ETUDE DES CONDITIONS DE REPRISE DE LA VEGETATION SUR LES SITES MINIERS ALLUVIONNAIRES

RAPPORT FINAL

JUILLET 2016

Etude des conditions de reprise de la végétation sur les sites miniers alluvionnaires

Juillet 2016

Responsable d'Etude :

Salomon Ludovic / BIOTOPE

Brunstein Elodie / SOLICAZ

Laloua Michael / GEO Plus environnement

Commanditaire :

DEAL GUYANE. Service « Risques, Énergie, Mines et Déchets ». Faoucher Guy

Table des matières

I. CONTEXTE DE L'ETUDE 3

II. EXIGENCES DU CAHIER DES CHARGES 4

III. PORTEURS DE PROJETS ET PARTENAIRES 5

IV. METHODOLOGIE GLOBALE DE L'ETUDE 7

IV.3 ANALYSE DE LA VEGETATION 10

IV.3.1 Pourquoi s'intéresser à la reprise de la végétation. 10

IV.3.2 Méthodologie générale employée 10

IV.3.3 Rappel de l'étude menée en 2008 par l'ONF 11

IV.4 ANALYSE PEDOLOGIQUE 13

IV.4.1 Pourquoi s'intéresser aux sols 13

IV.4.2 Méthodologie employée : Les bio-indicateurs de qualité des sols 13

IV.4.3 Rappel de l'étude menée en 2008-2009 par l'UMR Ecofog 15

V. EVALUATION DE LA REPRISE DE LA VEGETATION 18

V.1 PHOTO INTERPRETATION DES FORMATIONS VEGETALES 18

V.1.1 Méthodologie 18

V.1.2 Résultats des photo-interprétations et des analyses diachroniques 21

V.2 INVENTAIRE BOTANIQUE A LA PARCELLE 50

V.2.1 Méthodologie 50

V.2.2 Résultats des inventaires à la parcelle. 51

V.3 SYNTHESE SUR L'ANALYSE DE LA REPRISE DE LA VEGETATION 62

VI. EVALUATION DE LA QUALITE DES SOLS 63

VI.1 PROTOCOLE D'ECHANTILLONNAGE 63

VI.1.1 Stratification végétale 64

VI.1.2 Prélèvements de sol 64

VI.2 COMPILATION ET TRAITEMENT DES DONNEES 65

VI.2.1 Traitement des données relatives 65

VI.2.2 Données complémentaires 65

VI.2.3 Traitement des combinaisons de modalités pour s'affranchir de tout biais d'interprétation 66

VI.2.4 Analyses statistiques 66

VI.3 RESULTATS 67

VI.3.1 Etude comparative des sites entre 2008 et 2015 67

VI.3.2 Conclusion de l'étude comparative sur les types régénérés 70

VI.3.3 Impact du type de réhabilitation sur l'évolution du fonctionnement biologique des sols au cours du temps 70
VI.3.4 Impact de la revégétalisation sur le fonctionnement biologique des sols 74
VI.3.5 Effet de la largeur du flat sur la qualité du sol 77
VI.3.6 Prédiction de la reprise de la végétation par les bio-indicateurs du sol 78
VI.4 SYNTHESE GENERALE DES RESULTATS SUR LES SOLS 82
VII. TRANSCRIPTION TECHNIQUE ET PROPOSITION DE METHODES D'EXPLOITATION ET DE REHABILITATION FAVORISANT LA REPRISE DE LA VEGETATION 83
VII.1 ORGANISATION DES ACTIONS D'EXPLOITATION ET DE REAMENAGEMENT 84
VII.1.1 Présentation schématique et conceptuelle du principe de réaménagement coordonné 84
VII.1.2 Organisation d'un chantier alluvionnaire en vue d'optimiser le réaménagement 89
VII.2 BONNES PRATIQUES ET PRECONISATIONS POUR LA PHASE DE DEFRICHEMENT 91
VII.2.1 Avant le défrichement 91
VII.2.2 Lors du défrichement 92
VII.3 BONNES PRATIQUES ET PRECONISATIONS POUR LE DECAPAGE ET LE STOCKAGE SELECTIFS DE L'HORIZON SUPERFICIEL DU SOL 94
VII.4 BONNES PRATIQUES ET PRECONISATIONS POUR LA REMISE EN ETAT DU SOL ET DU SOUS-SOL 96
VII.4.1 Organisation générale de la remise en état du sol et du sous-sol 97
VII.4.2 Qualité et quantité des matériaux 97
VII.4.3 Conditions de mise en place des différents horizons du sol et du sous-sol 100
VII.4.4 Travail final du sol, préparation à la revégétalisation 107
VII.5 BONNES PRATIQUES ET PRECONISATIONS POUR LA REVEGETALISATION 109
VII.5.1 Obligation 109
VII.5.2 Mise en œuvre 109
VII.5.3 Réalisation de la phase de révégétalisation : 111
VII.5.4 Perspectives d'amélioration : nouvelles espèces et technique innovante : 118
VII.6 TABLEAU SYNTHETIQUE DES PRESCRIPTIONS PERMETTANT DE FAVORISER LE RETOUR DE LA VEGETATION VERS DES FORMATIONS VEGETALES FORESTIERES 119
VIII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES 120
IX. BIBLIOGRAPHIE 123
X. LISTE DES FIGURES ET SCHEMAS 125
XI. ANNEXE 128

I. Contexte de l'étude

L'orpaillage alluvionnaire est une activité minière menée en Guyane de manière industrielle depuis près de vingt ans (plus de 330 AEX délivrées depuis 1999). L'extraction du minerai dans le lit des cours d'eau et les terrasses alluviales impliquent des impacts importants sur les milieux d'origines (déforestation de forêt de flat, détournement de cours d'eau, destruction du sol). Différents itinéraires techniques d'exploitation, de réhabilitation et revégétalisation ont été élaborés et mis en place afin d'avoir une gestion efficace des terres mobilisées et de faciliter la reprise de la végétation.

La DEAL et l'ONF Guyane, souhaitant connaître la pertinence de ces différentes méthodes, ont mené en 2008-2009 une expertise sur différents sites miniers post-exploitation. L'un des sujets abordés était celui de la reprise de la végétation et avait porté sur 7 sites dans l'Est Guyanais (secteurs de Coralie et Bélizon).

Les variabilités inter-sites, vis-à-vis de la largeur de flat exploité, des méthodes d'exploitation (profondeur des bassins, orientation, taille des bassins…), de la réhabilitation effectuée (au bulldozer ou à la pelle hydraulique, remise de sol forestier ou non, ouverture de bassins…) et de revégétalisation (assistée ou non, avec ou sans nodulation) avaient rendu difficile la formulation de conclusions. De ce fait, cette expertise n'avait pu déboucher sur des recommandations concernant les moyens susceptibles de favoriser la reprise de la végétation et la régénération du sol en vue d'un retour vers un état proche de l'état initial des sites exploités.

Les préconisations de l'expertise 2008 recommandaient ainsi la nécessité d'une phase d'observation plus longue des sites par une analyse diachronique des sites permettant de mieux cerner l'évolution de la végétation et des sols.

La DEAL a souhaité ainsi disposer d'une seconde phase d'analyse, orientée principalement sur la reprise de la végétation, et concluant sur des recommandations techniques pertinentes.

En effet, en l'absence de ces conclusions et recommandations, les techniques et situations continuent à être très différentes en fonction des exploitations. Cela rend d'autant plus difficile l'évaluation, par des indicateurs fiables, de la suffisance des travaux de remise en état sur les sites miniers actuels. Afin de répondre aux exigences juridiques en matière de réhabilitation de sites miniers, il est indispensable que les opérateurs miniers soient en possessions de protocoles adaptés et approuvés favorisant le retour du site à un état naturel.

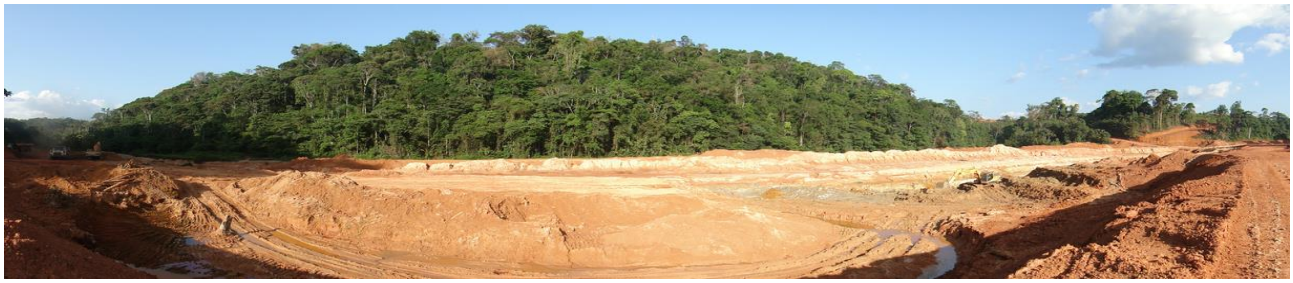


Figure 1 : Barranque en exploitation sur un site minier alluvionnaire.

II. Exigences du cahier des charges

La DEAL désirait ainsi que cette étude sur « les conditions de reprise de la végétation sur les sites miniers » aboutisse à des propositions techniques pertinentes à la fois pour les opérateurs miniers que pour les services administratifs concernés et les bureaux d'études traitant des mesures de réhabilitation dans le cadre d'élaboration de dossiers d'autorisation d'exploitation et des suivis de chantier.

Les objectifs de cette nouvelle étude sont :

- **De prolonger l'expertise menée en 2008-2009**, sur le thème particulier de la reprise de la végétation. Les sites expertisés feront préférentiellement l'objet d'un nouvel examen de leur état, afin de constater si les situations observées en 2008-2009 se sont confortées ou non et d'analyser les évolutions.
- **D'affiner cette expertise**, notamment en inventoriant plus précisément les espèces présentes sur les sites en cours de revégétalisation
- **De déterminer les conditions** influençant la reconstitution des habitats naturels détruits
- **De proposer aux opérateurs miniers des techniques** adéquates afin de favoriser cette reconstitution.

Figure 2 : Rapport de l'expertise minière de 2008

Les points importants du cahier des charges :

Reprise de l'expertise 2008
Compléter les inventaires botaniques

Affiner les conclusions

Transposer les résultats en mesures concrètes.

III. Porteurs de projets et partenaires

Afin de répondre aux exigences de cette étude nous avons proposé un groupement de bureaux d'étude et d'entreprise mettant à disposition les qualifications et l'expérience nécessaire pour l'ensemble des thématiques abordées lors de cette mission. En effet, notre **groupement BIOTOPE – SOLICAZ – GéoPlusEnvironnement allie compétences et expériences que ce soit en matière de réhabilitation et de revégétalisation de sites miniers, d'inventaire botanique, d'analyse de sols, de cartographie, de méthode d'exploitation aurifère, de connaissance de l'historique minier guyanais.**

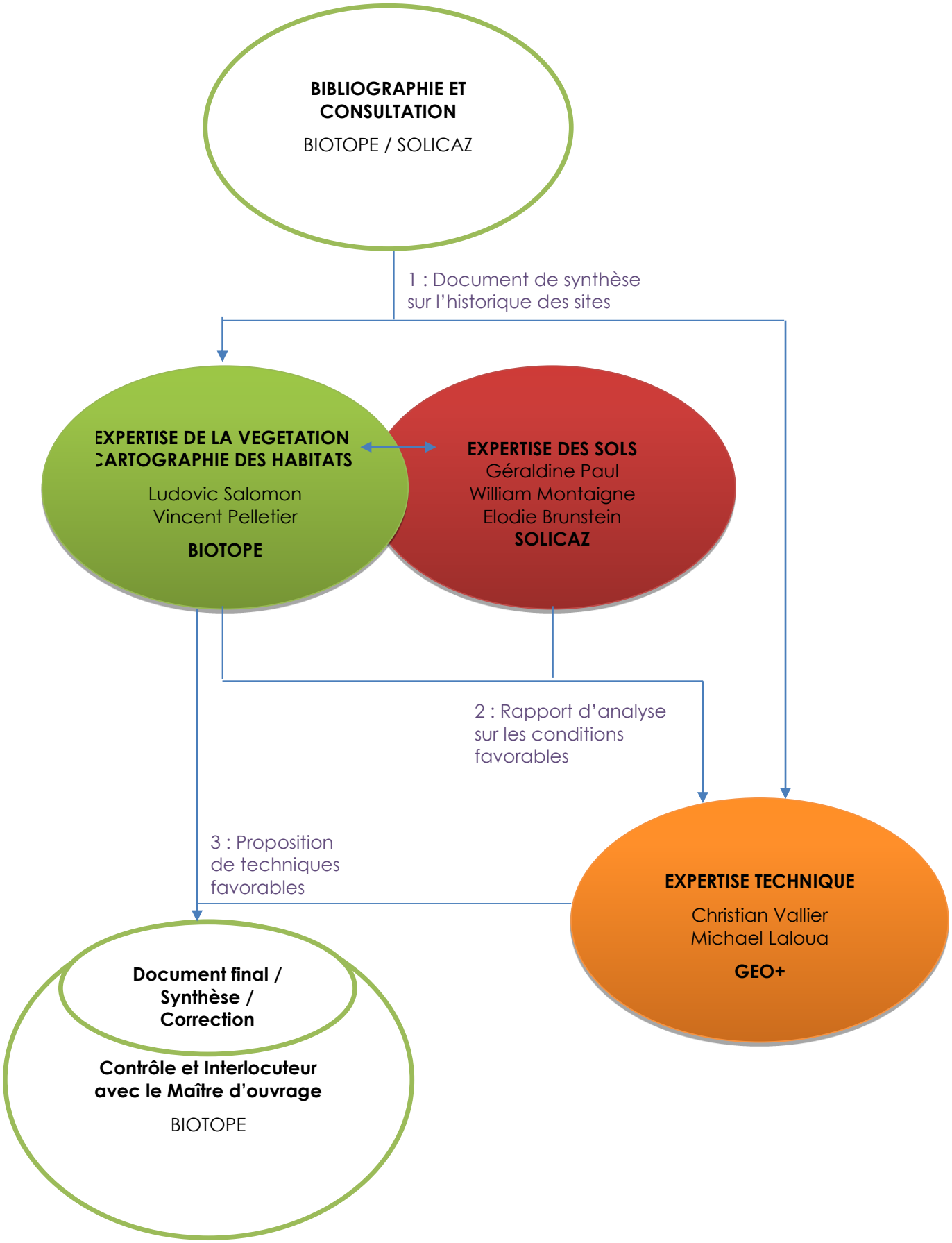
Chaque phase technique de l'étude a été traitée par le bureau d'étude ou l'entreprise spécialiste du domaine concerné :

Biotope, bureau d'étude spécialisé en expertises sur les milieux naturels (faune, flore, écologie), a traité l'inventaire floristique et la cartographie des sites. Via son agence implantée depuis 5 ans en Guyane, Biotope entretien des relations de confiance tant avec les services administratifs qu'avec le secteur minier professionnel. Biotope s'est également occupé du recueil et de la compilation des données lors de la phase d'analyse bibliographique sur l'historique des sites.

Solicaz, jeune entreprise innovante notamment pour ses outils de diagnostics de qualité des sols et ses actions de revégétalisation et d'ingénierie écologique mis en œuvre dans le cadre de multiples études dans le secteur minier, a apporté son expertise dans l'évaluation et la restauration du fonctionnement biologique des sols.

GéoPlusEnvironnement (« GEO+ »), bureau d'étude possédant une forte expérience en matière de technique d'exploitation minière, a mis en forme les préconisations techniques touchant tant à la phase d'exploitation que celle de réhabilitation.

BIOTOPE, bureau d'étude mandataire du groupement, a assuré la gestion des équipes intervenantes, une uniformisation des documents produits et a effectué un contrôle qualité sur les productions intermédiaires et finales. Enfin, BIOTOPE a été **l'interlocuteur principal auprès de la DEAL**.


BIBLIOGRAPHIE ET CONSULTATION
BIOTOPE / SOLICAZ
1 : Document de synthèse sur l'historique des sites
EXPERTISE DE LA VEGETATION CARTOGRAPHIE DES HABITATS
Ludovic Salomon
Vincent Pelletier
BIOTOPE
EXPERTISE DES SOLS
Géraldine Paul
William Montaigne
Elodie Brunstein
SOLICAZ
2 : Rapport d'analyse sur les conditions favorables
3 : Proposition de techniques favorables
EXPERTISE TECHNIQUE
Christian Vallier
Michael Laloua
GEO+
Document final / Synthèse / Correction
Contrôle et Interlocuteur avec le Maître d'ouvrage
BIOTOPE

IV. Méthodologie globale de l'étude

IV.1 Phase documentaire

Cette phase est intervenue dès le début de l'étude afin de recueillir et de compiler les données historiques des sites miniers ciblés par cette étude. Elle nous a permis de choisir les sites à étudier et d'ajuster la méthodologie d'inventaire (sol et végétation) afin d'obtenir des résultats pertinents et d'aboutir à des conclusions et des recommandations adaptées.

Pour cela nous nous sommes appuyés sur l'analyse de la bibliographie disponible et la rencontre d'acteurs pouvant apporter des informations sur l'histoire du site (opérateurs miniers, bureaux d'étude, PTMG, ONF, DEAL, ...). La consultation des différents acteurs intervenants dans la filière minière a permis une meilleure connaissance des zones étudiées lors de l'étude 2008 et une définition plus fine des zones à étudier (anciennes et nouvelles).

Nous avons dans la mesure des disponibilités recueillis les données suivantes :

- Historique de l'exploitation minière du site, date d'exploitation par le minier, méthode d'exploitation, date et méthode de réhabilitation ;
- Largeur de flat, largeur de cours d'eau, hauteur des crues ;
- Végétation initiale, stock ou non de la terre végétale, revégétalisation assistée ou non ;
- Réhabilitation avec ouverture des bassins, condamnation du canal de dérivation, écrêtage des cônes de graviers, re-profilage des berges, utilisation de pelle hydraulique ou bulldozer
- Accessibilité des sites, exploitation légale ou illégale en cours

Figure 3 : Pelle hydraulique effectuant des travaux de réhabilitation

A la fin de cette phase de consultation et de bibliographie, une synthèse des éléments recueillis a été réalisée en incluant une différenciation par site afin de faciliter le choix des zones d'études.

IV.2 Choix des sites

Au regard des premiers éléments recueillis, plusieurs sites miniers de l'expertise de 2008 sont devenus inaccessibles. Certains ont également fait l'objet d'une nouvelle exploitation légale ou illégale. Nous avons donc retenu les sites accessibles par des pistes empruntées pour éviter une perte de temps et limiter les risques d'inaccessibilités par route et/ou limiter les coûts (transport en hélicoptère). Il s'agit des sites Yaoni, Grand Yaoni, Georgeon, Boulanger et Mouflet accessibles par les pistes Coralie, Boulanger et Bélizon. Un sixième site a été intégré à cette liste : il s'agit d'un site alluvionnaire de la Société Minière de Ste Elie, réhabilité et revégétalisé dans le cadre du projet Guyafix.

L'étude se base ainsi sur un effectif de 6 sites pour lesquels une expertise de la flore et de la régénération du sol ont été menés sur le terrain.

Ces sites, ainsi que Jablot, Laboue, Grand Chardy et Guadeloupe, ont également fait l'objet d'une analyse diachronique de la reprise de leur végétation par photo-interprétation des formations végétales. Ils ont été retenus en raison de leur historique et de leur représentativité en matière de condition d'exploitation.

Seul le site de Formélia, étudié en 2008, a été écarté de l'étude puisqu'il a fait l'objet d'une nouvelle exploitation.

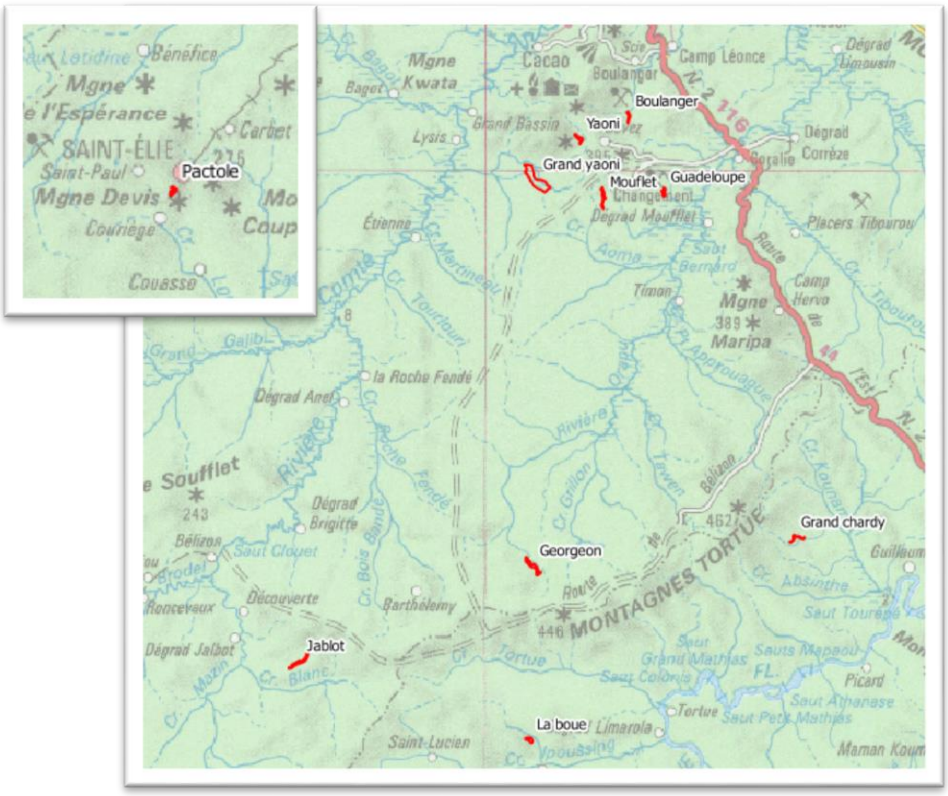


Figure 4 : Localisation des sites étudiés en 2008 ou 2015

	Synthèse des connaissances sur les sites étudiés																
	Site	**EXPLOITANT**	**Titre**	**Date exploitation**	**Réhabilitation**	**Revégétalisation**	**fixateur**	**Largeur flat**	**Photos aériennes IGN 2005**	**Photos aériennes Siage 2008**	**Surface végétation régénérée ONF**	**Note Etude sol Ecofog**	**Commentaires et conclusion de l'expertise 2008**	**Acces**	**Re-exploitation sur la zone depuis 2008 (source DEAL - ONF -PTMG)**	**Prise de vue aérienne 2014 + photo-interprétation végétation**	**Etude terrain Biotope/ Solicaz 2014**
3	**Boulanger**	CM BOULANGER	C01/30	2003-2004	Bull	Bouturage de Clitoria sp. et semis d'Acacia mangium		Etroit	X	X	10%	--	Préparation de terrain avant plantation	Piste boulanger	Reprise partiellement de l'exploitation sur le site en 2014	X	X
1	**Yaoni**	ATENOR / Antoine Leveillé	AEX 02/06	2006-2007	Bull	CEAX, essentiellement inga et clitoria	X sans nodulation	Large	X	X	56%	-	Plantation sans fixation d'azote. Site jeune quelle évolution ?	Piste Coralie	PER Iamgold 2003-2013	X	X
4	**Guadeloupe**	SMPA / Delafranchi	proche AEX 26/99	2001-2004	Pelle ? deux ans après CAEX	CAEX, wassaï		Large	X	X				Piste boulanger		X	X
2	**Mouflet**	DELAFRANCHI	AEX 08/07	2007	Pelle. Progressive CEAX, sud vers le nord	CAEX		Etroit	X	X			Intégration souhaité pour la nouvelle campagne	Piste boulanger		X	X
7	**Formelia /Barthélémy**	HADES MINING / Da Costa	B 3098	1999-2001	X suivi par CAEX			Large		X	62%		Site bien évolué	Piste bélizon	AEX 06/13 DOMIEX 2013-2017		
6	**Georgeon**	BALOUROU / Stéphane plat	AEX 17/03	2003-2004	Bull et pelle mécanique. Deux ans après. Suivi par CAEX. Non réhabilité sur la moitié nord			Large		X	46%	+++	Possible succession forestière sur sol bien réhabilité ?	Piste Bélizon		X	X
5	**Grand chardy**	DOMIEX / Jean Fleury	AEX 06/02	2002-2004	X			Etroit	X	X	32%	++	Réhabilitation progressive. Possible succession forestière sur sol bien réhabilité ?	Piste bélizon 4x4 + quad	illégal au nord et au sud ?	X	
8	**Jablot**	EQUINOX	AEX 07/03	2003-2004	X suivi par CAEX			Etroit		X	0%		Blocage de la végétation ?	Hélicoptère	illégal autour ?	X	
9	**La boue**	Ponet	AEX 05/99	1999-2001				Large et Etroit		X	88%	+	Dépérissement de la régénération forestière sur sol de mauvaise qualité ?	peu accessible	PER Metal Gold Ressource 2008-2011	X	X
10	**Grand yaoni**	CMB	C01/08	1990-2009	CEAX en partie en 2009-2012 sur 15 %. Au bull + pelle.	CAEX revegt bof, sol extra pauvre	spontané	Très large 300 à 500 m	X					Piste boulanger		X	X
11	**GuyaFix**	SMSE		2013	Pelle avec remise des andains	SOLICAZ, Clitoria et Inga	X avec nodulation	Large					Site à haute qualité de revégétalisation	Bateau		?	X
	Autres sites miniers avec image aérienne disponible				Différents cas de figure			Différents cas de figure					Secteur de Bélizon, Coralie et Boulanger , Saul Mana , Apatou				

expertise terrrain + photointerprétation 2015
photointerprétation 2015
pas d'expertise ni photointerprétation 2015

Tableau 1 : synthèse des données des sites miniers étudiés en 2008 et 2015

IV.3 Analyse de la végétation

IV.3.1 Pourquoi s'intéresser à la reprise de la végétation.

Les sites miniers entrainent par leurs méthodes d'exploitation le défrichement de forêts initialement riches et biodiversifiées typiques des zones équatoriales. Dans le cas des sites miniers alluvionnaires, ce sont les forêts inondables des bas-fonds, les forêts de flats, les forêts ripicoles et autres forêts marécageuses, qui sont les plus sévèrement touchées. Toutefois, les aménagements annexes (piste, camp, exploitation des colluvions..) impactent également les forêts de terre ferme adjacentes au flat exploité. Cette déforestation et la déstructuration totale des sols, comportant les ressources nécessaires à la reprise de la végétation, aboutissent à une remise à zéro de la biocénose et à l'accélération des processus d'érosion des sols.

Pour contrer ces effets, les opérateurs miniers ont l'obligation d'une réhabilitation progressive des zones exploitées, passant par une remise en état des stratifications minérales et un étalement des matières végétales disponibles. Cette étape doit favoriser le retour de la végétation permettant d'une part de freiner les processus d'érosion des sols, en particulier pour ceux composés d'argile meuble, et d'autre part d'amorcer un retour de la biodiversité dans l'optique d'un retour à la situation initiale. Néanmoins, face au constat récurant de situation de blocage dans la succession végétale, les opérateurs se doivent aujourd'hui d'entreprendre une révégétalisation de 30 % des surfaces exploitées.

L'étude des formations végétales présentes sur d'anciens sites miniers alluvionnaires a pour objectif de mieux comprendre les conditions aboutissant aux multiples évolutions végétales observables sur un site minier, et d'apprécier celles les plus à même aboutir à un milieu forestier diversifié et celles menant à des situations de blocages dans la succession végétale souhaitée.

Ainsi, il devrait être possible de connaitre les itinéraires d'exploitation et de réhabilitation favorable au retour de la végétation et d'orienter la phase de revégétalisation assistée pour la rendre la plus pertinente en se concentrant sur les zones à faible pouvoir de reprise spontanée de la végétation.

IV.3.2 Méthodologie générale employée

Les formations végétales et leurs espèces associées ont un caractère intégrateur des conditions pédologiques et des potentialités écologiques. De par l'analyse des espèces composant les différents cortèges, il est ainsi possible de prédire leur évolution et par extension un éventuel retour de la biodiversité tendant vers un état initial. Pour être pertinent, il est nécessaire de relever le type biologique (herbacée, arbuste, arbre…) et les traits fonctionnels des espèces présentes (espèce pionnière, secondaire, fixatrice d'azote, attractive pour la faune, à fort ombrage…). Ces caractéristiques nous renseignent en effet sur leur rôle et leur intérêt dans la succession végétale.

L'origine des formations végétales et leurs relations avec le milieu environnant est également un paramètre important pour comprendre leur évolution. En effet, les successions végétales seront différentes selon l'origine et la nature du substrat, lié aux phases d'exploitation et de

réhabilitation (digue argileuse, fond de barranque limoneux, cône de gravier…) et de leur emplacement au sein du site minier (partie centrale, zone en contact avec la forêt, zone d'expansion des crues …). L'analyse diachronique, sur la base de photo-aériennes géoréférencées, a rendu possible ces observations.

Deux niveaux d'observation ont ainsi été utilisés :

- **Une observation à l'échelle du site par photo-interprétation,** avec des points de contrôle sur le terrain, afin de mieux comprendre la répartition spatiale de la reprise de la végétation notamment en fonction de l'origine et de la nature des sols en lien avec l'exploitation (digue, cône de gravier, fond de barranque, andain, lisière,…). En plus de ces sites miniers issus de l'expertise de 2008, les images aériennes d'autres sites miniers sur le secteur de Boulanger/ Bélizon été observés pour y déceler l'évolution de leur végétation.
- **Une observation sur le terrain, à l'échelle des formations végétales**, par des placettes d'échantillonnage, permettant d'avoir des informations sur la structure des formations végétales, la composition des espèces et de leurs traits fonctionnels (type de plante, écologie, capacité à fixer l'azote atmosphérique,…).

Ces deux niveaux d'observations ont permis la production :

- de graphes de répartition des formations végétales par site en 2015
- d'analyse comparative de l'évolution par site et par formation végétale entre 2008 et 2015 ;
- des analyses de la reprise de la végétation en fonctions des sols, de leur origine et leur réhabilitation ;
- une identification d'espèces indicatrices de la reprise ou non des formations végétales.

L'étude des traits fonctionnels permet non seulement de retracer l'histoire écologique et évolutive des espèces, mais peuvent aussi potentiellement servir à prédire la réponse ou l'effet de la présence d'une espèce quant à son environnement. En écologie des systèmes, les chercheurs tendent à classer les plantes selon leur type fonctionnel davantage que leur taxonomie.

Un type fonctionnel est un groupe d'organismes partageant une ou plusieurs mêmes réponses à un ou des facteurs environnementaux ou affectant l'écosystème d'une même façon.

IV.3.3 Rappel de l'étude menée en 2008 par l'ONF

L'expertise minière de 2008 portait sur 7 sites sur le secteur de Bélizon / Cacao, âgés de 2 à 7 ans, et présentant différents modalités intrinsèques portant sur la largeur du flat (large ou étroit), la méthode de réhabilitation (non réhabilité, à la pelle, au bulldozer, progressive) et l'effort de revégétalisation.

Les résultats de l'étude de la végétation montraient que la régénération forestière était à première vue bien entamée 4 ans après réhabilitation. Cependant, cette reprise ne reflétait pas nécessairement la qualité des sols. Le peuplement de remplacement du bois canon (*Cecropia sp.*) était encore peu présent sur de nombreux sites et des blocages étaient pressentis ou

probables au regard de certaines formations végétales (herbacées, formation à *Mimosa pigra* et *M. myriadenia*).

Les observations faites par photographie aérienne ont permis de leur côté d'avoir une vision globale de chaque site et de tirer des conclusions quant aux conséquences à court terme des choix d'exploitation et de réhabilitation. Les conclusions qui peuvent en être tirées sont de trois ordres:

- **La part de forêt dégradée ou secondarisée** à proximité des sites exploitées fait état du souci de limitation des impacts et d'optimisation de l'exploitation (piste latérale, emprise connexe) ;
- **La part des surfaces restant en eau** est un indice quant à l'importance des efforts de réhabilitation fournis (remise en forme des terrains, gestion de la matière) et à la bonne gestion de l'eau en cours d'exploitation, permettant de limiter la perte de matière en cours d'exploitation ;
- A âge égal, compte-tenu de la relative homogénéité des habitats pré-existants et des potentialités forestières, **l'importance des formations dominées par un recru ligneux** important fournit un premier indicateur quant au soin porté à la gestion des sols au cours de l'exploitation et de la réhabilitation.

Ainsi, de l'analyse des sites et de leur modalité d'exploitation et de réhabilitation, certains itinéraires se montraient plus efficaces que d'autres :

- une réhabilitation au fur et à mesure
- une préparation des terrains avant revégétalisation
- des plantations de plantes fixatrices d'azote

En perspective l'expertise proposait de répondre à plusieurs interrogations soulevées, dont notamment :

- Les types herbacées pauvres bloquent-il l'évolution de la végétation y compris si il y a présence d'une régénération « naissante » ?
- Le stade végétation pluristratifé assez diversifiés repéré en 2008 a-t-il évolué vers un stade de régénération forestière ?
- De même, il y a-t-il une succession forestière normale sur sol bien réhabilité ?

IV.4 Analyse pédologique

IV.4.1 Pourquoi s'intéresser aux sols

Le sol est une ressource fondamentale qui supporte la croissance des plantes et assure la production primaire dont dépend la population humaine. Il est un compartiment des écosystèmes terrestres naturels ou anthropisées qui est maintenant reconnu comme une véritable composante environnementale indispensable à prendre en compte lorsque l'on parle de gestion durable. Cette prise en compte s'est accompagnée de la constatation que le sol ne constitue pas une ressource inépuisable et qu'il faut donc la gérer voire la restaurer. Claire Chenu (ambassadrice de l'année Internationale des Sols 2015) déclare qu' « il faut mettre fin à la dégradation des sols, c'est la priorité. Nous devons agir sur deux fronts: réduire la dégradation des sols et intensifier leur remise en état. Nous disposons de connaissances scientifiques qui nous permettent d'élaborer des stratégies de remise en état des sols [...]. On ne tient pas du tout compte de la qualité des sols, ni de leur capacité à remplir d'autres fonctions. Un grand progrès consisterait à prendre en considération la qualité du sol dans l'affectation des terres. »

Le concept de "qualité" ou de "santé du sol" doit donc être abordé via un certain nombre d'indicateurs complémentaires de types abiotiques (physique et chimie des sols) mais aussi biologiques. Un large panel de chercheurs (Schloter et al., 2003, Schimann et al. 2012, Ritz et al. 2009) considèrent que l'ensemble des indicateurs à prendre en compte doit se référer aux cycles de l'azote et du carbone.

Cette étude s'inscrit dans un contexte guyanais où l'exploitation aurifère constitue un problème écologique (et social) majeur et dans un contexte mondial de préoccupations environnementales, concentrées notamment sur l'évaluation de la qualité des écosystèmes, la mise en place de leur réhabilitation et leur sauvegarde. L'étude consiste (1) à dresser un bilan qualitatif des impacts de l'exploitation aurifère sur les sols de la forêt tropicale guyanaise grâce à l'utilisation de bio-indicateurs et (2) à mesurer les capacités d'évolution naturelle et assistée de ces sols. Nous avons en particulier cherché à évaluer l'état des sols (réhabilités ou non, revégétalisés ou non), leur potentialité de récupération de leur fonctionnement biologique afin de pouvoir prédire leur capacité d'accueil de la végétation forestière.

IV.4.2 Méthodologie employée : Les bio-indicateurs de qualité des sols

Sachant que (i) le recyclage des nutriments à l'origine de la fertilité d'un sol est le fait de microorganismes en interrelation avec leur environnement, (ii) la place prépondérante qu'occupent ces microorganismes dans le sol ainsi que le rôle fondamental qu'ils jouent dans son fonctionnement (Nannipieri et al., 2003), ceux-ci sont très largement utilisés comme bio-indicateurs. De plus, par la rapidité d'adaptation et de réaction aux changements, les mesures des capacités métaboliques des microorganismes peuvent rendre compte, avant tout autre indicateur, tel que celui de la productivité végétale, des modifications de l'état d'un sol.

Les microorganismes offrent une très grande diversité métabolique qui, bien évidemment, ne peut pas être prise en compte de manière exhaustive. Il est donc nécessaire de choisir des

activités microbiennes qui rendent compte du fonctionnement global du sol. Ces activités sont donc choisies selon deux types de critères : (1) leur représentativité par rapport à l'ensemble de la communauté microbienne du sol et, (2) l'accessibilité technique à la mesure des activités choisies. La respiration et la dénitrification sont les fonctions microbiennes répondant à ces critères car elles sont réalisées par des communautés abondantes et diversifiées, donc représentatives du système sol.

Ces fonctions biologiques peuvent donc servir de bio-indicateurs de la qualité des sols (Schimann et al. 2012).

La respiration potentielle (SIR- substrat-induced respiration ; dégagement de CO2):

La respiration microbienne du sol concerne l'ensemble des micro-organismes dans leur diversité et leur abondance. La mesure de respiration vient en complément des analyses chimiques de matière organique (C, N). Elle nous renseigne sur la capacité de la communauté microbienne hétérotrophe du sol à dégrader la matière organique. **Elle est considérée comme un indicateur de la biomasse microbienne totale active du sol.**

La dénitrification potentielle (DEA- Denitrifying enzyme activity ; dégagement de N2O):

La dénitrification concerne l'ensemble de la communauté microbienne impliquée dans le cycle de l'azote du sol (nitrifiants et fixateurs d'azote inclus).

Cette mesure renseigne donc sur le niveau de fonctionnement des micro-organismes impliqués dans le cycle du N dans le sol.

Le rapport dénitrification/respiration (DEA/SIR)

L'analyse en ratio de fonctions, permet d'affiner la bio-indication et ainsi de ne plus seulement traduire l'état de fonctionnement des sols mais également l'état de la structure des communautés microbiennes ciblées. Le rapport dénitrification/respiration chez le témoin forêt naturelle peut être considéré comme un indicateur d'équilibre à atteindre en termes de structure de communauté (**niveau de diversification de la communauté microbienne du sol**).

Il s'agit d'évaluer les possibilités d'un sol fortement perturbé à récupérer son activité ainsi que le temps nécessaire à cette récupération en fonction des modalités de réhabilitation qui lui sont appliquées. Cette évaluation se fait donc par comparaison de l'intensité des fonctions choisies (respiration et dénitrification) et du rapport N2O/CO2 avec celle de la forêt adjacente au site minier prise comme référence. Ainsi, les fonctions bio-indicatrices utilisées renseignent de la capacité et la rapidité qu'ont les sols perturbés à retrouver le fonctionnement et le niveau de diversification du milieu non perturbé alentour représentée par la forêt naturelle.

IV.4.3 Rappel de l'étude menée en 2008-2009 par l'UMR Ecofog

Une première étude conduite en 2008-2009 visait à dresser un bilan qualitatif des impacts de l'exploitation minière aurifère sur les sols de la forêt tropicale humide guyanaise et à mesurer les capacités d'évolution naturelle et assistée de ces sols *via* des fonctions microbiennes du sol utilisées en tant que bio-indicateurs. Cette étude a porté sur 5 sites ayant subi ou non différents travaux de réhabilitation. De visu, ces sites présentaient de grandes hétérogénéités en ce qui concerne la reprise de la végétation. Aussi l'échantillonnage du sol pour chaque site a été réalisé à la fois sur les parcelles à dominance de strate herbacée (type Non Régénéré) et sur celles présentant une végétation pluristratifiée (type Régénéré : herbe, arbuste, arbre).

Tableau 2 : Evolution des bio-indicateurs du sol (Biomasse microbienne, fonctionnement du cycle du N et niveau de diversité des sols) mesurés sur les sites en 2008, plusieurs années après exploitation (âge) par rapport à ceux de la forêt de référence adjacente représentant 100% de l'activité du site (M2 C. Petitjean 2009)

Sites **Age**	**Boulanger** **4 ans**		**Georgeon** **4 ans**		**Grand Chardy** **4 ans**		**La boue** **7 ans**		**Yaoni** **2 ans**	
% de récupération	**R**	**NR**	**R**	**NR**	**R**	**NR**	**R**	**NR**	**R**	**NR**
Biomasse microbienne	30%	20%	100%	70%	100%	50%	60%	55%	25%	15%
Biomasse microbienne /an	7,5%	5%	25%	17,5%	25%	12,5%	8,6%	7,8%	12,5%	7,5%
Fonctionnement du cycle du N	10%	0%	70%	10%	30%	10%	30%	10%	10%	0%
Fonctionnement du cycle du N /an	2,5%	0%	17,5%	2,5%	7,5%	2,5%	4,3%	1,4%	5%	0%
Type de réhabilitation	Bulldozer		Une partie au Bulldozer une autre sans réhabilitation		Pelle mécanique		Pas de réhabilitation		Bulldozer Revégétalisation assistée	

NR= végétation non régénérée : dominance de la strate herbacée

R= végétation régénérée : végétation pluristratifiée

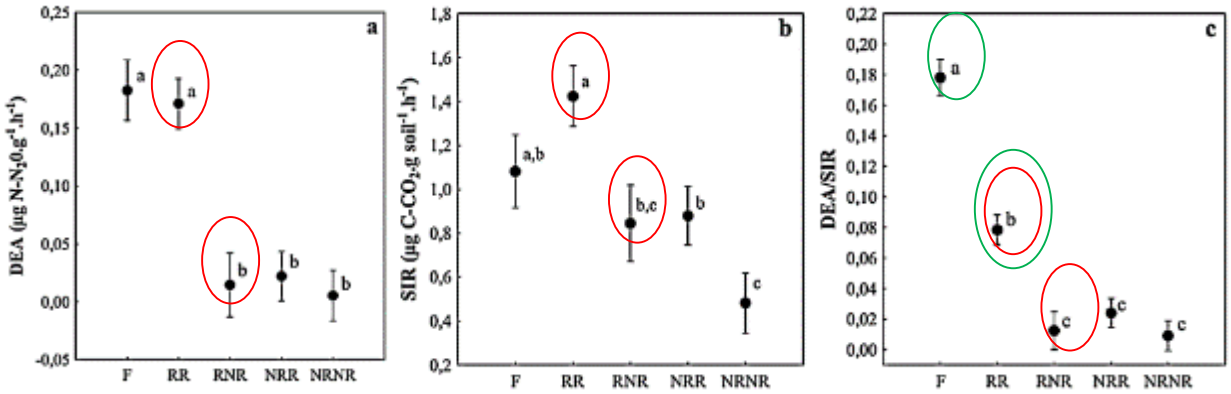
Ces résultats ont montré :

- **Une absence de récupération de la qualité des sols sous la strate herbacée** même 7 ans après l'arrêt de l'activité (La Boue), marquant un blocage définitif de la succession végétale avec ou sans réhabilitation des sols ;
- **Que la revégétalisation** du site Yaoni (non fixateur d'azote après réhabilitation au bulldozer) **n'a pas induit une meilleure récupération de la qualité des sols** par rapport aux autres sites non revégétalisés, 2 ans après exploitation (voir « R » Yaoni dans tableau ci-dessus). A contrario, une étude antérieure réalisée par Ecofog en 2005 avait

montré que la mise en place d'arbres fixateurs permettait une récupération rapide de la qualité des sols 3 ans après exploitation et une récupération totale de cette qualité au bout de 6 ans. Il semblerait donc que le type de végétaux utilisés, fixateur ou non, ait une grande importance dans la reprise de l'activité du sol. La question est de savoir si les mesures ont été faites trop tôt sur Yaoni pour voir une reprise d'activité du sol ou non et si la revégétalisation assistée par des non-fixateurs d'azote n'a pas été efficace.

- **L'importance de la réhabilitation sur la récupération de la qualité des sols**. Le site de Georgeon pour lequel les modalités étaient complètes (Régénéré/Réhabilité, Non Régénéré/Réhabilité, Régénérée/Non Réhabilité, Non Régénérée/Non Réhabilité) a montré un fonctionnement du sol médiocre sur les parcelles Régénérées Non Réhabilitées (RNR Figure 5 ci-dessous en rouge) par rapport aux parcelles Régénérées Réhabilitées (RR Figure 5 ci-dessous en rouge). Malgré la présence d'une végétation pluristratifiée on subodore un blocage à terme de la succession végétale sur les zones non réhabilitées et une fragilité des sols sur les zones réhabilitées du fait de leur faible niveau de diversité microbienne (Schimann et al 2012);

Figure 5: résultats d'analyse du fonctionnement biologique des sols lors de l'expertise de 2008



A partir de ces premières conclusions la présente étude propose de réaliser une deuxième campagne de mesures visant à évaluer l'évolution de ces mêmes sites dans le temps et à obtenir des informations supplémentaires sur l'impact du type de réhabilitation des sols (bulldozer *versus* pelle hydraulique) et de la revégétalisation assistée (avec ou sans fixateurs d'azote) sur la **récupération de la qualité des sols.**

L'ensemble des résultats de cette seconde étude permettra d'affiner les préconisations pour une meilleure restauration des sites miniers.

Expertise 2016

V. Evaluation de la reprise de la végétation

V.1 Photo interprétation des formations végétales

V.1.1 Méthodologie

La méthodologie de photo-interprétation établie par l'ONF en 2008 a été majoritairement reprise pour cette étude afin d'avoir des résultats les plus homogènes possibles et faciliter les analyses. Notons que de légers biais existent tout de même sur la cartographie des formations végétales et des analyses qui en découlent.

Géoréférencement

Les images fournies par SIAGE en 2008 (récupérées auprès de l'ONF) et en 2015 étant des mosaïques géoréférencées et non des orthophographies avec prise en compte du relief, il a fallu re-géoréférencer les images aériennes pour qu'elles se superposent au mieux à la couche SIG « Formation végétale » réalisée en 2008. En effet, une légère modification du calage des images avait été effectuée par l'ONF en 2008 pour coller au mieux à la réalité de terrain. Les fichiers sources de ces transformations n'ayant pas pu être récupérés, Biotope a procédé à cette opération pour les images 2008 et 2015. Il persiste néanmoins sur certains sites (Georgeon et Jalbot en particulier) de légers décalages.

Surface en eau

Les acquisitions d'images se sont faites toutes les deux en saisons des pluies (Mai 2008 et Février 2015) avec des niveaux d'eau similaires. Le biais vis-à-vis de la saisonnalité est donc réduit. Il existe par contre un biais d'appréciation de la superficie des plans d'eau par l'augmentation des houppiers obstruant la visibilité en 2015.

Interprétation

Lors de la phase de cartographie des formations végétales par photo-interprétation, bien qu'ayant suivi la méthodologie et la nomenclature de l'ONF en 2008, il existe forcement des biais dans l'appréciation de la couleur, la texture et la hauteur de la végétation caractérisant les formations végétales. Ces interprétations personnelles peuvent parfois aboutir à de légère différence lors du renseignement des couches attributaires sur les types de formation végétale.

De même, la meilleure définition des images de 2015 a permis d'effectué un détourage des formations végétales à des échelles comprise entre 1/2500°et le 1/1250° contre une échelle de 1/5000° en 2008.

Des reprises et modification ont ainsi été menées sur les cartographies de l'expertise de 2008:

- sur le site de Jalbot suite à une mauvaise attribution des habitats de régénération en lisière forestière en 2008 (Forêt dégradée sur une formation pionnière à Bois Canon)
- sur le site de la Boue et Boulanger pour affiner la cartographie trop grossière ne prenant pas en compte des formations végétales de taille réduite.

Nomenclature

Tableau 3 : Tableau synthétique la typologique des formations végétales en fonction de la Strate, de la Régénération et du type de végétation.

Code Strate	Code Régénération	Codes Formation végétale	Intitulés	Descriptions
Forêt haute / V4	Forêt	FD	Forêt dégradée	Le couvert forestier reste très important (5) avec des arbres de plus de 20m préexistants et diversifiés Le sol peu perturbé garde une texture équilibrée et une litière développée (OL ou MO)
		FS	Forêt secondarisée	Le couvert forestier est très ouvert (2-3) mais il reste des arbres de plus de 20m préexistants Le sous-bois est développé et présente fréquemment balisier, fougère et une strate arbustive riche en régénération Le sol est généralement peu perturbé et présente une litière assez développée (OF,OL)
Recrue forestier dominant / V3	Régénéré / régénération en cours	RG	Régénération forestière développée	Régénération bien développée (env 8m) avec une régénération de bois canon Autres strates limitées (<25%) - litière généreralement en cours de développement (OL)
		FR	Fourré diversifié	Le couvert est principalement arbustif (5) et diversifié, mais fréquemment envahie par Pigra Le sol est couvert d'une litière déjà formée (OL,OF)
Arbustif dominant / V2		PS	Végétation pluristratifié assez diversifiée	Toutes les strates (herb, arbus, arbo) sont assez développées et diversifiées La régénération est relativement développée (5 à 50%) Le sol est à dominante argileuse avec une litière en formation (OL)
	Régénération intermédiaire / naissante	HRD	Herbacée diversifiée ave	Idem HD avec présence d'une strate arbustive limitée et une régénération naissante assez pauvre (Bois canon)
		HRP	Herbacée pauvre avec régénération	Idem HP sans arbustes mais avec une régénération de bois canon et goupi plus ou moins développée Les gravillons et cailloux sont majoritaires en texture La fougère est très présente (anciennes baranques ?)
Herbacée dominant / V1	Non rénégnéré	HD	Herbacée diversifié	Le couvert est exclusivement herbacée (5) mais relativement diversifié (2-3) Il n'y a pas de régénération et très peu d'arbuste (variante avec plantation) Le sol est argileux avec ou sans gravillons et sans litière
		HP	Herbacée pauvre	Le couvert est quasi-exclusivement herbacée (4 -5) et quasi monospécifique (0-1) - Cypéracées Le sol est argileux mais présente fréquemment des cailloux et gravillons Il n'y a pas de régénération et très peu d'arbuste
Sol nu	Sol nu	S	Sol nu	Végétation très peu développée (<5%) sur sol nu et sans litière (variante avec plantation)
Eau	Eau	Eau	Zone en eau	Ancien baranque, bassin de décantation, plan d'eau en bordure de cours d'eau, mare, zone défrichée inondée

Figure 6 (ci après) : Extraits des photographies aériennes correspondant au différentes formations végétales

FD : Forêt dégradée

FS : Forêt secondaire

RG : Régénération

FR : Fourré

PS : Pluristratifié

HRD : Herbacée diversifiée avec régénération

HRP : Herbacée pauvre avec régénération

HD : Herbacée diversifié

HP : Herbacée pauvre

Eau : Ancien bassin et rivière

S : Sol nu

Plantation monospécifique à Clitoria

Echantillonnage spatial

Des grilles couvrant la superficie de chaque site avec des points d'échantillonnage espacés de 20 mètres ont également été créées. Ces points d'échantillonnages ont permis une analyse de l'évolution entre 2008 et 2015, tous sites confondus. Cette méthode a pour but de pouvoir s'affranchir des sites miniers eux même et d'évaluer l'évolution en fonction de la remise en état des sols (sol nu/andain), de la revégétalisation effectuée (avec ou sans plantation) ou des formations végétales d'origine (vers quoi évolue tel type de végétation ?).

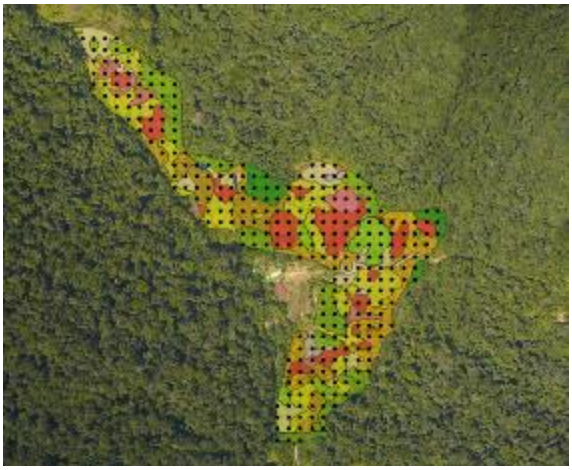


Figure 7 : Grille d'échantillonnage superposée à la couche « formation végétation 2015 » sur Yaoni

V.1.2 Résultats des photo-interprétations et des analyses diachroniques

Analyse par site

Yaoni :

- Situation et contexte :

Le site alluvionnaire de Yaoni (AEX02/06) est situé la piste Coralie. Exploité entre 2006 et 2007, il a été réhabilité au bulldozer et à la pelle hydraulique juste après son exploitation (2007). Encaissé entre deux massifs forestiers, le flat présente une zone centrale secteur assez large (150 m), se réduisant plus en amont (50 à 100 m). Les conditions de départs étaient peu favorables à une reprise spontanée de la végétation, avec un sol mobilisé comportant une forte proportion de graviers et cailloux. L'exploitant possédait une pépinière gérée par CEAX REAH et des plantations suivies ont eu lieu sur environ 26% du site. Plusieurs espèces ont été utilisées dont *Inga pezzifera et I. edulis, Senna reticulata, Clitoria fairchildiana, Mimosa cealsapinia, Eperua courbaril, Carapa sp*.

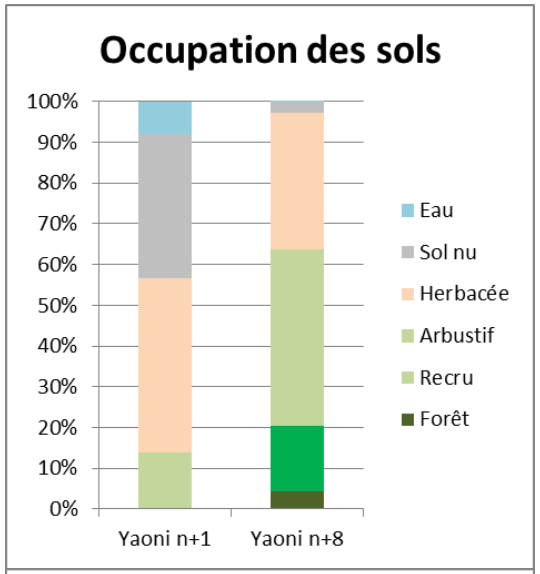
- Analyse de la reprise de la végétation :

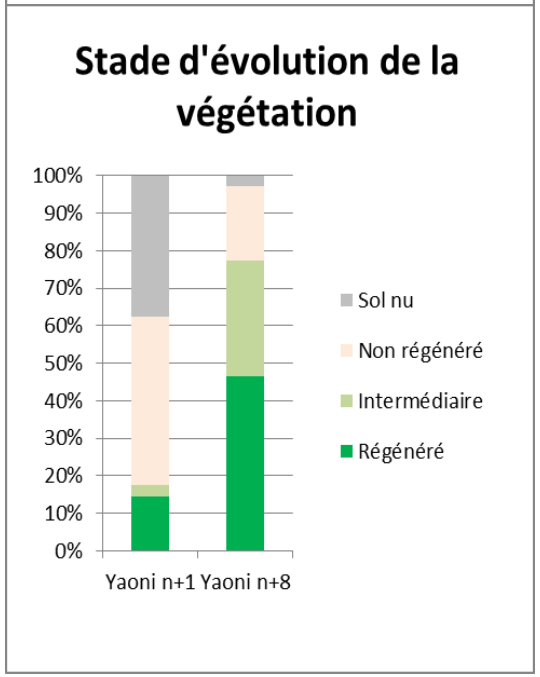
Le taux de surface de végétation régénérée en 2008 (n+1) était d'environ 18 %, (l'ONF avait ajouté les surfaces en cours de régénération par le biais des plantations pour arriver à 56 % de surface générée). En 2015, les formations végétales en cours de régénération représentent plus de 70 % de la superficie déforestée.

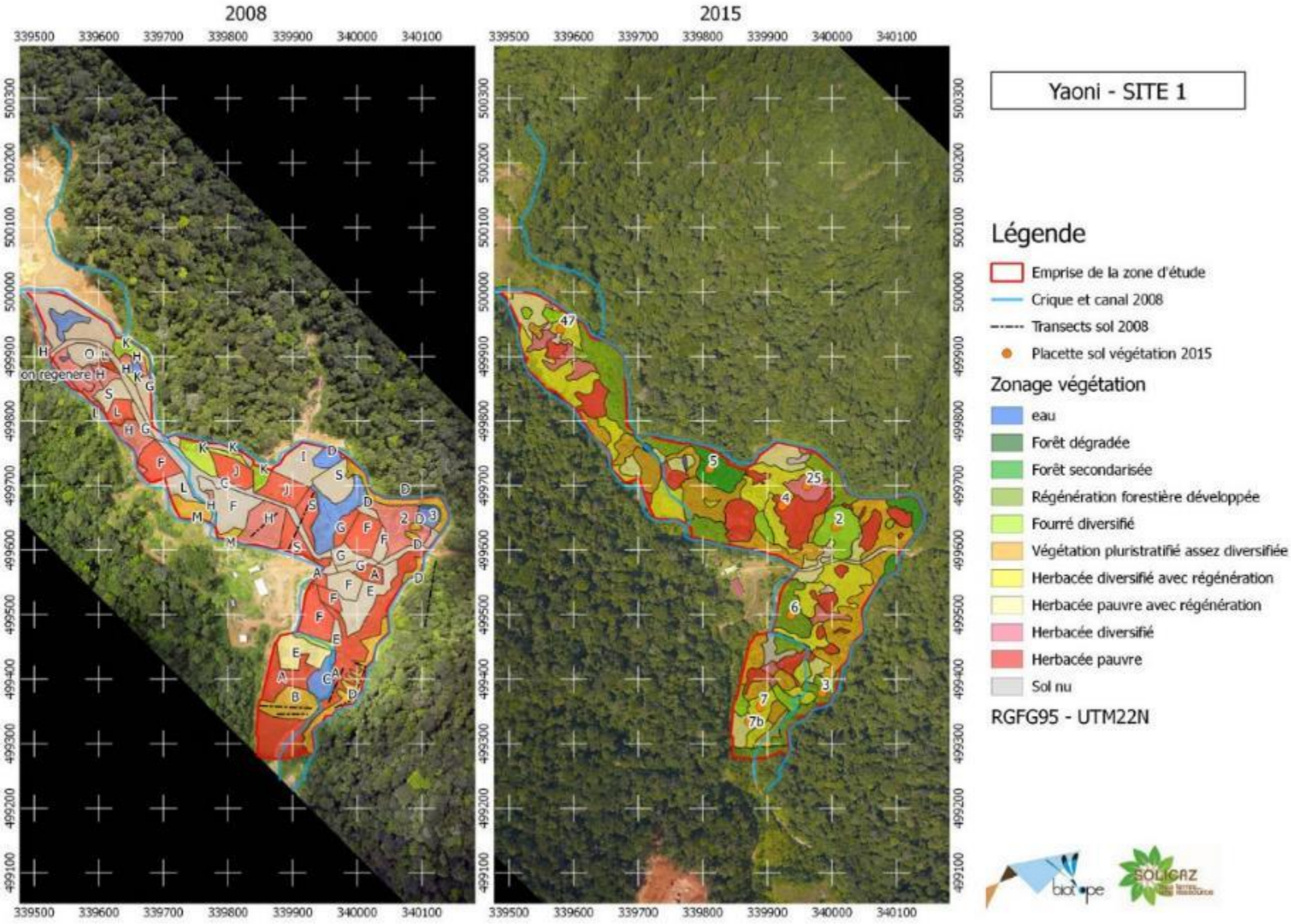
De manière générale, observe une disparition des zones en eaux par assèchement et arrivée de la végétation, ainsi qu'une forte diminution des sols nus (de 38 à 3 %).

Une fermeture du milieu est due aux plantations. Mais celles-ci, plantées en bosquet souvent monospécifiques n'ont que peu favorisé le retour de plantes secondaires. Enfin certains blocages peuvent persister sur différents types de substrat (cône de gravier étalé, fond de bassin de décantation).

Certaines placettes, aujourd'hui bien régénérées, ont néanmoins été dynamisées par l'étalement d'andains.






2008
2015
339500
339600
339700
339800
339900
340000
340100
500300
500200
500100
500000
499900
499800
499700
499600
499500
499400
499300
499200
499100
on regenere
Yaoni - SITE 1
Légende
Emprise de la zone d'étude
Crique et canal 2008
Transects sol 2008
Placette sol végétation 2015
Zonage végétation
eau
Forêt dégradée
Forêt secondarisée
Régénération forestière développée
Fourré diversifié
Végétation pluristratifié assez diversifiée
Herbacée diversifié avec régénération
Herbacée pauvre avec régénération
Herbacée diversifié
Herbacée pauvre
Sol nu
RGFG95 - UTM22N

Mouflet

- Situation et contexte :

Un site initialement en forêt haute, exploité assez récemment, étroit et réhabilité de manière progressive, à la pelle, avec étalement des andains à certains endroits. L'itinéraire de réhabilitation est ainsi exemplaire.

Des secteurs ont aussi été revégétalisés en bande avec des herbacées dans le but de fixer les sols, des arbustes de la famille des Mélastomatacées, des *Inga sp.* et d'autres arbres comme le Roucou et le Mombin. Les plants de légumineuses n'ont pas été inoculés.

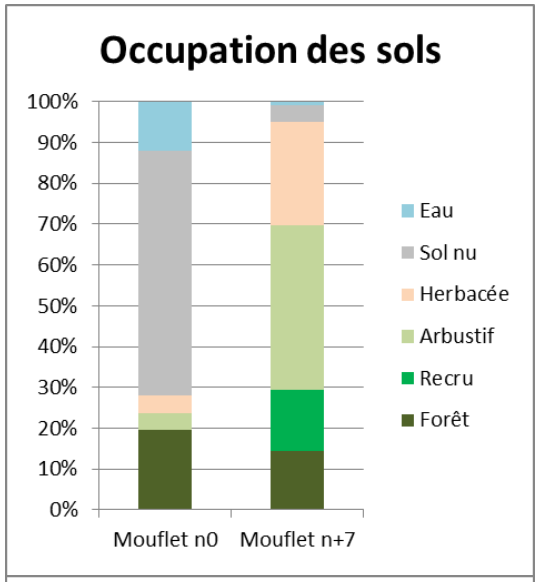
- Analyse de la reprise de la végétation :

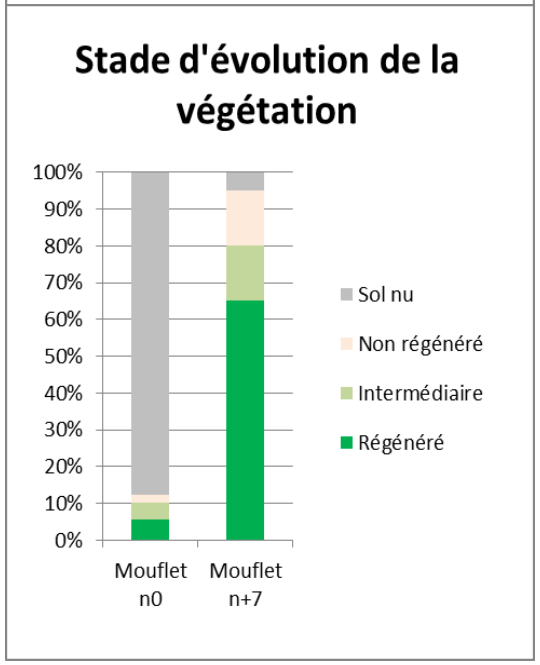
La proportion de sols nus a très fortement diminué (60 % à 4 %), avec un glissement rapide vers des formations arbustives. Ainsi, 7 ans après la fin des travaux, seul 20 % de la superficie déforestée ne comporte pas de végétation amorçant le début d'une régénération (Sol nu et Non régénéré), et les zones en eaux (hors lit de la crique) ont quasiment disparues.

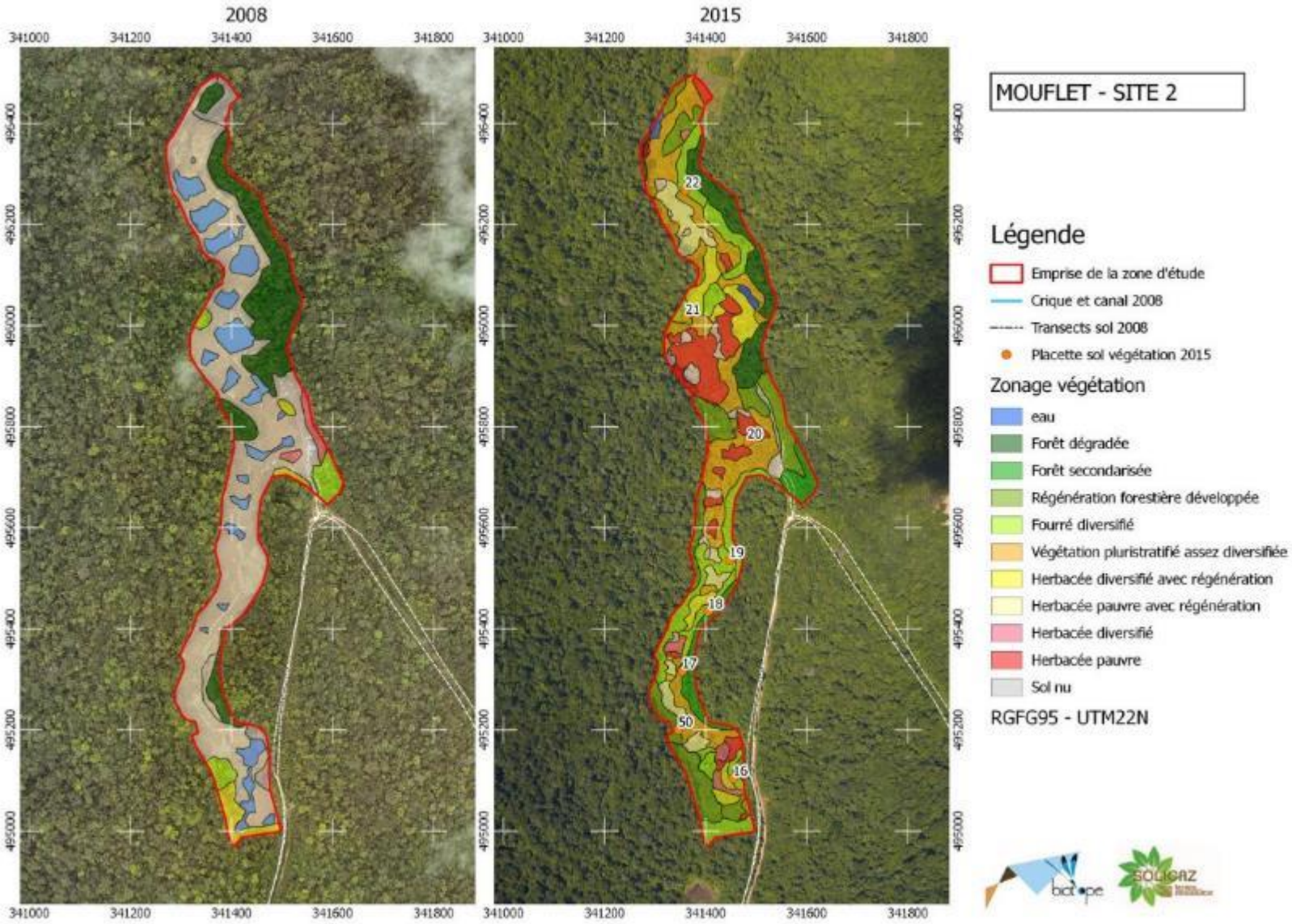
On observe une forte progression des stades régénérés le long des lisières, et en particulier sur les zones d'andain.

Une accélération de la régénération due aux plantations est perceptible mais certains blocages peuvent persister.

Enfin on observe une légère diminution des bosquets résiduels de la forêt initiale d'une part du fait de défrichements supplémentaires mais également par effet de dégradation à moyen terme due aux modifications de luminosité et d'humidité.






2008
2015
MOUFLET - SITE 2
Légende
Emprise de la zone d'étude
Crique et canal 2008
Transects sol 2008
Placette sol végétation 2015
Zonage végétation
eau
Forêt dégradée
Forêt secondarisée
Régénération forestière développée
Fourré diversifié
Végétation pluristratifié assez diversifiée
Herbacée diversifié avec régénération
Herbacée pauvre avec régénération
Herbacée diversifié
Herbacée pauvre
Sol nu
RGFG95 - UTM22N
341000
341200
341400
341600
341800
495400
495200
495000
495800
495600
22
21
20
19
18
17
50
16

Boulanger

- Situation et contexte :

Ce flat a été exploité en 2003/2004, réhabilité essentiellement au bulldozer (2005), avec des secteurs revégétalisés avec des boutures de *Clitoria fairchildiana* et des semis d'*Acacia mangium*. Le site est assez étroit dans sa globalité (de 50 à 150 mètres de largeur).

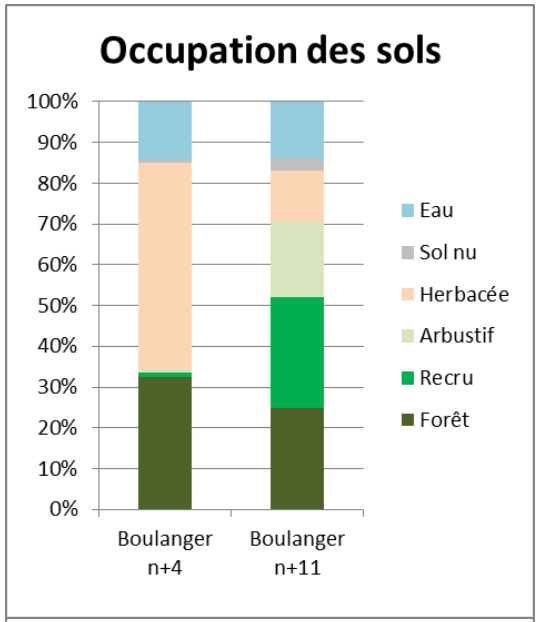
De nouvelles exploitations sont en cours à proximité, notamment juste amont. Cette dernière a engendré une dégradation du dernier bassin qui n'avait pas été réhabilité en 2008.

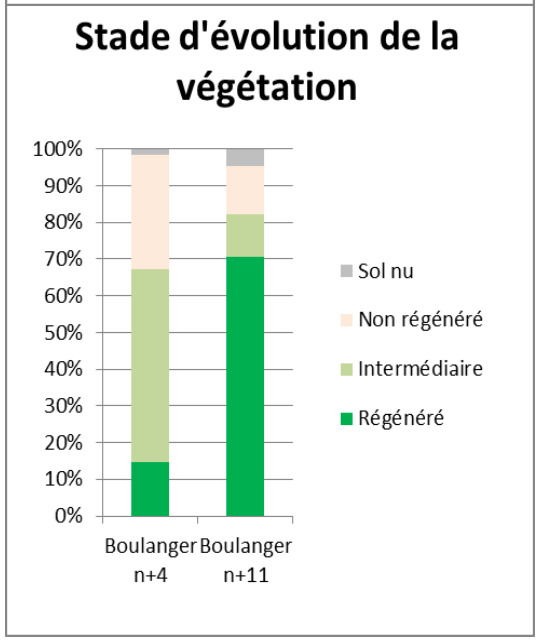
- Analyse de la reprise de la végétation :

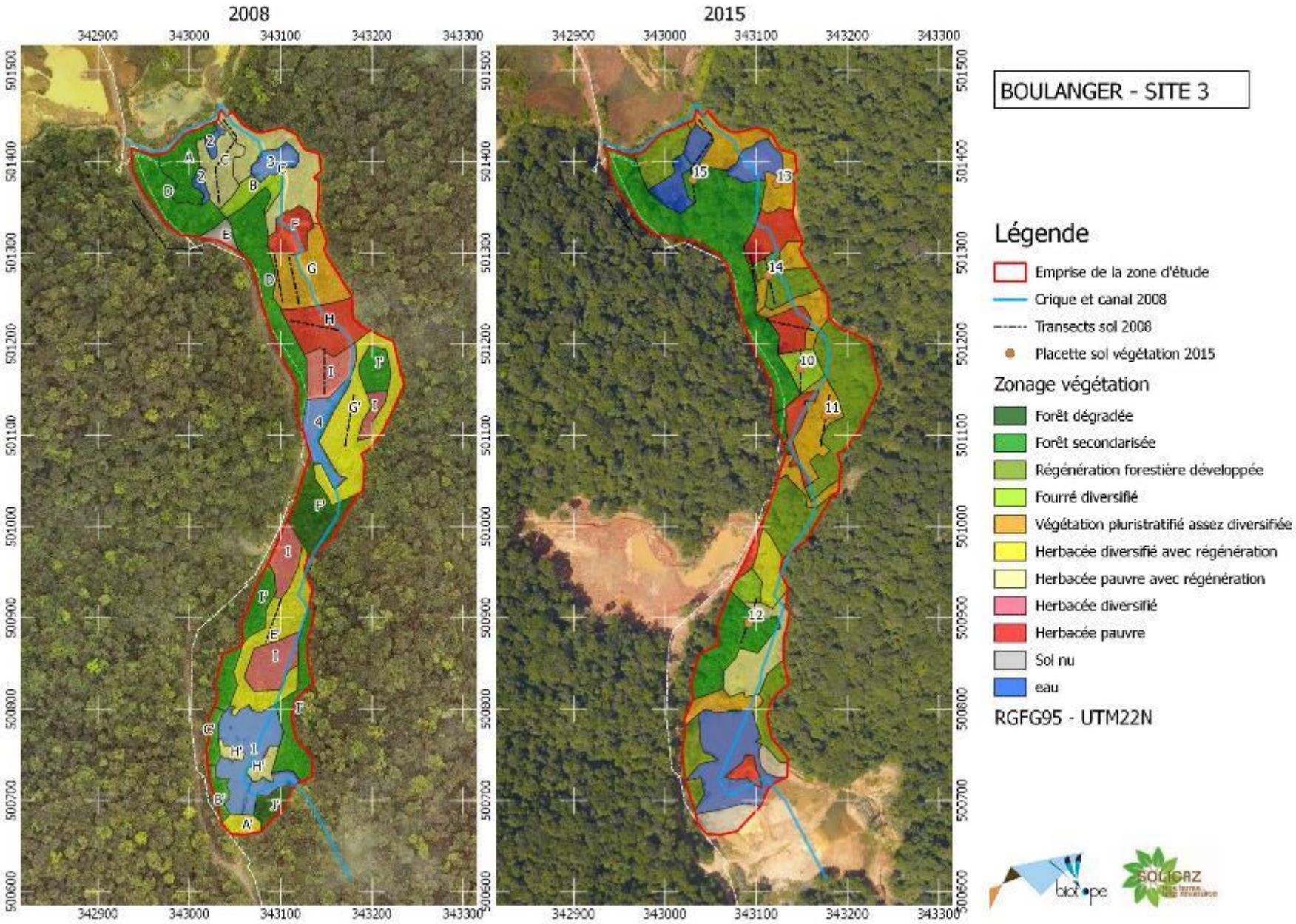
Une dynamique forestière forte s'observe depuis les lisières. Celle-ci favorise un retour vers des stades régénérés, même sur des zones initialement herbacées.

Des bassins non réhabilités au nord sont toujours en eau 11 ans plus tard.

Les zones centrales, correspondant aux anciens bassins de sédimentation, évoluent que très lentement vers des stades à dominés par les herbacées. Elles ne sont donc toujours pas régénérées après 11 ans.






2008
2015
342900
343000
343100
343200
343300
501500
501400
501300
501200
501100
501000
500900
500800
500700
500600
BOULANGER - SITE 3
Légende
Emprise de la zone d'étude
Crique et canal 2008
Transects sol 2008
Placette sol végétation 2015
Zonage végétation
Forêt dégradée
Forêt secondarisée
Régénération forestière développée
Fourré diversifié
Végétation pluristratifié assez diversifiée
Herbacée diversifié avec régénération
Herbacée pauvre avec régénération
Herbacée diversifié
Herbacée pauvre
Sol nu
eau
RGFG95 - UTM22N

Guadeloupe

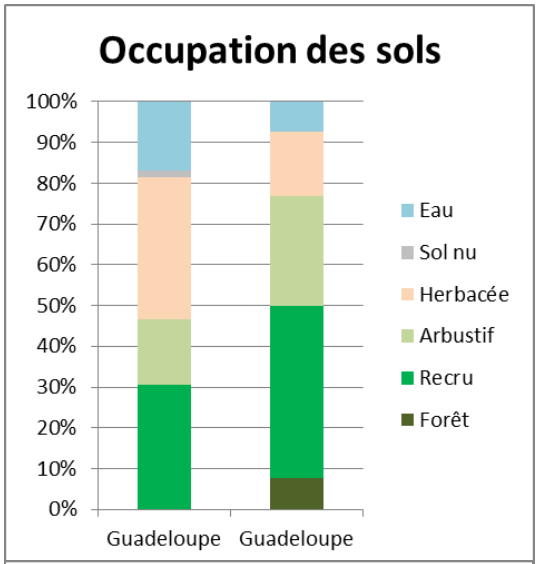
- Situation et contexte :

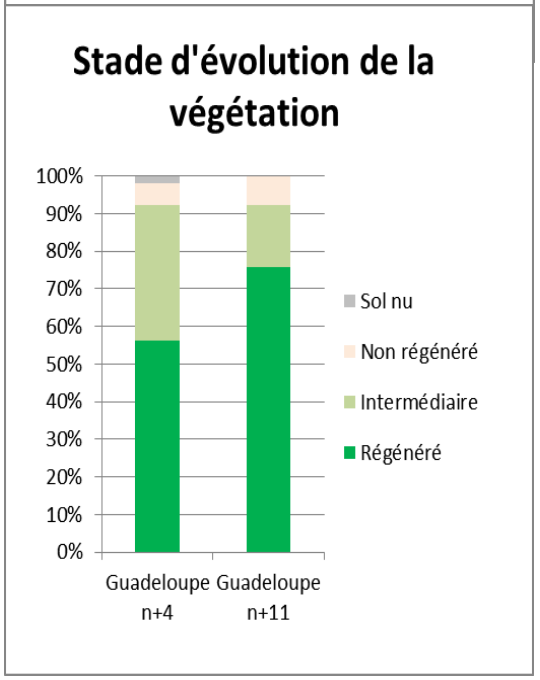
Un site de 2004, d'une centaine de mètres de large, avec revégétalisation assistée, peu efficace en 2008 malgré une préparation des sols.

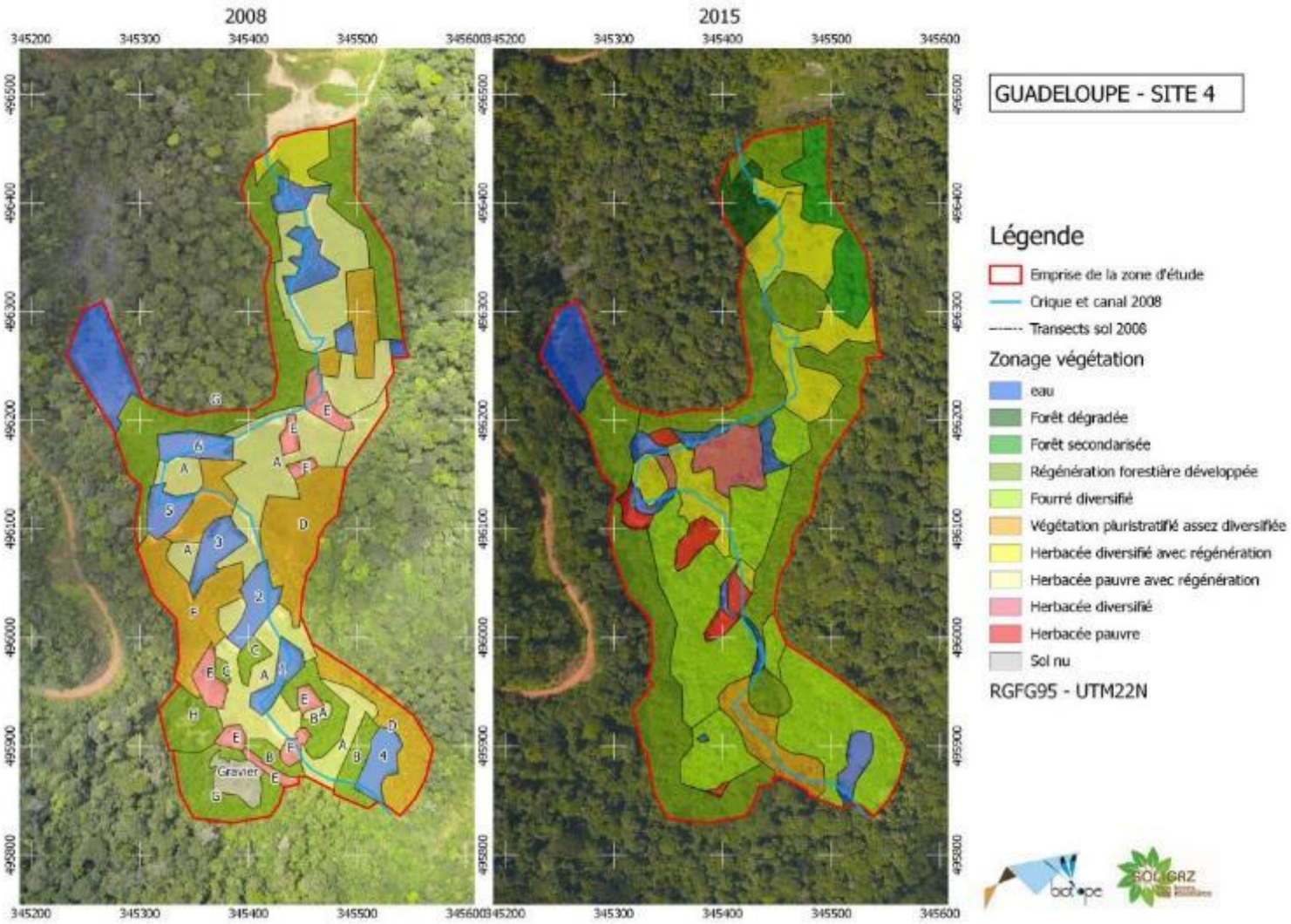
- Analyse de la reprise de la végétation :

Une importante fermeture progressive des bassins connectés, encore en eau en 2008 et transformé en stade herbacée pauvre en 2015.

Les secteurs pluristratifiés revenus à l'état forestier régénéré avec un fort effet lisière.






2008
2015
GUADELOUPE - SITE 4
Légende
Emprise de la zone d'étude
Crique et canal 2008
Transects sol 2008
Zonage végétation
eau
Forêt dégradée
Forêt secondarisée
Régénération forestière développée
Fourré diversifié
Végétation pluristratifié assez diversifiée
Herbacée diversifié avec régénération
Herbacée pauvre avec régénération
Herbacée diversifié
Herbacée pauvre
Sol nu
RGFG95 - UTM22N
Gravier

Grand Chardy

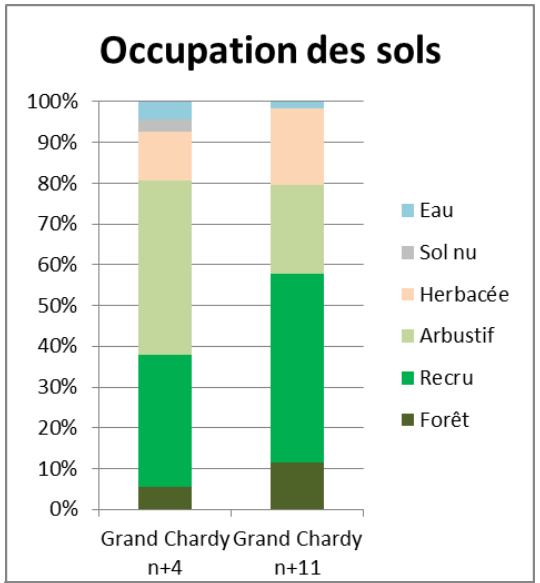
- Situation et contexte :

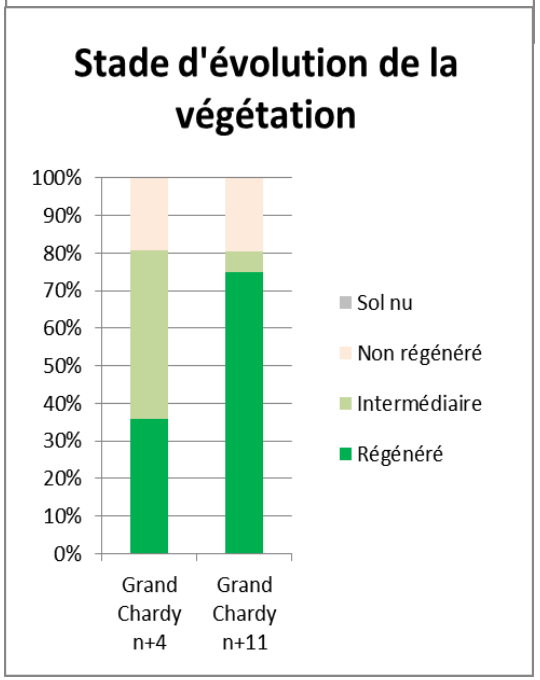
Un vieux site étroit, avec une simple remise en forme.

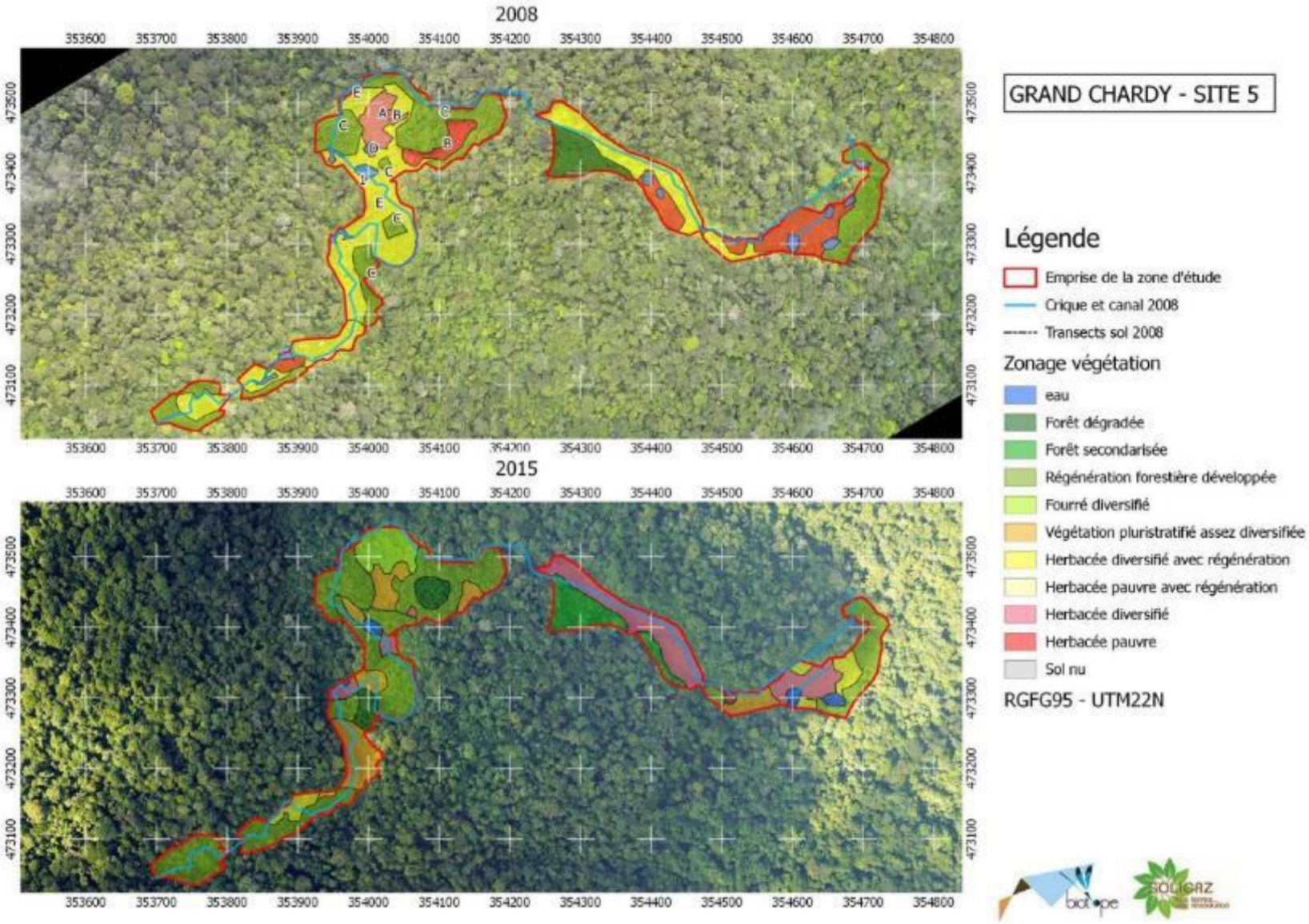
- Analyse de la reprise de la végétation :

Un stade arbustif non bloquant pour une bonne régénération sur l'ouest du site.

Des secteurs hydromorphes à herbacées bloquant sur l'est du site.






2008
2015
GRAND CHARDY - SITE 5
Légende
Emprise de la zone d'étude
Crique et canal 2008
Transects sol 2008
Zonage végétation
eau
Forêt dégradée
Forêt secondarisée
Régénération forestière développée
Fourré diversifié
Végétation pluristratifié assez diversifiée
Herbacée diversifié avec régénération
Herbacée pauvre avec régénération
Herbacée diversifié
Herbacée pauvre
Sol nu
RGFG95 - UTM22N

Georgeon

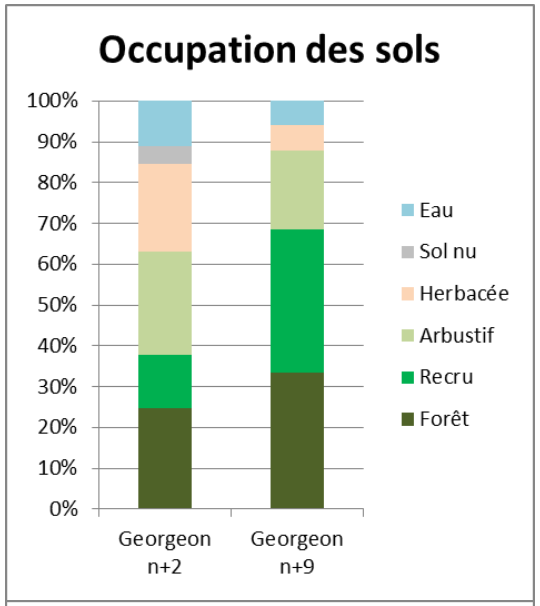
- Situation et contexte :

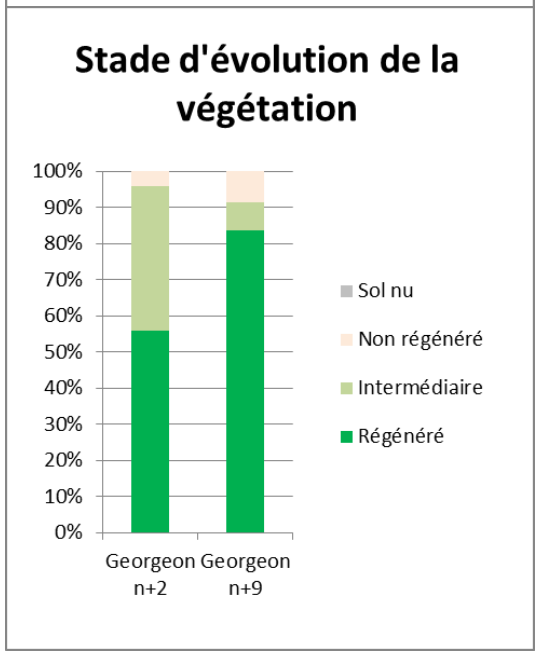
Sur la piste de Bélizon, un site assez encaissé, hétérogène sur sa largeur et sur l'effort de réhabilitation. Certains secteurs n'ont en effet pas été remaniés, d'autres ont été réhabilités au bulldozer et certains à la pelle hydraulique.

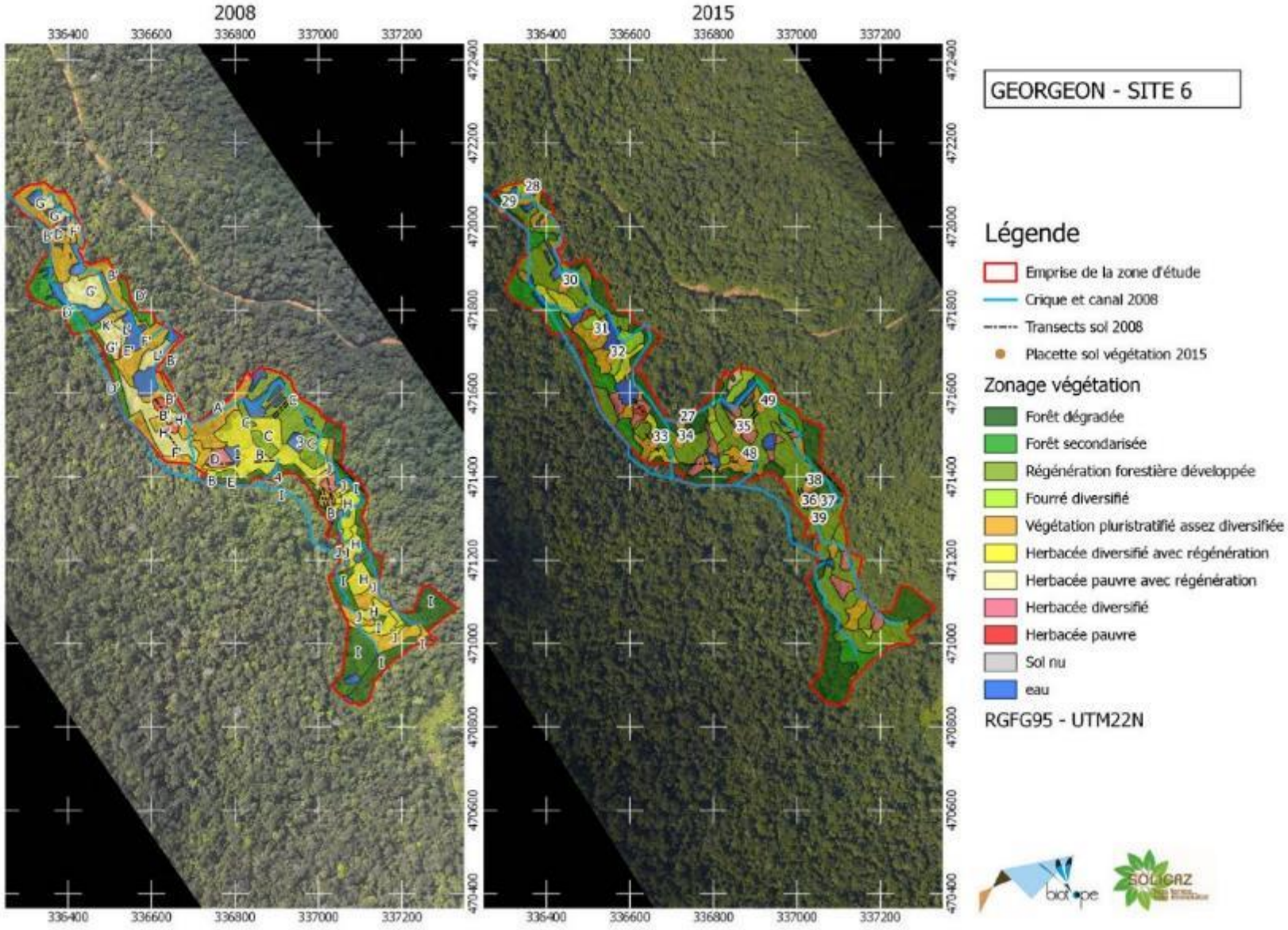
- Analyse de la reprise de la végétation :

Une dynamique forestière forte, favorisant un retour vers des stades régénérés diversifiés, même sur des zones initialement herbacées sur la partie sud du site.

Des bassins sont toujours en eau au nord, secteur non réhabilité. Les cônes de gravier traditionnellement non régénéré, ont vu par endroit un développement arboré assez conséquent malgré une ambiance sèche.






2008
2015
GEORGEON - SITE 6
Légende
Emprise de la zone d'étude
Crique et canal 2008
Transects sol 2008
Placette sol végétation 2015
Zonage végétation
Forêt dégradée
Forêt secondarisée
Régénération forestière développée
Fourré diversifié
Végétation pluristratifié assez diversifiée
Herbacée diversifié avec régénération
Herbacée pauvre avec régénération
Herbacée diversifié
Herbacée pauvre
Sol nu
eau
RGFG95 - UTM22N

Jalbot

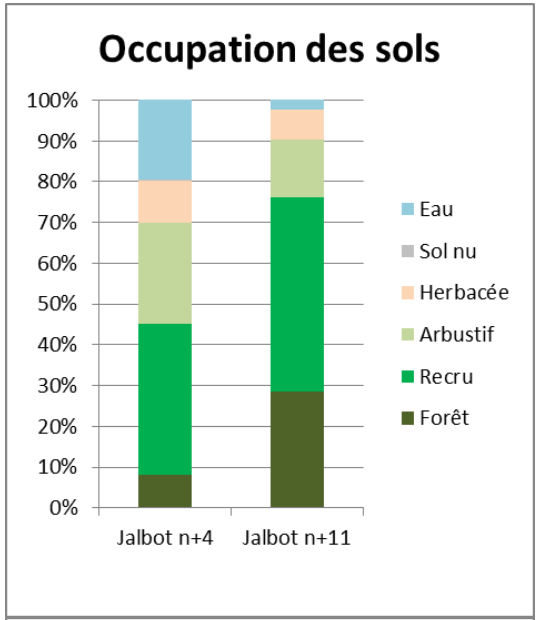
- Situation et contexte :

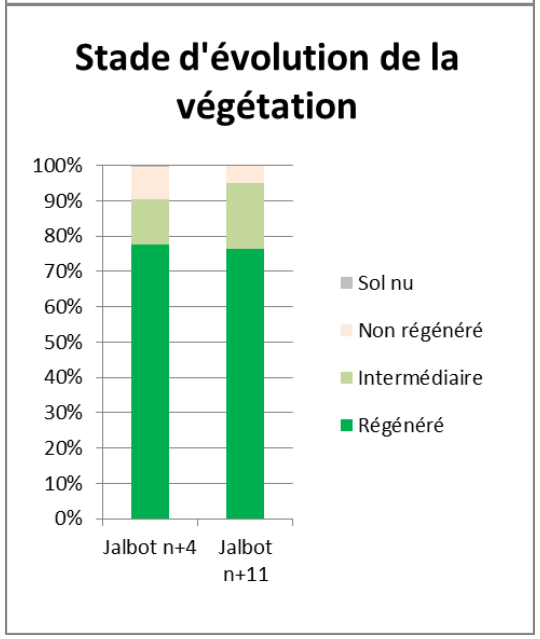
Un site étroit, avec un effort assez conséquent de la réhabilitation par une remise en forme du cours d'eau.

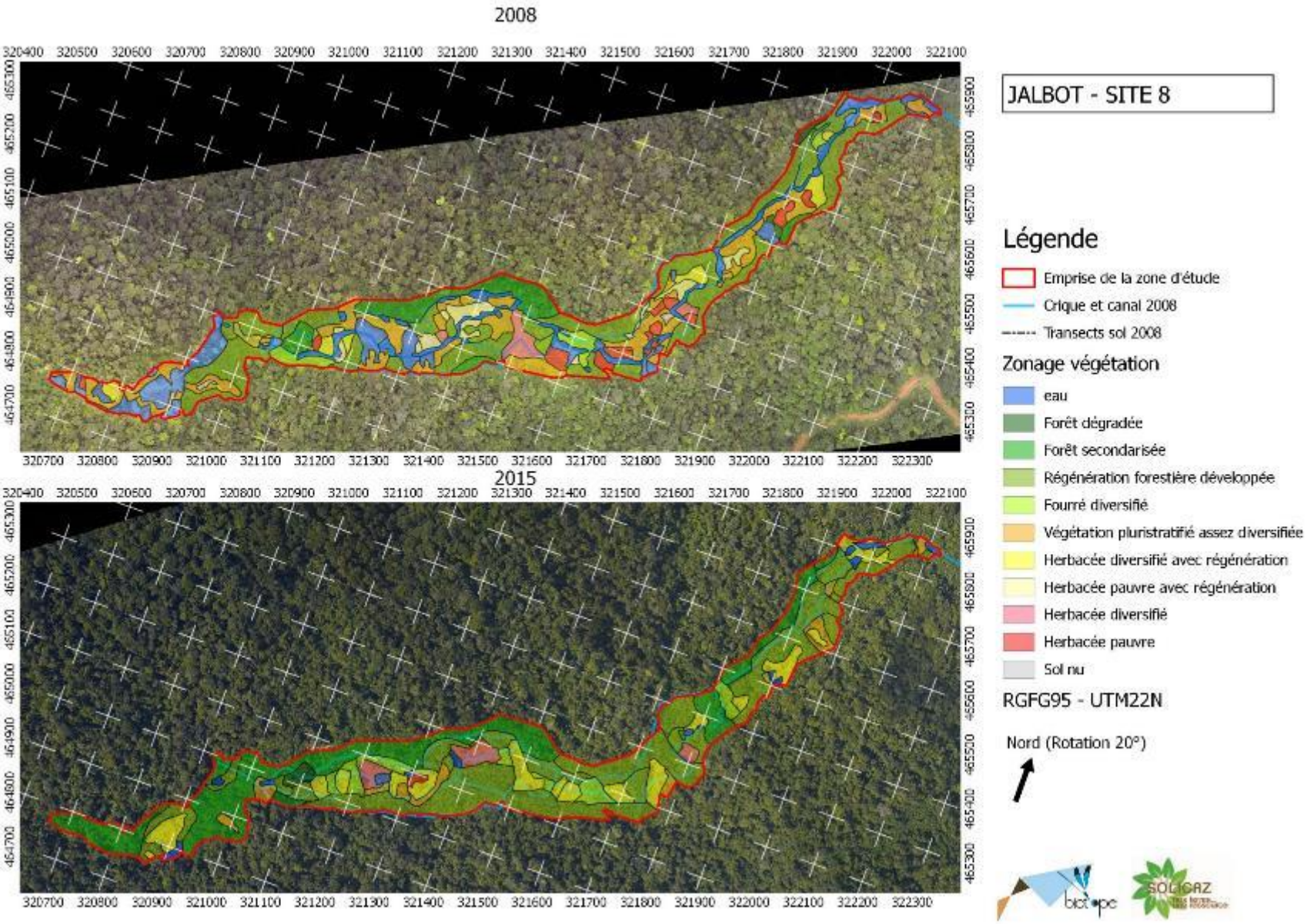
- Analyse de la reprise de la végétation :

Une diminution de l'emprise des secteurs en eau, passant par un stade herbacé diversifié mais persistant encore au centre du flat.

Un effet lisière très important avec de vieille formation à Bois canon qui passe lentement mais progressivement en forêt secondaire.






2008
2015
JALBOT - SITE 8
Légende
Emprise de la zone d'étude
Crique et canal 2008
Transects sol 2008
Zonage végétation
eau
Forêt dégradée
Forêt secondarisée
Régénération forestière développée
Fourré diversifié
Végétation pluristratifié assez diversifiée
Herbacée diversifié avec régénération
Herbacée pauvre avec régénération
Herbacée diversifié
Herbacée pauvre
Sol nu
RGFG95 - UTM22N
Nord (Rotation 20°)

La Boue

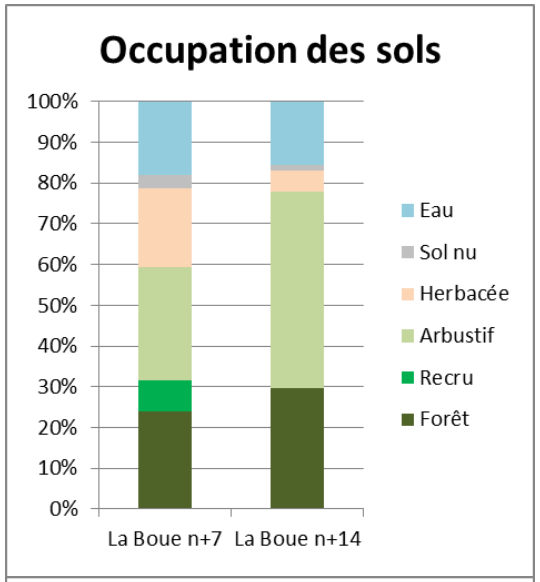
- Situation et contexte :

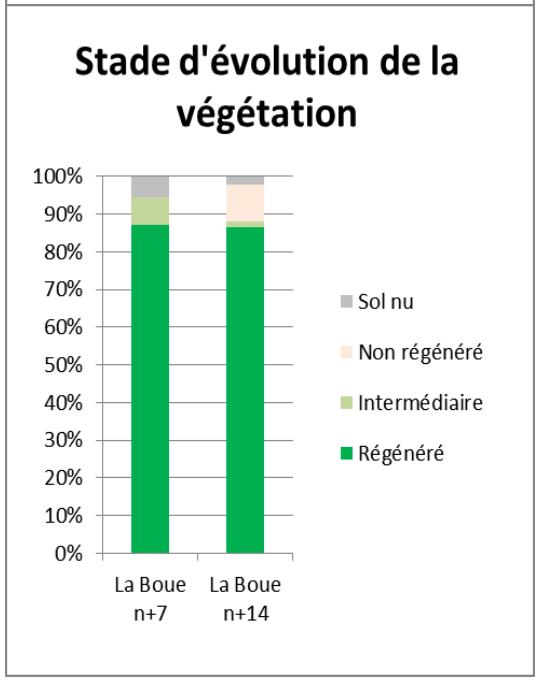
Un vieux site non réhabilité avec de nombreux bassins encore en eau.

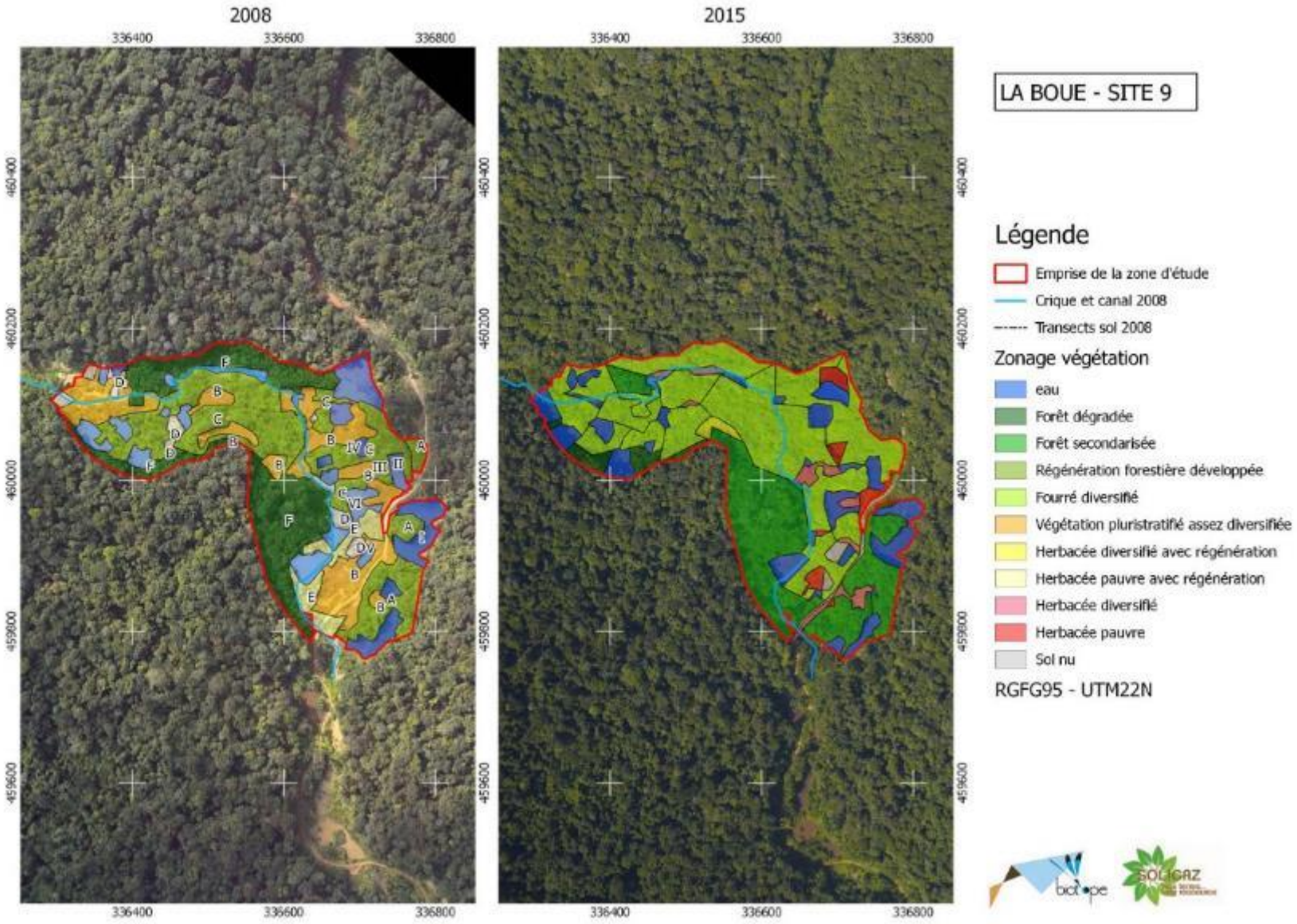
- Analyse de la reprise de la végétation :

Un stade arbustif long qui, bien que régénéré, semble avoir peu de capacité à évoluer vers des stades supérieurs.

L'emprise des surfaces en eau n'a pas diminuée.






2008
2015
336400
336600
336800
460400
460200
460000
459800
459600
LA BOUE - SITE 9
Légende
Emprise de la zone d'étude
Crique et canal 2008
Transects sol 2008
Zonage végétation
eau
Forêt dégradée
Forêt secondarisée
Régénération forestière développée
Fourré diversifié
Végétation pluristratifié assez diversifiée
Herbacée diversifié avec régénération
Herbacée pauvre avec régénération
Herbacée diversifié
Herbacée pauvre
Sol nu
RGFG95 - UTM22N

Grand Yaoni

- Situation et contexte :

Un site très large, très ancien avec de multiples exploitations successives, réhabilité en 2012, quelques plantations ont été effectuées sans trop de succès. L'*Acacia mangium*, présent de longue date sur le site semble recoloniser rapidement sur zones exondées.

- Analyse de la reprise de la végétation :

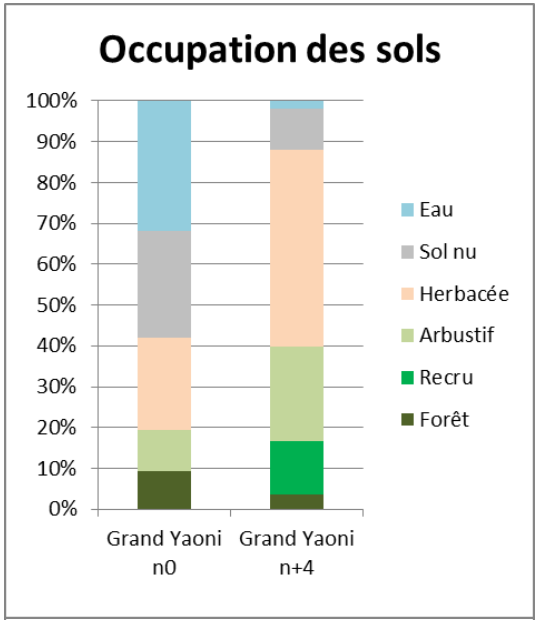
Une forte diminution des zones en eaux.

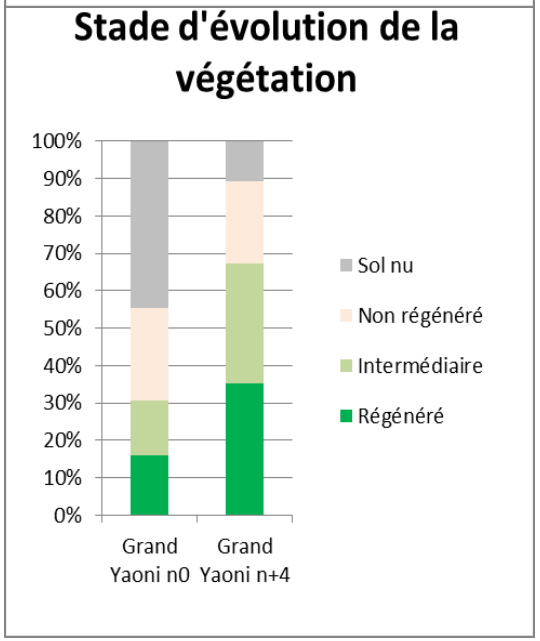
60 % de la surface est encore au stade herbacé, tant sur les secteurs de cône de gravier régalé que sur les zones basses des anciennes barranques.

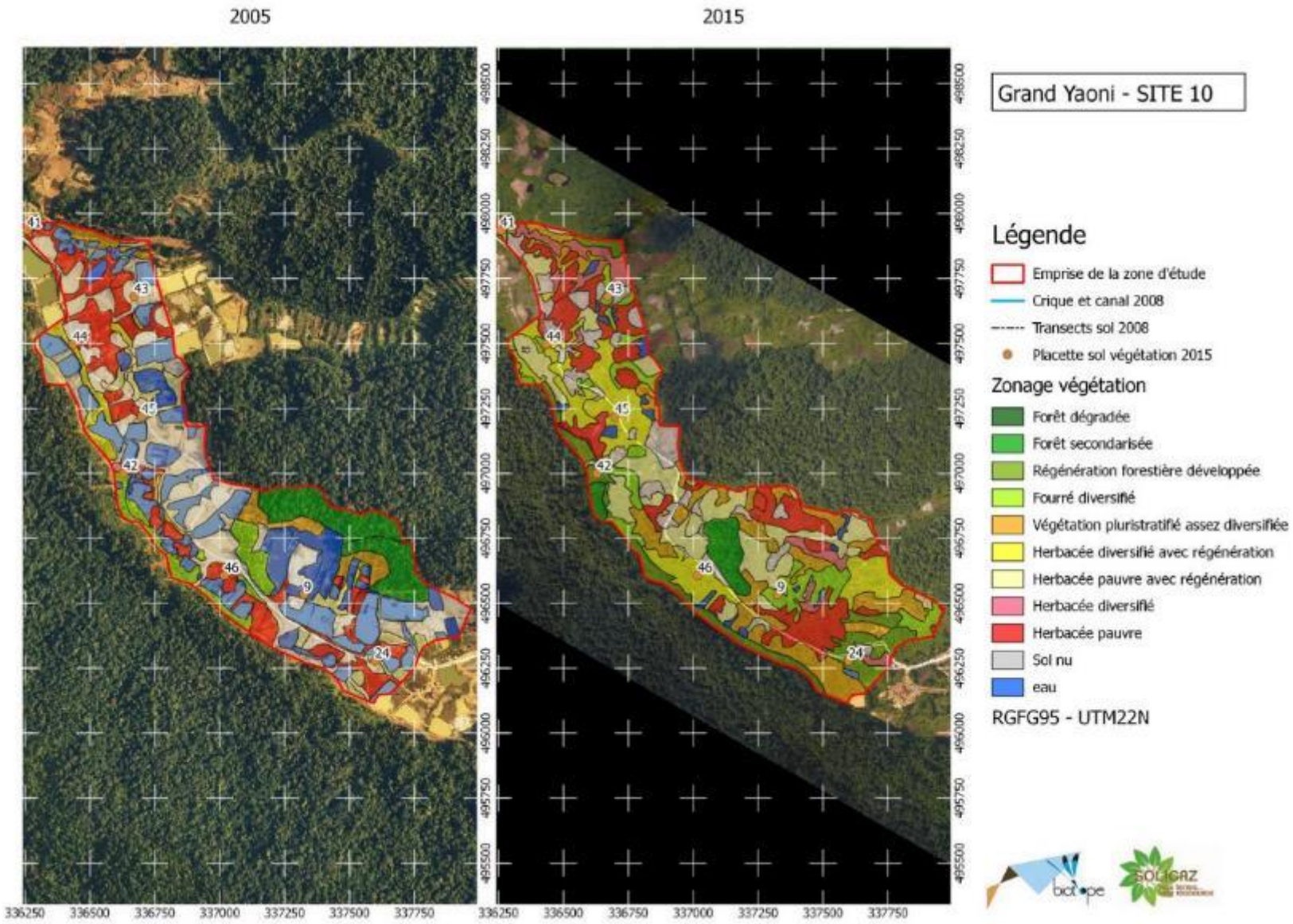
Une recolonisation spontanée en *Acacia mangium* formant des bosquets quasi-monospécifiques.

Des bosquets pluristratifiés sur milieu sec se sont formés par endroit (bois canon, arbuste du genre Vismia et Clusia, herbe sèches de type Cypéraceae).

L'effet lisière est important au sud, notamment sur les anciennes digues du canal de dérivation.






2005
2015
Grand Yaoni - SITE 10
Légende
Emprise de la zone d'étude
Crique et canal 2008
Transects sol 2008
Placette sol végétation 2015
Zonage végétation
Forêt dégradée
Forêt secondarisée
Régénération forestière développée
Fourré diversifié
Végétation pluristratifié assez diversifiée
Herbacée diversifié avec régénération
Herbacée pauvre avec régénération
Herbacée diversifié
Herbacée pauvre
Sol nu
eau
RGFG95 - UTM22N
336250
336500
336750
337000
337250
337500
337750

Smse

- Situation et contexte :

SMSE est un site étroit réhabilité il y a 3 ans, avec plusieurs remises en place d'andains et un effort important de revégétalisation avec des plantes légumineuses fixatrices d'azote (*Inga, Clitoria*). Ces plantations ont été menées et suivies par SOLICAZ dans le cadre du protocole GUYAFIX.

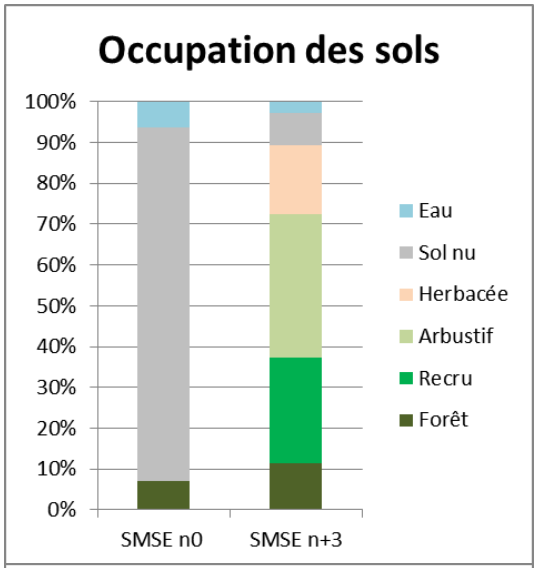
- Analyse de la reprise de la végétation :

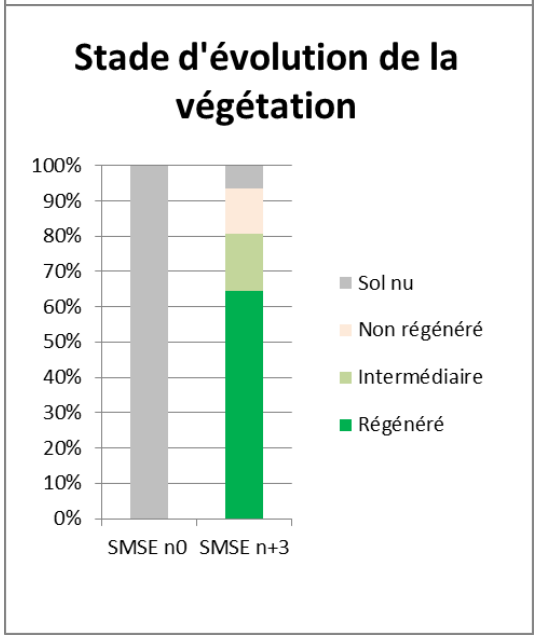
Le taux de reprise de la végétation est conséquent en seulement trois années.

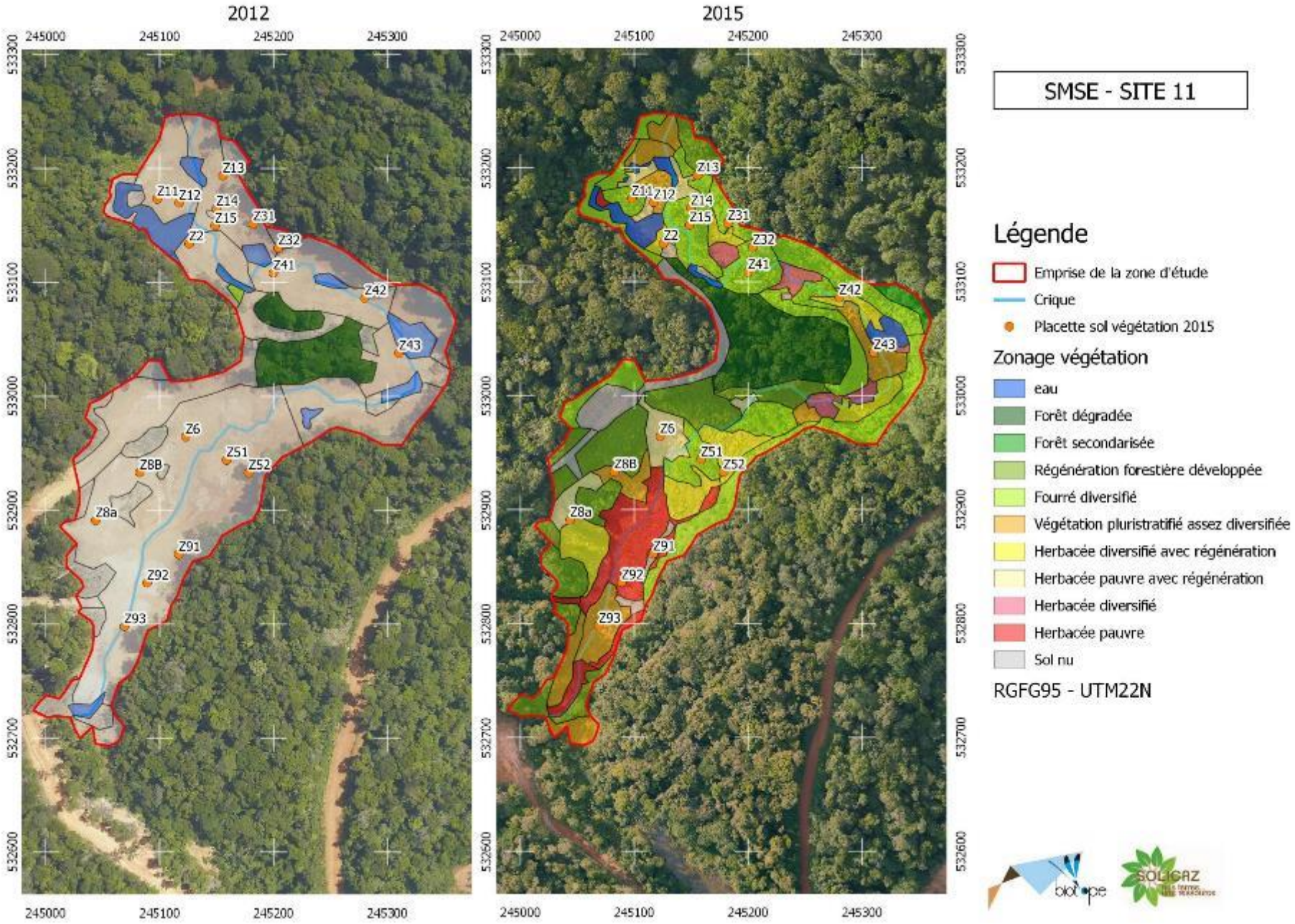
Les andains ont permis un développement rapide de la végétation vers un stade Régénéré (recru). Les espèces pionnières arborées, avec *Cecropia obtusa* comme espèce dominante, restent majoritaire, mais ces formations comportent également une diversité intéressante dans leurs strates inférieures.

Les plantations, encore jeunes, se sont majoritairement bien développées pour devenir des formations de type Fourré Diversifié (arbustif) et permettre l'arrivée d'espèces secondaires.

Sur la partie sud, certaines plantations ont malgré tout du mal à se développer correctement. Ceci semble dû à une nature de sol très pauvres, typique des fonds de barranques inondables.






2012
2015
245000
245100
245200
245300
533300
533200
533100
533000
532900
532800
532700
532600
Z13
Z11
Z12
Z14
Z15
Z31
Z2
Z32
Z41
Z42
Z43
Z6
Z51
Z52
Z8B
Z8a
Z91
Z92
Z93
SMSE - SITE 11
Légende
Emprise de la zone d'étude
Crique
Placette sol végétation 2015
Zonage végétation
eau
Forêt dégradée
Forêt secondarisée
Régénération forestière développée
Fourré diversifié
Végétation pluristratifié assez diversifiée
Herbacée diversifié avec régénération
Herbacée pauvre avec régénération
Herbacée diversifié
Herbacée pauvre
Sol nu
RGFG95 - UTM22N

Comparaison intersites

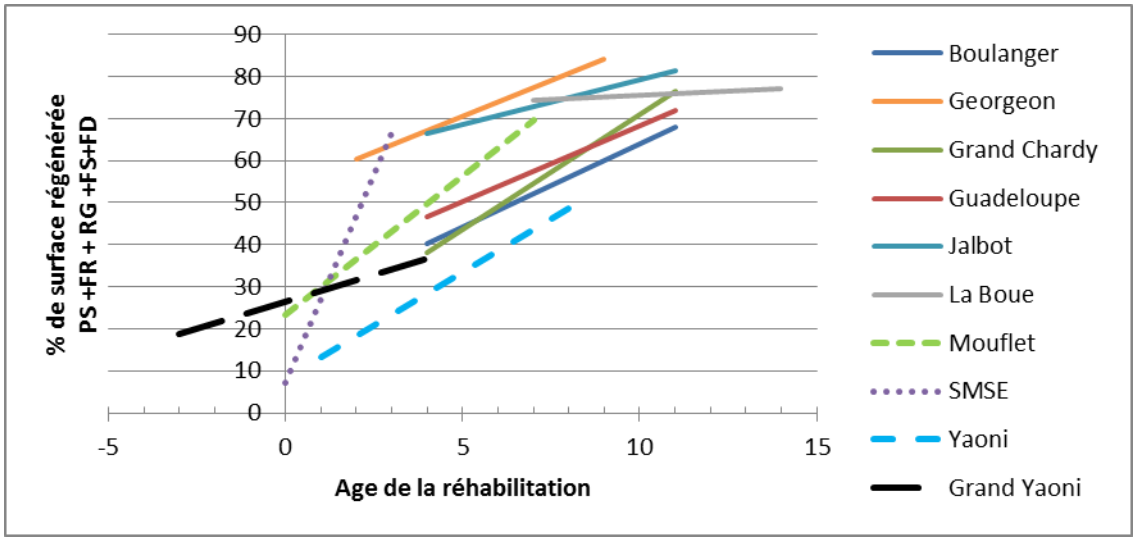


Figure 8 : Graphique des % de surface régénérée (en % de surface cumulée des formations FR + PS + RG + FS + FD) par site et suivant l'âge de leur réhabilitation.

	Age	% régénéré	Age	% régénéré	Progression en % en +	Vitesse de progression (pente)
La Boue n+14	7	74,4	14	77,0	2,5	0,4
Jalbot n+11	4	66,6	11	81,5	14,9	2,1
Grand Yaoni n+4	-3	18,8	4	36,9	18,1	2,6
Georgeon n+9	2	60,4	9	84,2	23,7	3,4
Guadeloupe n+11	4	46,7	11	72,1	25,3	3,6
Boulanger n+11	4	40,4	11	68,0	27,7	4,0
Yaoni n+8	1	13,3	8	48,7	35,4	5,1
Grand Chardy n+11	4	38,0	11	76,6	38,5	5,5
Mouflet n+7	0	23,3	7	69,7	46,3	6,6
SMSE n+3	0	7,1	3	66,7	59,6	19,9

Tableau 4 : % des surfaces régénérés sur les différents sites (surfaces cumulées FR + PS + RG + FS), et vitesse de progression des surfaces régénérées.

- Le site de SMSE montre la plus forte vitesse de progression des surfaces régénérées. Ceci semble due à la combinaison d'une bonne réhabilitation, avec l'étalement de nombreux andains et d'importantes surfaces revégétalisés avec des espèces adaptées. Le site a atteint en trois des valeurs proches de celles de sites vieux de 11 ans.
- Le site de Mouflet montre une vitesse de reprise de la végétation bonne vis à vis des autres sites, tout en sachant qu' un secteur de forêt initiale a été déforesté entre les deux analyses photographiques faisant abaisser singificativement cette vitesse. La réhabilitation progressive du site à la pelle avec remise des andains paraissent être les facteurs expliquant cette progression.

- Sur Yaoni, la progression est moins forte. La dynamique de reprise de la végétation semble freinée par de plus grandes surfaces de sol pauvres (gravier et fond de barranques). La réhabilitation des cônes de gravier et d'une partie des digues menées au bulldozer peut expliquer ce blocage aux stades herbacées. De plus, malgré certaines revégétalisation réussies sur plusieurs placettes, d'autres plantations mal adaptées au contexte de sol n'ont pas aboutie à des formations régénérées.
- Pour les sites plus âgés comme Jablot et Georgeon, les vitesses de progression de régénération des surfaces sont plus faibles. Pour Georgeon, ceci semble dû d'une part à des surfaces en eaux restante sur des zones non réhabilitées à l'ouest du site. Pour Jalbot ce sont les zones centrales hydromorphes qui évoluent très lentement avec des formations herbacées encore non régénérés.
- Grand Yaoni montre une progression faible des surfaces régénérées malgré une réhabilitation récente. La largeur du flat, l'ancienneté du site et les sols peu argileux, de nombreuses fois remaniés, peuvent expliquer cette faible vitesse de régénération de la végétation ; et ceux malgré la présence de l'espèce *Acacia mangium,* recolonisant spontanement une partie des placettes hors d'eau.
- Pour le site de la Boue, la succession végétale semble bloquée au stade arbustif et les surfaces en eau (bassins profonds non réhabilités) ne semblent pas pouvoir se refermer et évoluer vers des formations végétales. L'étendue de la rénégération végétale semble donc arrivée à son maximum.
- Sur le site de Grand Chardy, malgré un blocage au stade herbacé le long de la crique à l'est du périmètre, la régénération semble encore bien progresser sur l'ouest du périmètre. La végétation semble profiter de l'étroitesse du site et d'une bonne réhabilitation à la pelle hydraulique.

Notons qu'environ 15 à 30 % des surfaces restent non régénérées même plus de onze ans après la réhabilitation. Un blocage, ou au moins une reprise très difficile de la végétation s'opère sur ces sols (sols hydromorphes et gravillonnaires essentiellement ainsi que les zones en eaux des bassins non réhabilités).

De manière générale, les vitesses de développement de la végétation semblent diminuer avec le temps. Ceci peut s'expliquer par une recolonisation rapide des sols les plus propices sur les premières années, puis une reprise plus lente et progressive des surfaces plus contraignantes les années suivantes.

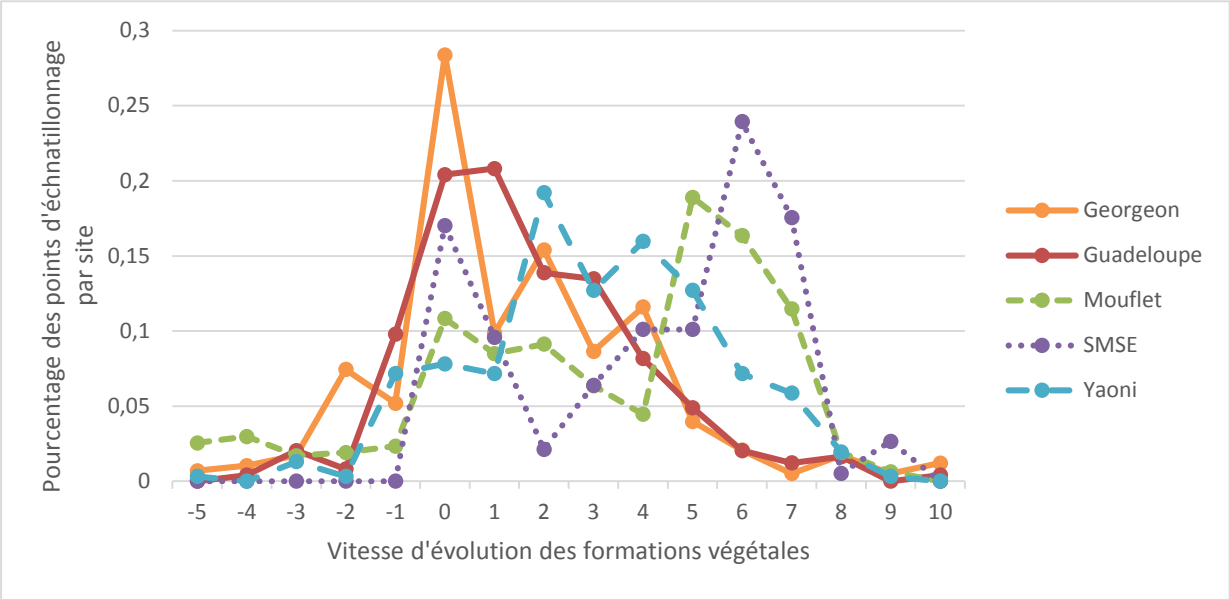


Figure 9: Vitesse d'évolution des formations végétales pour les sites de Georgeon (9 ans), Guadeloupe (11 ans), Yaoni (8 ans), Mouflet (7 ans) et SMSE (3 ans).

En abscisses, les valeurs de – 5 à 10 correspondent à l'évolution des points d'échantillonnages. Les valeurs négatives correspondent à une dégradation de la végétation ou à certains biais liés à la photo-interprétation ; les valeurs positives à une progression dans la régénération des formations végétales (par exemple une valeur de 4 peut être le passage d'un stade herbacé à régénéré, mais aussi d'un stade sol nu à herbacée avec régénération).

En ordonnée, le pourcentage de point d'échantillonnage par site ayant la même vitesse d'évolution.

De façon générale, comme de ce que l'on a pu voir précédemment, plus le site est récent plus l'évolution des formations végétales est potentiellement rapide.

Pour SMSE, les valeurs élevées sont dues d'une part aux replantations mais aussi aux andains qui permet le passage rapide d'un sol sans végétation (valeur 1) à celui d'une formation à bois canon avec des arbustes de sous-bois garantissant la régénération végétale (valeur 8). Le pic aux valeurs 6 et 7 correspondent aux plantations faisant évoluer un sol nu vers les stades « fourré diversifié » et « pluristratifié ».

Pour Mouflet, le pic est décalé d'un cran vers la gauche signifiant une évolution légèrement moins rapide. Les sols ont plus tendance à évoluer vers des stades intermédiaires de régénération. Ce décalage s'observe de manière plus prononcée sur le site de Yaoni, signifiant un plus faible potentiel de régénération des formations végétales.

Pour Guadeloupe et surtout Georgeon, on observe un ralentissement encore plus important de l'évolution. Certaines formations végétales sont bloquées, d'autres comme les stades régénérés évoluent très lentement ce qui est le cas pour le passage normal d'une formation à bois canon assez diversifiée au stade de forêt secondaire.

Analyse diachronique globale

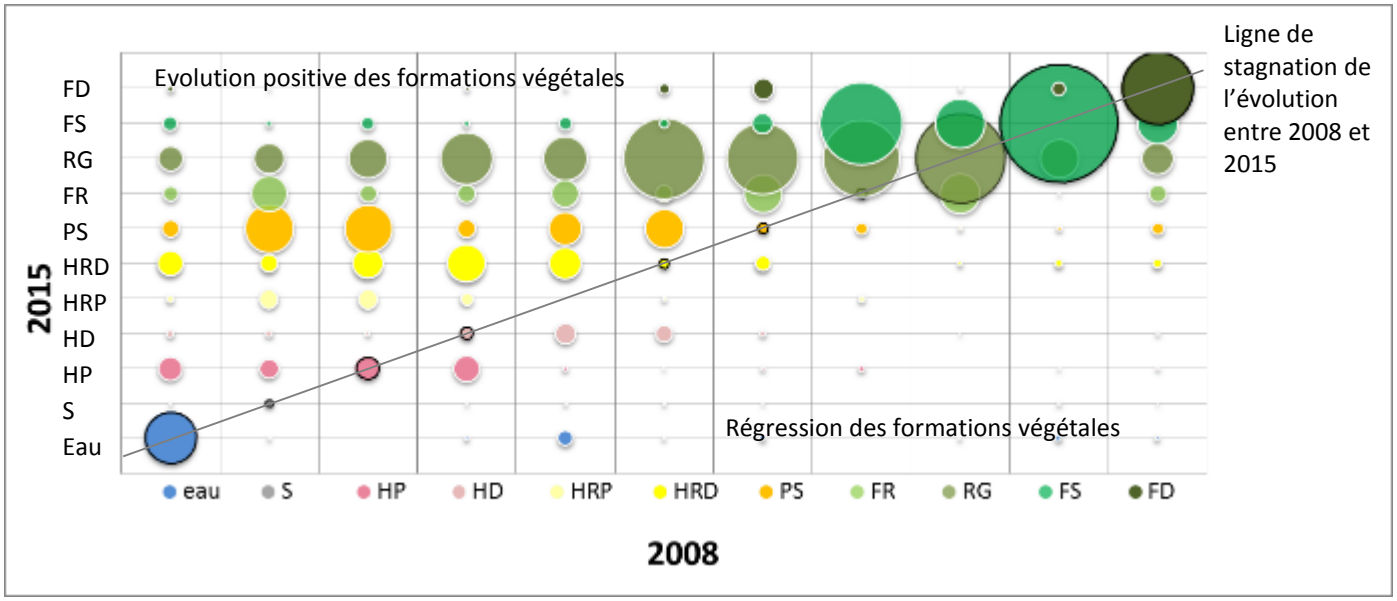


Figure 10 : Evolution des formations végétales entre 2008 et 2015, hors SMSE et Grand Yaoni. (Graphique à lire en colonne de bas en haut).

Ce graphique montre l'évolution des formations végétales sur les points d'échantillonnage, tous sites confondus (hors SMSE et Grand Yaoni qui n'ont pas le même pas de temps d'observation).

Pour les zones en eau (crique large, barranque) de 2008 (première colonne), une forte proportion (27%) est restée en eau en 2015. Certaines placettes en eau en 2008 ont néanmoins évoluées progressivement vers des formations végétales plus développées par comblement progressif des bassins ou fermeture du milieu par la végétation environnante.

Sur la deuxième colonne, on peut notamment apprécier l'évolution des placettes de sol (S) en 2008 vers des formations végétales « supérieures », et principalement vers une formation pluristratifié (PS 25%) comportant tant des arbres pionniers de type *Cecropia, Laetitia procera*, que des arbustes comme des *Vismia* et jeunes *Ingas*, mais également une proportion importante d'herbacée. Une bonne proportion des points d'échantillonnages a évolué vers des stades régénérés supérieurs (FR 18% et RG 15%). Ces placettes de sol possédaient donc en 2008 des conditions pédologiques et structurelles pour un retour correct de la végétation. On notera qu'une partie n'évolue (10%) que très succinctement pour devenir des placettes à végétation herbacée pauvre. Ce sont ces placettes qui semblent aboutir le plus fréquemment à un blocage de la végétation

Pour les secteurs sans régénération, Herbacée Pauvre (HP) et Herbacée Diversifiée (HD), l'évolution vers les stades supérieurs concernent près de 60% des placettes (visible notamment sur Yaoni). Ces formations n'aboutissent que faiblement au stade fourré diversifié (FR 18%). Enfin, environ 13 % des points d'échantillonnage restent bloqués à stades herbacées sans régénération, situation à priori de blocage.

Le stade à herbacée pauvre avec régénération (HRP) semble être une formation végétale seuil pour laquelle certains points évoluent lentement mais progressivement vers des stades supérieurs alors que d'autres points régressent en stade Herbacée diversifié (10%) voir vers des secteurs en eaux (8%). Ceci semble à une dégénérescence des plantes de régénération (*Vismia, Cecropia*…) qui n'arrive pas à se développer sur les sols les plus pauvres, voir sur des sols inondables de fond de barranques.

Pour le stade Herbacée Régénérée Diversifiée (HRD), 86% des placettes ont évolué vers des stades régénérés (dont 40% pour le stade RG). On retrouve tout de même une régression de 8 % des points d'échantillonnage.

Le stade Pluristratifiés Diversifiés (PS) semble posséder la qualité requise pour une évolution vers le stade Régénéré (RG). Ces stades se retrouvent principalement sur les secteurs argileux meubles, voir sur gravier réhabilité à la pelle. 90% des points de contrôle ont évolué positivement.

Le stade Fourré (FR) semble évoluer rapidement vers le stade régénéré, voir forêt secondaire. La diversité de ces milieux, et la qualité de leur sol (zone souvent défrichée mais dont le sol n'a pas été exploité) peut expliquer cette évolution assez rapide.

Seule une partie (25%) des secteurs en stade Régénéré (RG) ne semble avoir évolué vers le stade de Forêt Secondaire (FS). Ces formations parfois assez homogènes à arbres pionniers sur des sols mis à nu, se développent souvent en lisière de la forêt non défrichée ou sur les secteurs réhabilités avec des andains, et préférentiellement sur des sols argileux. Cette évolution lente vers un stade supérieur (Forêt Secondaire) est de manière normale longue à atteindre.

Les points de contrôle en forêt secondaire (FS), formée de recrues forestiers, « murissent » doucement avant d'atteindre le stade supérieur (Forêt primaire).

Enfin d'après le graphique, une portion des secteurs de Forêt dégradé (FD) semble subir un dépérissement (36%). Ceci peut s'expliquer par une dégradation progressive des espèces originelles, notamment des grands arbres de haut jet, et un développement important d'espèces pionnières sous leur houppier certainement dû aux modifications des conditions abiotiques (asséchement, augmentation de la luminosité, modification des hauteurs de nappe…). On assiste donc à une modification du cortège végétal, les espèces ombrophiles et hydrophiles les plus sensibles disparaissant aux profits d'espèces pionnières de régénération (*Cecropia*, *Isertia*….). Quelques déforestations intervenues entre les deux années observations (Mouflet) expliquent certaines régressions plus importantes.

Effet lisière

L'analyse des images aériennes de 2008 et 2015 a permis de visualiser l'effet de la lisière sur la reprise de la végétation.

Plusieurs points de contrôle ont été effectués sur différents sites. Le point de départ est la lisière forestière créée lors de la phase de défrichement, le point final est la limite de développement d'une formation végétale régénérée au droit de la lisière.

Une valeur moyenne de progression de 4 mètres par an depuis la lisière a été calculée. Notons que cette progression du bourrelet de lisière, comme sur l'ensemble du site, est plus rapide sur les premières années de recolonisation de la végétation en s'effectuant préférentiellement sur les sols possédant de bonnes conditions d'accueil de la végétation (secteur argileux, ancienne digue).

Cette recolonisation depuis la lisière est due à plusieurs facteurs biologiques et physiques :

- Les chauves-souris et les oiseaux utilisent la lisière comme couloir de progression. Ces animaux frugivores et granivores sont des disséminateurs naturels jouant un rôle clé dans régénération forestière. De nombreuses espèces pionnières comme les Bois canons, les Vismia, les Ficus, certaines Melastomatacées, Piperacées, Clusiacées et d'autres espèces à graines sont ainsi propagées par les animaux (zoochorie). (Cf. Figure 62 en annexe)
- Les conditions environnementales sévères (température, évaporation,…) que l'on peut avoir au centre d'un site, sont généralement attenuées par la lisière forestière offrant de l'ombrage, de l'humidité et un apport de matière organique favorable à la germination des graines.

Figure 12 : Evaluation de l'effet lisière sur le site de Mouflet

Figure 11 : Evaluation de l'effet lisère sur le site de Yaoni

Modalité Andain/sol nu

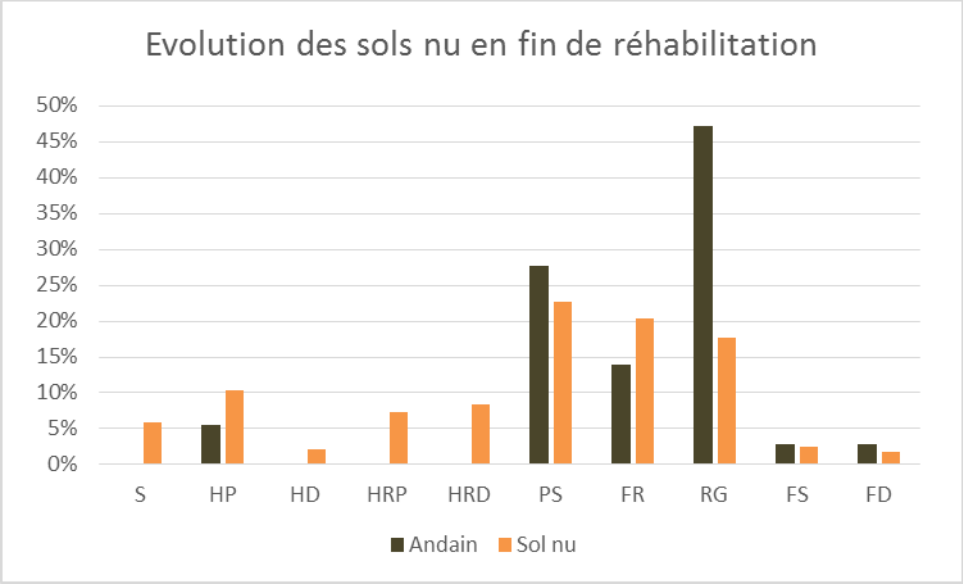


Figure 13 : Evolution de la végétation selon la remise en état du sol (donnée issues de Moulfet, SMSE et Yaoni)

Pour les sols argileux nus environ des placettes 60 % évoluent vers des formations régénérées. Une grande partie de ces placettes se situent en bordure de site. 40 % des placettes restent bloquées ou sont à évolution lente.

Pour les sols argileux sur lesquels des andains ont été replacées, 95 % d'entre elles évoluent vers des formations régénérées, dont 45% directement vers des formations à bois canon hébergeant des espèces secondaires offrant des possibilités d'évolution.

L'intérêt de la remise en place des andains est de permettre une évolution rapide des sols sans passer par les stades intermédiaires à herbacées.

Figure 14 : Evolution des andains entre 2012 et 2015 sur le site de SMSE

Figure 15 : Evolution des andains entre 2008 et 2015 sur le site de Mouflet

Modalité fixateur /non fixateur

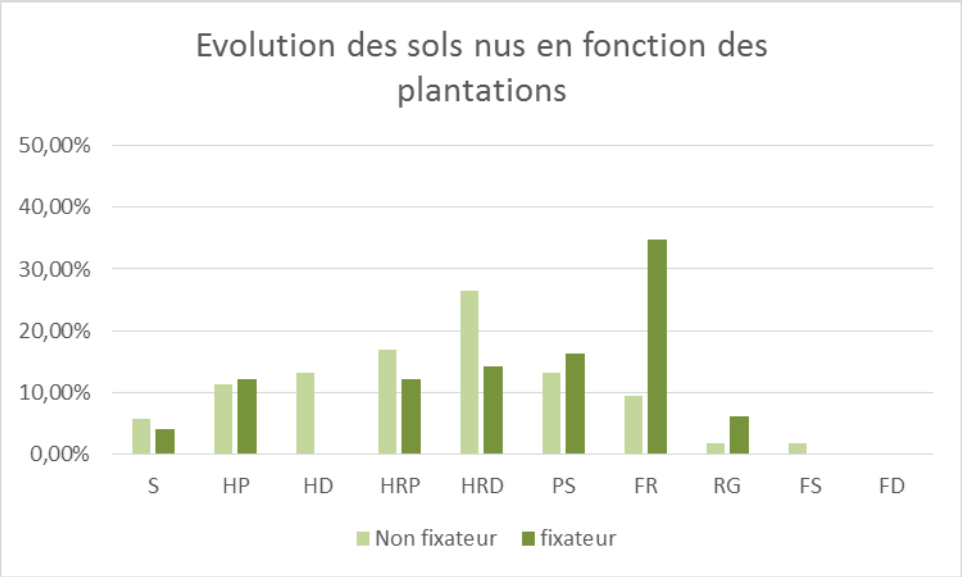


Figure 16 : Evolution de la végétation selon le type de végétaux plantés (données issues de Boulanger, Mouflet, SMSE et Yaoni)

Pour les placettes plantées sans fixateurs (Yaoni, Mouflet), l'évolution majoritaire vers les stades HP, HD, HRP, HRD), démontre qu'une grande part des plantations ne sont pas efficaces ou à développement très lente. 20% évoluent tout de même vers des stades régénérés de type pluristratifié et fourré après 7 ans d'âge.

Pour les placettes avec fixateurs inoculés, 55% des plantations évoluent vers les stades de pluristratifié, fourré ou régénéré. A noter que les plantations de fixateurs sur SMSE sont encore jeunes avec seulement 3 ans d'âge. Certaines placettes prometteuses sont encore aux stades HRD et HRP. Sur certains secteurs, les plantations, même inoculées, semblent néanmoins végéter puisqu'elles sont restées aux stades S et HP.

Notons enfin que les plantations ne se font généralement pas en bordure du site. L'effet lisière n'est donc pas perceptible contrairement l'échantillonnage des sols nus.

A retenir

- Andains : l'étalement d'andain permet un passage rapide vers un stade à régénération naturelle diversifiée à base de plantes pionnières forestières. Le stade RG est atteint pour 50% des placettes.
- Plantation sans espèces fixatrice d'azote : la majorité des plantations ne semblent pas pertinentes pour un retour rapide vers un stade régénéré.
- Plantation avec des espèces fixatrices d'azote : bon retour rapide vers les premiers stades régénéré (type fourré ou pluristratifié). Cela évite le stade à bois canon qui peut être long à évoluer, mais peu amnener à un possible blocage à plus ou moins long terme dans le cas de formation monospécifique.

V.2 Inventaire botanique à la parcelle

V.2.1 Méthodologie

Les relevés ont été effectués sur la base de la méthodologie employée par l'ONF en 2008, à laquelle nous avons rajouté différents indicateurs physionomiques intéressants pour l'étude.

Afin d'obtenir des inventaires botaniques comparables par site et par formation végétale, des stations d'échantillonnage sur 25 m² par type d'habitat homogène ont été menés. Sur ces placettes, en plus des inventaires à l'espèce, plusieurs paramètres ont été relevés : la richesse spécifique, la densité par espèce, hauteur de la végétation, le diamètre maximal….

Pour les espèces inventoriées, nous avons indiqués leur type (herbacée, plante aquatique, liane, arbuste, arbre, palmier…), leurs traits écologiques de développement (rudérale, pionnière, secondaire, forestière) et leur origine (indigène, exogène au site, plantation).

L'occurrence des strates de végétations (herbacée, arbustive, arborée) a été noté pour chaque placette à l'aide d'indice de couverture (0 : nulle ; 1:<5% ; 2 :<25% ; 3 :<50% ; 4 :<75% ; 5 : <75%), et d'indice de diversité (0 : monospécifique ; 1 : 2 à 3 espèces >90% couvert ; 2 : 2 à 3 espèces >50% couvert ; 3 : diversifié).

Les prélèvements de sol ont été effectués au sein de ces placettes pour connaitre leur activité microbiologique. Ce sondage des d'horizons de sols réalisé à la tarière a aussi permis d'avoir des indications sur le substrat (gravier, argile, limon) et la potentielle mise en place d'une couche argileuse et de terre forestière lors de la réhabilitation (voir protocole étude de sol).

De même, les modalités de réhabilitation (pelle, bulldozer, réhabilitation progressive), qui sont parfois hétérogène à l'échelle d'un même site puisque tous les secteurs n'ont pas le même historique, ont pu être appréhendées de manière plus précise.

Dans le but de posséder un jeu de données couvrant l'ensemble des modalités possibles (âges, sol, réhabilitation), les placettes ont ainsi été positionnées sur des secteurs typiques des multiples conditions écologiques observables sur les sites, pour les objectifs de cette étude, nous nous sommes néanmoins concentrés plus particulièrement sur les formations végétales régénérées. Au total, 52 placettes d'échantillonnages ont été relevées.

La standardisation des inventaires et relevés a permis de comparer les placettes entre elles et de tester différentes modalités en faisant abstraction du site minier. Citons par exemple :

- Station à formation haute en régénération sur sol argileux / Station à formation haute en régénération sur terre végétale issue de la réhabilitation.
- Station à végétation herbacée diversifiée sur gravier / Station à végétation herbacée pauvre sur gravier.

Notons que le parcours des sites pour mener les inventaires botaniques a permis de valider ou corriger certaines cartographies par photo-interprétation.

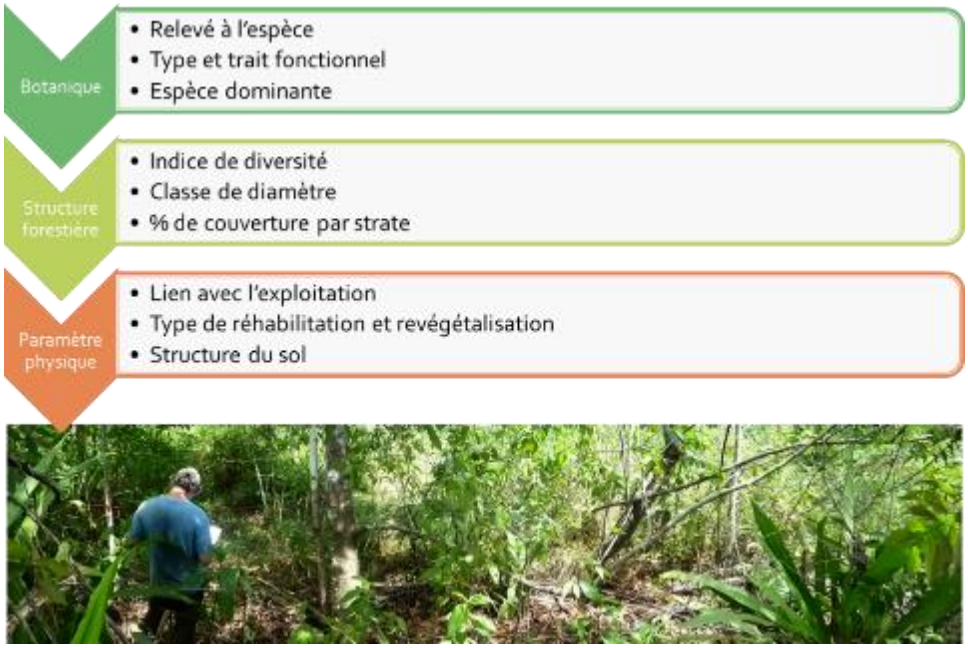


Figure 17 : Méthodologie d'inventaire botanique à la parcelle

V.2.2 Résultats des inventaires à la parcelle.

Diversité spécifique

Au total, plus de 161 espèces ont été inventoriées sur l'ensemble des placettes. Ces taxons sont répartis dans 65 familles.

2 espèces font parties de Lycopodes dont *Lycopodiella cernua* pouvant former des peuplements denses de 50 centimètres de hauteur en milieu humide ouvert.

11 espèces appartiennent au groupe des ptéridophytes (fougères), avec une présence dominante de *Pityrogramma calomelanos*, une petite fougère terrestre de zones gravillonnaires humides marquant les milieux fortement dégradés et ensoleillés, et de *Dicranopteris pectinata* (syn. *Gleichenia pectinata)* sur les talus latéritiques lors d'exploitation colluvionnaires, les bords de piste et les plates-formes terrassées.

41 espèces de monocotylédones, formées essentiellement d'herbacées dont *Panicum pilosum* persistant longtemps même après le rétablissement d'un couvert végétal important, et *Bracharia umbellata* sur les secteurs plus ouverts. Les aracées sont également bien représentées avec 8 espèces, majoritairement épiphytes, mais c'est sans conteste *Heliconia bihai* qui ressort comme le plus commun sur ces placettes. *Cyclanthus bipartidus*, une grande herbacée indigène au bloc forestier, est aussi largement présente en bords de barranques et cours d'eau.

106 espèces de dicotylédones, regroupant essentiellement arbres, arbustes et épiphytes. Le groupe des légumineuses (Fabacée, Mimosacée et Césalpiniacée) caractéristiques des espèces pionnières y ressort comme largement dominant avec 29 espèces. Chez les espèces arbustives ce sont les Mélastomatacées qui sont les plus fréquente avec des espèces tant pionnières comme *Miconia racemosa et Clidemia hirta*, que certaines plus « secondaires » provenant certainement du bloc forestier (dont *Leandra cremersii*, espèce rare et protégée en Guyane). Cette famille est

surreprésentée du fait de leur caractère attractif vis à vis de l'avifaune leur permettant une dissémination rapide et efficace.

DICOTYLEDONEA	LEGUMINOSAE-MIMOSOIDEAE	Inga edulis Mart.	Arbre
DICOTYLEDONEA	ULMACEAE	Trema micrantha (L.) Blume	Arbuste
PTEROPHYTA	ADIANTACEAE	Pityrogramma calomelanos (L.) Link	Herbe
MONOCOTYLEDONEA	POACEAE	Panicum pilosum Sw.	Herbe
DICOTYLEDONEA	CLUSIACEAE	Clusia cf. nemorosa G. Mey.	Arbuste
MONOCOTYLEDONEA	CYCLANTHACEAE	Cyclanthus bipartitus Poit.	Herbe
DICOTYLEDONEA	EUPHORBIACEAE	Croton matourensis Aubl.	Arbre
DICOTYLEDONEA	RUBIACEAE	Isertia coccinea (Aubl.) J.F. Gmel.	Arbre
DICOTYLEDONEA	LEGUMINOSAE-MIMOSOIDEAE	Inga ingoides (Rich.) Willd .	Arbre
DICOTYLEDONEA	MORACEAE	Ficus cf. maxima Mill.	Arbre
DICOTYLEDONEA	MELASTOMATACEAE	Bellucia grossularioides (L.) Triana	Arbre
DICOTYLEDONEA	RUBIACEAE	Gonzalagunia dicocca Cham. & Schltdl.	Arbuste
DICOTYLEDONEA	MYRISTICACEAE	Virola surinamensis (Rol. ex Rottb.) Warb.	Arbre
DICOTYLEDONEA	CLUSIACEAE	Vismia latifolia (Aubl.) Choisy	Arbre
DICOTYLEDONEA	LEGUMINOSAE-MIMOSOIDEAE	Mimosa myriadenia (Benth.) Benth.	Liane
DICOTYLEDONEA	CLUSIACEAE	Vismia cayennensis (Jacq.) Pers.	Arbuste
DICOTYLEDONEA	MELASTOMATACEAE	Miconia racemosa (Aubl.) DC.	Arbuste
MONOCOTYLEDONEA	HELICONIACEAE	Heliconia bihai (L.) L.	Herbe
DICOTYLEDONEA	CECROPIACEAE	Cecropia obtusa Trécul	Arbre
DICOTYLEDONEA	MELASTOMATACEAE	Clidemia hirta (L.) D. Don	Arbuste

Tableau 5 : Liste des 20 espèces végétales les plus souvent inventoriées

	Espèces pionnières		Espèces de seconde génération		Nombre total d'espèces
Type	Nombre	%	Nombre	%	
Arbre	34	64%	19	36%	53
Arbuste	18	55%	15	45%	33
Epiphyte	2	**17%**	10	**83%**	12
Herbe	28	62%	17	38%	45
Liane	11	61%	7	39%	18
Total général	93	58%	68	42%	161

Tableau 6 : proportion des espèces pionnières et secondaires par type de plantes

Indicateurs de reprise de la végétation

Les paramètres de structures et de compositions n'ont pas tous donné des résultats intéressants à interpréter. Nous présentons ici ceux indiquant le mieux la reprise de la végétation et son évolution vers un stade arboré diversifié.

- Les indices de couverture herbacée et arborée :

Une forte couverture herbacée est généralement le reflet d'une forte luminosité arrivant au sol. Ainsi, la densité de cette strate est inversement proportionnelle à celle de la couverture arborée. L'arrêt d'une partie de la luminosité par la canopée provoque ainsi un effondrement de la proportion d'herbe au sol et permet le développement d'espèces secondaires, plus en lien avec des conditions de sous-bois, marquant une certaine évolution forestière.

Le graphique montre au stade pluristratifié (PS) des proportions similaires entre l'indice de couverture arborée et celui de couverture herbacée. La formation végétale FR, avec un indice de couverture arboré supérieur à 3 (soit + de 50% de la couverture) semble ainsi être un bon indicateur d'une reprise correcte de la voute arborée.

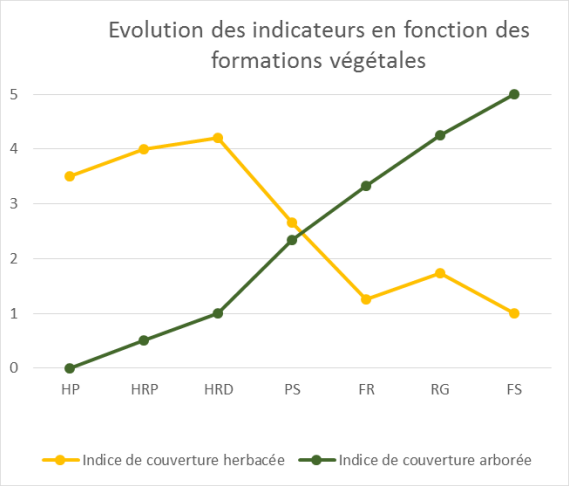


Figure 18 : Evolution des indices de couverture herbacée et arborée selon le type de formation végétale

- L'indice du pourcentage d'espèces secondaires dans le cortège.

Ces espèces considérées comme secondaires sont ainsi celles arrivant dans un deuxième temps dans la succession végétale, après les espèces pionnières. Elles ont généralement besoin d'ombrage (espèce sciaphile et semi-sciaphile), d'une certaine humidité (espèce hygrophile) ou d'un support végétal (épiphyte) pour s'installer.

Un seuil de plus de 20 % d'espèces secondaires semble être un bon indicateur de retour vers une formation végétale diversifiée. Cette valeur est généralement atteinte au stade PS. Parmi l'ensemble des espèces inventoriées, les épiphytes sont celles qui marquent le mieux la présence d'un cortège d'espèces secondaires.

Pour autant, il est important de noter que **les formations avec une espèce arborée non indigène dominante voir monospécifique (principalement plantées avec *Clitoria* ou spontanées avec *Acacia mangium*) n'atteignent que rarement cette valeur**.

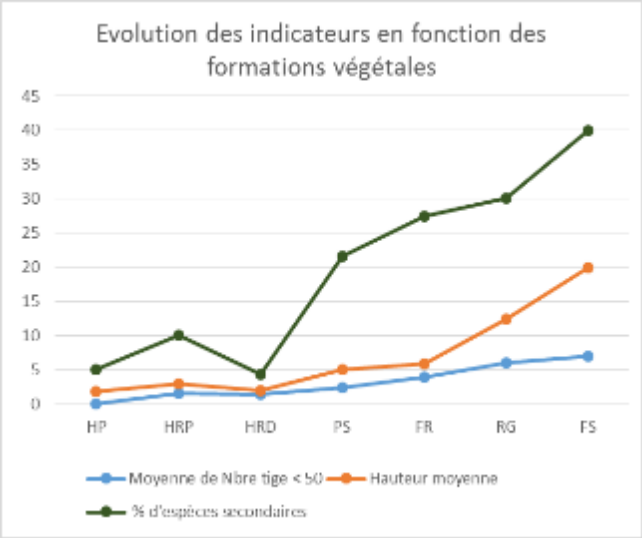


Figure 20: Evolution des indices de structure et de diversité selon le type de formation végétale

Figure 20 : *Psychotria racemosa*, une espèce de sous-bois apparaissant aux stades régénérés avec un indice de couverture arborée élevé.

- Les indices de hauteur et de diamètre

Les valeurs seuils pour ces deux paramètres semblent plus nuancées. Il ressort tout de même qu'une formation végétale atteint un stade « forestier » sur les sites miniers lorsqu'elle dépasse 10 mètres de hauteur moyenne et plus de 5 tiges comprises entre 10 et 50 centimètres de diamètre sur 25 m².

A retenir :

- **l'intérêt de regarder la proportion des indices de couverture herbacée et de couverture arborée**, comme indicateur d'une reprise de la végétation tendant vers une succession végétale arborée. Le seuil de situe lorsque l'indice de couverture arborée dépasse celui de la couverture herbacée.
- **L'intérêt de regarder la proportion d'espèces secondaires** comme indicateur de retour vers une formation forestière diversifiée. Une valeur seuil suppérieure à 20% d'espèces secondaires semble intéressant.
- **Une hauteur moyenne supérieure à 10 mètres de la formation végétale**, et la présence de plus de 5 tiges entre 10 et 50 centimètres de diamètre marquent le passage vers une formation végétale forestière.

Type de réhabilitation

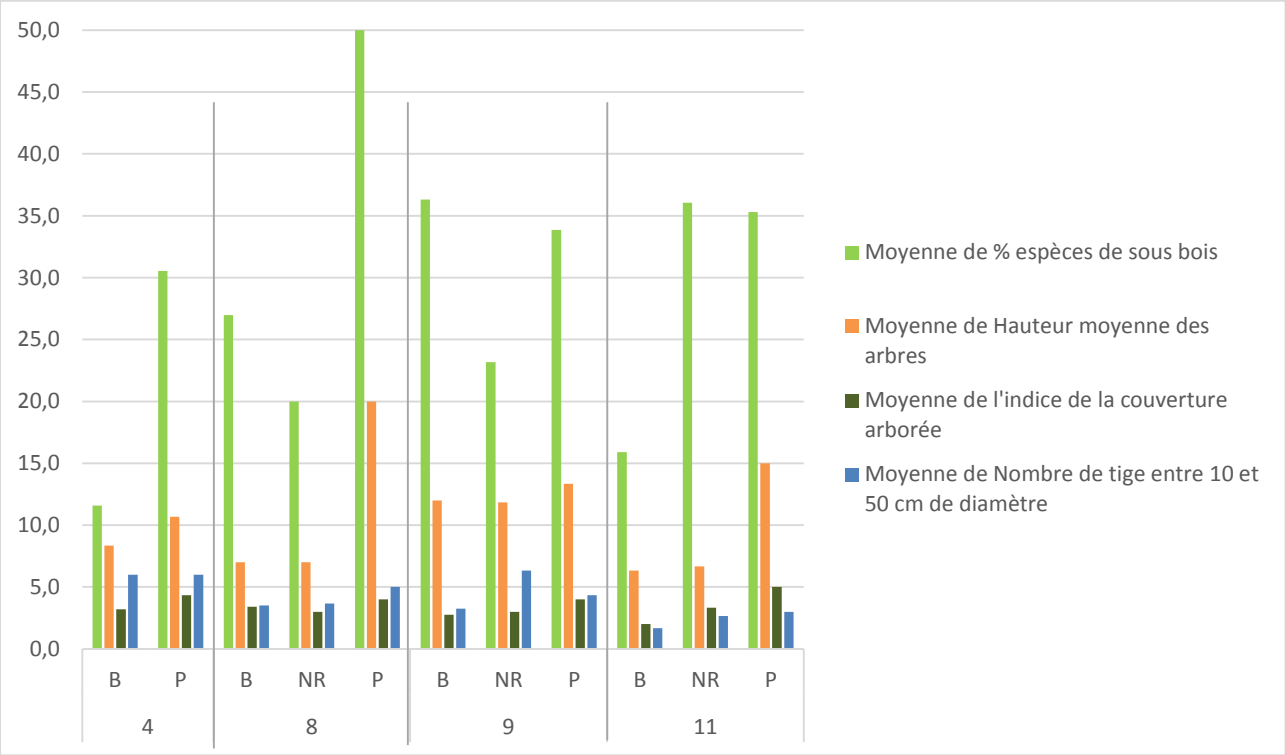


Figure 21 : Evolution d'indicateurs sur la composition et la structure des formations végétales selon : l'âge de la réhabilitation (4 ; 8 ; 9 ; 11) et le type de réhabilitation (B = Bull ; NR = Non réhabilité ; P = Pelle)

Par ce graphique, nous essayons de connaitre le rôle de la modalité « type de réhabilitation » sur les indicateurs précédemment cités. Les indicateurs sont ainsi évalués sur les différents types de réhabilitation au niveau des placettes (réhabilitation au bulldozer, non réhabilité, ou à la pelle hydraulique) et selon leur âge pour rendre possible leur comparaison.

Certains indicateurs semblent plus pertinents que d'autres. Tandis que le nombre de tiges entre 10 et 50 cm ne présente pas toujours de différence significative, on observe une tendance favorable de la réhabilitation à la pelle hydraulique sur la hauteur moyenne des formations végétales et l'indice de couverture arborée. De même, à 4, 8 et 11 ans, la proportion d'espèces secondaires est plus de deux fois supérieure pour des placettes réhabilitées à la pelle de celles aplanies au bulldozer.

On notera qu'il n'apparait pas de croissance franche des indicateurs avec l'âge des placettes. Ceci est très certainement dû à l'importance des conditions initiales et d'autres paramètres éléments influençant la reprise de la végétation (substrat, proximité de la lisière, remise en état des andains…).

A retenir :

Une réhabilitation à la pelle semble favoriser une meilleure reprise de la végétation, notamment sur les indices structurels de la végétation comme l'indice de couverture arboré, la hauteur moyenne des formations végétales mais également sur la qualité de la végétation par une proportion plus importantes d'espèces secondaires.

Type de substrat

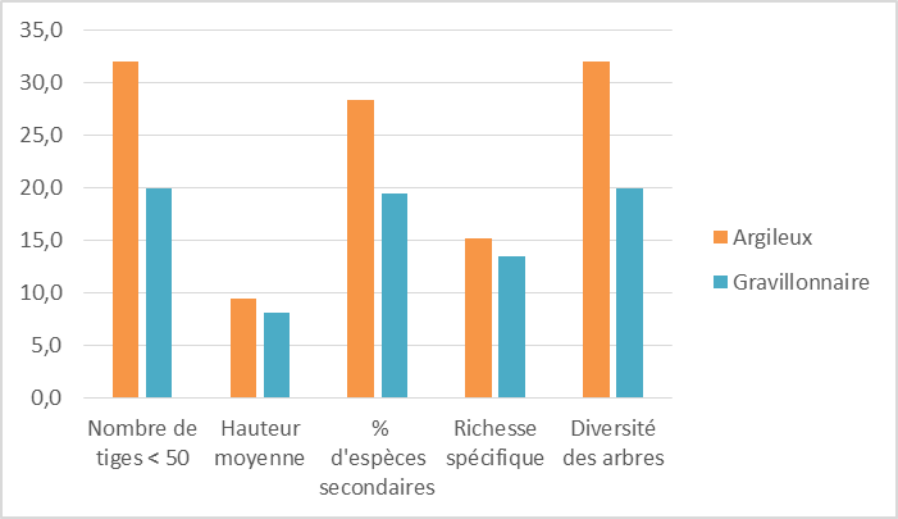


Figure 23 : Evolution des indicateurs selon le type de substrat (toutes placettes confondues)

Figure 22 : Cas de formation à herbacée pauvre avec une régénération en dépérissement sur sol gravillonnaire

La modalité type de substrat est testée ici. D'une manière générale, les indicateurs de reprise de la végétation révèlent que le substrat argileux présente de meilleures capacités de développement.

L'effet du substrat se ressent particulièrement sur la présence d'espèces de sous-bois, sur le nombre de tiges comprise entre 10 et 50 centimètres et sur la diversité des arbres. Les effets sur la hauteur et sur la richesse spécifique apparaissent moins significatifs.

Notons que cette tendance se vérifie quelques soit l'âge du site et qu'elle est encore plus prononcée pour les formations de type régénéré.

Cette différence entre ces deux substrats peut s'expliquer par les conditions sévères régnant sur un sol à dominance gravillonnaire, tant en termes de température du sol que d'un point de vue de la rétention en eau. De plus, les substrats gravillonnaires des sites miniers alluvionnaires sont généralement issus des tables de triage (sluices). Ce processus de lessivage entraine une perte de capacité biotique du sol. Ainsi, seules les espèces les plus adaptées et compétitives peuvent s'y développer.

Ces effets ont pour conséquence de défavoriser l'implantation spontanée d'arbres pionniers adaptés aux substrats argileux, de bloquer leur développement et ainsi de limiter l'arrivée d'espèces secondaires ayant une préférence pour les milieux ombragés et humides. Concernant la richesse spécifique, l'écart de valeur réduit est dû à un transfert des plantes sous-bois vers des espèces rudérales, souvent de type herbacées ou arbustives, et compense ainsi la perte de diversité sans pour autant refléter la qualité de la végétation.

Relation avec la rivière et fond de barranque

Sur les terrains, le positionnement de la placette vis-à-vis de la rivière avait été relevé. Trois cas de figure ont été définis : terre ferme, berge, zone d'expansion de crue.

Aucun des indicateurs de reprise de la végétation ne semblent varier de façon significative et constante selon ces modalités. Pour autant, des observations directes sur le terrain, il semble se dégager quelques principes.

La présence de la crique est généralement signe d'un accès facilité à la nappe alluviale et apporte par endroit de l'humidité. Ces paramètres semblent être profitables à la croissance des plantes et l'installation de la végétation dont les espèces « secondaires » sur les berges exondées. Certaines images aériennes attestent de cette reprise de la végétation favorisée en bord de rivière (cf. Figure 12).

Les criques favorisent l'apport de graines hydrochores. Certaines espèces arborées ont ainsi été retrouvées en bordure de crique, notamment sur les berges et plus ponctuellement sur les zones d'expansion des crues. Il s'agit, parmi les arbres, de *Pterocarpus officinalis* (Moutouchi marécage), de *Macrolobium bifolium*, de *Hura crepitans* (Bois diable) et de l'espèce héliophile *Mahurea palustris*. Cependant, les semenciers se font rares du fait de la destruction de la ripisylve sur l'ensemble de la mine.

Néanmoins, et c'est peux être ce qui ne permet pas de trouver de relation fiable, cette influence positive s'inverse lorsque l'inondation du sol est trop fréquente en période de hautes eaux (zone d'atterrissement, fond de barranques). Ainsi, seules les espèces spécifiques liées aux milieux à hydromorphie prolongée peuvent s'y installer. Un bon nombre de ces plantes sont des herbacées héliophiles à fort pouvoir d'expansion (comme *Lycopodiella cernua,* et certaines Cyperacées*)* bloquant s'installation des espèces arborées. Parmi les grandes herbacées forestières, on notera la présence de *Cyclanthus bipartitus*, héliophile dominante sur certaines placettes, ou encore de la fougère arborescente moins commune *Cyathea cyatheoides*.

Figure 24 : Ripisylve arborée en berge argileuse à droite et zone d'atterrissement inondable colonisée par les herbacée à gauche

Effet lisière

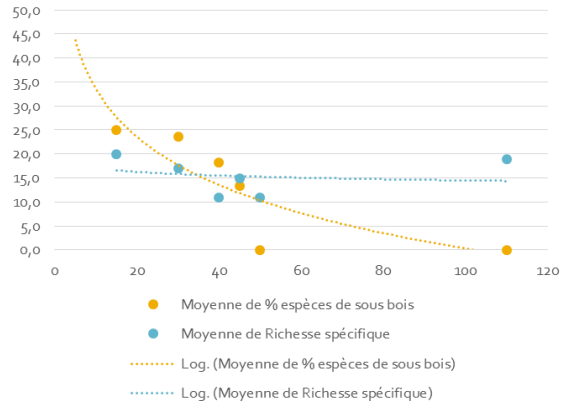


Figure 25 : Effet de la distance à la lisière forestière intacte sur la richesse spécifique et la proportion d'espèces secondaires (SMSE, 2 ans après réhabilitation avec pelle)

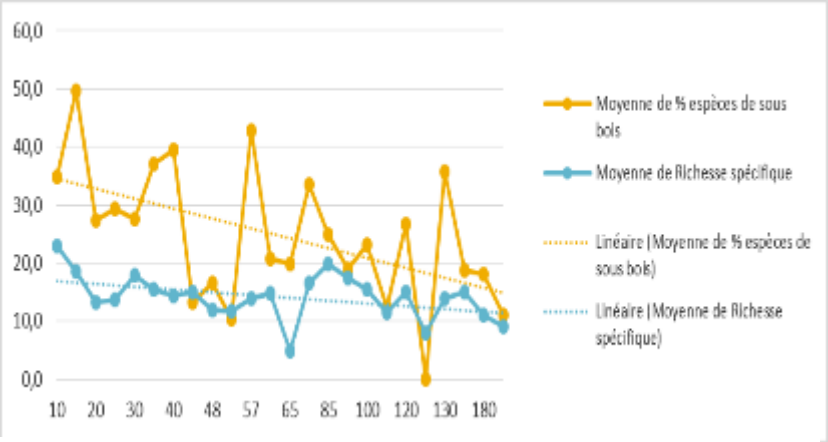


Figure 26 : Effet de la distance à la lisière forestière intacte sur la richesse spécifique et la proportion d'espèces secondaires (toutes parcelles confondues).

Ces graphiques montre l'effet lisière sur la biodiversité des parcelles (richesse spécifique et présence d'espèces secondaires comme certaines fougères, espèces de sous-bois et épiphytes..) en fonction de la distance à la lisière forestière intacte la plus proche.

Pour l'indicateur de retour vers une végétation forestière diversifiée (% d'espèces secondaire), les valeurs décroissent en fonction de la distance. Sur le site de SMSE, la proportion d'espèces de sous-bois chute ainsi de 25% pour des parcelles directement en contact avec la lisière à tout juste 0 % pour des parcelles à plus de 50 mètres de secteurs non défrichés. Cette tendance d'observe également si l'on prend l'ensemble des placettes étudiées (35 % d'espèce secondaires à 10 mètres de la lisère contre moins de 15 % à plus de 180 mètres).

Cet effet n'a pas de conséquence significative sur la richesse spécifique ; les espèces secondaires étant remplacées par des espèces héliophiles voir rudérales.

Intérêt des andains

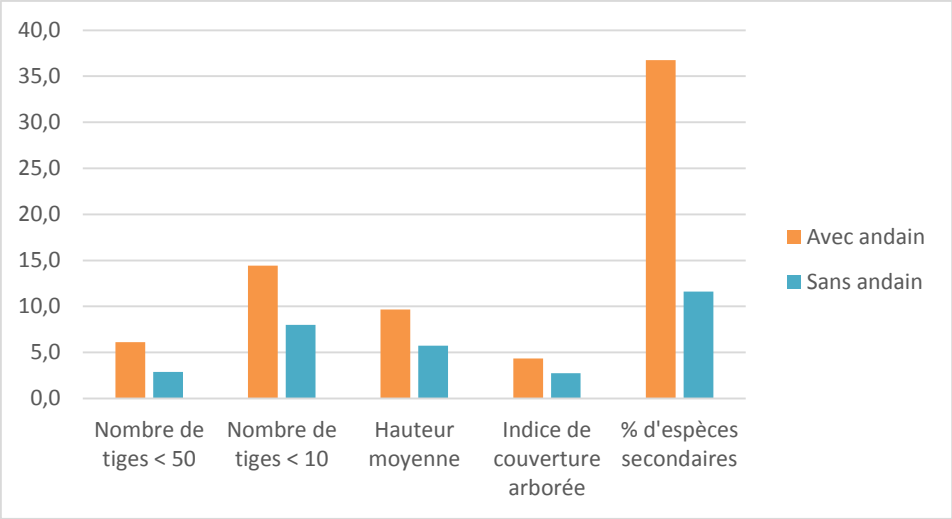


Figure 27 : Comparaison des indicateurs en fonction de la présence d'andain avec une distance maximale à 50 mètres de la lisière, pour les sites SMSE (3 ans), Mouflet (7 ans) et Yaoni (8 ans).

La présence d'andain (vieux tronc, bois en décomposition, terre végétale) a été noté sur les placettes inventoriées afin d'évaluer les impacts positifs sur la reprise de la végétation.

Les andains étant généralement déposés en lisière forestière (de 5 à 50 mètres) et ayant réellement entrepris que sur les sites de SMSE, Mouflet et Yaoni (dont la réhabilitation date respectivement de 3, 7 et 8 ans), l'analyse comparative ne porte que sur les placettes correspondant à ces critères. La nature du sol n'est pas un critère discriminant ici.

Les résultats sont significatifs. L'action des andains semblent agir tant sur la structure forestière que sur la composition botanique de formations végétales en place. D'après l'analyse, vis-à-vis des placettes sans andains, celles ayant profité d'un étalement de la terre végétale ont :

- deux fois plus de tiges comprises entre 10 et 50 centimètres, et de même pour les plus jeunes recrues de moins de 10 centimètres ;
- une hauteur moyenne de la formation végétale près de 2 fois plus haute ;
- un indice de fermeture de canopée plus important (4.3 contre 2.8) ;
- 3 fois plus d'espèces secondaires que sur les placettes sans andain ;
- une diversité spécifique chez les arbres et les arbustes plus importante.

Figure 28 Formation à bois canon et espèces secondaires en sous-bois, issue de l'étalage d'andain 3 ans auparavant. SMSE

Origine de la végétation

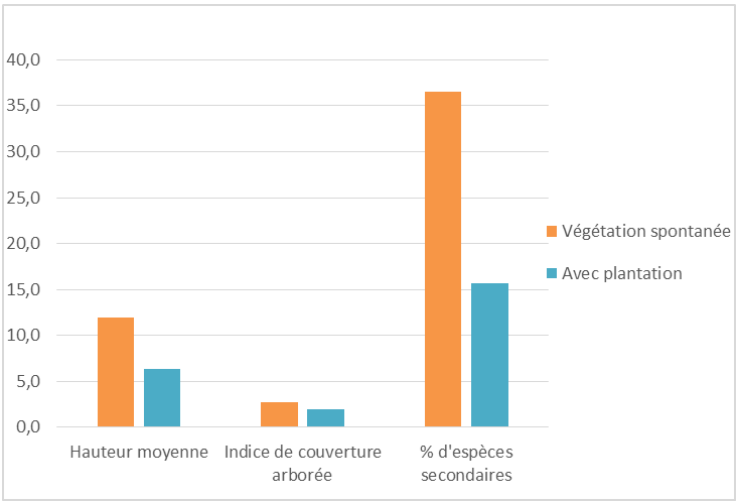


Figure 29 : Comparaison des indicateurs selon l'origine de la végétation (réhabilitation au bulldozer, sol argileux, 9 et 11 ans après réhabilitation), plantation sans fixateurs

La modalité testée ici est l'origine de la végétation. Cette comparaison entre la végétation spontanée et plantation, est effectuée sur des placettes sur sol argileux, réhabilitées à la pelle hydraulique ou au bulldozer et intégrant tant des plantations sans fixateurs (à 4, 9 et 11 ans) qu' avec fixateurs (à 3 ans).

	Hauteur moyenne	**Indice de couverture arborée**	**% d'espèces secondaires**
3 et 4 ans, pelle, argileux			
Végétation spontanée	8,7	4,0	28,2
Avec plantation	7,7	4,3	25,7
9 et 11 ans, pelle, argileux			
Végétation spontanée	20,0	5,0	40,0
Avec plantation (sans fixateur)	15,0	5,0	35,0
9 et 11 ans, bulldozer, argileux			
Végétation spontanée	12,0	2,8	36,5
Avec plantation (sans fixateur)	6,3	2,0	15,7

Tableau 7 : Indicateurs botaniques selon l'origine de la végétation.

Les indicateurs de qualité de la végétation penchent en faveur d'une reprise spontanée de la végétation, en particulier lors de plantation sans fixateur. Cette différence est moindre sur des placettes réhabilitées à la pelle. Cette méthode de réhabilitation, plus favorable à un retour spontané de la végétation que celle au bulldozer, semble également modérer les contraintes vis-à-vis des espèces plantées.

Cette différence entre végétation spontanée et plantation peut être interprétée par :

- l'utilisation de certaines espèces à croissance lente, peu adaptées aux substrats pauvres (Lecythidacée, Carapa, Ebène) et du développement en éventail des espèces plantées (*Inga, Clitoria*), vis-à-vis de certaines espèces spontanées à croissance rapide et verticale (Bois canon, *Croton, Isertia, Bellucia grossularoides*, *Jacaranda*…)
- le caractère souvent monospécifiques des plantations et avec des espèces parfois exogènes au milieu (*Acacia mangium, Clitoria fairchildiana*) ne favorisant pas les interactions avec la faune et les associations entre plantes enrichissant normalement le milieu. Le sous-bois des plantations monospécifique à espèces exogènes peut ainsi être très pauvre (en nombres d'espèces et en nombre d'individus) avec une litière se dégradant difficilement.

Figure 31 : Plantation non fonctionnelle d'espèce à croissance lente sur sol gravillonnaire et réhabilité au bulldozer

Figure 30 : Sous-bois pauvre sous un peuplement monospécifique dense d'*Acacia mangium*

Enfin notons que les données n'étaient pas suffisantes pour tester cette modalité sur gravier ni la différence plantation avec ou sans fixateur inoculé. Cependant les observations tendent à montrer :

- sur sol gravillonnaire : des croissances faibles tant pour la végétation spontanée (cf. « Type de substrat » ci-dessus) que pour les plantations peut adaptées.
- pour les plantations avec des espèces fixatrices d'azotes inoculés, en particulier sur argile et mais également sur gravier : des résultats intéressants, s'approchant des formations régénérés, en termes de diamètre, couverture arborée et arrivées de plantes secondaires.

Figure 32 : Plantation âgée de 3 ans d'*Inga pezizifera* inoculés sur sol argilo-gravillonnaire (SMSE).

V.3 Synthèse sur l'analyse de la reprise de la végétation

Sur l'évolution des sols et de la végétation selon les modalités d'exploitation et de réhabilitation

- Une reprise rapide de la végétation s'effectue sur les sols les plus favorables durant les premières années après la réhabilitation (+ 2% de la surafece déforestée pour le site de la Boue âgés de 14 ans, contre + de 46% pour Mouflet âgé de 7 ans). Cette vitesse de progression de la végétation ralenti ensuite progressivement au fil des années et une certaine proportion de sols restent non régénéré (entre 10 et 30%).
- Cette vitesse de recolonisation de la végétation est d'autant plus grande sur les sites réhabilités de manière progressive à l'aide de pelles hydrauliques (Mouflet). Cette régénération spontanée est réduite par l'utilisation de bulldozer (Yaoni).
- Les substrats issus du lavage de l'horizon aurifère, comme les cônes de gravier et les limons de fond de bassin, sont peu propices à une régénération forestière spontanée et stagnent régulièrement au stade herbacé (Jalbot, Yaoni,…) .
- Une fermerture progressive des zones s'effectue sur les zones en eaux peu profonde. Les zones continuellement en eaux, issues des bassins non réhabilités, se maintiennent sans végétation (la Boue).
- Un front de colonisation, dû notamment à l'apport de matière organique et aux interactions végétaux/animaux, s'observe à partir de la lisère forestière. Cet effet « lisière », favorisant la qualité de la reprise de la végétation par l'arrivée d'espèces forestières secondaires, est perceptible sur les 40 premiers mètres bordant le massif forestier non impacté.

Sur la structure et la qualité de la végétation régénérée :

- Les espèces secondaires sont de bons marqueurs du stade d'évolution de la régénération végétale. Un seuil de 20% d'espèces non pionnières semble indiquer une régénération en bonne voie pour évoluer vers une formation forestière diversifiée.
- Un taux de couverture arboré de + de 50 % indique une fermeture du milieu suffisante pour limiter le développement des herbacées et pour rendre possible l'évolution vers un stade forestier diversifié.
- La remise en place des andains permet une évolution très rapide à un stade régénéré diversifié composé d'espèces pionnières forestières.
- L'utilisation d'espèces non adaptées aux sols n'accélère pas la reprise de la végétation spontanée. Les indicateurs de développement de ces plantations sont moins performant qu'avec une régénération spontanée. Seules les plantations avec des espèces fixatrices d'azote (légumineuses) sont performantes pour arriver à un stade régénéré assez rapidement.
- Les plantations d'arbres non indigènes, même fixateur, ne sont pas favorables à un retour de la strate arbustive ni au retour d'une biodiversité faunistique et floristique forestière.

VI. Evaluation de la qualité des sols

Les préconisations de la précédente étude concluaient sur la nécessité d'une phase d'observation plus longue des sites et d'une analyse diachronique permettant de mieux cerner l'évolution de la végétation et des sols.

L'objectif de cette nouvelle étude consiste à évaluer l'état des sols 7 ans après la première étude, leur capacité d'accueil de la végétation forestière et leur potentialité de reconstitution au cours du temps par le biais des bio-indicateurs de la qualité des sols décrits précédemment. Il s'agit de mesurer la qualité de la réhabilitation effectuée (pelle, bulldozer ou absence de réhabilitation) dans les zones régénérées et mettre en évidence l'intérêt des actions d'ingénierie écologique sur la fertilité des sols (revégétalisation assistée avec fixateurs d'azote ou non).

Enfin pour mieux cerner l'évolution des sols 7 ans après, les mêmes méthodes ont été appliquées en 2008 et 2015 permettant ainsi une analyse diachronique de sites communs aux deux études. De plus, dans le but de donner une portée générique aux résultats, on s'est appliqué à considérer, dans des conditions environnementales données et suivant le temps écoulé, l'impact des modalités de réhabilitation tout site confondu.

VI.1 Protocole d'échantillonnage

Les transects de l'étude de 2008 géo-référencés ont pu être échantillonnés à nouveau et complétés par de nouveaux points afin de prendre en compte l'ensemble des modalités du projet en 2015-2016.

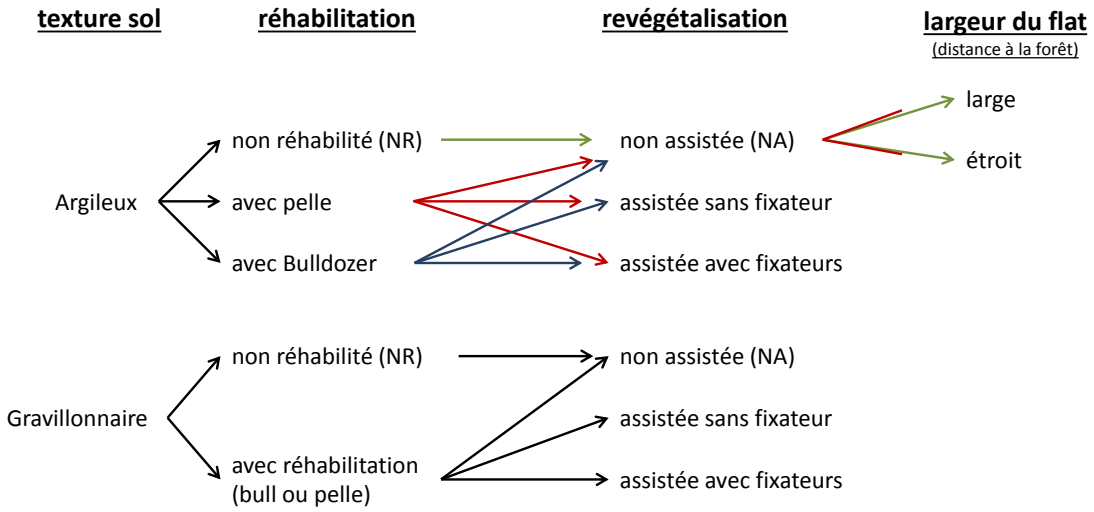


Figure 35 : Modalités de l'étude 2015

Ainsi, 9 modalités ont été définies pour la texture dite "Argileux" et 4 modalités pour la texture "Gravillonnaire". De plus, dans le souci d'obtenir une bonne représentativité des résultats, chaque modalité a été répétée 3 fois, tous sites confondus.

VI.1.1 Stratification végétale

Le choix du type de végétation s'est porté uniquement sur les strates les mieux représentées et couvrant la majorité du site (les petites unités de surface n'ont pas été prises en compte).

L'étude de 2008 avait considéré les types de végétation, en 3 strates :

- le type « Herbacées spontanées »;
- le type « Intermédiaires spontanés » (Herbacée avec Régénération pauvre naissante);
- les types « Régénérés spontanés » ou « Régénérés assistés » (Pluristratifiés, Régénération forestière ou Fourrés diversifiés avec régénération).

Comme une absence de récupération de la qualité des sols sous les strates herbacées et Intermédiaires marquait un blocage définitif de la succession végétale, nous ne les prendrons pas en compte dans la nouvelle étude.

Pour l'étude 2015, seule la troisième strate **(régénérée spontané ou assisté)** est prise en considération sur les différents sites. En effet les résultats de l'étude de 2008 mettaient en évidence une situation partielle de blocage des sols sur ces types de reprise de végétation plusieurs années après exploitation. Nous voulions donc savoir si ce blocage était levé ou pas 7 ans après.

Nous avons également étendu notre étude 2015 des types régénérés à la comparaison de 2 types de revégétalisation assistée (sans fixateurs d'azote/ avec fixateurs d'azote)

VI.1.2 Prélèvements de sol

Notre démarche consiste à utiliser les caractéristiques de la forêt adjacente à chaque site minier (forêt considérée comme un milieu non anthropisé en équilibre) comme référence pour les activités microbiennes, c'est-à-dire comme milieu témoin.

Chaque unité expérimentale (type végétation x texture) a fait l'objet de 10 relevés effectués sur un transect aussi linéaire que possible. Les relevés ont été espacés de 5 m. Pour les zones trop étroites, plusieurs transects parallèles ont été mis en place.

Sur le terrain, un profil de sols a été réalisé sur chaque parcelle afin d'en déterminer la texture dominante (présence plus ou moins prononcée d'argile/graviers).

Les sites étudiés sont : Boulanger, Yaoni, Grand Yaoni, Georgeon, Mouflet, SMSE (Société Minière de Ste Elie, crique Pactole, crique sable, et mirabelle).

La surface du sol est nettoyée au préalable des débris végétaux et les 10 premiers cm du sol sont prélevés. Le prélèvement est ensuite conditionné (séchage et tamisage) puis ensaché en laboratoire.

Chaque échantillon a fait l'objet de trois analyses en laboratoire :

- granulométrie ;
- respiration potentielle ;
- dénitrification potentielle.

	Nombre de prélèvements		
Lieux de prélèvements	**Forêt de référence adjacente**	**Végétation régénérée**	**Total**
Boulanger	10	60	70
Yaoni	10	80	90
Grand Yaoni	10	80	90
Georgeon	10	130	140
Mouflet	10	80	90
Smse	10	160	170
Total	**60**	**590**	**650**

Tableau 8: nombre de prélèvements de sols effectués et analysés par site et type de formation végétale

Au final 650 prélèvements ont été effectués et analysés entre juin et juillet 2015.

VI.2 Compilation et traitement des données

VI.2.1 Traitement des données relatives

Pour permettre la comparaison des résultats concernant les différentes modalités sans tenir compte de la localisation des sites miniers, nous avons dû réaliser une standardisation des données. Cette standardisation consiste à considérer les valeurs d'activité de la forêt proche comme valeur de référence à atteindre. Comme celles-ci sont variables d'un site à l'autre (hétérogénéité spatiale mais aussi temporelle, cf. Figure 63 en annexe), nous exprimons les valeurs observées sur les zones exploitées en pourcentage de récupération par rapport à celles issues de la "forêt naturelle" avoisinante qui représente alors les 100% à atteindre.

$$\text{valeur relative (en \%)} = \frac{\text{valeur mesurée sur l'exploitation minière}}{\text{valeur mésurée dans la forêt adjacente}} \text{X } 100$$

VI.2.2 Données complémentaires

Ces nouvelles analyses ont été réalisées selon un protocole standardisé. Elles ont de ce fait pu être comparées aux données d'analyse de sol issues d'études précédentes et effectuées en partie sur les mêmes sites miniers. L'étude 2015 a ainsi porté sur 6 sites miniers alluvionnaires, dont 3 communs avec l'expertise minière de 2008 et 1 avec une étude de sol datant de 2004 : Yaoni

(2008-2015), Boulanger (2004-2008-2015), Georgeon (2008-2015), Mouflet (2015), Grand Yaoni (2015) et Ste Elie (2015).

Le cumul des données de ces 3 études ont permis de faire des analyses diachroniques sur les modalités présentes sur les sites communs aux différentes études.

VI.2.3 Traitement des combinaisons de modalités pour s'affranchir de tout biais d'interprétation

Lorsque les impacts d'une modalité sont étudiés (texture, réhabilitation, revégétalisation), il est important de s'affranchir de tous les paramètres pouvant biaiser l'analyse. Ainsi, par exemple, lorsque la réhabilitation est étudiée, il est important d'utiliser les données pour lesquelles les autres conditions sont identiques : même type de sol, même type de revégétalisation et même durée post-réhabilitation. Pour chaque analyse, nous avons choisi la combinaison de données pour laquelle il y avait le plus d'échantillons possibles afin de s'assurer d'une robustesse statistique suffisante.

VI.2.4 Analyses statistiques

Les différentes comparaisons ont été soumises à des tests statistiques appropriés afin de s'assurer de la robustesse des résultats. En l'occurrence, des tests d'analyse de variance ANOVA et tests post hoc de Tukey ont été réalisés.

VI.3 Résultats

VI.3.1 Etude comparative des sites entre 2008 et 2015

L'un des objectifs de l'étude était de mesurer l'évolution des sites entre 2008 et 2015 afin d'apporter des réponses sur l'état de fonctionnement des sols pouvant entrainer un "blocage" ou non de la succession végétale.

Des transects sur les types régénérés des sites Boulanger, Yaoni et Georgeon de l'étude 2008, sont ainsi comparés aux mêmes transects se trouvant dans les zones régénérées en 2015.

Site Boulanger

Les activités microbiennes du sol du site Boulanger apparaissent significativement différentes pour les trois bio-indicateurs entre 2008 et 2015 (augmentation). Néanmoins, 11 ans après exploitation, le sol du site Boulanger a faiblement gagné en biomasse microbienne et encore moins en diversité, les valeurs sont encore très éloignées de la forêt de référence (respectivement 50% et 20%). Le fonctionnement du cycle du N n'est qu'à 20 % des valeurs de la référence forêt naturelle laissant présager d'importantes carences en N dans les sols. La reconstitution du sol sur les zones régénérées reste donc extrêmement lente et laisse penser qu'elles ne récupéreront pas leur fonctionnement originel.

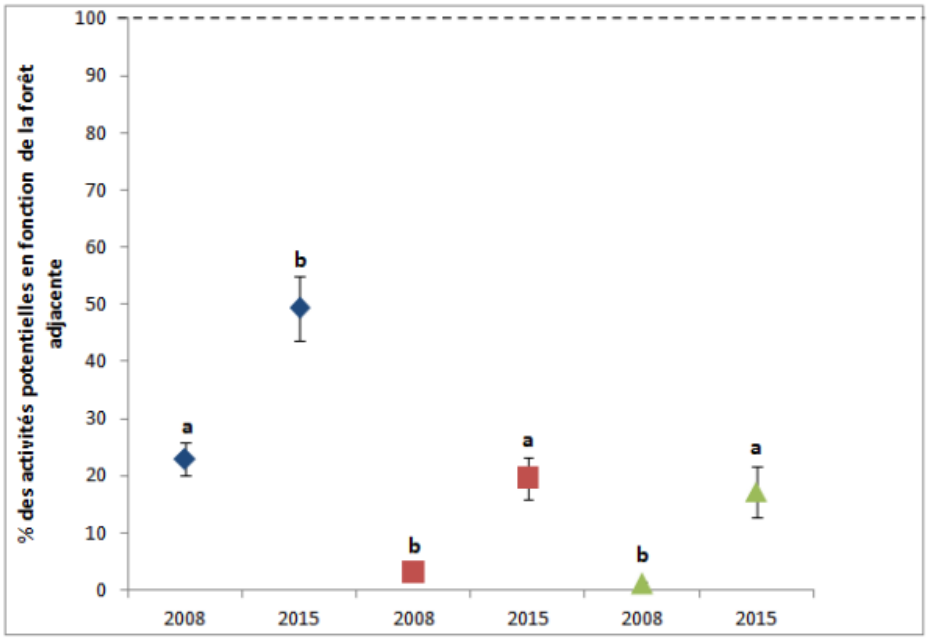


Figure 36: comparaison des moyennes des bio-indicateurs, biomasse microbienne (losange bleu), fonctionnement du cycle du N (carré rouge) et diversité de la communauté microbienne du sol (triangle vert), exprimées en pourcentage de la forêt de référence sur le site Boulanger. Les lettres "a" et "b" marquent la différence significative au seuil 5%.

Site Yaoni

Les trois bio-indicateurs (biomasse microbienne, fonctionnement du cycle du N et diversité microbienne), sont significativement plus importants en 2015 par rapport à 2008 mais restent encore très éloignés des valeurs de référence, en particulier au niveau de la diversité microbienne des sols (10 % de la valeur de référence) et des microorganismes impliqués dans le cycle de l'azote (30 % de la valeur de référence). Ainsi, 9 ans après exploitation, si le sol a quand même récupéré une biomasse microbienne proche de la forêt (95% de la valeur de référence) il reste encore très fragile de par le faible niveau de diversité observé et est encore en situation de blocage au niveau de son cycle azoté.

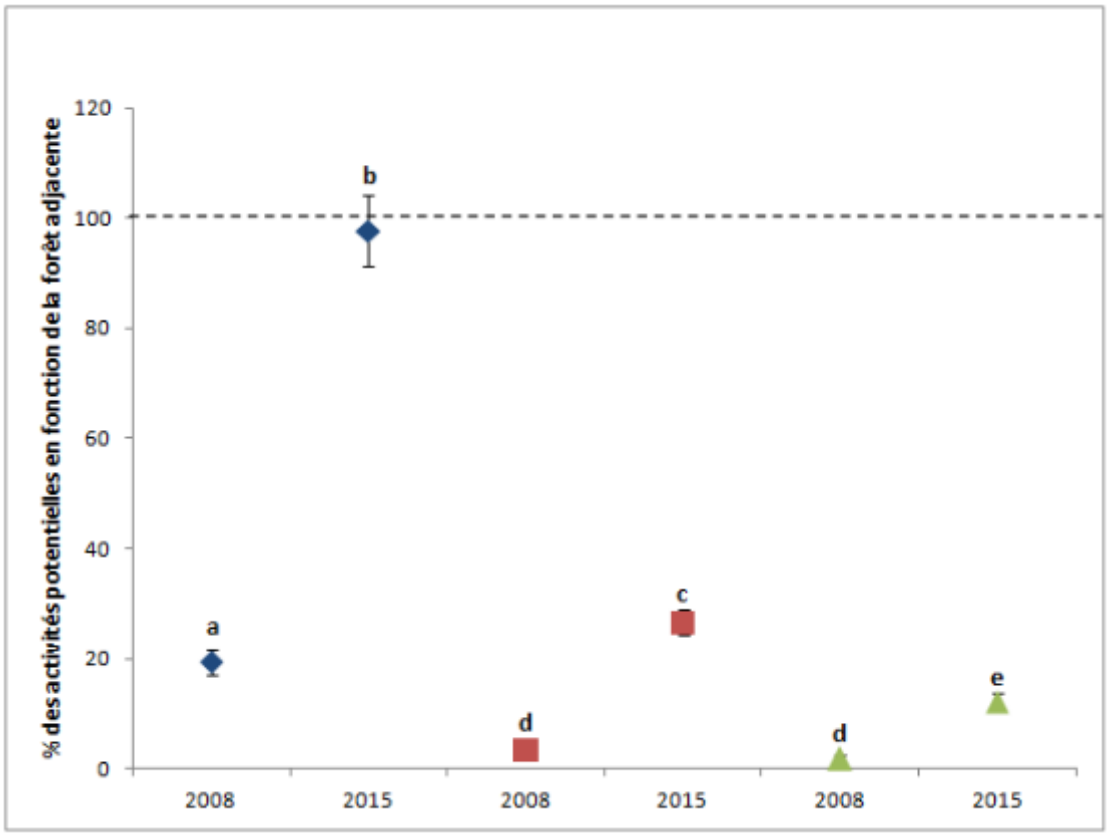


Figure 37: comparaison des moyennes des activités bio-indicateurs, biomasse microbienne (losange bleu), fonctionnement du cycle du N (carré rouge) et diversité microbienne (triangle vert), exprimées en pourcentage de la forêt de référence sur le site Yaoni. Les lettres "a" et "b" marquent la différence significative au seuil 5%.

Site Georgeon

Les résultats () montrent que le fonctionnement du sol du site Georgeon n'a pas évolué entre 2008 et 2015. En effet les bio-indicateurs n'ont pas augmenté de manière significative entre les deux études. Le niveau de respiration observé est proche de la valeur de référence, traduisant une bonne récupération de la biomasse microbienne. En revanche, la communauté microbienne liée au cycle de l'azote ne s'est pas développée marquant une ainsi forte limitation de ce cycle dans les sols. Enfin, le sol n'a pas non plus atteint le niveau de diversité microbienne de la forêt qui reste encore très faible après 11 ans laissant toujours présager une situation de blocage des zones régénérées de ce site.

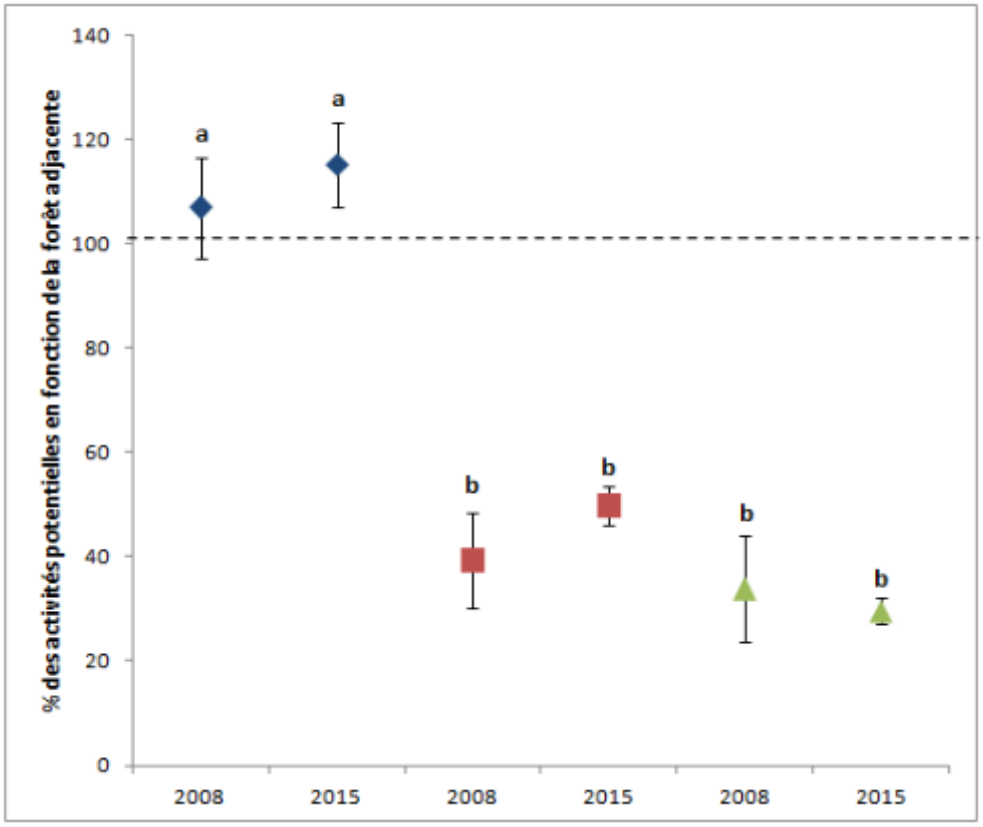


Figure 38: comparaison des moyennes des bio-indicateurs, biomasse microbienne (losange bleu), fonctionnement du cycle du N (carré rouge) et diversité microbienne (triangle vert), exprimées en pourcentage de la forêt de référence sur le site Georgeon. Les lettres "a" et "b" marquent la différence significative au seuil 5%.

VI.3.2 Conclusion de l'étude comparative sur les types régénérés

	BOULANGER		YAONI		GEORGEON	
Années	**2008**	**2015**	**2008**	**2015**	**2008**	**2015**
Biomasse microbienne	22,95%	49,35%	19,47%	95,26%	106,84%	115,20%
Fonctionnement du cycle du N	3,16%	19,57%	3,27%	26,06%	39,25%	49,74%
Diversité microbienne	1,19%	17,23%	1,78%	11,85%	33,78%	29,50%

Tableau 9: Evolution des bio-indicateurs du sol (Biomasse microbienne, fonctionnement du cycle du N et niveau de diversité des sols) des sites Boulanger, Yaoni et Georgeon, entre 2008 et 2015, exprimé en pourcentage de récupération par rapport à la forêt de référence.

Les comparaisons entre 2008 et 2015 ont été réalisées sur chacun des 3 sites sans tenir compte des modalités de réhabilitation des sols (sans réhabilitation, réhabilitation à la pelle, réhabilitation au Bull). De manière générale les activités microbiennes observées sur les trois sites restent encore très éloignées de la forêt de référence. Mêmes si les biomasses microbiennes sont récupérées sur certains sites (Yaoni et Georgeon), les systèmes restent néanmoins encore très fragiles en raison de leur faible niveau de diversité et d'un réenclenchement très partiel du cycle de l'azote.

Ces observations de 2015 montrent donc les mêmes tendances que celles déjà observées en 2008. Même si des évolutions sont observées au niveau de la végétation entre ces 2 périodes, on peut subodorer que le mauvais fonctionnement du sol sera un frein au processus de succession végétale.

VI.3.3 Impact du type de réhabilitation sur l'évolution du fonctionnement biologique des sols au cours du temps

Les résultats de l'expertise minière menée en 2008 avaient mis en avant qu'une réhabilitation des sols permettait une meilleure récupération de leur fonctionnement biologique (cas de la mine Georgeon). Cependant, le type de réhabilitation (pelle hydraulique ou bulldozer) et la durée de son impact dans le temps, n'avaient pas été étudiés.

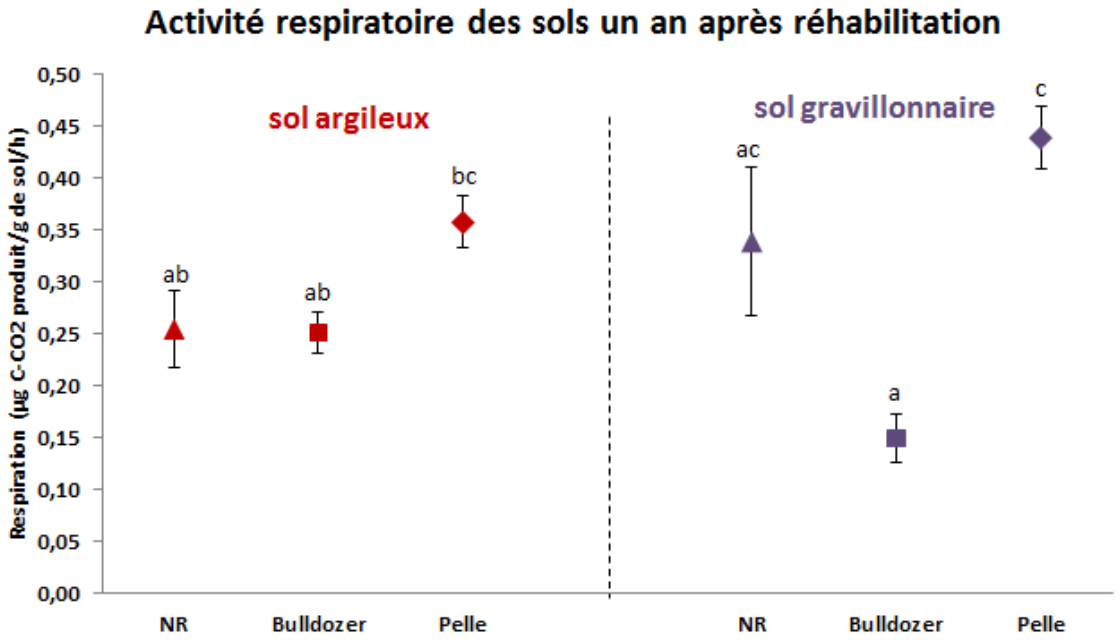
Les données utilisées pour ce volet sont celles des deux campagnes de mesures (2008 et 2015) qui permettent d'évaluer l'impact de la réhabilitation après 1, 4 et 8 ans sur un seul type de végétation ; la « Régénération spontanée non assistée » (NA).

Pour ce faire, nous avons sélectionné la combinaison de modalités présentant (i) le plus grand nombre de données pour obtenir une puissance statistique satisfaisante et, (ii) des données espacées dans le temps pour la réalisation d'une analyse diachronique.

La combinaison de modalités sélectionnée pour cette analyse est le type de réhabilitation (non réhabilité/Pelle/Bull) avec le type de sol (argileux/gravillonnaire)

Impact à 1 an

Premièrement, on remarque que les valeurs des bio-indicateurs des sols miniers, un an après réhabilitation, sont très faibles par rapport à celles des sols forestiers de référence : entre 10 et 20 fois plus faible pour la biomasse microbienne et entre 100 et 400 fois plus faible pour le cyclage du N qui est pratiquement inexistant (voir annexe Figure 63). On remarque néanmoins que la pelle est moins impactante que le Bull même si les valeurs restent très faibles quel que soit le type de substrat (Figure 39).



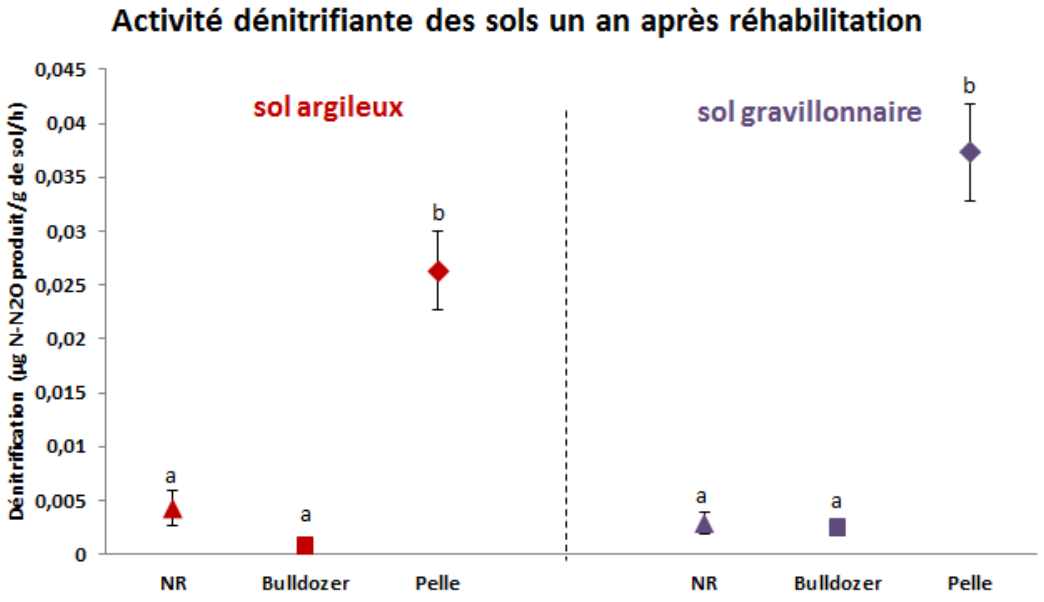


Figure 39 : valeurs brutes des bio-indicateurs des sols (respiration (biomasse microbienne), dénitrification (fonctionnement du cycle du N), un an après réhabilitation en fonction des moyens utilisés : sans réhabilitation (triangle), bulldozer (carré) ou pelle (losange). Les analyses ont été réalisées sur sols argileux (rouge) et sur sols gravillonnaires (violet). Des lettres différentes montrent, au sein d'un graphique, des différences significatives au seuil 5%. Sites : SMSE, Yaoni.

Le tableau ci-dessous reprend les principales conclusions quant à l'effet de la réhabilitation sur le fonctionnement biologique des sols.

Impact à court terme (+ 1 an) par rapport à l'absence de réhabilitation	Sols argileux	Sols gravillonnaires
Réhabilitation à la pelle	+	+
Réhabilitation au bulldozer	0	0

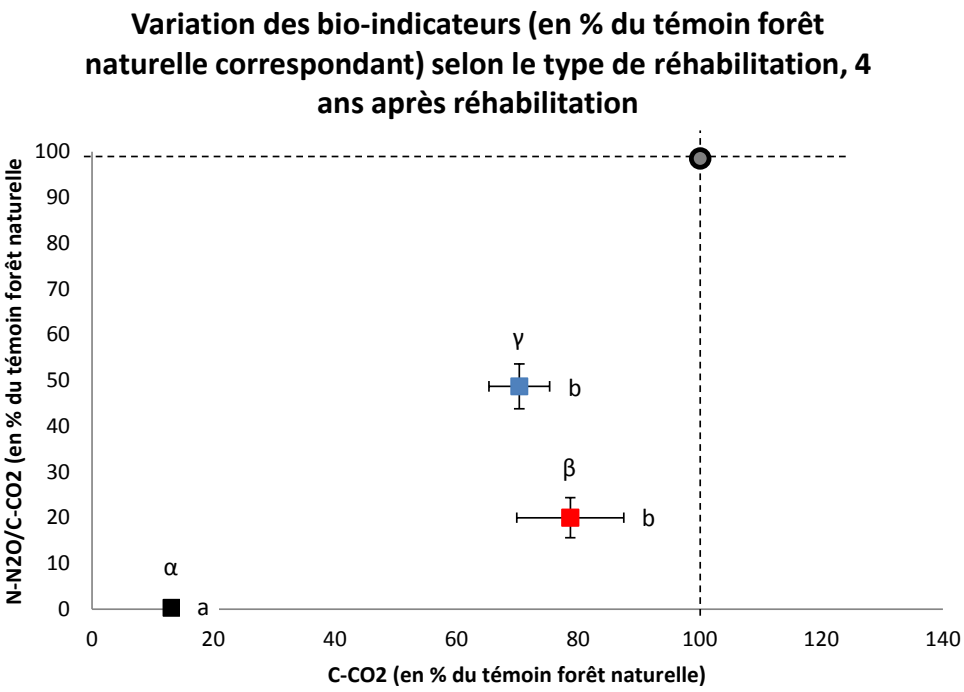
Tableau 10 : tableau récapitulatif de l'effet du type de réhabilitation en fonction de la texture du sol rencontré sur site minier.

Impact à 4 et 8 ans

Au bout de 4 ans (Figure 40), la réhabilitation (pelle et bulldozer) a permis au sol de retrouver une biomasse microbienne active à plus de 70% Par contre, celle-ci est restée très faible pour les parcelles non-réhabilitées (moins de 20% de la valeur du témoin forêt). Si aucune différence n'a été observée entre la réhabilitation à la pelle et la réhabilitation au bulldozer pour la respiration, on distingue que la pelle a permis une meilleure diversification de la communauté microbienne du sol. Les niveaux de diversité atteints restent néanmoins toujours faibles dans les deux cas (pour la pelle, 50 % de la valeur du milieu forestier, contre environ 25% pour le bulldozer). L'absence de réhabilitation montre quant à elle une valeur moyenne quasiment nulle. Un effet positif de la pelle est observé en ce qui concerne le fonctionnement du cycle du N (43% de récupération) contre 26 % pour le Bull et pas de reprise du cycle sur les zones non réhabilitées (moins de 1%).

Au bout de 8 ans, la résilience est atteinte pour l'activité respiratoire des sols sur chacune des 3 modalités (). Le fonctionnement du cycle du N s'est également amélioré pour les 3 modalités mais reste inférieur à celui de la forêt (60% de récupération pour la pelle et autour de 50 % pour le Bull et les zones non réhabilitées). En revanche, les niveaux de diversité de la communauté microbienne du sol restent globalement les mêmes pour ces modalités par rapport à ce qui a été observé 4 ans auparavant : environ 55% de la valeur témoin pour la réhabilitation à la pelle, et environ 30 % pour la réhabilitation au bulldozer et pour les zones non-réhabilitées.

Les mêmes niveaux de biomasse microbienne, de fonctionnement du cycle du N et de diversité observés entre zones réhabilitées au Bull et zones non réhabilitées peuvent s'expliquer par l'impact du compactage lié au passage des engins sur la zone réhabilitée au Bull.



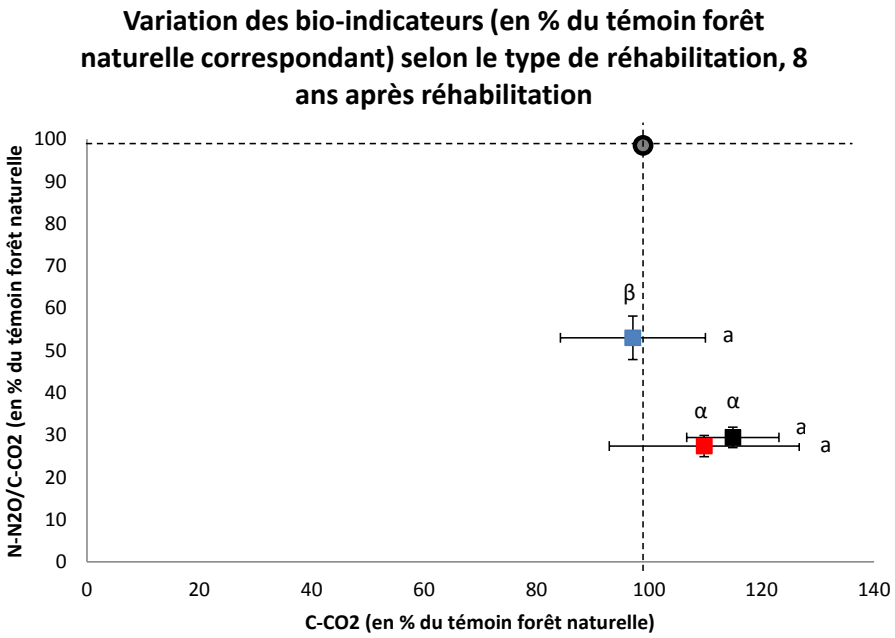


Figure 40 : Variation des bio-indicateurs (activité respiratoire (biomasse microbienne) en abscisse et DEA/SIR (diversité microbienne) en ordonnée, valeurs en pourcentage du témoin forêt naturelle selon les modes de réhabilitations. 4 ans (en haut) et 8 ans (en bas) après réhabilitation. En noir: non-réhabilité, en rouge: réhabilitation au bulldozer et en bleu: réhabilitation à la pelle. Les lignes en pointillé indiquent 100% de récupération des bio-indicateurs par rapport à la référence forêt. Des lettres différentes montrent des différences significatives au seuil 5% (lettres latines pour respiration, romaines pour DEA/SIR). Sites de Grand Yaoni, Boulanger, Yaoni. Georgeon.

Effet des andains

Sur des placettes argileuses, après de 7 ans d'années de réhabilitation (site de Mouflet), l'effet des andains est visible sur la reprise de l'activité microbienne du sol. La respiration, liée à la biomasse microbienne, a retrouvée des niveaux identiques à ceux observés sur les parcelles forestières voisines uniquement pour les placettes sur lesquelles des andains y avaient été déposés. Pour les placettes sans andains, la respiration microbienne ne dépasse pas 50 % de la valeur témoin.

Concernant la diversité microbienne, on observe pour les placettes avec andain des taux 2 fois supérieurs à ceux des placettes sans andains. Les andains semblent donc apporter une diversité microbienne supplémentaire vis-à-vis des sols nus. Les niveaux de diversité atteints restent néanmoins toujours faibles dans les deux cas par rapport à la diversité microbienne naturelle en forêt.

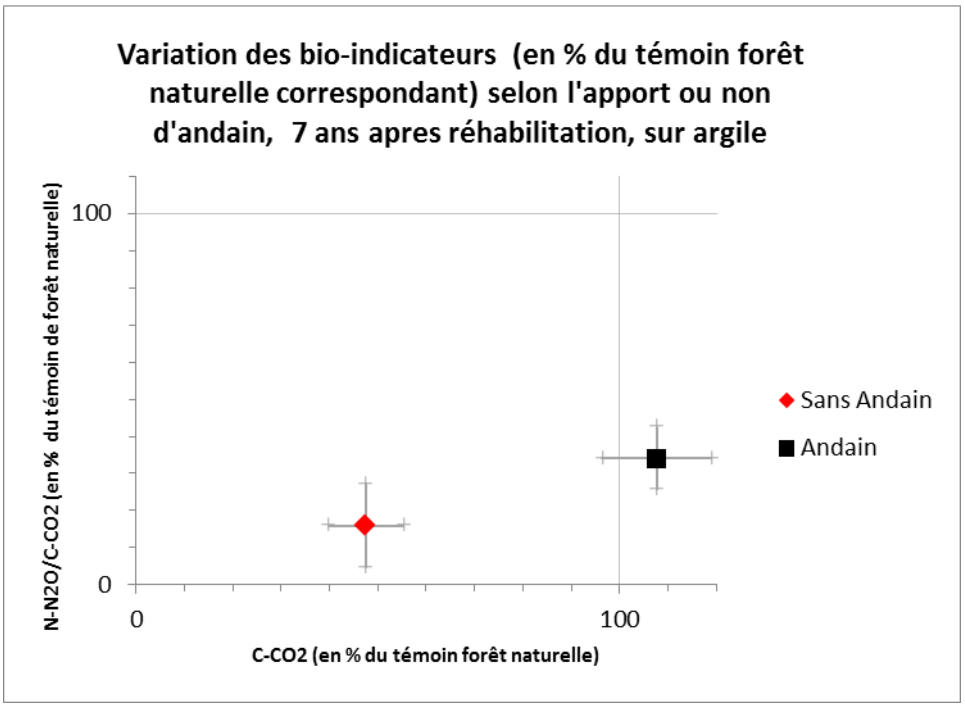


Figure 41 : Variation des bio-indicateurs (activité respiratoire (biomasse microbienne) en abscisse et DEA/SIR (diversité microbienne) en ordonnée, valeurs en pourcentage du témoin forêt naturelle selon la présence ou non d'andain. Placettes sur sol argileux sur le site de Mouflet à 7 ans après réhabilitation. En rouge : sans andain. En noir : Avec Andain.

VI.3.4 Impact de la revégétalisation sur le fonctionnement biologique des sols

La végétation est le premier indicateur visuel de l'évolution des sites vers leur reforestation naturelle. Cependant, la précédente étude de 2008 avait comparé des sites avec et sans reprise de la végétation spontanée. Il a été remarqué qu'il pouvait ne pas y avoir de différences au niveau des activités biologiques du sol entre ces deux types de modalités. Ainsi, la reprise de la végétation spontanée sur un site minier n'entraine pas obligatoirement une reprise du

fonctionnement du sol. L'indication seule de la présence de végétation spontanée n'est donc pas un indicateur toujours pertinent d'une bonne voix de retour vers le climax forêt ; le mauvais fonctionnement des sols suggérant ainsi une possibilité de blocage de la succession végétale.

L'objectif était ici de comparer sur les zones régénérées des différents sites, différentes modalités de régénération afin de savoir dans quelle mesure ces modalités peuvent avoir un impact sur la récupération du fonctionnement du sol en fonction du temps et par conséquent favoriser la reprise de la succession végétale.

Les modalités retenues sont :

- Revégétalisation non assistée (Régénération spontanée)
- Revégétalisation assistée avec espèces non fixatrices d'azote (ou fixatrices d'azote non nodulées).
- Revégétalisation assistée avec espèces fixatrices d'azote nodulées.

Revégétalisation spontanée / Revégétalisation assistée (arbres non fixateurs)

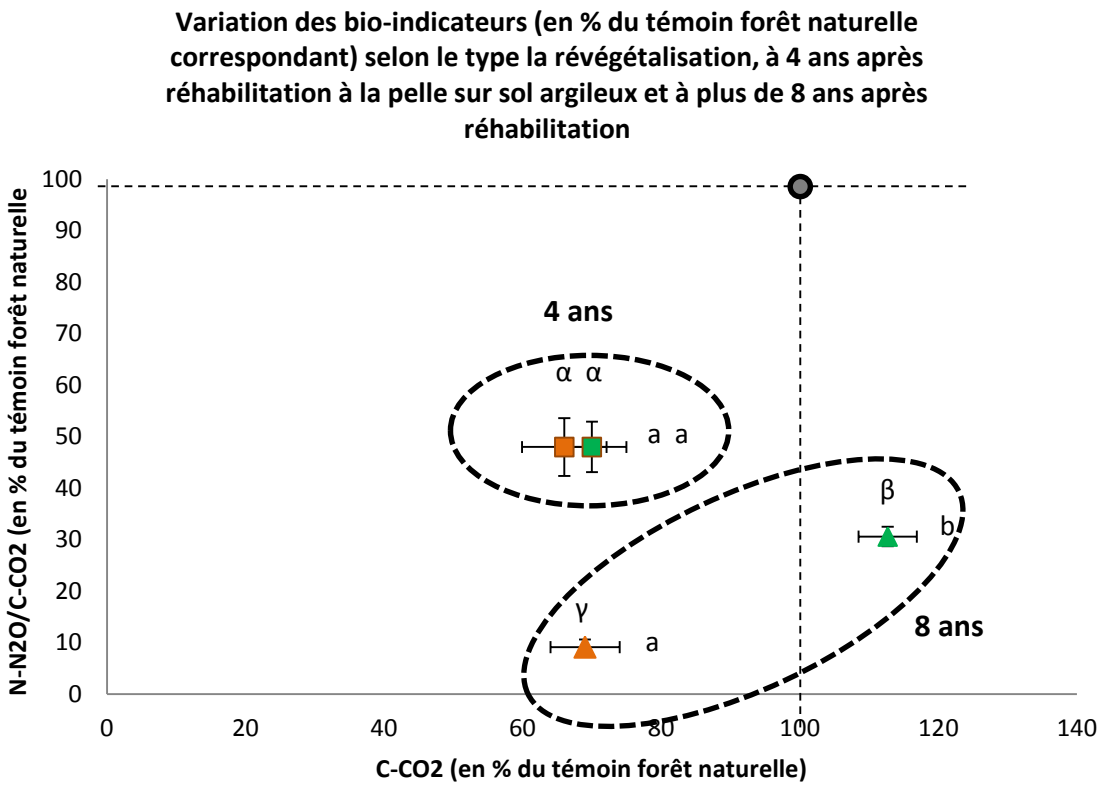


Figure 42 : Variation des bio-indicateurs (activité respiratoire (biomasse microbienne) en abscisse et DEA/SIR (diversité microbienne) en ordonnée, valeurs en pourcentage du témoin forêt naturelle selon le type de révégétalisation. **4 ans (carrés)** et **8 ans** ou plus (**triangles**) après réhabilitation. **En vert: régénération spontanée, en marron : régénération assistée (arbres non-fixateurs**). Les lignes en pointillé indiquent 100% de récupération des bio indicateurs par rapport à la référence forêt. Des lettres différentes montrent des différences significatives au seuil 5% (lettres latines pour respiration, romaines pour DEA/SIR). Sites de Grand Yaoni et Boulanger.

La comparaison entre sites revégétalisés de façon assistée et non assistée 4 ans après réhabilitation ne montre aucune différence significative au niveau du fonctionnement biologique des sols (). Les sols ont évolué pour les 2 types de végétation jusqu'à atteindre environ 50 %

du fonctionnement de ceux de la forêt naturelle de référence pour le cycle du N et leur niveau de diversité et environ 70 % pour la biomasse microbienne.

A 8 ans ou plus on constate que sous végétation spontanée le sol a atteint une biomasse microbienne supérieure à celle de la forêt alors que celle-ci n'a pas évolué sous végétation assistée. En revanche, on observe dans les deux cas une forte diminution du fonctionnement du cycle du N ainsi que de la diversité microbienne en comparaison des valeurs observées à 4 ans et, particulièrement sous végétation assistée, passant de 50 % à respectivement 30 et 10 % de la forêt de référence.

Les deux types de revégétalisation (assistée et non assistée) atteignent donc un même optimum à 4 ans qui reste cependant éloigné des valeurs de la forêt de référence, marquant une limite dans l'évolution du système sol. Celui-ci reste en situation de blocage et particulièrement au niveau de son cycle azoté, générant des carences en N. Ce phénomène semble s'accentuer à 8 ans et plus, car si la biomasse microbienne continue d'évoluer sous la végétation spontanée, le manque de N dans le sol conduit à une compétition en faveur des plantes qui limite le développement des microorganismes impliqués dans le cycle du N. Cette compétition pour le N entre plantes et microorganismes du sol est plus importante lorsque l'on introduit des espèces dans ce type de milieu. Ces dernières peuvent en effet avoir des exigences en N supérieures à celles s'installant spontanément dans un milieu pauvre.

La revégétalisation assistée avec des espèces non fixatrices d'azote présente à terme un impact sur le sol plus défavorable qu'une revégétalisation non assistée (régénération spontanée) qui elle est mieux adaptée à la pauvreté chimique du sol. Dans les deux cas des entrées d'azote sont nécessaires si l'on veut débloquer le système.

Revégétalisation assistée avec arbres fixateurs d'azote

Les données issues de cette étude réalisée sur les sites de SMSE (plantations d'espèces fixatrices âgées de 0,5 à 2 ans) complètent les résultats des travaux de Schimann et al. (2005) utilisant les mêmes méthodes et réalisés sur le site de Boulanger (plantations de fixateurs d'azote âgés de 3 à 6 ans).

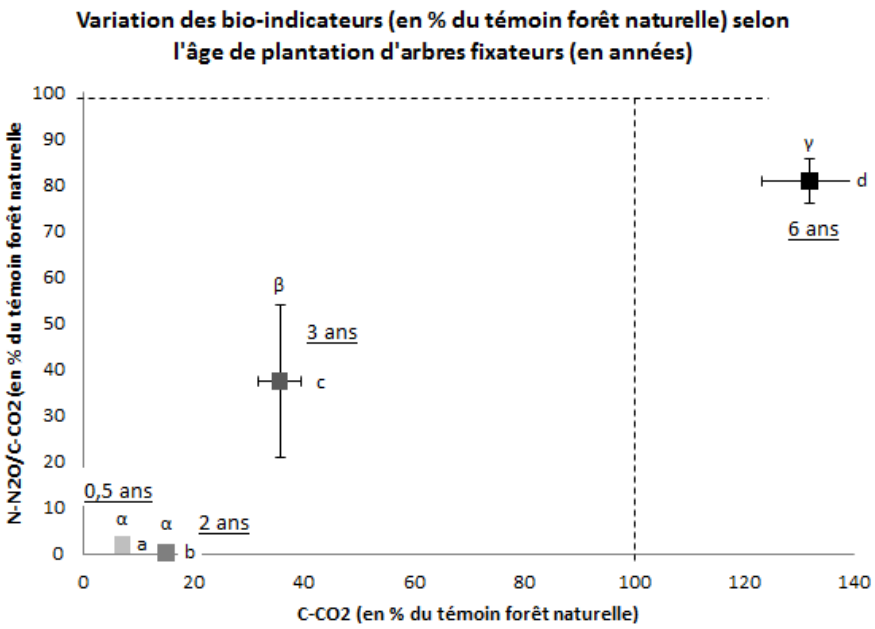


Figure 43 : Variation des bio-indicateurs (activité respiratoire en abscisse et DEA/SIR en ordonnée, valeurs en pourcentage du témoin) dans le temps (0,5, 2, 3 et 6 ans) avec l'utilisation de plantes fixatrices d'azote sur sites argileux réhabilités à la pelle. Les lignes en pointillé indiquent le niveau des activités biologique en écosystème forestier. Des lettres différentes montrent des différences significatives au seuil 5% (lettres latines pour respiration, romaines pour DEA/SIR). Sites de SMSE et Boulanger.

L'utilisation de plantes dont la capacité fixatrice d'azote a été contrôlée (espèces utilisées : *Acacia mangium* du site boulanger, *Clitoria fairchildiana* et plusieurs espèces du genre *Inga* du site SMSE) montre une récupération progressive des fonctions du sol au cours du temps pour atteindre à 6 ans les valeurs de la forêt naturelle toute fonctions confondues (). Les résultats montrent également qu'au moins 4 ans sont nécessaires pour que les espèces fixatrices d'azote marquent leur effet sur les activités biologiques du sol par rapport à des systèmes de revégétalisation spontanée ou assistée avec des espèces non fixatrices.

En effet, les plantes fixatrices d'azote sont bien connues pour leur capacité à transformer la source illimitée qu'est l'azote de l'air en forme minérale assimilable par le végétal, l'affranchissant ainsi des conditions de très faibles fertilité azotée rencontrées sur les sites miniers. Avec cette capacité, ces espèces vont donc pouvoir croître rapidement, fournir de la matière organique riche en azote dans les sols, et ainsi réenclencher le cycle du N améliorant la fertilité des sols et leur fonctionnement global.

VI.3.5 Effet de la largeur du flat sur la qualité du sol

Par effet d'entrainement par l'eau de ruissellement, le sol de la forêt avoisinant le site d'exploitation peut être source d'éléments nutritifs pour les plantes et les microorganismes du sol détruit par l'exploitation. La question est de savoir dans quelle mesure et sur quelle distance, l'eau de ruissellement et l'apport de matière organique peut favoriser une reprise de la vie du sol exploité devenu infertile ?

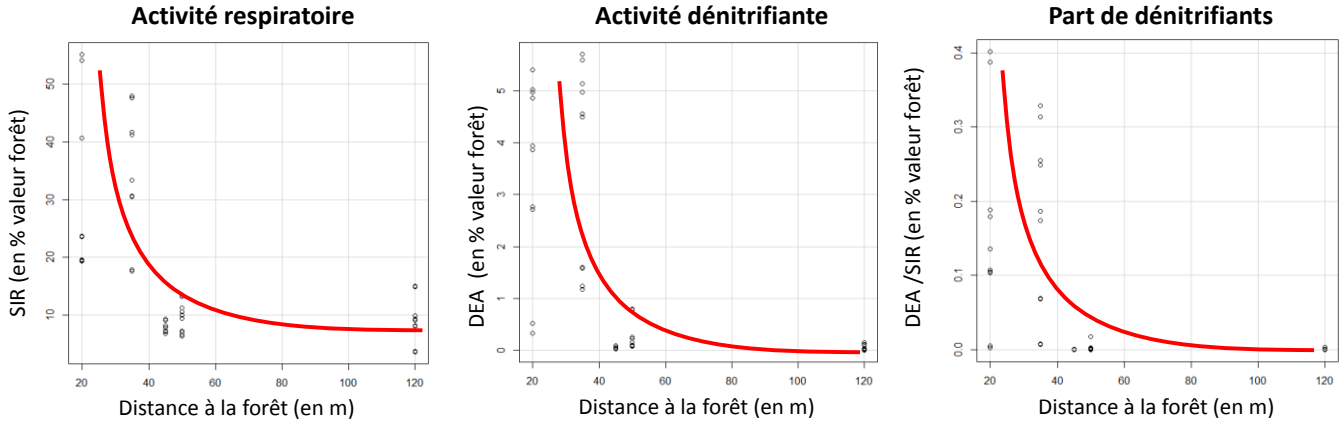


Figure 44 : effet de la proximité de la forêt avoisinante sur les bio-indicateurs du sol (en pourcentage de la valeur forêt correspondante) avec visualisation de la courbe de tendance. Site de SMSE, 2 ans après réhabilitation à la pelle. Ce jeu de données a été choisi car il présentait une large gamme de distance à la forêt (de 20 à 120 m).

La décrit les variations des bio-indicateurs de la qualité du sol en fonction de l'éloignement à la forêt. Pour l'ensemble des bio-indicateurs, nous observons un changement de tendance à partir de 40 mètres. La biomasse microbienne, le cycle de l'azote ainsi que la diversité des communautés est plus importante en bordure de forêt ; de 0 à 20 mètres, la forêt semble avoir un effet bénéfique sur la reprise du fonctionnement du sol. Toutefois cette reprise reste faible puisque, au plus proche de la forêt (moins de 20m), la biomasse a atteint au maximum 50% de celle de la forêt, la reprise du cycle de l'azote, 5% et la diversité, 0,4%. En revanche, au-delà des 40 mètres, cet effet n'est plus notable.

Les cartes d'évolution de la végétation entre 2008 et 2015 (cf. Analyse par site) montrent également un effet positif de la proximité de la forêt sur les stades de végétation. On peut noter que certaines zones, même proches de la forêt (au deçà de 40 mètres), ont un fonctionnement du sol très faible alors que d'autres zones, éloignées, sont propices à une reprise forestière.

Comme cette analyse concerne seulement le site SMSE âgé de 2 ans et choisi pour sa large gamme de distances par rapport à la forêt, nous ne disposons pas de données diachroniques pour le sol permettant de mettre en évidence une possible progression de son amélioration par la proximité de la forêt.

VI.3.6 Prédiction de la reprise de la végétation par les bio-indicateurs du sol

Les bio-indicateurs de la qualité du sol peuvent être d'autant plus intéressants s'ils sont capables de prédire rapidement après réhabilitation les capacités du sol à supporter une végétation.

Pour savoir si les bio-indicateurs ont cette capacité de prédiction, nous avons suivi en 2015 le devenir des sols des zones à dominance herbacée (zones non régénérées) de 2008. Certaines de ces zones n'ont pas évoluées et sont restées avec seulement un couvert herbacé, d'autres ont développé une strate arbustive. Nous avons alors regroupé les résultats obtenus en 2008 en deux groupes de mesures, correspondant aux deux cas de figures :

- Zones non-régénérées en 2008 et toujours non-régénérées en 2015 (situation de blocage)
- Zones non-régénérées en 2008 qui ont depuis été régénérées en 2015 ;

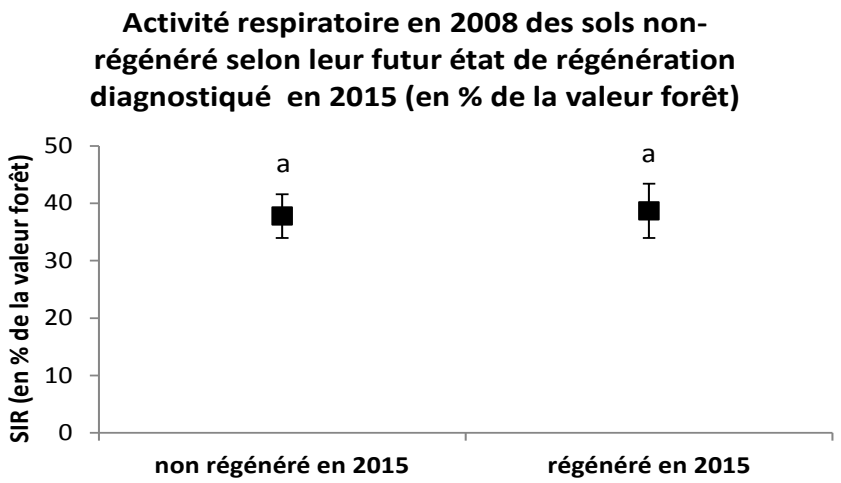
La comparaison des résultats obtenus en 2008 sur les deux groupes formés à partir de l'évolution des zones en 2015 montre (Figure 45) :

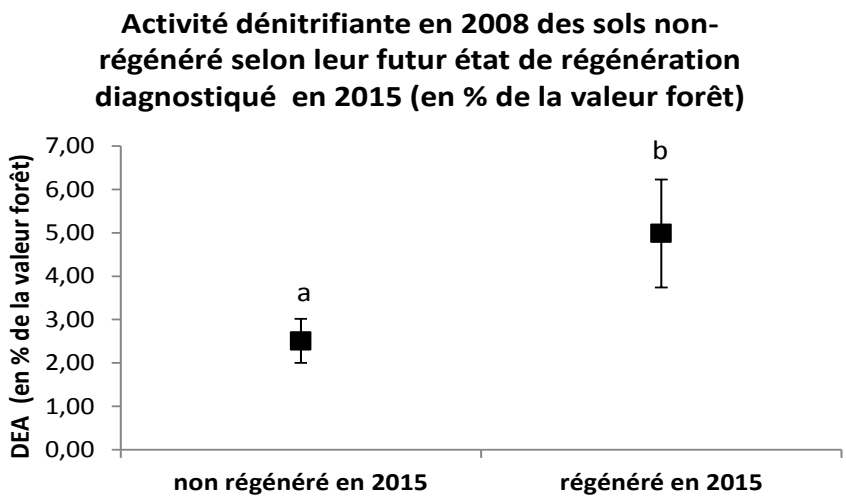
- aucune différence significative de la capacité biotique des sols que l'on se trouve aussi bien en zones qui se sont ou non régénérées ;
- une différence nettement significative pour les bio-indicateurs liées au cycle de l'azote (DEA) et à la diversité microbienne des sols : les sols correspondant aux zones qui se sont régénérées présentaient dès 2008, une valeur plus importante que ceux de la zone non régénérée.

Ce résultat démontre la nécessité d'avoir, pour qu'une zone se régénère, un seuil minimum initial de diversité microbienne (au moins, 10% de celle de la forêt de référence) et qu'elle ait enclenchée dès le début de la réhabilitation, le cycle de l'azote à au moins 5% de la valeur de la forêt de référence.

C'est donc à partir des bio-indicateurs « cycle de l'azote » et « biodiversité » et non pas à partir de la « biomasse microbienne » que la prédiction d'une possible installation de la strate arbustive peut se faire alors que *de visu*, on n'observe qu'une strate herbacée.

Si on compare l'évolution des valeurs des bio-indicateurs () sur les zones qui se sont régénérées entre 2008 et 2015, on remarque une augmentation de la biomasse d'environ 20% par rapport à 2008 mais que le niveau de la biodiversité et du cycle de l'azote n'ont pas évolué. Cette observation vient confirmer celles faites sur l'ensemble des zones régénérées mesurées en 2015 ayant été réhabilitées ou revégétalisées sans fixateurs d'azote. Ainsi, bien que des zones présentent une strate arbustive, le fonctionnement biologique du sol reste faible devant conduire à terme à des carences fortes limitant le développement de la forêt. Ces carences peuvent être levées avec l'arrivée spontanée d'arbres fixateurs d'azote ou un apport exogène *via*, par exemple, une revégétalisation à partir d'arbres fixateurs d'azote.





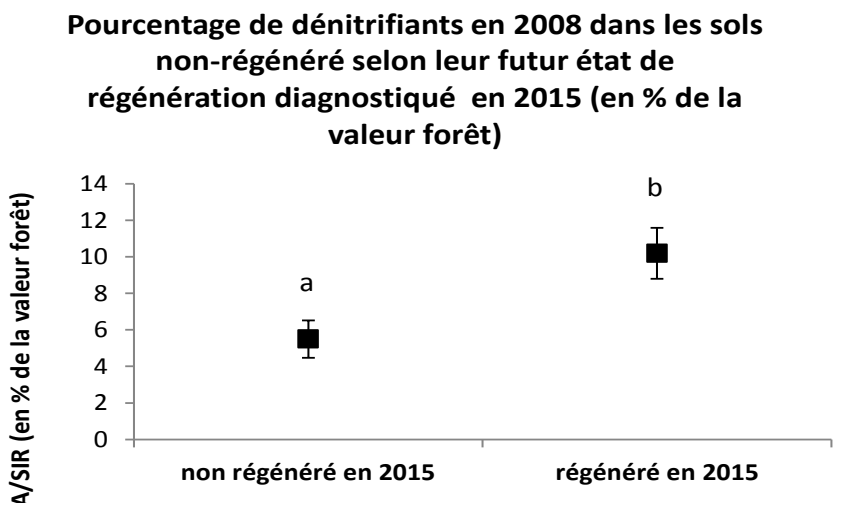


Figure 45 **:** Variation des bio-indicateurs (activité respiratoire (biomasse microbienne), activité dénitrifiante (cycle de l'azote) et DEA/SIR (diversité microbienne) ; valeurs en pourcentage du témoin forêt correspondant) sur les sols non-régénérés de 2008 qui sont soit restés non-régénérés en 2015 ou qui se sont régénérés en 2015. Des lettres différentes montrent des différences significatives au seuil 5%. Sites de Boulanger, Yaoni et Georgeon.

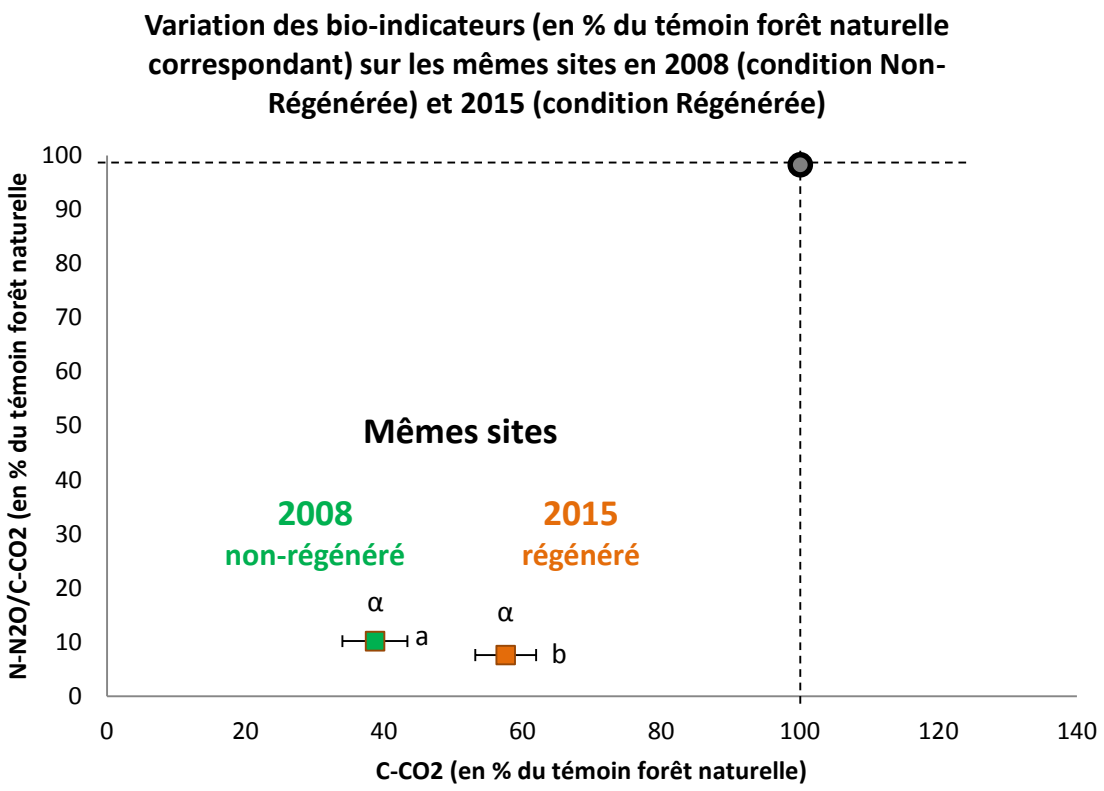


Figure 46 : Variation des bio-indicateurs (activité respiratoire en abscisse et DEA/SIR en ordonnée, valeurs en pourcentage du témoin) sur les mêmes placettes en 2008 (placettes non-régénérées, en vert) et en 2015 (placettes qui se sont régénérées, en orange). Les lignes en pointillé indiquent le niveau des activités biologique en écosystème forestier. Des lettres différentes montrent des différences significatives au seuil 5% (lettres latines pour respiration, romaines pour DEA/SIR). Sites de Boulanger, Georgeon et Yaoni.

VI.4 Synthèse générale des résultats sur les sols

Evolution des bio-indicateurs du sol sur les types régénérés 7 ans après la première étude :

- Plus importante évolution des bio-indicateurs sur le site le plus jeune (Yaoni), très faible évolution sur le site plus âgé de Boulanger.
- Systèmes encore très fragiles, à faible niveau de diversité.
- Mauvais fonctionnement du cycle du N du sol, frein au processus de succession végétale.

Impact du type de réhabilitation sur les bio-indicateurs du sol en fonction du temps :

- Récupération de la biomasse microbienne du sol entre 4 et 8 ans après réhabilitation ou non des sols.
- Meilleure récupération du fonctionnement global des sols quand les zones sont réhabilitées à la pelle parce que limitant le compactage des sols.
- Néanmoins, toujours un blocage du cycle du N et très faible niveau de diversité microbienne, même 8 ans après réhabilitation à la pelle. Ainsi, malgré la présence d'une végétation stratifiée les sols réhabilités à la pelle restent encore très fragiles.

Impact de la revégétalisation sur le fonctionnement biologique des sols :

- La revégétalisation assistée avec des espèces non fixatrices d'azote présente à terme (8 ans et plus) un impact sur le sol plus défavorable qu'une régénération spontanée ; cette dernière étant mieux adaptée à la pauvreté chimique du sol.
- Dans les deux cas (revégétalisation spontanée ou assistée par des espèces non fixatrices d'azote) une limite dans l'évolution du système sol est observée et particulièrement au niveau de son cycle azoté, générant des carences en N. Ces carences peuvent entrainer un ralentissement voir à terme un blocage de la succession végétale.
- La revégétalisation à partir d'arbres fixateurs d'azote permet un apport de N exogène et un déblocage des fonctions biologiques des sols favorable à une reprise de la succession végétale.

Effet de la largeur du flat sur la qualité du sol :

- La forêt peut être source d'éléments nutritifs permettant d'améliorer la fertilité des sols exploités qui se trouvent en bordure jusqu'à une distance de 20 mètres.
- Cette amélioration reste néanmoins faible pour la part dénitrifiante.
- Les flats étroits, et particulièrement les lisières forestières seraient donc plus propices à une reprise du fonctionnement biologique des sols.

Prédiction de la reprise de la végétation par les bio-indicateurs du sol :

- La détermination des zones qui à priori ne se régénèreront pas spontanément est possible dès la fin de la réhabilitation grâce à l'utilisation des bio-indicateurs liés au cycle de l'azote.
- Le repérage précoce de ces zones peut permettre d'orienter les priorités en termes de revégétalisation.

VII. Transcription technique et proposition de méthodes d'exploitation et de réhabilitation favorisant la reprise de la végétation

Ce chapitre a pour objectif, en application des résultats et constats des chapitres précédents, de proposer des principes et astuces techniques visant à favoriser la régénération des sols et la reprise de la végétation en agissant sur les différentes étapes de l'exploitation (dès le défrichement, pendant l'extraction, lors de la réhabilitation finale). Les principaux axes d'action identifiés sont :

- La planification amont de l'exploitation en prenant en compte la réhabilitation et l'application autant que possible du principe de réaménagement coordonné à l'extraction ;
- Les conditions de manipulation de la biomasse (andian) et des horizons superficiels du sol (terre végétale et premiers décimètres à mètre de la découverte) : choix des engins et leur utilisation, décapage et stockage sélectifs, modalités de régalage…,
- Les modalités de revégétalisation et les espèces adaptées.

Ces préconisations tiennent compte au maximum des moyens disponibles sur les chantiers alluvionnaires guyanais et des techniques applicables et économiquement viables des exploitations artisanales à semi-industrielles.

Les mines d'or exploitent un minerai contenant quelques grammes d'or par tonne extraite. Les exploitations aurifères présentent donc la particularité de générer autant de stériles de traitement que de minerai extrait. Du fait de cette singularité, l'exploitant dispose donc en théorie d'un volume de matériaux suffisant pour réhabiliter son site au plus proche de l'état initial.

Parmi les matériaux disponibles pour la réhabilitation, on peut distinguer :

- Les débris végétaux issus du défrichement ;
- La terre végétale ;
- Les stériles de découverte, en Guyane généralement argileux ou limoneux, voire parfois sableux ;
- Les résidus de traitement issus du lavage du minerai dont, dans le cas d'une exploitation alluvionnaire :
  - Des sables et graviers se déposant au pied des installations de lavage ;
  - Des fines argileuses issues des boues de lavage de décantant en bout de barranque.

Comme l'ont démontré les résultats des analyses de terrain, les différents matériaux, par leurs propriétés physico-chimiques, voire biologiques (pour les débris végétaux et la terre végétale),

seront plus ou moins propices à la reconstitution d'un sol fonctionnel et à la reprise de la végétation.

VII.1 Organisation des actions d'exploitation et de réaménagement

Le réaménagement des zones exploitées doit faire partie intégrante du programme prévisionnel et effectif d'exploitation et doit être pensé dès l'amont du projet. Le phasage des opérations permet d'organiser au mieux le décapage des horizons superficiels, le transport et le stockage du sol, l'exploitation du gisement et le réaménagement progressif. Il permet d'optimiser les mouvements de véhicules et les manipulations de terre, sources de risques de compaction et de perte du sol. Il contribue également à **l'optimisation des coûts d'exploitation** en limitant les reprises inutiles.

Le **réaménagement progressif et coordonné**, lorsqu'il est soigneusement planifié et réalisé, permet de limiter au maximum la manipulation des terres. L'idéal est de ne pas avoir à déposer temporairement la terre en tas pour la reprendre ensuite, mais de passer directement du décapage d'un panneau d'exploitation à la remise en place sur un autre panneau dont l'exploitation est terminée.

VII.1.1 Présentation schématique et conceptuelle du principe de réaménagement coordonné

Les possibilités de réaménagement coordonné sur un chantier aurifère alluvionnaire en Guyane vont être conditionnées par :

- La **largeur du flat exploité** : un chantier sur flat étroit limite les possibilités de réaménagement coordonné sans stockage intermédiaire des matériaux ;
- La **disponibilité d'engins pour le transport des matériaux** (tombereau, dumper) d'un chantier en cours d'exploitation vers un chantier en cours de remise en état. Dans ce cas (assez rare sur les chantiers alluvionnaires semi-industriels en Guyane), le réaménagement coordonné est grandement facilité.

Cas d'un chantier sur flat large

Un chantier sur flat large augmente le rayon d'action possible d'une pelle hydraulique d'un chantier intermédiaire ou panneau d'exploitation à un autre et permet, sans moyen de transport autre que la pelle, de réaménager un panneau exploité à partir des matériaux d'un panneau en cours d'exploitation.

Les possibilités de transport de matériaux étant limités sur les chantiers alluvionnaires artisanaux à semi-industriel (pas de tombereau sur site), ce rapport propose un principe de réaménagement coordonné par couples de bandes de panneaux transversaux au flat, de façon à limiter les distances de transport, voire à permettre à une pelle seule de déplacer les matériaux, et à éviter les stockages trop longs en les limitant à quelques mois.

La *Figure 47* représente de façon schématique le principe du réaménagement coordonné pour les chantiers alluvionnaires **sur des flats larges** (3 panneaux, voire plus, dans la largeur) :

- Lors de la première phase :
  - L'horizon superficiel (terre végétale) des 3 premiers panneaux d'exploitation est décapé et stocké sélectivement à proximité du panneau 4 ;
  - Les stériles de découverte (horizon minéral) des 2 premiers panneaux sont décapés et stockés sélectivement à proximité du panneau 4 et/ou utilisés pour la constitution de la digue du canal de dérivation de la crique, des digues des bassins de décantation ou tout autre terrassement sur le site (base vie, pistes…).
  - Les stocks à proximité du panneau 4 seront laissés en place jusqu'à la remise en état des panneaux 4, 5 et 6. Leur stockage temporaire nécessitera alors les précautions particulières présentées au § VII.3.
  - Le gisement des panneaux 1 et 2 est exploité.
- Lors de la deuxième phase :
  - Le panneau 1 est à réaménager ;
  - Les digues des bassins de décantation sont ouvertes et les cônes de graviers sont régalés de façon à reconstituer le lit de la crique et/ou utilisés comme éléments filtrants pour la remise en état du sol ;
  - Les stériles de découverte (horizon minéral) du panneau 3 sont alors décapés puis :
    - Terrassés pour constituer les digues des bassins de décantation ;
    - Utilisés pour la réhabilitation du panneau 1 ;
  - Le panneau 4 est alors décapé de son horizon superficiel (terre végétale) qui est remis en place directement par régalage sur les stériles de découverte remblayés sur le panneau 1, et en priorité sur les zones les plus défavorables à la reprise de la végétation (plateformes latéritiques du flat, zones terrassées du camp, zones à argile lessivée ou hydromorphe, zones graveleuses).

L'exploitation et le réaménagement coordonnés se poursuivent ainsi de panneau (n) en panneau (n+2) pour les stériles de découverte (horizon minéral) et (n+3) pour l'horizon superficiel (terre végétale), jusqu'à la réhabilitation du panneau 3. Les panneaux 4, 5 et 6 utiliseront les terres stockées initialement depuis le début de l'exploitation.

Un nouveau cycle de réaménagement coordonné redémarre ensuite pour les panneaux 7 à 12.

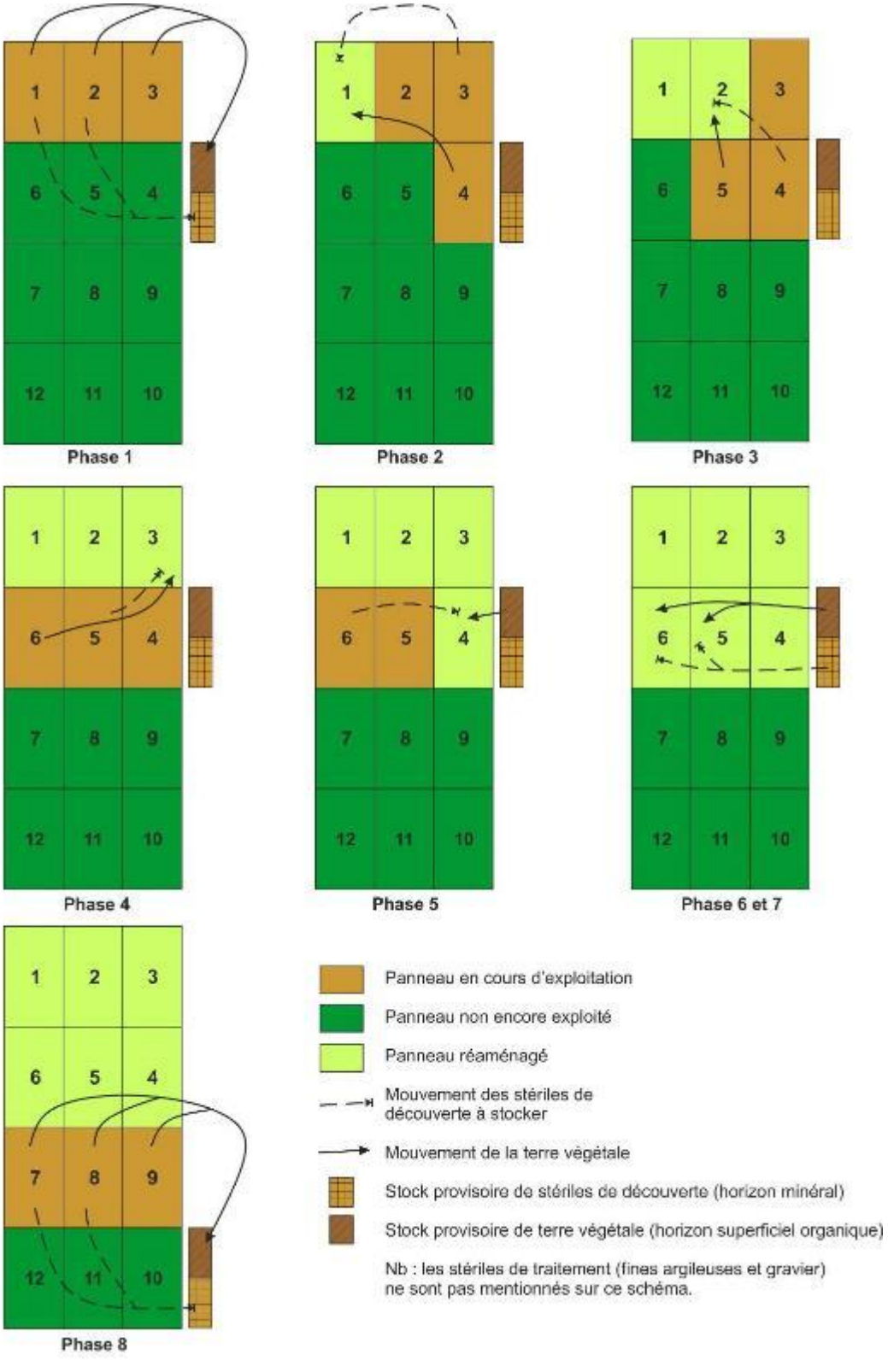


Figure 47 : Exemple de planification conceptuelle d'une exploitation avec réaménagement coordonné pour limiter les mouvements de matériaux liés au réaménagement, cas d'un chantier alluvionnaire sur flat large

Cas d'un chantier sur flat étroit

Pour des flats étroits (1 panneau d'exploitation de large), il sera difficile de mettre en place un réaménagement coordonné sans passer par des transports sur de plus longues distances. Le plus simple sera alors de stocker les terres végétales et stériles de découverte sur les bords des panneaux d'exploitation en vue de leur régalage lors de la réhabilitation.

Un autre schéma conceptuel de réaménagement coordonné pourra alors être mis en place (Cf. Figure 488) :

- Lors de la phase 1 :
  - Les stériles de découverte et la terre végétale des panneaux 1 à 3 sont décapés sélectivement à l'avance ;
  - La terre végétale est stockée sélectivement sur le bord du chantier dont elle est issue ;
  - Les stériles de découverte minéraux sont stockés sélectivement sur le bord du chantier dont ils sont issus et/ou utilisés pour la constitution de la digue du canal de dérivation de la crique, des digues des bassins de décantation, ou tout autre terrassement sur le site (base vie, pistes…) ;
  - Les panneaux 1 et 2 sont exploités.
- Lors de la phase 2 :
  - Les stériles de découverte et la terre végétale des panneaux 3 à 5 sont décapés sélectivement à l'avance et stockés sur les bords de chantiers ;
  - Les panneaux 3 et 4 sont exploités ;
  - Le panneau 1 puis le panneau 2 sont réaménagés :
    - Les digues des bassins de décantation sont ouvertes et les cônes de graviers sont régalés de façon à reconstituer le lit de la crique et/ou utilisés comme éléments filtrants pour la remise en état du sol ;
    - Les stériles de découverte stockés sur le bord du panneau sont régalés ;
    - Les terres végétales stockées sur le bord du panneau sont régalées en priorité sur les zones les plus défavorables à la reprise de la végétation (plateformes latéritiques du flat, zones terrassées du camp, zones à argile lessivée ou hydromorphe, zones graveleuses).
- Lors de la phase 3 :
  - Les stériles de découverte et la terre végétale des panneaux 5 à 6 sont décapés sélectivement à l'avance et stockés sur les bords de chantiers ;
  - Les panneaux 5 et 6 sont exploités ;
  - Le panneau 3 puis le panneau 4 sont réaménagés.
- Lors de la phase 4, les panneaux 5 et 6 sont réaménagés.

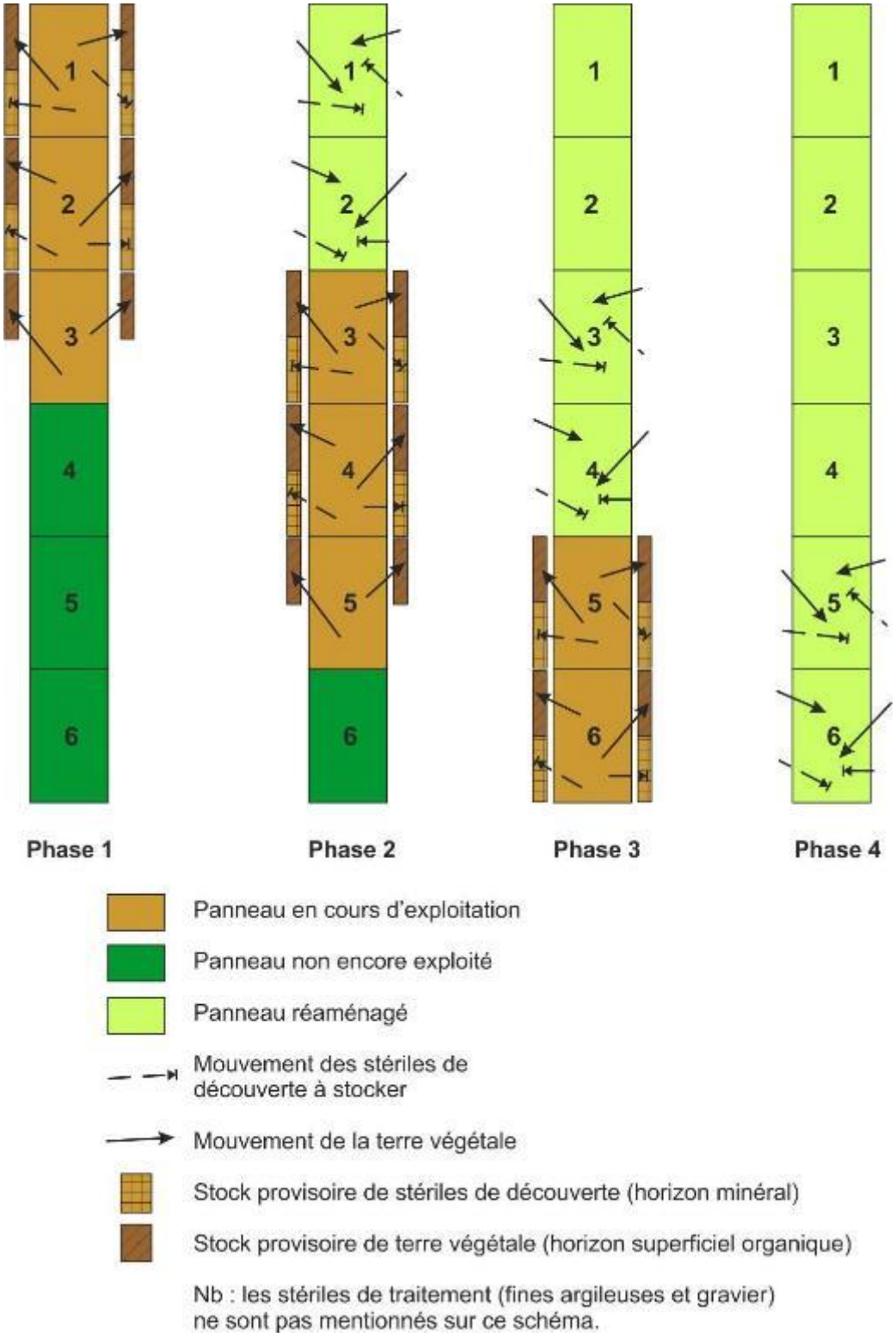


Figure 48 : Exemple de réaménagement coordonné possible dans le cas d'un chantier alluvionnaire sur flat étroit

VII.1.2 Organisation d'un chantier alluvionnaire en vue d'optimiser le réaménagement

Ce paragraphe commence par présenter l'organisation préconisée d'un chantier aurifère alluvionnaire en Guyane afin d'optimiser le réaménagement puis il applique les principes théoriques de réaménagement coordonné exposés précédemment et détaille les conditions de remise en état sur deux panneaux d'exploitation.

Organisation générale d'un chantier alluvionnaire

Le schéma suivant, réalisé par le PTMG (Pôle Technique Minier de Guyane), adapté et complété par GéoPlusEnvironnement dans le cadre de cette étude, illustre l'organisation générale d'un chantier alluvionnaire. Il y sera fait référence dans la suite du rapport pour illustrer les différentes préconisations techniques.

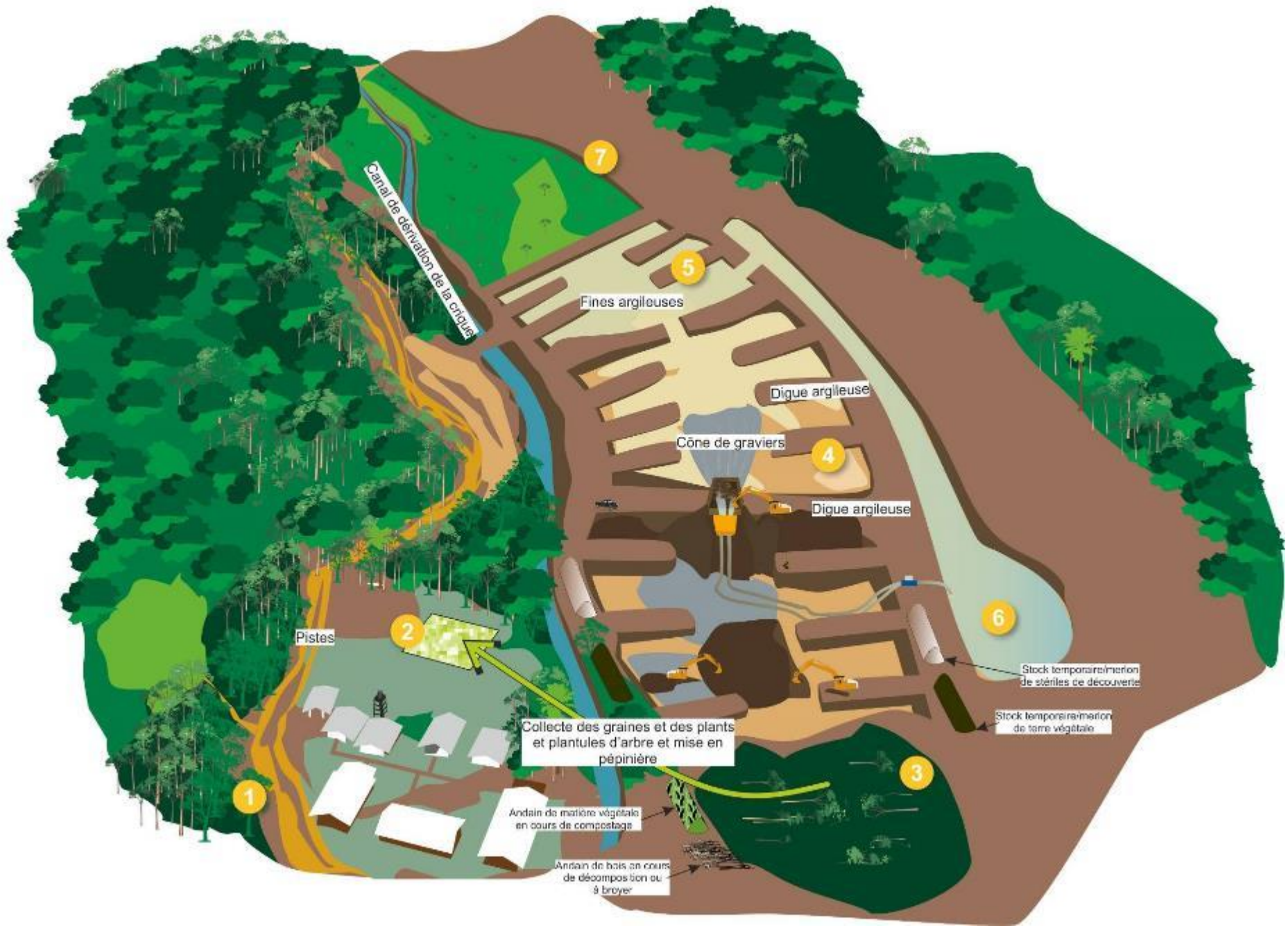


Figure 49 : Organisation générale d'un chantier alluvionnaire (d'après PTMG)

1 : Camp/Base vie

2 : Pépinière

3 : Zone en cours de défrichement

4 : Zone en cours d'exploitation

5 : Bassin de décantation

6 : Canal d'amenée des eaux de lavage depuis le bassin de décantation pour nouvel usage en circuit fermé

7 : Zone en cours de réaménagement

Illustration de la coordination entre l'exploitation et le réaménagement

Les schémas suivants reprennent l'organisation d'un chantier alluvionnaire type (*Cf. Figure 49*) et illustrent l'avancée de l'exploitation et du réaménagement.

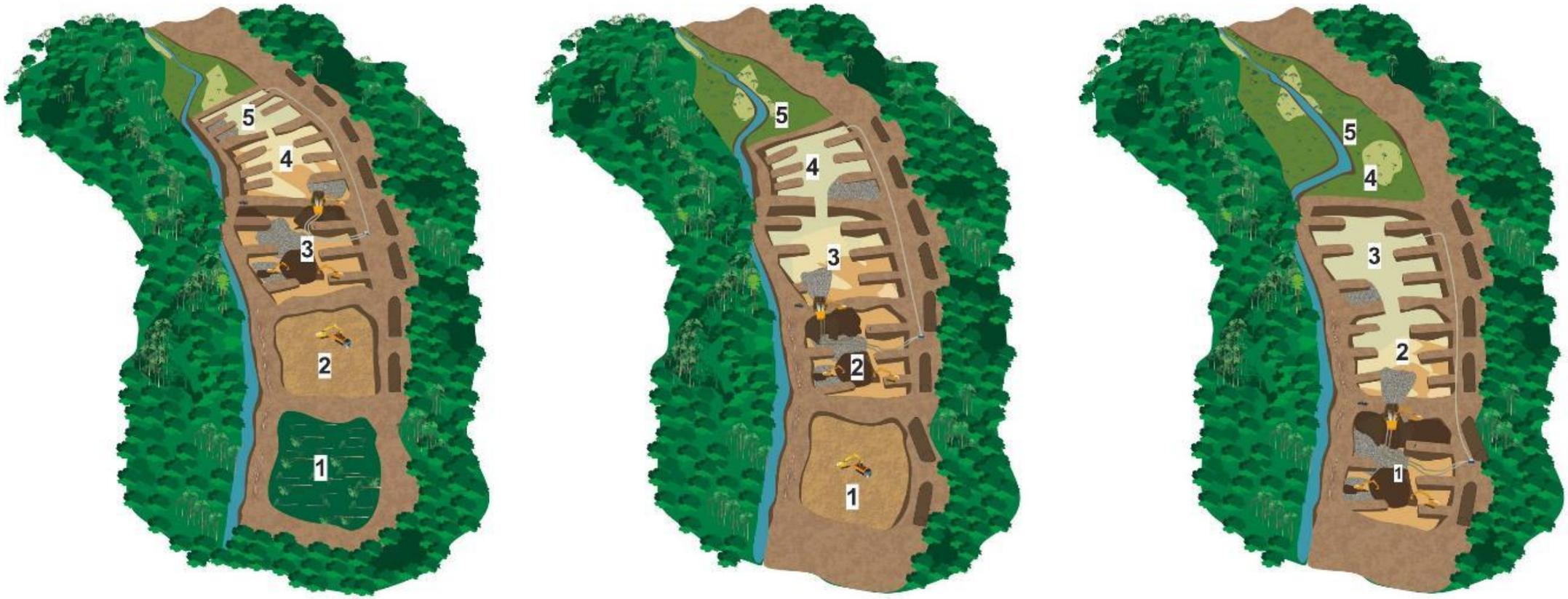


Schéma A :

Panneau 1 défriché : stockage sélectif des débris végétaux en andains sur le bord de l'exploitation.
Panneau 2 en cours de décapage : décapage et stockage sélectif de la terre végétale en merlons sur le bord de l'exploitation.
Panneau 3 en cours d'exploitation : installation de lavage en rive droite et rejets des graviers en rive droite dans le bassin issu de l 'exploitation du panneau 4.
Panneaux 4 et 5 exploités et servant de bassins de décantation pour les rejets de lavage.

Schéma B :

Panneau 1 en cours de décapage : décapage et stockage sélectif de la terre végétale en merlons sur le bord de l'exploitation.
Panneau 2 en cours d'exploitation : installation de lavage en rive gauche et rejets des graviers en rive gauche dans le bassin issu de l'exploitation du panneau 3.
Panneaux 3 et 4 exploités et servant de bassins de décantation pour les rejets de lavage.
Panneau 5 réaménagé.

Schéma B :

Panneau 1 en cours d'exploitation : installation de lavage en milieu de flat et rejets des graviers dans le bassin issu de l'exploitation du panneau 2.
Panneaux 2 et 3 exploités et servant de bassins de décantation pour les rejets de lavage.
Panneau 4 réaménagé.

Figure 50 : Illustration de la coordination entre l'exploitation et le réaménagement sur un chantier alluvionnaire type

Le déplacement de l'installation de lavage permet d'alterner la position des cônes de graviers en rive gauche, rive droite ou partie centrale du flat. Cette action et recommandée pour préparer la reconstitution d'un lit de crique méandriforme plus naturel qu'un lit rectiligne.

VII.2 Bonnes pratiques et préconisations pour la phase de défrichement

Le défrichement constitue la première étape de l'exploitation et l'exploitant peut agir, dès cette phase, pour préparer le succès de son réaménagement, et plus particulièrement de la revégétalisation de son site.

VII.2.1 Avant le défrichement

Avant même de commencer le défrichement, il est important de pouvoir identifier les espèces végétales occupant le site et leurs habitats associés par une **cartographie sommaire des habitats** et un **inventaire de la végétation**, si ce n'a pas déjà été fait lors d'une étude ou une « notice » d'impact sur le site. La végétation d'un panneau destiné à être défriché peut-être relevée le long de transects repérés au GPS, depuis la berge jusqu'au relief.

Cette action préalable permettra d'identifier les habitats à reconstituer lors du réaménagement et de déterminer les espèces végétales qui pourront être utilisées et dans quels milieux.

- Dans un second temps, l'exploitant pourra procéder à la **mise en pépinière** des espèces sélectionnées afin de constituer des plants forestiers locaux (*Cf. Figure 49*) :
- Délimitation et numérotation de placeaux de prélèvement le long des transects d'inventaires. Un placeau de prélèvement correspondra à un carré identifié de la pépinière ;
- Collecte des plants et plantules d'arbres, en attente dans le sous-bois selon un protocole précis permettant de repérer leur position par rapport à la berge et de les identifier dans la pépinière ;
- Collecte de graines sous les grands semenciers pour constituer une banque de graines.

La *Figure 51* présente un plan type de pépinière. Celle-ci devra être judicieusement positionnée en fonction de l'exploitation à venir (base vie, proximité d'un point d'eau).

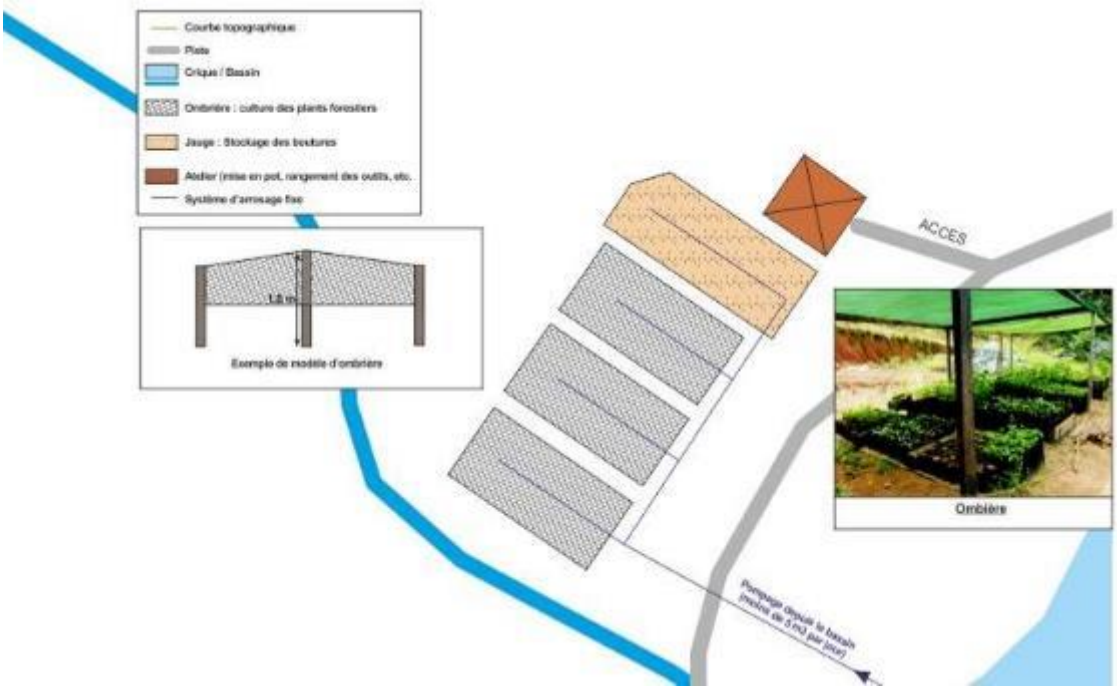


Figure 51 : Plan type d'une pépinière (source : GéoPlusEnvironnement)

Figure 52 : Pépinière sur site (crédit photo SOLICAZ)

VII.2.2 Lors du défrichement

Le défrichement avant exploitation constitue la première étape du réaménagement qui va impliquer les actions principales suivantes, préparatoires au futur réaménagement :

- Le défrichement va occasionner des circulations d'engins sur le sol. Afin de ne pas dégrader l'horizon superficiel organo-minéral, les précautions suivantes doivent être prises :
  - Etablir un plan de phasage du défrichement et défricher progressivement les panneaux selon l'avancée de l'exploitation ;
  - Défricher en saison sèche afin de ne pas compacter et déstructurer le sol par des

circulations d'engins excessive et de ne pas enlever trop d'humus avec les circulations d'engins ;

- Mettre en place un schéma de circulation des engins sur le site afin que le trajet des engins se fasse autant que possible toujours au même endroit et qu'il n'y ait pas une compaction sur une trop grande surface ;
- Préférer l'extraction des souches à la pelle hydraulique afin de bien séparer les racines et la terre.

- Le défrichement est aussi l'occasion de collecter la **matière organique** disponible et de la **stocker sélectivement**, avec la plus grande précaution, suivant le plan de phasage de l'exploitation et du réaménagement, en vue de sa valorisation lors de la préparation des sols à la revégétalisation :
  - Les **rameaux et petites branches** des espèces tendres ou mi-dures doivent donc être collectés, broyés et stockés ;
  - Les **feuilles et brindilles** pourront être compostées ;
  - Une partie des **gros bois** restants (souches, troncs), en dehors de ceux valorisables sur place en bois d'œuvre, pourra être fragmentée et décomposée par des champignons (ensemencement avec du mycélium de champignons dégradant le.

- Enfin, cette étape préalable et primordiale du défrichement devra également prévoir :
  - La collecte du matériel végétal pour reproduction par voie végétative : boutures, macro-boutures…
  - La collecte et le stockage sélectifs de l'horizon superficiel du sol contenant la banque de graines, en particulier sous les grands semenciers.

Figure 53 : Plantules d'Eperua grandiflora sous un semencier en bord de piste.

VII.3 Bonnes pratiques et préconisations pour le décapage et le stockage sélectifs de l'horizon superficiel du sol

L'horizon superficiel du sol (terre végétale) doit être **décapé sur 20 à 40 cm** de profondeur et être stocké sélectivement en vue de son régalage final lors de la remise en état.

Le décapage de l'horizon superficiel doit être réalisé **en saison sèche** et de préférence **avec une pelle hydraulique sur chenilles**. Les bulldozers peuvent toutefois être utilisés pour cette opération de décapage avant l'exploitation aurifère. Ils permettent un meilleur rendement en poussant la terre végétale sur une profondeur homogène. Le tassement qu'ils engendrent, supérieur à celui d'une pelle hydraulique, n'impactera pas la réhabilitation puisque les sols décapés seront par la suite totalement dénaturés.

L'horizon superficiel décapé doit être stocké sélectivement sur un sol propre, décapé et nivelé, en bordure d'exploitation (*Cf. Figure 49*). Afin de limiter la dégradation des qualités biologiques de la terre végétale, il est recommandé de creuser des fossés à ciel ouvert autour des dépôts pour détourner les eaux de ruissellement.

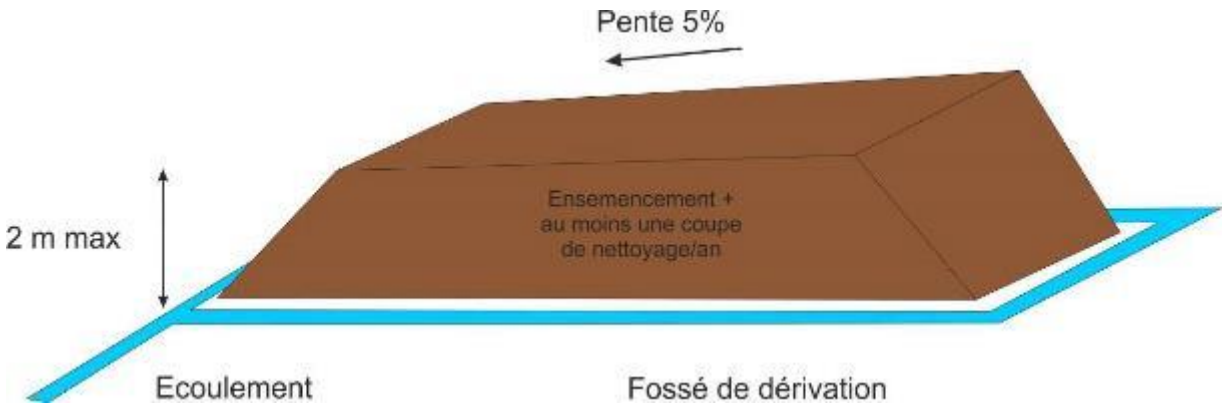


Figure 54 : Conditions optimales de stockage de l'horizon superficiel du sol

(Institut agricole de l'état de Fribourg, 1998. Directives concernant le décapage et la mise en dépôt de la terre végétale ainsi que la remise en culture de gravières et de décharges)

Les conditions de stockage doivent privilégier le maintien d'une vie biologique du sol. Les tas doivent donc être larges et peu élevés pour maintenir au maximum l'aération du sol. En outre, les compactions dues au poids de la terre doivent être minimisées en constituant des **tas de 2 m de hauteur maximum.** La hauteur de dépôt doit, de plus, être constituée en une seule fois, sans rouler sur le dépôt.

Pour les dépôts de longue durée (plusieurs mois), le sommet du dépôt doit avoir une pente d'environ 5% pour éviter la stagnation d'eau de pluie. Il est également recommandé d'ensemencer le dépôt avec des espèces à fort pouvoir de recouvrement pour éviter l'érosion pluviale des stocks.

Des herbacées légumineuses fixatrices d'azote pourront être utilisées :

Famille	Espèce	Illustration
LEGUMINOSAE-CAESALPINIOIDEAE	Arachis pintoi	
LEGUMINOSAE-CAESALPINIOIDEAE	Chamaecrista spp.	
LEGUMINOSAE-FABOIDEAE	Aeschynomenes spp.	

Famille	Espèce	Illustration
LEGUMINOSAE-FABOIDEAE	Crotalaria retusa	
LEGUMINOSAE-FABOIDEAE	Sesbania exasperata	

Tableau 11 : Herbacées légumineuses fixatrices d'azote utilisable dans le cadre du réaménagement des mines en Guyane

VII.4 Bonnes pratiques et préconisations pour la remise en état du sol et du sous-sol

La remise en état du sol et du sous-sol doit permettre, après exploitation du gisement, de reconstituer un sol et un sous-sol favorisant le développement de la végétation, c'est-à-dire qui assure :

- La pénétration des racines, de l'air et de l'eau ;
- Une richesse minérale et organique afin de satisfaire les besoins nutritifs des végétaux ;
- Le développement d'une vie biologique indispensable à la fertilité des sols.

VII.4.1 Organisation générale de la remise en état du sol et du sous-sol

Afin d'atteindre l'objectif de remise en état du sol et du sous-sol, les différentes couches de matériaux sont à remettre en place sur 3 niveaux qui composeront le sol et le sous-sol reconstitués (*Cf. Figure 55*) :

- L'horizon organo-minéral ou terre végétale correspondant à l'horizon superficiel décapé sur 20 à 40 cm de profondeur ;
- L'horizon minéral correspondant aux stériles de découverte et aux stériles de traitement ;
- Eventuellement une couche de remblai en sous-couche.

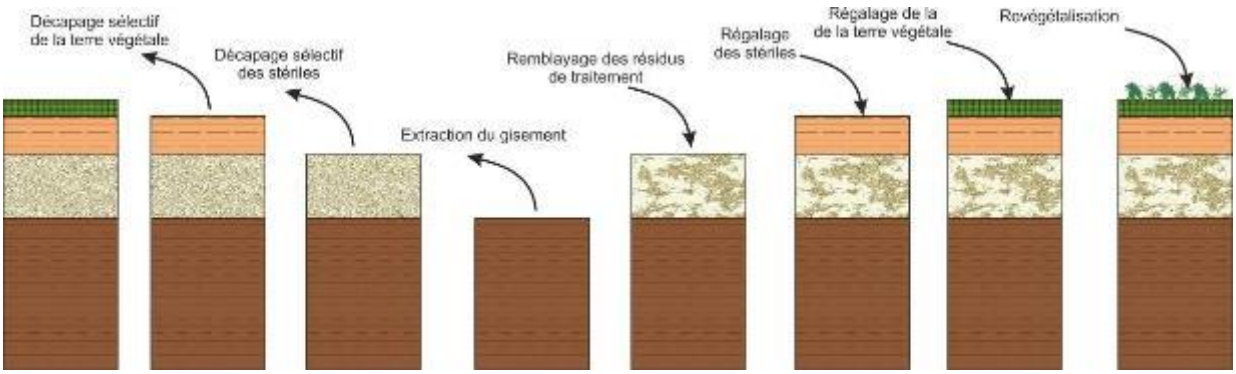


Figure 55 : Schéma de principe du décapage sélectif et de la remise en place des différents horizons du sol et du sous-sol

VII.4.2 Qualité et quantité des matériaux

Un inventaire des matériaux disponibles est nécessaire. Une **estimation préalable des quantités et de la qualité de matériaux disponibles** doit être effectuée : mesure de l'épaisseur de stériles de découverte, estimation des volumes de stériles de traitement du minerai (sables, graviers et fines argileuses de décantation). Ces données peuvent être acquises lors des sondages et puits de reconnaissance du gisement (sondages à la moto-tarière ou puits à la pelle hydraulique).

Le choix des matériaux pour la phase de terrassement du réaménagement dépendra de qualité et de leur disponibilité sur le site ou à proximité :

- des matériaux de remblaiement de fond de fouille si nécessaire : stériles d'extraction ou de traitement du minerai (fines et graviers) ;
- des matériaux de reconstitution de l'horizon minéral du sol : stériles de découverte ;
- de la terre végétale issue du décapage d'un panneau en cours d'exploitation ou stockée sélectivement en attente de reprise ;
- des matériaux visant à améliorer le substrat : matière organique issue du défrichement et mise en andins ou merlons après compostage, fragmentation et/ou dégradation, fines de décantation permettant d'augmenter la capacité de réserve en eau.

Les matériaux de remblayage (reconstitution du sous-sol)

Les résidus de traitement résultent du lavage du minerai aurifère alluvionnaire et correspondent aux cônes de sables et graviers déposés en sortie de table de lavage et aux fines de décantation déposées dans les bassins (*Cf. Figure 49*).

- **Les sables et graviers** permettent de reconstituer une épaisseur suffisante de "prospection" pour l'appareil racinaire des végétaux, à condition qu'ils n'aient pas été trop compactés. Par contre, comme horizon superficiel, ils n'assurent généralement pas une réserve en eau suffisante. Une amélioration possible de capacité de réserve en eau peut être apportée par des fines de décantation.
- **Les fines (ou boues) de décantation** sont un sous-produit du lavage du minerai alluvionnaire ou sont issues des bassins de décantation des eaux pluviales. Les eaux de lavage d'un panneau en cours d'exploitation sont déversées dans les bassins constitués par l'exploitation des panneaux précédents où les matières minérales se déposent afin de recycler l'eau propre pour une utilisation en circuit fermé. Du fait de leur granulométrie très fine et se leur structure minéralogique en feuillets, elles possèdent une forte capacité de rétention en eau. Cependant, utilisées seules, elles peuvent se comporter comme une couche imperméable. Elles sont pauvres en matière organique et un apport organique supplémentaire est nécessaire si elles sont utilisées seules.

Les matériaux de reconstitution de l'horizon minéral

Dans le sol, l'horizon minéral joue un rôle important pour la pénétration des racines et pour la constitution de la réserve utile du sol en eau et minéraux. Cet horizon minéral reconstitué à partir des stériles de découverte (horizon minéral initialement en place) et/ou des stériles de traitement (fines argileuses, sables et graviers) devra avoir des caractéristiques physico-chimiques assurant ces fonctions.

Les stériles de découverte sont issus soit du décapage sélectif, à l'avancée d'un nouveau panneau d'exploitation, soit de la reprise d'un stock provisoire constitué lors de l'exploitation antérieure du panneau maintenant à réaménager (*Cf. Figure 47, Figure 48, Figure 49 et Figure 55*).

L'horizon minéral reconstitué doit refléter la composition de l'horizon minéral originel, mais peut quelques fois être modifié pour tenter d'améliorer ses caractéristiques en :

- mélangeant des sols de différents endroits du site ;
- augmentant localement l'épaisseur de certains horizons ;
- mélangeant des matériaux de granulométries différentes. Les fines de décantation peuvent notamment être incorporées à un horizon minéral sablo-graveleux et ainsi améliorer notablement la réserve utile en eau. Elles apportent également une fraction minérale plus fine favorable à la constitution du complexe argilo-humique qui jouera un rôle important dans la nutrition des futures plantes.

Les matériaux de reconstitution de l'horizon organo-minéral

L'horizon organo-minéral (ou terre végétale) provient du décapage sélectif d'autres panneaux d'exploitation (réaménagement coordonné) ou du même panneau avec reprise du stock provisoire constitué au moment du décapage sélectif (*Cf. Figure 47, Figure 48, Figure 49 et Figure 55*).

En cas de manque d'horizon organo-minéral pour assurer une épaisseur suffisante pour le développement des appareils racinaires, cet horizon peut provenir de chantiers extérieurs (décapages pour les pistes, la base vie…) dans la mesure où le décapage aura bien été fait de manière sélective.

Dans certains cas extrêmes où il n'existe pas ou plus d'horizon organo-minéral, il est possible :

- soit de reconstituer un horizon organo-minéral avec des stériles de découverte ou de traitement mélangés à des fines de décantation et à de la matière organique produite spécialement à partir des déchets végétaux du défrichement ;
- soit de planter directement sur l'horizon minéral en utilisant des plantes fixatrices d'azote (herbacées, arbustives et arbres) et des plants forestiers micorhyzés.

Le remblayage préalable du chantier d'extraction (reconstitution du sous-sol) pourra se faire à partir des stériles de traitement (graviers et fines de décantation).

Le choix des matériaux de reconstitution de **l'horizon minéral** d'un sol doit permettre de reconstituer la couche inférieure d'un sol apte à la reprise de la végétation sur l'horizon organo-minéral sus-jacent. En effet, ces matériaux doivent être sélectionnés pour leur complémentarité et leur intérêt :

- **stériles de découverte** (argileux à argilo-sableux) **et de traitement** (sablo-graveleux à graveleux) pour apporter un **volume de substrat** important prospectable par les racines et suffisamment drainant ;
- **fines de décantation** si nécessaire pour améliorer la **rétention en eau**, primordiale pour assurer une bonne croissance des végétaux.

L'horizon organo-minéral, bien qu'il soit parfois peu épais et difficile à décaper sélectivement, doit toujours être utilisé même si des reconstitutions de cet horizon sont possibles à partir d'un mélange de stériles de découverte et de traitement, de fines de décantation et de matière organique obtenue à partir des débris végétaux du défrichement.

La préservation des qualités initiales de cet horizon lors des opérations de décapage permettra toujours une meilleure reprise des plants et un réaménagement à moindre coût.

Epaisseur de matériaux

- ***L'horizon de remblai du sous-sol***

L'épaisseur de remblai à mettre en place est notamment conditionnée par le niveau à atteindre au-dessus de la nappe, par le volume prospectable à constituer et par la topographie que l'on souhaite restituer. Elle est calculée en fonction des épaisseurs fixées pour les horizons supérieurs. Les bassins d'exploitation doivent ainsi être préalablement remblayés **jusqu'à 1,2 à 1,5 m au dessous de niveau définitif souhaité**.

- ***L'horizon minéral***

Selon les pays, les préconisations relatives aux épaisseurs minimales de l'horizon minéral à mettre en place varient de 1 à 2 m. En France métropolitaine, les épaisseurs minimales préconisées par l'ENGREF sont **de 1 à 1,20 m** dans le cadre du réaménagement des carrières, ce qui paraît applicable au contexte guyanais selon l'épaisseur d'origine de la couche argileuse stérile.

- ***L'horizon organo-minéral (ou terre végétale)***

En France métropolitaine l'épaisseur d'horizon organo-minéral conseillée par l'ENGREF dans le cadre du réaménagement des carrières va **de 0,25 à 0,40 m**. La fourchette basse proche de 0,25 m paraît la plus raisonnable pour le réaménagement des chantiers aurifères alluvionnaires guyanais.

Entre le volume de terre végétale en place et le volume disponible pour le réaménagement, il y a toujours un déficit lié au non décapage sélectif de toute la terre végétale et aux manipulations de terre. Souvent, et malgré le foisonnement, les épaisseurs de terre à remettre sont donc inférieures à celles d'origine.

Il conviendra donc de privilégier la répartition des volumes de terres végétales sur les secteurs les plus défavorables à la reprise de la végétation : plateforme latéritique du flat, zones terrassées de la base vie et des pistes, zones à argile lessivée ou hydromorphe, zone graveleuse… (Cf. Synthèse générale des résultats sur les sols).

VII.4.3 Conditions de mise en place des différents horizons du sol et du sous-sol

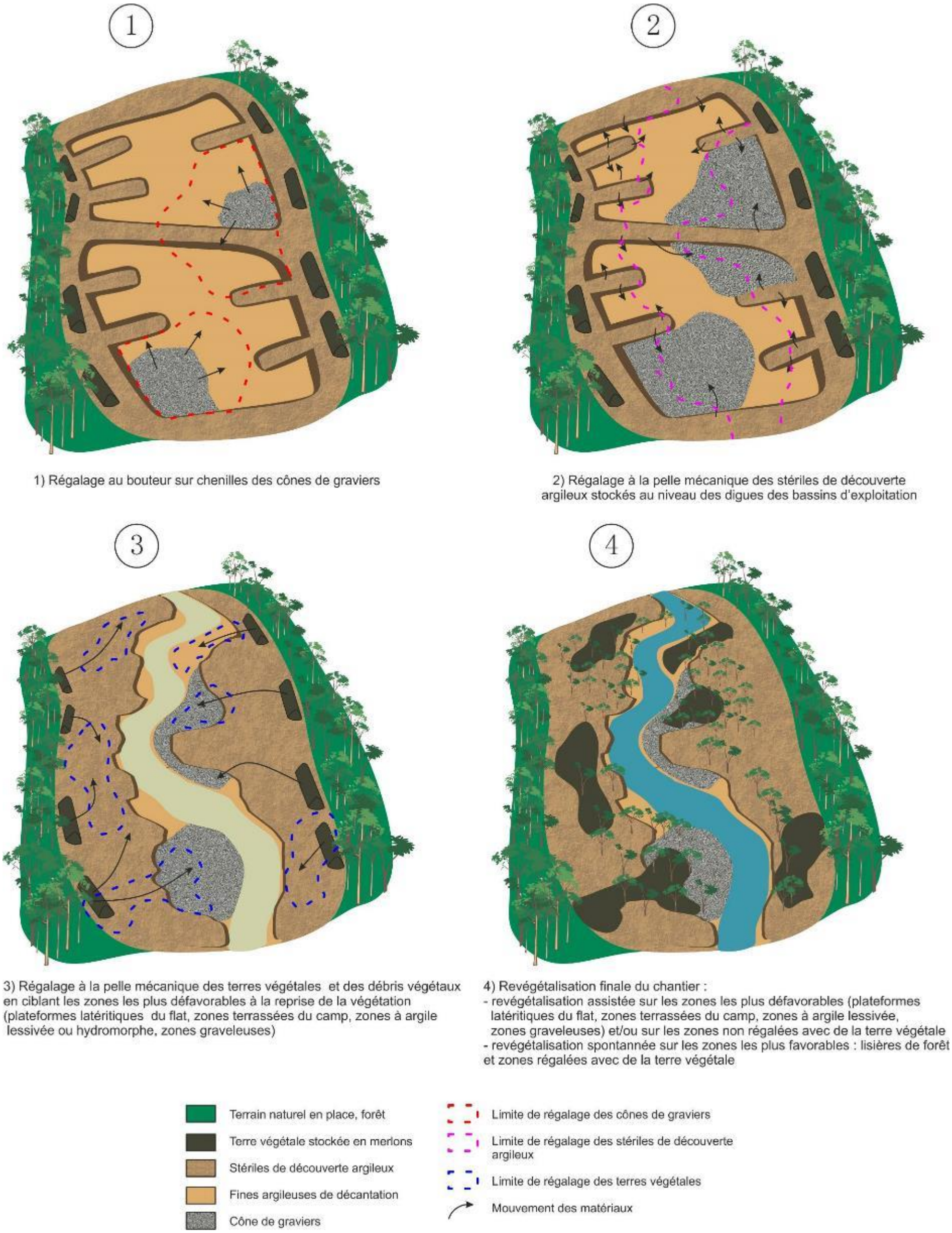
La *Figure 56* illustre les différentes étapes de terrassement lors de la remise en état des sols sur un chantier alluvionnaire.

Mise en place des matériaux de comblement et de l'horizon minéral

La mise en place de matériaux de comblement (sous-sol) et de l'horizon minéral (1 à 1,20 m) avant régalage et de l'horizon organo-minéral (de l'ordre de 0,25 m) consistera essentiellement à (*Cf. Figure 56*) :

- reprendre les cônes de gravier et tas de cailloux formés au pied des tables de lavage pour les étaler en fond de barranques ;
- casser les digues et étaler les matériaux argileux les constituant sur les zones de gravier restantes ;
- reprendre et étaler les stériles de découverte en stock.

Si l'incorporation de fines de décantation à un horizon minéral trop sablo-graveleux est nécessaire, il est conseillé de mettre en place séparément les fines de décantation en couche inférieure (0,25 m) et les matériaux sablo-graveleux en couche supérieure (0,25 m) puis de les incorporer au moyen d'**outils agricoles (labour, machine à bêcher…)**.



1) Régalage au bouteur sur chenilles des cônes de graviers

2) Régalage à la pelle mécanique des stériles de découverte argileux stockés au niveau des digues des bassins d'exploitation

3) Régalage à la pelle mécanique des terres végétales et des débris végétaux en ciblant les zones les plus défavorables à la reprise de la végétation (plateformes latéritiques du flat, zones terrassées du camp, zones à argile lessivée ou hydromorphe, zones graveleuses)

4) Revégétalisation finale du chantier :
- revégétalisation assistée sur les zones les plus défavorables (plateformes latéritiques du flat, zones terrassées du camp, zones à argile lessivée, zones graveleuses) et/ou sur les zones non régalées avec de la terre végétale
- revégétalisation spontannée sur les zones les plus favorables : lisières de forêt et zones régalées avec de la terre végétale

Figure 56 : Illustration des différentes étapes de terrassement lors de la remise en état des sols sur un chantier alluvionnaire

Régalage de l'horizon organo-minéral (ou terre végétale)

Pour reconstituer un sol propice à la reprise de la végétation, l'horizon organo-minéral doit être traité avec soin afin d'éviter tout compactage. L'utilisation de bulldozer est donc proscrite pour des questions de tassement et de déstructuration du sol.

- ***Conditions de manipulation de la terre végétale***

Pour être manipulée dans de bonnes conditions, la terre végétale doit être correctement ressuyée car, transporter et manipuler des matériaux trop humides provoque des phénomènes de compaction et de dégradation de leur structure. Le décapage et le régalage ne devraient donc avoir lieu, autant que possible, **que si le sol est suffisamment sec** (terre friable ne collant pas aux mains et aux machines).

- ***Régalage de la terre végétale***

Les conditions de mise en place des matériaux influent sur la qualité du réaménagement au même titre que les caractéristiques intrinsèques de ces matériaux. En effet, pour la terre végétale, c'est notamment l'absence de compactage qui sera garante du succès.

Le régalage de la terre végétale peut ensuite se faire à la **pelle hydraulique sur chenilles** *(Cf. Figure 57)*, en bandes. La terre végétale est gerbée sur la zone rippée, couche par couche, et régalée par une pelle située latéralement ou en avant du chantier, travaillant en rétro. La pelle peut aussi travailler en reculant sur la bande en cours d'aménagement, par balayage. Aucun engin sur pneus ne doit circuler sur les surfaces rippées ou sur la sous-couche pour ne pas la tasser.

Afin de pratiquer un travail optimum, il est bon de mener le rippage et le régalage de façon conjointe, par bandes *(Cf. Figure 57)* :

- Rippage d'une bande de 2,5 à 3 m ;
- Gerbage de l'horizon organo-minéral ;
- Régalage de l'horizon organo-minéral.

Ensuite, une nouvelle bande peut être réalisée, sans tassement de la première.

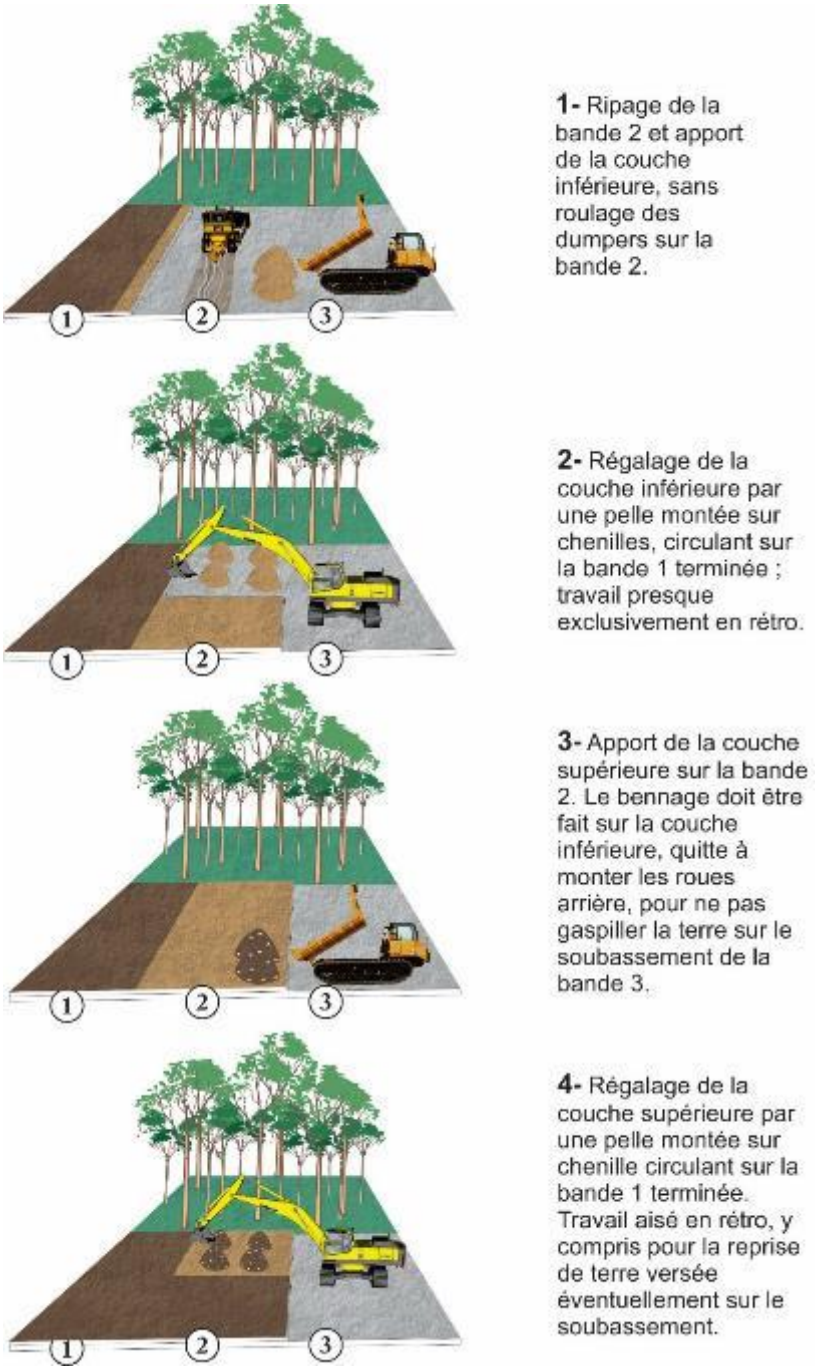


Figure 57 : Schéma de régalage de la terre végétale

L'utilisation d'un mauvais engin (sur pneus, circulant sur les couches de sol mises en place, ou non adapté (niveleuse, scrapeur…)) ou la manipulation de terres humides sont deux causes de dégâts irrémédiables à la structure et donc à la qualité des sols.

Choix et utilisation des engins

Une des contraintes majeures dans le respect des préconisations citées précédemment en termes de coordination du réaménagement avec l'exploitation et de remise en état du sol sera la **disponibilité d'engins adaptés**.

La coordination du réaménagement avec l'exploitation impose à l'exploitant de disposer d'un **moyen de transport des matériaux** de découverte décapés sélectivement (terre végétale et stériles de découverte) et des stériles de traitement (sables, graviers et fines de décantation) vers les zones en cours de réaménagement. Les chantiers alluvionnaires de type AEX en Guyane sont rarement équipés de tombereau ou dumper puisque le minerai extrait est traité directement après transport hydraulique. Certains exploitants utilisent de **petits tombereaux sur chenilles de type Crawler Morooka pouvant transporter une charge de 5 à 10 t** (*Cf. Figure 58*), notamment pour acheminer le carburant. Ce type d'engin pourrait être utilisé pour le transport des matériaux entre les zones d'extraction ou de stockage et les zones de remise en état.

Figure 58 : Exemple de tombereau sur chenilles parfois utilisé pour le transport du carburant ou de matériels divers

Les derniers horizons de sol remis en place (entre 1,25 et 1,50 m de profondeur) doivent être manipulés avec précaution, avec des **engins à basse pression au sol**. En France, le chiffre retenu dans la bibliographie est une **pression au sol maximale de 0,39 bar** pour une pelle hydraulique sur chenilles pouvant travailler en rétro sur le sol remis en place. Un document du PTMG compare les pressions au sol exercées par les engins miniers utilisés en Guyane. **Une pelle Hydraulique Hyundai de type Robex 210 ou 250 LC-9 équipée d'un patin de chenille de 800 mm de large** (souvent utilisée en Guyane) permet d'atteindre des pressions aux sols de l'ordre de 0,39 bar, voire moins.

Les bulldozers sont ainsi déconseillés car ils provoquent un tassement plus important du sol, ce qui participe à le déstructurer et défavorise la reprise de la végétation (cf Type de substrat et VI.3.3 Impact du type de réhabilitation sur l'évolution du fonctionnement biologique des sols au cours du temps). En effet, les bulldozers exercent une pression au sol allant de 0.61 à 0.66 bar. Notons que cette pression au sol diminue avec le poids de l'engin et la surface de contact au sol.

Les engins légers et utilisant des chenilles larges sont donc fortement conseillés lors de la réhabilitation des couches superficielles. Cette prescription s'applique évidemment pour les couches de terre végétale.

Le bulldozer peut être utilisé pour régaler les premiers horizons de remblais (horizon sablo-graveleux en sous-couche).

Si, seul un bulldozer est disponible pour le régalage des horizons superficiels du sol, il faudra étudier la possibilité de l'équiper d'un patin de chenilles plus large (800 à 1000 mm) ou d'utiliser les engins les plus légers (type D3 ou D4) pour limiter les tassements du sol. et **l'équiper d'un ripper pour décompacter** les zones remblayée et surtout le substratum en place avant régalage des derniers horizons de sol.

Figure 59 : Bulldozer équipé d'un ripper

L'acquisition de tracteurs agricoles montés sur chenilles et d'outils agricoles (charrue, machine à bêcher, sous-soleuse, benne à vérins) peut s'avérer moins coûteuse pour l'exploitant et utile pour le transport des matériaux de remise état et pour le travail du sol avant la plantation. Il est par ailleurs assez courant de trouver des tracteurs agricoles sur les sites miniers en Guyane.

Une **mutualisation des moyens alloués au réaménagement** (achat d'engins adéquats) **entre exploitants voisins ou avec des agriculteurs à proximité** peut être envisagée dans la mesure où les sites sont reliés par un réseau de pistes praticables et/ou accessibles depuis la route.

VII.4.4 Travail final du sol, préparation à la revégétalisation

A l'image de ce qui peut se faire en réaménagement de carrière en métropole, la qualité du sol peut être améliorée au travers d'une succession de travaux culturaux permettant l'amélioration des sols en limitant les intrants et les engrais artificiels et en favorisant des solutions intégrées.

La couche de surface des terrains remis en état peut faire l'objet de deux séquences successives :

- La première intervention est intitulée **préverdissement**. Les terres sont enherbées à partir d'herbacées légumineuses fixatrices d'azote (voir la liste des espèces recommandées au *Tableau 11*). La surface ainsi nivelée et enherbée n'est pas plantée ;
- La deuxième séquence intervient une fois que les surfaces réaménagées présentent une couverture herbacée conséquente. La couverture végétale est alors enfouie par un labour profond, voire un sous-solage enfouissement qui permettra en plus de décompacter les matériaux qui se seront "cimentés". Une **apport supplémentaire de matière organique** peut être effectué lors de cette étape. La matière végétale, notamment les légumineuses, enfouie dans le sol permet d'amorcer une amélioration de la structure du sol.

La répétition de ces travaux culturaux avec enfouissement de la couverture herbacée assure :

- un nivellement définitif des terrains ;
- le développement de la couverture herbacée limitant le ruissellement l'érosion ;
- un apport en matière organique et azote ;
- la préparation finale du sol avant la reforestation.

La **remise en état du sol** est l'une des étapes fondamentales du succès ou de l'échec d'un réaménagement, surtout pour un retour à l'état originel.

Le remblayage préalable du chantier d'extraction (reconstitution du sous-sol) pourra se faire à partir des stériles de traitement (graviers et fines de décantation).

La reconstitution de l'horizon minéral et de l'horizon organo-minéral supérieur (terre végétale) doit être effectuée avec le même soin en ce qui concerne **l'absence de compactage** des différentes couches remises en place :

- La terre végétale doit être manipulée autant que possible en **condition sèche** (en dessous de la limite de plasticité) ;
- Les engins transportant la terre doivent emprunter un circuit bien précis et ne pas rouler sur les zones remises en état ;
- La remise en place des terres doit être effectuée si possible avec **une pelle sur chenilles en reculant**.

Toute zone de compaction avant la plantation sera la cause d'une limitation de la zone de "prospection" des racines en créant une barrière physique à leur croissance.

Le sol avant mise en place de la plantation ne doit pas présenter de zone compactée dans ses deux premiers mètres. Un **sous-solage profond** (0,4 m) dans certains sols peut être efficace.

L'utilisation de fines de décantation en mélange à l'horizon minéral (par labour, sous-solage, bêchage, malaxage…) est à promouvoir **afin d'augmenter la capacité de réserve en eau utile** des sols.

La **préparation du sol et son amélioration** avant plantation peut faire intervenir, en plus du sous-solage :

- Un **apport de matière organique** : andains de débris végétaux issus du défrichement et préalablement broyés, compostés et/ou dégradés ;
- Un apport naturel d'azote par **enherbement à partir d'herbacées légumineuses fixatrices d'azote** et enfouissement de la couverture végétale une fois formée.

Il conviendra enfin de **privilégier la répartition des volumes disponibles de terres végétales sur les secteurs les plus défavorables à la reprise de la végétation** : plateforme latéritique du flat, zones terrassées de la base vie et des pistes, zones à argile lessivée ou hydromorphe, zone graveleuse…

VII.5 Bonnes pratiques et préconisations pour la revégétalisation

Un chapitre sur la revégétalisation est abordé ci-dessous. Cette étape participe en effet activement à la reprise de la végétation sur les sites dégradés que sont les mines alluvionnaires. Les questions de densité, de surface prioritaire, d'espèces adaptées sont abordées, cependant pour plus de précisions sur les techniques de productions végétales, il est conseillé de se reporter aux guides et livrets techniques déjà existants (Loubry, SOLICAZ,…) et de se rapprocher des structures proposant ce type de service (VERDAL REFORESTAGE, SOLICAZ, CEAX REAH, ….).

VII.5.1 Obligation

Le « Cahier des charges pour la réhabilitation des sites miniers alluvionnaires » rédigé par l'ONF impose la revégétalisation assistée de 30 % de la surface travaillée, ceci pour les exploitations dont les opérations de réhabilitation ont été réalisées suivant les directives de ce même cahier des charges. Pour les sites où la réhabilitation n'a pas été prise en compte dès la mise en œuvre du chantier d'exploitation, la surface à revégétaliser peut augmenter à 50 % des surfaces déforestées. L'objectif étant d'établir rapidement une couverture végétale sur les zones sensibles à l'érosion et d'aider la reprise de la végétation sur les zones les plus stériles.

Pour une moyenne de 20 hectares déforestés (100 mètres de large sur 2 km de linéaire de crique) par AEX, ce sont donc 5 hectares au minimum qui doivent faire l'objet d'une révégétalisation assistée pour un flat correctement réhabilité, et 10 hectares pour une exploitation présentant encore de nombreuses surfaces stériles après réhabilitation.

VII.5.2 Mise en œuvre

Cette phase de revégétalisation nécessite un savoir-faire et une expérience en production végétale en condition tropicale particulière. Plusieurs options s'offrent au minier quant à la réalisation de cette opération sensible. Il peut : soit internaliser la majeure partie ce cette phase, soit faire appel à un prestataire de service extérieur. Chaque scénario possède des avantages et inconvénients qui sont rappelés dans le tableau ci-après :

	Revégétalisation menée en interne	Révégétalisation par une structure externe
Avantages	- Maîtrise les coûts de production - Autonomie - Plants directement accessibles sur site - Adapté aux concessions	- Organisation du travail simplifiée - Produit clé en main - Pas d'infrastructure à mettre en œuvre - Intéressant pour les exploitations de type alluvionnaire
Contraintes	- Aléas de production - Moins bien adapté aux AEX -Forte implication de l'opérateur -Connaissances techniques poussées - Turn-over de la masse salariale	- Dépendance aux prestataires extérieurs -Logistique et une organisation bien maîtrisées - Difficile à réaliser sur sites isolés

Tableau 12 : Avantages et inconvénient de l'internalisation et de l'externalisation de la revégétalisation (Source : Etude GUYAFIX / SOLICAZ)

	Scénario 1	**Scénario 2**
Mode de gestion	Interne	Externe
Main d'œuvre annualisée (ETP)	0.91	0.63
Achats et Consommables	5 150 €	27 720 €
Charges externes	8 200 €	7 250 €
Charges salariales	19 628 €	13 440 €
Amortissements	6 160 €	0 €
Imprévus	2 000 €	2 000 €
Total (20ha)	41 138 €	56 598 €
Coût de revient (€/ha)	**2 057€/ha**	**2 830 €/ha**

Tableau 13 : tableau des coûts de revégétalisation à l'hectare selon l'entreprise maitrise d'œuvre (Source : Etude Guyafix / SOLICAZ)

Notons que l'entreprise Phytotrop donnait à titre indicatif des montants similaires pour la revégétalisation d'un site minier alluvionnaire avec achat du matériel végétal. (Loubry, 2004).

Dans tous les cas, il est important que le minier ait un « référent environnement » sur son chantier. Ce technicien sera responsable de la mise en applications et la coordination des différentes phases décrites dans la partie VII de ce présent rapport. Selon le niveau d'internalisation des opérations liées à la réhabilitation et la revégétalisation, le responsable environnement devra être formé aux différentes pratiques favorisant une reprise de la végétation (reconnaissance des espèces, conduite de la réhabilitation progressive, technique de mise en andain…).

Ce technicien pourra également être en charge d'autres problématiques environnementales liées aux activités aurifères (gestion des déchets et de l'eau, produit dangereux, …).

Les comptes rendus réguliers permettront à la DEAL d'avoir une certaine visibilité sur les pratiques environnementale des exploitants sur leur mine.

Un audit régulier de l'intégration des problématiques environnementales par l'opérateur minier lors des différentes phases peut également être réalisé par un bureau d'étude et de conseil.

VII.5.3 Réalisation de la phase de révégétalisation :

Priorisation des surfaces à végétalisées.

D'après les résultats des expertises menées ci-dessus, **les secteurs les moins propices à une reprise de la végétation** sont **les surfaces issues du processus d'extraction** de l'or **: les cônes sablo-gravillonnaires, les fines argileuses anoxiques et hydromorphes des bassins de décantation** et **les zones en eaux profondes.** C'est donc sur ces surfaces que les efforts de réhabilitation et de revégétalisation doivent être concentrés.

Du fait des fréquentes phases anoxiques lors des épisodes de hautes eaux, de la pauvreté du substrat et de la colonisation parfois rapide par de denses formations à herbacées (pouvant être bloquant pour l'installation des végétaux des strates supérieures), les fonds de bassins sont en effet des secteurs où la reprise de la végétation, tendant vers un retour au stade forestier, ne se fait que très lentement voire pas du tout.

Les cônes de graviers sont quant à eux des surfaces très contraignantes par leur absence d'éléments organiques ainsi que par leur faible capacité de rétention d'eau et les fortes températures en saison sèche. Le stress hydrique, associés à de faible ressource en éléments ne favorise pas l'installation spontanées des espèces pionnières.

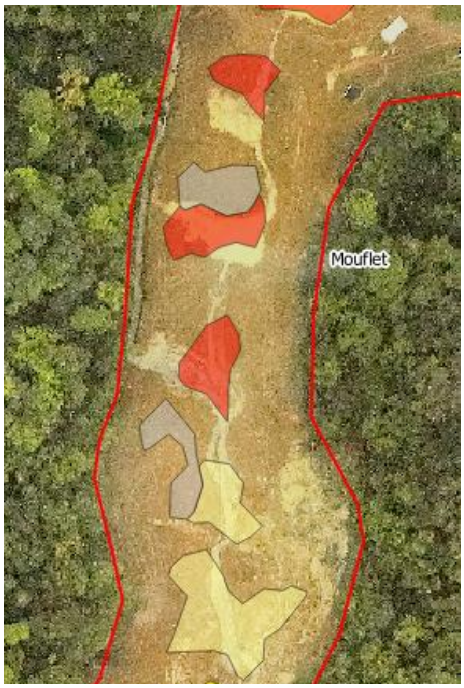


Figure 60 : Secteurs non régénérés en 2015, superposés à la photographie aérienne de 2008. Zones hydromorphes des fonds de bassins en herbacée (en jaune et rouge) et cône de graiver (en gris) sur Mouflet (site réhabilité).

A l'inverse, on s'attardera moins sur les surfaces argileuses en lisière forestière dont les capacités de retour spontané de la végétation ont été démontrées. De même, les zones où des andains ou de la terre végétale ont pu y être déposés ne sont pas des surfaces prioritaires pour la revégétalisation du site. Ce principe s'applique aussi, mais dans une moindre mesure, aux digues argileuses qui n'ont pas subi de lessivage lié au processus d'extraction aurifère. Pour ces digues, une stabilisation rapide du sol, par des herbacées légumineuses parait néanmoins indispensables avant leur régalage lors de la réhabilitation.

Densité

Des plantations en ligne avec un plant tous les deux mètres et un interligne de deux mètres également, selon une disposition en quinconce (soit une densité de 1 pied pour quatre mètres carrés), semble être un nombre minimal en matière de revégétalisation. A cette densité, cela fait 2500 plants par hectares. Il est donc nécessaire de produire 12 500 plants, pour une AEX de 20 hectares déforestés et revégétalisés à 25%.

Espèce

Le choix se portera sur des espèces répondant aux caractéristiques suivantes :

- héliophile, pour répondre aux contions environnentales régnant sur les sites miniers
- facilité de production en pépinière, pour permettre une multiplication aisée des espèces

- croissance rapide et faible exigence de sol, pour garantir le succès de développement recrer rapidement les conditions d'un milieu forestier
- présences en Guyane française, pour favoriser les espèces locales adaptées et favoriser les interactions écologiques

Parmi les espèces répondant à ces critères, les espèces fixatrices d'azote, permettant de restaurer une part de la fertilité du sol, seront utilisées de manière prioritaire.

Les différentes études et expérimentations de revégétalisation menées avec ces espèces montent des résultats très intéressants.

Chaque espèce a cependant des préférences pédologiques qui lui sont propres. Il est nécessaire les de respecter pour garantir un bon développement des plants.

D'autres espèces, adaptées aux sols et attractives pour la faune, doivent être incorporées à ces plantations de légumineuse afin de favoriser la dynamique de retour de la biodiversité.

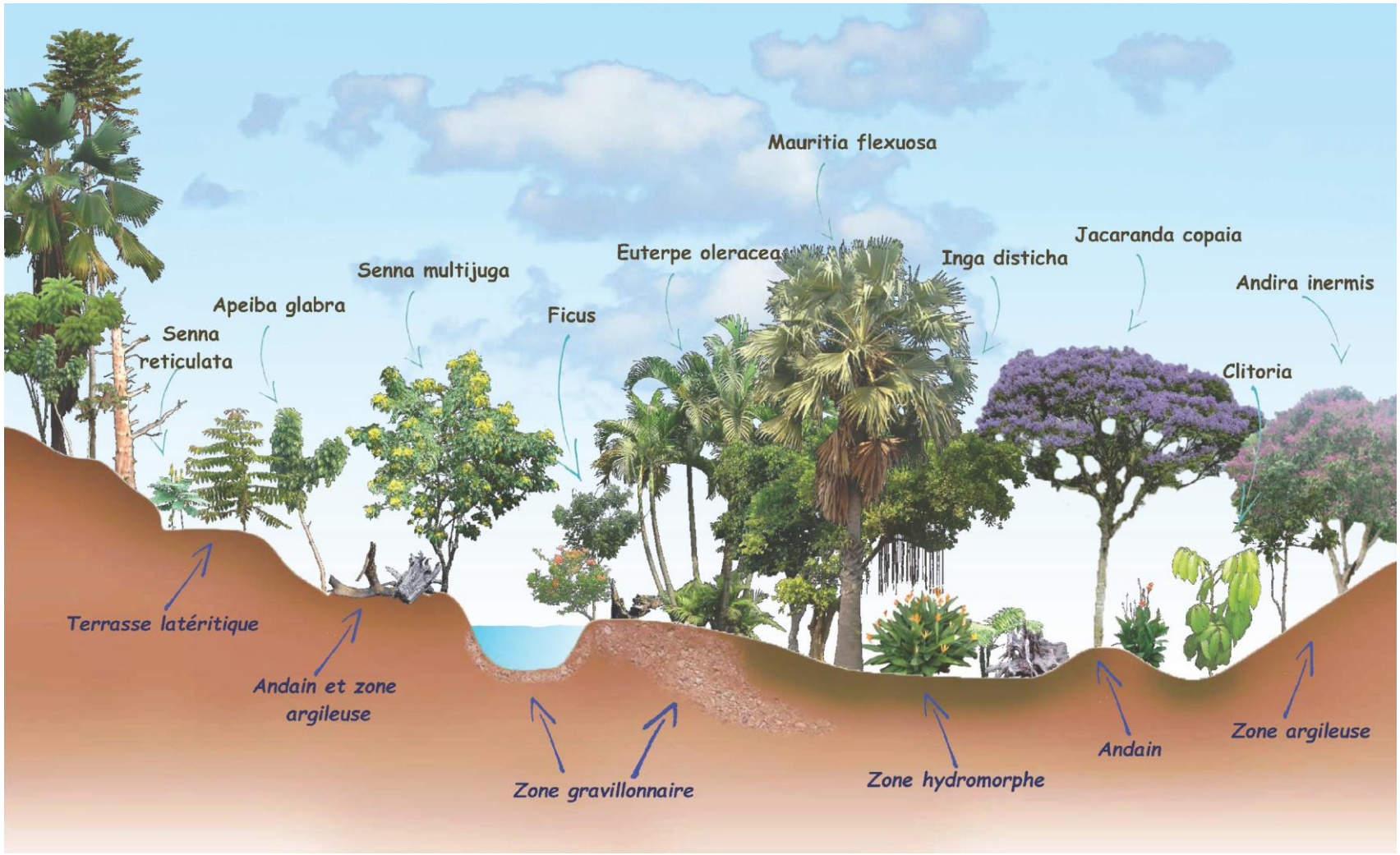


Figure 61 : Coupe de principe illustrant les différents substrats d'un site minier alluvionnaire réaménagé et la végétation associée

Tableau 13 : liste d'espèces utilisable pour la revégétalisation

Groupe & Famille	Espèces	Argile / terre ferme	Sable / Gravier filtrant	Zone hydromorphe	Milieu	Type	Priorité d'utilisation	Type de production	Fixateur d'azote	Intérêt	Source
DICOTYLEDONE Leguminosae-caesalpinioideae	***Senna reticulata***	x	x		Berge et zone hydromorphe	Arbre	**Forte**	Graine		Croissance rapide Autopropagation	Test favorable (CAEX, Loubry)
DICOTYLEDONE Leguminosae-faboideae	***Erythrina poeppigiana***			x	Berge et zone hydromorphe	Arbre	**Forte**	Graine et bouture	oui	Espèce adaptée aux zones hydromorphes	à tester (proposition Loubry et PTMG)
DICOTYLEDONE Leguminosae-faboideae	***Pterocarpus officinalis***			x	Berge et zone hydromorphe	Arbre	**Forte**	Graine	oui	Fixateur en zone hydromorphe	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Leguminosae-mimosoideae	***Inga disticha***			x	Berge et zone hydromorphe	Arbre	**Forte**	Graine	oui	Espèce adaptée aux zones hydromorphes	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Leguminosae-mimosoideae	***Inga vera***			x	Berge et zone hydromorphe	Arbuste	**Forte**	Graine	oui	Espèce adaptée aux zones hydromorphes	Observation terrain BIOTOPE
MONOCOTYLEDONE Arecaceae	***Euterpe oleracea***			x	Berge et zone hydromorphe	Palmier	**Forte**	Graine		Espèce attractive	Test favorable (Loubry, CAEX)
MONOCOTYLEDONE Arecaceae	***Mauritia flexuosa***			x	Berge et zone hydromorphe	Palmier	**Forte**	Graine		Espèce attractive	Test favorable (Boulanger)
DICOTYLEDONE Caryocaraceae	*Caryocar microcarpum*		x	x	Berge et zone hydromorphe	Arbre	Moyenne	Macrobouture		Espèce adaptée	Test favorable (Loubry)
DICOTYLEDONE Clusiaceae	*Mahurea palustris*			x	Berge et zone hydromorphe	Arbre	Moyenne	Bouture ?		Espèce adaptée	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Clusiaceae	*Symphonia globulifera*			x	Berge et zone hydromorphe	Arbre	Accessoire	Bouture		Espèce adaptée aux zones hydromorphes	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Leguminosae-caesalpinioideae	*Macrolobium bifolium*		x	x	Berge et zone hydromorphe	Arbre	Moyenne	Graine		Espèce adaptée aux zones hydromorphes	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Meliaceae	*Carapa procera*			x	Berge et zone hydromorphe	Arbre	Moyenne	Graine		Espèce adaptée aux zones hydromorphes	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Myristicaceae	*Virola surinamensis*			x	Berge et zone hydromorphe	Arbre	Moyenne	Graine		Espèce adaptée aux zones hydromorphes	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Sterculiaceae	*Theobroma cacao*	x		x	Berge et zone hydromorphe	Arbsute	Moyenne	Graine et bouture		Facilité de production	Observation terrain BIOTOPE
PTEROPHYTE Cyatheaceae	*Cyathea microdonta*			x	Berge et zone hydromorphe	Fougère	Accessoire	Spore		Biodiversité	Observation terrain BIOTOPE
MONOCOTYLEDONE Heliconiaceae	*Heliconia psittacorum*			x	Berge et zone hydromorphe	Herbacée	Moyenne	Séparation de rhizome		Fixation des fines Facilité de production	Observation terrain BIOTOPE

DICOTYLEDONE Leguminosae-caesalpinioideae	*Eperua rubiginosa*			x	Berge et zone hydromorphe	Arbre	Accessoire	Graine		Espèce adaptée aux zones hydromorphes	Proposition BIOTOPE
MONOCOTYLEDONE Costaceae	*Costus scaber*	x		x	Berge et zone hydromorphe	Herbacée	Accessoire	Séparation de rhizome		Biodiversité Facilité de production	Observation terrain BIOTOPE
MONOCOTYLEDONE Heliconiaceae	*Heliconia bihai*	x		x	Berge et zone hydromorphe	Herbacée	Accessoire	Séparation de rhizome		Biodiversité Facilité de production	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Anacardiaceae	*Tapirira guianensis*	x			Plate forme latéritique	Arbre	Moyenne	Graine		Espèce peu exigeante	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Humiriaceae	*Humiria balsamifera*	x	x		Plate forme latéritique et sable	Arbre	**Forte**	Graine / Bouture ?		Espèce très peu exigeante (Sable et latérite) Bonne croissance et autopropagation	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Clusiaceae	*Clusia nemorosa*	x	x		Plate forme latéritique et sable	Arbuste	Moyenne	Bouture		Espèce peu exigeante Espèce adaptée aux zones sableuses	Test favorable (Loubry)
PTEROPHYTE Gleicheniaceae	*Dicranopteris flexuosa*	x			Plate forme latéritique	Fougère	Moyenne	Spore		Espèce peu exigeante Recouvrement de sol	Test favorable (Agence Détails paysages)
DICOTYLEDONE Euphorbiaceae	*Hura crepitans*	x			Zone argileuse	Arbre	**Forte**	Graine et macrobouture		Croissance rapide	Test favorable (Agence Détails paysages)
DICOTYLEDONE Leguminosae-mimosoideae	***Inga edulis***	x	x		Zone argileuse	Arbre	**Forte**	Graine	oui	Croissance rapide	Test favorable (SOLICAZ, CAEX)
DICOTYLEDONE Leguminosae-mimosoideae	***Inga ingoïdes***	x	x		Zone argileuse	Arbre	**Forte**	Graine	oui	Croissance rapide	Test favorable (SOLICAZ, CAEX)
DICOTYLEDONE Leguminosae-mimosoideae	***Inga leiocalycina***	x		x	Zone argileuse	Arbre	**Forte**	Graine	oui	Croissance rapide	Test favorable (SOLICAZ)
DICOTYLEDONE Leguminosae-mimosoideae	***Inga macrophylla***	x			Zone argileuse	Arbre	**Forte**	Graine	oui	Croissance rapide	Test favorable (SOLICAZ)
DICOTYLEDONE Leguminosae-mimosoideae	***Inga pezizifera***	x			Zone argileuse	Arbre	**Forte**	Graine	oui	Croissance rapide	Test favorable (SOLICAZ)
DICOTYLEDONE Leguminosae-caesalpinioideae	***Senna multijuga***	x			Zone argileuse	Arbuste	**Forte**	Graine	?	Auto propagation	Test favorable (Miniers, CAEX, Loubry)
DICOTYLEDONE Anacardiaceae	*Spondias mombin*	x			Zone argileuse	Arbre	Moyenne	Graine		Espèce attractive	Test favorable (Loubry) mitigé (CAEX)
DICOTYLEDONE Bignoniaceae	*Jacaranda copaia*	x			Zone argileuse	Arbre	Moyenne	Macrobouture		biodiversité	Test favorable (Loubry) mitigé (CAEX)
DICOTYLEDONE Leguminosae-caesalpinioideae	*Dicorynia guianensis*	x			Zone argileuse	Arbre	Moyenne	Graine			Proposition VERDAL
DICOTYLEDONE Leguminosae-caesalpinioideae	*Eperua falcata*	x			Zone argileuse	Arbre	Accessoire	Graine			Proposition VERDAL
DICOTYLEDONE Leguminosae-caesalpinioideae	*Hymenea courbaril*	x			Zone argileuse	Arbre	Moyenne	Graine		biodiversité	Observation terrain BIOTOPE

DICOTYLEDONE Leguminosae-faboideae	*Andira inermis*	x			Zone argileuse	Arbre	Moyenne	Bouture	oui	Espèce peu exigeante	Test favorable (Loubry)
DICOTYLEDONE Tiliaceae	*Apeiba glabra*	x			Zone argileuse	Arbre	Moyenne	Graine		Espèce peu exigente	Test favorable (Agence Détails paysages)
DICOTYLEDONE Bixaceae	*Bixa orellana*	x			Zone argileuse	Arbuste	Moyenne	Graine		Facilité de production	Test favorable (CAEX)
DICOTYLEDONE Rubiaceae	*Gonzalagunia dicocca*	x			Zone argileuse	Arbuste	Accessoire	Bouture		Auto propagation Espèce très attractive	Observation terrain BIOTOPE
MONOCOTYLEDONE Arecaceae	*Attalea maripa*	x			Zone argileuse	Palmier	Moyenne	Graine		Espèce attractive	Test favorable pépiniériste
DICOTYLEDONE Bignoniaceae	*Tabebuia serratifolia*	x			Zone argileuse	Arbre	Accessoire	Graine		biodiversité	Test mitigé (CAEX)
DICOTYLEDONE Leguminosae-caesalpinioideae	*Dimorphandra polyandra*	x	x		Zone argileuse et sableuse	Arbre	**Forte**	Graine		Croissance rapide Espèce adaptée aux sables blancs	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Leguminosae-mimosoideae	***Inga thibaudiana***	x	x		Zone argileuse et sableuse	Arbre	**Forte**	Graine	oui	Croissance rapide	Test favorable (SOLICAZ, CAEX)
DICOTYLEDONE Moraceae	***Ficus spp.***	x	x		Zone argileuse et sableuse	Arbre	**Forte**	Macrobouture		Croissance rapide, peu exigeante Espèce très attractive	Test favorable (Loubry)
DICOTYLEDONE Leguminosae-caesalpinioideae	***Arachis pintoi***	x	x		Zone argileuse et sableuse	Herbacée	**Forte**	Graine	oui	Facilité de production Recouvrement de sol	Test favorable (Miniers, pépiniéristes)
DICOTYLEDONE Leguminosae-faboideae	***Aeschynomene spp.***	x	x		Zone argileuse et sableuse	Herbacée	**Forte**	Graine	oui	Facilité de production Recouvrement de sol	Test favorable (Miniers, Pépiniéristes)
DICOTYLEDONE Leguminosae-faboideae	***Crotalaria sp.***	x	x		Zone argileuse et sableuse	Herbacée	**Forte**	Graine	oui	Facilité de production Recouvrement de sol	Test favorable (Miniers, Loubry, CAEX,…)
DICOTYLEDONE Leguminosae-faboideae	*Clitoria fairchildiana*	x	x		Zone argileuse et sableuse	Arbre	Moyenne	Bouture	oui	Croissance rapide Facilité de production	Test favorable (Loubry, CAEX, SOLICAZ,...)
DICOTYLEDONE Melastomataceae	*Miconia racemosa*	x	x		Zone argileuse et sableuse	Arbuste	Moyenne	Graine		Espèce attractive Port arbustif	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Solanaceae	*Solanum subinerme*	x	x		Zone argileuse et sableuse	Arbuste	Accessoire	Graine		Espèce attractive Port arbustif	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Leguminosae-caesalpinioideae	***Chamaecrista sp.***		x	x	Zone sableuse à hydromorphe	Herbacée	**Forte**	Graine	oui	Facilité de production Espèce peu exigeante	Observation terrain BIOTOPE
DICOTYLEDONE Leguminosae-faboideae	***Sesbania exasperata***		x	x	Zone sableuse à hydromorphe	Herbacée	**Forte**	Graine	oui	Facilité de production Espèce peu exigeante	Test favorable (Miniers)
MONOCOTYLEDONE Arecaceae	***Elais oleifera***		x	x	Zone sableuse à hydromorphe	Palmier (protégé)	**Forte**	Graine		Facilité de production Espèce adaptée aux sables blancs	Observation terrain BIOTOPE, test favorable en agriculture
DICOTYLEDONE Chrysobalanaceae	*Parinari campestris*	x	x	x	Zone sableuse à hydromorphe	Arbre	Moyenne	Graine ?		Espèce peu exigeante (notamment sur sable hydromorphe)	Observation terrain BIOTOPE
MONOCOTYLEDONE Cyclanthaceae	*Cyclanthus bipartitus*		x	x	Zone sableuse à hydromorphe	Herbacée	Accessoire	Séparation de rhizome		Biodiversité Espèce adaptée	Observation terrain BIOTOPE

VII.5.4 Perspectives d'amélioration : nouvelles espèces et technique innovante :

En zone hydromorphe

L'utilisation d'espèces arborées adaptées aux zones hydromorphes argileuses des barranques semble nécessaire. L'espèce la plus prometteuse est le Moutouchi marécage (*Pterocarpus officinalis*), arbre typique des berges de rivières et des forêts inondables. Cette espèce s'avère être une légumineuse (Fabacée) fixatrice d'azote. Elle recolonise notamment des bas-fonds inondables très dégradés en bord de route. L'espèce a été retrouvée sur plusieurs sites miniers, se développant et se reproduisant spontanément.

Outre cette espèce, il existe des *Ingas* (*I. disticha* et *I. vera*) que l'on retrouve communément en bord de berge convexe des rivières et qui sont ainsi adaptés aux inondations fréquentes sur des sols chargés en limons. Toujours parmi les légumineuses, on retiendra aussi *Erythrina poeppigiana*, de nombreuses fois citée mais peu expérimentée.

Mahurea palustris, un arbuste fréquemment observés en fond de barranques, semble également intéressant à utiliser, au même titre que le Palmier bâche (*Mauritia fexuosa*) qui a déjà fait ces preuves sur ces zones hydromorphes dégradées.

En zone sablo-gravillonnaire

L'utilisation d'hydro-rétenteurs biophiles enrichis en éléments fertilisants équilibrés, un produit à base de cellulose végétale retenant l'eau dans des conditions climatiques sévères semble intéressant sur les secteurs à fort stress hydrique. Ce produit est incorporé directement dans le volume de terre à la plantation. Il garantit à la plante un accès prolongé à l'eau sans faire pourrir les racines durant leur premier stade développement et favorise par la suite leur développement. Cette technique innovante devrait pouvoir diminuer la mortalité des plantations durant la saison sèches sur les sols les plus xériques des sites miniers (zones gravillonnaires et sableuses).

VII.6 Tableau synthétique des prescriptions permettant de favoriser le retour de la végétation vers des formations végétales forestières

Tableau 14 Paramètres influençant sur la reprise de la végétation

Amélioration de la reprise de la végétation

site déjà dégradé par une ancienne exploitation	**Formation végétale initiale**	*site vierge*
faible	**Epaisseur de la couche humifère**	*épaisse*
faible	**Profondeur d'argile**	*épaisse*
non	**Faune disséminatrice**	*oui*
non	**Présence d'espèces fixatrices**	*oui*
large	**Largeur déforestée du flat**	*étroit*
anarchique	**Gestion et traitement des stocks d'argile, de sable et de terre végétale**	*réfléchie*
finale	**Programmation de la réhabilitation**	*progressive*
bulldozer	**Méthode de réhabilitation**	*pelle hydraulique*
forte	**Surfaces en eaux, hydromorphes ou sableuses en fin de réhabilitation**	*faible*
lente	**Etalement des andains**	*rapide*
non	**Plantation d'espèces adaptées, attractives et fixatrices d'azote**	*oui*
réduits	**Moyens humains, techniques et financiers mis à disposition**	*adaptés*

VIII. Conclusion et perspectives

Cette nouvelle campagne d'expertise de la reprise de la végétation sur le réseau de sites miniers alluvionnaires de référence en Guyane a permis le recueil d'une quantité importante de données.

La cartographie des végétations végétales effectuée sur des photographies aériennes prises à deux années différentes sur 11 sites miniers alluvionnaires vers Bélizon/Cacao (essentiellement en 2008 puis en 2015), et les relevés botaniques et de l'activité du sol sur des parcelles d'échantillonnage sur 6 de ces sites, ont rendu possible de nombreuses analyses diachroniques.

L'influence de plusieurs modalités comme la texture de sol (argileux ou gravillonnaire), le type réhabilitation (pelle hydraulique, bulldozer, absence de réhabilitation ou réhabilitation progressive) et de revégétalisation (assistée sans fixateur, assistée avec fixateurs, spontanée, avec andain) sur la reprise de la végétation et de l'activité du sol ont pu être étudiées à différents pas de temps.

Dans le but de donner une portée générique aux résultats, on s'est appliqué à évaluer, dans des conditions environnementales données et suivant le temps écoulé depuis la réhabilitation ou la fin d'exploitation, l'impact des modalités tout site confondu.

Vis-à-vis des surfaces régénérées par site, nous avons pu observer qu'une reprise rapide de la végétation s'effectue sur les sols les plus favorables durant toutes premières années après la réhabilitation. Cette vitesse de progression de la végétation ralenti ensuite progressivement au fil des années. Un effet « lisière », favorisant tant la qualité de la reprise de la végétation que la biomasse microbienne du sol, est perceptible sur les 20 premiers mètres bordant le massif forestier non impacté. Ainsi, les flats étroits restent préférables afin de permettre une cicatrisation plus rapide du site par l'avancé de ce bourrelet de régénération forestière.

Concernant la réhabilitation, l'étude de 2008 avait mis en évidence son importance pour accélérer la reprise de la végétation et le processus de vie dans le sol. La présente étude vient confirmer cela, en affirmant que, quel que soit la texture (argileux comme gravillonnaire), le sol récupère plus rapidement une partie de son fonctionnement biologique lorsque le site est réhabilité. L'étude de 2015 va plus loin en mettant en évidence l'effet de compaction du sol par le bulldozer et son impact négatif sur certains indicateurs botaniques ainsi que sur le fonctionnement des micro-organismes. En termes de réhabilitation, l'usage de la pelle ou en tout cas de méthodes entrainant le moins de compaction possible sont préférables au bulldozer. De même, la vitesse de recolonisation de la végétation est d'autant plus grande lors d'une réhabilitation progressive avec étalement des andains. Ces derniers permettant une amélioration de l'activité du sol et le passage rapide vers une formation végétale typique de la régénération forestière spontanée et naturelle.

Les inventaires botaniques à la parcelle ont permis de trouver des indicateurs sur le caractère régénéré des formations végétales présentes. D'après les observations et analyses, il s'avère qu'un seuil de 20% d'espèces non pionnières semble indiquer un peuplement en bonne voie pour évoluer vers une formation forestière diversifiée. De même, un taux de couverture arboré de +

de 50 % indique une fermeture du milieu suffisante pour limiter le développement des herbacées et avoir la possibilité d'évoluer vers un stade forestier.

Toutefois, quelle que soit la réhabilitation, 15 à 30 % des surfaces déforestées et exploitées peuvent restées non régénérées après plus de 11 ans. Les substrats issus du lavage de l'horizon aurifère, comme les cônes de gravier et les limons de fond de bassin, sont en effet peu propices à une régénération forestière spontanée et à une reprise de l'activité correcte du sol. Il en est de même pour les argiles pauvres (Kaolin) et celles soumises à une forte érosion. Bien qu'une fermeture progressive du milieu puisse s'effectuer sur les zones en eaux peu profonde, certaines reliques de barranques continuellement en eau se maintiennent également sans végétation. Les fonds de barranques persistent pour beaucoup avec une végétation essentiellement herbacée. Quant aux zones gravillonnaires, l'accès limité à l'eau rend contraignant le développement d'espèces arborées.

Enfin, le sol, même sur argile, semble ne jamais récupérer un fonctionnement égal à celui de la forêt, en particulier en ce qui concerne le cycle de l'azote. La présence d'arbres n'est ainsi pas pour autant signe d'un bon fonctionnement biologique du sol qui présente, malgré une réhabilitation soignée et même une revégétalisation assistée, un blocage du cycle de l'azote pouvant amener à terme à un ralentissement voire un blocage de la succession végétale. La réhabilitation seule rendra de ce fait difficile un retour au stade forestier.

Ainsi, le deuxième levier que possède l'opérateur minier, concerne la revégétalisation de son site après réhabilitation. Dans la mesure où l'obligation de revégétaliser ne porte que sur 30% de la surface totale, il est préférable de privilégier les zones qui ne pourront pas se régénérer sans intervention d'ingénierie. Cette étude nous a ainsi permis de tester les outils permettant un repérage précoce des zones non régénérables. Les seuils des valeurs des bio-indicateurs du sol qui enclenchent la régénération permettent de choisir, très rapidement après réhabilitation, les zones à revégétaliser en priorité.

Le choix des espèces est primordial quant à la réussite de cette phase de revégétalisation. L'utilisation d'espèces non adaptées aux sols, ou introduite n'accélère pas la reprise de la végétation et de l'activité du sol. Les indicateurs de régénération sont moins performants qu'avec une régénération spontanée. A terme (8 ans et plus), cette revégétalisation assistée peut même avoir un effet dépressif sur le sol. Ceci peut s'expliquer par le niveau d'exigence nutritive de ces plantes introduites par rapport à une végétation spontanée, plus adaptée au milieu très pauvre des sites après exploitation. Une compétition pour les nutriments, en particulier l'azote, premier élément de la vie après le carbone, s'installe entre le végétal et les microorganismes du sol et ces derniers se trouvent alors limités dans leur développement. De plus, les espèces introduites, plantées ou non de manière monospécifique, ne sont pas favorables à l'installation d'une strate arbustive ni au retour d'une biodiversité faunistique et floristique forestière.

Les seules espèces capables de lever le facteur limitant qu'est l'azote sont les espèces végétales fixatrices d'azote. Pour ce faire, celles-ci doivent avoir installé une symbiose avec des bactéries type Rhizobium (pour les légumineuses) seules, capables de transformer l'azote de l'air en azote métabolisable et introduire ainsi de l'azote exogène dans le milieu. Sans nodulation (site de la symbiose), l'espèce végétale se comportera comme n'importe quelle espèce vis-à-vis des réserves nutritives du sol.

Les espèces fixatrices d'azote nodulées permettent ainsi de lever la limitation du système sol/plante par l'azote qu'elles apportent et de restaurer dans un temps relativement court (6 ans) une grande partie des fonctions biologiques du sol. Le développement de ces plantes

indigènes (essentiellement du genre Inga, appelée aussi Poids sucrés) va permettre, via sa production de litière et de racines, d'enrichir le sol en matière organique à forte concentration en azote. Le milieu devient propice (présence de nutriments et ombrage) à l'installation d'autres espèces venant de la forêt avoisinante qui amorcent la succession végétale.

De nouvelles espèces végétales fixatrices d'azote, comme le Moutouchi marécage (*Pterocarpus officinalis)* sont ainsi proposées dans les recommandations techniques notamment pour combler le manque d'espèces opérationnelles pour les zones inondables. L'utilisation d'autres techniques innovantes, comme les hydro-rétenteurs d'eau employés dans le cadre de restauration de sites dégradés sur les substrats les plus secs comme les cônes de gravier, est également recommandée.

Les préconisations formulées vont dans le sens d'une prise en compte, dès les premières étapes d'installation de l'exploitation aurifère et de défrichement, de l'intérêt de valoriser la diversité végétale locale et la biomasse sur site pour les phases de réhabilitation et de revégétalisation. Ceci passe notamment par une gestion et un traitement réfléchi des stocks d'argile, de sable et de terre végétale, mais également par la mise à disposition de moyens techniques, humains et financiers adaptés. Des schémas de principe d'exploitation et de réhabilitation sont ainsi proposés.

Pour finir, il nous semble judicieux que cette expertise se poursuive sur tout ou une partie des sites miniers alluvionnaires de référence étudiés dans le cadre de cette expertise. Une nouvelle campagne de cartographie et d'analyse sur le terrain pourrait avoir lieu dans 7 à 8 ans, soit en 2023.

De même, au regard de l'intérêt grandissant des industriels pour l'extraction d'or primaire, il nous parait judicieux de transposer cette étude aux mines aurifères primaires dont les techniques de reconstitution de sol et de la végétation sont loin d'être maitrisés, du fait notamment de la forte problématique de l'érosion des sols sur les fosses et verses à stérile.

IX. Bibliographie

- Annen B. et al., 1991. Forêt et gravières : directives pour le reboisement des gravières désaffectées, FSK – Schweiz. Fachverband für San und Kies, Bern.
- Berry P., Holst B. et Kay Y., Flora of the Venezuelan Guyana,Missouri botanical garden press, 1998, vol 3 et 4.
- Billard A. 2010. Conduite et suivi de peuplement artificiel d'espèces végétales autochtones en Guyane. Exploitation minière et valorisation du patrimoine floristique de Guyane. CAEX REAH. 56p.
- Bruhier S., 1992. Méthodologie de réaménagement de carrière, stage d'étude ENGREF, Bureau d'études Pierre Blanc, ENGREF, Paris.
- CAEX REAH, 2010. Guide technique de revegetalisation. Extrait de document de travail Pépinière des mines. 19p.
- ECOFOG, 2016. http://mariwenn.ecofog.gf/00/Taxons.aspx
- FAO, 2001. Récupération des sites dégradés. Unasylva 207, Revue internationale des forêts et des industries forestières. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Vol. 52 2001/4. 66p.
- Fern K., 2016. Useful Tropical Plants Database. http://tropical.theferns.info/
- Herbier de Cayenne. 2016. IRD. http://publish.plantnet-project.org/project/caypub
- Loubry D., 2002. Livret technique pour la conduite de la revégétalisation sur les surfaces minières alluvionnaires de Guyane, IRD, 50 p.
- Loubry D., Livret sur la restauration des sites miniers, IRD.
- Loubry Dd., 2004. La revégétalisation des zones minières : le placer de la crique Verdun. -Rapport de synthèse des missions PHYTOTROP réalisées pour le compte de la société REXMA -. PHYTOTROP. 31p.
- Loureiro M. E., James E. K. & Franco. A. A., 1998. Nitrogen fixation by legumes in flooded regions. OECOLOGIA BRASILIENSIS. In Scarano, F. Ft. pp. 195-233.
- Loureiro M. F., James E.K, & Franco A. A., 1998. Nitrogen fixation by legumes in flooded regions. Pp 195-233.
- Nannipieri P., Kandeler E.K., Ruggiero P., 2002. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. In: Burns R.G., Dick R. (Eds.), Enzymes in the Environments. Marcel Dekker, New York, pp. 1–33.
- Nutman P. S., 2011. Symbiotic Nitrogen Fixation in Plants. Part of International Biological Programme Synthesis Series. 590p.
- Office National des Forêts de Guyane, Cahier des charges pour la réhabilitation des sites miniers alluvionnaires. 5p.
- Office National des Forêts de Guyane, ECOFOG, HYDRECO, 2009. Expertise minière Réseau de référence de sites désactivés. 178p.
- Paul G., 2015. « Sélection de plantes fixatrices d'azote endogènes de Guyane pour la restauration des sites dégradés ». Restitution finale. Projets GUYAFIX et MOM (2012-2015). Eutde menée par SOLICAZ. 58p.
- Pia Parolin P .,2005. Senna reticulata (Willd.) H. S. Irwin & Barneby (Fabaceae) as "pasture killer" ("matapasto") pioneer tree in Amazonian floodplains. Ecología Aplicada, 4 (1-2). pp 41-46.

- Pomel S. et Salomon J.N., La déforestation dans le monde tropical, Presse universitaire de Bordeaux, Collection Scieteren, 1998, 145 p.
- PTMG. 2013. Comparaison de pression au sol d'engins miniers utilisés en Guyane. 2p.
- Ritz K., Black H.I.J., Campbell C.D., Harris J.A., Wood C., 2009.Selecting biological indicators for monitoring soils: a framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. Ecological Indicators: 9, 1212–1221.
- Salomon L. et Miau D., 2006. Etude de faisabilité sur la création de la « Pépinière des Mines » pour un approvisionnement en végétaux adaptés à la revégétalisation de sites dégradés. CEAX REAH. 43p.
- Salomon, 2005. Problématique de l'érosion des terres en attente de réhabilitation sur les sites miniers - Cas concrets / Solutions / Expérimentation. Rapport de stage Licence pro environnement – CEAX REAH. 36p.
- Schimann H, Petitjean C, Guitet S, Reis T Domenach AM, Roggy JC. 2012. Microbial bioindicators of soil functioning after disturbance: the case of gold-mining in tropical forests of French Guiana. Ecological Indicators: 20, 34–41.
- Schimann H. 2005. Impact des perturbations liées à l'activité minière aurifère en Guyane sur l'évolution des communautés et fonctionnalités microbiennes d'un sol. Thèse Doctorat en Sciences forestières. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF). 98p.
- Schloter M., Dilly O., Munch J., 2003. Indicators for evaluating soil quality. Agric.Ecosyst. Environ.: 98, 255–262.
- Sylla E. S. N., 1996. Contribution à l'étude de la symbiose fixatrice d'azote chez Pterocarpus erinaceus Poir.(venn) et Pterocarpus lucens Lepr. Mémoire de Thèse. Université Cheikh Anta Diop De Dakar. ORSTOM. 109p.
- Tanguy JAFFRE T. et RIGAULT F., 1989. Recherches sur les possibilités d'implantation végétale sur sites miniers. ORSTOM, centre de Nouméa. Convention sciences de la vie – Botanique . N° 3, 23p.
- USDA, ARS, National Genetic Resources Program. 2016. Germplasm Resources Information Network - (GRIN) [Online Database]. National Germplasm Resources Laboratory, Beltsville, Maryland. URL: http://www.ars-grin.gov/~sbmljw/cgi-bin/taxnodul.pl?language=en
- Veasey E. A., et al.,1999. Early growth and seedling morphology of species of Sesbania Scop. (Leguminosae, robinieae). Scientia Agricola, 56(2), 329-335. https://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161999000200011
- Veazey E. A., 1999. Early growth and seedling morphology of species of Sesbania scop. (Leguminosae, Robinieae) Sci. agric. vol.56 n.2 Piracicaba.
- Weigel J., 2009. Diagnostic écologique et technique pour la révégétalisation sur la mine de Yaou, Auplata. Les jardins de la Comté. 10p.
- WIKIWATER : E55 - L'irrigation par hydrorétenteurs d'eau en cristaux polymères gonflants biologiques. http://wikiwater.fr/e55-l-irrigation-par.html

X. Liste des figures et schémas

TABLEAUX :

TABLEAU 1 : SYNTHESE DES DONNEES DES SITES MINIERS ETUDIES EN 2008 ET 2015 9
TABLEAU 2 : EVOLUTION DES BIO-INDICATEURS DU SOL (BIOMASSE MICROBIENNE, FONCTIONNEMENT DU CYCLE DU N ET NIVEAU DE DIVERSITE DES SOLS) MESURES SUR LES SITES EN 2008, PLUSIEURS ANNEES APRES EXPLOITATION (AGE) PAR RAPPORT A CEUX DE LA FORET DE REFERENCE ADJACENTE REPRESENTANT 100% DE L'ACTIVITE DU SITE (M2 C. PETITJEAN 2009) 15
TABLEAU 3 : TABLEAU SYNTHETIQUE LA TYPOLOGIQUE DES FORMATIONS VEGETALES EN FONCTION DE LA STRATE, DE LA REGENERATION ET DU TYPE DE VEGETATION. 19
TABLEAU 4 : % DES SURFACES REGENERES SUR LES DIFFERENTS SITES (SURFACES CUMULEES FR + PS + RG + FS), ET VITESSE DE PROGRESSION DES SURFACES REGENEREES. 42
TABLEAU 5 : LISTE DES 20 ESPECES VEGETALES LES PLUS SOUVENT INVENTORIEES 52
TABLEAU 6 : PROPORTION DES ESPECES PIONNIERES ET SECONDAIRES PAR TYPE DE PLANTES 52
TABLEAU 7 : INDICATEURS BOTANIQUES SELON L'ORIGINE DE LA VEGETATION. 60
TABLEAU 8: NOMBRE DE PRELEVEMENTS DE SOLS EFFECTUES ET ANALYSES PAR SITE ET TYPE DE FORMATION VEGETALE 65
TABLEAU 9: EVOLUTION DES BIO-INDICATEURS DU SOL (BIOMASSE MICROBIENNE, FONCTIONNEMENT DU CYCLE DU N ET NIVEAU DE DIVERSITE DES SOLS)DES SITES BOULANGER, YAONI ET GEORGEON, ENTRE 2008 ET 2015, EXPRIME EN POURCENTAGE DE RECUPERATION PAR RAPPORT A LA FORET DE REFERENCE. 70
TABLEAU 10 : TABLEAU RECAPITULATIF DE L'EFFET DU TYPE DE REHABILITATION EN FONCTION DE LA TEXTURE DU SOL RENCONTRE SUR SITE MINIER. 72
TABLEAU 11 : HERBACEES LEGUMINEUSES FIXATRICES D'AZOTE UTILISABLE DANS LE CADRE DU REAMENAGEMENT DES MINES EN GUYANE 96
TABLEAU 12 : LISTE D'ESPECES UTILISABLE POUR LA REVEGETALISATION 115
TABLEAU 13 : NOMBRE D'ESPECES PAR FAMILLE RECENSEES LORS DES INVENTAIRES A LA PARCELLE 130

ILLUSTRATIONS ET GRAPHIQUES :

FIGURE 1 : BARRANQUE EN EXPLOITATION SUR UN SITE MINIER ALLUVIONNAIRE. 3
FIGURE 2 : RAPPORT DE L'EXPERTISE MINIERE DE 2008 4
FIGURE 3 : PELLE HYDRAULIQUE EFFECTUANT DES TRAVAUX DE REHABILITATION 7
FIGURE 4 : LOCALISATION DES SITES ETUDIES EN 2008 OU 2015 8
FIGURE 5: RESULTATS D'ANALYSE DU FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DES SOLS LORS DE L'EXPERTISE DE 2008..... 16
FIGURE 6 (CI APRES) : EXTRAITS DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES CORRESPONDANT AU DIFFERENTES FORMATIONS VEGETALES 19
FIGURE 7 : GRILLE D'ECHANTILLONNAGE SUPERPOSEE A LA COUCHE « FORMATION VEGETATION 2015 » SUR YAONI 21
FIGURE 8 : GRAPHIQUE DES % DE SURFACE REGENEREE (EN % DE SURFACE CUMULEE DES FORMATIONS FR + PS + RG + FS + FD) PAR SITE ET SUIVANT L'AGE DE LEUR REHABILITATION. 42
FIGURE 9: VITESSE D'EVOLUTION DES FORMATIONS VEGETALES POUR LES SITES DE GEORGEON (9 ANS), GUADELOUPE (11 ANS), YAONI (8 ANS), MOUFLET (7 ANS) ET SMSE (3 ANS). 44
FIGURE 10 : EVOLUTION DES FORMATIONS VEGETALES ENTRE 2008 ET 2015, HORS SMSE ET GRAND YAONI. (GRAPHIQUE A LIRE EN COLONNE DE BAS EN HAUT). 45
FIGURE 11 : EVALUATION DE L'EFFET LISERE SUR LE SITE DE YAONI 47
FIGURE 12 : EVALUATION DE L'EFFET LISIERE SUR LE SITE DE MOUFLET 47
FIGURE 13 : EVOLUTION DE LA VEGETATION SELON LA REMISE EN ETAT DU SOL (DONNEE ISSUES DE MOULFET, SMSE ET YAONI) 48
FIGURE 14 : EVOLUTION DES ANDAINS ENTRE 2012 ET 2015 SUR LE SITE DE SMSE 48
FIGURE 15 : EVOLUTION DES ANDAINS ENTRE 2008 ET 2015 SUR LE SITE DE MOUFLET 48

FIGURE 16 : EVOLUTION DE LA VEGETATION SELON LE TYPE DE VEGETAUX PLANTES (DONNEES ISSUES DE BOULANGER, MOUFLET, SMSE ET YAONI) 49
FIGURE 17 : METHODOLOGIE D'INVENTAIRE BOTANIQUE A LA PARCELLE 51
FIGURE 18 : EVOLUTION DES INDICES DE COUVERTURE HERBACEE ET ARBOREE SELON LE TYPE DE FORMATION VEGETALE 53
FIGURE 20: EVOLUTION DES INDICES DE STRUCTURE ET DE DIVERSITE SELON LE TYPE DE FORMATION VEGETALE 54
FIGURE 20 : *PSYCHOTRIA RACEMOSA*, UNE ESPECE DE SOUS-BOIS APPARAISSANT AUX STADES REGENERES AVEC UN INDICE DE COUVERTURE ARBOREE ELEVE. 54
FIGURE 21 : EVOLUTION D'INDICATEURS SUR LA COMPOSITION ET LA STRUCTURE DES FORMATIONS VEGETALES SELON : L'AGE DE LA REHABILITATION (4 ; 8 ; 9 ; 11) ET LE TYPE DE REHABILITATION (B = BULL ; NR = NON REHABILITE ; P = PELLE) 55
FIGURE 22 : CAS DE FORMATION A HERBACEE PAUVRE AVEC UNE REGENERATION EN DEPERISSEMENT SUR SOL GRAVILLONNAIRE 56
FIGURE 23 : EVOLUTION DES INDICATEURS SELON LE TYPE DE SUBSTRAT (TOUTES PLACETTES CONFONDUES) 56
FIGURE 24 : RIPISYLVE ARBOREE EN BERGE ARGILEUSE A DROITE ET ZONE D'ATTERRISSEMENT INONDABLE COLONISEE PAR LES HERBACEE A GAUCHE 57
FIGURE 25 : EFFET DE LA DISTANCE A LA LISIERE FORESTIERE INTACTE SUR LA RICHESSE SPECIFIQUE ET LA PROPORTION D'ESPECES SECONDAIRES (SMSE, 2 ANS APRES REHABILITATION AVEC PELLE) 58
FIGURE 26 : EFFET DE LA DISTANCE A LA LISIERE FORESTIERE INTACTE SUR LA RICHESSE SPECIFIQUE ET LA PROPORTION D'ESPECES SECONDAIRES (TOUTES PARCELLES CONFONDUES). 58
FIGURE 27 : COMPARAISON DES INDICATEURS EN FONCTION DE LA PRESENCE D'ANDAIN AVEC UNE DISTANCE MAXIMALE A 50 METRES DE LA LISIERE, POUR LES SITES SMSE (3 ANS), MOUFLET (7 ANS) ET YAONI (8 ANS). 58
FIGURE 28 FORMATION A BOIS CANON ET ESPECES SECONDAIRES EN SOUS-BOIS, ISSUE DE L'ETALAGE D'ANDAIN 3 ANS AUPARAVANT. SMSE 59
FIGURE 29 : COMPARAISON DES INDICATEURS SELON L'ORIGINE DE LA VEGETATION (REHABILITATION AU BULLDOZER, SOL ARGILEUX, 9 ET 11 ANS APRES REHABILITATION), PLANTATION SANS FIXATEURS 59
FIGURE 30 : SOUS-BOIS PAUVRE SOUS UN PEUPLEMENT MONOSPECIFIQUE DENSE D'*ACACIA MANGIUM* 61
FIGURE 31 : PLANTATION NON FONCTIONNELLE D'ESPECE A CROISSANCE LENTE SUR SOL GRAVILLONNAIRE ET REHABILITE AU BULLDOZER 61
FIGURE 32 : PLANTATION AGEE DE 3 ANS D'*INGA PEZIZIFERA* INOCULES SUR SOL ARGILO-GRAVILLONNAIRE (SMSE) 61
FIGURE 33 : EFFET DE LA DISTANCE A LA LISIERE FORESTIERE INTACTE SUR LA RICHESSE SPECIFIQUE ET LA PROPORTION D'ESPECES SECONDAIRES (SMSE, 2 ANS APRES REHABILITATION AVEC PELLE) 63
FIGURE 34 :EFFET DE LA DISTANCE A LA LISIERE FORESTIERE INTACTE SUR LA RICHESSE SPECIFIQUE ET LA PROPORTION D'ESPECES SECONDAIRES (TOUTES PARCELLES CONFONDUES). 63
FIGURE 35 : MODALITES DE L'ETUDE 2015 63
FIGURE 36: COMPARAISON DES MOYENNES DES BIO-INDICATEURS, BIOMASSE MICROBIENNE (LOSANGE BLEU), FONCTIONNEMENT DU CYCLE DU N (CARRE ROUGE) ET DIVERSITE DE LA COMMUNAUTE MICROBIENNE DU SOL (TRIANGLE VERT), EXPRIMEES EN POURCENTAGE DE LA FORET DE REFERENCE SUR LE SITE BOULANGER. LES LETTRES "A" ET "B" MARQUENT LA DIFFERENCE SIGNIFICATIVE AU SEUIL 5%. 67
FIGURE 37: COMPARAISON DES MOYENNES DES ACTIVITES BIO-INDICATEURS, BIOMASSE MICROBIENNE (LOSANGE BLEU), FONCTIONNEMENT DU CYCLE DU N (CARRE ROUGE) ET DIVERSITE MICROBIENNE (TRIANGLE VERT), EXPRIMEES EN POURCENTAGE DE LA FORET DE REFERENCE SUR LE SITE YAONI. LES LETTRES "A" ET "B" MARQUENT LA DIFFERENCE SIGNIFICATIVE AU SEUIL 5%. 68
FIGURE 38: COMPARAISON DES MOYENNES DES BIO-INDICATEURS, BIOMASSE MICROBIENNE (LOSANGE BLEU), FONCTIONNEMENT DU CYCLE DU N (CARRE ROUGE) ET DIVERSITE MICROBIENNE (TRIANGLE VERT), EXPRIMEES EN POURCENTAGE DE LA FORET DE REFERENCE SUR LE SITE GEORGEON. LES LETTRES "A" ET "B" MARQUENT LA DIFFERENCE SIGNIFICATIVE AU SEUIL 5%. 69
FIGURE 39 : VALEURS BRUTES DES BIO-INDICATEURS DES SOLS (RESPIRATION (BIOMASSE MICROBIENNE), DENITRIFICATION (FONCTIONNEMENT DU CYCLE DU N), UN AN APRES REHABILITATION EN FONCTION DES MOYENS UTILISES : SANS REHABILITATION (TRIANGLE), BULLDOZER (CARRE) OU PELLE (LOSANGE). LES ANALYSES ONT ETE REALISEES SUR SOLS ARGILEUX (ROUGE) ET SUR SOLS GRAVILLONNAIRES (VIOLET). DES LETTRES DIFFERENTES MONTRENT, AU SEIN D'UN GRAPHIQUE, DES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES AU SEUIL 5%. SITES : SMSE, YAONI. 71
FIGURE 40 : VARIATION DES BIO-INDICATEURS (ACTIVITE RESPIRATOIRE (BIOMASSE MICROBIENNE) EN ABSCISSE ET DEA/SIR (DIVERSITE MICROBIENNE) EN ORDONNEE, VALEURS EN POURCENTAGE DU TEMOIN FORET NATURELLE SELON LES MODES DE REHABILITATIONS. 4 ANS (EN HAUT) ET 8 ANS (EN BAS) APRES REHABILITATION. EN NOIR: NON-REHABILITE, EN ROUGE: REHABILITATION AU BULLDOZER ET EN BLEU: REHABILITATION A LA PELLE. LES LIGNES EN POINTILLE INDIQUENT 100% DE RECUPERATION DES BIO-INDICATEURS PAR RAPPORT A LA

REFERENCE FORET. DES LETTRES DIFFERENTES MONTRENT DES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES AU SEUIL 5% (LETTRES LATINES POUR RESPIRATION, ROMAINES POUR DEA/SIR). SITES DE GRAND YAONI, BOULANGER, YAONI. GEORGEON. 73
FIGURE 41 : VARIATION DES BIO-INDICATEURS (ACTIVITE RESPIRATOIRE (BIOMASSE MICROBIENNE) EN ABSCISSE ET DEA/SIR (DIVERSITE MICROBIENNE) EN ORDONNEE, VALEURS EN POURCENTAGE DU TEMOIN FORET NATURELLE SELON LA PRESENCE OU NON D'ANDAIN. PLACETTES SUR SOL ARGILEUX SUR LE SITE DE MOUFLET A 7 ANS APRES REHABILITATION. EN ROUGE : SANS ANDAIN. EN NOIR : AVEC ANDAIN. 74
FIGURE 42 : VARIATION DES BIO-INDICATEURS (ACTIVITE RESPIRATOIRE (BIOMASSE MICROBIENNE) EN ABSCISSE ET DEA/SIR (DIVERSITE MICROBIENNE) EN ORDONNEE, VALEURS EN POURCENTAGE DU TEMOIN FORET NATURELLE SELON LE TYPE DE REVEGETALISATION. **4 ANS (CARRES)** ET **8 ANS** OU PLUS (**TRIANGLES**) APRES REHABILITATION. **EN VERT: REGENERATION SPONTANEE**, **EN MARRON : REGENERATION ASSISTEE (ARBRES NON-FIXATEURS**). LES LIGNES EN POINTILLE INDIQUENT 100% DE RECUPERATION DES BIO INDICATEURS PAR RAPPORT A LA REFERENCE FORET. DES LETTRES DIFFERENTES MONTRENT DES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES AU SEUIL 5% (LETTRES LATINES POUR RESPIRATION, ROMAINES POUR DEA/SIR). SITES DE GRAND YAONI ET BOULANGER..... 75
FIGURE 43 : VARIATION DES BIO-INDICATEURS (ACTIVITE RESPIRATOIRE EN ABSCISSE ET DEA/SIR EN ORDONNEE, VALEURS EN POURCENTAGE DU TEMOIN) DANS LE TEMPS (0,5, 2, 3 ET 6 ANS) AVEC L'UTILISATION DE PLANTES FIXATRICES D'AZOTE SUR SITES ARGILEUX REHABILITES A LA PELLE. LES LIGNES EN POINTILLE INDIQUENT LE NIVEAU DES ACTIVITES BIOLOGIQUE EN ECOSYSTEME FORESTIER. DES LETTRES DIFFERENTES MONTRENT DES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES AU SEUIL 5% (LETTRES LATINES POUR RESPIRATION, ROMAINES POUR DEA/SIR). SITES DE SMSE ET BOULANGER..... 77
FIGURE 44 : EFFET DE LA PROXIMITE DE LA FORET AVOISINANTE SUR LES BIO-INDICATEURS DU SOL (EN POURCENTAGE DE LA VALEUR FORET CORRESPONDANTE) AVEC VISUALISATION DE LA COURBE DE TENDANCE. SITE DE SMSE, 2 ANS APRES REHABILITATION A LA PELLE. CE JEU DE DONNEES A ETE CHOISI CAR IL PRESENTAIT UNE LARGE GAMME DE DISTANCE A LA FORET (DE 20 A 120 M)..... 78
FIGURE 45 **:** VARIATION DES BIO-INDICATEURS (ACTIVITE RESPIRATOIRE (BIOMASSE MICROBIENNE), ACTIVITE DENITRIFIANTE (CYCLE DE L'AZOTE) ET DEA/SIR (DIVERSITE MICROBIENNE) ; VALEURS EN POURCENTAGE DU TEMOIN FORET CORRESPONDANT) SUR LES SOLS NON-REGENERES DE 2008 QUI SONT SOIT RESTES NON-REGENERES EN 2015 OU QUI SE SONT REGENERES EN 2015. DES LETTRES DIFFERENTES MONTRENT DES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES AU SEUIL 5%. SITES DE BOULANGER, YAONI ET GEORGEON..... 80
FIGURE 46 **:** VARIATION DES BIO-INDICATEURS (ACTIVITE RESPIRATOIRE EN ABSCISSE ET DEA/SIR EN ORDONNEE, VALEURS EN POURCENTAGE DU TEMOIN) SUR LES MEMES PLACETTES EN 2008 (PLACETTES NON-REGENEREES, EN VERT) ET EN 2015 (PLACETTES QUI SE SONT REGENEREES, EN ORANGE). LES LIGNES EN POINTILLE INDIQUENT LE NIVEAU DES ACTIVITES BIOLOGIQUE EN ECOSYSTEME FORESTIER. DES LETTRES DIFFERENTES MONTRENT DES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES AU SEUIL 5% (LETTRES LATINES POUR RESPIRATION, ROMAINES POUR DEA/SIR). SITES DE BOULANGER, GEORGEON ET YAONI. 81
FIGURE 47 :EXEMPLE DE PLANIFICATION CONCEPTUELLE D'UNE EXPLOITATION AVEC REAMENAGEMENT COORDONNE POUR LIMITER LES MOUVEMENTS DE MATERIAUX LIES AU REAMENAGEMENT, CAS D'UN CHANTIER ALLUVIONNAIRE SUR FLAT LARGE 86
FIGURE 48 :EXEMPLE DE REAMENAGEMENT COORDONNE POSSIBLE DANS LE CAS D'UN CHANTIER ALLUVIONNAIRE SUR FLAT ETROIT..... 88
FIGURE 49 :ORGANISATION GENERALE D'UN CHANTIER ALLUVIONNAIRE (D'APRES PTMG)..... 89
FIGURE 50 :ILLUSTRATION DE LA COORDINATION ENTRE L'EXPLOITATION ET LE REAMENAGEMENT SUR UN CHANTIER ALLUVIONNAIRE TYPE 90
FIGURE 51 :PLAN TYPE D'UNE PEPINIERE (SOURCE : GEOPLUSENVIRONNEMENT) 92
FIGURE 52 : PEPINIERE SUR SITE (CREDIT PHOTO SOLICAZ)..... 92
FIGURE 53 : PLANTULES D'EPERUA GRANDIFLORA SOUS UN SEMENCIER EN BORD DE PISTE. 93
FIGURE 54 :CONDITIONS OPTIMALES DE STOCKAGE DE L'HORIZON SUPERFICIEL DU SOL 94
FIGURE 55 :SCHEMA DE PRINCIPE DU DECAPAGE SELECTIF ET DE LA REMISE EN PLACE DES DIFFERENTS HORIZONS DU SOL ET DU SOUS-SOL..... 97
FIGURE 56 :ILLUSTRATION DES DIFFERENTES ETAPES DE TERRASSEMENT LORS DE LA REMISE EN ETAT DES SOLS SUR UN CHANTIER ALLUVIONNAIRE 102
FIGURE 57 :SCHEMA DE REGALAGE DE LA TERRE VEGETALE 104
FIGURE 58 :EXEMPLE DE TOMBEREAU SUR CHENILLES PARFOIS UTILISE POUR LE TRANSPORT DU CARBURANT OU DE MATERIELS DIVERS..... 105
FIGURE 59 :BULLDOZER EQUIPE D'UN RIPPER 106
FIGURE 60 : SECTEURS NON REGENERES EN 2015, SUPERPOSES A LA PHOTOGRAPHIE AERIENNE DE 2008. ZONES HYDROMORPHES DES FONDS DE BASSINS EN HERBACEE (EN JAUNE ET ROUGE) ET CONE DE GRAIVER (EN GRIS) SUR MOUFLET (SITE REHABILITE)..... 112

FIGURE 61 :COUPE DE PRINCIPE ILLUSTRANT LES DIFFERENTS SUBSTRATS D'UN SITE MINIER ALLUVIONNAIRE REAMENAGE ET LA VEGETATION ASSOCIEE 114
FIGURE 62 : SCHEMA DE LA REGENERATION FORESTIERE APRES LA CHUTE D'UN ARBRE (CHABLIS) PAR CHARLES-DOMINIQUE, 1989. LE POTENTIEL EDAPHIQUE (STOCK DE GRAINE EN GERMINATION ↑), DE POTENTIEL EXTERIEUR (PLUIE DE GRAINE GENEREE PAR LES VERTEBRES FRUGIVORES) ET LE POTENTIEL VEGETATIF (⬅) ASSURENT LA FERMETURE DE LA TROUEE. 128
FIGURE 63 : VALEURS DES ACTIVITES BIOLOGIQUES DES SOLS (RESPIRATION, DENITRIFICATION ET DEA/SIR) DES TEMOINS FORET SUR CHAQUE SITE D'ETUDE. DES LETTRES DIFFERENTES MONTRENT, AU SEIN D'UN GRAPHIQUE, DES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES AU SEUIL 5%. SITES : SMSE : SOCIETE MINIERE DE SAINT-ELIE, BOU : BOULANGER, G-YAO : GRAND-YAONI, MOU : MOUFLET, GEO : GEORGEON, YAO : YAONI. LA DATE DE PRELEVEMENTS DES SOLS EST EGALEMENT PRECISEE. 129

XI. Annexe

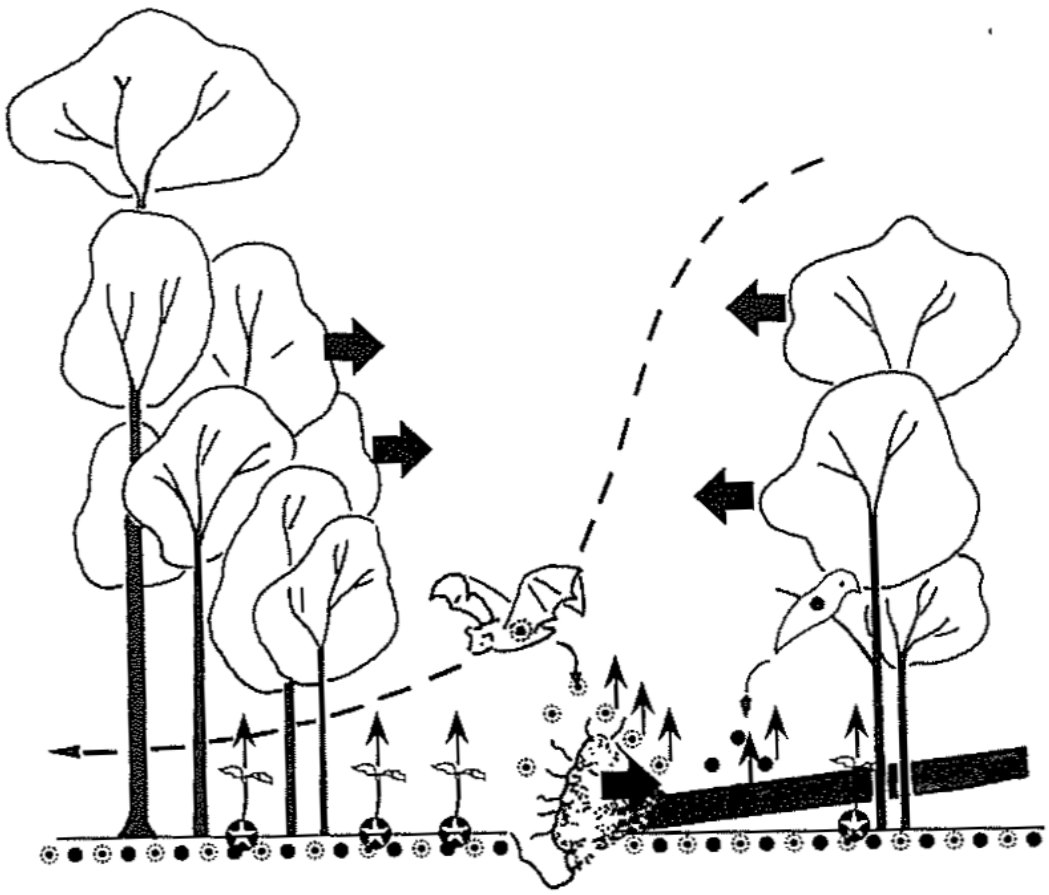


Figure 62 : Schéma de la régénération forestière spontanée après la chute d'un arbre (chablis) par Charles-Dominique, 1989. Le potentiel édaphique (stock de graine en germination ↑), de potentiel extérieur (pluie de graine générée par les vertébrés frugivores) et le potentiel végétatif (⬅) assurent la fermeture de la trouée.

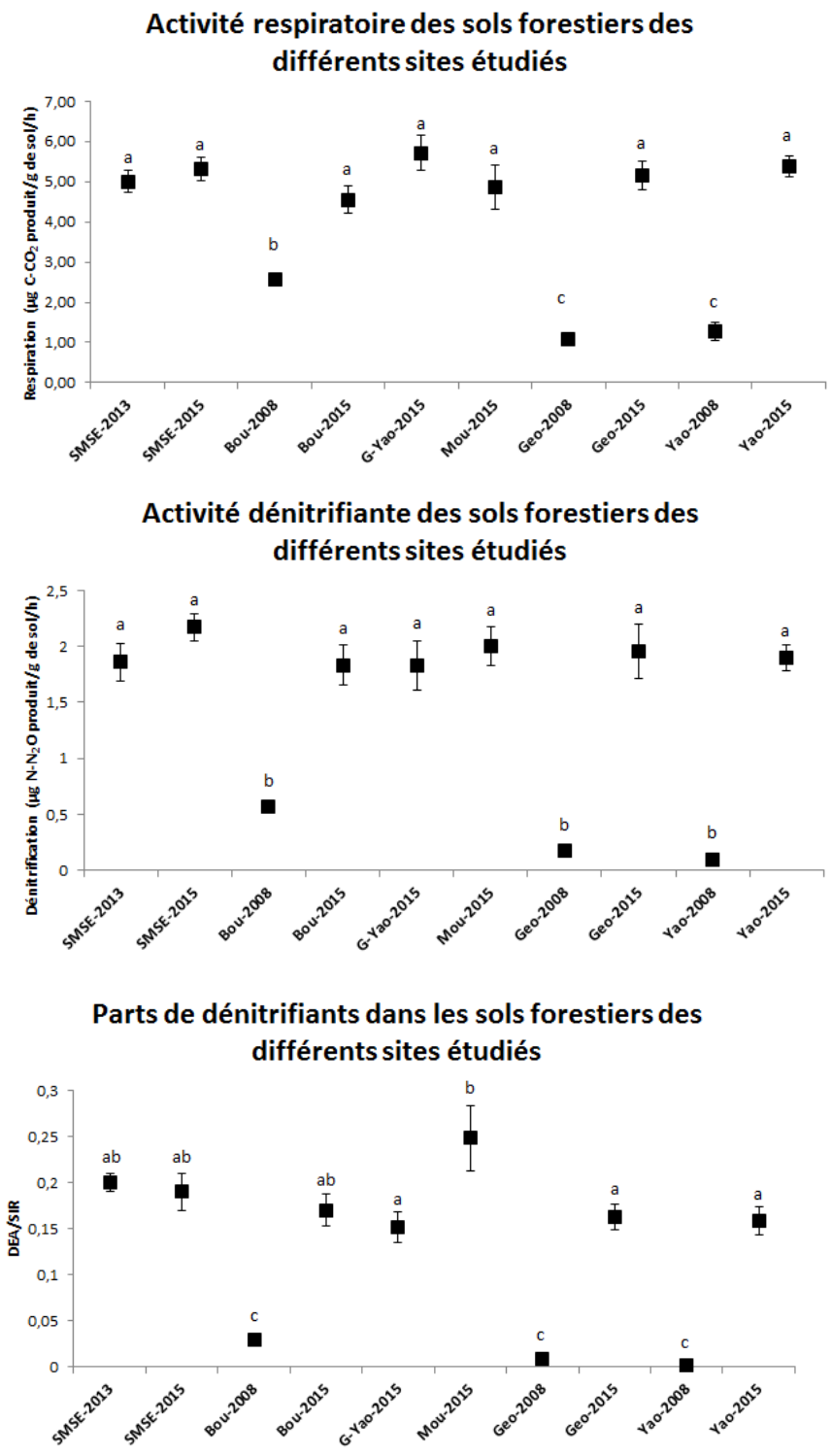


Figure 63 : valeurs des activités biologiques des sols (respiration, dénitrification et DEA/SIR) des témoins Forêt sur chaque site d'étude. Des lettres différentes montrent, au sein d'un graphique, des différences significatives au seuil 5%. Sites : SMSE : Société minière de Saint-Elie, Bou : Boulanger, G-Yao : Grand-Yaoni, Mou : Mouflet, Geo : Georgeon, Yao : Yaoni. La date de prélèvements des sols est également précisée.

Tableau 15 : Nombre d'espèces par famille recensées lors des inventaires à la parcelle

Famille	Espèces
LEGUMINOSAE-CAESALPINIOIDEAE	11
LEGUMINOSAE-MIMOSOIDEAE	10
MELASTOMATACEAE	10
ARACEAE	8
LEGUMINOSAE-FABOIDEAE	8
RUBIACEAE	8
CLUSIACEAE	6
CYPERACEAE	6
POACEAE	6
BIGNONIACEAE	5
ARECACEAE	4
EUPHORBIACEAE	4
CECROPIACEAE	3
HELICONIACEAE	3
MARANTACEAE	3
MORACEAE	3
SOLANACEAE	3
ADIANTACEAE	2
BROMELIACEAE	2
COMPOSITAE	2
COSTACEAE	2
CYATHEACEAE	2
CYCLANTHACEAE	2
MYRISTICACEAE	2
PIPERACEAE	2
PTERIDACEAE	2
TILIACEAE	2
VERBENACEAE	2
ANACARDIACEAE	1
ANNONACEAE	1
ARALIACEAE	1
BIXACEAE	1
BLECHNACEAE	1
BOMBACACEAE	1
BORAGINACEAE	1
CELASTRACEAE	1
COMBRETACEAE	1
CUCURBITACEAE	1
DILLENIACEAE	1
ELAEOCARPACEAE	1
FLACOURTIACEAE	1
GENTIANACEAE	1
GLEICHENIACEAE	1
LAURACEAE	1
LOGANIACEAE	1
LOMARIOPSIDACEAE	1
LORANTHACEAE	1
LYCOPODIACEAE	1
MALPIGHIACEAE	1
MARCGRAVIACEAE	1
MELIACEAE	1
ONAGRACEAE	1
ORCHIDACEAE	1
PASSIFLORACEAE	1
POLYPODIACEAE	1
RAPATEACEAE	1
RUTACEAE	1
SAPOTACEAE	1
SELAGINELLACEAE	1
SIMAROUBACEAE	1
SMILACACEAE	1
STRELITZIACEAE	1
THELYPTERIDACEAE	1
ULMACEAE	1
ZINGIBERACEAE	1
Total général	161