



Etude de la dynamique du carbone dans le sol suite à l'adoption de pratiques agroécologiques en Itasy

Rakotovao Harisoa Narindra, Ramifehiarivo Nandrianina, Razakamanarivo Ramarson Herintsitohaina, Grinand Clovis, Razafimbelo Tantely Maminiana



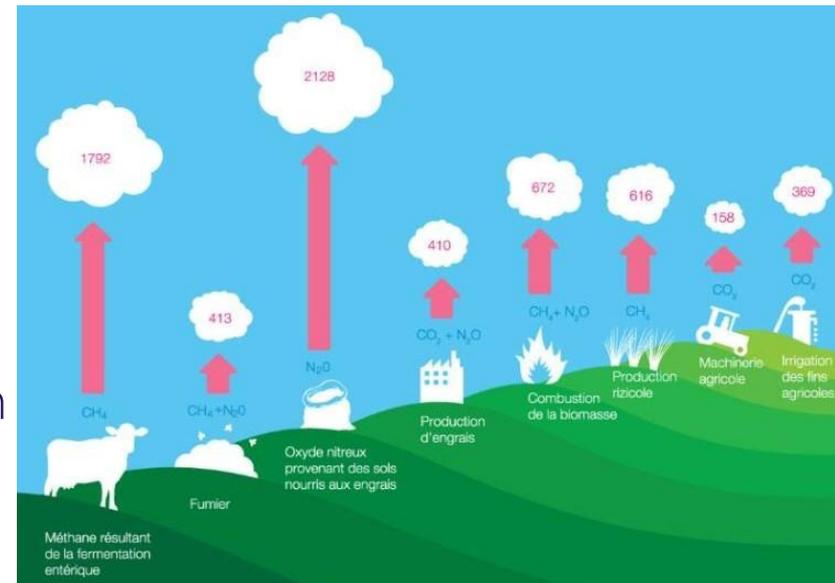
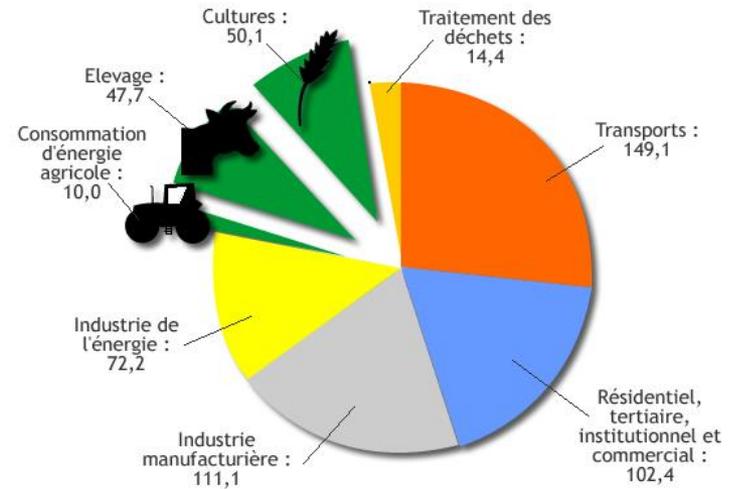
Sommaire

- 1) Contexte
- 2) Objectif
- 3) Zone d'étude et approches
- 4) Méthodologie
 - Systèmes étudiés
 - Inventaire terrain
 - Analyses en laboratoire
- 5) Résultats
- 6) Discussion
- 7) Conclusion & Perspectives



Contexte 1/3

- L'agriculture est un secteur émetteur de GES à l'échelle mondiale: ~20% des émissions mondiales annuelles
- Elevage, l'utilisation d'engrais, la combustion de biomasse et la riziculture sont les premières activités agricoles émettrices.
- L'agroécologie comme solution pour à la fois la sécurité alimentaire et l'atténuation des émissions de GES ?



Contexte 2/3

→ Réalisations d'études sur l'empreinte climatique des exploitations agricoles en Itasy durant la phase 1 de Mahavotra

- ✓ Elaboration **d'équations de séquestration de carbone** dans la biomasse aérienne pour les hautes terres de Madagascar
- ✓ Développement d'un **calculateur de l'empreinte carbone** des petites exploitations agricoles de l'Itasy
- ✓ Développement de **modèles de prédiction des propriétés de sol** à partir de méthode de spectroscopie infra rouge.
- ✓ Etude de la **séquestration de carbone dans le sol** pour différents modes d'usage des terres
- ✓ Calcul de **bilan GES à 20 ans** pour le projet Mahavotra phase 1.

Contexte 3/3

- Conclusions de l'étude précédente sur la séquestration de carbone dans le sol
 - Estimation de variabilité des stocks de carbone du sol dans l'Itasy en fonction des modes d'usage, du type de sol et de la topographie.
 - Effet type de sol et position de versant significatifs
 - Pas d'effets significatifs des modes d'usages des terres
 - Explication : pas assez de recul sur l'adoption de pratiques (seulement quelques années) et biais de l'approche synchronique (comparaison de sites différents).

Objectif

- Compléter l'étude précédente de **quantification de la séquestration de carbone suite à l'adoption de pratiques agrécologiques** en se concentrant sur des systèmes ayant le plus de potentiel de séquestration et en utilisant deux méthodes de détection des changements : l'approche synchronique et diachronique.

Les 2 approches

- **Approche diachronique** : Comparaison des résultats d'inventaire et stocks de carbone dans le sol mesurés en 2014 (étude phase 1) avec les mesures et résultats d'inventaire obtenus en 2018.
- **Approche synchronique** : Comparaison des mesures et résultats d'inventaire obtenus en 2018 pour différents systèmes « agroécologiques » avec ceux obtenus pour des systèmes « témoins » représentant un état initial ou des pratiques conventionnelles.

Zone d'étude

L'inventaire a été réalisé sur les 3 communes de la Région Itasy ayant fait l'objet d'un inventaire sol en 2014 (Analavory, Imerintsiatosika et Miarinarivo II).

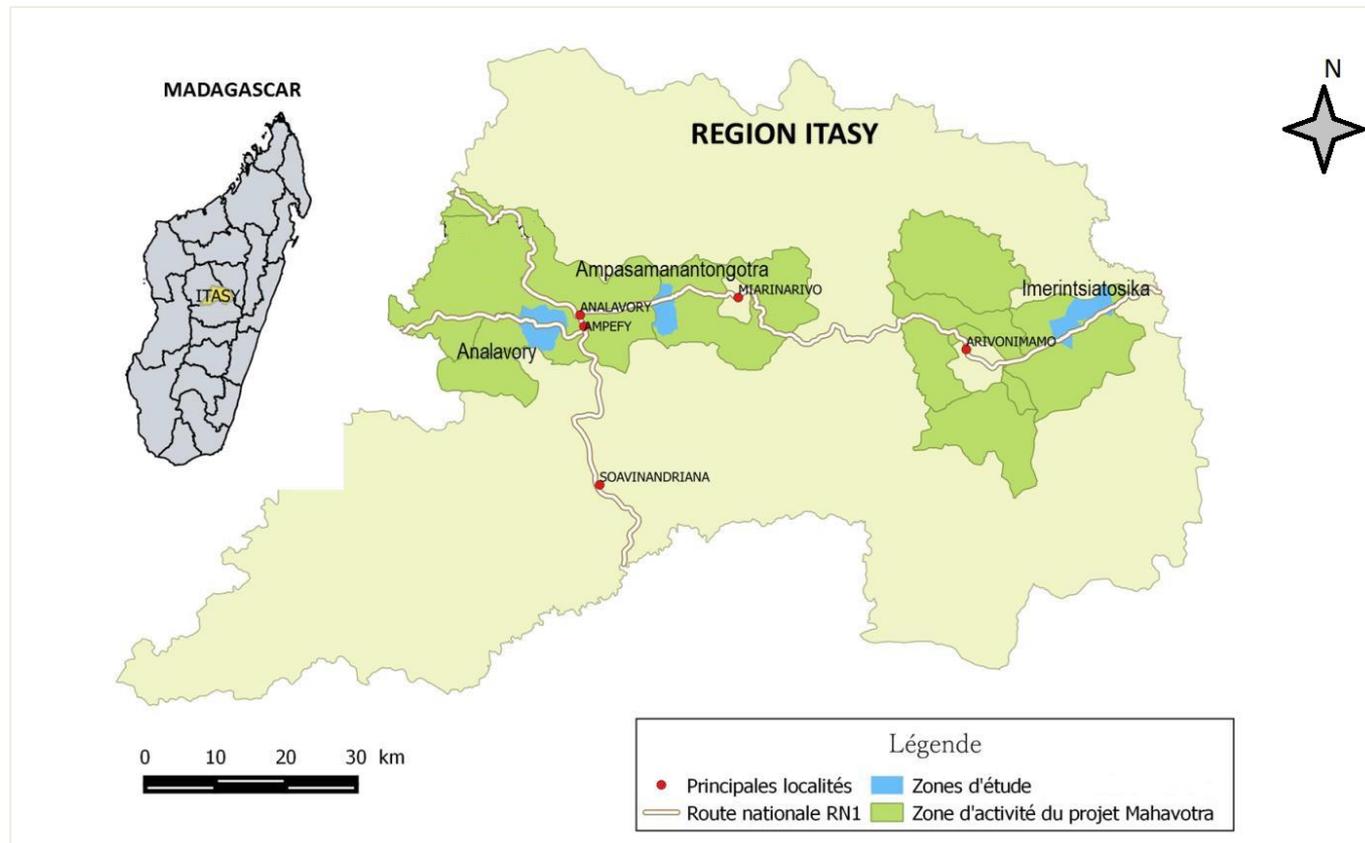


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et des zones d'activités du projet Mahavotra (phase 1 – 2012-2016)

Résumé des étapes de l'étude

- 1) Sélection des systèmes agroécologiques et conventionnels
- 2) Identification des parcelles de prélèvements et producteurs
- 3) Inventaire et prélèvements de sol sur le terrain
- 4) Analyses des échantillons au laboratoire
- 5) Calculs des stocks de carbone
- 6) Analyses statistiques de l'impact de l'adoption des systèmes

Choix des systèmes



Systemes étudiés

3 systemes agroécologiques ont été sélectionnés pour le fort niveau de diffusion dans le cadre du projet Mahavotra et pour le potentiel de séquestration de carbone



Agroforesterie mature

Association de cultures annuelles (riz, manioc, patate douce, maïs, haricot) à des espèces ligneuses fruitières (café, litchi, mangue, orange, avocat, banane) ayant en 2018, de 8 à 10 ans de mise en pratique, et où les espèces fruitières sont intégrées dans la parcelle (et non localisés autour de la parcelle), avec une densité de plantation de 200 à 500 pieds par hectare. Ces parcelles ont été fertilisées principalement soit avec du compost, soit avec une fumure améliorée à raison de 9 à 12 tonnes par hectare.



Foresterie mature

Plantation d'arbres pour des utilisations future comme ressource énergétique et/ou comme bois de construction (Eucalyptus sp., Pinus sp., Acacia sp.). En 2018, les arbres sont âgés entre 13 à 15 ans, avec une densité de plantation variant de 500 à 1200 arbres par hectare. L'apport en fertilisant organique de ces parcelles ont été effectués uniquement lors des premières années de plantation.



Culture vivrière avec compost

Système de rotation de plusieurs cultures vivrières (riz, manioc, patate douce, maïs, haricot) sur une même parcelle durant ces 9 dernières années avec un apport annuel, non systématique de compost, ou de fumure améliorée à raison de 5 à 9 tonnes par hectare et avec association de culture (essentiellement avec des légumineuses).

Systemes étudiés

Ces 3 systemes ont été comparés à deux systemes de référence représentant l'état initial ou le systeme traditionnel



Culture vivrière traditionnelle

Systeme de rotation de plusieurs cultures vivrières (riz, manioc, patate douce, maïs, haricot) sur une même parcelle durant ces 9 dernières années avec un faible apport annuel de fertilisant organique allant de 0 à 5 tonnes par hectare.



Jachère

Parcelles non cultivées ou des parcelles anciennement cultivées mais abandonnées par les agriculteurs en raison de leur faible fertilité et de leur faible capacité de rétention en eau. Les parcelles de jachères de moins de 5 ans d'âges sont dominées par des herbacées de la famille des Poaceae (*Aristida* sp.)

Résumé et Typologie finale

Résumé des systèmes étudiés et comparaison synchronique réalisée.

Système agroécologique	Système de référence
Agroforesterie mature (AF)	Jachère (J)
	Culture vivrière traditionnelle (CVT)
Foresterie paysanne mature (F)	Jachère (J)
	Culture vivrière traditionnelle (CVT)
Culture vivrière avec compost (CVC)	Culture vivrière traditionnelle (CVT)

Inventaire Terrain



Plan d'échantillonnage

- Les parcelles agroécologiques ont été sélectionnées à partir d'une **base de données déjà existante** (Rakotovao, 2017) regroupant de nombreuses parcelles échantillonnées au cours de l'année 2014.
- Pour les parcelles **en cultures vivrières fertilisées au compost**, des travaux d'enquête ont été effectués afin de reconstituer l'historique de la fertilisation des parcelles (*cf formulaire d'enquête*). L'enquête a permis de finaliser le choix des parcelles retenues en ciblant les parcelles ayant été fertilisées au compost solide, au moins deux fois durant la période 2014-2018
- Pour les **parcelles de référence (ou témoin)**, le choix des parcelles s'est basé sur la distance aux parcelles agroécologiques et leur emplacement sur un même position topographique afin d'éviter les artefacts liés à la variabilité des stocks de C (biais de l'approche synchronique). Par ailleurs, cette parcelle de référence permet également de faire des **comparaisons par paire** pour analyser les différences.

Plan d'échantillonnage

Pour chaque système agroécologique ou de référence, quatre répétitions par site ont été réalisées. Au total, **96 parcelles** ont été échantillonnées, soit **32 parcelles par site ou paysage**.

Le nombre de placettes échantillonnées, par site et mode d'usage est présenté ci-dessous:

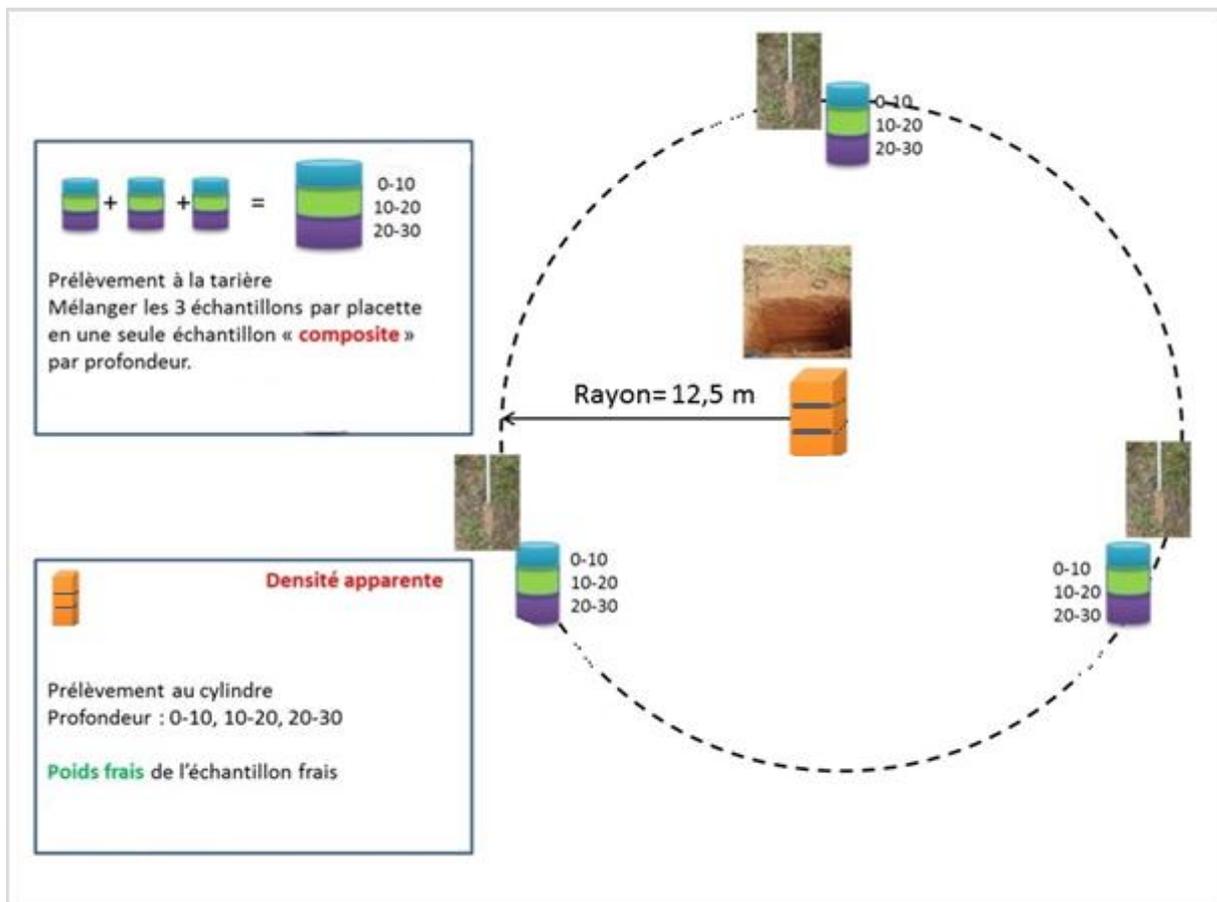
Système	Agroécologique			Référence		Total
	AF	F	CVC	CVT	J	
Imerintsiatosika	4	4	4	12	8	32
Ampasamanantongotra	4	4	4	12	8	32
Analavory	4	4	4	12	8	32
Total	12	12	12	36	24	96

Protocole d'échantillonnage

- Les campagnes de prélèvement de sols ont été réalisées au cours de la **période du 18 juin au 6 juillet 2018**, correspondant à la même période de prélèvement pour l'étude de Rakotovao en 2014.
- Des prélèvements de sol ont été effectués **0-10, 10-20 et 20-30 cm de profondeurs**, sur les parcelles agroécologiques et les parcelles de référence des 3 sites d'études.
- Ces prélèvements ont été effectués **à l'aide d'une tarière et d'un cylindre** : les échantillons prélevés au cylindre ont servi à la mesure de la densité apparente du sol, tandis que les échantillons prélevés à l'aide de la tarière ont servi à la mesure de leur teneur en C.
- Un protocole de **placette circulaire et prélèvement d'échantillon** de sol a été mis en place

Protocole d'échantillonnage

- Placette de 12,5 m de rayon
- Réalisation de fosse pédologique et sondage à la tarière (cf figure →)
- Au total, 15 échantillons (sachet) ont été prélevés par placette



Profondeur (cm)	Nombre échantillons prélevés au cylindre	Nombre échantillons prélevés à la tarière	Nombre échantillons Composite constitués
0-10	1	3	1
10-20	1	3	1
20-30	1	3	1
Sous-total	3	9	3
Total		15	

Différentes étapes réalisées sur la placette

- 1) Obtention de **l'accord des propriétaires** pour réaliser les mesures et prélèvements de sol.
- 2) **Recrutement et formation** des mains d'œuvres locales. Le prélèvement a été effectué par 2 équipes en parallèle composées de 1 chercheur, 1 technicien spécialisée et 2 main d'œuvres locales par équipe.
- 3) Réalisation d'une **fosse pédologique** de 1 m * 1m * 0.5 m à l'angady
- 4) Prélèvement des **échantillons des sols par la méthode du cylindre** de volume connu suivant les 3 profondeurs du sol
- 5) Mise en sachet fermé hermétiquement de chaque échantillon prélevé par cylindre pour conservation et transport
- 6) **Prélèvement à la tarière** des échantillons de sols sur les 3 profondeurs et 3 répétitions (cf schéma d'inventaire)
- 7) Mélange de sol pour former des **échantillons composites** pour chaque profondeur à l'aide d'une cuvette et d'un versoir pour les échantillons prélevés par tarière
- 8) Mise en sachet de chaque échantillon composite pour **conservation et transport**
- 9) **Remblayage** par couche de sol de la fosse occasionnée par les prélèvements

Protocole d'échantillonnage

Nombre d'échantillons prélevés à l'issu de l'inventaire.

Profondeur (cm)	Nombre échantillons prélevés au cylindre	Nombre échantillons prélevé à la tarière	Nombre échantillons composite constitués
0-10	99	297	99
10-20	99	297	99
20-30	99	297	99
Sous-total	297	891	297
Total		1485	

Analyses en Laboratoire



Les étapes

Des travaux d'analyse au laboratoire ont été effectués afin de mesurer les indicateurs nécessaires pour le calcul du stock de carbone à savoir, la teneur en C du sol pour chaque profondeur et leur densité apparente (DA).

Les travaux de laboratoire comprennent les phases suivantes :

- 1) La préparation des échantillons de sol,
- 2) La mesure de la densité apparente
- 3) Les analyses chimiques et spectrométriques pour estimer la teneur en C
- 4) Le calcul des stocks de carbone
- 5) L'analyse statistique

Préparation des échantillons de sol

Une fois ramené au laboratoire, les sachets des échantillons composites sont ouverts et séchés de 15 à 30 jours afin de pouvoir les broyer et tamiser facilement



Broyage au mortier et pilon



Tamisage à 2 mm
(le refus est considéré comme des « Eléments grossiers »)



Tamisage à 0,2 mm
(le refus est la fraction sables grossiers du sol non utilisé pour la suite des analyses)



Sol broyé à 0,2 mm
(fraction de sol sables fins, limons et argiles sur laquelle sera réalisée les analyses chimiques et spectroscopiques)

Estimation de densité apparente (Da)

La méthode utilisée pour estimer la densité apparente du sol est la **méthode standard au cylindre**.

Les échantillons de sol prélevés par cylindre ont été pesés pour avoir **le poids de l'échantillon frais**.

Ces échantillons ont été ensuite séchés et tamisés à 2 mm pour avoir le poids des éléments grossiers ou refus supérieurs à 2 mm nécessaire au calcul du stock de C.

La Da exprimée en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ est le rapport entre le poids total du sol sec contenu dans le cylindre déterminé après séchage par étuve de 105°C durant 24h (en g) sur le volume du cylindre (ici 502.4 cm^3) selon la formule ci-dessous.

$$DA (\text{g}/\text{cm}^3) = \frac{\text{Poids sec (g)}}{\text{Volume (cm}^3\text{)}}$$

Analyse de teneur en carbone du sol

La détermination de la teneur en carbone des échantillons de sol a été réalisée suivant deux méthodes :

- la **méthode chimique Walkley and Black** (1934) pour les échantillons venant des parcelles agroécologiques
- la **méthode par Spectrométrie à Moyen Infra-Rouge** (MIRS) pour les échantillons venant des parcelles de référence.

La méthode consiste à prédire les teneurs en C des sols à partir d'un modèle mathématique qui relie les valeurs de signatures spectrales mesurées par MIRS et les valeurs de référence laboratoire mesurée par la méthode W&B.

L'utilisation du MIRS requiert une phase de calibration et de validation. Une fois calibré et validé, le modèle peut être utilisé sur des échantillons ayant été analysés uniquement par MIRS.

Cette méthode permet de réduire fortement les coûts d'analyses et obtenir rapidement des valeurs de teneur en carbone, tout en limitant l'utilisation de produits chimiques.

Analyse de teneur en carbone du sol

Deux modèles MIRS préalablement développé par Rakotovao (2017) durant la phase 1 pour les Ferralsols et les Andosols de la région d'Itasy ont été re-utilisé pour prédire la teneur en C des échantillons de 2018 venant des parcelles de référence.

Ces deux modèles sont robustes du fait des valeurs de R^2 et de RPD élevées en validation : respectivement 0.86 et 2.72 pour les Ferralsols après un prétraitement des spectres par le SNV et 0.95 et 4.08 pour les Andosols sans prétraitement (cf résultats de calibration et validation ci-dessous).

Modèle	Prétraitement	N	CALIBRATION				VALIDATION		
			R^2	RMSEC	RPD	n	R^2	RMSEP	RPD
Ferralsols	SNV	500	0.91	3.74	3.19	232	0.86	4.34	2.72
Andosols	-	160	0.97	1.59	6.5	50	0.95	2.54	4.08

Calcul des stocks de carbone du sol

Les **stocks de C dans le sol en tonnes par hectare** ($\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$) pour chaque parcelle ont été obtenus à partir de indicateurs et formule ci dessous:

- la teneur en C (en $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$)
- la densité apparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
- l'épaisseur de la couche de sol (en m)
- la quantité de refus* (en %)

$$STC = \sum_{i=1}^k [SOC_i \times DA_i \times E_i \times (1 - \%refus)]$$

Avec **STC** : stock de carbone dans le sol ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$).

SOC_i : teneur en carbone de la couche de sol i ($\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}\text{sol}$)

DA : masse volumique assimilée à la densité apparente du sol total ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

E_i : épaisseur de la couche i (m)

% refus : pourcentage de refus dans la couche i

i : couche d'étude dans notre cas : 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm

** lors du broyage à 2 mm, les cailloux (> 2 mm) et les débris de végétaux (racines) ont été considérés comme du refus et ont été éliminés du calcul.*

Calcul de la séquestration du carbone

La **séquestration de carbone annuelle** ou **Delta C** a été calculé en faisant la différence des stocks de C d'une même parcelle sur 0-30 cm de profondeur entre 2018 et 2014, et en la divisant par le nombre d'années passés entre ces 2 périodes (4 ans).

$$\mathbf{DeltaC = (STC2018 - STC2014)/4}$$

Avec

DeltaC : Séquestration annuelle de carbone dans le sol (Mg C.ha⁻¹.an⁻¹).

STC2018 : Stock de carbone de la parcelle prélevée en 2018 sur 0-30 cm de profondeur (Mg C.ha⁻¹)

STC2014 : Stock de carbone de la parcelle prélevée en 2014 sur 0-30 cm de profondeur (Mg C.ha⁻¹)

Analyse statistiques

Les différences de stocks de carbone et Delta C ont été analysés d'un point de vue de leur significativité statistique selon les deux approches.

Pour l'approche synchronique, l'analyse de la variance a été réalisée avec un test de Tukey ($p < 0.05$) pour voir la différence entre les données de stocks de C issues des pratiques agroécologiques (AF, F, CVC) par rapport aux pratiques de références (CVT et T) mesurées en 2018.

Pour l'approche diachronique, les moyennes des stocks de carbone pour chaque pratique agroécologiques mesurées en 2014 et 2018 ont été analysées par la méthode d'Analyse de la Variance (ANOVA)

Les traitements ont été réalisés avec le logiciel statistiques R.

Résultats



Indicateur 1: Densité apparente (g/cm²)

Résultats obtenus de Da pour les différentes pratiques, type de sols et années d'inventaire.

Système	2014			2018		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Ferralsols (g.cm⁻³)						
AF	1.06 (±0.14)Aa	1.09 (±0.15)Ab	1.1 (±0.18)Aa	1.18 (±0.15)Aa	1.26 (±0.1)Aa	1.25 (±0.15)Aa
F	1.04 (±0.14)Ab	1.18 (±0.11)Ab	1.18 (±0.18)Aa	1.24 (±0.06)Aa	1.29 (±0.1)Aa	1.31 (±0.18)Aa
CVC	1.04 (±0.07)Ab	1.19 (±0.05)Aa	1.23 (±0.07)Aa	1.23 (±0.19)Aa	1.24 (±0.17)Aa	1.25 (±0.22)Aa
CVT	-	-	-	1.23 (±0.12)A	1.27 (±0.15)A	1.33 (±0.15)A
J	-	-	-	1.27 (±0.13)A	1.30 (±0.12)A	1.32 (±0.11)A
Andosols (g.cm⁻³)						
AF	0.98 (±0.11)Aa	1.06 (±0.07)Aa	1.03 (±0.08)Aa	1.07 (±0.12)Aa	1.04 (±0.12)Aa	1.04 (±0.1)Aa
F	1.03 (±0.05)Aa	0.99 (±0.16)Aa	1.01 (±0.29)Aa	1.12 (±0.16)Aa	1.01 (±0.1)Aa	0.93 (±0.08)Aa
CVC	1.11 (±0.11)Aa	1.04 (±0.19)Aa	1.06 (±0.12)ABa	1.11 (±0.05)Aa	1.14 (±0.07)Aa	1.03 (±0.13)Aa
CVT	-	-	-	1.07 (±0.10)A	1.06 (±0.11)A	1.00 (±0.10)A
J	-	-	-	1.07(±0.12)A	0.99 (±0.14)A	0.97(±0.16)A

- Les andosols sont moins denses que les sols ferralitiques ce qui est attendu
- Il y n'a pas des différences significatives de densité entre les systèmes pour les deux modes comparaison (synchronique et diachronique).
- On note une augmentation des densités entre 2014 et 2018

Indicateur 2 : Teneur en C (%)

Résultats obtenus de C pour les différentes pratiques, type de sols et années d'inventaire.

Système	2014			2018		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Ferralsols (gC.kg⁻¹)						
AF	27.8 (±16.2)Ba	24.5 (±11.4)Ba	24.4 (±8)Ba	32.2 (±14)Aa	29.5 (±12.4)Aa	23.3 (±11.9)Aa
F	24 (±4.6)Ba	18.7 (±10.6)Ba	16.8 (±6.4)Ba	23.6 (±4.8)Ba	18.9 (±6.5)Ba	15.7 (±6.4)ABa
CVC	26.5 (±7.4)Ba	20.6 (±4.4)Ba	19.9 (±4.1)Ba	19.9 (±6.7)Ba	20.7 (±5.4)Ba	19.2 (±5.5)ABa
CVT	-	-	-	21.2 (±7.7)B	18.4 (±8.1)B	16.9 (±7.9)AB
J	-	-	-	17.3 (±8.0)B	15.8 (±7.9)B	13.1 (±5.9)B
Andosols (gC.kg⁻¹)						
AF	45.3 (±7.4)Aa	44.5 (±3.5)Aa	46.9 (±6.2)Aa	49.4 (±13.4)Aa	49 (±11)Aa	42.2 (±11)Aa
F	24.6 (±5.2)Ba	23.5 (±8.5)Ba	19 (±11.7)Ba	20.4 (±13.6)Ba	21.7 (±15.7)Ba	21.3 (±13.5)Aa
CVC	27 (±4.4)Ba	26.5 (±9)Ba	22.3 (±5.2)Ba	27.6 (±8.2)ABa	23.7 (±9.3)Ba	23.4 (±8.9)Aa
CVT	-	-	-	29(±14.0)AB	27.9(±15.5)B	26.6(±15.6)A
J	-	-	-	32.7 (±17.1)AB	30(±16.1)B	26.5(±16.4)A

- Les valeurs moyennes de AF sont significativement supérieures à celles des autres pratiques étudiées (F, CVC, CVT et J) en mode synchronique.
- Les teneurs en C ne sont pas différentes significativement entre les deux années (diachronique)

Indicateur 3: Stock de Carbone (tonnes/ha)

Résultats obtenus de Stock C pour les différentes pratiques, type de sols et années d'inventaire.

Pratique	2014			2018		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Ferralsols (MgC.Ha⁻¹)						
AF	29.5 (±18.2)Aa	26.6 (±14.5)ABa	27.4 (±12.9)Ba	34.4 (±13.6)Aa	36.7 (±17.3)Aa	27.3 (±13.2)Aa
F	24.2 (±3.9)Aa	21.7 (±12.2)ABa	19.9 (±8.4)Ba	28.1 (±6.6)ABa	23.3 (±8.1)Ba	19.9 (±8.1)Aa
CVC	27.6 (±8.9)Aa	24.4 (±5.3)ABa	24.3 (±4.3)Ba	23.9 (±10)Ba	25 (±8.2)Ba	23.4 (±8.1)Aa
CVT	-	-	-	25.0 (±9.5)AB	22.6 (±10.3)B	21.5 (±10.2)A
J	-	-	-	21.1 (±9.8)B	20.0 (±10.5)B	16.9 (±8.2)A
Andosols (MgC.Ha⁻¹)						
AF	41.3 (±5.6)Aa	41 (±14)Aa	45.1 (±9.2)Aa	49.3 (±14)Aa	42.6 (±14.6)Aa	39.5 (±10)Aa
F	25.2 (±6)Aa	15.6 (±8.3)Ba	15.2 (±16.6)Ba	25.3 (±3.1)Aa	23 (±3.7)Aa	16.1 (±8.3)Aa
CVC	29.9 (±6)Aa	28.4 (±13.1)ABa	23.9 (±7.9)Ba	29.8 (±8.2)Aa	26.5 (±11.1)Aa	23.7 (±9.5)Aa
CVT	-	-	-	29.8 (±13)A	27.7 (±14.1)A	25.2 (±13.9)A
J	-	-	-	33.7 (±15.4)A	29.3 (±16.0)A	25.4 (±15.5)A

- Même observations et tendances que pour les teneurs en carbone en moyenne mais tendances différentes lorsqu'on regarde par type de sol (effets significatifs selon les systèmes et profondeurs).

Sequestration de Carbone

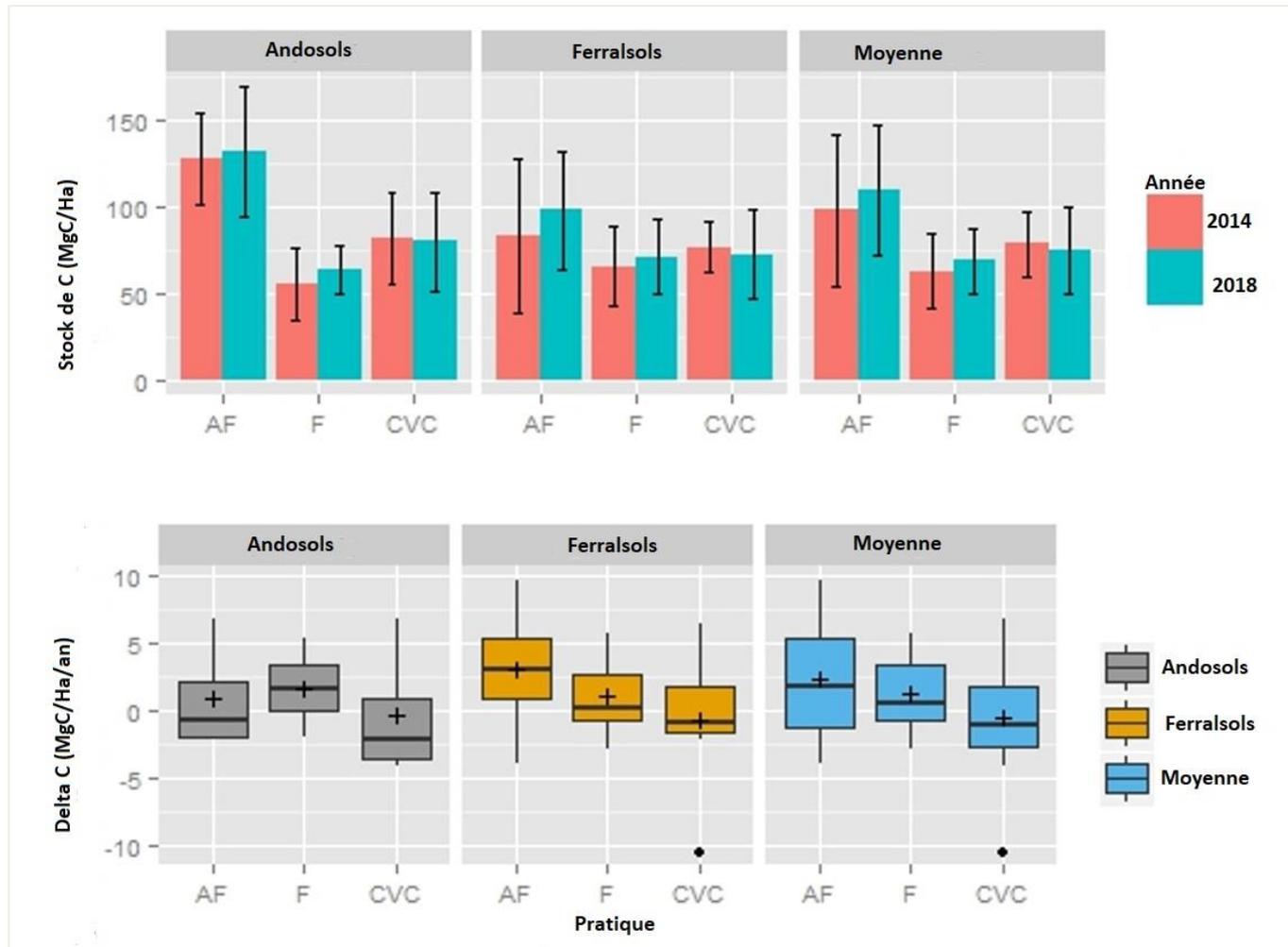
Calcul de la séquestration sur 0-30 cm par l'approche diachronique (delta 2018-2014)

Système	Stock de C sur 0-30 cm (MgC.Ha ⁻¹)		DeltaC annuel (MgC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Pourcentage de deltaC annuel
	2014	2018		
Moyenne				
AF	98.1 (±43.7)a	109.4 (±37.1)a	2.82	2.9 %
F	62.6 (±21.5)a	69 (±18.9)a	1.6	2.6 %
CVC	78.5 (±18.4)Aa	74.8 (±25.4)a	-0.92	- 1.2 %
Ferralsols				
AF	83.5 (±44.5)a	98.4 (±33.9)a	3.72	4.5 %
F	65.8 (±22.4)a	71.3 (±21.5)a	1.37	2.1 %
CVC	76.4 (±14.5)a	72.3 (±25.6)a	-1.02	-1.3 %
Andosols				
AF	127.4 (±25.9)a	131.4 (±37.2)a	1	0.8 %
F	56.1 (±20.7)a	64.5 (±13.8)a	2.1	3.7 %
CVC	82.2 (±26)a	80 (±27.9)a	-0.55	- 0.7 %

- Des valeurs positives et élevées de séquestration de C pour AF et F.
- Des valeurs négatives pour CVC
- Les valeurs de séquestration ne sont toutefois pas significatives d'un point de vue statistique.

Sequestration de Carbone

Calcul de la séquestration sur 0-30 cm par l'approche diachronique (delta 2018-2014)



Sequestration de Carbone

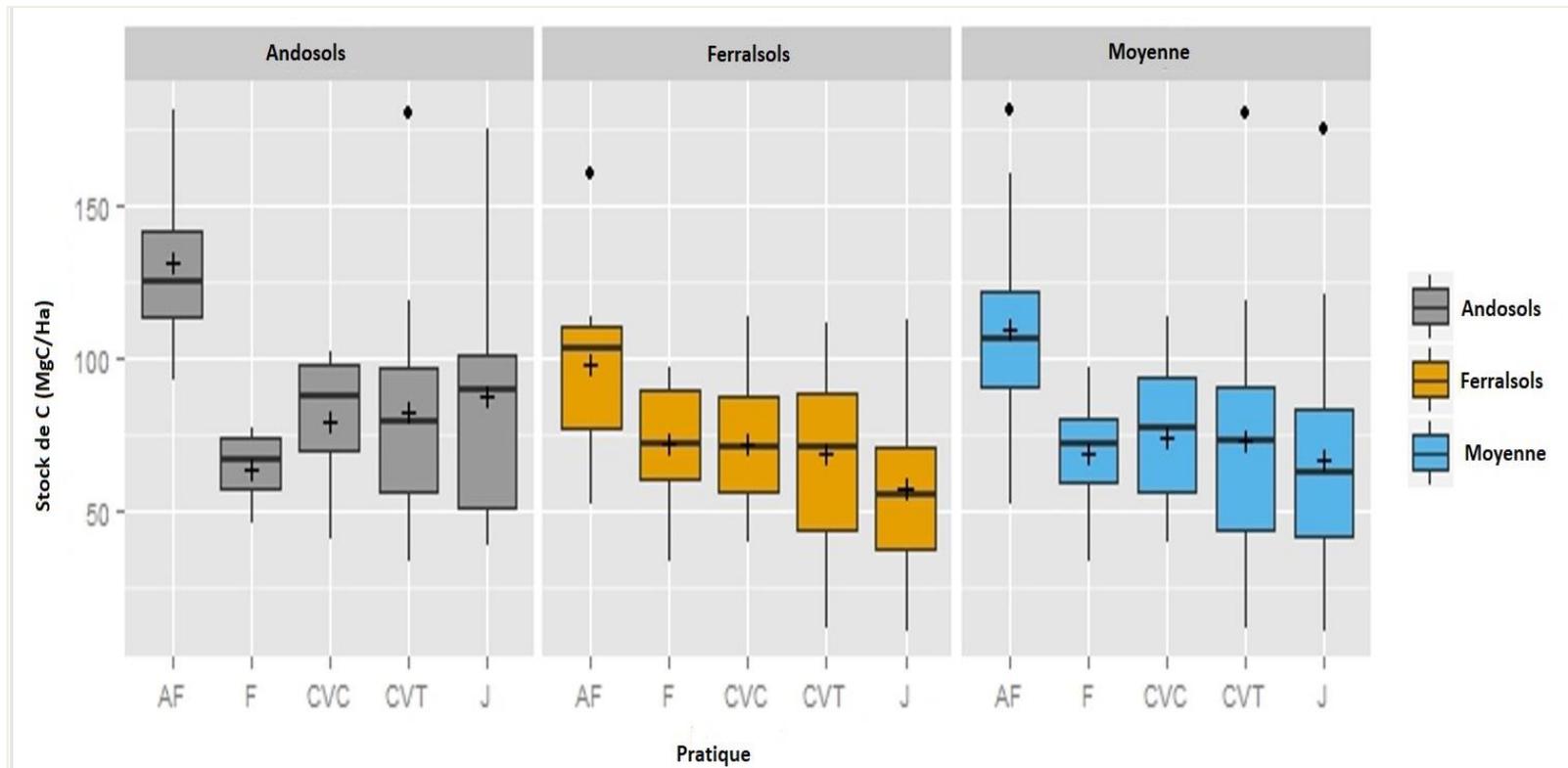
Calcul des différences de stocks totaux par **approche synchronique** (différences de stock en 2018)

Système	Stock de C sur 0-30 cm (MgC.Ha ⁻¹) en 2018		
	Moyenne	Ferralsols	Andosols
AF	109.4 (±37.1)A	98.4 (±33.9)A	131.4 (±37.2)A
F	69 (±18.9)B	71.3 (±21.5)B	64.5 (±13.8)A
CVC	74.8 (±25.4)B	72.3 (±25.6)B	80 (±27.9)A
CVT	73.8 (±32.0)B	69.1 (±26.8)B	82.7 (±39.9)A
J	67.4 (±35.1)B	58.1 (±25.5)B	88.5 (±45.8)A

- Des différences significatives en 2018 pour AF (très élevés) comparés aux autres systèmes
- Foresterie et Jachère ont les niveaux les plus faibles de stock de C

Sequestration de Carbone

Calcul des différences de stocks totaux par **approche synchronique** (différences de stock en 2018)



Discussions



Potentiel de l'agroforesterie

- L'agroforesterie permet de **stocker du carbone dans le sol jusqu'à $1,0 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ sur Andosols et $3,7 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ sur Ferralsols** à une profondeur de 0 à 30 cm. Ce sont des valeurs élevées et cohérentes avec la littérature.
- Peut être expliqué par la **densité de plantation estimée à 200-500 arbres par hectare** qui favorise le taux d'accumulation de carbone dans le sol en raison des apports de biomasse aérienne et souterraine (racines).
- Egaleme nt, les cultures annuelles (riz pluvial, maïs, haricot, manioc) associées aux arbres (*Coffea arabica*, *Citrus* sp., *Litchi chinensis*, *Mangifera indica* et *Persea americana*) **ont bénéficié d'un apport important en fertilisation organique** estimé à 5 à 9 tonnes / hectare, principalement en compost et en fumier amélioré.
- L'approche synchronique montre que les parcelles d'**Agroforesterie ont un stock bien au dessus des autres systèmes** ($109,4 \text{ tC/ha}$) et statistiquement différent. Cela traduit le choix d'installation des parcelles d'agroforesterie sur sol ayant initialement un bon niveau de fertilité.

Potentiel de la foresterie

- La foresterie paysanne (F) permet de séquestrer du carbone dans le sol à la fois sur les Ferralsols ($1,4 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) et sur les Andosols ($2,1 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$).
- Une forêt âgée de 10 à 15 ans a augmenté le stock de carbone dans le sol jusqu'à $1,6 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en moyenne.
- L'approche synchronique a montré que les parcelles forestières étudiées avaient des stocks systématiquement plus faibles ($\sim 70 \text{ tC/ha}$) par rapport aux autres systèmes étudiés.
- Cela traduit le choix des sites des plantations dans le cadre du projet, sur terres marginales ou dégradées ainsi que le fort potentiel de la foresterie à restaurer la fertilité des sols, que ce soit sur sol ferrallitique ou sol volcanique.

Potentiel de la culture vivrière avec compost

- L'approche diachronique a montré que la séquestration du carbone dans le sol sous CVC de 2014 à 2018 était négative ($-0,9 \text{ MgC.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$) dans les deux types de sol, Ferralsols ($-1,0 \text{ MgC.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$) ou Andosols. ($-0,6 \text{ MgC.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$).
- L'interprétation de cette diminution de stock peut s'expliquer par la faible capacité des agriculteurs à appliquer les doses recommandées de fertilisants organiques (12 tonnes de compost par hectare). En effet, les apports de compost et fumier amélioré pour CVC n'ont pas été réalisés systématiquement chaque année, car cela dépendaient de la disponibilité de matière organique pas toujours disponible.
- La méthode synchronique a révélé des stocks similaires (différences non significatives) entre les cultures vivrières avec compost $74,8 \text{ MgC.ha}^{-1}$ et ceux des cultures vivrières traditionnelles $73,8 \text{ MgC.ha}^{-1}$
- Par conséquent, **dans cette étude, les systèmes CVC et CVT pourraient être assimilés comme étant similaires**, caractérisés par de faibles apports en matière organique.

Discussion sur les approches

- Les deux approches ont montré des **valeurs et tendances similaires de séquestration du C du sol sur les parcelles AF et F**. Pour CVT, une diminution des stocks de C a été observée avec l'approche diachronique et aucune augmentation significative avec l'approche synchronique.
- L'**approche synchronique** peut générer une incertitude considérable en raison de l'**hétérogénéité des sites de prélèvements** pour comparer les systèmes.
- L'**approche diachronique est considérée plus robuste et fiable**, mais elle présente l'inconvénient **d'attendre et de mesurer pendant de nombreuses années** avant de pouvoir estimer la quantité de C séquestrée.
- D'après cette étude, **une période de plus de 10 ans est nécessaire pour pouvoir détecter un changement** cumulatif significatif sur le stock de carbone.

Conclusions & Perspectives



Conclusion

- Il s'agit d'une **étude unique à Madagascar** qui mesure l'évolution des stocks de carbone sur des mêmes parcelles après 4 années de mise en pratique, en milieu paysan et sur plusieurs paysages, en s'appuyant sur deux approches de détection des changements.
- Les résultats sont clairs : **l'Agroforesterie et Foresterie permettent de séquestrer du carbone**, permettant à la fois l'augmentation de la fertilité dans les parcelles et de constituer un levier pour lutter contre le changement climatique.
- **L'effet de l'apport de compost n'a pas pu être mis en évidence** du fait d'absence de connaissance sur les apports annuels durant ces quatre années et du potentiel faible apport organique.
- Ces travaux viennent compléter les études sur le sujet sur l'impact de l'agroécologie en Itasy et plus largement à Madagascar.

Perspectives

- **Valorisation et communication scientifique de ces travaux**
 - *Présentation à la conférence mondiale sur l'Agroforesterie (mai 2019)*
 - *Publication d'un article dans « Agriculture Ecosystem and Environment" (AGEE) (soumis en février 2019)*
- **Communiquer et sensibiliser** les acteurs du développement à l'impact de l'adoption de ces pratiques et limites de ces études.
- **Alimenter les initiatives** mondiales (4/1000) **et politiques** nationales (objectif de neutralité de la dégradation des terres) qui s'intéressent au sol.
- **Continuer les études scientifiques** sur l'impact des changements de pratiques agricoles (autres systèmes et paysages, ajouter d'indicateurs socio-economiques et biodiversité, etc.)



20-22 May 2019

Le Corum Conference Centre
Montpellier, France

Impact of agroecological practices on soil organic carbon sequestration using synchronic and diachronic approaches on ferralsols and andosols of Madagascar

Rakotovoao Harisoa Narindra^{1*}, Ramifehiarivo Nandrianina¹, Razakamanarivo Ramarson Herintsitohaina¹, Grinand Clovis², Razafimbelo Tantely Maminiana¹

¹Laboratoire des Radio-Isotopes, University of Antananarivo, BP 3383, Route d'Andraisoro Antananarivo, Madagascar

²Nitidae, 500 rue Jean-François Breton, Maison de la télédétection, Montpellier, France

*n.rakotovoao@yahoo.fr



Etude de la dynamique du carbone dans le sol suite à l'adoption de pratiques agroécologiques en Itasy

Rakotovao Harisoa Narindra, Ramifehiarivo Nandrianina, Razakamanarivo Ramarson Herintsitohaina, Grinand Clovis, Razafimbelo Tantely Maminiaina

