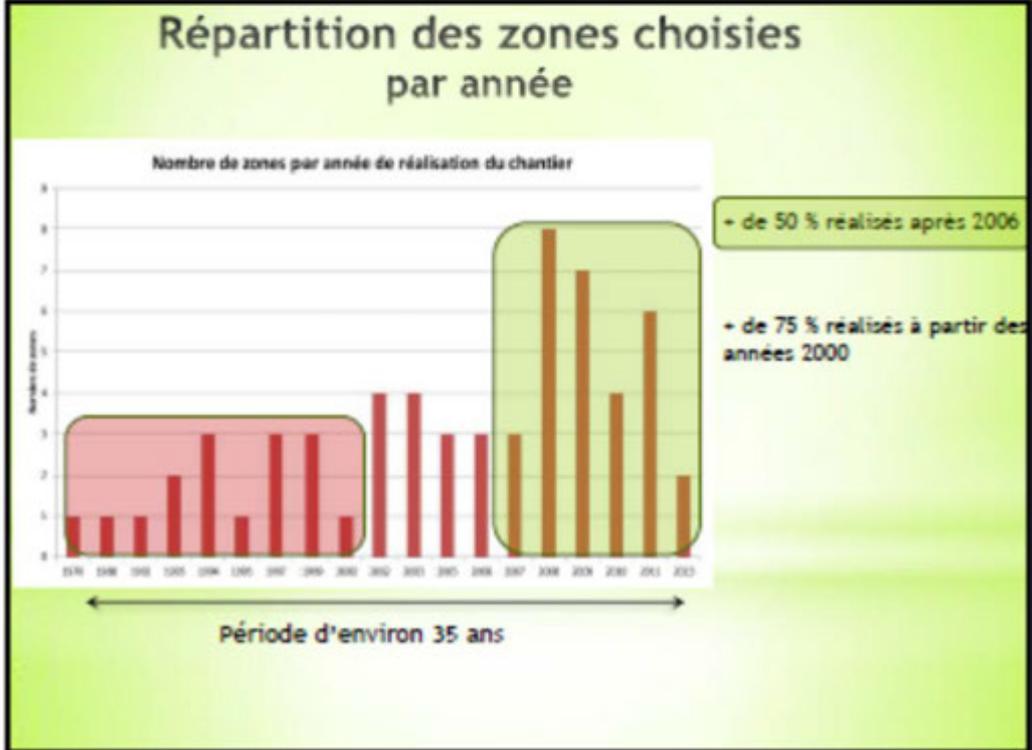
381 zones → 58 zones

+ 3 zones de BIOINDIC (kuebini, cofremi et ancienne pépinière)

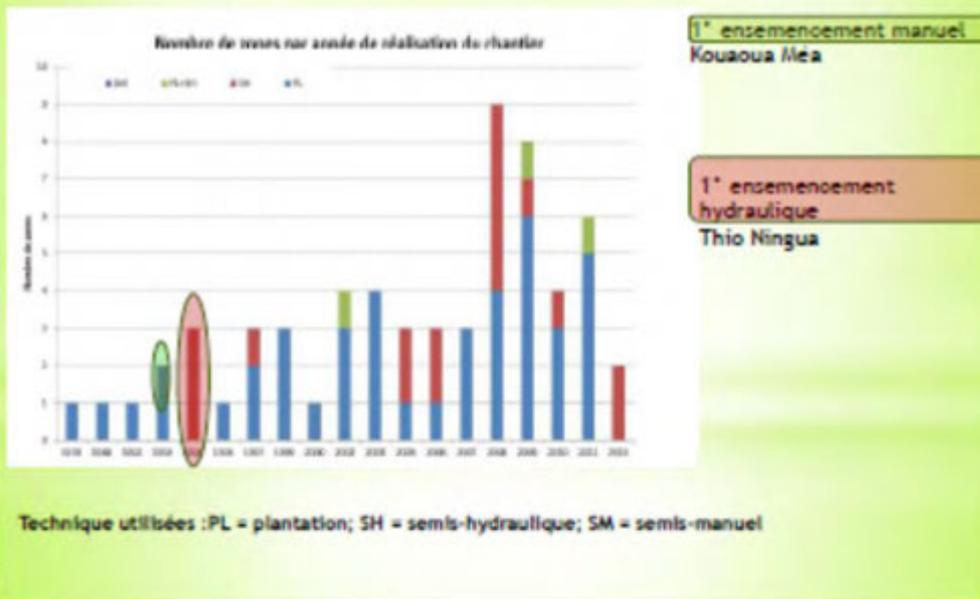
Présélection de 61 zones



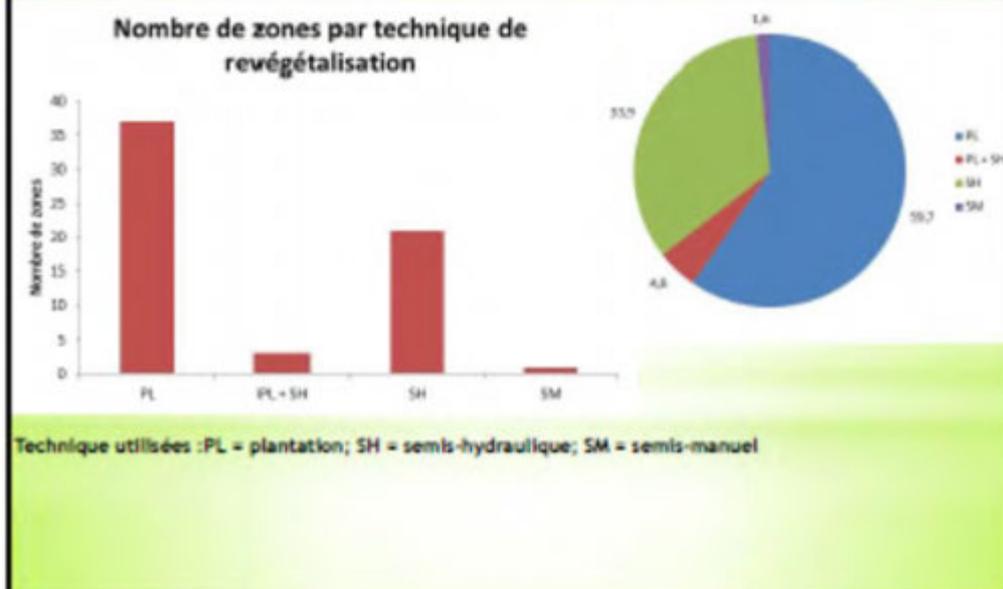
PROVINCE	site	zone	date	PROVINCE	site	zone	date
Sud	Ningua	zone A	1994	Nord	Thiébaghi	Grande vers	2003
Sud	Ningua	zone B	1994	Nord	Thiébaghi	Versé haute	2003
Sud	Ningua	zone C	1994	Nord	Thiébaghi	Versé intern	2003
Sud		Route du Cxi	1997	Nord	Thiébaghi	Versé intern	2003
Sud	Sainte Marie	Secteur rA N	2007	Nord	Thiébaghi	Zone compli	2005
Sud	Les Moulins	Les Moulins	2008	Nord	Thiébaghi	3er essai sur	2005
Sud	verse AC2	talus 1	2013	Nord	Thiébaghi	Grande vers	2006
Sud	verse AC2	talus 2	2013	Nord	Thiébaghi	Zone J du co	2006
Sud	Versé de l'e	Versé de l'e	2008	Nord	Thiébaghi	Notou	2008
Sud	verse ferry	verse ferry	2008	Nord	Thiébaghi	Carrière Fro	2008
Sud	Ningua	Essai 508	1992	Nord	Crête 2	Paagouméu	2009
Sud	De Rouvray	De Rouvray	1993	Nord	Crête 2	Fridoline	2009
Sud	De Rouvray	Essai 567	1999	Nord	Bégonia	BN3	2005
Sud	Vulcain	Vulcain	2006	Nord	Versé Fredo	Versé Fredo	2008
Sud	Carrière de r	Carrière de r	2009	Nord	kiwé	kiwé	2008
Sud	FER	CPKE	2011	Nord	Mont Martre	Mont Martre	2008
Sud	Investon 5	Empreinte t	2010	Nord	Versé St Anc	Décharge	2009
Sud	Goro	besoin à rési	2008	Nord	Méa	Kou1 et Kou	1993 - 1994
Sud	Goro	Versé SAMP	2009	Nord	Ouaco	Décharge Ch	1997
Sud	Goro	Anden pard	2009	Nord	Monastir	Essai 569	1999 - 2000
Sud	Pente du co	Pente du co	2010	Nord	Koniambo	Essai 584	1999 - 2000
Sud	Usine , Bale	Route du Po	2009	Nord	Koniambo	basse massif	2010
Sud	Usine , Kawé	Mine A1	2011	Nord	Cap-Bocage	Versé	2009
Sud	Usine	Col de l'ante	2011	Nord	Mona Sud	Mona sud	2000
Sud	Tomo	Versé face n	mai-10	Nord	Pounehous	Versé CA	2007
Sud	Jean rédalte	Versé modé	juil-11	Nord	Michel 37	Versé	av-02
Sud	Goro	Andenne pé	1997	Nord	Nakarty	Versé princj	nov-96
Sud	Goro	Kuabini	2002	Nord	Vallée des T	Décharge 1	2007
Sud	Goro	Kuabini	2002		Versé	Versé	
Sud	Goro	cofremi	1988	Nord	domergue	domergue	2001 - 2002 -
Sud	Plaine des l	Mine Amas	1978	Nord	Koniambo	Koniambo	2011
Sud				Nord	Koniambo	Koniambo	2011



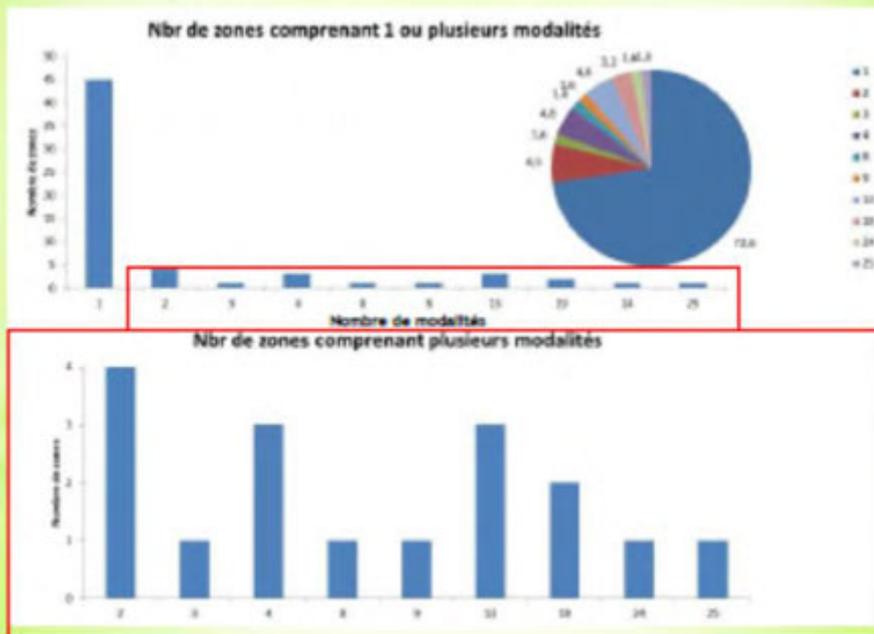
Répartition des zones choisies par année et par technique de revégétalisation



Répartition des zones choisies par technique de revégétalisation



Répartition des zones choisies par nombre de modalités

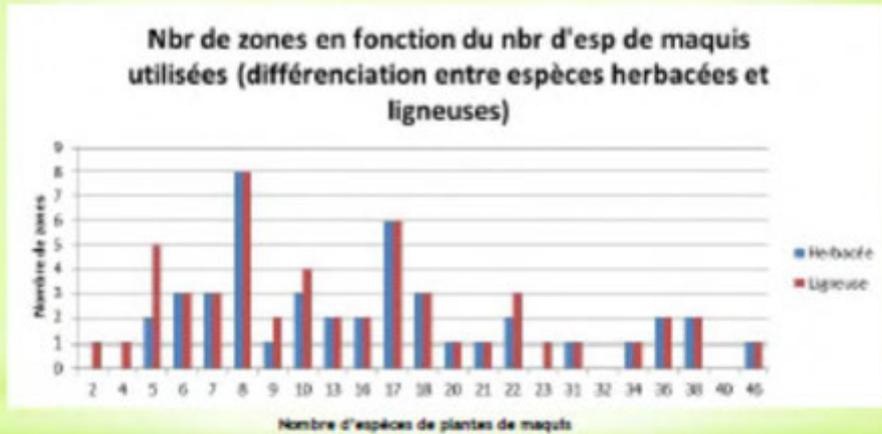


Répartition des zones choisies par nombre d'espèces de maquis utilisées



- de 50% des zones utilisent plus de 10 espèces
- de 30% des zones utilisent plus de 20 espèces

Répartition des zones choisies par nombre d'herbacées ou de ligneux de maquis

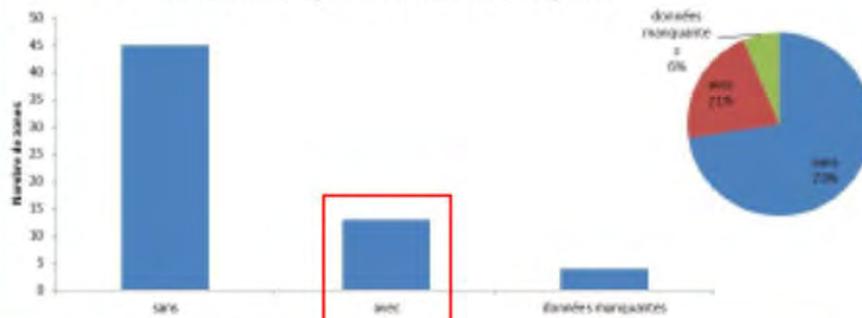


Répartition des zones choisies par nombre d'espèces non natives



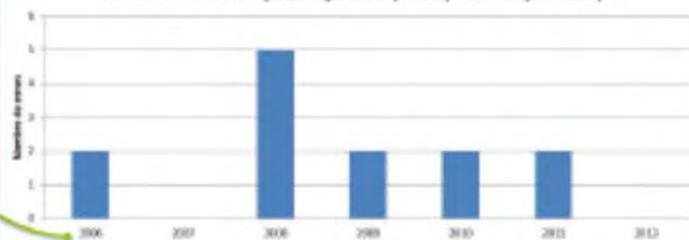
Répartition des zones choisies selon l'utilisation ou non du top soil

Nombre de zones ayant reçu ou non du top soil



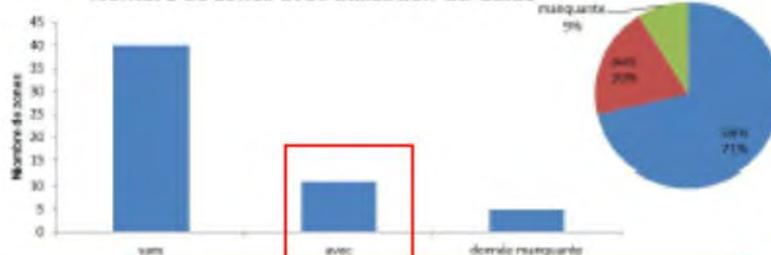
1^{er} utilisation du top soil - parmi les zones sélectionnées

Nombre de zones ayant reçu du top soil (classées par date)

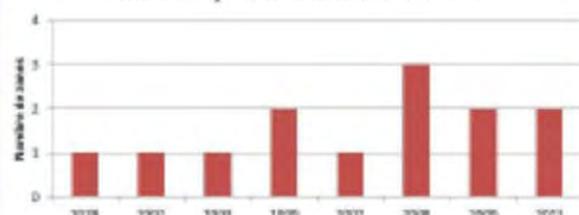


Répartition des zones choisies selon l'utilisation ou non du Gaïac

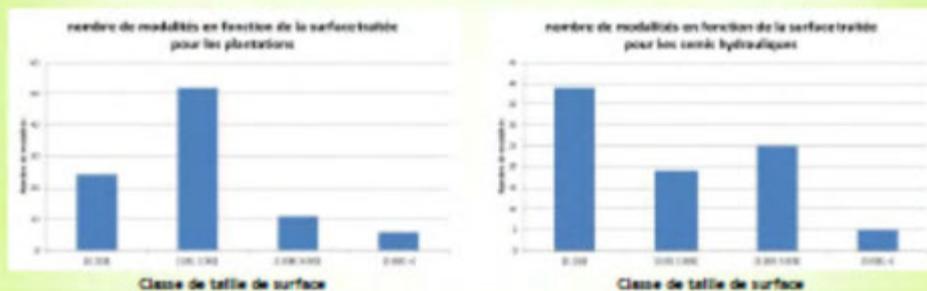
Nombre de zones avec utilisation du Gaïac



Nombre de zones avec utilisation du Gaïac classées par année de réalisation



Répartition des zones choisies par technique et selon la taille des surfaces



Travaux préliminaires pour la base de donnée

Organisation des données sous forme de tables

Création de tables pour la définition des champs à remplir (=liste déroulante) / pour un référentiel taxonomique d'espèce végétale / pour les différents imbrications définit /

Elaborer des identifiants pour faire le lien entre les tables

Réflexion sur l'interface graphique, les différentes pages, les requêtes à formuler, l'implémentation des données

Table	Champs	Type	Contraintes
Table 1	Champs 1, 2, 3	Texte, Nombre	Clé primaire
Table 2	Champs 4, 5, 6	Texte, Date	Clé étrangère

Première sortie terrain

En vue de standardiser la démarche

But : Vérifier la faisabilité de l'ensemble de la grille d'évaluation (fiche terrain) et faire des ajustements en conséquence

S'accorder sur la démarche technique des relevés à effectuer

Visite de 6 zones revégétalisées sur Goro (4 plantations et 2 semis hydrauliques)



Travail réalisé et suite des actions à mener

Tâche	Période	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	Trimestre 5	Trimestre 6	Trimestre 7	Trimestre 8
Tâche 1 : Analyse des actions de revégétalisation									
Acquisition et recueil de données									
Pré-sélection et prospection des sites et proposition d'une typologie globale									
Tâche 2 : Construction d'une grille d'analyse interdisciplinaire									
Reunions de travail									
Rédaction de la grille									
Tâche 3 : Acquisition des données de terrain									
Sorties de terrain									
Saisie des données									
Tâche 4 : Analyse et synthèse des résultats									
Mise en forme des données									
Analyses statistiques									
Tâche 5 : Coordination et valorisation du rendu final									
Rédaction d'une synthèse bibliographique									
Rédaction de recommandations									
Rédaction d'un guide méthodologique									

Travail avec l'entreprise MELANOPUS pour la construction de la BDD

Finir la sélection des zones et début des relevés sur le terrain

6.4. FICHE POUR RELEVÉS SUR LE TERRAIN

  Fiche de terrain - RECOSYNTH   	
I. Information générale	
Auteur du relevé :	
Nom du relevé :	
Date du relevé :	| Mine :
Site :	| Zone :
N° des photos de la zone :	
II. Informations modalités	
Nom de la modalité :	
Orientation de la modalité :	
Altitude :	|Pente :
Météo lors du suivi :	<input type="checkbox"/> Ensoleillé <input type="checkbox"/> Nuageux <input type="checkbox"/> Pluvieux
Vent :	<input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Fort
Technique de restauration :	<input type="checkbox"/> Plantation <input type="checkbox"/> Semis hydraulique <input type="checkbox"/> Semis à sec
Désignation de la modalité :	<input type="checkbox"/> Banquette <input type="checkbox"/> Bord de piste <input type="checkbox"/> Décharge
	<input type="checkbox"/> Ravine <input type="checkbox"/> Talus <input type="checkbox"/> Verse
	<input type="checkbox"/> Autre : _____
Génie écologique :	<input type="checkbox"/> Fascine <input type="checkbox"/> Géofilet <input type="checkbox"/> Mur bois
Etat :	<input type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais
III. Caractéristiques modalités	
Type de substrat :	<input type="checkbox"/> Brun hypermagnésien <input type="checkbox"/> Gabbros <input type="checkbox"/> Enrochement avec blocs <input type="checkbox"/> Latérites rouges <input type="checkbox"/> Latérites jaunes
<input type="checkbox"/> Limonite <input type="checkbox"/> Limonite jaune <input type="checkbox"/> Serpentes <input type="checkbox"/> Saproplites <input type="checkbox"/> Tout venant <input type="checkbox"/> Tout venant latérique <input type="checkbox"/> Tout venant saprolitique	
Induration :	<input type="checkbox"/> Meuble <input type="checkbox"/> Induré
Terre fine :	<input type="checkbox"/> < 5% <input type="checkbox"/> de 5% à 15% <input type="checkbox"/> de 15% à 30% <input type="checkbox"/> de 30% à 50% <input type="checkbox"/> > 50%
Type de pierrosité majeure :	<input type="checkbox"/> Gravieres <input type="checkbox"/> Cailloux <input type="checkbox"/> Pierres <input type="checkbox"/> Grosses pierres <input type="checkbox"/> Blocs
Indice :	<input type="checkbox"/> < 5% <input type="checkbox"/> de 5% à 15% <input type="checkbox"/> de 15% à 30% <input type="checkbox"/> de 30% à 50% <input type="checkbox"/> > 50%
Type de pierrosité secondaire :	<input type="checkbox"/> Gravieres <input type="checkbox"/> Cailloux <input type="checkbox"/> Pierres <input type="checkbox"/> Grosses pierres <input type="checkbox"/> Blocs
Indice :	<input type="checkbox"/> < 5% <input type="checkbox"/> de 5% à 15% <input type="checkbox"/> de 15% à 30% <input type="checkbox"/> de 30% à 50% <input type="checkbox"/> > 50%
Erosion dominante :	<input type="checkbox"/> en nappe <input type="checkbox"/> griffes <input type="checkbox"/> rigoles = rill <input type="checkbox"/> ravines
Tracé :	<input type="checkbox"/> linéaire <input type="checkbox"/> sinueux
Erosion secondaire :	<input type="checkbox"/> en nappe <input type="checkbox"/> griffes <input type="checkbox"/> rigoles = rill <input type="checkbox"/> ravines
Tracé :	<input type="checkbox"/> linéaire <input type="checkbox"/> sinueux
Erosion tertiaire :	<input type="checkbox"/> en nappe <input type="checkbox"/> griffes <input type="checkbox"/> rigoles = rill <input type="checkbox"/> ravines
Tracé :	<input type="checkbox"/> linéaire <input type="checkbox"/> sinueux
Nature de l'écosystème dominant environnant :	<input type="checkbox"/> forêt dense humide <input type="checkbox"/> maquis arbustifs <input type="checkbox"/> maquis ligno-herbacés <input type="checkbox"/> maquis paraforestiers
	<input type="checkbox"/> Sol nu <input type="checkbox"/> Système anthropisé <input type="checkbox"/> Autre : _____
Hauteur de la canopée : _____	Distance à la parcelle : _____
	Position : <input type="checkbox"/> sous le vent <input type="checkbox"/> ou non
Similarité avec l'écosystème :	Couleur : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
	Texture : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Nature de l'écosystème dominant environnant :	<input type="checkbox"/> Sol nu <input type="checkbox"/> forêt dense humide <input type="checkbox"/> maquis arbustifs <input type="checkbox"/> maquis ligno-herbacés
	<input type="checkbox"/> maquis paraforestiers <input type="checkbox"/> Système anthropisé <input type="checkbox"/> Autre : _____
Hauteur de la canopée : _____	Distance à la parcelle : _____
	Position : <input type="checkbox"/> sous le vent <input type="checkbox"/> ou non
Similarité avec l'écosystème :	Couleur : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
	Texture : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non

1. Recouvrement dans le quadrat						
Recouvrement total au sol :	<input type="checkbox"/> + : <1%	<input type="checkbox"/> 1 : 1 à 5%	<input type="checkbox"/> 2 : 5 à 25%	<input type="checkbox"/> 3 : 25 à 50%	<input type="checkbox"/> 4 : 50 à 75%	<input type="checkbox"/> 5 : 75 à 100%
Recouvrement au sol des herbacées autochtones :	<input type="checkbox"/> + : <1%	<input type="checkbox"/> 1 : 1 à 5%	<input type="checkbox"/> 2 : 5 à 25%	<input type="checkbox"/> 3 : 25 à 50%	<input type="checkbox"/> 4 : 50 à 75%	<input type="checkbox"/> 5 : 75 à 100%
Recouvrement au sol des ligneux :	<input type="checkbox"/> + : <1%	<input type="checkbox"/> 1 : 1 à 5%	<input type="checkbox"/> 2 : 5 à 25%	<input type="checkbox"/> 3 : 25 à 50%	<input type="checkbox"/> 4 : 50 à 75%	<input type="checkbox"/> 5 : 75 à 100%
Homogénéité du recouvrement :	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non				
2. Santé du peuplement						
Etat général de l'écosystème :	<input type="checkbox"/> Bon	<input type="checkbox"/> Moyen	<input type="checkbox"/> Mauvais	<input type="checkbox"/> Très mauvais		
Remarques :	_____					
Type d'animaux non-nuisibles :	<input type="checkbox"/> Oiseaux	<input type="checkbox"/> Insectes	<input type="checkbox"/> Lézards	<input type="checkbox"/> Autres :	_____	
Remarques :	_____					
Présence de champignons au sol :	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non	N° photos : _____			
Type de nuisibles :	<input type="checkbox"/> Fourmis	<input type="checkbox"/> Cicadelles	<input type="checkbox"/> Cochenilles	<input type="checkbox"/> Autre : _____		
Dégradation générale :	<input type="checkbox"/> Feu	<input type="checkbox"/> Evénement climatique	<input type="checkbox"/> Intervention humaine	<input type="checkbox"/> Autre : _____		
Degré de dégradation :	<input type="checkbox"/> + : <1%	<input type="checkbox"/> 1 : 1 à 5%	<input type="checkbox"/> 2 : 5 à 25%	<input type="checkbox"/> 3 : 25 à 50%	<input type="checkbox"/> 4 : 50 à 75%	<input type="checkbox"/> 5 : 75 à 100%
Type de dégradation foliaire et liste des espèces impactées (et nombre d'individus) :						
Chlorose : _____						
Nécrose : _____						
Déformation : _____						
Piqûre : _____						
Morsure : _____						
Autre : _____						
Type de dégâts et espèces impactées (et nombre d'individus) :						
Abrouissement : _____						
Piétinement : _____						
Fouille : _____						
Frottement : _____						
Défoliation : _____						
Autre : _____						
3. Espèces envahissantes						
1. Noms des espèces envahissantes observées						

2. Pourcentage de recouvrement des espèces exotiques envahissantes sur le quadrat :						
<input type="checkbox"/> + : <1%	<input type="checkbox"/> 1 : 1 à 5%	<input type="checkbox"/> 2 : 5 à 25%	<input type="checkbox"/> 3 : 25 à 50%	<input type="checkbox"/> 4 : 50 à 75%	<input type="checkbox"/> 5 : 75 à 100%	
V. Remarques						
Difficultés rencontrées : _____						

Remarques : _____						

6.5. FICHE MÉMO ASSOCIÉE À LA FICHE TERRAIN

(Informations nécessaires pour utiliser correctement la fiche terrain)

Fiche mémo associée à la fiche terrain

Projet RECOSYNTH

I Information générale

Auteur(s) du relevé : pour désigner les personnes qui ont réalisé les relevés.

Nom du relevé : La désignation des relevés se fait sur la base du nombre de relevés déjà réalisés sur la modalité.
Code de R1 à Rn (avec n désignant le n^{ième} relevé réalisé)

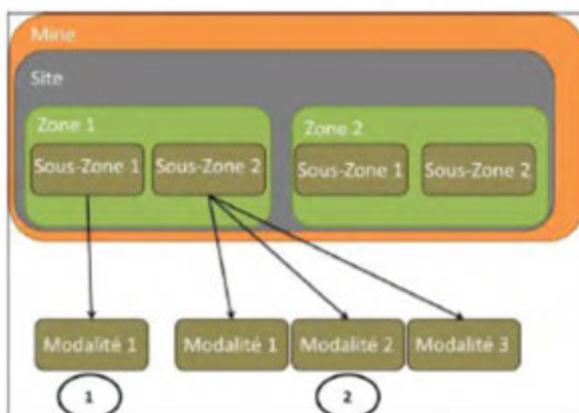
Date du relevé : jours / mois / année

Désignation mine : nom de la mine.

Désignation du site : entité géographique pouvant désigné une partie de mine ou une simplement une verse selon les cas (notamment en fonction des surfaces).

Désignation de la zone : entité géographique plus petite que les deux précédentes

Numéro de photo de la zone : code qui correspond à celui pris pour la zone ou numéro de photo de l'appareil.



Explication des dénominations des différentes entités

Mine, Site, Zone et Sous-Zone sont des entités géographiques imbriquées les unes dans les autres.
Ainsi un site est contenu dans une mine, une zone dans un site et une sous-zone dans une zone.

La **Modalité** est un traitement qui a été réalisée sur une **Sous-Zone** ou une **Zone donnée** (si la zone n'est pas découpée en Sous-Zone) à une **date donnée**.

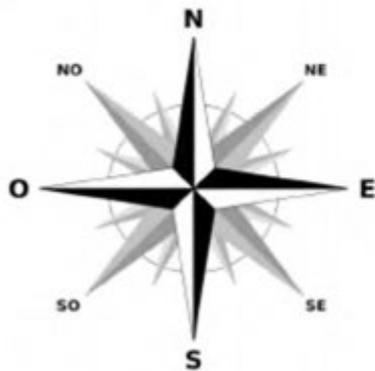
La modalité est ainsi définie par l'emplacement géographique et la date de réalisation du chantier.

Il est possible d'avoir une seule modalité sur une sous-zone donnée, si un seul traitement a été effectué (plantation ou ensemencement - cas ①). Il peut aussi y avoir plusieurs modalités sur une sous-zone donnée, si différents traitements ont été appliqués (cas ②).

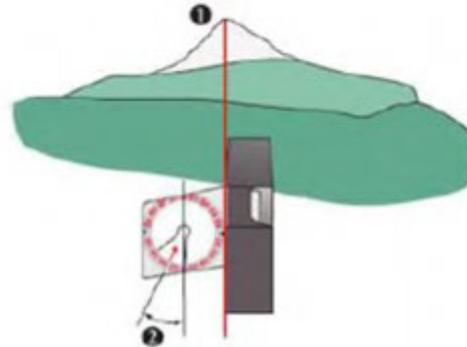
II Informations modalités

Nom de la modalité : désigne la zone géographique, le nom du traitement utilisé ou une désignation arbitraire et la date de réalisation du chantier de revégétalisation

Orientation de la parcelle : Elle est prise dos à la pente. La désignation se limite aux 8 orientations classiques.



Pente : En degré, mesurée à l'aide d'un clinomètre



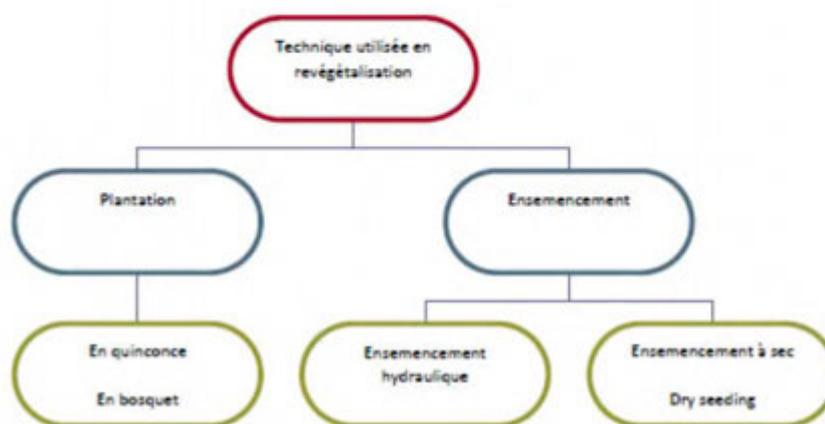
- 1 Orienter la fente longitudinale supérieure de la boussole sur l'objet à viser.
- 2 L'angle d'inclinaison est directement lisible en degré sur l'échelle.

Altitude : exprimée en mètre

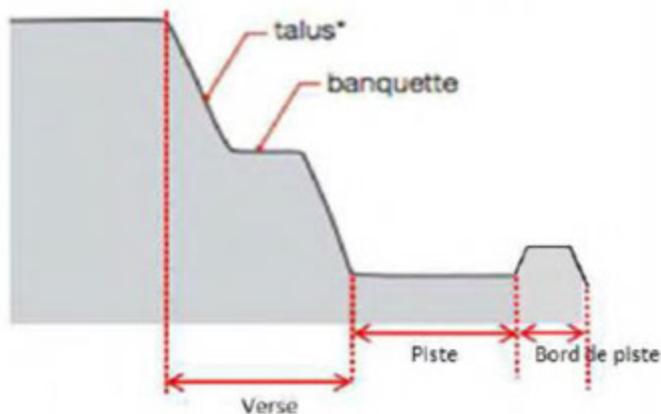
Météo lors du suivi : 3 propositions ici , ensoleillé, nuageux, pluvieux

Vent : relever la force du vent lors de la sortie. 3 propositions : Faible (entre 0 et 10 nœud), Moyenne (entre 11 et 20) et Forte (supérieure à 20 nœuds).

Technique de restauration : 2 grandes techniques sont habituellement utilisées (plantation et ensemencement). Certains chantiers de revégétalisation peuvent utiliser plusieurs techniques sur une même modalité.



Désignation de la modalité : Les principales désignations sont présentées sur le schéma ci-dessous. A cela s'ajoute les décharges de stérile minier et des faciès d'érosion qui sont parfois revégétalisés (comme par exemple les ravines).



Génie biologique : Différentes techniques peuvent être utilisées présentées succinctement par les photos ci-dessous



Fascines



Géofilet



Mur Bois

Etat : 3 propositions

Bon -> l'ouvrage est intact et fonctionnel

Fascine : les pieux et les rameaux sont intacts

Géofilet : le géofilet n'a pas encore subi de dégradation

Mur bois : les pieux et bois utilisés sont intacts

Moyen -> l'ouvrage a été endommagé par le temps et/ou l'ouvrage est partiellement fonctionnel

Fascine : les pieux et les rameaux commencent à pourrir par endroit

Géofilet : sur certaines zones le géofilet est dégradé et absent

Mur bois : les pieux et bois utilisés commencent à pourrir par endroit

Mauvais -> ouvrage très dégradé et/ou non fonctionnel

Fascine : les pieux et les rameaux sont arrachés, détruits, absents...

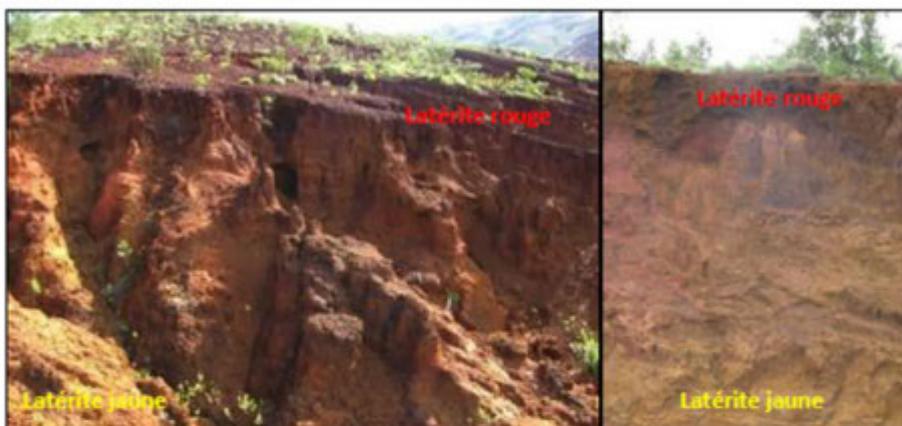
Géofilet : le géofilet est presque complètement ou complètement dégradé et absent

Mur bois : les pieux et bois utilisés sont pourris, dégradés, absents ...

III. Caractéristiques de la modalité

Le type de substrat : latérite rouge, latérite jaune, serpentinite, saprolite, péridotite, enrochement avec blocs, tout venant, tout venant latéritique, tout venant saprolitique, limonite, limonite jaune, cuirasse, gabbros, brun hypermagnésien, autre. Il est aussi possible d'apporter des précisions sur le type de substrat (par exemple si le tout-venant est plutôt à tendance latéritique ou saprolitique, si les latérites sont colluvionnées...)

→ Latérites en place (latérite rouge en surface, latérite jaune dessous)



Latérite ou topsoil sur banquette (avec talus rocheux)



□ Sols bruns sur serpentinites (sol en place)



□ Saproлите (et topsoil à côté)



□ Enrochement



□ Topsoil



Induration

Les classes du critère « induration du sol » :

- ✓ Majoritairement indurée, la tarière n'atteint pas 20 cm de profondeur ;
- ✓ Majoritairement meuble, la tarière va au-delà de 20 cm de profondeur.

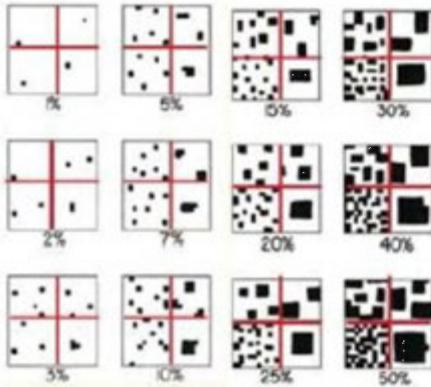


Meuble



Indurée

Type de pierosité majeur

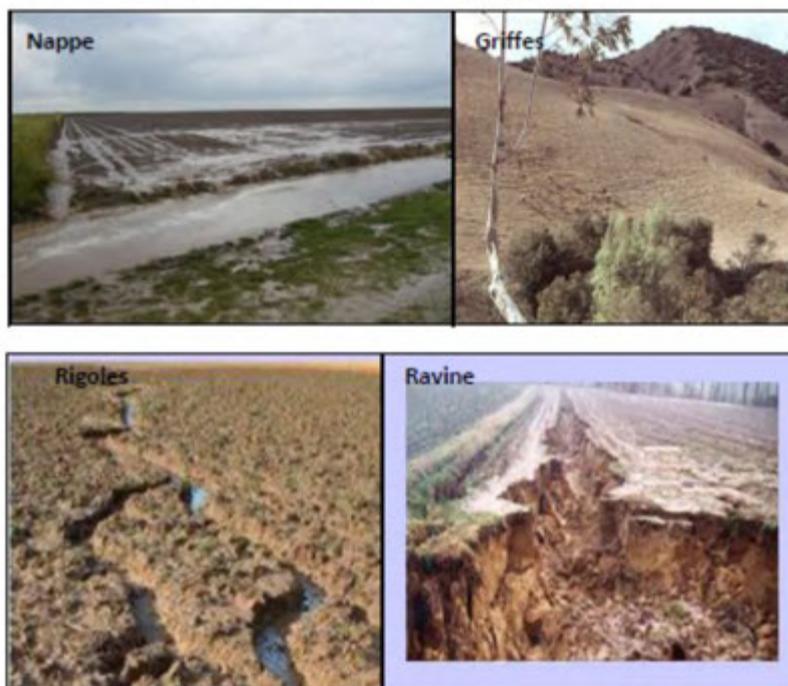


Diamètre des particules	Dénomination
< à 2mm	Terre fine
de 2 mm à 2 cm	Graviers
de 2 cm à 7,5 cm	Cailloux
de 7,5 cm à 12 cm	Pierres
de 12 cm à 25 cm	Grosses pierres
> à 25 cm	Blocs

% de cailloux	Description
< à 5%	Peu d'éléments grossiers
de 5 à 15 %	Faible charge caillouteuse
de 15 à 30 %	Charge caillouteuse moyenne
de 30 à 40 %	Charge caillouteuse élevée
> à 40%	Charge caillouteuse très élevée

Erosion

NB : érosion en nappe -> érosion diffuse, décollement des particules par effet splash



Formes	Tracé	Longueur	Largeur	Profondeur
Griffe	Sinueux	< 1 m	< 10 cm	5-6 cm
Rill	Rectiligne	Centaine de m	10-20 cm	5-10 cm
Rigole	Sinueux	Dizaine de m	5-70 cm	10- 30 cm
Ravine	Peu sinueux	Centaine de m	50cm à 1 m	30-50 cm
Petit ravin	Peu sinueux	Centaine de m	50 cm à 1m	50-200 cm

Nature de l'écosystème environnant : définit le type d'écosystème le plus fréquent à proximité de la zone ou de la parcelle. Les différents écosystèmes sont présentés ci-dessous. En plus de ceux-ci, on peut ajouter des sols nus et les systèmes anthropisés, qui peuvent être fréquent à proximité de zones restaurées.

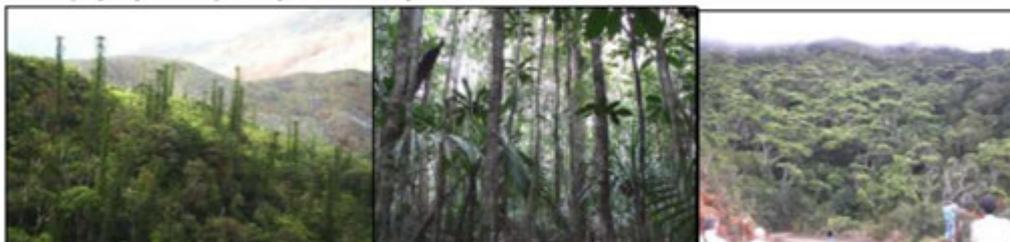
- **Forêts denses humides**

Se développent dans des zones recevant en moyenne entre 1 500 et 5 000 mm de pluie/an et sont classées en fonction de l'altitude en deux grandes catégories :

- (i) les forêts denses humides de basse et de moyenne altitude (<800-1000m ; hauteur d'arbres généralement entre 15 et 25 m)
- (ii) les forêts denses humides d'altitude (>900-1000m ; hauteur d'arbres généralement entre 8 et 15 m).

Formations végétales les plus complexes et les plus diversifiées.

Familles les plus riches des forêts sur terrains miniers : Orchidaceae, Rubiaceae, Euphorbiaceae sensulato, Myrtaceae, Apocynaceae, avec plus de 50 espèces chacune.



- **Les maquis arbustifs**

Situés le plus souvent en dessous de 350 m d'altitude. Possèdent une flore diversifiée et spécialisée, avec une strate herbacée réduite.

Espèces caractéristiques : différent selon les zones (voir ouvrage L'Huillier et al 2010, page 68).

Maquis pas directement touchés par l'extraction minière, mais le sont de manière indirecte (ouverture de routes, implantation d'infrastructures, feux).



- **Les maquis ligno-herbacés**

Sur sols ferrallitiques remaniés par érosion ou colluvionnement, sur pente plus ou moins forte.

Maquis les plus communs et ont, à la même altitude, une composition floristique relativement homogène sur l'ensemble des massifs.

Strate herbacée importante, formée de Cyperaceae des genres *Costularia*, *Schoenus*, et de *Lepidosperma perteres* (abondante après passage du feu). Prolifération de la fougère aigle (*Pteridium esculentum*) quand les feux sont répétés.

Strate arbustive constituée d'espèces héliophiles.



- **Maquis paraforestiers et préforestiers**

Maquis plus hauts et plus denses que ceux des catégories précédentes, dont ils sont souvent des faciès plus évolués, n'ayant pas subi l'action d'incendies récents.

Très diversifiés, souvent dominés par des peuplements de *Gymnostoma*, par des espèces des genres *Alstonia*, *Polyscias*, *Codia*, *Geissois*, *Pancheria*, *Myodocarpus*, *Garcinia*, *Hibbertia*...



Hauteur de la canopée : exprimée en mètre.

Distance à la parcelle : exprimée en mètre

Position : permet de définir si la parcelles est sous l'influence des écosystèmes les plus proches (notamment important pour l'apport de graines).

Similarités : -La couleur est définie par les teintes de la canopée : comparer la parcelle aux écosystèmes environnants.

-La texture est définie par le grain de la canopée (ainsi une texture fine désigne généralement une forte densité de tiges par hectare et une biomasse aérienne attendue des individus peu importante, alors qu'une texture grossière désigne un nombre de tiges moins important à l'hectare mais avec des individus possédant une plus forte biomasse aérienne).

IV. ETATS DES LIEUX

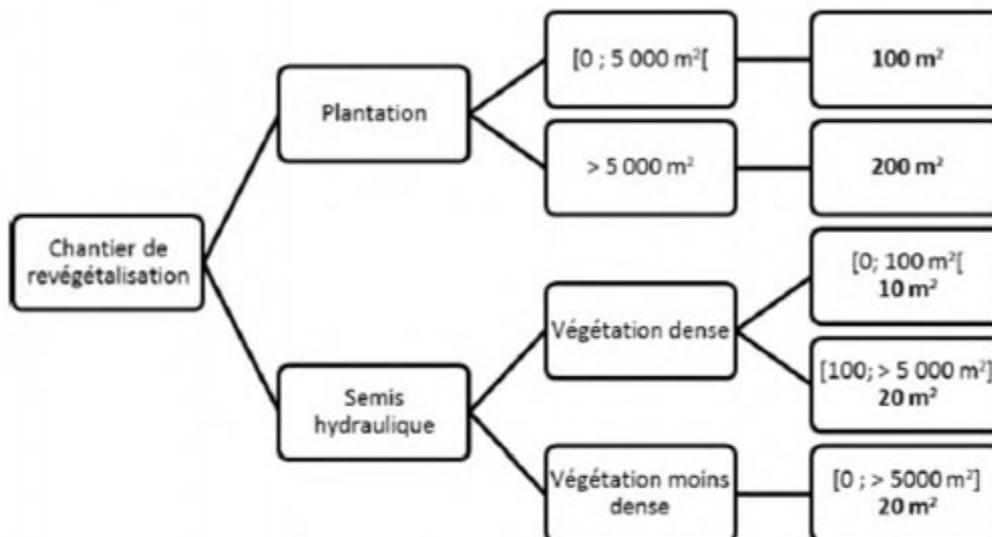
Numéro du quadrat : si plusieurs sont tracés sur la parcelle noter de Q1 à Q5

Les coordonnées GPS : prises au centre du quadrat.

Les numéros de photos des parcelles : photos prises aux 4 coins du quadrat.

Mortalité : noter le nombre d'individus morts sur le quadrat.

Taille du quadrat : Pour les répétitions il faudra au minimum 5 quadrats par parcelles. L'arbre ci-dessous propose un choix quant à la taille du quadrat en fonction de la technique de revégétalisation utilisée et la taille ou la densité de la végétation.



- Les quadrats seront préférentiellement réalisés dans des zones homogènes
- S'il y a une trop forte densité d'espèces exotiques (légumineuses ou fougères par exemple) il est nécessaire de noter le recouvrement du sol, mais pas de compter le nombre d'individus pour ces espèces. La quantification se fait préférentiellement sur les espèces natives.
- Positionnement du quadrat : Sur une zone hétérogène le positionnement peut se faire le long d'un transect.(fig 2)

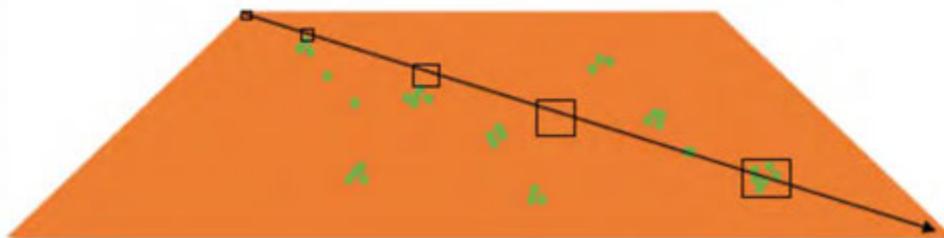


Figure 2 : Zone restaurée présentant une hétérogénéité. La disposition des quadrats se fait alors le long d'un transect permettant l'évaluation de cette hétérogénéité

Différencier espèces utilisées et espèces apparues : Cela est possible sur les zones de plantations (généralement les individus plantés sont alignés). Pour les ensemencements, il faut distinguer les espèces utilisées pour l'ensemencement, et les espèces qui apparaissent après (qui n'étaient pas présentes dans le mélange de graines ensemencées).

Nombre d'individus de chaque espèce dans le quadrat : relever le nombre d'individus présents dans le quadrat pour chaque espèce.

Hauteur : distance collet - bourgeon terminal et, pour les cypéracées : de la base à l'extrémité de la plus grande feuille (on ne tient pas compte des hampes florales).

Diamètre au collet : Au niveau de la base pour les espèces ligneuses, ou le diamètre de la touffe pour les cypéracées (extrémités des feuilles, et l'on ne tient pas compte des hampes florales).

Pour ces deux mesures prendre en compte 5 individus par quadrat. Noter aussi les variabilités observables (min et max) pour l'ensemble des individus du quadrat.

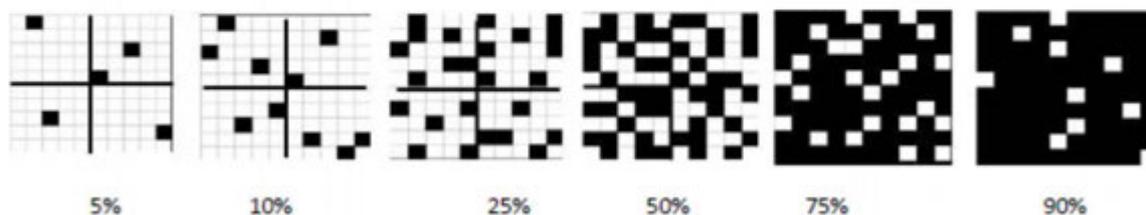
Floraison (FL) et/ ou Fructification (FR) : noter la présence de bourgeons ou de hampes florales, à renseigner par un « FL ». Noter de la même manière la présence de fruits « FR ».

Recrues : noter la présence d'individus de la même espèce au pied de l'individu mesuré (ou dans une zone située sous le vent – noter « id »). Les individus appartenant à une autre espèce sont également dénombrés (nommer « dif »)

Épaisseur : moyenne de la litière : mesurer en cm au pied de chaque individu mesuré.

1. Recouvrement dans le quadrat

Indice de Braun-Blanquet



Le recouvrement total au sol se fait sur l'ensemble du quadrat. Le recouvrement en herbacées, en ligneux et en exotiques est aussi exprimé sur la totalité du quadrat.

Homogénéité du recouvrement : estimer si dans le quadrat le recouvrement observé est uniforme ou non.

2. Santé du peuplement

Etat général de l'écosystème : 3 propositions.

Bon = croissance des plants (des plants bien ramifiés, touffes de cypéracées bien développées et ayant tallé), un feuillage fournit et en bonne condition (vert intense, pas de signe de jaunissement ou de nécrose).

Moyen = croissance plus faible (des plants moins ramifiés)

Mauvais = état stagnant du peuplement végétal. Croissance lente, présence de marque de mauvais état des plants, comme un jaunissement ou des nécroses foliaires).

Très mauvais = le peuplement présente un fort taux de mortalité, et une croissance ralentie.

Types de dégradations foliaires et liste des espèces impactées (et nombre d'individus) : Plusieurs types de dégradations peuvent être observées, des chloroses, des nécroses, des déformations, des piqures, ou des morsures.



Types de dégâts et espèces impactées (et nombre d'individus) : plusieurs dégâts peuvent être observés sur les espèces végétales tel que l'abrutissement (dû aux cerfs principalement), le piétinement, la fouille (dû aux cochons principalement) le frottement et la défoliation.

6.6. RÉSULTATS DES ANALYSES PAR MODALITÉS

6.6.1. EFFET TOPSOIL

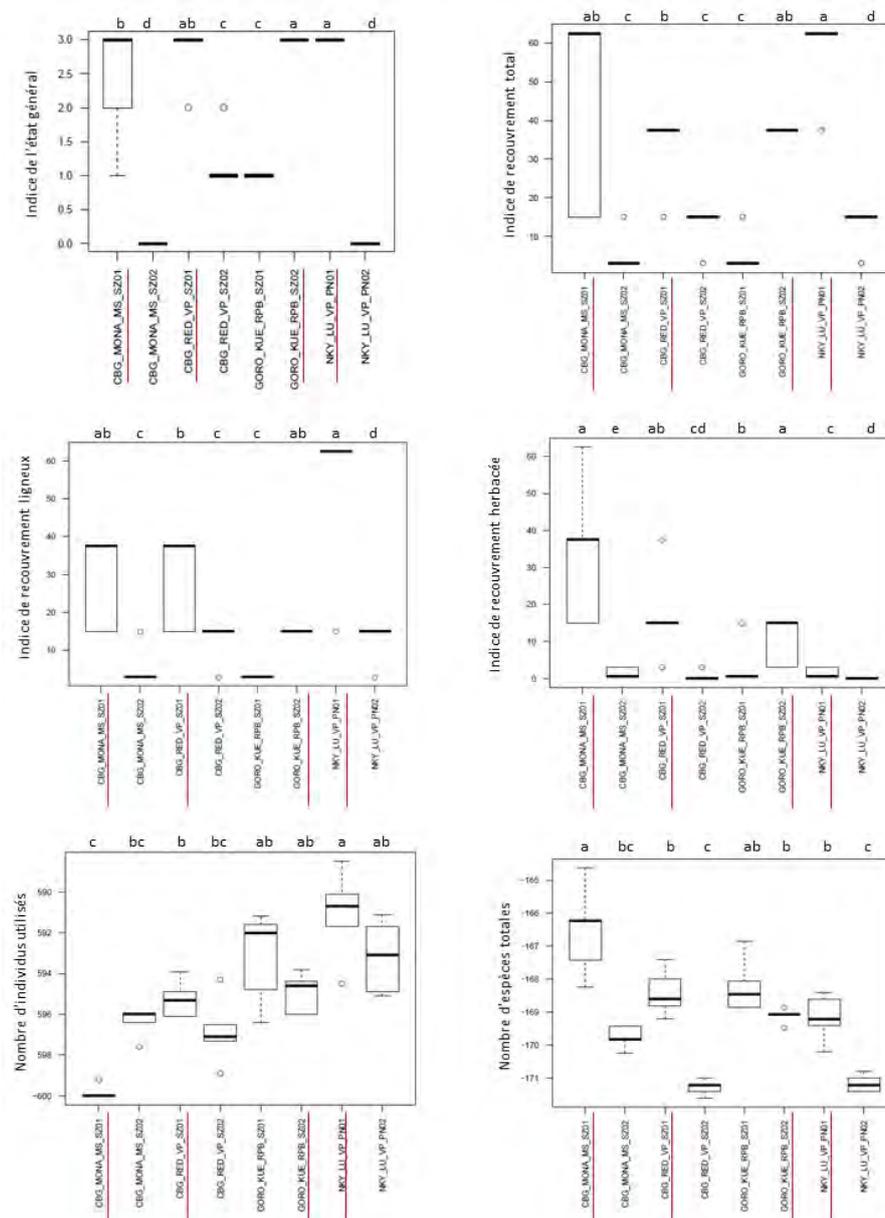


Figure 72 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet topsoil.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les modalités. (Les modalités surlignées en rouge sont celles qui ont reçu du topsoil). NB : les données sont exprimées pour 20 m².

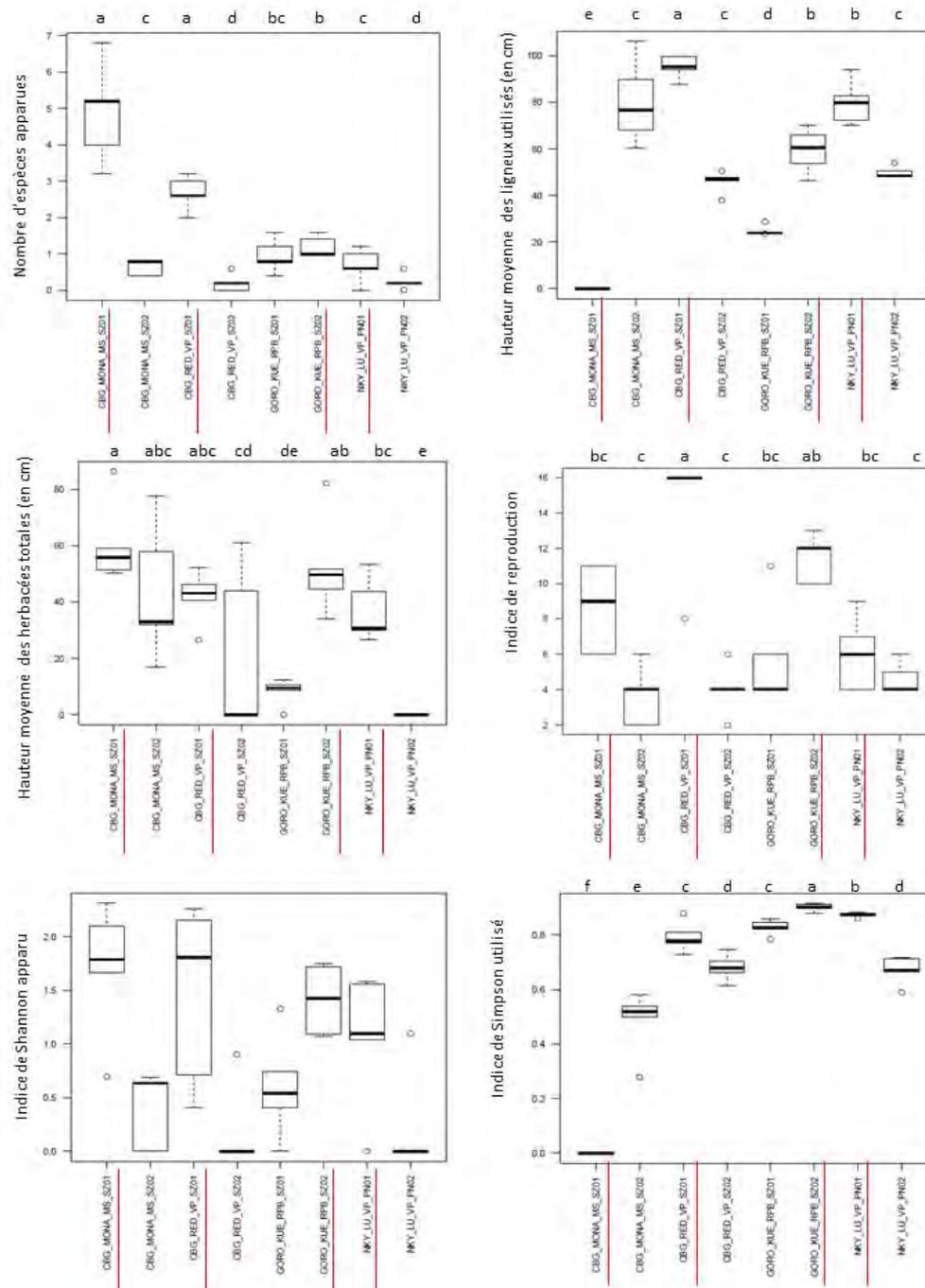


Figure 73 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet topsoil.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les modalités. (Les modalités surlignées en rouge sont celles qui ont reçu du topsoil). NB : les données sont exprimées pour 20 m².

Tableau 37 : Espèces apparues sur les modalités avec topsoil.

Ne sont soulignées que les espèces apparues sur les deux modalités (avec ou sans topsoil). Les espèces apparues marquées d'un astérisque appartiennent à la même espèce que celles plantées, dont il existe encore des individus vivants.

CBG_MONA_MS_SZ01	CBG_RED_VP_SZ01	GORO_KUE_RPB_SZ02	NKY_LU_VP_PN01
<i>Acacia spirorbis</i>	<i>Alphitonia neocaledonica</i>	<u><i>Alphitonia neocaledonica</i></u> *	<i>Costularia pubescens</i>
<i>Actinostachys sp</i>	<i>Caladenia catenata</i>	<i>Casuarina collina</i>	<i>Dianella sp</i>
<i>Cloezia artensis</i>	<i>Casuarina collina</i>	<u><i>Costularia comosa</i></u>	<i>Dodonaea viscosa</i> *
<u><i>Costularia pubescens</i></u> *	<i>Comptonella drupaceae</i>	<u><i>Costularia nervosa</i></u>	<i>Eriaxis rigida</i>
<i>Dracophyllum sp</i>	<i>Costularia comosa</i> *	<i>Dodonaea viscosa</i> *	<i>Grevillea exul rubiginosa</i> *
<i>Dubouzetia elegans elegans</i>	<i>Costularia nervosa</i>	<i>Grevillea sp</i> *	<i>Lepidosperma perteres</i>
<i>Eriaxis rigida</i>	<i>Costularia pubescens</i>	<i>Gymnostoma deplancheanum</i> *	<i>Longetia buxoides</i>
<i>Grevillea gillivrayi</i>	<i>Dracophyllum sp</i>	<i>Hibbertia sp</i> *	<u><i>Psilotum nudum</i></u>
<i>Guioa glauca</i>	<i>Eriaxis rigida</i>	<i>Hibbertia vieillardii</i>	<i>Smilax sp</i>
<i>Hibbertia wagapii</i>	<i>Guioa glauca</i>	<i>Lepidosperma perteres</i>	
<u><i>Lepidosperma perteres</i></u>	<i>Gymnostoma intermedium</i> *	<i>Machaerina deplanchei</i>	
<i>Machaerina deplanchei</i>	<i>Hibbertia lucens</i>	<i>Myrtaceae sp</i>	
<i>Montrouzieria sphaeroidea</i>	<i>Hibbertia wagapii</i>	<i>Nephrolepis sp</i>	
<i>Myrtopsis myrtoidea</i>	<i>Ilex sebertii</i>	<i>Proteaceae sp</i>	
<i>Nepenthes vieillardii</i>	<u><i>Lepidosperma perteres</i></u> *	<i>Stenocarpus milnei</i>	
<i>Oxera neriifolia</i>	<u><i>Lycopodium sp</i></u>	<u><i>Stenocarpus umbelliferus</i></u> *	
<i>Pancheria billardierei</i>	<u><i>Machaerina deplanchei</i></u> *		
<i>Phyllanthus aeneus</i>	<i>Montrouzieria sphaeroidea</i>		
<i>Phyllanthus chrysanthus</i>	<i>Myrtopsis myrtoidea</i>		
<i>Phyllanthus torrentium</i>	<i>Nephrolepis sp</i>		
<i>Psychotria comptonii</i>	<i>Phyllanthus torrentium</i>		
<i>Schizaea dichotoma</i>	<i>Polyscias dioica</i>		
<i>Smilax orbiculata</i>	<i>Sannantha leratii</i> *		
<i>Soulamea pancheri</i>	<i>Schoenus neocaledonicus</i> *		
<i>Sphenomeris deltoidea</i>	<i>Sphenomeris deltoidea</i>		
<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	<i>Xanthostemon aurantiacus</i> *		
<i>Styphelia cymbulae</i>			
<i>Styphelia dammarifolia</i>			
<i>Tristaniopsis calobuxus</i>			

Tableau 38 : Espèces apparues trouvées sur les modalités sans topsoil.

Ne sont soulignées que les espèces apparues sur les deux modalités. Les espèces apparues marquées d'un astérisque appartiennent à la même espèce que celles plantées, dont il existe encore des individus vivants.

CBG_MONA_MS_SZ02	CBG_RED_VP_SZ02	GORO_KUE_RPB_SZ01	NKY_LU_VP_PN02
<i>Casuarina collina*</i>	<u><i>Lepidosperma perteres</i></u>	<u><i>Alphitonia neocaledonica</i></u>	<i>Acacia spirorbis</i>
<i>Costularia comosa*</i>	<u><i>Lycopodium sp</i></u>	<i>Caladenia catenata</i>	<u><i>Psilotum nudum</i></u>
<u><i>Costularia pubescens</i></u>	<u><i>Machaerina deplanchei*</i></u>	<u><i>Costularia comosa</i></u>	<i>Sannantha leratii*</i>
<u><i>Lepidosperma perteres</i></u>	<u><i>Sannantha leratii*</i></u>	<u><i>Costularia nervosa</i></u>	
		<u><i>Sannantha leratii</i></u>	
		<i>Scaevola beckii</i>	
		<i>Schoenus neocaledonicus</i>	
		<u><i>Stenocarpus umbelliferus</i></u>	

Tableau 39 : Nombre d'espèces plantées, d'espèces plantées retrouvées dans les relevés, d'espèces composant les recrûs et nombre d'espèces composant les recrûs communes aux espèces plantées (les lignes en grisées sont les modalités ayant reçues du topsoil).

	Nombre d'espèces plantées	Nombre d'espèces plantées retrouvées	% d'espèces retrouvées	Nombre d'espèces composant les recrûs	Nombre d'espèces composant les recrûs communes aux espèces plantées
CBG_MONA_MS_SZ01	6	1	17	29	1
CBG_MONA_MS_SZ02	5	5	100	4	2
CBG_RED_VP_SZ01	19	16	84	26	7
CBG_RED_VP_SZ02	19	5	26	4	2
GORO_KUE_RPB_SZ01	30	12	40	8	0
GORO_KUE_RPB_SZ02	30	23	77	16	6
NKY_LU_VP_PN01	22	19	86	9	2
NKY_LU_VP_PN02	22	7	32	3	1

Cap Bocage Mona Sud sous-zone 1



Cap Bocage Mona Sud sous-zone 2



Cap Bocage réduite sous-zone 1



Cap Bocage réduite sous-zone 2



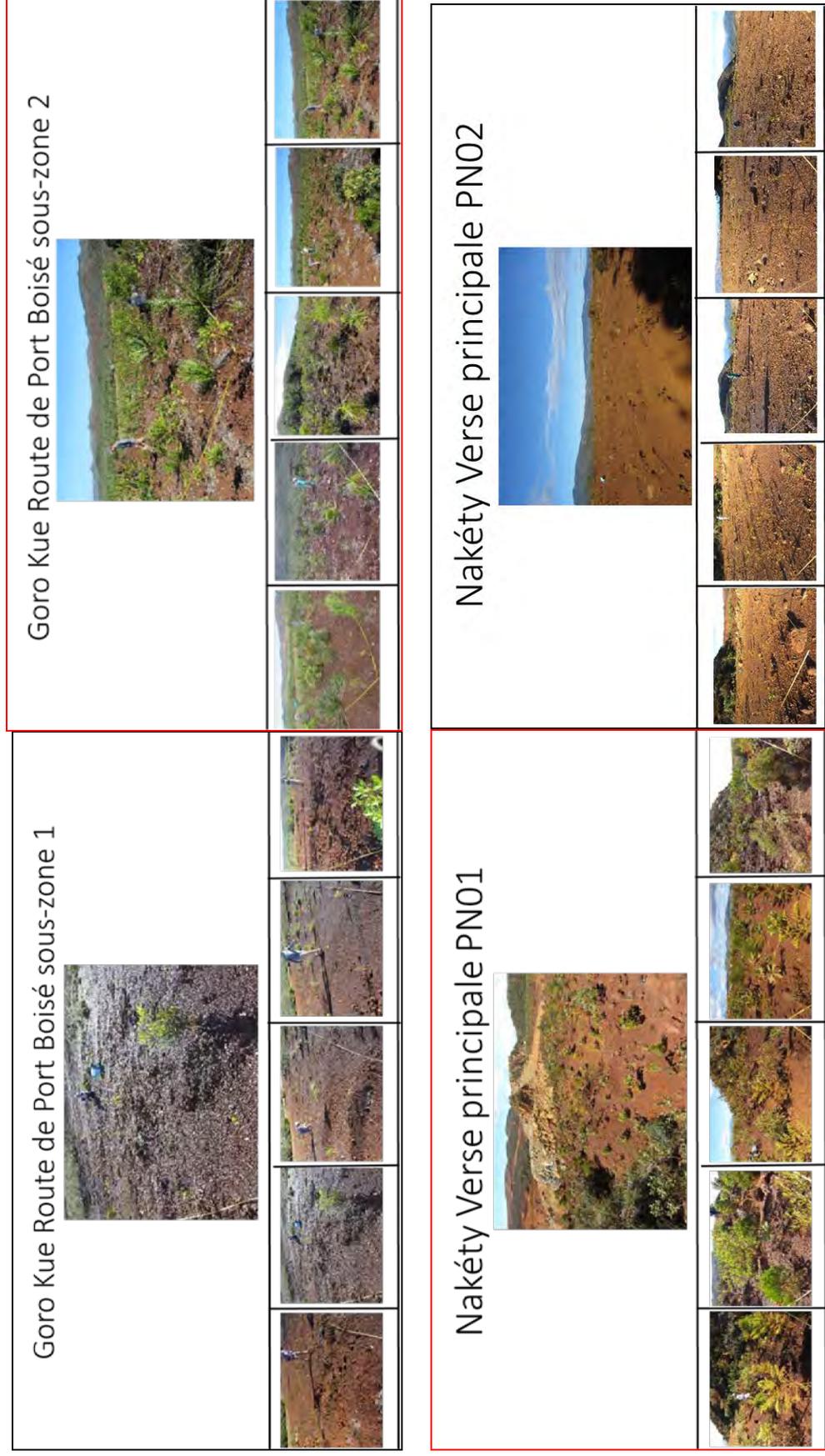


Figure 74 : Photos des différentes modalités classées en fonction de la classification hiérarchique pour l'étude de l'effet topsoil (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 11).

6.6.2. EFFET DE L'ACACIA SPIRORBIS

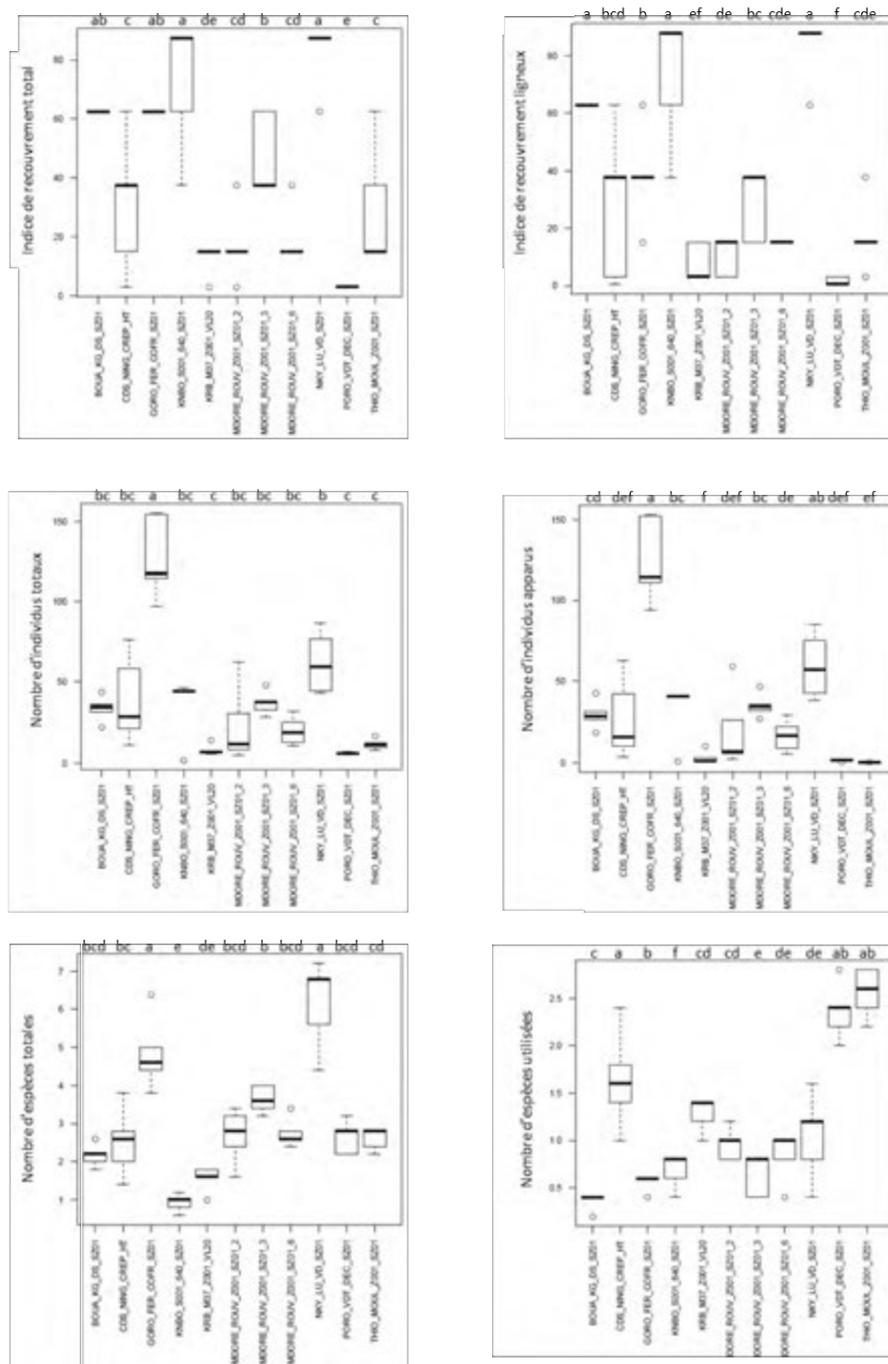


Figure 75 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet A. spirorbis.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les modalités qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les modalités.

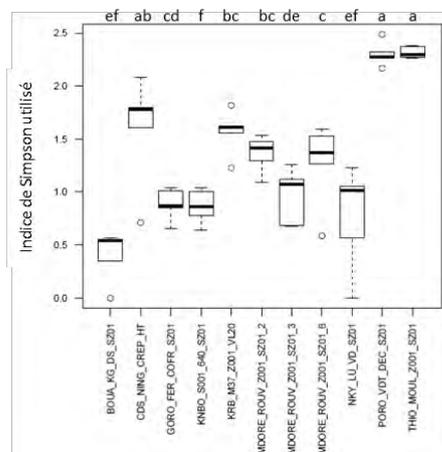
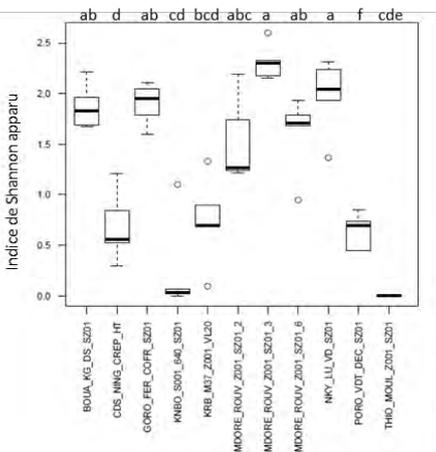
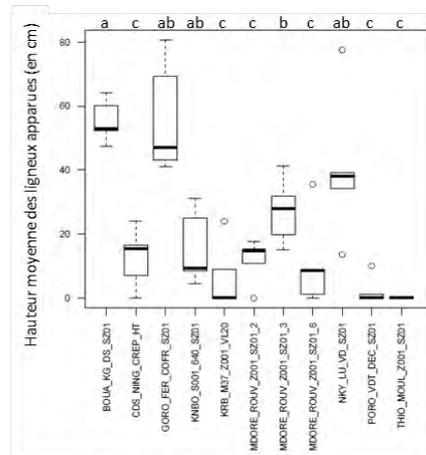
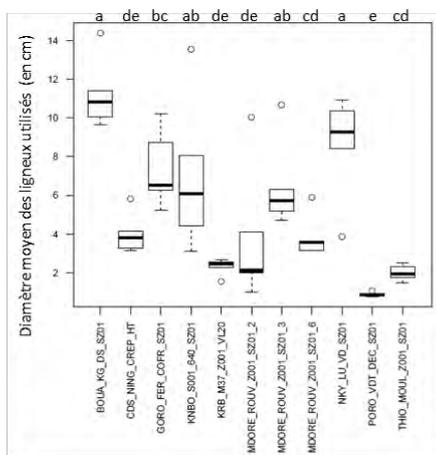
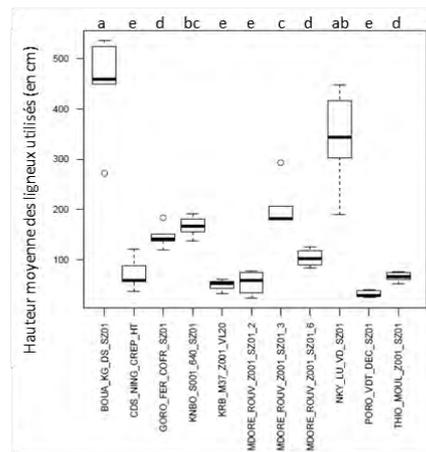
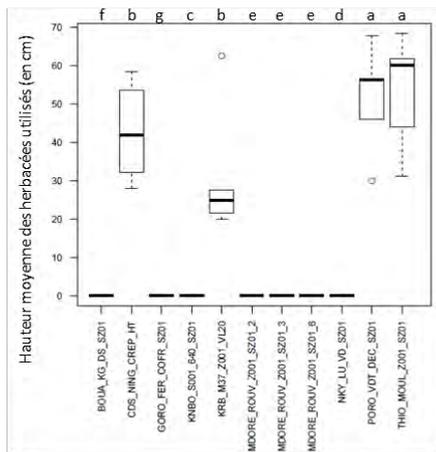


Figure 76 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet A. spirorbis.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les modalités

Camp des sapins – Crépuscule Haut



Poro Vallée des Tritouts Décharge



Thio Plateau Les Moulinets



Karembé Verse L20



Mont Dore De Rouvray Parcelle 2



Mont Dore De Rouvray Parcelle 6



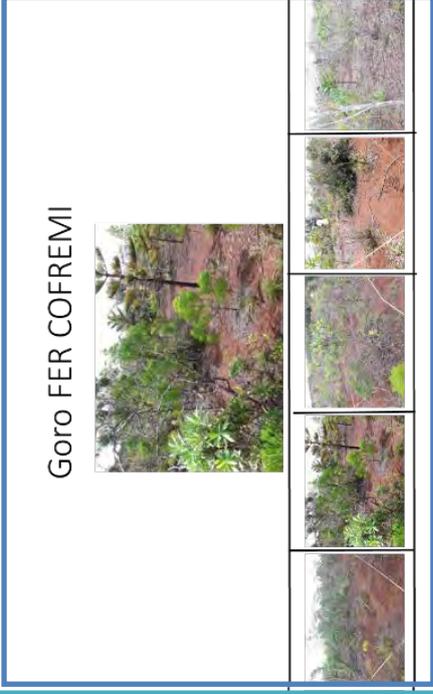
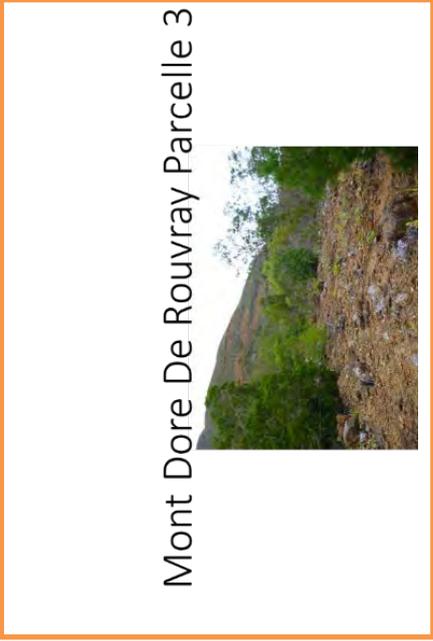


Figure 77 : Photos des différentes modalités pour l'étude de l'effet A. spirorbis classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 15)

6.6.3. EFFET SUBSTRAT

6.6.3.1. Cas de camps des Sapins

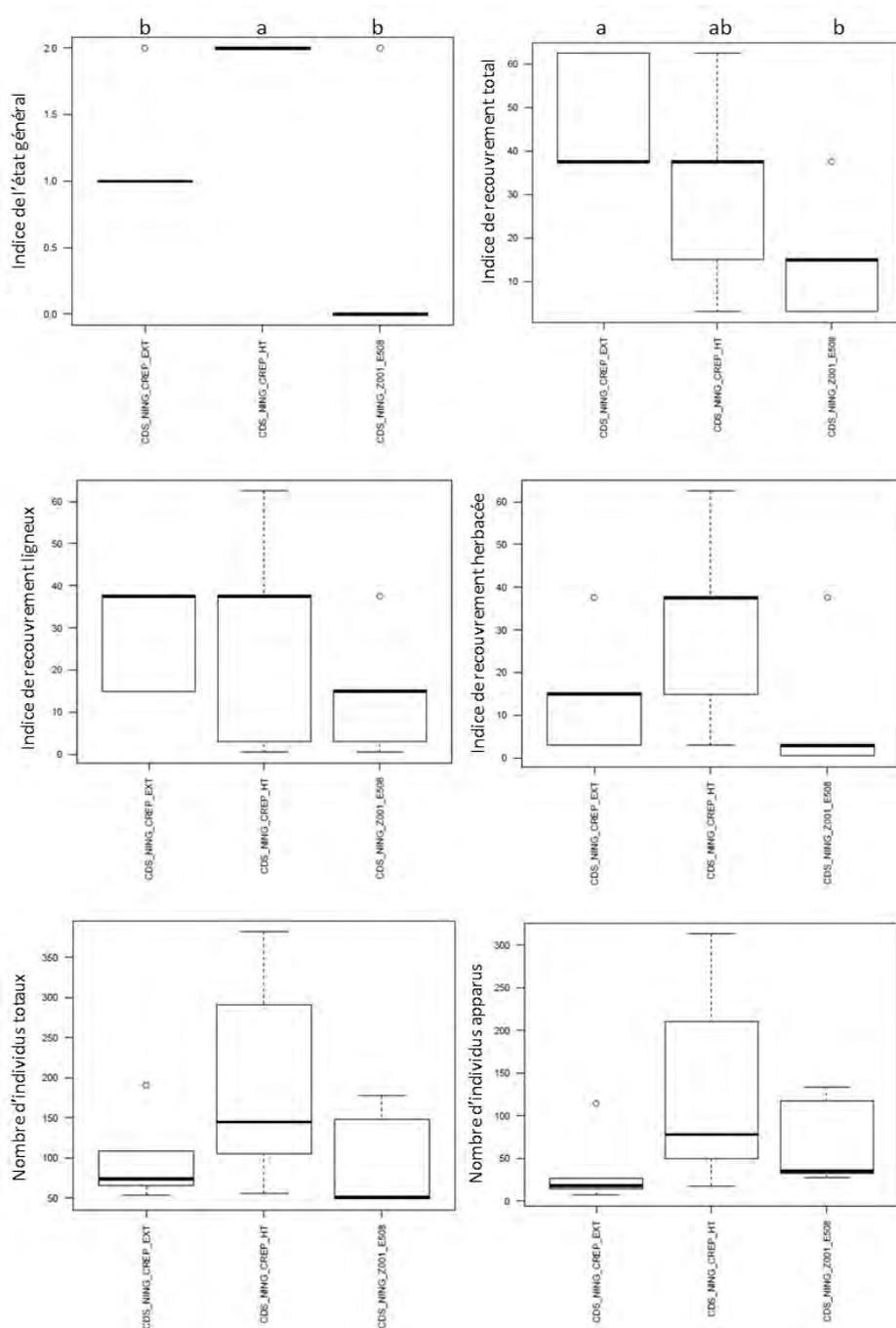


Figure 78 : Boxplot des variables sélectionnées (Camps des Sapins).

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les modalités qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

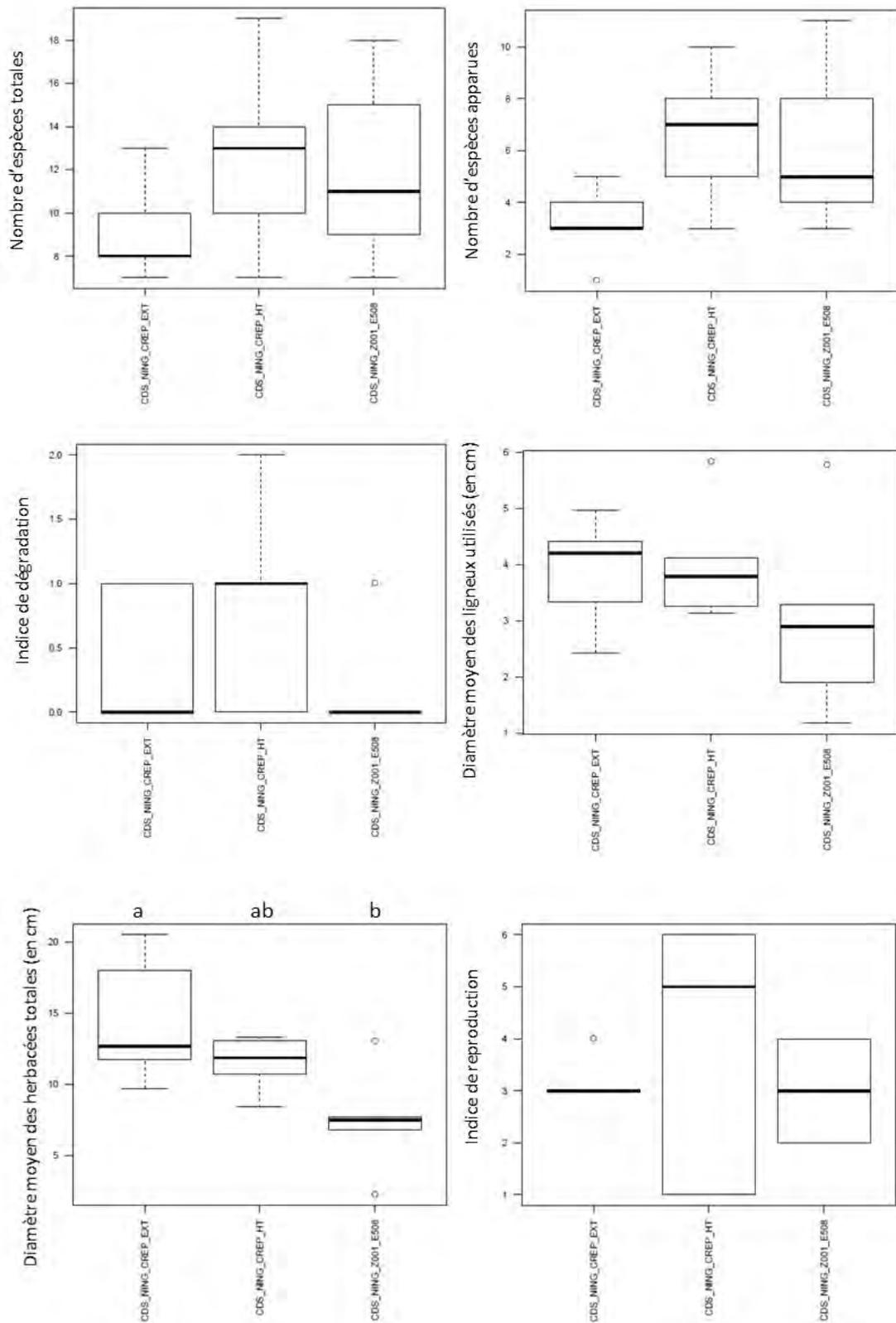


Figure 79 : Boxplot des variables sélectionnées (Camps des Sapins).

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les modalités qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements.

Tableau 40 : Espèces utilisées retrouvées uniquement sur chacune des modalités sur Camps des Sapins.

CDS_NING_CREP_EXT	CDS_NING_CREP_HT	CDS_NING_2001_E508
<i>Dodonaea viscosa</i>	<i>Acacia spirorbis</i> <i>Geissois pruinosa</i> <i>Peripterygia marginata</i> <i>Xanthostemon multiflorus</i>	<i>Arillastrum gummiferum</i> <i>Cloezia artensis</i> <i>Serianthes calycina</i>

Tableau 41 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités sur Camps des Sapins.

CDS_NING_CREP_EXT	CDS_NING_CREP_HT	CDS_NING_2001_E508
<i>Alyxia sp</i> <i>Casuarina collina</i> <i>Sphenomeris deltoidea</i>	<i>Alphitonia neocaledonica</i> <i>Costularia arundinacea</i> <i>Dracophyllum ramosum</i> <i>Eriaxis rigida</i> <i>Longetia buxoides</i> <i>Polyscias sp</i>	<i>Costularia nervosa</i> <i>Gymnostoma sp</i> <i>Phaius tancarvilleae</i>

Tableau 42 : Nombre d'espèces plantées et retrouvées sur chacune des modalités sur Camps des Sapins

	Nombre d'espèces plantées	Nombre d'espèces plantées retrouvées
CDS_NING_CREP_EXT	38	20
CDS_NING_CREP_HT	38	24
CDS_NING_2001_E508	38	20

Tableau 43 : Espèces plantées non retrouvées sur l'ensemble des modalités sur Camps des Sapins.

Acridocarpus austrocaledonicus
Agatea pancheri
Bocquillonia sessiliflora
Grevillea gillivrayi
Grevillea meisneri
Joinvillea plicata
Oxera neriifolia
Phyllanthus aeneus
Phyllanthus buxoides
Phyllanthus montrouzieri
Scaevola montana
Soulamea pancheri



Figure 80 : Photos des différentes modalités sur Camps des Sapins.classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 18)

6.6.3.2. La mine A1

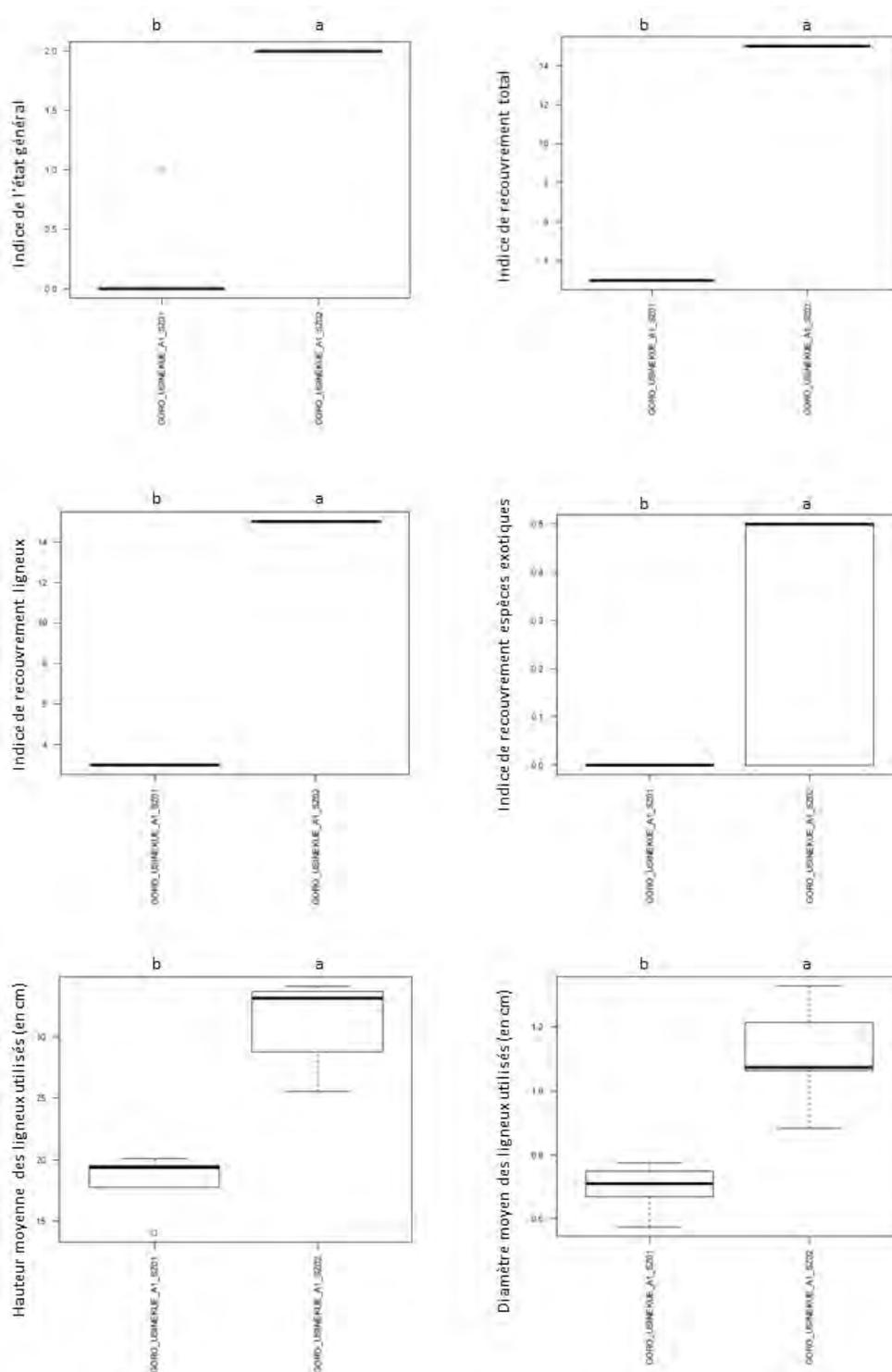


Figure 81: Boxplot des variables sélectionnées (Mine A1).

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

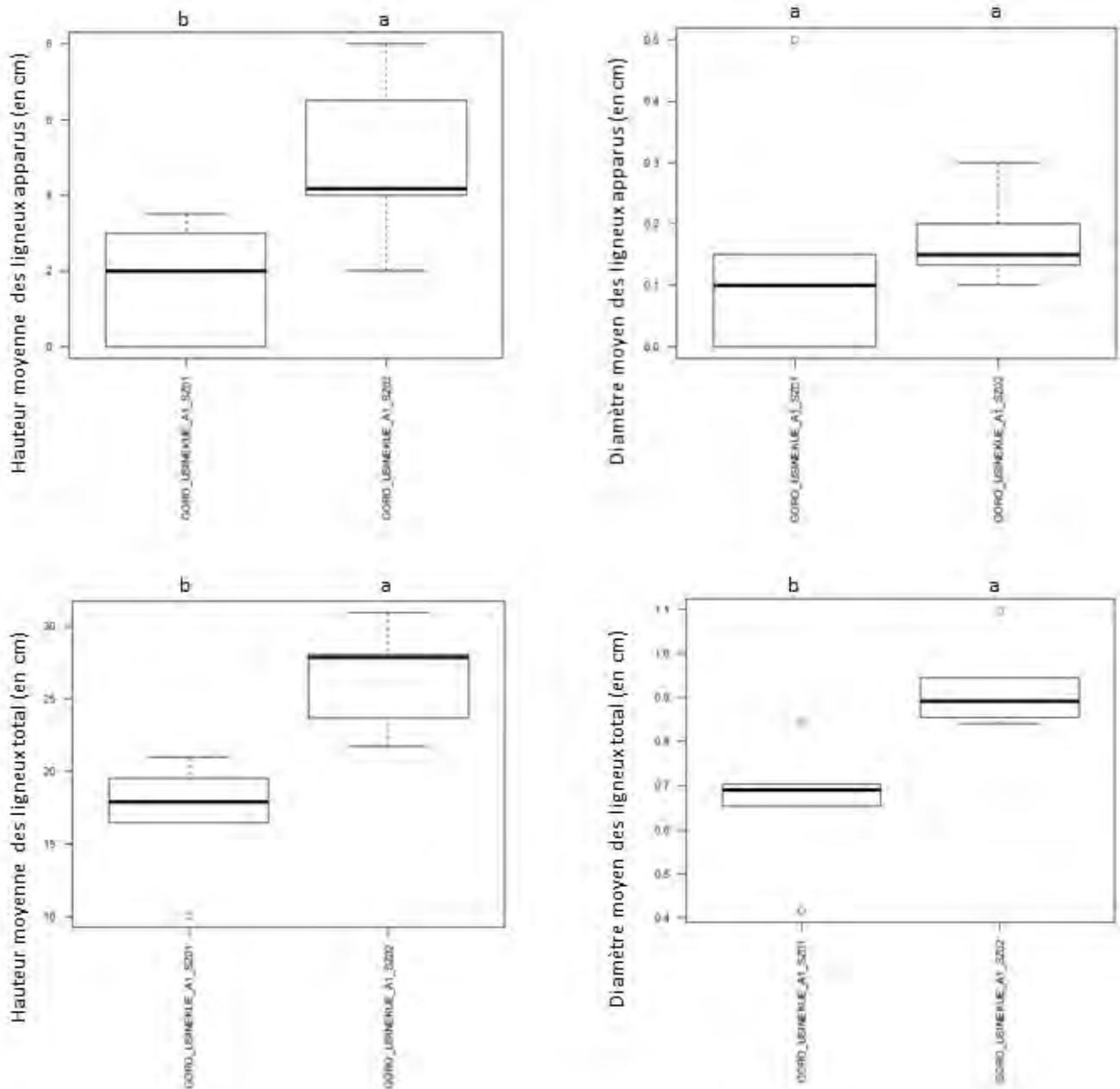


Figure 82: Boxplot des variables sélectionnées (Mine A1).

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

Tableau 44 : Nombre d'espèces apparues utilisées et plantées pour chacune des modalités de la Mine A1.

	Espèces apparues	Espèces utilisées	Espèces plantées
GORO_USINEKUE_A1_SZ01	4	26	38
GORO_USINEKUE_A1_SZ02	6	21	38
Totaux	9	29	

Tableau 45 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités de la Mine A1.

GORO_USINEKUE_A1_SZ01	GORO_USINEKUE_A1_SZ02
<i>Costularia comosa</i>	<i>Alstonia coriacea</i>
<i>Grevillea exul</i>	<i>Gymnostoma deplancheanum</i>
<i>Schoenus neocaledonicus</i>	<i>Lepidosperma perteres</i>
	<i>Scaevola cylindrica</i>
	<i>Smilax sp</i>

Tableau 46 : Espèces utilisées retrouvées uniquement sur chacune des modalités de la Mine A1.

GORO_USINEKUE_A1_SZ01	GORO_USINEKUE_A1_SZ02
<i>Cloezia artensis</i>	<i>Costularia pubescens</i>
<i>Codia albifrons</i>	<i>Gardenia aubryi</i>
<i>Flagellaria indica</i>	<i>Stenocarpus comptonii</i>
<i>Joinvillea plicata</i>	
<i>Oxera neriifolia</i>	
<i>Scaevola cylindrica</i>	
<i>Storckiella pancheri</i>	
<i>Syzygium ngoyense</i>	

Goro Usine Kue Mine A1



Figure 83 : Photos des différentes modalités sur Mine A1.classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 20)

6.6.4. DIFFÉRENCE SEMIS HYDRAULIQUE (AVEC OU SANS TRAVAIL DU SOL) ET SEMIS MANUEL : EXEMPLE DE LA VERSE BN4

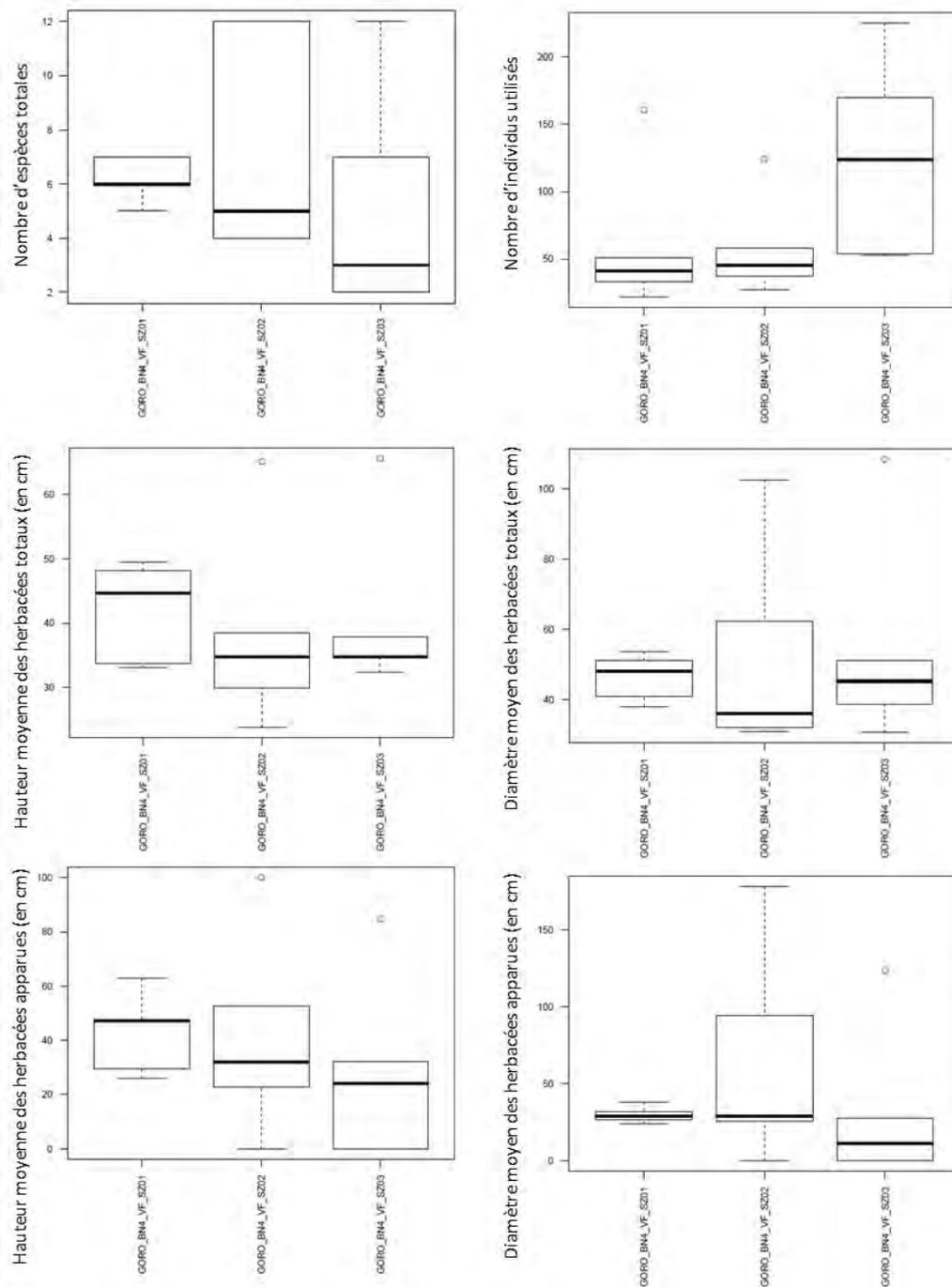


Figure 84 : Boxplot des variables sélectionnée (Verse BN4 Goro).

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

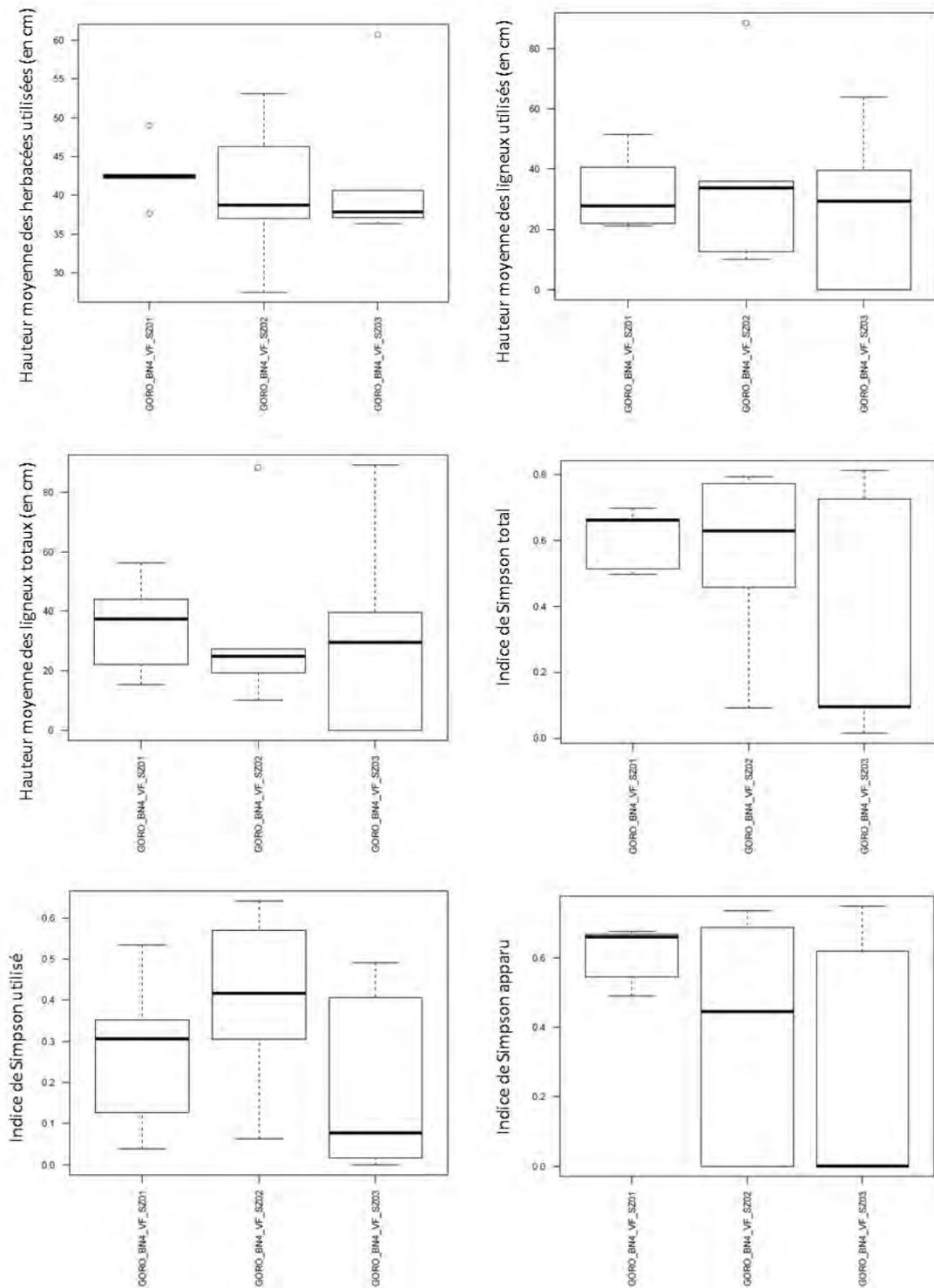


Figure 85 : Boxplot des variables sélectionnées (Verse BN4 Goro).

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

Tableau 47 : Nombre d'espèces apparues (absente du mélange d'origine), utilisées retrouvées (issues du mélange) et semées (composant le mélange) pour chacune des modalités et sur la totalité de la verse BN4-Goro

	Espèces apparues	Espèces utilisées retrouvées	Nombre d'espèces contenues dans le mélange
GORO_BN4_VF_SZ01	8	5	11
GORO_BN4_VF_SZ02	9	6	11
GORO_BN4_VF_SZ03	9	4	6
Totaux	12	8	12

Tableau 48 : Espèces présentes dans le mélange de base mais non retrouvées dans les relevés sur verse BN4-Goro

<i>Hibbertia pancheri</i>
<i>Joinvillea plicata</i>
<i>Scaevola montana</i>

Tableau 49 : Espèces utilisées dans le mélange retrouvées uniquement sur chacune des modalités sur verse BN4-Goro

GORO_BN4_VF_SZ01	GORO_BN4_VF_SZ02	GORO_BN4_VF_SZ03
<i>Scaevola cylindrica</i>	<i>Stenocarpus umbelliferus</i>	<i>Gymnostoma deplancheanum</i>
	<i>Xanthostemon aurantiacus</i>	

Tableau 50 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités sur verse BN4-Goro

GORO_BN4_VF_SZ01	GORO_BN4_VF_SZ02	GORO_BN4_VF_SZ03
<i>Casuarina collina</i>		<i>Alphitonia neocaledonica</i>
		<i>Grevillea gillivrayi</i>

Goro Baie Nord 4 Verse Ferry



Figure 86 : Photos des différentes modalités sur la Verse BN4-Goro

6.6.5. EFFET DES INTRANTS

6.6.5.1. Cas de Col de l'antenne

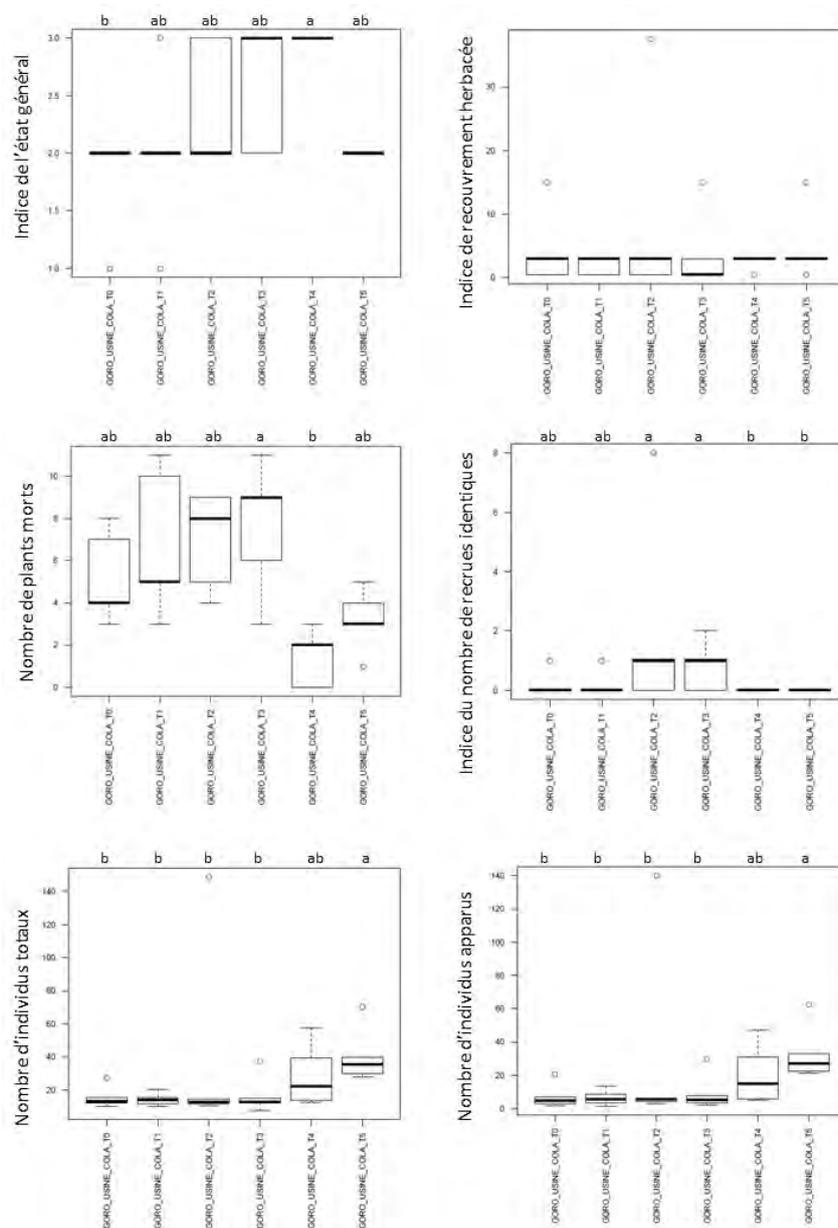


Figure 87 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet intrant sur le col de l'antenne.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

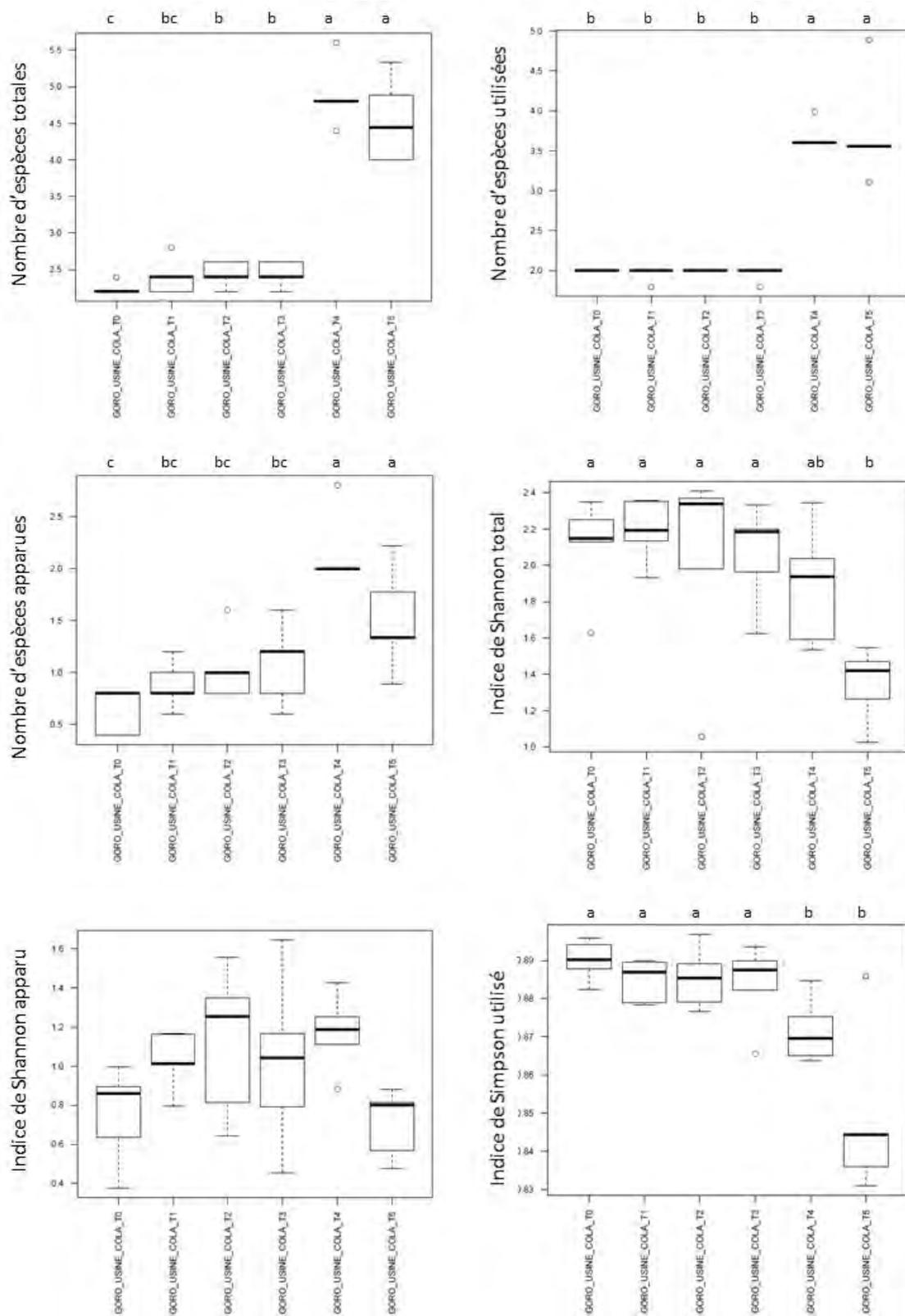


Figure 88 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet intrant sur le col de l'antenne.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

Tableau 51 : Nombre d'espèces apparues, utilisées et plantées pour chacune des modalités pour l'étude de l'effet intrant sur le col de l'antenne

	Espèces apparues	Espèces utilisées	Espèces plantées
GORO_USINE_COLA_T0	6	10	
GORO_USINE_COLA_T1	9	10	
GORO_USINE_COLA_T2	11	10	
GORO_USINE_COLA_T3	14	10	
GORO_USINE_COLA_T4	11	10	
GORO_USINE_COLA_T5	6	10	
Totaux	22	10	10

Tableau 52 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités pour l'étude de l'effet intrant sur le col de l'antenne

GORO_USINE_COLA_T0	GORO_USINE_COLA_T1	GORO_USINE_COLA_T2	GORO_USINE_COLA_T3	GORO_USINE_COLA_T4	GORO_USINE_COLA_T5
<i>Costularia comosa</i>	<i>Costularia sp</i>	<i>Costularia nervosa</i>	<i>Caladenia catenata</i> <i>Myodocarpus fraxinifolius</i> <i>Polyscias pancheri</i> <i>Schoenus neocaledonicus</i>	<i>Actinostachys sp</i> <i>Joinvillea plicata</i>	<i>Pancheria billardie</i>

Goro Usine Col de l'antenne



Figure 89 : Photos des différentes modalités classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 26)

6.6.5.2. Cas de CR7

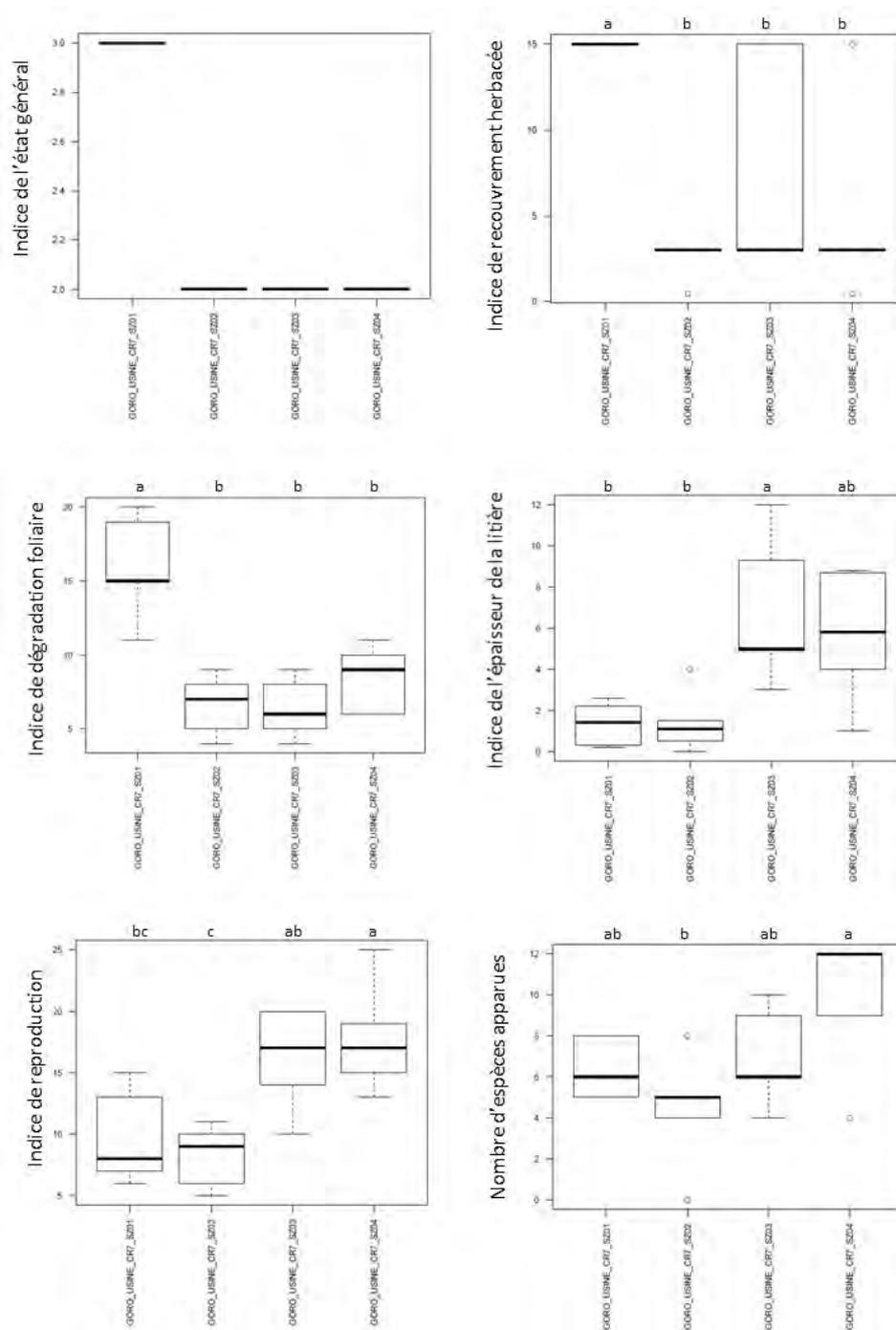


Figure 90 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

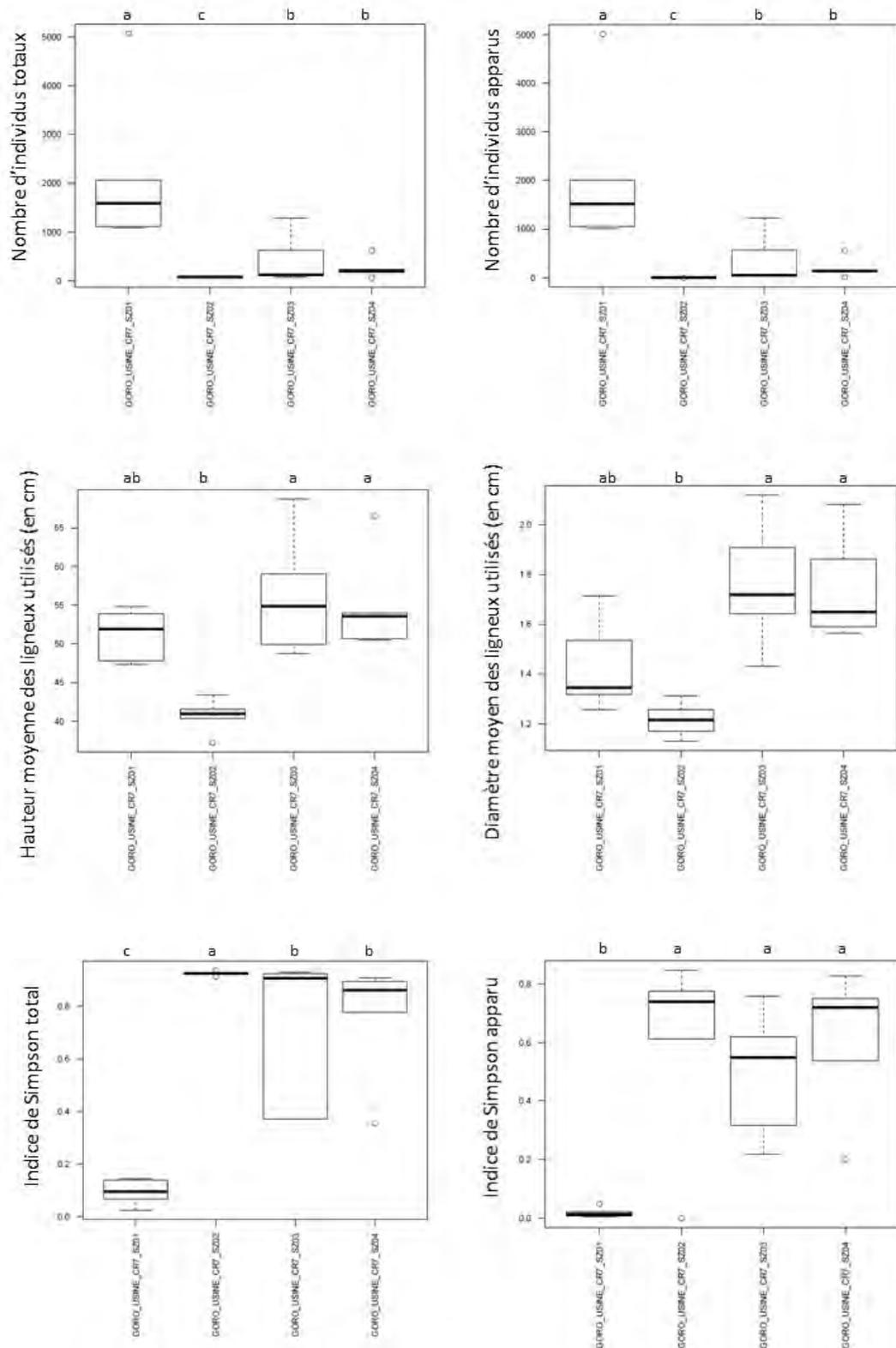


Figure 91 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

Tableau 53 : Nombre d'espèces apparues utilisées et plantées pour chacune des modalités utilisées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7

	Espèces apparues	Espèces utilisées	Espèces plantées
GORO_USINE_CR7_SZ01	12	32	
GORO_USINE_CR7_SZ02	12	22	
GORO_USINE_CR7_SZ03	14	26	
GORO_USINE_CR7_SZ04	20	27	
Totaux	29	52	52

Tableau 54 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités utilisées pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7

GORO_USINE_CR7_SZ01	GORO_USINE_CR7_SZ02	GORO_USINE_CR7_SZ03	GORO_USINE_CR7_SZ04
<i>Caladenia catenata</i>	<i>Megastylis gigas</i>	<i>Dracophyllum ramosum</i>	<i>Actinostachys sp</i>
<i>Peripterygia marginata</i>	<i>Styphelia sp</i>	<i>Hibbertia pulchella</i>	<i>Asplenium nidus</i>
<i>Tristaniopsis guillainii</i>			<i>Dodonaea viscosa</i>
			<i>Hibbertia lucens</i>
			<i>Liparis laxa</i>
			<i>Psilotum nudum</i>
			<i>Sphenomeris deltoidea</i>

Goro Usine CR7



Figure 92 : Photos des différentes modalités pour l'étude de l'effet des intrants sur CR7 classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 28)

6.6.5.3. Influence de la plantation et des boues de STEP Essai Tontouta

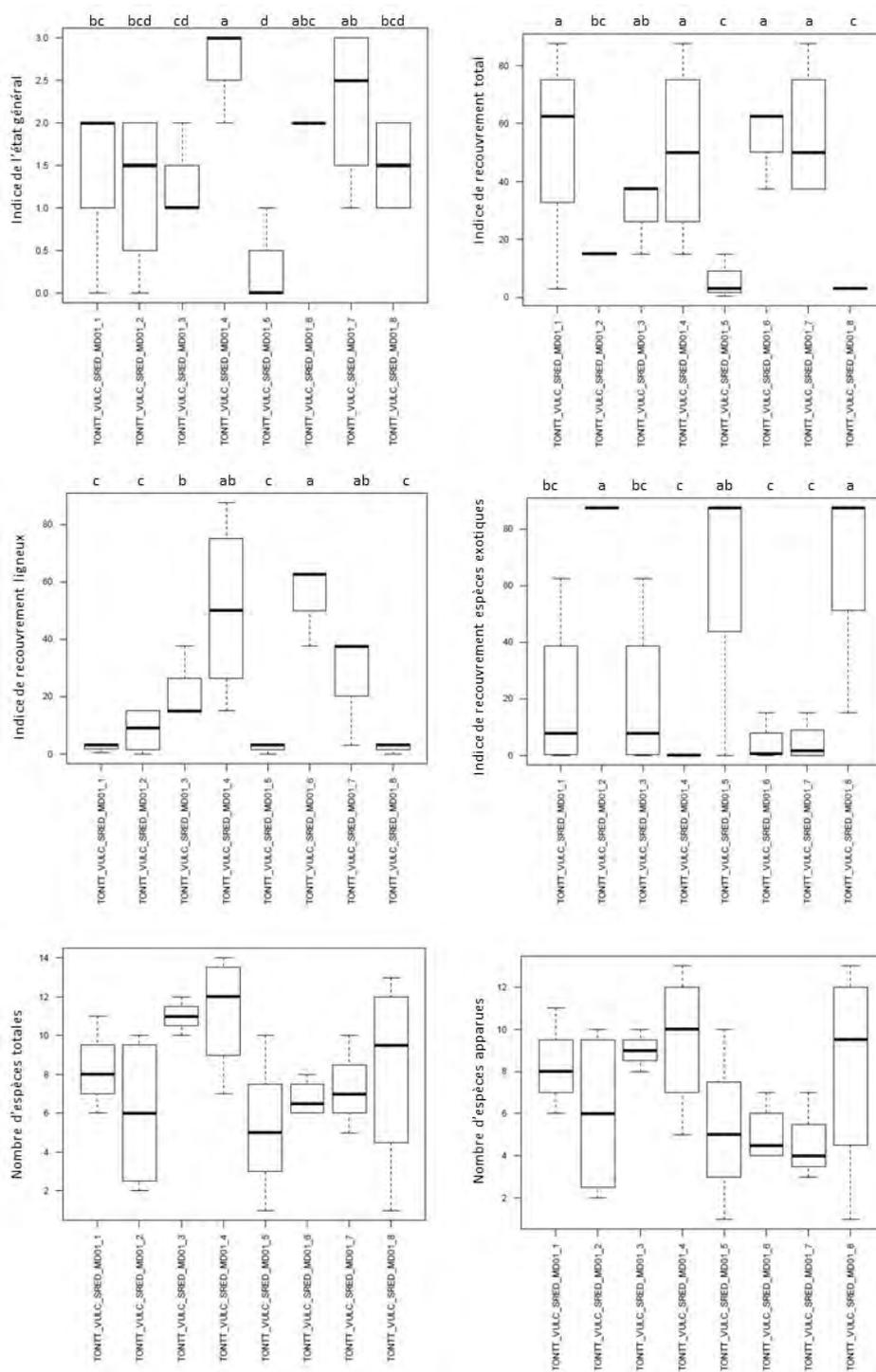


Figure 93 : Boxplots des variables sélectionnées pour l'étude sur Tontouta Vulcain.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

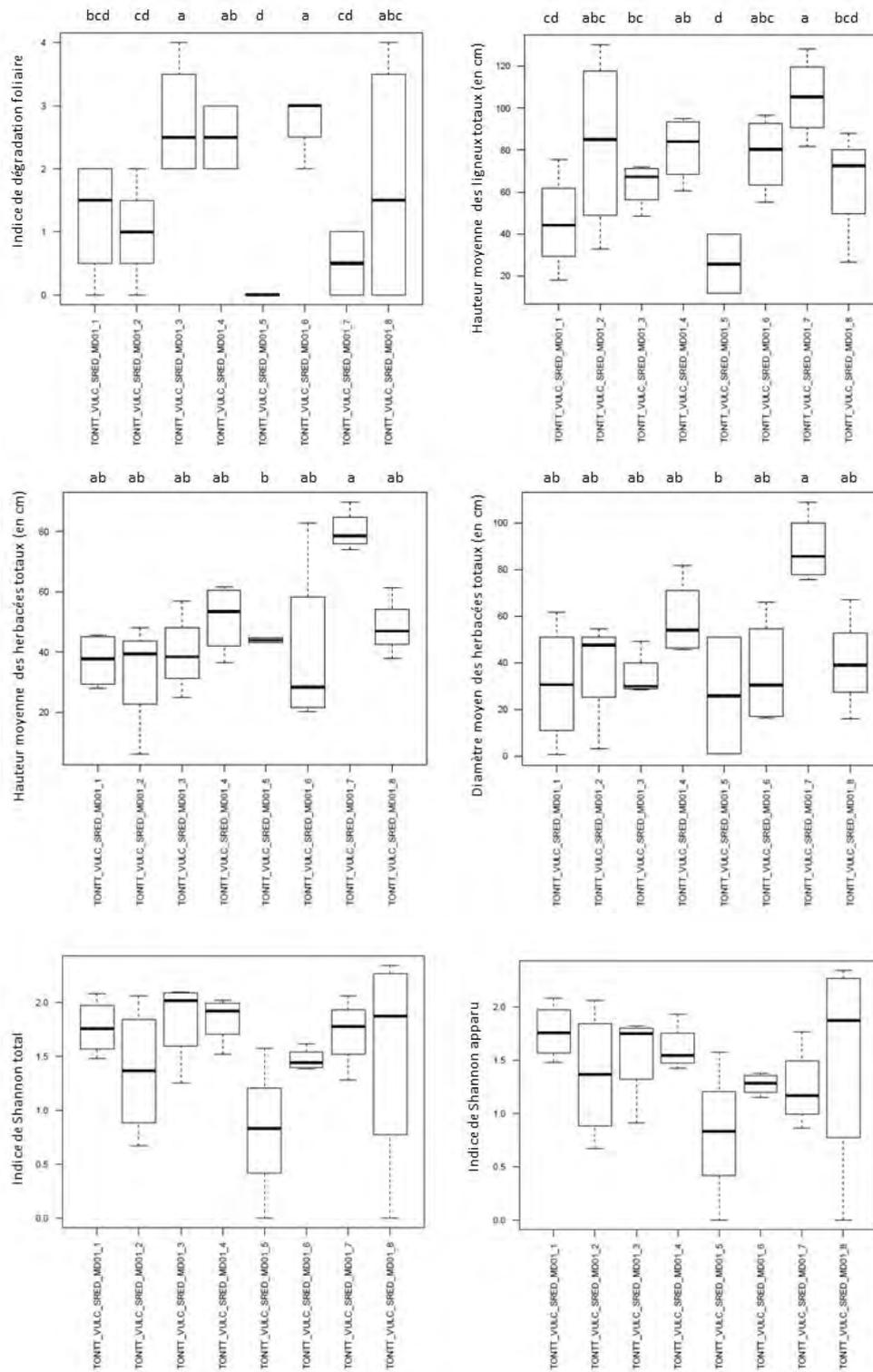


Figure 94 : Boxplots des variables sélectionnées pour l'étude sur Tontouta Vulcain.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

Tableau 55 : Nombre d'espèces apparues sur chacune des modalités testées sur Tontouta Vulcain

Modalités	espèces apparues	total
TONTT_VULC_SRED_MD01_1	17	58
TONTT_VULC_SRED_MD01_2	17	
TONTT_VULC_SRED_MD01_3	21	
TONTT_VULC_SRED_MD01_4	20	
TONTT_VULC_SRED_MD01_5	14	
TONTT_VULC_SRED_MD01_6	12	
TONTT_VULC_SRED_MD01_7	12	
TONTT_VULC_SRED_MD01_8	21	

Tableau 56 : Espèces végétales retrouvées uniquement sur les différentes modalités testées sur Tontouta Vulcain

TONTT_VULC_SRE ED_MD01_1	TONTT_VULC_SRE D_MD01_2	TONTT_VULC_SRE D_MD01_3	TONTT_VULC_SRED _MD01_4
top_soil rien rien	top_soil rien Boue de STEP	top_soil PL rien	top_soil PL Boue de STEP
<i>Hibbertia sp</i>	<i>Costularia arundinacea</i>	<i>Costularia nervosa</i>	<i>Pittosporum sp</i>
<i>Megastylis gigas</i> <i>Pancheria confusa</i>	<i>Lomandra insularis</i> <i>Sphenomeris deltoidea</i> <i>Wikstroemia indica</i>	<i>Costularia sp</i> <i>Hibbertia lucens</i> <i>Ixora francii</i> <i>Scaevola sp</i> <i>Smilax neocaledonica</i>	<i>Scaevola cylindrica</i>

TONTT_VULC_SRE D_MD01_5	TONTT_VULC_SRE ED_MD01_6	TONTT_VULC_SRED _MD01_7	TONTT_VULC_SRE ED_MD01_8
latérite rien Boue de STEP	latérite PL Boue de STEP	top_soil PL Boue de STEP	top_soil rien engrais chimique
<i>Peripterygia marginata</i>		<i>Boronia pancheri</i> <i>Eucarpha deplanchei</i> <i>Longetia buxoides</i> <i>Normandia neocaledonica</i>	<i>Basselinia deplanchei</i> <i>Dianella sp</i> <i>Parsonsia flexilis</i> <i>Psychotria sp</i> <i>Scaevola montana</i>

Tableau 57 : Résultats MANOVA sur l'effet du substrat, de la technique, de l'amendement et de l'interaction des 3 sur les différentes variables sélectionnées

variables sélectionnées	Interaction	Substrat	Technique	Amendement	p-value:
DEGATFOLIAIRE					0.1032
div.shannon.app.tteszones					0.1088
div.shannon.tot.tteszones	**	**	.		0.01243
etat.général		.	**		0.006534
moyenne.diamètre.moyenne..herbacée.esp.tot		*	**		0.004377
moyenne.hauteur.moyenne..herbacée.esp.tot			**		0.01651
moyenne.hauteur.moyenne..ligneuse.esp.tot		*	**		0.004469
Nbr_esp_app_20m2					0.1907
Nbr_esp_tot_20m2	*	*	.		0.02866
RECOUV_EE	**		***		0.0001547
RECOUV_LIGN			***		1.089e-05
RECOUV_TOT	*		**		0.006451

Tontouta Vulcain Module 01 Essai IAC



Figure 95 : Photos des différentes modalités testées sur Tontouta Vulcain classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 30)

6.6.6. EFFET DES INTRANTS EN SEMIS HYDRAULIQUE : EXEMPLE DE LA MINE PINPIN

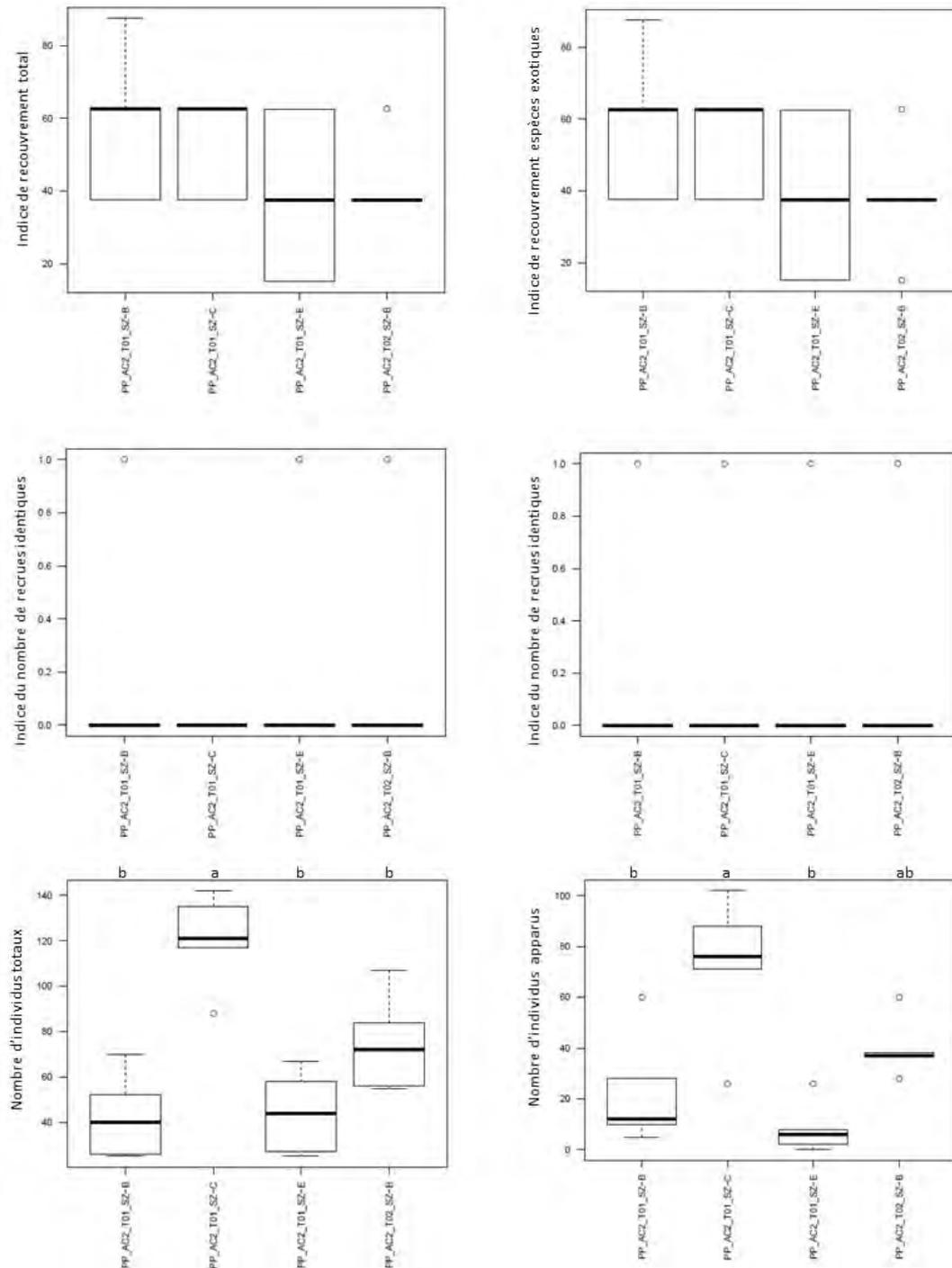


Figure 96 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur la Mine Pinpin.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

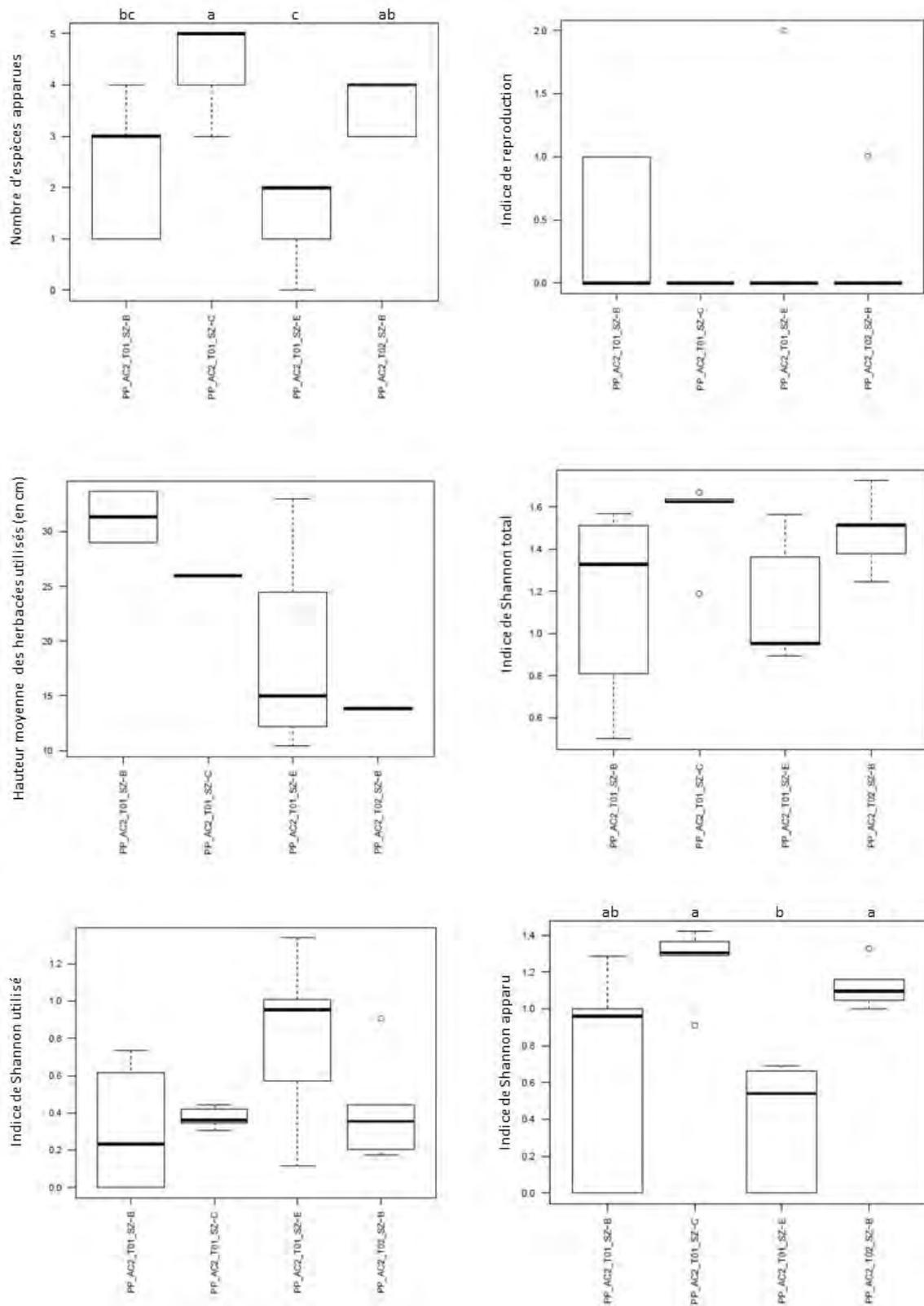


Figure 97 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur la mine Pinpin.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

Tableau 58 : Nombre d'espèces apparues (absente du mélange d'origine), utilisées retrouvées (issues du mélange) et semées (composant le mélange) pour chacune des modalités et sur la totalité de la zone expérimentale sur la mine Pinpin.

	Espèces apparues	Espèces utilisées retrouvées	Espèces semées
PP_AC2_T01_SZ-B	5	4	20
PP_AC2_T01_SZ-C	5	5	20
PP_AC2_T01_SZ-E	5	6	20
PP_AC2_T02_SZ-B	5	5	20
Totaux	9	7	20

Tableau 59 : Espèces apparues retrouvées (absente du mélange d'origine) uniquement sur chacune des modalités testées sur la mine Pinpin

PP_AC2_T01_SZ-B	PP_AC2_T01_SZ-C	PP_AC2_T01_SZ-E	PP_AC2_T02_SZ-B
<i>Gardenia sp</i>	<i>Metrosideros laurifolia</i>	<i>Hibbertia lucens</i> <i>Lepidosperma perteres</i>	<i>Spathoglottis plicata</i>

Tableau 60: Liste des espèces présentes dans le mélange de base mais non retrouvées dans les relevés effectués sur la mine Pinpin

Nom des espèces
<i>Scaevola montana</i>
<i>Schoenus juvenis</i>
<i>Schoenus neocaledonicus</i>
<i>Costularia pubescens</i>
<i>Codia discolor</i>
<i>Codia montana</i>
<i>Geissois pruinosa</i>
<i>Joinvillea plicata</i>
<i>Myrtastrum rufopunctatum</i>
<i>Tristaniopsis calobuxus</i>
<i>Tristaniopsis guillainii</i>
<i>Xanthostemon laurinus</i>
<i>Xanthostemon multiflorus</i>

Pinpin verse AC2 Talus 1 & 2



Figure 98 : Photos des différentes modalités classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 33)

6.6.7. INFLUENCE DE L'ORIENTATION

6.6.7.1. L'exemple du Mont Dore

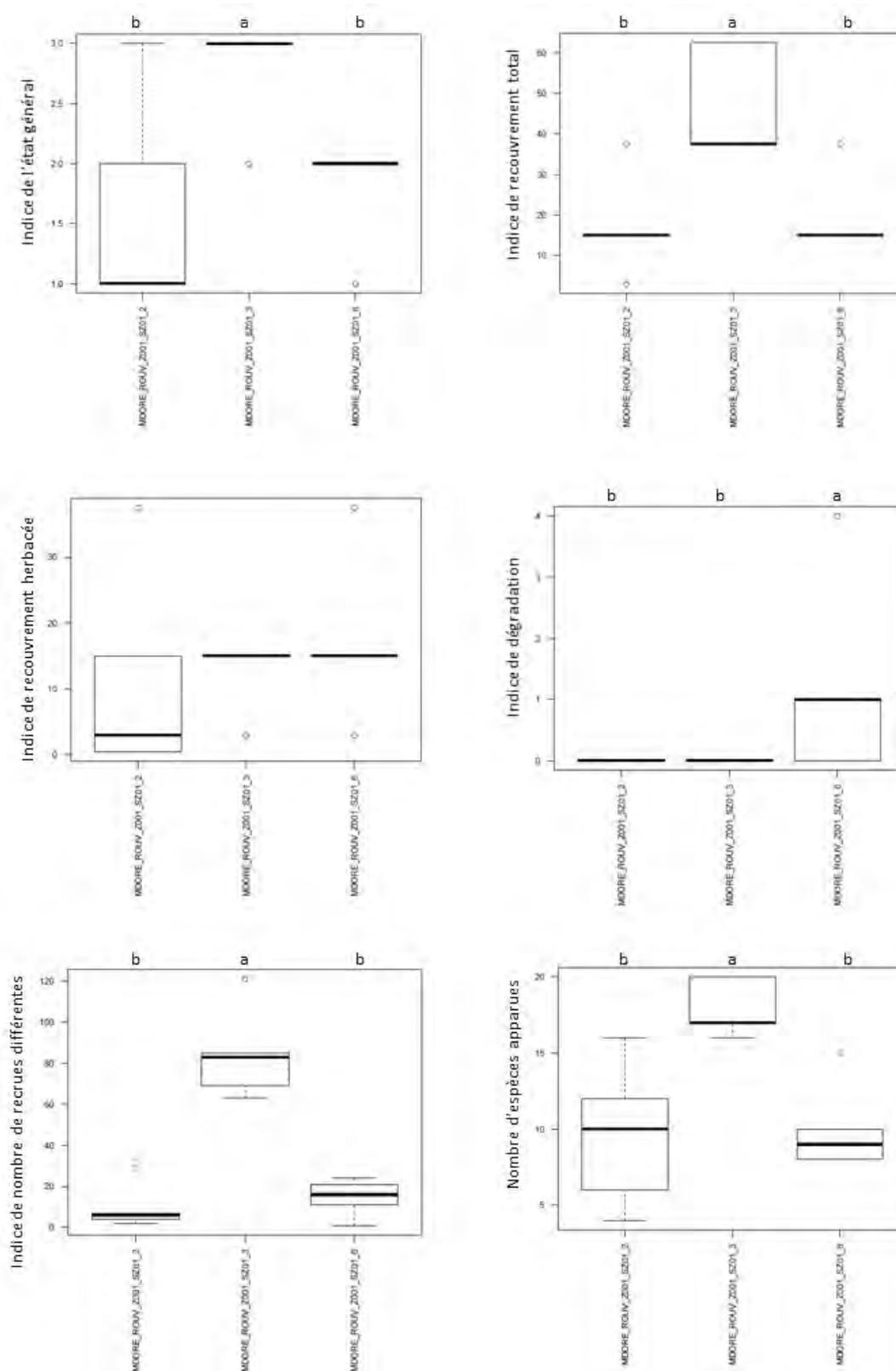


Figure 99 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur la mine De Rouvray.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

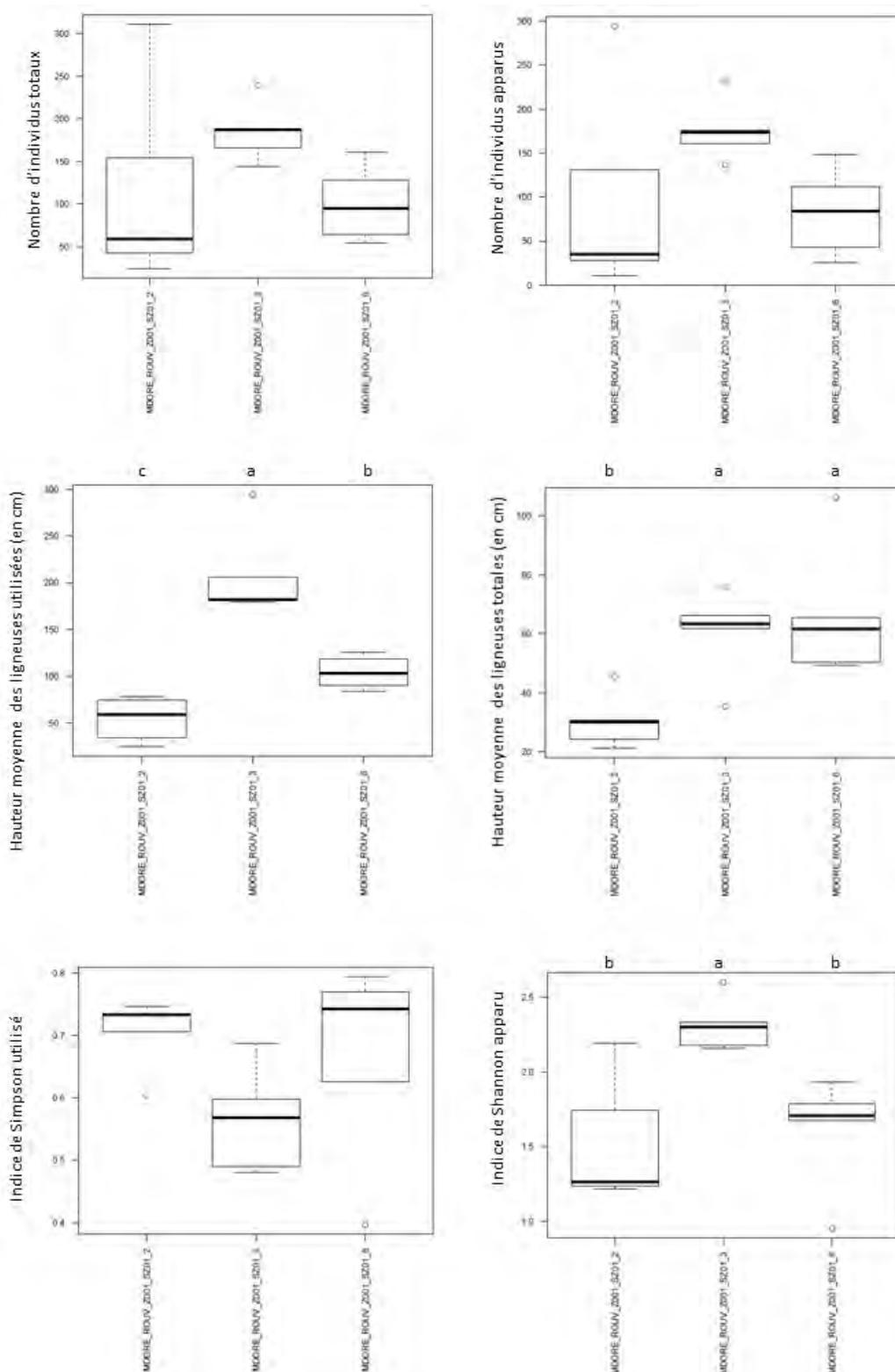


Figure 100 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur la mine De Rouvray.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

Tableau 61 : Nombre d'espèces apparues utilisées et plantées pour chacune des modalités testées sur la mine De Rouvray

	Espèces apparues	Espèces utilisées	Espèces plantées
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_2	20	7	
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3	34	5	
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_6	23	7	
Totaux	44	8	7

Tableau 62 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités testées sur la mine De Rouvray

MDORE_ROUV_Z001_SZ01_2	MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3	MDORE_ROUV_Z001_SZ01_6
<i>Scaevola montana</i>	<i>Dracophyllum sp</i>	<i>Costularia nervosa</i>
<i>Stenocarpus dumbeensis</i>	<i>Grevillea gillivrayi</i>	<i>Lycopodium deuterodensum</i>
	<i>Hibbertia vieillardii</i>	<i>Normandia neocaledonica</i>
	<i>Nephrolepis cordifolia</i>	<i>Spathoglottis plicata</i>
	<i>Pancheria sp</i>	<i>Tristaniopsis calobuxus</i>
	<i>Peripterygia marginata</i>	
	<i>Polyscias pancheri</i>	
	<i>Psilotum nudum</i>	
	<i>Scaevola sp</i>	
	<i>Soulamea pancheri</i>	
	<i>Spathoglottis unguiculata</i>	
	<i>Styphelia sp</i>	

Mont Dore De Rouvray Parcelle 2



Mont Dore De Rouvray Parcelle 3



Mont Dore De Rouvray Parcelle 6



Figure 101 : Photos des différentes modalités testées sur la mine De Rouvray classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 35)

6.6.7.2. L'exemple de Paagoumène Crête 2

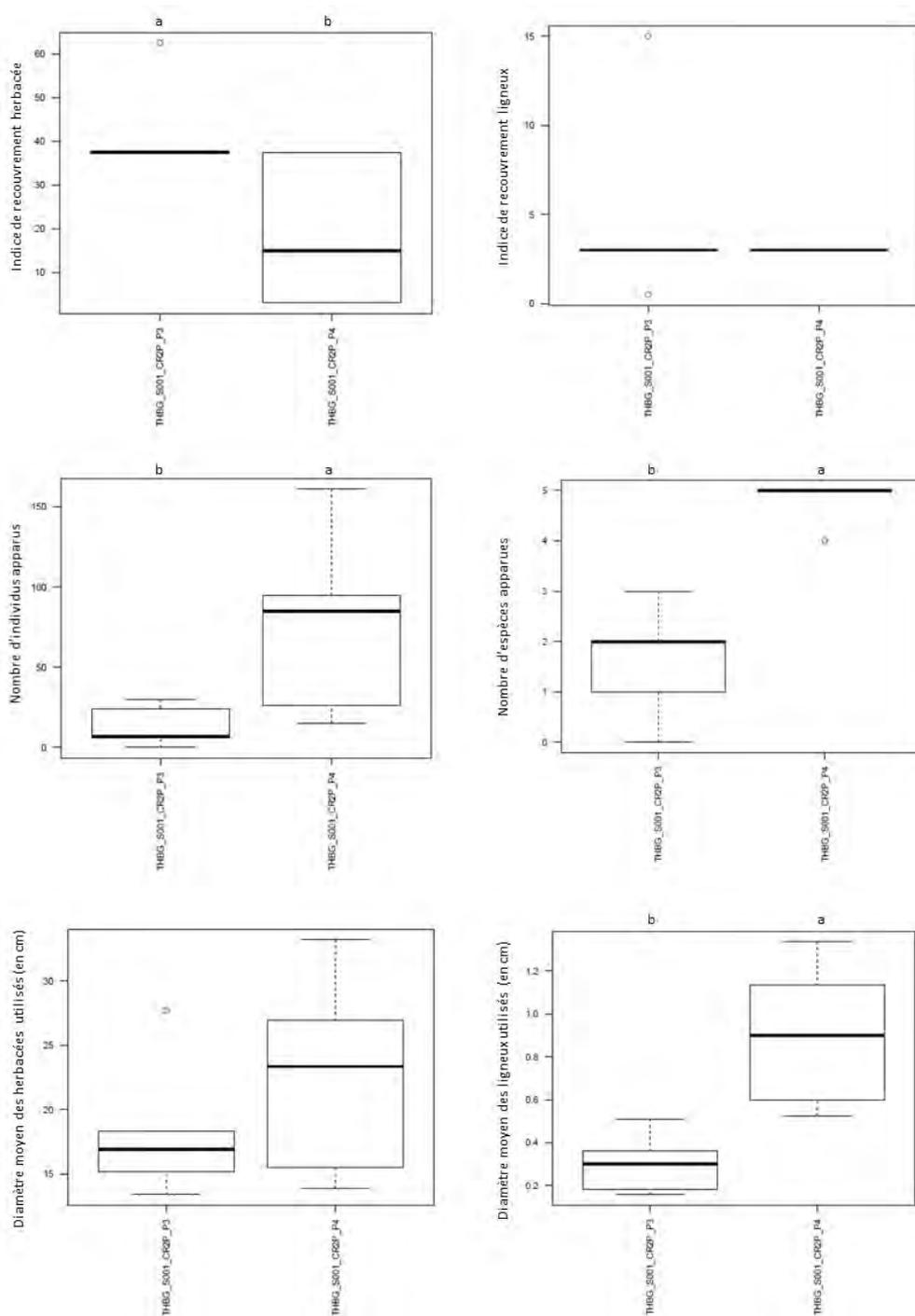


Figure 102 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur Paagoumène Crête 2.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

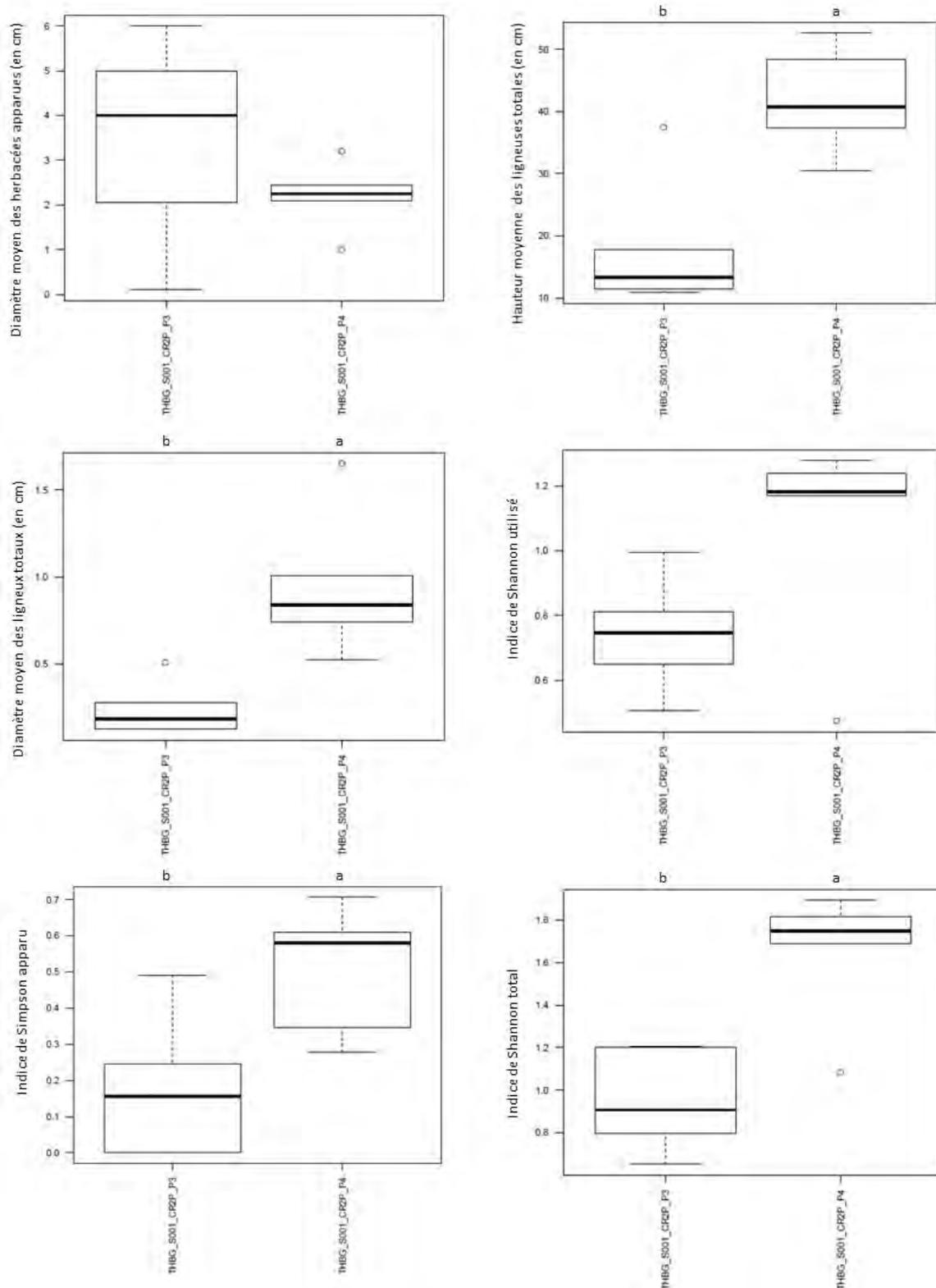


Figure 103 : Boxplot des variables sélectionnées pour l'étude sur Paagoumène Crête 2.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

Tableau 63 : Nombre d'espèces apparues utilisées et plantées pour chacune des modalités testées sur Paagoumène Crête 2

	Espèces apparues	Espèces utilisées	Espèces semées
TBGH_S001_CR2P_P3	5	8	
TBGH_S001_CR2P_P4	8	6	
Totaux	11	8	17

Tableau 64 : Espèces semées non retrouvées sur l'ensemble des modalités testées sur Paagoumène Crête 2

Metrosideros laurifolia
Grevillea exul rubiginosa
Scaevola montana
Xanthostemon aurantiacus
Schoenus juvenis

Tableau 65 : Espèces apparues retrouvées uniquement sur chacune des modalités testées sur Paagoumène Crête 2

TBGH_S001_CR2P_P3	TBGH_S001_CR2P_P4
<i>Nephrolepis cordifolia</i>	<i>Cloezia sp</i>
<i>Solmsia sp</i>	<i>Geissois pruinosa</i>
<i>Stenocarpus sp</i>	<i>Microsorium sp</i>
	<i>Polyscias sp</i>
	<i>Spathoglottis plicata</i>

Tiébaghi Paagoumène Crête 2 Partie 3 et Partie 4

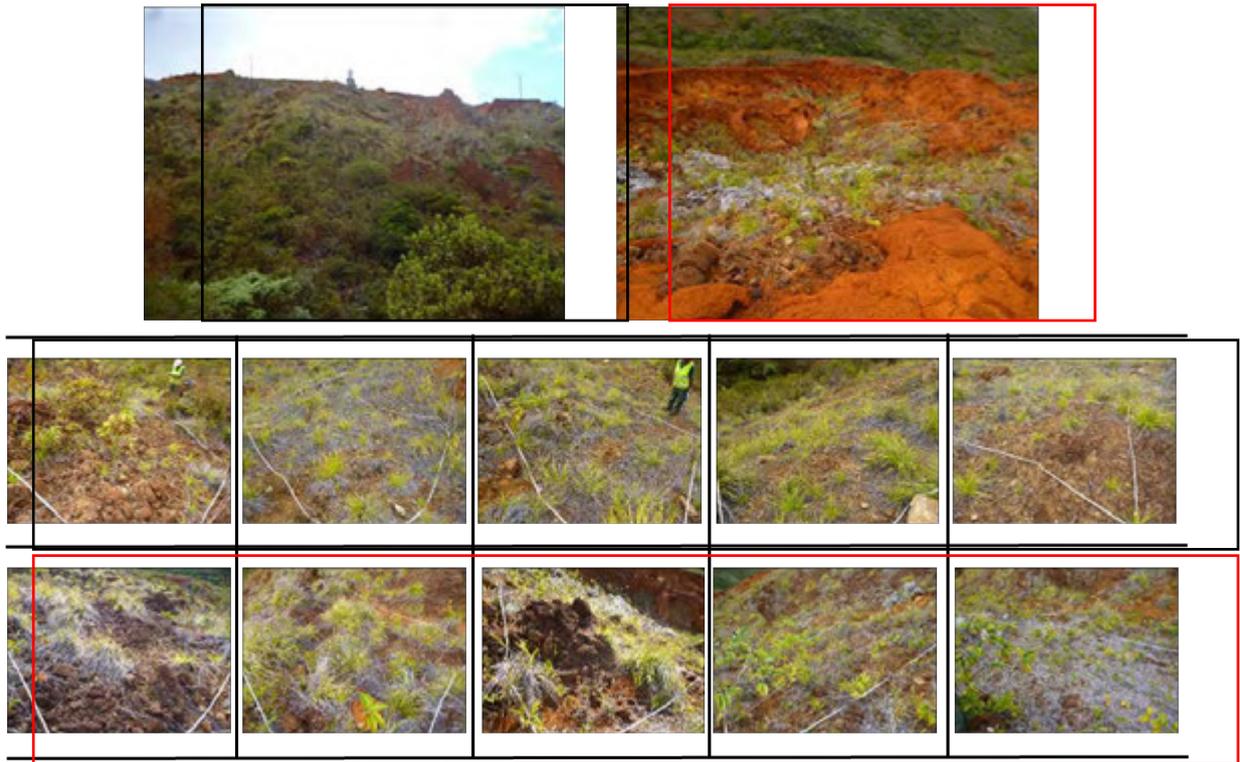


Figure 104 : Photos des différentes modalités classées en fonction de la classification hiérarchique (les couleurs sont celles que l'on retrouve dans la Figure 37)

6.7. ESPÈCES UTILISÉES OU APPARUES EN FONCTION DE LEUR AFFINITÉ AVEC LE TYPE DE SUBSTRAT

Tableau 66 : Liste des espèces utilisées ou apparues en fonction de leur affinité avec le type de substrat

	Latérite	Saprolite
Espèces utilisées retrouvées uniquement sur un type de substrat	<i>Acacia spirorbis</i>	<i>Arillastrum gummiferum</i>
	<i>Costularia pubescens</i>	<i>Cloezia artensis</i>
	<i>Gardenia aubryi</i>	<i>Codia albifrons</i>
	<i>Geissois pruinosa</i>	<i>Flagellaria indica</i>
	<i>Peripterygia marginata</i>	<i>Joinvillea plicata</i>
	<i>Stenocarpus comptonii</i>	<i>Oxera neriifolia</i>
	<i>Xanthostemon multiflorus</i>	<i>Scaevola cylindrica</i>
		<i>Serianthes calycina</i>
	<i>Storckiella pancheri</i>	
	<i>Syzygium ngoyense</i>	
Espèces utilisées présentant un bon développement	<i>Gymnostoma chamaecypris</i>	
	<i>Gymnostoma delancheanum</i>	
	<i>Cordyline neocaledonica</i>	
Espèces apparues uniquement sur un type de substrat	<i>Alphitonia neocaledonica</i>	<i>Costularia comosa</i>
	<i>Alstonia coriacea</i>	<i>Costularia nervosa</i>
	<i>Costularia arundinacea</i>	<i>Grevillea exul exul</i>
	<i>Dracophyllum ramosum</i>	<i>Phaius tancarvilleae</i>
	<i>Eriaxis rigida</i>	<i>Schoenus neocaledonicus</i>
	<i>Gymnostoma deplancheanum</i>	
	<i>Lepidosperma perteres</i>	
	<i>Longetia buxoides</i>	
	<i>Scaevola cylindrica</i>	

6.8. COMPLÉMENT À L'ANALYSE MATHÉMATIQUE GLOBALE

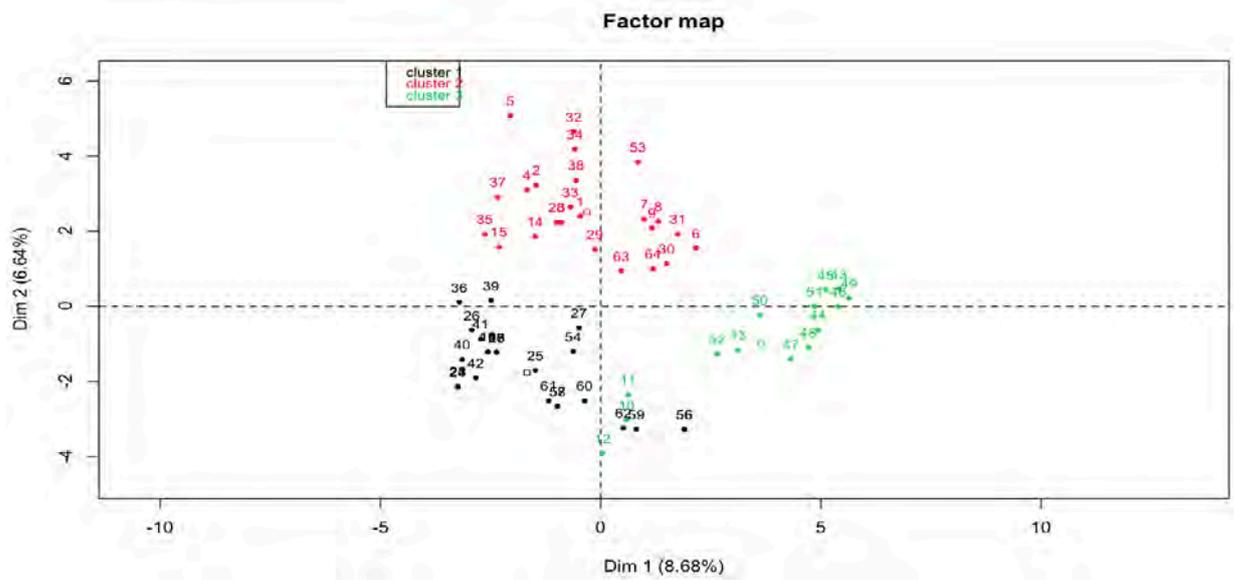


Figure 105 : Analyse factorielle de données mixtes réalisée avec 23 variables

Tableau 67 : Description des variables caractérisant les 3 clusters issus de l'AFDM réalisée à partir de 23 variables

- Variables dont le pourcentage est très élevé (proche de 100)
- Variables dont le pourcentage est nul
- Interprétation des variables quantitatives

I

Variables_caractéristiques_v7_23_VAR		
Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
GRAVIERS = [>50[	ALIZEE = oui	TECHNIQUE = SH
PIERRES = 0	TECHNIQUE = PL	PAILLAGE = non
SUBSTRAT = top_soil	NBRESPEXO = 0	HYDRORET = non
ALIZEE = non	INDURATION = meuble	DESIGNATION = talus
HYDRORET = oui	PAILLAGE = oui	ALIZEE = non
NBRESPEXO = 0	NBRESPMAQUIS = CORREL.POSI	GRAVIERS = 0
ORIENTATION = Ouest	PENTE = CORREL.NEG	ALIZEE = oui
ORIENTATION = Sud-Ouest		ORIENTATION = Sud-Ouest
TECHNIQUE = PL		DESIGNATION = plateforme
PLUVIO = 1376,925		PAILLAGE = oui
GRAVIERS = [5_15[		HYDRORET = oui
PIERRES = [30_50[		TECHNIQUE = PL
PIERRES = [5_15[		PENTE = CORREL.POSI
TERRE_FINE = [15_30[
ORIENTATION = Sud-Est		
TECHNIQUE = SH		
ALIZEE = oui		
ECODOMI_DIST = CORREL.NEG		
NBRESPMAQUIS = CORREL.NEG		

Tableau 68 : Tableau de composition des clusters issus de l'AFDM réalisée à partir de 23 variables

Classif_V7_23_VAR		
Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
GORO_USINE_COLA_T0	BOUA_KG_DS_SZ01	GORO_BN4_VF_SZ01
GORO_USINE_COLA_T1	CBG_MONA_MS_SZ01	GORO_BN4_VF_SZ02
GORO_USINE_COLA_T2	CBG_MONA_MS_SZ02	GORO_BN4_VF_SZ03
GORO_USINE_COLA_T3	CBG_RED_VP_SZ01	GORO_FER_VEM_VEM7
GORO_USINE_COLA_T5	CBG_RED_VP_SZ02	PP_AC2_T01_SZ-C
GORO_USINE_CR7_SZ01	CDS_NING_AEC_ZA	PP_AC2_T01_SZ-E
GORO_USINE_CR7_SZ02	CDS_NING_CREP_EXT	PP_AC2_T02_SZ-B
GORO_USINE_CR7_SZ03	CDS_NING_CREP_HT	THBG_S001_CR2P_P3
GORO_USINE_CR7_SZ04	CDS_NING_Z001_E508	THBG_S001_CR2P_P4
GORO_USINE_RDP_SZ01	GORO_KUE_RPB_SZ01	THBG_S001_GV03_SZ01
GORO_USINE_SMSP_SZ01	GORO_KUE_RPB_SZ02	THBG_S001_GV06_SZ01
GORO_USINE_SMSP_SZ02	GORO_USINEKUE_A1_SZ01	THBG_S001_VHTE_SZ01
MDORE_ROUV_Z001_SZ01_3	GORO_USINEKUE_A1_SZ02	THBG_S001_VP_PS
NKY_LU_VD_SZ01	KNBO_S001_640_SZ01	THIO_MOUL_Z001_SZ01
NKY_LU_VP_PN01	KNBO_S001_TRAZ_SZ01	
NKY_LU_VP_PN02	KOUA_MEA_MMMR_SZ01	
NKY_LU_VP_PS01	KRB_M37_Z001_CSO	
TONTT_S001_Z001_1	KRB_M37_Z001_VL20	
TONTT_S001_Z001_2	MDORE_ROUV_Z001_SZ01_2	
TONTT_S001_Z001_3	MDORE_ROUV_Z001_SZ01_6	
TONTT_S001_Z001_4	MDORE_ROUV_Zser_SZ01	
TONTT_S001_Z001_5	PP_AC2_T01_SZ-B	
TONTT_S001_Z001_6	TOMO_S001_VFM_SZ01	
TONTT_S001_Z001_7	PORO_VDT_DEC_SZ01	
TONTT_S001_Z001_8		
VULC_SRED_MD04_SZ01		

6.9. ANNEXE 8 : BOXPLOTS CONCERNANT LES DONNÉES COMPARATIVES DES VARIABLES UTILISÉES, EN VUE DE LES COMPARER POUR LEUR ÉVOLUTION VERS LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE.

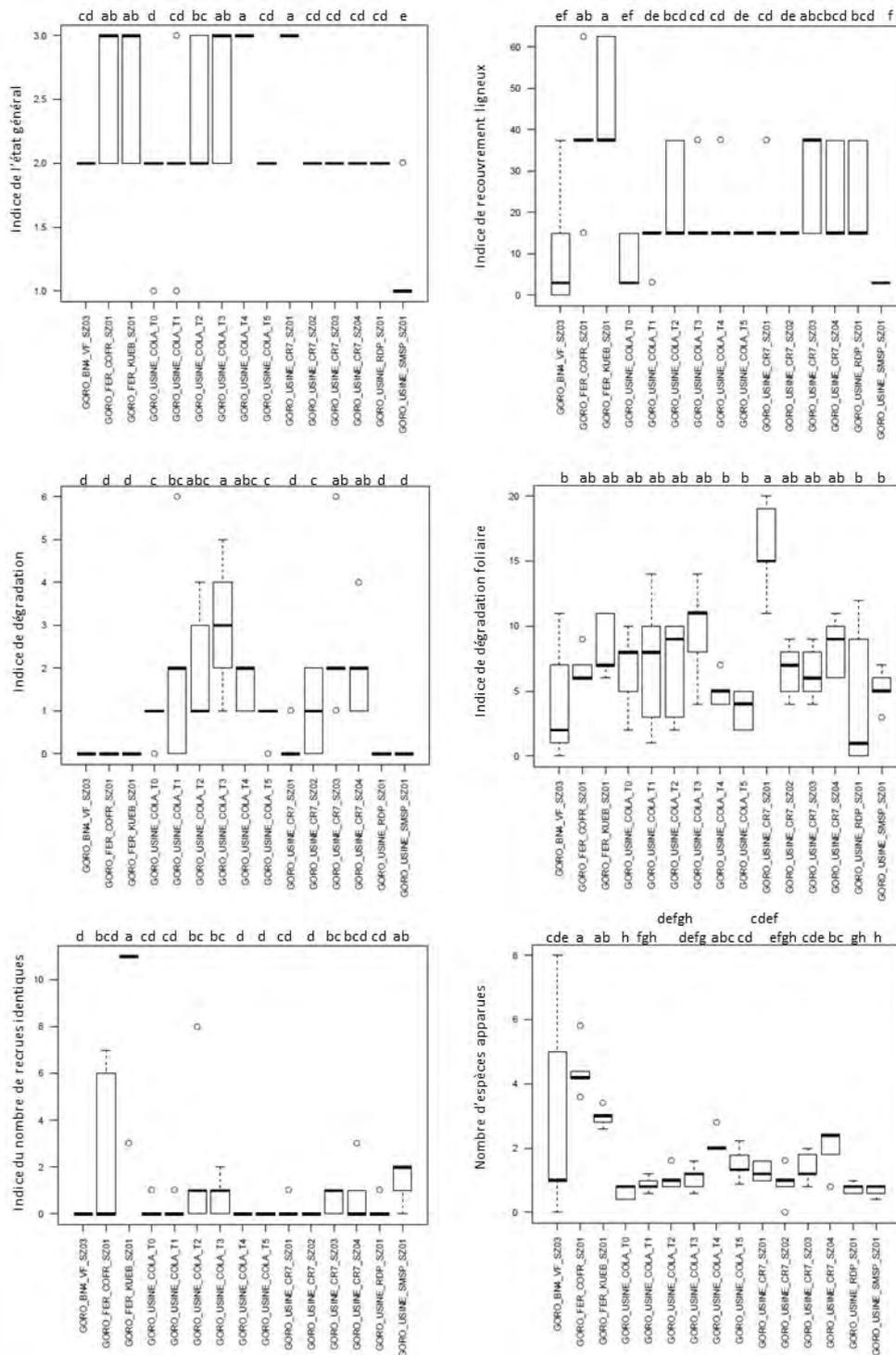


Figure 106 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 1.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

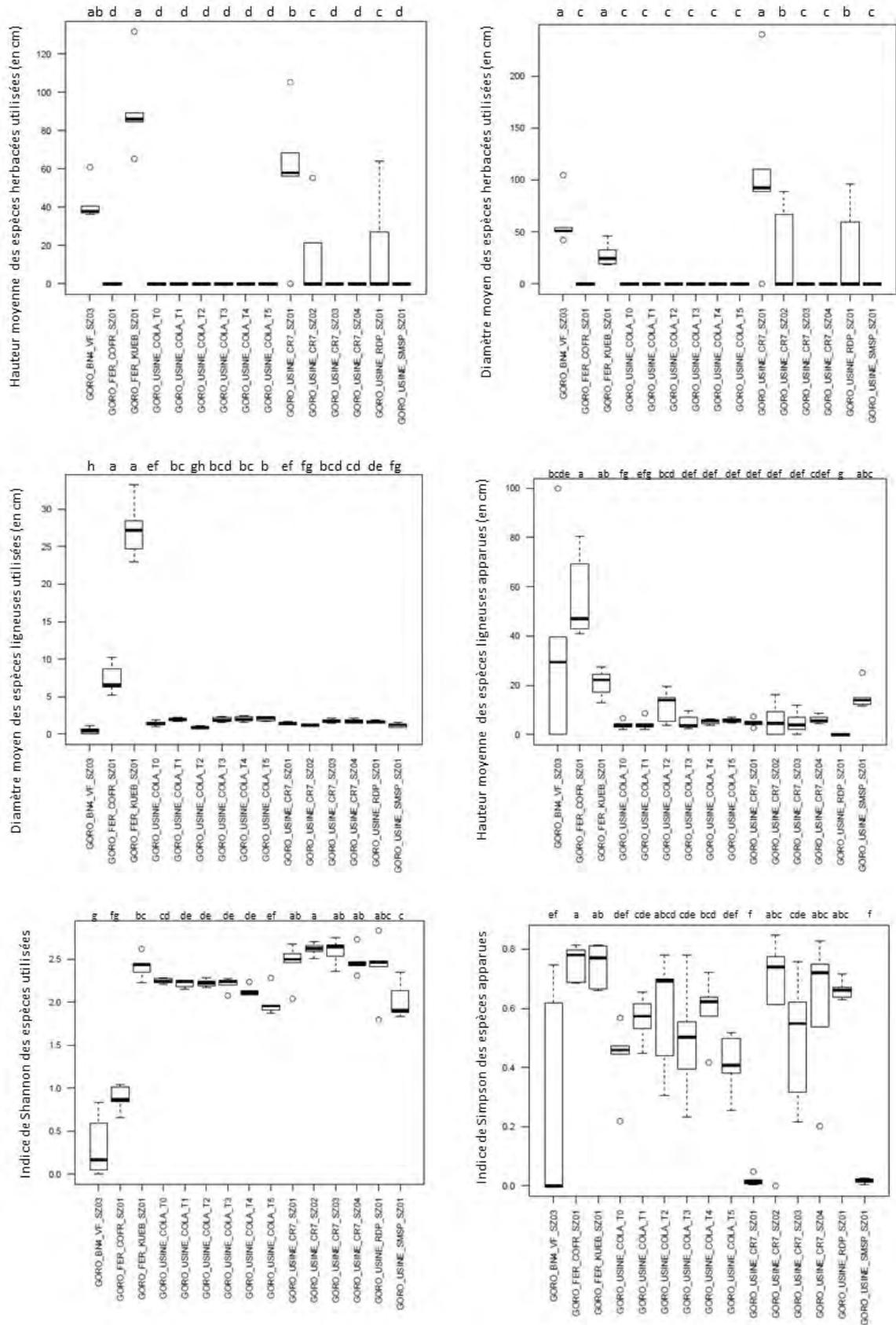


Figure 107 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 1.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

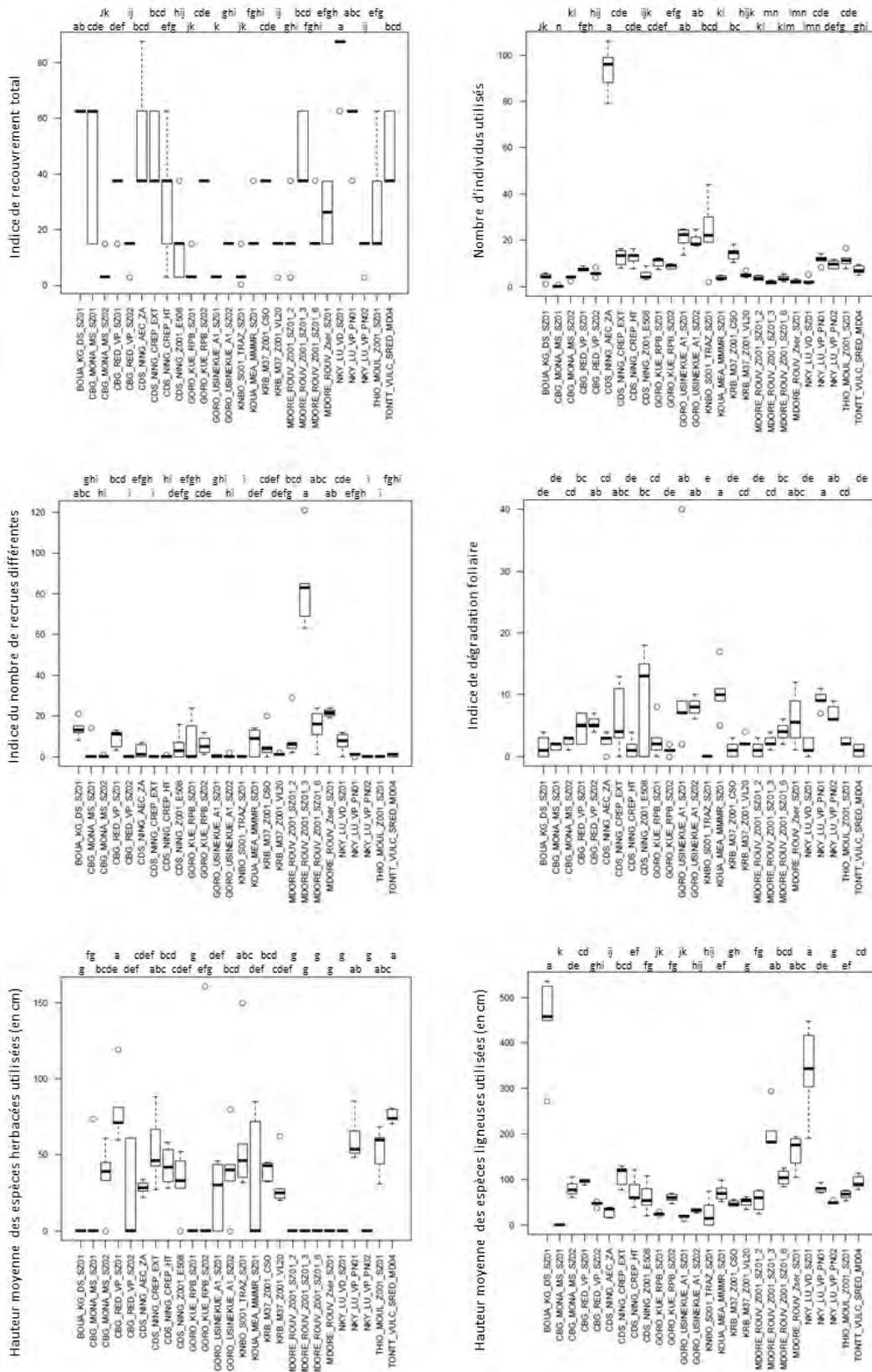


Figure 108 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 2.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

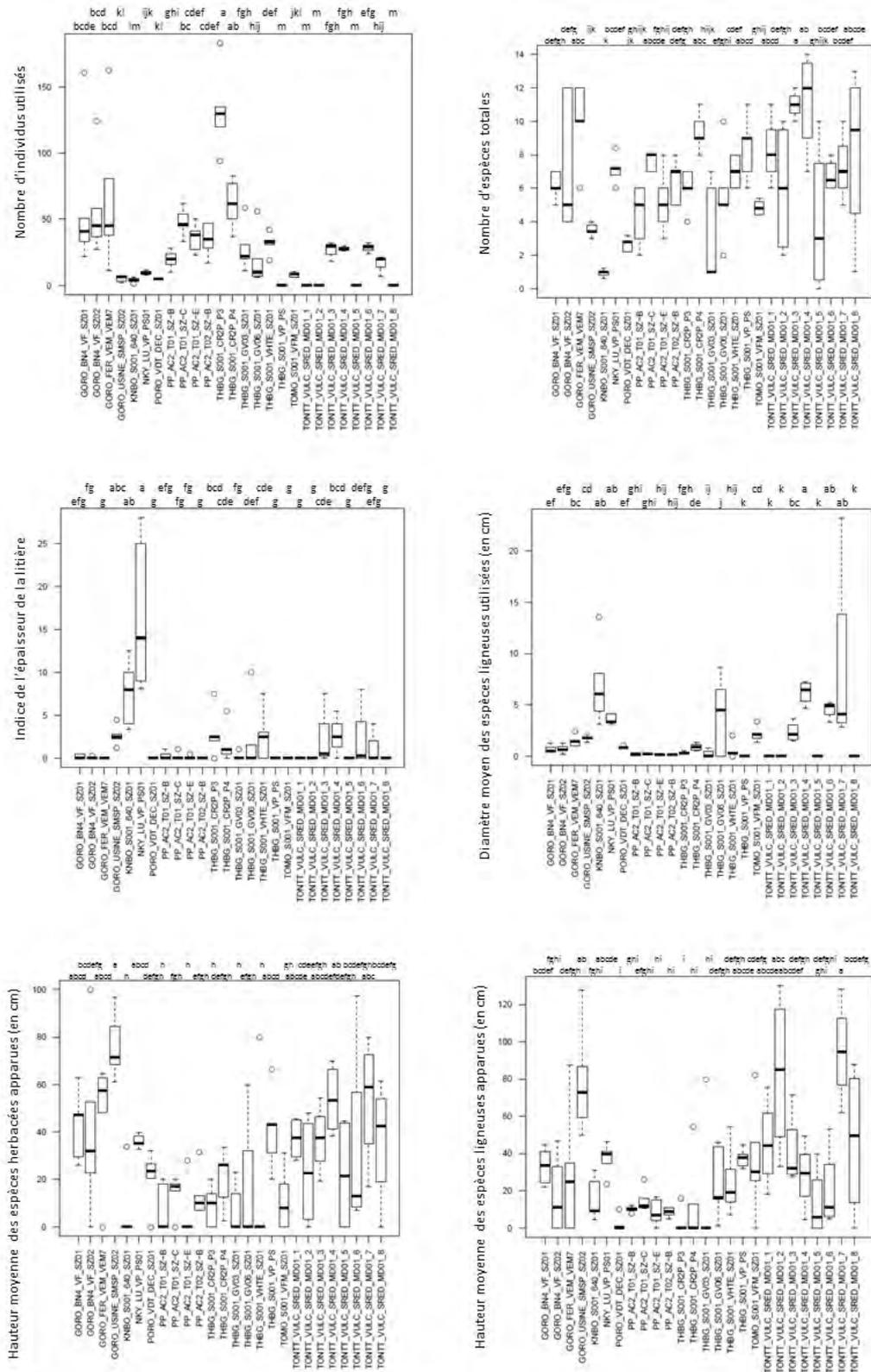


Figure 110 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 3.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

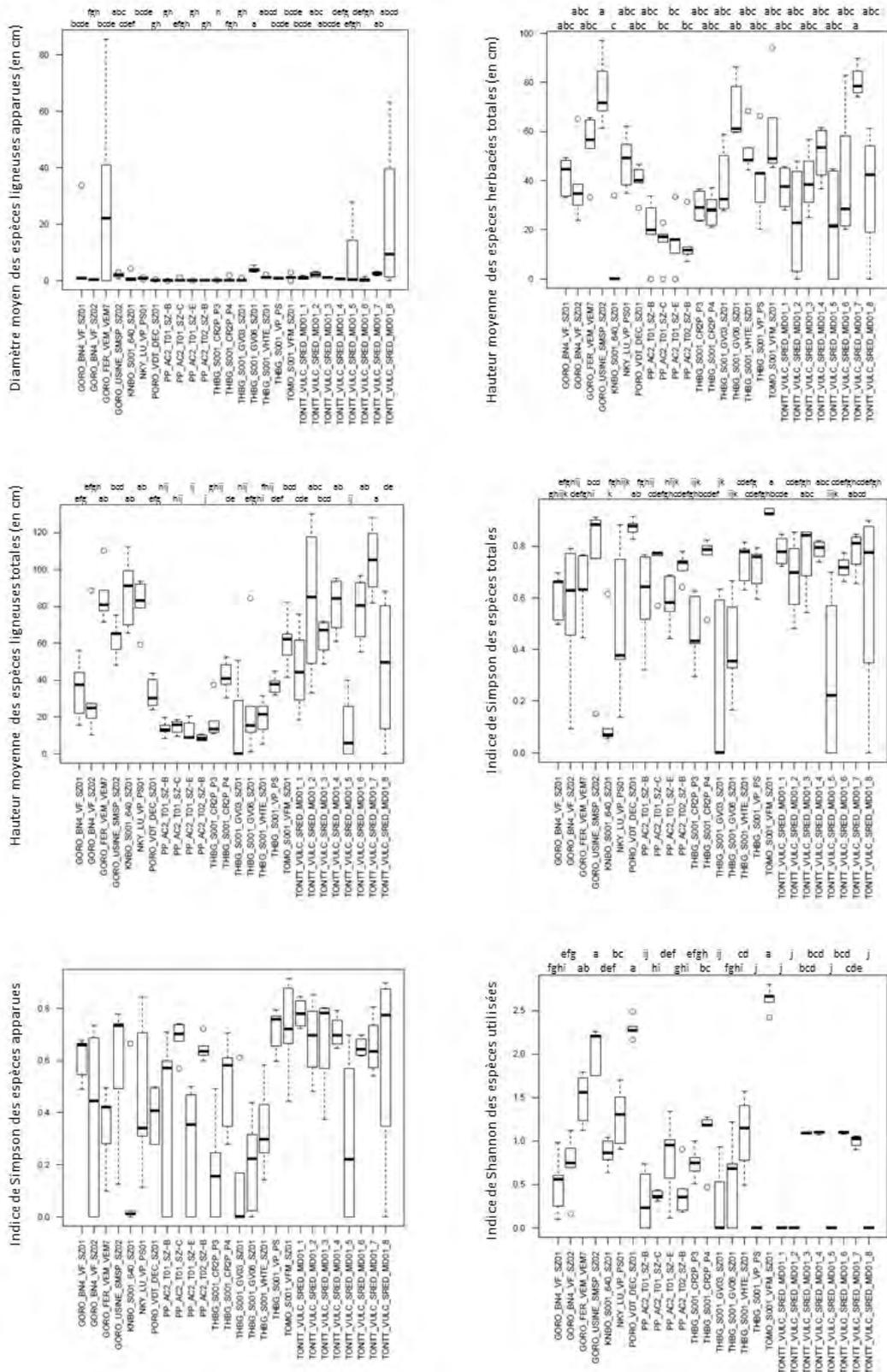


Figure 111 : Boxplot des variables sélectionnées pour le cluster 3.

Les lettres de significativités sont issues d'une analyse de comparaison de variance. Les zones qui possèdent des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les graphiques ne présentant pas de lettres ne présentent pas de différences significatives entre les traitements

6.10. PHOTOS DES SOUS-ZONES (MODALITÉS) ÉTUDIÉES

Boualoudjelima



Cap Bocage Mona Sud sous-zone 1



Cap Bocage Mona Sud sous-zone 2



Cap Bocage réduite sous-zone 1



Cap Bocage réduite sous-zone 2



Camp des sapins – Ningua Essai 508



Camp des sapins – Crépuscule Extérieur



Camp des sapins – Crépuscule Haut



Camps Des Sapins Ningua Zone A



Goro Usine Kue Mine A1 sous-zone 1



Goro Usine Kue Mine A1 sous-zone 2



Goro FER COFREMI



Goro Baie Nord 4 Verse Ferry sous-zone 1



Goro Baie Nord 4 Verse Ferry sous-zone 2



Goro Baie Nord 4 Verse Ferry sous-zone 3



Goro Usine Col de l'antenne T0



Goro Usine Col de l'antenne T1



Goro Usine Col de l'antenne T2



Goro Usine Col de l'antenne T3



Goro Usine Col de l'antenne T4



Goro Usine Col de l'antenne T5



Goro Usine CR7 sous-zone 1



Goro Usine CR7 sous-zone 2



Goro Usine CR7 sous-zone 3



Goro Usine CR7 sous-zone 4



Goro FER Kuebini



Goro Usine Route du port



Goro Kue Route de Port Boisé sous-zone 1



Goro Kue Route de Port Boisé sous-zone 2



Goro Verse SMSP sous-zone 1



Goro Verse SMSP sous-zone 2



Goro FER Verse de l'Exercice Minier



Karembé Carrière Sud Ouest



Karembé Verse L20



Koniambo 640



Koniambo Trazy Essai UNC



Kouaoua Mont Martre Mont Rêve



Mont Dore De Rouvray Parcelle 2



Mont Dore De Rouvray Parcelle 3



Mont Dore De Rouvray Parcelle 6



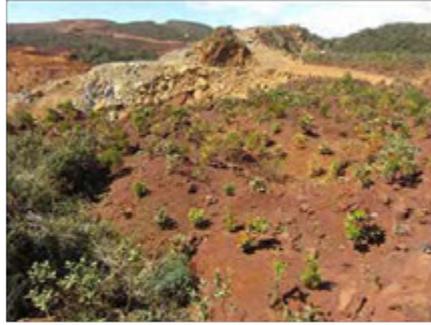
Mont Dore De Rouvray Essai Serianthes



Nakéty Lucienne Verse Domergue



Nakéty Verse principale PN01



Nakéty Verse principale PN02



Nakéty Lucienne Verse Principale PS01



Pinpin verse AC2 Talus 1 B



Pinpin verse AC2 Talus 1 C



Pinpin verse AC2 Talus 1 E



Pinpin verse AC2 Talus 2 B



Poro Vallée des Tritouts Décharge



Tiébaghi Verse Principale Partie Sud



Tiébaghi Grande verse Partie 2003



Tiébaghi Grande verse Partie 2006



Tiébaghi Verse Haute



Tiébaghi Paagoumène Crête 2 Partie 3



Tiébaghi Paagoumène Crête 2 Partie 4



Thio Plateau Les Moulinets



Tomo Verse Face Mer



Tontouta Vulcain Module 01 Essai IAC 1



Tontouta Vulcain Module 01 Essai IAC 2



Tontouta Vulcain Module 01 Essai IAC 3



Tontouta Vulcain Module 01 Essai IAC 4



Tontouta Vulcain Module 01 Essai IAC 5



Tontouta Vulcain Module 01 Essai IAC 6



Tontouta Vulcain Module 01 Essai IAC 7



Tontouta Vulcain Module 01 Essai IAC 8



Tontouta Vulcain Module 04



