

Chapitre 18

Afforestation en lisière du corridor de Fianarantsoa (Madagascar) : un puits de carbone potentiel ?

Razafindramanana N., Serpantié G., Carrière S., Razafindrakoto M.A., Blanchart E. & Albrecht A.

Résumé : L'afforestation est une pratique préconisée par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat pour limiter la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique. Cette pratique d'aménagement fait l'objet de la présente étude menée en lisière ouest du corridor forestier de Fianarantsoa (Madagascar), une zone de savane des Hautes Terres relativement humide. En vue d'évaluer son intérêt en matière de stockage de carbone, quatre systèmes ont été étudiés : la savane à *Aristida similis*, considérée comme témoin, les plantations sur savane de *Pinus patula* et d'*Eucalyptus robusta*, et une culture vivrière temporaire sur savane. Le stock de carbone dans la biomasse a été évalué à partir de la conversion de la matière sèche ou du volume de bois de l'arbre en stock de carbone. Le stock de carbone dans le sol a été établi après analyses chimiques d'échantillons de sols recueillis dans la couche de 0 à 40 cm. Des inventaires floristiques ont été également réalisés dans le but de caractériser chaque système étudié.

Le témoin est une savane herbeuse (ou pseudo-steppe) pâturée et brûlée tous les 3 ans, dont le stock de C du sol est de 97,5 MgC.ha⁻¹. Les changements d'utilisations de cette savane par afforestation ou culture temporaire, diminuent le stock de carbone dans le sol. Le stock passe à 81,0 MgC.ha⁻¹ sous pin. En revanche, l'afforestation augmente le stock de carbone contenu dans la biomasse aérienne (de 4,9 MgC.ha⁻¹ pour la savane à 42,2 MgC.ha⁻¹ pour la plantation de pins déjà en grande partie exploitée et possédant un recrû de sous-bois). L'afforestation dans la situation étudiée permet donc un stockage de carbone mais moins important que prévu, du fait de la teneur élevée en carbone du sol de la savane étudiée et de la forte minéralisation de réserves en matière organique du sol sous le pin et l'eucalyptus. Il ressort aussi de l'étude qu'il existe des facteurs déterminants du stock de carbone : la texture du sol, le pédoclimat, et le mode de gestion du peuplement forestier.

Mots-clés : Biomasse, eucalyptus, pin, savane, sol, stock de carbone

Introduction

Une hausse de la température enregistrée au niveau du globe terrestre s'est révélée après la révolution industrielle (OMM, 2003). Elle est à l'origine d'un changement climatique dont les conséquences pourront être désastreuses : augmentation du niveau de la mer, sécheresse, inondation, perte de biodiversité, catastrophes naturelles etc. (IPCC., 2001). Cette hausse est liée à la modification de la composition atmosphérique, essentiellement l'augmentation de la concentration de l'air en gaz à effet de serre (GES), et en particulier le dioxyde de carbone (CO₂).

Face à cette situation, dans le but de limiter la quantité du dioxyde de carbone atmosphérique, une série de moyens a été avancée : (1) la réduction de la consommation d'énergie fossile ; (2) le développement de l'utilisation des sources d'énergie pauvres en carbone, et (3) le développement des " puits " de GES (IPCC., 2001). La dernière alternative fait l'objet de la présente étude, menée vers Fianarantsoa, sur l'effet de l'afforestation en matière de stockage de carbone. Les objectifs de cette recherche sont d'évaluer la différenciation du stockage de carbone dans la biomasse et le sol entre quatre écosystèmes, à savoir les plantations de pins et d'eucalyptus, la culture vivrière et la savane herbeuse pâturée considérée comme témoin puisqu'elle a précédé les formes actuelles d'utilisation du milieu étudié.

Matériels et méthodes

Sites d'étude

L'étude a été menée sur les Hautes Terres malgaches, dans la région de la Haute-Matsiatra, Sous-préfecture de Fianarantsoa II, Commune Rurale (CR) d'Androy, à 35 km au nord-est de Fianarantsoa (Figure 37). Le climat y est de type tropical d'altitude caractérisé par un hiver frais et une saison sèche atténuée par des brouillards. La précipitation annuelle est de 1500 mm. La température moyenne annuelle est de 20 C. Les sols sont de type ferrallitique. Après une étude cartographique et des enquêtes auprès de la population locale, deux sites d'études ont été retenus, situés respectivement à :

- SITE 1 Ambalavao Sud, site plus proche de la lisière forestière, et
- SITE 2 Andranolava, situé à 10 km d'Ambalavao.

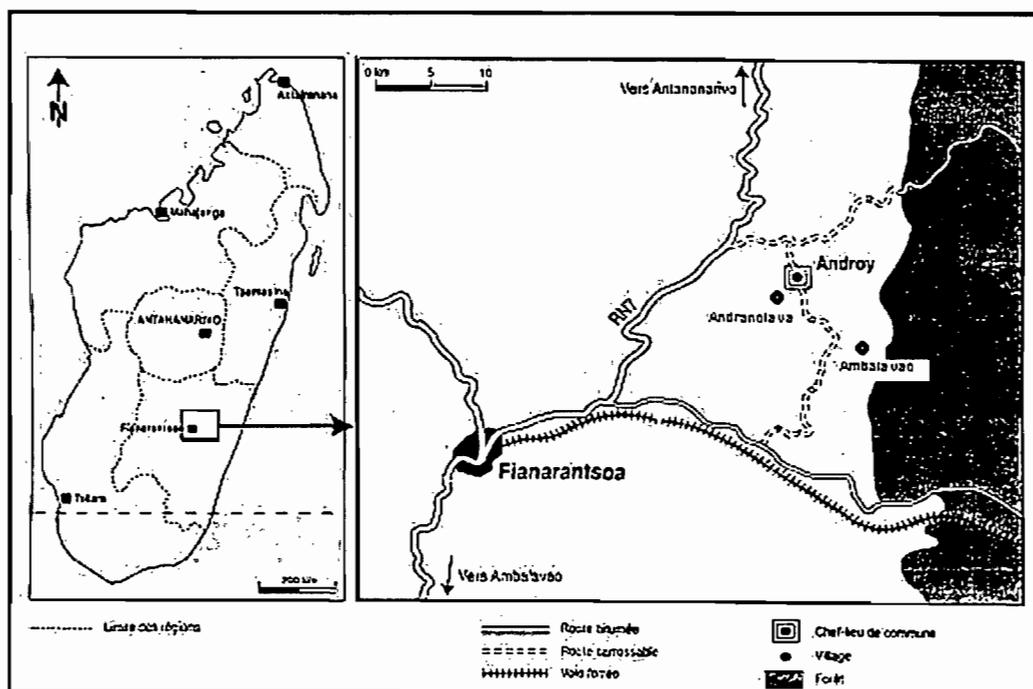


Figure 37. Carte de localisation du site d'étude

Sur chaque site, des parcelles d'environ un hectare, proches les unes des autres et reconnues comme ayant des sols comparables par une reconnaissance pédologique (profils et sondages à la tarière) portent les différents traitements étudiés :

Site 1 : Traitements : savane à *kifafa* (ou pseudo-steppe à *Aristida similis* " 1K " ; pin exploité avec sous bois " 1P ", planté sur savane vers 1970.

Site 2 : Traitements : savane à *kifafa* " 2K ", pin exploité avec recrû de pin " 2P ", taillis d'eucalyptus " 2E ", culture temporaire de manioc labourée " 2C "

Chaque parcelle est composée de six stations jointives (Figure 38). Chaque station est caractérisée par cinq placettes de prélèvements de biomasses et un profil de sol pour prélever les échantillons nécessaires aux différentes analyses en laboratoire.

coupe (DHC) et la hauteur totale de l'arbre. Ces mesures ont été employées pour évaluer le volume de bois du peuplement de pins avant et après exploitation, car la plantation de pins est en partie exploitée. Le volume est utilisé ultérieurement pour estimer le stock de carbone. La méthodologie utilisée pour estimer la quantité de la biomasse aérienne du traitement eucalyptus était proche de celle développée pour le traitement " pin ", mais dans un rayon de 7 m au lieu de 15 m.

La méthode de carottage a été adoptée pour évaluer la biomasse des racines fines de diamètre inférieur à 5 mm. La procédure consiste à prélever une carotte de sol-racines près du centre de la placette jusqu'à 40 cm de profondeur à l'aide d'une sonde. La séparation du sol-racines se fait par tamisage. Pour les racines supérieures à 5 mm, leur répartition hétérogène oblige à associer plusieurs méthodes : l'extraction de racines sur des monolithes consistant à extraire au centre de la placette un bloc de terre (0,25 x 0,25) m² jusqu'à 40 cm de profondeur. Sur le terrain s'effectue la séparation de sol-racine par lavage et tamisage. Une modélisation de la répartition racinaire dans l'espace vise à parfaire l'estimation de la biomasse de racines sachant qu'elles se distribuent en fonction de la distance au centre des souches. Pour les racines les plus proches des troncs, le dessouchage de deux arbres a permis d'extraire toutes les racines sur un rayon de 1 m à partir du centre de la souche jusqu'à 40 cm de profondeur. Puis on a séparé les racines de la terre, nettoyé à sec les racines, pesé le poids total de racines fraîches, et pris un échantillon pour étuvage. La quantité de C contenue dans la biomasse épigée et hypogée est estimée sachant que la quantité standard de carbone dans la biomasse correspond en moyenne à la moitié de son poids sec (Young, 1990).

Pour les biomasses aériennes de pins et d'eucalyptus, la formule proposée par Dewar et Cannel (1991) a été employée : $St = V \cdot d \cdot f_c$ avec St : le stock de carbone (MgC.ha⁻¹), V : le volume de la biomasse (m³), d : l'infra densité moyenne du tronc d'arbres, exprimée en Mg.m⁻³. Cette infra densité varie suivant les espèces, passant de 0,5 Mg.m⁻³ pour *Pinus patula* à 0,83 Mg.m⁻³ pour *Eucalyptus robusta* (Gueneau & Gueneau, 1969, Rakotovo du DRFP com.pers ;) et f_c : la fraction moyenne de carbone dans la biomasse sèche égale à 0,5. Selon Pearson & Brown (2005), le pourcentage de branches représente 15 et 20% de la biomasse épigée. Le pourcentage de feuilles est de l'ordre de 5 à 6% de la biomasse épigée (cas des conifères et des arbres à bois tendre), et de 2 à 3% pour les essences à bois dur (cas de l'eucalyptus).

Sol

Les échantillons du sol sont prélevés à l'aide des cylindres métalliques. La méthode de Walkley & Black a été appliquée pour déterminer lateneur en carbone total du sol. Pour évaluer le stock de carbone contenu dans le sol, la formule suivante est appliquée : $St = C \cdot Da \cdot e$ avec St : le stock de carbone dans le sol (kg.m⁻²), Da : la densité apparente du sol (g.cm⁻³), e : épaisseur de couche (dm) et C : teneur en carbone de la couche de sol tamisé à 2mm (mgC.g⁻¹sol) (Ellert et Bettany, 1995 ; Desjardins *et al*, 2000). Pour les sols caillouteux contenant des éléments supérieurs à 2 mm de diamètre ; la charge en éléments grossiers du sol doit être prise en considération. Cette charge est éliminée du calcul, car elle est de nature siliceuse et considérée comme ayant une teneur en matière organique nulle. Dans ce cas, la formule suivante est appliquée pour calculer le stock de carbone : $St = C \cdot (100 - \% \text{ charge}) \cdot Da \cdot e$. Ellert & Bettany (1995) ont mentionné que pour pouvoir évaluer de façon fiable les modifications de quantité de matières organiques liées aux modes de conduite du sol, il est nécessaire que les masses de sol comparées soient équivalentes. Dans la mesure où les densités apparentes des sols des systèmes étudiés sont différentes, le calcul du stock de carbone doit être basé sur " une masse équivalente ", c'est-à-dire qu'il faut d'abord choisir une masse de sol de référence (le plus faible généralement) et calculer les stocks sur une épaisseur de sol correspondant à cette masse.

L'analyse granulométrique est effectuée pour déterminer le pourcentage de sables, limons et argiles du sol. Les particules de taille supérieure à 20 µm : sables grossiers, sables fins et limons grossiers ont été obtenues par tamisage à l'aide d'une série de tamis de maille décroissante. Les éléments fins en dessous de 20µm : limons fins et argiles ont été obtenus par sédimentation. Les différentes fractions sont passées à l'étuve à 105°C durant 48 heures puis pesées.

Résultats

Inventaire floristique

Les résultats des inventaires floristiques (Tableau 58) de recrûs sous pin à Ambalavao et Andranolava montrent que la richesse floristique de la formation est faible mais pas négligeable. La formation à Ambalavao (1p) est dominée par trois espèces d'arbustes pionniers et celle d'Andranolava (2p) par une espèce (*Pinus patula*). En ce qui concerne la savane herbeuse, l'indice de Shannon et l'indice de régularité montrent également que la formation est dominée par quelques espèces, dont la plus représentée est *Aristida similis*. Steudel.

Tableau 58. Indice de Shannon et indice de régularité

| Ttm | Nombre d'espèces | Nombre de Genres | Nombre de Familles | Indice de Shannon | Indice de régularité | Espèces dominantes |
|-----|------------------|------------------|--------------------|-------------------|----------------------|--|
| 1P | 25 | 22 | 18 | 3,63 | 0,78 | <ul style="list-style-type: none"> • <i>Harongana madagascariensis</i> Choisy • <i>Macaranga alnifolia</i>. Baker • <i>Dombeya seyrigii</i>. J.Arènes |
| 2P | 35 | 30 | 18 | 1,79 | 0,37 | Jeunes pousses de <i>Pinus patula</i> Schiede & Deppe |
| 1K | 32 | 25 | 11 | 3,33 | 0,67 | <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aristida similis</i>. Steudel • <i>Andropogon encomus</i>. Nées • <i>Sporobolus centrifugus</i>. Nées |

Ttm : traitement, 1 : site 1 à Ambalavao ; 2 : site 2 à Andranolava

P : *Pinus patula* ; K : savane herbeuse

Biomasse végétale épigée et hypogée

Le stock de C contenu dans la biomasse aérienne présente une différence significative entre les systèmes étudiés. Les savanes herbeuses ont les stocks les plus faibles, car la végétation est constituée essentiellement par des plantes herbacées pauvres en matière sèche. En revanche le système reboisé, dont le peuplement est composé par des arbres, des arbustes de sous-bois des arbrisseaux et des plantes herbacées a un stock de C beaucoup plus élevé (tableau 59).

Concernant le stock de carbone de la litière, la plantation de pins à Ambalavao a une litière relativement épaisse. Elle est constituée par des débris de sous bois, d'aiguilles, de fruits et de graines de pins en décomposition, ainsi que les restes et débris d'exploitation. À Andranolava, la situation est différente ; la litière est composée uniquement par des aiguilles de pins récemment tombées et légèrement décomposées. Quant aux savanes herbeuses, une très faible accumulation litière a été constatée. Elle est généralement grossière, peu décomposée et composée essentiellement par des débris de feuilles tombées. Pour les deux savanes étudiées, il n'existe pas de différence significative entre les stocks de carbone de la litière. Dans la plantation d'eucalyptus, la litière est également grossière, légèrement décomposée, constituée par des feuilles, des fleurs et des brindilles. Les stocks de C contenus dans la litière de pin et d'eucalyptus à Andranolava sont proches.

Le stock de C racinaire de la savane est faible, puisqu'il provient uniquement de racines fines des plantes herbacées. Le stock total de C de la biomasse racinaire sous plantations de pin et d'eucalyptus est plus élevé que celui des savanes herbeuses, compte tenu des grosses racines d'arbres.

Statistiquement, entre les deux sites d'études les résultats obtenus sont significativement différents. Le stock de C racinaire de savane à Andranolava (site 2) est inférieur à celui d'Ambalavao (site 1). Non seulement les sols diffèrent entre les deux sites, ce qui peut agir sur la production de racines, mais les pédoclimats des sites peuvent aussi différer : Andranolava est un peu plus sec qu'Ambalavao : exposé au Nord, situé plus à l'Ouest et plus éloigné de la forêt. Un milieu humide est plus favorable à la production de biomasse racinaire.

Tableau 59. Stock de carbone des différents systèmes étudiés MgC.ha⁻¹

| Ttmt | B. arborée | | Sous bois et herbacées | | Litière | | Racine fines | | Grosses racines | | Sol | | Total |
|------|------------|------|------------------------|-----|---------|-----|--------------|-----|-----------------|-----|------|-----|---------|
| 1P | 13,3 | 4,7 | 3,4 | 1,4 | 8,9 | 4,5 | 2,4 | 1,0 | 114,2 | 0,8 | 81,0 | 9,2 | 123,2 a |
| 1K | 0,0 | 0,0 | 1,9 | 0,9 | 0,2 | 0,2 | 3,4 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 97,5 | 9,7 | 103,0 b |
| 2P | 13,1 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 3,0 | 1,3 | 1,1 | 0,4 | 23,9 | 2,5 | 61,0 | 3,6 | 82,1 c |
| 2K | 0,0 | 0,0 | 2,6 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 2,1 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 69,9 | 2,7 | 74,8 cd |
| 2C | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,7 | 9,9 | 56,7 e |
| 2E | 18,4 | 11,3 | 0,0 | 0,0 | 3,3 | 1,7 | 1,1 | 0,4 | 4,9 | 3,5 | 50,8 | 9,5 | 78,5 c |

Le chiffre en italique indique l'écart type. Une même lettre indique une absence de différence significative entre les systèmes étudiés au seuil de 5% d'après le test de Mann Whitney.

Les sols étudiés sur les deux sites sont des sols ferrallitiques rajeunis (horizon B de faible épaisseur ou difficile à différencier de l'horizon C d'altération). A Ambalavao le pourcentage moyen des éléments fins (argiles et limons fins) est de l'ordre de 62% alors qu'à Andranolava, le pourcentage moyen des éléments fins est de 42%. Le sol d'Ambalavao est donc plus argileux. Le stock de C des deux sites d'étude est différent. Le sol d'Ambalavao stocke plus de carbone que le sol d'Andranolava. Cette différence peut être expliquée en partie par la texture différente de deux sols (tableau 59).

Par rapport à la savane herbeuse considérée comme témoin, les stocks de C des sols des plantations et cultures connaissent une diminution. Sur une couche de 0-40 cm, la diminution est de l'ordre de 19% pour la culture temporaire, de 13 à 17% pour le pin, et jusqu'à 27% pour l'eucalyptus.

Discussion

Réduction du stock de carbone du sol par l'afforestation et la mise en culture traditionnelle

Outre le climat assez humide de la lisière du corridor, la teneur relativement élevée du stock de C sous savane pourrait être aussi liée à la gestion pastorale : pâturage peu intensif et passage du feu modéré (tous les trois ans). Ce mode de gestion activerait la production de la biomasse racinaire et aérienne, favorable au stock de carbone.

Dans la situation étudiée, le changement d'utilisation du sol par l'afforestation a réduit le stock de C dans le sol. Ce fait pourrait paraître paradoxal, le reboisement et plus généralement l'arbre étant souvent considérés comme bénéfiques à la teneur en matière organique du sol. Des études effectuées par Barthès et al. (1996), Ross et al. (1998), Hakan et al. (1998), Turner et al. (1999) et Chapela et al. (2003), ont déjà mentionné de telles diminutions des teneurs en matière organique sous plantation. Cette diminution du stock de carbone du sol après plantation de pin et d'eucalyptus s'explique par la

présence des champignons mycorhiziens qui vivent en symbiose avec les racines (Chapela *et al.*, 2001). Ces microorganismes hétérotrophes participent à l'épuisement du carbone souterrain, en favorisant la minéralisation des stocks organiques du sol et de composés carbonés racinaires de la plante hôte, nutriments absorbés par cette dernière.

Le retournement et la mise en culture de la savane herbeuse conduisent aussi à une diminution du stock de C. L'opération entraîne une augmentation de l'aération dans le sol et une perturbation intense, stimulant la minéralisation de la matière organique par les micro-organismes du sol et sa dilution (Barthès *et al.*, 1996). L'action des outils du travail de sol a aussi un effet direct sur la rupture des agrégats du sol qui facilite la minéralisation de la matière organique. Cette minéralisation est activée sous un sol non recouvert et exposé aux pluies, ce qui est le cas du manioc ainsi que lors des travaux de plantation des pins (sous-solage). La destruction des agrégats conduit à une déprotection de la matière organique et une perte de C par érosion liée à la faible couverture du sol. Diverses études effectuées en milieux variés ont déjà rapporté des effets négatifs de ce type de système de culture au niveau de la quantité du carbone du sol (Barthès *et al.*, 1996 ; Razafimbelo, 2005).

Cependant, cette baisse de carbone du sol sous afforestation peut être transitoire car après le pin exploité se met en place un milieu ligneux plus diversifié à partir des plantes de sous-bois (voir chap. 13). Il conviendrait d'évaluer le fonctionnement d'un tel milieu de remplacement, notamment au niveau du sol.

Accroissement du bilan global de carbone grâce aux parties aériennes

Le bilan de stockage de carbone de l'afforestation reste positif car le carbone contenu dans la biomasse racinaire compense le carbone perdu dans le sol. Le carbone contenu dans les parties aériennes représente finalement le seul gain à attendre de l'afforestation, d'environ 20 MgC.ha⁻¹ dans le cas de la forêt de pin étudiée (déjà exploitée) du site 1. Le gain avant exploitation, obtenu par calcul à partir de la reconstitution du couvert arboré, serait de 40 MgC.ha⁻¹ (Figure 39).

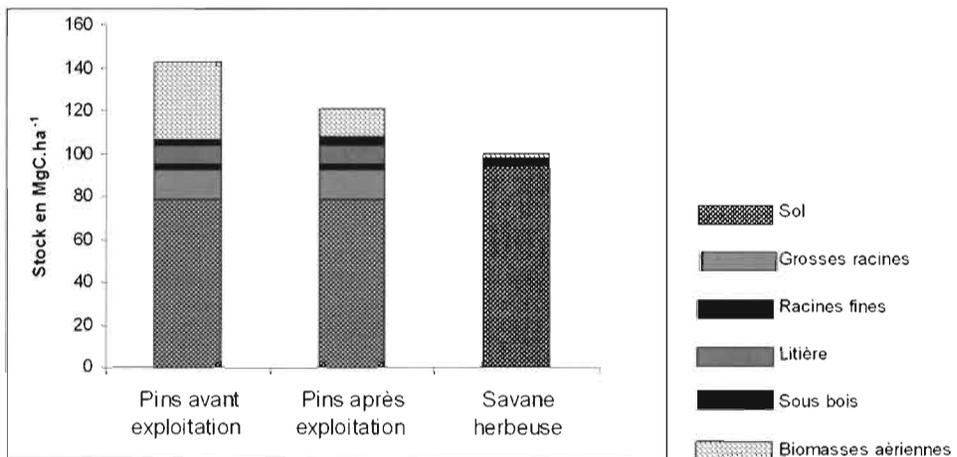


Figure 39. Comparaison des stocks totaux dans le site 1(sol +végétation)

De la durabilité du bois produit dépendrait donc l'intérêt de cette afforestation pour le stockage de carbone : meubles, papier (recyclable), bois de charpente conserveraient durablement du carbone fixé. De plus, de la régénération ou non de ces forêts après exploitation dépendra leur intérêt final. La conversion de ces plantations en une agriculture labourée temporaire, comme on l'observe

aujourd'hui (manioc) devant la demande foncière, ne fera qu'annuler les maigres acquis : brûlage des troncs résiduels et du sous-bois, mise en culture avec labour et minéralisation des parties souterraines et des litières libèrent beaucoup de CO₂ dans l'atmosphère. Le bilan de l'afforestation sera alors négatif en carbone car la savane aura perdu son stock de sol.

Conclusion

Dans la situation étudiée, le sol est un grand réservoir de carbone. Il contient de 60 à 95 % du stock total de carbone du système sol-plante.

Les résultats de stock de carbone des systèmes étudiés ont montré que malgré un stock de carbone du sol plus faible sous forêts artificielles que sous savane herbeuse, les stocks totaux de carbone des forêts de pin et d'eucalyptus, bien que déjà exploités, sont supérieurs aux traitements témoins (savane herbeuse à *Aristida similis*). Ceci confirme donc l'importance des forêts de reboisement pour le stockage de carbone dans notre situation de lisière de forêt naturelle, au climat humide favorable à l'arbre. Dans l'ensemble, le stock de carbone entre les deux essences de reboisement (jeunes pousses de pins en pleine croissance et plantation d'eucalyptus sous régime de taillis) n'est pas significativement différent mais on ne peut rien en conclure car il aurait fallu que les modes de sylviculture et l'âge des plantations soient comparables.

Entre les deux sites d'étude, une différence significative a été constatée sur le stock de carbone. Le site 1 à Ambalavao stocke plus de carbone que le site 2 à Andranolava. La différence serait liée à plusieurs facteurs dont la texture du sol, le microclimat et le mode de gestion de l'écosystème :

- la texture argileuse stocke plus de carbone que le sol à texture plus sableuse ;
- le climat plus humide en bordure de forêt naturelle est plus favorable à la production et donc au stock de carbone.
- le régime de pâturage et de feu pourrait être plus intensif dans le site 2, plus sec et plus peuplé

Les recoupements des informations permettent de conclure que l'afforestation contribue à augmenter le stock de carbone, mais moins que prévu car non seulement le sol de la savane étudiée est riche en carbone, mais aussi parce que les deux essences de reboisement, à croissance rapide, diminuent le stock de carbone du sol, et enfin parce que les parties aériennes sont exploitées rapidement et/ou amoindries par les feux accidentels.