UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

MONTPELLIER SUPAGRO

Écoles doctorales	Institutions d'accueil	Encadrement

A2E
Agriculture, Élevage & Environnement

PERTINENCE DE L'AGRICULTURE DE CONSERVATION POUR TAMPONNER LES ALEAS CLIMATIQUES : CAS DES SYSTEMES DE CULTURE EN RIZ PLUVIAL AU LAC ALAOTRA, MADAGASCAR

Thèse en cotutelle
Présentée en vue de l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCES AGRONOMIQUES
par :

GUILLAUME BRUELLE

Jean-Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY	Professeur titulaire Université d'Antananarivo	Rapporteur
Jean ROGER-ESTRADE	Professeur AgroParisTech	Rapporteur *Président du jury*
Marco WOPEREIS	Docteur AfricaRice Center	Rapporteur
Tahina RAKOTONDRALAMBO	Docteur ANAE	Examinateur
Jacques WERY	Professeur Montpellier SupAgro	Examinateur
Lilia RABEHARISOA	Professeur titulaire Université d'Antananarivo	Directeur de thèse
Pablo TITTONELL	Professeur Wageningen University	Directeur de thèse

UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

MONTPELLIER SUPAGRO

Écoles doctorales		Institutions d'accueil		Encadrement	
A2E	SIBAGHE	FOFIFA	CIRAD	SPAD	AÏDA

FAHAMARINAM-POTOTRY NY FANALEFAHANA NY FIOVAOVAN'NY TOETR'ANDRO AMIN'NY ALALAN'NY VOLY MITANDRO NY TONTOLO IAINANA : VOLY VARY AN-TANETY ANY AMIN'NY FARITRA ALAOTRA, MADAGASIKARA

PERTINENCE DE L'AGRICULTURE DE CONSERVATION POUR TAMPONNER LES ALEAS CLIMATIQUES : CAS DES SYSTEMES DE CULTURE EN RIZ PLUVIAL AU LAC ALAOTRA, MADAGASCAR

CAN CONSERVATION AGRICULTURE BUFFER CLIMATE HAZARD? THE CASE OF UPLAND RICE CROPPING SYSTEMS IN THE LAKE ALAOTRA REGION OF MADAGASCAR

Thèse en cotutelle présentée en vue de l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCES AGRONOMIQUES
par :

GUILLAUME BRUELLE

Jean-Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY	Professeur titulaire, Université d'Antananarivo	Rapporteur
Jean ROGER-ESTRADE	Professeur, AgroParisTech	Rapporteur*
Marco WOPEREIS	Docteur, AfricaRice Center	Rapporteur
Tahina RAKOTONDRALAMBO	Docteur, ANAE	Examinateur
Jacques WERY	Professeur, Montpellier SupAgro	Examinateur
Lilia RABEHARISOA	Professeur titulaire, Université d'Antananarivo	Directeur de thèse
Pablo TITTONELL	Professeur, Wageningen University	Directeur de thèse

**Président du jury*

Remerciements

ELSEBEER

Journal du thésard accompli

journal home page : http://www.guillaume-bruelle.be.ma/

De la contribution à l'étude du développement neuro-synaptique en milieu contrôlé : évaluation de l'impact de populations exogènes sur l'efficience par l'outil de modélisation ***MERCI*** (Modèle d'Étude des Relations Cognitives en Interactions)

G. Bruelle [a,*]

[a] *Doctorant en cotutelle (Madagascar/France) Université d'Antananarivo - Montpellier SupAgro, écoles doctorales A2E - SIBAGHE*
guillaume.bruelle@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:
Received 1 January 2012
Received in revised form 3 November 2014
Accepted 31 December 2014

Keywords:
Remerciements
Patience
Indulgence
Bakchich

ABSTRACT

Il est largement admis que la thèse est une démarche de recherche individuelle. Elle est centrée sur une problématique émanant d'une demande extérieure, et elle répond au besoin égoïste d'observer, de comprendre, de s'approprier, et dans le plus optimiste des cas de résoudre un problème donné. De nombreuses interrogations découlent alors de ce processus de réflexion: Est-il légitime de faire d'une problématique collective une affaire individuelle ? Existe-t-il un véritable problème ou s'en convainc-t-on ? La démarche est-elle purement personnelle ? Une co-réflexion induit-elle un biais ? De quelle nature et à quel degré ? Y'a-t-il du bisphénol A dans le capuchon du stylo que je mâchouille ? L'objectif de cette étude a été de répondre à toutes ces questions de la manière la plus complète. Le modèle dynamique MERCI, validé et éprouvé par ailleurs, m'a permis de retracer l'évolution chronologique du développement neuro-synaptique en interrelation cognitive permanente avec son environnent sur une durée de 3 ans. Si certaines interrogations sont restées en suspens, l'étude a levé le voile sur l'impact de l'environnement social en milieu contrôlé : Oui, c'est principalement grâce à l'entourage personnel et professionnel que l'on parvient à mener sa thèse à terme, sans diminution d'efficience. L'interaction avec son environnement est donc primordiale, voire une condition *sine qua none*. MERCI intègre une très grande quantité de paramètres environnementaux que je n'ai pu exhaustivement citer dans cette étude. L'omission volontaire de certains paramètres participe à l'effort de synthèse pour une facilité de compréhension, mais il est important de se rappeler que tous les paramètres environnementaux ont eu un impact positif significatif.

© Elsebeer. Tous droits réservés

1. Introduction

La thèse, le doctorat, ou encore *Philosophiæ Doctor* (Ph.D.) dans les systèmes anglo-saxons, est un travail de recherche original d'un jeune chercheur en sciences ou en lettres. Mais comment devient-on « jeune chercheur » ? Là où certains y voient une vocation, une destinée ou un parcours dicté par le grand dessein intelligent de la providence, d'autres y voient un cheminement logique plus ou moins déterministe suivant le principe de causalité. Dans tous les cas, le parcours est, ou du moins j'aime à croire qu'il est influencé par de nombreux facteurs et particulièrement par les rencontres et les interactions qui se créent.

Avant tout, il y a un postulat difficilement réfutable en sciences naturelles, mais peut-être plus discutable en sciences sociales : nous existons grâce à nos parents (Anne-Marie & Henri, 1987). Si je dois piocher quelques indices dans les 27 ans qui se sont écoulés pour justifier cette thèse, je retiendrais ceux-ci : Les mots fléchés, les parties de Scrabble©, les poèmes sont autant de petits moments de vie aux travers desquels ma mère m'est apparue telle une femme de lettres et de l'être, rendant l'apprentissage ludique et alimentant ma soif de connaissance. On pourra aussi supposer que les innombrables moments passés avec mon père dans les champs de maïs, de riz, d'oignons, de tomates, plus intéressé par les ballades en tracteur et les pique-niques dominicaux que le volet agronomique, auront lentement percolé, diffusé et inconsciemment contaminé ma pensée. Après mon décollage de Madagascar pour atterrir sur la piste de l'enseignement supérieur en France, le relais a été pris, de manière assez naturelle, par des personnes que je considère aujourd'hui comme mes seconds parents (Kathleen & Bernard, 2005). Enfin, s'il y a une personne à cause de qui, mais qui préfèrera me reprendre et préciser « grâce à qui » je me suis lancé dans cette aventure, c'est indéniablement

Hermine (2007). À l'origine de tout ce qui a suivi, elle m'a encadré, coaché, boudé, changé et appris bien des choses, tant au plan personnel que professionnel. Je suis donc arrivé, par un concours de circonstances, en stage de fin d'études au CIRAD à Madagascar. « La boucle est bouclée » pourrait-on dire, mais bien au contraire, cela n'a été que le début de l'aventure, mes premiers contacts timides avec le monde de la recherche, un avant-goût du milieu professionnel, une démystification du développement. L'acclimatation dans cet univers nouveau s'est faite très naturellement, sans choc ni déception. Peut-être n'ai-je pas eu d'attente particulière. Mais surtout, j'ai été guidé par trois principes : la réflexion (Scopel, 2010), la sagesse (Naudin, 2010) et le savoir-vivre (Penot, 2010).

L'objectif de cette étude est… flou ! La problématique est vague, les questions sont nombreuses, mais je m''intéresserai ici peut-être plus à la méthode qu'aux résultats. De manière générale, j'utiliserai l'outil de modélisation MERCI pour souligner l'importance de chaque paramètre.

Table 1 : Liste des paramètres utilisés dans le modèle MERCI

Nom	Description	Référence
Paramètres d'encadrement général		
EG_Dir_MG	Directrice de thèse pour l'Université d'Antananarivo	(Rabeharisoa, 2012)
EG_Dir_NL	Directeur de thèse pour Montpellier SupAgro	(Tittonell, 2012)
EG_Init_MG_FR	Co-encadrant de thèse à Antananarivo et Montpellier	(Scopel, 2012)
EG_Suivi_MG_FR_NL	Co-encadrant de thèse à Antananarivo, Montpellier et Wageningen	(Naudin, 2012)
S_Help_MG_FR	Grande assistance à personne en danger	(Hary, Brigitte, Anne-Laure, & Jocelyne, 2012)
S_DR_MG	Directrice scientifique du FOFIFA	(Rakotoarisoa, 2012)
Paramètres d'encadrement ponctuel		
EP_Mod_FR	Travail de fond sur le chapitre II qui deviendra le chapitre III	(Affholder, 2012)
EP_Zik_FR	Travail de fond sur le chapitre III qui était en fait le chapitre II	(Ripoche, 2012)
EP_Rice_MG	Expertise sur la variété de riz B22	(Dusserre, 2012)
EP_Cart_FR	Aide à la mise en œuvre de l'analyse CART	(Delmotte, 2012)
EP_Clim1_FR	Accès aux modèles mondiaux de scénarios de changement climatique	(Sultan, 2013)
EP_BDD_MG	Capitalisation des données du projet BV/Lac	(Domas, 2012)
EP_Voy_WWW	Mobilité et variabilité	(Corbeels, 2012)
EP_Clim2_FR	Climate-smart contribution	(Torquebiau, 2014)
EP_Stat_FR	Analyse de la variance en composantes principales multi-variées	(Letourmy, 2012)
EP_Val1_MG	Rapporteur à Antananarivo	(Randriamboavonjy, 2014)
EP_Val2_MG	Examinateur à Antananarivo	(Rakotondralambo, 2014)
EP_Val3_FR	Rapporteur à Montpellier	(Roger-Estrade, 2014)
EP_Val4_FR	Rapporteur à Montpellier	(Wopereis, 2014)
EP_Val5_FR	Examinateur à Montpellier	(Wery, 2014)
Paramètres de soutien		
S_M&M_MG_FR	Accompagnement et métamorphose	(Marie & Marion, 2010)
S_Fam1_FR	Condition *sine qua none* au succès	(Cécile, 2003)
S_Fam2_FR	Intermède Arlésien	(Chantal & Maurice, 2007)
S_Fam3_FR	Intermède Cressois	(Léopold, Salomé, Sophie, & Thierry, 2012)
S_Fam4_FR	Intermède Marseillais	(Diégo, Kim, Nanou, & Nicolas, 2012)
S_Fam5_FR	Intermède Toulono-Niçois	(Vianney, Jeanne, Christelle, Valérie, & Maman, 2012)
S_A&M_FR	Découverte de Montpellier	(Ângela & Michèle, 2012)
S_M&E_MG	Convivialité et gastronomie à Antananarivo	(Marianne & Eric, 2012)
S_Proj_FR	Figure paternelle vidéo-projetée	(Thomas, 2013)
S_Sub_FR	Substitut de beaucoup de choses	(Raphaël, 2007)
S_Eng_FR	Tradutor Inglês brasileira	(Claudia, 2014)
S_Gout_MG_FR	Gouteur par sécurité	(Thomas, 2012)
S_0/1_MG_FR	Ascenseur émotionnel	(Céline, 2010)
S_Bur_MG	Mitabataba ao @birao avec café et chocolat	(Mamy & Jean-François, 2012)
S_Sum_MG	Communauté des thésards de SCRiD-SPAD	(Lalaina & Laingo, 2012)
S_4L_MG	Chauffeuse, garageuse et dépanneuse	(Emilie, 2014)
S_Max_WWW	Résistance et résilience inconditionnelles	(Manitra, 2012)

2. Matériels et méthodes

Dans cette section, je présente les différents paramètres utilisés dans le modèle socio-dynamique MERCI (**Table 1**). Chaque paramètre intervient spécifiquement dans un module particulier. Le module d'encadrement général modélise le développement neuro-synaptique d'un point de vue scientifique, de manière dynamique et continue sur toute la durée simulée. Sa construction est largement inspirée du modèle ECOLE (Etude des COnnaissances, de la Lecture et de l'Ecriture). Nous ne reviendrons donc pas sur le détail de sa structure, largement documentée dans la littérature scientifique. Le module d'encadrement ponctuel modélise les chocs et perturbations qui induisent des améliorations et des changements dans la croissance neuronale. Ici encore, les algorithmes sont inspirés d'un modèle connu : SCIENCE (Simulation des Chocs et Interventions Exogènes sur la Neuro-Croissance

de l'Etudiant). Enfin, les simulations sont contenues dans un cadre architectural défini par le module de soutien. Régis par les lois de la modélisation expérimentale, ce module guide et optimise le développement jour après jours. Il est construit sur les bases du modèle CŒUR (Cadre Original et Expérimental des Unions Résistantes). Il en résulte un modèle relativement complexe avec de nombreuses interactions entre modules, paramètres et variables. Après avoir calibré le modèle dans les conditions de thèse en cotutelle, j'ai simulé le développement neuro-synaptique sur trois ans, du 1ier janvier 2012 au 31 décembre 2014.

3. Résultats & Discussion

De manière générale, le développement neuro-synaptique à la fin des trois ans de simulation semble abouti, mais la marge de progression et les possibilités d'évolutions sont encore grandes, voire infinies. De nombreuses imperfections et incohérences subsistent, mais il faudrait un temps de simulation plus long pour pouvoir corriger ces défauts. Néanmoins les sorties du modèle indiquent une véritable robustesse du modèle MERCI ; ce qui illustre l'universalité des modèles ECOLE, SCIENCE et CŒUR.

Etant donné la complexité du modèle et le nombre de variables de sortie, il est difficile d'émettre des résultats clairs. Cependant nous auront remarqué l'importance de tous les paramètres, sans exception, dans la détermination des sorties du modèle. Même s'il serait bon de le confirmer par une analyse de sensibilité, je peux affirmer avec certitude que chaque paramètre a participé, avec le même poids, au résultat final. Dans ce contexte de cotutelle, il semble donc important de ne négliger la calibration d'aucun paramètre.

4. Conclusion

Le message est peut-être confus. Mon intention est peut-être maladroite. Ma volonté d'être originale, de marquer le coup – le tout mêlé à une sorte de pudeur et/ou de fausse modestie – rendent surement le message incompréhensible. Néanmoins la sincérité y est. Et le résultat a été obtenu grâce à la combinaison des tous les paramètres du modèle MERCI !

Références

Affholder, F. (2012). Merci de ne jamais t'être (trop) découragé et d'avoir supporté mon insolence durant nos interminables discussions passionnées ! Tu m'as endoctriné... Non !? Juste appris beaucoup de choses. *Qu'est-Ce Que La Science ?*, de 2012 à 2014.

Ângela, & Michèle. (2012). Merci d'avoir pris soin de moi lors de mon premier séjour en France. Découvrir la vie montpelliéraine à vos côtés a été une superbe expérience ! *Amitié, Psychologie & Conseils*, de mars à juillet 2012.

Anne-Marie, & Henri. (1987). Merci pour votre soutien et votre amour inconditionnel. *Parents, Famille & Education*, du 09 Octobre 1987 à aujourd'hui.

Cécile. (2003). Merci ! Ce mot est-il seulement suffisant pour exprimer ma gratitude ? Grâce à toi, ton "petit" prend son envol et il est temps que tu prennes soin de toi, tu l'as largement mérité ! *Parents, Famille & Education*, de 2003 à aujourd'hui.

Céline. (2010). Merci ! A cause de toi, j'ai eu envie de faire une thèse ; grâce à toi je me suis parfois demandé pourquoi je fais une thèse !? *Amitié, Psychologie & Conseils*, de 2010 à aujourd'hui.

Chantal & Maurice. (2007). Merci pour votre accueil ! Dès notre rencontre je me suis senti chez moi. Des remerciements particuliers à Chantal : on vit chacun des épreuves, et à tes côtés, j'ai appris à relativiser. Merci ! *Parents, Famille & Education*, de 2007 à aujourd'hui.

Claudia. (2014). Merci d'avoir pris soin de moi dans la phase finale ! Une moqueca de peixe... et le moral est au top. *Amitié, Psychologie & Conseils*, de juillet à novembre 2014.

Corbeels, M. (2012). Merci pour ta polyvalence ! Tu es venu du Brésil rien que pour me faire découvrir mon terrain, en France rien que pour corriger mon anglais, ailleurs dans le monde rien que pour une bière. *Science & Voyage*, de 2012 à 2014.

Delmotte, S. (2012). Merci pour le temps que tu m'as accordé. J'ai pu, grâce à tes conseils, mener à terme mon analyse statistique CART. *Les Stat' C'est Fun*, mars/avril 2012.

Diégo, Kim, Nanou, & Nicolas. (2012). Je n'aurai jamais autant non-visité Marseille ! Merci pour tous ces instants philosophiques au Panier. *Parents, Famille & Education*, de 2012 à aujourd'hui.

Domas, R. (2012). Merci pour ta rigueur et ta minutie ! L'exploitation de la base de données parcelles n'aurait pas été possible sans l'énorme travail que tu as fourni en amont. *Les Travers Des Bases de Données*, de février à juillet 2012.

Dusserre, J. (2012). Merci pour ta disponibilité ! Face à mes questions les plus improbables, tu as toujours trouvé une réponse scientifique, avec une réactivité impressionnante. *Le Riz Sous Toutes Ses Formes*, de 2012 à 2014.

Emilie. (2014). Merci d'avoir pris soin d'elle ! Tu lui a refait une beauté et elle nous a permis de trouver les meilleurs riz cantonnais et mine-sao de Tana. *Amitié, Psychologie & Conseils*, de Janvier 2014 à aujourd'hui.

Hary, Brigitte, Anne-Laure, & Jocelyne. (2012). Vous avez accédé à toutes mes requêtes, aussi farfelues soient-elle, et m'avez tellement facilité la vie ! Merci pour tout, vous êtes exceptionnelles ! *Encadrement & Formation*, de 2012 à 2014.

Hermine. (2007). Merci pour tellement de choses... Tu as été une mère, une soeur, un pote, une amie ! Tu l'es toujours d'ailleurs, alors surtout garde ta zouk attitude. *Amitié, Psychologie & Conseils*, de 2007 à aujourd'hui.

Kathleen, & Bernard. (2005). Merci de m'avoir pris sous votre aile et de m'avoir si bien aiguillé. *Parents, Famille & Education*, de 2002 à aujourd'hui.

Lalaina, & Laingo. (2012). Comment "résumer" votre contribution ? Ben voilà... Tsara finamànana ! Misaotra ! *Amitié, Psychologie & Conseils*, de 2012 à 2014.

Léopold, Salomé, Sophie, & Thierry. (2012). Merci de m'avoir babysitté à Montpellier ! Je n'aurais pu rêver d'un meilleur accueil : piscine, repas et jeux vidéos. *Parents, Famille & Education*, de 2012 à aujourd'hui.

Letourmy, P. (2012). Merci... Merci d'avoir compris avant moi et pour moi que je ne choisirai pas le bon test ! Chacune de tes interventions a été salvatrice. *Les Stat' C'est Fun*, de 2012 à 2014.

Mamy, & Jean-François. (2012). Misaotra betsaka ô ! On aura passé de super moments, très conviaux, dans ce bureau 207 du FOFIFA Ampandrianomby. Merci pour votre soutien. *Amitié, Psychologie & Conseils*, de 2012 à 2014.

Manitra. (2012). Merci pour tout ! Tu m'as supporté dans le meilleur mais surtout dans le pire. Je ne te remercierai jamais assez de m'avoir subie pendant ces années de thèse. *Amour, Gloire et Beauté*, de 2012 à aujourd'hui.

Marianne, & Eric. (2012). Merci pour votre accueil ! Votre générosité et votre hospitalité ont donné une saveur toute particulière à chacun de mes séjours à Tana. *Amitié, Psychologie & Conseils*, de 2012 à 2014.

Marie, & Marion. (2010). Merci d'avoir été là ! Vous m'avez probablement changé et grandi. Merci pour tous ces moments de vie passés ensemble. *Amitié, Psychologie & Conseils*, de 2010 à aujourd'hui.

Naudin, K. (2010). Merci pour ton investissement, ta patience, ta confiance et ton karaoké. *Encadrement & Formation*, de 2010 à aujourd'hui.

Naudin, K. (2012). Merci pour ton encadrement très rapproché ! Tu t'es pleinement investi dans cette thèse, et à l'image de ton encadrement pendant le stage de MII, tu t'es rendu disponible à toutes les étapes, des plus futiles aux plus importantes. *Encadrement & Formation*, de 2012 à 2014.

Penot, E. (2010). Merci pour ton soutien, ta disponibilité et tes rhums arrangés. *Encadrement & Formation*, de 2010 à aujourd'hui.

Rabeharisoa, L. (2012). Merci pour ton encadrement et ton suivi. Tu es en grande partie responsable du succès de cette cotutelle franco-malgache, et je t'en suis très reconnaissant. *Encadrement & Formation*, de 2012 à 2014.

Rakotoarisoa, J. (2012). Merci pour ta disponibilité. Malgré ton emploi du temps de ministre tu as toujours trouvé le temps de t'occuper de mon cas, sans quoi cette thèse n'aurait été possible. Misaotra betsaka ! *Encadrement & Formation*, de 2012 à 2014.

Rakotondralambo, T. (2014). Merci pour votre flexibilité. Vous avez accepté de faire partie du jury de cette thèse, qui s'est déroulée dans des conditions assez particulières tant au niveau logistique qu'institutionnel. *Jury D'excellence*, 19 décembre 2014.

Randriamboavonjy, J.-C. (2014). Merci pour votre flexibilité. Vous avez accepté de faire partie du jury de cette thèse, qui s'est déroulée dans des conditions assez particulières tant au niveau logistique qu'institutionnel. *Jury D'excellence*, 19 décembre 2014.

Raphaël. (2007). Gwada merci chéwiie de t'être engagé dans la même galère par solidarité ! Je te décerne la palme du meilleur cuistot de la coloc de ouf. *Amitié, Psychologie & Conseils*, de 2007 à aujourd'hui.

Ripoche, A. (2012). Merci pour ton soutien et ta bonne humeur. Tu as toujours su déceler mes moments de faiblesse pour venir me coller dans la tête un air entêtant de Joe Dassin ou autre variétiste inoubliable ! *La Ballade Des Gens Heureux*, de 2012 à 2014.

Roger-Estrade, J. (2014). Merci pour votre flexibilité. Vous avez accepté de faire partie du jury de cette thèse, qui s'est déroulée dans des conditions assez particulières tant au niveau logistique qu'institutionnel. *Jury D'excellence*, 19 décembre 2014.

Scopel, E. (2010). Merci pour ta confiance, tes conseils, ton implication, ta patience, ta patience et... ta patience ! *Encadrement & Formation*, de 2010 à aujourd'hui.

Scopel, E. (2012). Merci d'avoir cru en moi ! Tu es à l'origine de cette thèse, et tu as su gérer la carotte et le bâton d'une main de maître pour m'amener jusqu'ici. *Encadrement & Formation*, de 2012 à 2014.

Sultan, B. (2013). Merci pour ton investissement ! Tu m'as initié très patiemment à une plateforme et un langage de programmation qui m'étaient complètement étrangers. J'ai pu, grâce à toi, accéder à une méga base de données. *Les Mystères Du Changement Climatique*, septembre/octobre 2013.

Thomas. (2012). Merci d'avoir testé le modèle et l'appart vide avant moi ! Tu m'auras presque trop facilité la tâche. *Amitié, Psychologie & Conseils*, de 2012 à 2014.

Thomas. (2013). Excellent guitariste, cuisinier amoureux des bons produits et culture générale impressionnante... Merci d'avoir partagé avec moi un peu de ton talent ! *Amitié, Psychologie & Conseils*, de 2013 à aujourd'hui.

Tittonell, P. (2012). Merci d'avoir accepté de participer à cette aventure. Tu as su intervenir à des moments clés et le partage de ton expérience a été très formateur. *Encadrement & Formation*, de 2012 à 2014.

Torquebiau, E. (2014). Merci pour ton investissement. Tu as directo-accepté, sans aucune hésitation, de me conseiller et de participer à l'étude sur l'agriculture climato-intelligente. *Les Mystères Du Changement Climatique*, de juillet à décembre 2014.

Vianney, Jeanne, Christelle, Valérie, & Maman. (2012). Merci pour ces instants en famille. Vous avez réussi à me faire oublier la thèse pendant ces moments. Et qu'est-ce que ça fait du bien ! *Parents, Famille & Education*, de 2012 à aujourd'hui.

Wery, J. (2014). Merci pour votre flexibilité. Vous avez accepté de faire partie du jury de cette thèse, qui s'est déroulée dans des conditions assez particulières tant au niveau logistique qu'institutionnel. *Jury D'excellence*, 19 décembre 2014.

Wopereis, M. (2014). Merci pour votre flexibilité. Vous avez accepté de faire partie du jury de cette thèse, qui s'est déroulée dans des conditions assez particulières tant au niveau logistique qu'institutionnel. *Jury D'excellence*, 19 décembre 2014.

Fintina

Any Afrika, ny voly mitandro ny tontolo iainana (VMT) dia nahely mba hanatsara ny tsiron'ny tany sy hampivoatra maharitra ny famokaran'ny mpamboly any an-toerana. Ny VMT araka ny famaritana nataon'ny FAO dia miankina amin'ny fampihenana ny fiasana ny tany, ny fandrakofana ny tany mandritra ny voly ary ny fifandimbiasam-boly. Maro ny tombotsoa entin'ny VMT, ny fahefan'ny rakotra manatsara ny hamandoan'ny tany dia manalefaka ny fikorontanana ateraky ny tsy fahampian'ny rano mandritra ny fotoam-pambolena, izany hoe tsy mampiovaova ny vokatra azo rehefa tsy ampy na ratsy ny fizarazaran'ny orana mandritra ny taona. Amin'ny faritra Alaotra any Madagasikara, ny voly vary an-tanety dia tena miroborobo. Ny orana eny amin'iny faritra iny nefa dia miovaova isan-taona, koa ny voly rakotra no tekinika azo antoka mba hahafahana mamokatra hatrany. Ny tanjona amin'ity fikarohana ity dia ijerena ny fahafahan'ny voly rakotra miatrika ny fiovaovan'ny toe-trandro. Manoloana ny fitomboan'ny hamaroan'ny olona sy ny fiovaovan'ny toe-trandro any Afrika, ny VMT dia naroso ho vahaolana "climate-smart", izany hoe voly afaka mampitombo ny vokatra sy mifanaraka amin'ny fiovaovan'ny toetr'andro. Ny fikarohana maro natao tany amin'ny Afrika dia namoaka ny fahefan'ny voly rakotra mitazona, na ihany koa mampitombo ny famokarana amin'ny fotoana maharitra, sy amin'ny fotoana fohy manoloana ny fahakelezana na/sy ratsy fitsinjarana ny orana amin'ny faritra afrikanina .Izany dia mandroso fa afaka miatrika ny fiovaovan'ny toetr'andro, izay hita taratra any amin'ny faritra Afrika, ny voly rakotra. Manampy izany, ny fahefan'ny voly rakotra hampihena ny vokatry ny fiovaovan'ny toetr'andro izay mihazona ny carbone anaty tany volena dia mbola tsy mazava satria ny fihazonana ny carbone dia miseho indrindra eo ambony tany ka mametraka fisalasalana eo amin'ny fitombonan'ny carbone ao anatin'ny tany. Avy eo dia niompana be be kokoa tamin'ny fahefan'ny voly rakotra mampihena ny voka-dratsi'ny fiovaovan'ny toetr'andro ny fikarohana natao. Raha niainga avy amin'ny tarehimarika azo avy amin'ny fanarahana tanimboly izay mivoatra manakany amin'ny VMT nandritra ny taom-pambolena efatra dia tsikaritra fa misy ny fitombon'ny vokatra dieny amin'ny taona voalohany fampiharana ny VMT. Ary misy fitomboana hatrany izany isan-taona ry hita ihany koa fa tsy dia miaka-midina loatra ny vokatra na dia miovaova aza ny toetr'andro. Ireo tarehimarika ireo ihany koa dia mampiseho fa tsy dia manana olana ny fambolena aloha na tara loatra amin'ny VMT. Fa tsapa fa manan-danja be eo amin'ny antony mampiovaova ny vokatra ny toetr'andro any amin'ny faritra nanaovana ny fikarohana. Nahafahana namoaka ny tombotsoan'ny VMT manoloana ny toetr'andro any amin'ny faritra Alaotra, indrindra indrindra teo amin'ny fanatsarana ny hamandoan'ny tany. Fa ireo vokatra azo teo am-pelatanana ireo dia tsy nahafahana nanamarina io tolo-kevitra io. Ka dia niompana

be be kokoa tany amin'ny vokatry ny rakotra eo amin'ny fanatsarana ny hamandoan'ny tany sy ny voka-bary manoloana ny zava-misy ara toe-karena sy ara-toetr'andro ny fikarohana. Ka noho izany dia nanao fanandramana virtoaly miaraka amin'ny modely PYE-CA mba ahafahana mijery ny zavatra mety hitranga amin'ny karazana tany sy tarehimarika mikasika ny toetr'andro maromaro. Ka dia voamarina tamin'izany ny fahefan'ny rakotra amin'ny fampihenana ny riaka. Hita tamin'izany ihany koa ny fotoam-pambolena ny vary tena mety ahafahana miala amin'ny fikorontanana ateraky ny tsy fahampian'ny rano. Ny vokatry ny fikarohana dia namoaka fa ny fotoam-pambolen'ny ankamaroan'ny tantsaha, ny hamandoan'ny tany ho an'ny voly vary dia tsy dia miankina loatra amin'ny rano entin'ny riaka. Ny tombotsoan'ny fihenan'ny riaka mantsy dia tsy hita raha tsy misy antony manokana maha-voafetra ny hamandoana azon'ny vary toy ny fambolena mialoha azy na ny fanajariana mba hampihena ny fiovaovan'ny vokatra. Ity fikarohana ity dia nanampy antsika ahazo be be kokoa ny vokatry ny VMT eo amin'ny hamandoan'ny tany manoloana ny zava-misy ara toe-karena sy toetr'andro misy teo anivon'ny toerana nanaovana ny fikarohana. Mba hanohizana ity asa ity dia tsara raha manao fikarohana amin'ny lafiny seham-pihariana mba ahafahana mamantatra ny sakana sy ny tombotsoa ateraky ny voly rakotra manoloana ny zava-misy ara-tsosialy sy ara ekonomika ao amin'ny faritra Alaotra.

Teny manan-danja : Fambolena ; Afrika ; Rakotra ; Modely ; Orana ; Riaka

(Traduit du français par Lalaina B. Ranaivoson et Laingo I. Rasolofo)

Résumé

En Afrique sub-saharienne (ASS), l'agriculture de conservation (AC) est diffusée afin de d'améliorer durablement la productivité de l'agriculture familiale. Cette AC est basée sur les principes de travail réduit du sol, d'une couverture permanente et de rotations introduisant des légumineuse. Parmi tous les bénéfices potentiels de l'AC, le mulch peut améliorer le bilan hydrique et tamponner le stress hydrique, et donc sécuriser les rendements, lorsque les pluies sont limitées et/ou aléatoirement distribuées. A Madagascar, la région du lac Alaotra connaît une forte expansion de la riziculture pluviale. Etant caractérisée par une distribution des pluies très erratique, la pratique de l'AC semble pertinente pour sécuriser la production pluviale. L'objectif de cette étude est donc d'évaluer dans quelle mesure cet aléa climatique est tamponné par l'AC. Tout d'abord, à travers revue de la littérature scientifique, nous avons ouvert à une problématique plus large. En effet, au regard des projections de croissance démographique et de changement climatique (CC) en ASS, l'AC est proposée comme solution '*climate-smart*'; i.e. une agriculture capable d'augmenter la productivité et de s'adapter au CC tout en l'atténuant. Les études identifiées en ASS montrent une capacité de l'AC à augmenter les rendements sur le long-terme, et à plus court-terme dans les contextes climatiques où les pluies sont faibles et/ou mal distribuées. Cela suggère donc une capacité de l'AC à s'adapter au CC qui prévoit une augmentation de la variabilité de la distribution des pluies en ASS. La capacité de l'AC à atténuer le CC en séquestrant du carbone (C) dans les sols reste en suspens car le stockage du C se fait principalement en surface et la stabilité de ce C est questionnée. Nous nous sommes ensuite recentrés sur le sujet et la zone de cette étude afin d'évaluer le potentiel de l'AC à tamponner l'aléa pluviométrique. En se basant sur les données de suivi de parcelles en transition vers l'AC sur quatre saisons contrastées, nous avons constaté une augmentation des rendements moyens en riz pluvial dès la première année de pratique, avec une augmentation progressive des rendements et une diminution de la variabilité. Les données ont également suggéré une sécurisation des semis précoces et tardifs en AC. Nous avons constaté un poids important du climat sur la variabilité des rendements dans la zone d'étude. Cette analyse exploratoire nous a donc permis d'observer des effets positifs de l'AC dans le contexte climatique du lac Alaotra, suggérant notamment un effet potentiel sur la ressource hydrique. Mais les informations à notre disposition ne nous ont pas permis de vérifier cette hypothèse. Nous nous sommes donc intéressés à l'impact du mulch sur le bilan hydrique et les rendements en riz pluvial dans les conditions agro-climatiques de la zone d'étude. Nous avons effectué une expérimentation virtuelle, en utilisant le modèle PYE-CA. Nous avons confirmé la capacité du mulch à réduire le ruissellement. Nous avons identifié les dates de semis pour lesquelles le riz pluvial est le moins impacté

par le stress hydrique dans la région. Les résultats nous ont indiqué que pour les dates de semis majoritairement pratiquées par les agriculteurs, et dans un éventail de conditions de sol, la disponibilité en eau est très peu affectée par une modification du ruissellement. Les bénéfices d'une réduction du ruissellement apparaissent dans des conditions hydriques plus stressantes telles que des dates de semis précoce ou une intensification, en diminuant la variabilité des rendements. Cette étude nous a permis de mieux appréhender les impacts de l'AC sur le bilan hydrique dans le contexte climatique de notre zone d'étude. Pour faire sens, ces résultats sont à intégrer à l'échelle exploitation, voire plus large, pour identifier les contraintes et avantages induits par les systèmes en AC dans le contexte socio-économique du lac Alaotra.

Mots clés : Agriculture familiale ; Afrique sub-Saharienne ; Mulch ; Modélisation ; Pluie ; Ruissellement

Abstract

Conservation agriculture (CA) is widely disseminated at large scale in sub-Saharan Africa (SSA) in order to restore soil fertility and sustainably increase crop production of family farming. As defined by the FAO, CA is based on the three principles of minimal soil disturbance, permanent soil cover, and complex crop rotation. Among all the beneficial functions of CA, its ability to improve water balance through mulching can buffer water stress during crop cycle, and hence secure yields when rainfall are limited or poorly distributed. In the Lake Alaotra region of Madagascar, the area under rainfed upland rice has expanded lately. The region being characterized by an erratic rainfall distribution, intra- and inter-annually, CA practice seems appropriate to secure rainfed production. The main objective of this study is to evaluate to which extent this climate hazard can be buffered through the practice of CA. Firstly, we ran a review of the scientific literature to better understand the impact of CA in a wider context. Regarding the projections of population growth and climate change for SSA, CA is considered as a climate-smart option, i.e. an agriculture able to simultaneously mitigate climate change, adapt to this change, and sustainably increase productivity. The different studies illustrated the capacity of CA to maintain, or even increase production in the long-term, and in the shorter-term under limited or poorly distributed rainfall African contexts. These results suggested an ability of CA to adapt to climate change, predicting an increase in rainfall variability in SSA. However, the climate change mitigation through carbon sequestration under CA remained unclear because of a superficial storage which may be unsteady. Then, we focused on the study area to evaluate the potential of CA to buffer rainfall hazard. Using a 4-year dataset monitoring farmers' fields transitioning to CA, we observed a gradual increase in upland rice average yield with a decrease in variability over the consecutive years of CA practice. The data also suggested a capacity of CA to secure early or late sowing. But agro-environmental factors were mainly impacting yields in the region. This exploratory analysis allowed us to observe positive impacts of CA under the climate conditions of the Lake Alaotra region, suggesting an impact on water balance but no information was available to validate this hypothesis. Finally, we focused more precisely on the impact of mulch on water balance and upland rice yields under the climate conditions of the region, using a modeling approach. We ran an virtual experiment with the model PYE-CA to simulate a range of soil and climate conditions met in the region. We confirmed the ability of mulch to reduce, or even suppress, efficiently surface water runoff. We identified the sowing period within which rice growing would be the least impacted by water stress in the region. The results indicated that water availability for rice cropping was slightly impacted by a decrease in runoff for the majority of soil conditions and farmers' usual sowing dates. Beneficial effects of runoff reduction appeared under

higher water stress conditions such as early sowing date or crop intensification and yield variability was decreased. This study allowed us to better apprehend the impacts of CA on water balance in the specific climate context of the study area. It would be interesting to integrate these results at the farm-level to identify the pros and cons of adopting CA under the socio-economic context of the Lake Alaotra region of Madagascar.

Keywords : Smallholder ; sub-Saharan Africa; Mulch ; Modeling approach; Rainfall; Runoff

Table des Matières

Remerciements **5**
Fintina **11**
Résumé **13**
Abstract **15**
Liste des figures **19**
Liste des tables **21**
Liste des abréviations **23**
Introduction générale **25**
1. Enjeux agricoles pour l'Afrique sub-Saharienne 25
2. Présentation de la zone d'étude 27
3. Hypothèse et objectifs de l'étude 29
Chapitre I Une option *climate-smart* pour l'agriculture familiale ? **31**
Synthèse 31
1. Introduction 33
2. Approach 35
3. Sustainably increasing crop productivity 39
4. Mitigating climate change 40
5. Adapting to climate change 42
6. Is CA a climate-smart option for all family farmers in SSA? 43
Chapitre II Qu'en est-il sur le terrain ? Cas du riz pluvial au Lac Alaotra **47**
Synthèse 47
1. Introduction 49
2. Materials and Methods 50
3. Results 55
4. Discussion 61
5. Conclusion 63
Chapitre III Impact du mulch sur le bilan hydrique **65**
Synthèse 65
1. Introduction 67
2. Material and Methods 67
3. Results 76
4. Discussion 82
5. Conclusions 83
Discussion générale & Conclusion **85**
1. Réponses aux hypothèses et objectifs de départ 85
2. Limites et perspectives de l'étude 89
Références bibliographiques **93**
Annexes **99**

Liste des figures

Figure 1: Une forte croissance de la population d'Afrique sub-Saharienne 25
Figure 2 : Une pluviométrie très aléatoire au Lac Alaotra 28
Figure 3 : Présentation de la zone d'étude 28
Figure 4: Conservation agriculture & climate-smart agriculture 35
Figure 5: Conservation agriculture & rainfall 42
Figure 6: Rainfall distribution 52
Figure 7: Overall yield distribution 54
Figure 8: Evolution of yield distribution 55
Figure 9: Rainfall & sowing strategies 57
Figure 10: Yields over the seasons 58
Figure 11: Yields & rainfalls 59
Figure 12: Factors impacting yield distribution 60
Figure 13: Modeling LAI 69
Figure 14: Rainfall distribution 73
Figure 15: Mulch decomposition 77
Figure 16: Surface water runoff 77
Figure 17: Biomass and grain yield 78
Figure 18: Soil water content 78
Figure 19: Simulated grain yield & climatic risk 79
Figure 20 : Le changement climatique 90
Figure 21 : La pluie en octobre 91

Liste des tables

Table 1: Literature search methods 34
Table 2: Conservation agriculture & economics 38
Table 3: Conservation agriculture & soil carbon content 41
Table 4: Monitored farmers' fields 51
Table 5: Dataset structure 53
Table 6: Nitrogen fertilization 56
Table 7: Yields and extreme sowing dates 59
Table 8: Model parameters 72
Table 9: The virtual experiment 73
Table 10: Minimum 'acceptable level of yield' 76
Table 11: Simulated grain yield 80
Table 12: Favorable sowing window 80
Table 13: Simulated water drainage 81
Table 14 : Culture du riz et temps de travaux 92
Table 15: Conservation agriculture & soil carbon content 100
Table 16: Conservation agriculture & rainfall 102

Liste des abréviations

ABACO	Agroecology-based aggradation-conservation agriculture
AC	Agriculture de conservation
AÏDA	Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles
ANAE	Association nationale d'actions environnementales
ASS	Afrique sub-Saharienne
CA	Conservation agriculture
CART	Classification and regression tree analysis
CC	Climate change / Changement climatique
CCAFS	Climate change, agriculture and food security
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CR	Climatic risk
CSA	Climate-smart agriculture
CV	Conventional / Conventionnel
ESSA	Ecole supérieure des sciences agronomiques
FAO	Food and agriculture organization
FOFIFA	Foibe-mpirenena momba ny fikarohana ampiharina amin'ny fampandrosoana ny ambanivohitra
FSW	Favorable sowing window
GHG	Greenhouse gas
GYL	Growth and yield limitation
HI	Harvest index
IPCC	Intergovernmental panel on climate change
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
IRC	Institut des régions chaudes
IRF	Intercepted rainfall by mulch
IWC	Initial soil water content
LAI	Leaf area index
MAEP	Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche
MJ	Méga joules
MRO	Mean runoff coefficient
MT	Minimum tillage

NT	No-tillage
PAMPA	Programme d'actions multi pays en agroécologie
PYE	Potential yield estimator
RO	Runoff coefficient
SCV	Système de culture en semis direct sous couvert végétal
SIBAGHE	Systèmes intégrés en biologie, agronomie, géosciences, hydrosciences, environnement
SPAD	Systèmes de production d'altitude et durabilité
SSA	Sub-Saharan Africa
STICS	Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard
TDR	Time-domain reflectrometry
UPR	Unité propre de recherche
VE	Virtual experiment
VEP	Virtual elementary plot
VMT	Voly mitandro ny tontolo iainana
WCCA	World congress of conservation agriculture
WHC	Water holding capacity of soil
WS	Water stress coefficient

Introduction générale

1. Enjeux agricoles pour l'Afrique sub-Saharienne

1.1. Objectif de sécurité alimentaire

Les projections sur les 100 prochaines années prévoient une diminution globale de la croissance démographique mondiale. Cette diminution devrait se traduire en une réduction de la croissance de la consommation des produits issus de l'agriculture (Alexandratos and Bruinsma, 2012). Cependant, il est important de remarquer que, même si la croissance démographique mondiale est amenée à diminuer du fait du ralentissement – voire du déclin – de cette croissance dans certains pays, les projections prévoient un maintien de cette croissance dans d'autres pays (Figure 1). Ces derniers, principalement situés en Afrique sub-Saharienne, présentent des problèmes de consommation alimentaire et des niveaux important de malnutrition. Selon les estimations, la production agricole en Afrique sub-Saharienne devra croître de 77% d'ici 2050 pour répondre à la demande alimentaire de sa population grandissante (Alexandratos and Bruinsma, 2012).

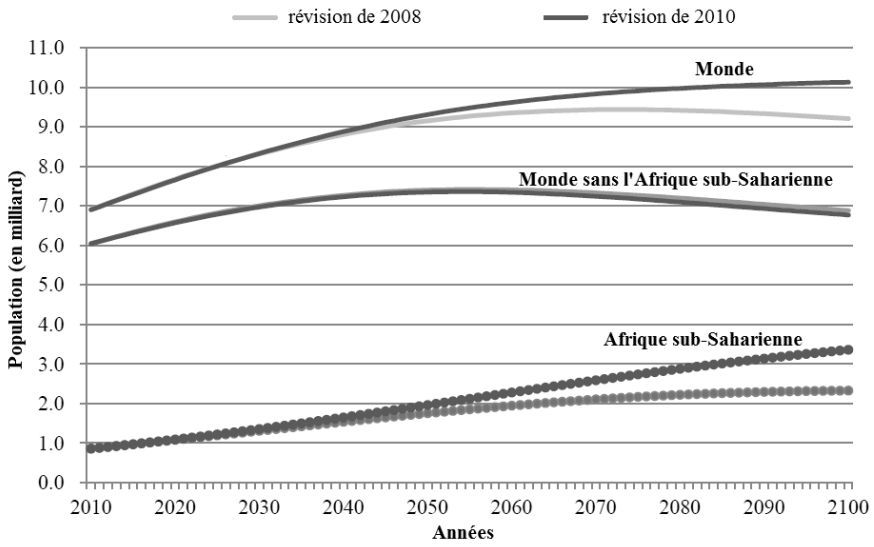


Figure 1: Une forte croissance de la population d'Afrique sub-Saharienne
Projection de l'évolution de la population des 100 prochaines années basée sur les chiffres de 2008 et réactualisée en 2010 (Alexandratos and Bruinsma, 2012).

1.2. Le changement climatique

Le changement climatique fait aujourd'hui consensus au sein de la communauté scientifique. Il est admit par la majorité que les activités humaines, par l'émission de gaz à effet de serre, en sont la principale cause. Parmi ces activités, l'agriculture a été identifiée comme première responsable de

l'enrichissement global de l'atmosphère en méthane (CH_4) et en protoxyde d'azote (N_2O) (IPCC et al., 2013). Ces gaz ont respectivement un pouvoir de réchauffement global 21 fois et 310 fois supérieures à celui du dioxyde de carbone (CO_2). En Afrique sub-Saharienne, les projections indiquent jusqu'à 2°C d'augmentation de la température à la fin de ce siècle. Les prédictions de changements de régimes pluviométriques sont plus incertaines et régionalisées. Néanmoins, elles suggèrent globalement des cumuls de précipitations saisonnières inchangés, un retard du démarrage de la saison des pluies et une augmentation en fréquence et en intensité des évènements extrêmes, tels que des épisodes de fortes pluies ou de sècheresse, durant les saisons pluvieuses.

1.3. L'agriculture de conservation

Dans ce contexte de forte croissance démographique et de changement climatique, il est primordial de développer des systèmes de production agricoles qui puissent accroître la production tout en s'adaptant et en atténuant les changements climatiques. Les décideurs, la communauté scientifique et la société civile s'accordent sur la nécessité de mettre en place une démarche durable pour atteindre cet objectif. Parmi les solutions mises en avant, l'intensification écologique (Doré et al., 2011) est de plus en plus considérée comme la solution la plus à même de répondre à l'objectif d'augmentation durable de la production. Dans cette optique, l'agriculture de conservation (AC), qui est une forme d'intensification écologique, est promue et diffusée à grande échelle en Afrique sub-Saharienne à travers des projets de développements. Considérés par la FAO comme adaptés aux contextes des agricultures familiales africaines, très contraints tant du point de vue agro-environnemental que du point de vue socio-économique, les systèmes en AC ont pour objectif de restaurer et maintenir la fertilité des sols en évitant les effets néfastes du labour répété et de la monoculture souvent observés en agriculture traditionnelle. L'AC est basé sur trois principes (http://www.fao.org/ag/ca/) :

1. L'absence de travail profond du sol : Idéalement, le sol ne doit jamais être labouré, ou alors le moins perturbé possible, et la culture est installée en semis-direct. L'objectif est de conserver les agrégats du sol, de ralentir la minéralisation de la matière organique et de développer l'activité biologique du sol.
2. Le maintien d'une couverture végétale permanente morte ou vive : Les résidus de culture ou la culture associée à la culture principale ont un rôle de couche protectrice pour le sol. L'objectif est d'améliorer le bilan hydrique par un accroissement de l'infiltration et une diminution de l'évaporation. Cette couche de matière organique permet aussi de limiter le développement des adventices et elle représente un apport d'éléments nutritifs pour le biota du sol et la culture.

3. La gestion de cultures en rotation et/ou en association : Cette gestion est réfléchie de manière à créer des synergies qui permettent le contrôle des adventices et des maladies, mais aussi de manière à diversifier les cultures afin d'optimiser l'utilisation des ressources naturelles, d'équilibrer la répartition des temps de travaux ou encore diversifier les sources de revenus. L'objectif est également de produire plus de biomasse végétative aérienne pour être à même d'en maintenir tout ou partie comme couverture du sol.

Si les bénéfices potentiels énoncés ici semblent en accord avec les objectifs de production à moyen, voire long-terme, l'AC n'est pas pour autant la panacée en Afrique sub-Saharienne (Giller et al., 2009). En effet, l'adoption de ces systèmes par les agriculteurs reste encore limitée à ce jour. Le succès de la diffusion et de l'adoption de systèmes innovants dépend de nombreux facteurs agronomiques, environnementaux, économiques et sociologiques. Mais dans un contexte d'agriculture familiale, souvent de subsistance, ce succès réside aussi dans la capacité des systèmes proposés à répondre aux objectifs des agriculteurs sur le court-terme. Il est donc important de pouvoir évaluer la pertinence de ces systèmes, c'est-à-dire de prendre en compte les spécificités du contexte dans lequel on apporte l'innovation afin de cerner les opportunités et les contraintes pour pouvoir *in fine* proposer des systèmes adaptés, qui répondent aux attentes des agriculteurs. Dans un contexte donné, évaluer de manière complète la pertinence des systèmes en AC fait appel à des compétences multidisciplinaires, à la fois agronomiques, économiques et sociologiques. Les travaux de recherche exposés dans cette thèse participent à cette approche en évaluant la pertinence agronomique de ces systèmes en se basant sur le contexte agro-environnemental particulier du lac Alaotra, Madagascar.

2. Présentation de la zone d'étude

La région du lac Alaotra (17°35'S, 48°30'E) est un graben situé dans la province de Toamasina, à 250 km au nord de la capital Antananarivo, Madagascar (Bakoariniaina et al., 2006). La plaine, à une altitude de 750 m, couvre une surface de 180 000 ha. Elle est entourée de hautes collines ferralitiques et en son centre se trouve le plus grand lac de Madagascar avec une surface de 25 000 ha pour 2 à 4 m de profondeur. Qualifiée de « grenier à riz de Madagascar », la région a toujours été une zone d'enjeux pour la production rizicole (Devèze, 2006; Teyssier, 1994). On y recense 30 000 ha de rizières irriguées avec une maintenance régulière des canaux d'irrigations, et 72 000 ha de rizières irriguées à gestion de l'eau aléatoire (MAEP, 2004). La région attire de nombreuses familles rurales et enregistre, depuis plus de vingt ans, le taux de croissance démographique annuel le plus haut de Madagascar (4,2% pour une moyenne nationale de 2,7%) (Wilhelm and Ravelomanantsoa, 2006). On estime que la population de la région du lac Alaotra a doublé depuis 1987 pour atteindre 670 000 habitants en 2005 (Devèze, 2006). Depuis cette dernière étude, aucun recensement de la population n'a encore été fait. Les estimations du réseau des observatoires ruraux restent néanmoins du même ordre (communication

personnelle, H. David-Benz, 2014). La production agricole étant centrée autour du riz, la forte croissance démographique a entraîné une saturation des rizières irriguées, forçant les agriculteurs à développer et intensifier la production pluviale. Les cultures pluviales sont pratiquées sur les sols ferralitiques de collines ou dans les bas-fonds non-irrigués (Annexe 1).

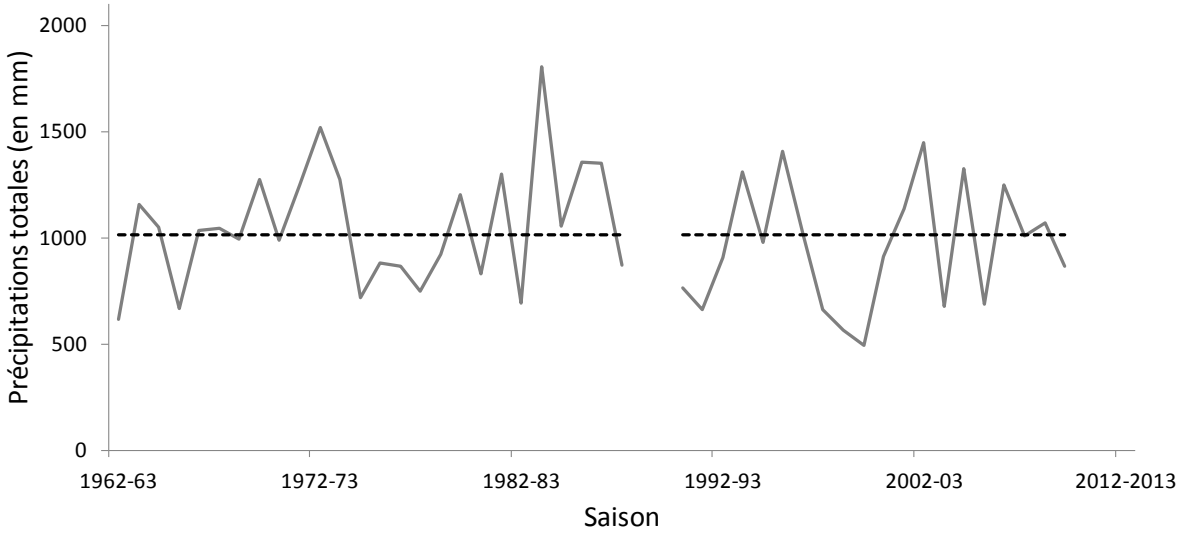


Figure 2 : Une pluviométrie très aléatoire au Lac Alaotra
Evolution des précipitations saisonnières totales à la station de Bevava de 1962 à 1988 et de 1990 à 2010. La ligne en pointillés représente la moyenne sur ces 46 saisons (1013 mm).

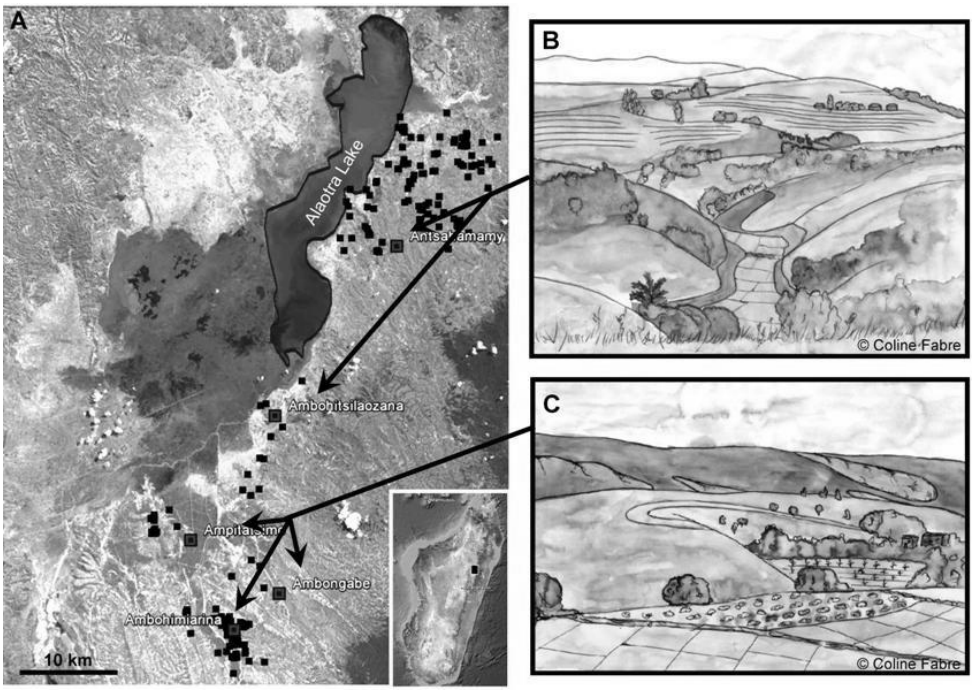


Figure 3 : Présentation de la zone d'étude
Deux zones d'intervention contrastées du projet BV/Lac (A) : Paysages typiques du nord-est (B) et de la vallée du sud-est (C) (Fabre, 2010). Le nord-est est un paysage très vallonné. Dans les bas-fonds, la riziculture est prioritairement implantée en irrigué avec une mauvaise maîtrise de l'eau ou en pluvial sur les sols alluviaux riches. Les collines, à faible pente, sont consacrées à la culture pluviale et la vaine pâture des animaux se fait sur les collines plus éloignées, à pente plus forte. La vallée du sud-est est limitée par de hautes collines qui subissent une érosion profonde, appelée *lavaka*, auxquelles sont jouxtées des collines et bas-fonds qui assurent la même fonction agricole qu'au nord-est. Ce paysage s'ouvre sur de vastes plaines où la culture du riz irrigué, est pratiquée avec une plus ou moins bonne maîtrise de l'eau.

La région est caractérisée par un climat tropical humide d'altitude avec une température moyenne de 20°C et une saison des pluies, très aléatoire, s'étalant de Novembre à Mars, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 1000 mm. Les variations pluviométriques sont d'ordres intra- et interannuelles (Figure 2), avec une distribution journalière, un cumul annuel et un début et une fin de saison très aléatoires. Dans ce contexte climatique, étant donné la faible capacité d'investissement des agriculteurs, les niveaux de production pluviale sont faibles et très variables. Nous n'avons pas de chiffre précis sur la variabilité, mais le rendement moyen en riz pluvial sur colline est de 2 t ha^{-1} et ce rendement peut dépasser les 5 t ha^{-1} sur certaines parcelles (Penot et al., 2011). De 2003 à 2013, le projet de développement BV/Lac a proposé et diffusé des systèmes en AC (Figure 3) dans l'objectif de sécuriser, voire augmenter la production pluviale, en accompagnant les agriculteurs par un suivi et appui technique. En 2010, la surface cultivée en AC au lac Alaotra était estimée entre 970 et 1 420 ha (Penot et al., 2011; Rakotondramanana et al., 2010).

3. Hypothèse et objectifs de l'étude

Les hypothèses principales de cette étude sont les suivantes :

- Parmi tous les bénéfices potentiels apportés par les systèmes en AC, la capacité du mulch à améliorer le bilan hydrique permet de tamponner le stress hydrique, et donc de sécuriser les rendements, lorsque les pluies sont limitées et/ou aléatoirement distribuées.
- Le contexte pluviométrique de la région du lac Alaotra est très aléatoire et le stress hydrique, qui influe très fortement sur les niveaux de production en culture pluviale, est tamponné par les systèmes en AC.

La thèse est construite autour de trois objectifs qui structurent les trois chapitres qui suivent. Du plus général au plus spécifique, les objectifs sont les suivants :

1. Evaluer, à l'échelle de l'Afrique sub-Saharienne, le potentiel des systèmes en AC dans des conditions pluviométriques contrastées ;
2. Evaluer, dans une zone agroécologique à forte variabilité pluviométrique, le potentiel des systèmes en AC sur le court-terme ;
3. Identifier, à l'échelle de la culture et pour un climat à variabilité pluviométrique, dans quelles mesures la réduction du ruissellement par les systèmes en AC améliore le bilan hydrique, tamponne le stress hydrique et sécurise la production pluviale.

Dans le chapitre I, nous tentons de répondre au premier objectif dans un contexte plus global. Etant donné les enjeux agricoles pour l'Afrique sub-Saharienne et le changement climatique pour ces prochaines décennies, les systèmes de productions agricoles doivent être adaptés aux contextes

africains actuels et augmenter la production de manière durable en s'adaptant aux changements climatiques à venir : c'est le concept d'agriculture climato-intelligente, auquel on préfèrera l'anglicisme « *climate-smart* ». A travers une étude bibliographique de la littérature scientifique, nous recensons les articles qui apportent des réponses à la question suivante : L'AC est-elle une option *climate-smart* pour l'agriculture familiale sub-Saharienne ? Pour répondre au deuxième objectif, nous nous focalisons sur une zone d'étude plus réduite, la région du lac Alaotra, Madagascar. Profitant de la grande quantité de données (plus de 3800 parcelles suivies) et du climat très contrasté couvert par la base de données du suivi parcellaire du projet BV/Lac de 2006-07 à 2009-10, nous menons une analyse exploratoire sur les systèmes de cultures pluviales à base de riz afin de mieux comprendre, sur le court- à moyen-terme, comment s'exprime les capacités de l'AC dans un contexte à forte variabilité climatique (chapitre II). Pour répondre au troisième objectif, nous utilisons l'outil de modélisation biophysique PYE-CA afin d'identifier, dans les conditions pluviométrique du lac Alaotra, l'impact d'une diminution du ruissellement sur le stress hydrique et la production pluviale (chapitre III). Nous clôturons cette étude en repositionnant les hypothèses de départ, au regard des résultats obtenus à différentes échelles dans les chapitres précédents, et nous ouvrons la discussion sur la pertinence des systèmes en AC pour l'agriculture familiale, au-delà des impacts sur la ressource en eau.

Chapitre I

Une option *climate-smart* pour l'agriculture familiale ?

Ce chapitre est adapté de l'article de revue :
Bruelle, G., Naudin, K., Scopel, E., Corbeels, M., Torquebiau, E., Penot, E., Rabeharisoa, L., Mapfumo, P., Tittonell, P., 2014. Is conservation agriculture a climate-smart option for smallholders in sub-Saharan Africa? An overview. En cours de finalisation pour soumission.

Synthèse

Introduction

Le changement climatique (CC) fait aujourd'hui consensus au sein de la communauté scientifique, et l'agriculture est la première cause de l'enrichissement de l'atmosphère en méthane et en protoxyde d'azote. Dans ce contexte, l'Afrique sub-Saharienne (ASS) doit augmenter sa production agricole de 77% pour répondre aux besoins alimentaires de sa population d'ici 2050. Il est donc primordial de développer une agriculture *climate-smart*, basée sur trois piliers définis par la FAO : (i) augmenter durablement la productivité agricole, (ii) atténuer le CC et (iii) s'adapter au CC. Une recherche du terme '*climate-smart agriculture*' (CSA) dans la littérature scientifique nous a permis d'identifier huit études depuis 2012 : Trois études restreignent la définition à un seul pilier ; les quatre autres utilisent la définition complète. Dans cette étude, nous nous cantonnons à la définition de la FAO.

L'agriculture de conservation (AC), telle que définie par la FAO, suit les trois principes de (i) travail minimal du sol, (ii) couverture permanente et (iii) rotations. Afin de palier au problème de perte de fertilité des sols et de baisse de production en agriculture familiale en ASS, les systèmes en AC sont aujourd'hui diffusés à grande échelle à travers des projets de développement. Cette technologie a pour but d'apporter des effets agronomiques, économiques, environnementaux et sociaux positifs ; et se traduit par un éventail des systèmes de cultures dans la littérature. Dans cette étude, nous considérons comme AC tout système, dès lors qu'il respecte, au moins, le principe de travail minimum du sol.

L'objectif de cette étude est d'évaluer dans quelles mesures l'AC peut être considérée comme une option CSA pour l'agriculture familiale en ASS, en alternative aux systèmes traditionnels sur labours. Nous avons donc cherché des indices dans la littérature scientifique pour comprendre comment l'AC peut répondre aux trois piliers de CSA.

Approche méthodologique

Accroître durablement la productivité est un objectif commun à tous les projets de développement agricole dans les contextes contraints de l'agriculture familiale. L'impact de l'AC sur les rendements en ASS a fait l'objet de plusieurs revues, relatant un manque de données, une efficacité de l'AC sur le long-terme mais des résultats mitigés sur le court-terme. En se basant sur les études à long-terme (plus de 5 ans) recensées dans la méta-analyse de Corbeels et al. (2014), nous avons tenté de compléter ces résultats. Nous avons aussi identifié les études qui analysent les impacts économiques de l'AC dans les exploitations familiales en ASS.

Le non-labour et la conservation de mulch organique en AC peuvent modifier les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol ; ce qui peut alors modifier la respiration du sol et donc les émissions directs de CO_2, CH_4 et N_2O. Nous avons donc retenu les études qui relatent l'impact de l'AC sur les émissions de gaz à effet de serre. Les sols cultivés sont aussi considérés comme des puits potentiels de carbone (C) et l'AC comme un moyen de compenser le CC par une séquestration de ce C dans le sol. Nous avons donc retenus les études qui décrivent l'impact de l'AC sur le C du sol en ASS.

S'adapter au CC signifie s'adapter à des changements de température, de concentration on CO_2 dans l'atmosphère et de régime pluviométrique. En ASS, on prévoit jusqu'à 2°C d'augmentation de température pour ce siècle et une augmentation en fréquence et en intensité des évènements pluvieux extrêmes. On peut supposer qu'au fil des années, les programmes de recherche et de sélection variétale permettront de

proposer des cultivars qui soient adaptés à ces changements. Mais l'efficacité réside aussi dans la combinaison avec pratiques agricoles adaptées. Dans le cas de l'AC, le mulch permet de diminuer le ruissellement ; ce qui est envisagé comme moyen efficace pour tamponner le stress hydrique et faire face au changement pluviométrique annoncé en ASS. Nous avons donc tenté de vérifier cette capacité de l'AC en se basant sur les études retenues par Corbeels et al. (2014).

Augmentation durable de la productivité

D'après les études que nous avons identifiées, il semble que l'AC ait la capacité d'augmenter les rendements. Ceci est du, sur le long-terme, à un accroissement de la fertilité du sol, notamment grâce à la rétention d'un mulch de matière organique. Il semble aussi que l'impact sur les rendements soit d'autant plus rapide que les conditions hydriques sont limitantes. Ces résultats sont donc en accord avec les trois revues de la littérature. D'un point de vu économique, parmi les 12 études retenues, nous avons observé des résultats contrastés. Certaines études observent un impact positif de l'AC lié à l'augmentation des rendements ou une diminution de la charge de travail. D'autres relatent un impact négatif lié aux coûts des intrants, à l'absence de marché pour les nouvelles cultures introduites, ou encore à la diminution des rendements la première année de transition vers l'AC.

Atténuation du changement climatique

L'impact de l'AC sur les émissions directes de gaz à effet de serre est très peu renseigné dans la littérature scientifique. Les résultats préliminaires, souvent mesurés en laboratoire, sont contradictoires et toutes les études s'accordent sur la nécessité de mettre en place des dispositifs à plus large échelle pour une variété de cultures afin de mieux cerner les impacts potentiels de l'AC. Au sujet de la séquestration du C dans les sols, les études identifiées en ASS rejoignent les conclusions des revues scientifiques faites par ailleurs. Le stockage du carbone se fait essentiellement dans les couches superficielles du sol, i.e. les 30 premiers centimètres. La stabilité de ce carbone est donc questionnée : peut-on envisager une séquestration durable du carbone étant données les pratiques agricoles actuelles et notamment le retour occasionnel au labour pour diverses raisons ?

Adaptation au changement climatique

Les études recensées suggèrent qu'il y a un seuil aux alentours de 900-1000 mm de pluviométrie annuelle. En dessous de ce seuil, l'AC semble mieux exprimer son potentiel et augment les rendements alors qu'au-delà les rendements sont inchangés voire diminués, en moyenne. Seulement, certaines études suggèrent que l'impact de l'AC sur les rendements ne dépend pas nécessairement de la quantité totale mais plutôt la distribution des pluies. Ainsi, dans un contexte aléatoire, l'AC semble permettre une sécurisation des semis et de la levée, et une diminution du stress hydrique pendant la croissance.

Une option *climate-smart* pour l'agriculture familiale ?

Si la capacité de l'AC à participer au pilier 'atténuation du CC' reste à creuser dans le contexte de l'ASS, nous avons vu au travers de différentes études que l'AC peut augmenter la productivité et peut s'adapter au CC. Ce potentiel de l'AC est essentiellement assuré par le maintien d'un mulch organique sur la surface des sols cultivés. Seulement, notre étude montre que l'impact de l'AC est extrêmement dépendent des conditions agro-environnementales et socio-économiques. Or, les zones agroécologiques où l'AC peut exprimer tout son potentiel sont des zones où l'une des difficultés majeures est de produire suffisamment de biomasse pour maintenir un mulch, et la compétition avec l'élevage est importante. Cela ouvre donc vers une problématique plus large : l'AC, définie par ses trois principes, est-elle réellement adaptée aux contextes africains limités en ressources ? Ne faut-il pas proposer des systèmes plus adaptés ?

1. Introduction

1.1. Climate-smart agriculture

Today, climate change is a fact which gathers consensus among the scientific community. It is generally believed that humans are causing most of it through activities that increase concentrations of greenhouse gases (GHG). Agriculture has been identified to be the primary cause of global increases in methane and nitrous oxide concentrations in the atmosphere (IPCC et al., 2013). In this context of climate change, developing countries face the challenge of achieving food security. It is estimated that agricultural production has to increase by 77% to meet the food demands by 2050 (Alexandratos and Bruinsma, 2012). Thus, there is an imperative need to develop an agriculture that simultaneously mitigates GHG emissions and adapts to climate change in order to sustainably enhance production. In addressing both food security and climate change challenges, the concept of climate-smart agriculture (CSA) recently emerged at the Hague Conference on Agriculture, Food Security and Climate Change (FAO, 2010). CSA aims to contribute to the achievement of sustainable development goals and integrates the three, economic, social, and environmental, dimensions of sustainable development. CSA is composed of three main pillars (FAO, 2013): (i) sustainably increasing agricultural productivity; (ii) reducing or removing GHG emissions; and (iii) adapting and building resilience to climate change. Launching a search on the online Scopus database (Elsevier B.V., 2014. http://www.scopus.com/), we found eight peer-reviewed articles using the concept of 'climate-smart agriculture'. Three studies have narrowed down the definition of CSA to one particular aspect of the concept. Buysman and Mol (2013) and Ahmed et al. (2013) defined CSA as practices that reduce GHG emissions; and Xiong et al. (2014) defined it as an optimal match of cultivars and management to climate in order to obtain the highest attainable yield. The remaining studies have used the concept in its wholeness (Harvey et al., 2014; Nyamadzawo et al., 2014; Schroth et al., 2014; Siedenburg et al., 2012; Singh, 2012). In this study, we adhere the FAO definition of CSA.

1.2. Conservation agriculture

The FAO (2014) defines conservation agriculture (CA) as crop cultivation that follows the three principles of (i) minimal soil disturbance, (ii) permanent soil cover, and (iii) crop rotations. In sub-Saharan Africa (SSA), CA has been widely promoted and disseminated through development projects to address the productivity depletion in smallholder farming systems. This technology is expected to provide agronomic, economic, environmental, and social benefits. A large variety of cropping systems are referred to as CA in the literature. In this paper, we adopted a broad definition of CA including all cropping systems labeled as CA as long as they apply, at least, the principle of minimal soil disturbance.

Table 1: Literature search methods

Literature search methods to assess the adequacy of conservation agriculture to the three climate-smart agriculture pillars in peer-reviewed literature

CSA pillar	CA objectives	Data source	Keywords (within title, keywords and abstract sections)	Screening criteria (studies must meet all the listed conditions)	Number of studies
Sustainable increase in productivity	Increase in yield	Corbeels et al. (2014)		(i) study duration ≥ 5 years	7
	Increase in income	Scopus online database	['conservation agriculture' or 'no till*' or 'zero till*' or 'minimum till*' or 'mulch'] and ['livelihood' or 'income' or 'revenue' or 'cash' or 'economic*']	(i) located in sub-Saharan Africa (SSA) (ii) economic data (margin, income, return, …) (iii) comparison to conventional treatment	12
Climate change mitigation	reduction of GHG emissions	Scopus online database	['conservation agriculture' or 'no till*' or 'zero till*' or 'minimum till*' or 'mulch'] and ['co2' or 'n2o' or 'ch4']	(i) located in SSA (ii) data on CO_2, CH_4, or N_2O emissions (iii) comparison to conventional treatment	5
	Increase in soil carbon sequestration	Scopus online database	['conservation agriculture' or 'no till*' or 'zero till*' or 'minimum till*' or 'mulch'] and ['mitigation' or 'greenhouse' or 'co2' or 'carbon' or 'sequestration']	(i) located in SSA (ii) data on soil carbon content (iii) comparison to conventional treatment	27
Climate change adaptation	Water stress buffering	Corbeels et al. (2014)		(i) data on total seasonal rainfall (ii) data on yield for each season	29

1.3. Aim and scope of this study

The objective of this study is to evaluate CA as a potential climate-smart option for smallholder farmers in SSA, finding evidence in the peer-reviewed literature about the capacity of CA, as compared to conventional tillage-based farming (CV), to meet the requirements of each pillar of CSA. We first assessed the extent to which CA can sustainably increase agricultural productivity, this pillar being the primary goal of CA dissemination in SSA. We then evaluated the capacity of CA to mitigate climate change, and to adapt to climate change, these two pillars being the very core of the CSA concept.

2. Approach

Theoretically CA aims to improve crop productivity through the enhancement of ecological, agronomic and management functions (Figure 4). While this main objective of CA is completely in line with the first pillar of CSA, it may also contribute to the objectives of the two other 'climate change' pillars of CSA. The expected beneficial functions resulting from the combination of the three principles of CA are intertwined and, hence, the objectives are expected to be achieved simultaneously. However, for an ease of understanding and to remain consistent throughout the study, we focused on each objective independently. Thus, our literature search was organized as presented in Table 1, systematically comparing CA with CV practice.

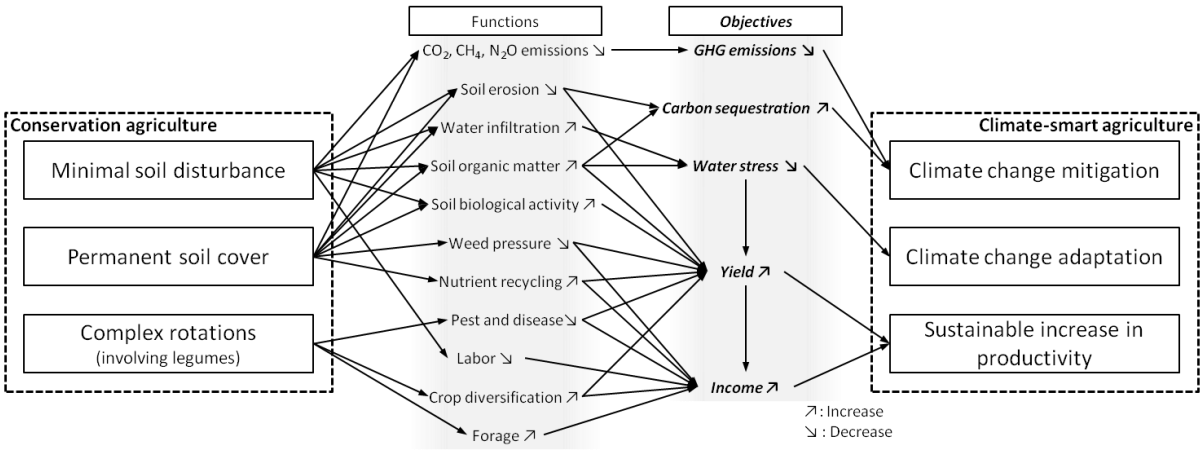


Figure 4: Conservation agriculture & climate-smart agriculture
Diagram showing the adequacy of the potential functions of conservation agriculture in meeting the objectives of climate-smart agriculture (original scheme inspired from literature review and K. Naudin Ph.D. thesis)

2.1. Sustainable increase in productivity

In the low-productive context of smallholder farming, crop yield improvement is often the first objective when implementing an innovative agricultural technology or cropping system. The ability of the new technology to achieve this objective is a major criterion for farmers' adoption. For CA, the

impact on yield has been the topic in recent reviews. . Giller et al. (2009) reported the lack of empirical evidence for clear positive impacts of CA on crop yields in the resource-constrained contexts of smallholder farming in SSA. The authors concluded that, in the short-term yield losses or no yield benefits were just as likely, whilst yield benefits were observed in the long-term, although it may take up to 10 years to achieve this. In a meta-analysis of maize yield responses to CA under sub-humid and semi-arid conditions worldwide, Rusinamhodzi et al. (2011) confirmed the increase in yield under CA compared to that of CV in the long-term, specifying the importance of soil texture and rainfall conditions. Recently, Brouder and Gomez-Macpherson (2014) published a scoping review of the impact of CA on yields in smallholder farming systems in SSA and south Asia. They pointed out the need to set up well-designed experiments to allow making strong general conclusions about benefits of CA. Their review of empirical CA studies also suggested that short-term impact of CA on yield compared to that of CV was null or even negative, but a positive long-term impact could be observed, particularly if a mulch of crop residues is maintained on the soil surface. In our study we used the published CA studies that were retrieved in the in the meta-analysis of crop responses to CA in SSA by Corbeels et al. (2014) and selected the longer term studies (five years and more) to verify whether a positive trend in crop yields could be observed under CA as compared to the yields under CV.

The implementation of CA into smallholder production systems may increase crop yields but also farm income (Corbeels et al., 2014a). Shifting from CV to CA involves changes in farm organization, labor allocation, and input uses at farm level which may lead to a better – or not – economic return of investment (Pannell et al., 2014). To verify this, we ran a literature search on the online Scopus database to assess the economic changes related to the implementation of CA in SSA, comparing economic output of CA and CV systems.

2.2. Climate change mitigation

Through reduced tillage and residue conservation, CA practices modify soil physical, chemical and biological properties. These changes may alter soil respiration, and hence soil CO_2, CH_4, and N_2O direct emissions. Thus, we ran a literature search on the online Scopus database to assess the extent to which CA soil direct GHG emissions in SSA. This aspect being poorly documented, we directly transcribed the main results as reported in each study.

Agricultural soils are a potential sink for carbon (C) (Bernoux et al., 2006; Lal, 2004; Paustian et al., 1997). The original interest in CA was related to its potential to conserve soil and to enhance soil fertility by reducing soil erosion, soil organic matter decline and soil structural breakdown. Since then, CA has increasingly been endorsed as a practice to mitigate climate change through its potential to sequester soil carbon. Several studies have been conducted in SSA to assess the potential of CA to sequestrate

soil C and increase soil fertility. We ran an extensive search focusing on the impact of CA on soil C sequestration, comparing CA with CV. For each study, we calculated the C gain in favor of CA treatment at a given soil depth as the difference between the average C content under CA and CV treatment at the end of the experiment. The C gain was only calculated when differences in C content were significant. When more than two CA systems were compared to CV, we only considered the CA system which applies the maximum CA principles.

2.3. Adaptation to climate change

Climate change will principally affect agricultural production through three main processes: (i) temperature changes; (ii) changes in atmosphere GHG concentration; and (iii) changes in precipitation, i.e. length, amounts, and distribution of rainfall. While there is consensus that temperature and CO_2 concentrations will continue to increase during the 21st century, projections regarding length, total rainfall amounts, or distribution of the rainy season are highly variable and uncertain (IPCC et al., 2013). In SSA, climate projections indicate a maximum global warming of 2°C at the end of the century and they suggest steady total seasonal rainfalls but a delay of the onset of the rainy season and an increase in intensity and frequency of extreme events such as drought or heavy rainfall during the rainy season. An increase in temperature would lead to a shortening of cropping cycle and, hence, a decrease in productivity in most of the cropping system x environment scenarios in SSA (Shrestha et al., 2012). However, it is likely that breeding programs will evolve along with the change in climate, supplying varieties adapted to higher temperature. Regarding the changes in rainfall regimes, breeding can also provide varieties less sensitive to water stress (Bänziger et al., 2006). However, it will be important to combine agronomic management with crop-breeding improvements (Tittonell and Giller, 2013). CA's major potential to mitigate negative effects of climate change lies in the conservation of soil water as a result of mulching. We chose to focus on impact of the CA systems on yield under contrasting rainfall conditions, bearing in mind that the rainfall distribution within the rainy season, and the onset of the rainy season are predicted to change in the future. Thus, comparisons between current contrasted rainfall distributions may help evaluating the potential of CA as regard the projected rainfall changes in SSA.

We based our review on the published studies reported in the meta-analysis of crop responses to CA in SSA by Corbeels et al. (2014). For each study, we calculated the yield response to CA as the difference between the yield under CA and CV treatment for a given fertilization level and rainy season. The yield response was only calculated when yield differences were significant. When more than two CA systems were compared to CV, we only considered the CA system that includes the maximum CA principles.

Table 2: Conservation agriculture & economics

List of the 12 peer-reviewed articles measuring economic benefits of conservation agriculture (CA) as compared to conventional agriculture (CV) in sub-Saharan Africa

Ref.	Location	Duration (Years)	Cropping system	Tillage	Soil cover	Conservation agriculture			Economic indicator	Unit	Under CV	Under CA
						P1	P2	P3				
1	Ghana	7	M	CV; NT		**X**			Net benefit	US $ ha^{-1}	73 88 63	521 344 159
2	Cameroon	3	IR	CV; NT		**X**			Labor costs	US $ ha^{-1}	290	577
3	Nigeria	5	M	CV; NT	RRt; RI	**X**	**X**		Relative costs	ha^{-1} kg^{-1}	1 1	~1.7 ~5
4	Ghana	2	M; S	CV; NT		**X**			Net return	US $ acre^{-1}		NS
5	Kenya	2	M/S	CV; MT		**X**			Net benefits	US $	48 1136 -51 914	-620 1783 703 2990
6	South Africa	13	M	CV; MT; NT		**X**			Mean return	R ha^{-1}	1680	1814
7	Malawi	3	M; M/Pp	CV; NT	RI; RRt	**X**	**X**		Gross margin	US $ ha^{-1}	344	705
8	Malawi	6	M; M/Pp	CV; NT	RRm; RRt; RI	**X**	**X**		Net return	US $ ha^{-1}	130 670	497 822
9	Burkina Faso	2	Sg	CV; NT	RRt	**X**	**X**		Economic benefit	€ ha^{-1}	32 151 66 -66	95 92 30 -59
10	Zambia	4	M; x/M; x/y/M	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	Gross margin	US $ ha^{-1}	~800 ~720 ~480 ~420	~600 ~520 ~550 ~350
11	Ethiopia	2	T	CV; MT; NT		**X**			Gross margin	Birr ha^{-1}	1374 1319	-108 520
12	Zambia	4		CV; MT; NT		**X**			Gross margin	10^3 ZMK ha^{-1}	-270	2213

Ref : 1: (Aflakpui et al., 2007); 2: (Ambassa-Kiki et al., 1996); 3: (Anazodo et al., 1991); 4: (Dalton et al., 2014); 5: (Guto et al., 2011); 6: (Lawrance et al., 1999); 7: (Ngwira et al., 2012a); 8: (Ngwira et al., 2013); 9: (Elisée Ouédraogo et al., 2007); 10: (Thierfelder et al., 2013a); 11: (Tulema et al., 2008); 12: (Umar et al., 2012).

Cropping systems: /: crop succession; IR: Irrigated rice; M: Maize; Pp: Pigeonpea; S: Soybean; Sg: Sorghum; T: Tef; x and y: other crops.

Tillage: CV: Conventional tillage; MT: Minimum tillage; NT: No-tillage.

Soil cover: RI: Residue incorporation; RRm: Residue removal; RRt: Residue retention.

Conservation agriculture: P1: Minimal soil disturbance; P2: Permanent soil cover; P3: crop rotations with legumes.

Under CA: NS: Non-significant difference with CV.

~: graph estimates.

3. Sustainably increasing crop productivity

3.1. Long-term impact on yield

Variable results were observed among the seven studies reporting paired CV-CA comparisons for five years or more. Four studies observed positive impact of CA on yield. While Lal (1995) did not notice any trend along the years of CA practice but immediate increase in yield, Araya et al. (2012) and Osuji (1984) observed beneficial effect of CA after five years of application, attributing the yield improvement to the aggradation of soil fertility under CA through the enhancement of soil physical, chemical, and biological properties. Comparing contrasted agroecological zones of Zimbabwe, Thierfelder and Wall (2012) specified that beneficial impact of CA would appear sooner if soil moisture is a limiting factor for crop growth and later under non water-stressed environments because of the slow aggradation of soil fertility. The three other studies did not come to the same conclusions. In a Nigerian savannah area, Anazodo et al. (1991) observed lower yields under no-till because of soil strength, limited root development, aeration issues and weed pressure. In sub-humid western Kenya, Paul et al. (2013) did not observe significant yield difference because of limited water stress in the studied region. In Ethiopian Highlands, Erkossa et al. (2006) concluded that the appropriate land preparation method depended on the crop and a six year experimentation was not long enough to draw any conclusion.

Our results are in line with the findings of three earlier reviews (Brouder and Gomez-Macpherson, 2014; Giller et al., 2009; Rusinamhodzi et al., 2011). CA has the potential to sustainably increase crop yields mainly due to the increase in soil fertility over time. The long-term improvement of soil fertility is principally attributed to the retention of mulch on the soil surface. Climate conditions are, however, also key determinants of the time required to observe beneficial impact of CA on yield. For instance, in a water-limited context, CA alleviates the soil water stress constraint and allows an immediate increase in yield.

3.2. Economic impact

We extracted 26 paired CV-CA comparisons of economic data from 12 studies on smallholder farming in SSA. Among these comparisons 8, 1, and 17 reported respectively negative, null, and positive higher economic benefits under CA than under CV (Table 2).

Higher economic benefits under CA were mainly due to either a decrease in labor (Ambassa-Kiki et al., 1996; Anazodo et al., 1991; Ngwira et al., 2013, 2012a) or an increase in yield without significantly changing production costs (Aflakpui et al., 2007; Guto et al., 2011; Lawrance et al., 1999; Elisée Ouédraogo et al., 2007; Umar et al., 2012). The decrease in labor was observed regardless the type of

farming (hand-based, animal-drawn or mechanized). The increases in yield were attributed to different factors: in Ghana, demonstration plots were considered to be more carefully managed than farmers' plots (Aflakpui et al., 2007); in South Africa, CA plots were more responsive to fungicides (Lawrance et al., 1999); and in Burkina Faso, CA plots allowed better water conservation (Elisée Ouédraogo et al., 2007)

Lower economic benefits under CA were caused by different factors. In Zambia, the decrease in gross margin under CA was due to the introduction of cotton and sunnhemp into the rotation with maize (Thierfelder et al., 2013a). The first crop yielded less than maize for the same sale price, and the second crop did not allow any economic return because of the absence of market for sunnhemp seed. In Ethiopia, zero-tillage resulted in lower gross margin because of an high increase in labor for hand-weeding (Tulema et al., 2008). In Ghana, net return difference between CV and CA depended on yields and herbicide prices (Dalton et al., 2014). While CA reduced by half the costs of land preparation, it was compensated by a decrease in yield or an increase in herbicide costs during the two years of the experiment. In the short-term, it resulted in no significant economic difference between CV and CA.

4. Mitigating climate change

4.1. Greenhouse gas emissions

Very little results on CA impacts on GHG emission have been reported in the peer-reviewed literature in SSA (Table 1). In the highlands of Madagascar, Rabenarivo et al. (2014) indicated that mulching increased CO_2 emission but reduced N_2O emissions because of N immobilization. In the same region, Baudoin et al. (2009) observed an increase in N_2O fluxes under CA in the short-term because of anaerobic conditions due to the increase in soil water content, but Chapuis-Lardy et al. (2009) did not observed significant N_2O emissions differences between CV and CA treatments over the whole cropping season. In a humid savanna zone of the Ivory Coast, Koné et al. (2008) observed an increase in CO_2 emissions under maize cropping with legume cover crops as compared to conventional cropping. In the western Kenya Highlands, Baggs et al. (2006) observed an increase in CO_2 and N_2O emissions in the short-term, depending on the nitrogen and lignin contents of the residue, but a decrease in N_2O emissions under no-tillage without significant changes in CO_2 or CH_4 emissions. No general conclusion can be drawn from these results, and the five studies agreed on the necessity to run experiments on longer-term and larger-scale to encompass the variability of soil and crop types in SSA.

4.2. Soil carbon sequestration

We found 27 studies that report data on soil C contents comparing CV and CA treatments in SSA (Table 1). Among the large variety of crop species, crop rotations, tillage types, and soil cover

management, we identify the potential of CA to increase the soil C content in the top layer (Table 3), reaching a maximum increase in C concentration of 10.5 g kg^{-1} at the 0-10 cm depth after 3 years, depending on the cover crop species (Lal et al., 1978). Below 20 cm depth, the few reported evidence suggested that CA slightly enhanced soil C content, and it could even reduce C content as observed by Loke et al. (2012) in South Africa with a maximum C depletion of 0.63 g kg^{-1} at 15-25 cm depth under 32 years of no-till. These observations are in line with conclusion drawn in Europe, and northern and southern America. In a recent review, Powlson et al. (2014) concluded that C sequestration through no-till agriculture was limited and overstated: the increase in soil C contents mainly happens near the surface and the soil would lose any soil C benefit as soon as it has been cultivated under CV, as it is commonly done every few years. A meta-analysis under Mediterranean climate (Aguilera et al., 2013) showed high C sequestration rates for practices that combine external organic inputs with cover crops or reduced tillage; the highest response being achieved by the practices applying largest amounts of C inputs. Another meta-analysis of paired CV tillage/no-till experiments (Luo et al., 2010) showed that no-till did not enhance soil total C stock down to 40 cm and C sequestration was regulated by cropping frequency. In Brazil, a review also reported an increase in soil C content down to 40 cm under CA, indicating promising strategy for GHG emissions mitigation (Bernoux et al., 2006).

Table 3: **Conservation agriculture & soil carbon content**
Soil carbon content gain for each soil layer referred to in Supplementary Materials. NS: Non-significant

Depth (cm)	n	NS	Soil carbon gain (g kg-1)		
			Minimum	Median	Maximim
0-5	7		0.2	1.9	5.2
0-10	8	3	-1.7	6.2	10.5
0-15	5	2	0.24	2.9	5.4
0-20	8	1	0.27	2.42	4.47
0-30	4	1	0.83	1.4	5.5
5-10	2	1		2.9	
10-15	1	1			
10-20	6	3	3	3.3	9
15-25	1			-0.63	
15-30	3	1	2.2	2.8	3.4
20-30	3	2		0.9	
25-35	1	1			
30-40	1			1	
30-45	2	1		3.4	
35-45	1			0.9	
45-60	1	1			
50-60	1			0.9	

Our results suggest that CA improves soil C content. But, we were unable to distinguish soil C content changes due to tillage management, soil cover, crop rotation, or the interaction between these factors. In particular, the mulch amount is a key value to better understand the capacity of CA to sequester C. It is admitted that the increase in soil C content is mainly due to the retention of biomass on the soil surface (Corbeels et al., 2006). However, this information was omitted in the large majority

of studies. For a better quantification of the potential of CA to sequester CA, there is a need to detail comprehensive methodologies and standardize research approaches (Derpsch et al., 2014).

5. Adapting to climate change

The set of studies embodied a wide range of types of climate (Supplementary materials) with very different rainfall regimes, from a 165 mm short rainy season in semi-arid North Eastern Tanzania (Enfors et al., 2011) to a 1500 mm rainy season in the tropical rainforest of Western Nigeria (Agboola, 1981). Among the 178 paired CV-CA yield comparisons, we observed no significant impact of CA on yield in 58% cases, yield penalty in 16%, and yield gain in 26% of the cases. The review showed that positive yield response under CA occurs mainly when total seasonal rainfall is lower than 900 mm (Figure 5). Beyond this threshold, CA tends to have no - or even negative - impacts on yield. Contrary to the findings of Baudron et al. (2012) and Enfors et al. (2011), these results suggest that CA increases soil water availability under poor rainfall conditions, resulting in higher crop yields. Under wetter conditions this impact on water balance has no effect on crop yields (Rusinamhodzi et al., 2011; Sissoko et al., 2013). The most negative CA impact on yield (87% lower yield compared to CV) was observed in a study in Nigeria with 1000 mm of annual rainfall (Anazodo et al., 1991). This poor performance was "*attributed to high soil strength which probably offered mechanical impedance to root growth and proliferation,* [...] *aeration problems,* [...] *high weed growth*". The highest yield gain under CA (228% higher yield compared to that under CV) was observed under no-till with mulch in Nigeria for a 637 mm rainy season (Lal, 1995). The author did not focus on correlation between rainfall amount and CA efficiency, but he highlighted that under low water retention capacity "*it is the frequent occurrence of gentle rains that determines crop growth and yield, rather than the total seasonal amount per se*".

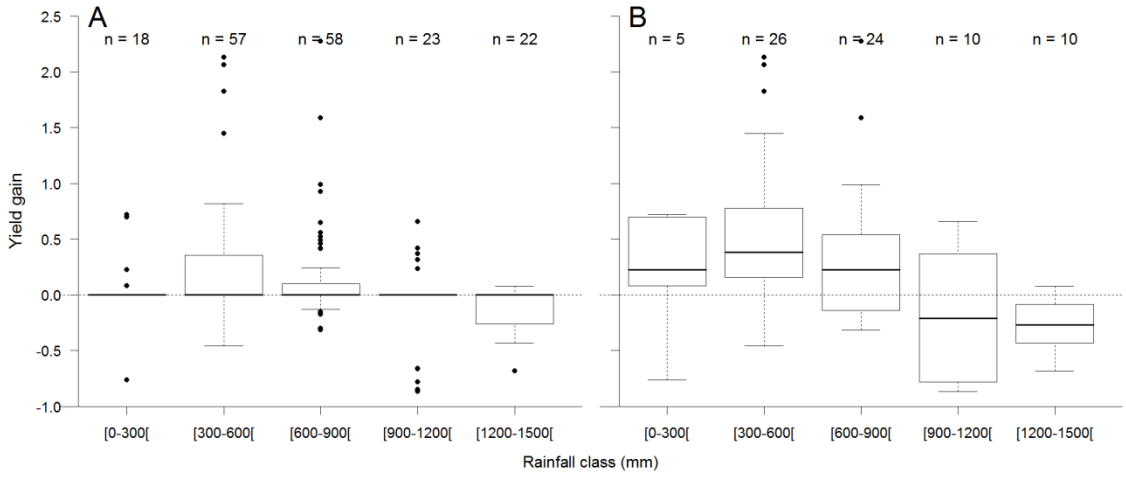


Figure 5: Conservation agriculture & rainfall
Yield gain in favor of CA for different rainfall classes considering non-significant differences with CV as null (A) or excluding non-significant difference (B).

Besides total seasonal rainfall, rainfall distribution within the season appears to be a key determinant of CA impact on crop production. In northern Ethiopia, Araya et al. (2012) reported a better rainfall use efficiency under CA, particularly at the beginning of the rainy season. Despite the frequent dry spells, the crop emergence was faster because of a better water infiltration which limited water stress under CA. Similar results were observed in Nigeria (Obalum et al., 2011) where higher yield under no-till was attributed the higher soil moisture at the beginning of the rainy season under erratic distribution of rainfall. In Zimbabwe, Mupangwa et al. (2007) observed a better crop stand with planting basins because of a higher soil moisture at the beginning of crop growth. However, it did not translate into higher yield as compared to conventional tillage based system due to severe water underwent under both treatments during the second half of the rainy season. These results suggest an ability of CA to secure sowing and crop emergence through an increase in soil moisture at the beginning of rainy season. It also suggests that CA could offset negative impact of dry spells during rainy season.

Rainfall changes predictions are uncertain in Africa. Our review indicates that CA could express its potential under a decrease in total seasonal rainfall, a delay of the rainy season onset or an increase in dry spell frequency within the season. However, the set of studies also illustrates the site-specific impacts of CA on soil water conservation and water use efficiency. Under CA practices, the mulch of crop residues held on the soil surface intercepts rainfall, decreases surface water runoff and limits soil evaporation (Findeling et al., 2003; Lal, 1976; Scopel et al., 2013). The increase in water infiltration does not necessarily infer better rainwater use efficiency. It can result in an increase in water drainage (Scopel et al., 2004) and the impact on water balances and subsequently on yield depends on the soil characteristics, particularly its water storage capacity in the rooting zone, the rainfall distribution during the season, and the synchrony between dry spells (or rainfall episodes) and the crop development stages which determines the water stress underwent during crop growth.

6. Is CA a climate-smart option for all family farmers in SSA?

6.1. The key role of mulching into the achievement of CSA

Our findings reflected the complexity of functions interactions and the simultaneity of objective achievements (Figure 4). It confirmed the major role of mulching in the achievement of CSA pillars. Retention of crop residues improves the soil fertility principally as a result of an increase in soil C content. Increased soil fertility translates into an increase in yield which subsequently translates into economic benefits, if production costs are unchanged. The mulch is also a protective layer that enhances water infiltration. Combined with the increase in soil organic matter, it can improve water conservation and buffer water stress.

However, retaining a permanent mulch of crop residues on the soil surface is very challenging on smallholder farms in SSA (Erenstein, 2003; Giller et al., 2009). Combined with the limited rainfall, particularly in semi-arid Africa, and the limited access to fertilizers, small amounts of biomass are produced. Besides, under mixed crop-livestock farming, there can be competing uses for this biomass , for example as fodder (Corbeels et al., 2014a). Most of the studies reported considered the mulch as an efficient mean to restore soil fertility without providing quantitative data on mulch characteristics. We can assume that the ability of mulch to increase soil fertility or reduce water runoff will depend on the amount retained on the surface, the type of crop residues, and its chemical composition. Quantifying these effects could also help making relevant trade-offs between the use as mulch or livestock feed without jeopardizing one or the other farm activity (Baudron et al., 2014; Naudin et al., 2014). For instance, in Zimbabwe Mupangwa and Thierfelder (2013) showed that using biomass for both mulch and fodder purposes was possible without reducing maize yield.

6.2. CA ability to be climate-smart is local-specific

This paper reports evidence of the ability of CA to be climate-smart, but it also helps to better understand under which circumstances.

The increase in yield in the long-term is attributed to the progressive increase in soil fertility. In the shorter-term, the increase in yield is less likely, but when it happens, it is attributed to the ability of CA to offset water stress through mulching. CA mainly expresses its potential under low and/or erratic rainfall conditions. But, under such conditions, farmers struggle to produce biomass and the competition with livestock is severe. Thus, there is a need to better apprehend the biomass flows at the farm- and village-level to optimize the use of this biomass for both mulch and fodder (Andrieu et al., 2014).

Regarding economic benefits, CA impact is very site- and farm-specific, depending on many factors such as crop type, household structure, market price of farm inputs and outputs, social organization, or support from national institutions. Further studies at the farm-level would be necessary to fully apprehend the economic potential of CA. However, reporting evidence from smallholders throughout SSA is a preliminary approach to better identify the economic benefits and constraints in order to tailor and adapt CA cropping systems to each socio-economic context. We showed that labor and herbicides costs are key determinants of the economic success of CA implementation.

6.3. Conclusion: CA is not necessarily climate-smart in SSA

The focus on the three main pillars of CSA enabled a better analysis of CA. It suggests that the two are not as congruent as often implied, i.e. it doesn't seem that CA is necessarily climate-smart in the

context of the African systems examined. Available literature reported evidence of the capacity of CA to contribute to the 'productivity' pillar of CSA through an increase in soil fertility, crop yields, and economic benefits. However, it is also suggested that increasing yield may not be the primary benefit of CA except in cases under low rainfall areas where waterlogging is not pronounced as part of seasonal rainfall variability. This means that CA can also contribute to the 'adaptation' pillar of CSA by buffering water stress, but negative impact on yields could also be observed under wetter conditions. The contribution of CA to the 'mitigation' pillar remains unanswered. C accumulation is observed in the top soil layer (30 cm) but there is an apparent failure for C enrichment at lower depth. This may not translate into sustainable forms of C sequestration under predominant agronomic practices (Powlson et al., 2014). Occasional tillage, changes in cropping sequences, weeding regimes (e.g. mechanical versus herbicides), disease and pest management methods, and changes in environmental conditions (temperature, rainfall variability) could alter the C balance. This is an area requiring further research. Moreover, the increase in soil C content, and more generally the increase in organic matter alter soil properties. On the bases of available data, the direct impact on soil GHG emissions remains unclear. The few reported studies did not allow concluding on the impact on GHG emissions. Further studies considering the associated trace gas fluxes must be carried out to evaluate the possible compensatory phenomena (Bernoux et al., 2006).

Chapitre II

Qu'en est-il sur le terrain ?

Cas du riz pluvial au Lac Alaotra

Ce chapitre est adapté de l'article :

Bruelle, G., Naudin, K., Scopel, E., Domas, R., Rabeharisoa, L., Tittonell, P., 2014. Short- to mid-term impact of conservation agriculture on yield variability of upland rice: Evidence from farmer's fields in Madagascar. *Experimental Agriculture* 1–19. doi: 10.1017/S0014479714000155

Synthèse

Introduction

En Afrique sub-saharienne, l'agriculture de conservation (AC) est diffusée à grande échelle à travers de grands programmes de développement afin de restaurer la fertilité des sols et améliorer durablement la productivité de l'agriculture familiale. Cette AC est basée, selon la définition de la FAO, sur trois principes : (i) un travail réduit du sol, (ii) une couverture permanente et (iii) des rotations complexes introduisant notamment des légumineuse. Depuis 2003, l'AC est diffusé dans la région du lac Alaotra. Cette région, caractérisée par une distribution des pluies très erratique et qualifiée de 'grenier à riz' de Madagascar, connaît une forte expansion de la riziculture pluviale depuis cette dernière décennie. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de l'AC sur les rendements en riz pluvial en agriculture familiale durant les six premières années de transition vers l'AC.

Matériels et Méthodes

La région du lac Alaotra (17°35'S, 48°30'E; alt. 750 m), est caractérisée par un climat tropical humide d'altitude. La température moyenne est de 20°C et la saison des pluies, de novembre à mars, enregistre une pluviométrie annuelle moyenne de 1000 mm. La distribution des précipitations intra et interannuelle est cependant très variable. Dans ce contexte climatique, la faible capacité d'investissement des agriculteurs combinée au labour fréquent de la couche arable a conduit à une érosion et une baisse de fertilité des sols, augmentant ainsi le risque de cultiver les collines et bas-fond non-irrigués. De la saison culturale 2006-2007 à 2009-2010, plus de 3800 parcelles agriculteurs en transition vers l'AC ont été suivies. Le système en AC étudié est un riz pluvial associé à une légumineuse, en rotation avec d'autres cultures vivrière. Les saisons culturales étudiées ont décrit quatre profils pluviométriques très distincts ; ce qui a été l'opportunité de tenter de distinguer, parmi d'autres facteurs agronomiques, techniques et environnement, le poids du facteur hydrique dans la détermination du rendement. Dans un premier temps, nous avons analysé l'effet (i) du nombre d'années consécutives de culture en AC afin de déceler un potentiel effet progressive ou cumulative, (ii) de la fertilisation azotée et (iii) de la distribution des pluies sur la date de semis et les rendements. Dans un second temps, nous avons utilisé une méthode de classification et régression (analyse CART) afin de hiérarchiser l'influence de chaque facteur sur la distribution des rendements.

Résultats et Discussion

Dans le contexte climatique de la région du lac Alaotra, l'AC nous a semblé diminuer les risques liés à la production pluviale en augmentant les rendements, en moyenne, et en réduisant la variabilité sur le court et moyen terme. Dès la première année de conversion vers l'AC, nous avons observé des différences de rendement faibles, mais significatives, en faveur de l'AC, avec un écart de plus en plus important au fil des années de pratique de l'AC. Ces résultats, plus marqués sur les cultures de colline, vont à l'encontre de certains résultats relatés dans la littérature où les premières années de transition sont associées à une baisse des rendements. Le grand nombre de parcelles suivies et leur variabilité de niveaux de fertilisation nous ont aussi permis de distinguer l'effet de la fertilisation sur l'augmentation des rendements. En effet, l'intégration d'une nouvelle technologie peut souvent être accompagnée d'un apport supplémentaire de fertilisant, biaisant alors l'interprétation de la hausse des rendements. Dans notre étude, nous avons montré que, même si la fertilisation avait un impact positif sur les rendements de certaines parcelles de colline, cet

apport n'était pas systématiquement lié à la pratique de l'AC. La fonction 'semis précoce', souvent mise en avant pour la promotion des systèmes en AC, n'est pas apparue clairement dans notre jeu de données. Nous avons cependant observé des rendements en AC toujours égaux, voire supérieurs, aux rendements en conventionnel pour les dates de semis précoces et tardives, suggérant une certaines sécurisation de ces semis. L'analyse CART nous a permis de souligner l'importance des facteurs agro-environnementaux dans la détermination des rendements, rejoignant les conclusions d'autres études en Afrique stipulant qu'aucune option technique ne peut tamponner les conditions climatiques trop extrêmes.

Conclusion

La pratique de l'AC en agriculture familiale semble avoir permis une augmentation progressive des rendements en riz pluvial accompagnée d'une réduction du risque, particulièrement sur les parcelles de colline. Cette transition vers l'AC ne s'est pas nécessairement accompagnée d'une augmentation de la fertilisation et a offert une meilleure flexibilité pour les dates de semis. Dans un environnement contraint tant par les conditions biophysiques que socio-économiques, ce type de système innovant, capable de lever des contraintes directes, peut immédiatement exprimer son potentiel. Dans le cas de la riziculture pluviale du lac Alaotra, la capacité de l'AC à tamponner la variabilité climatique pourrait alors faciliter le processus d'adoption par les paysans.

1. Introduction

Conservation agriculture (CA) has been promoted and disseminated through large development programs to restore soil fertility and productivity on family farms in sub-Saharan Africa. CA is based on three principles: (i) minimal soil disturbance, (ii) permanent soil cover and (iii) crop rotation (FAO, 2014). The combination of the three principles aims to maintaining soil fertility by avoiding the negative consequences of tillage-based conventional soil management and monoculture. CA can provide several agronomic benefits such as enabling early sowing by preserving soil moisture, reducing erosion by protecting the soil surface (Barton et al., 2004; Scopel et al., 2005), enhancing infiltration of rainfall water, and reducing soil evaporation (Adekalu et al., 2007; Scopel et al., 2004; Thierfelder et al., 2013a) or increase crop yields in the long term by building up soil fertility (Thierfelder et al., 2013b, 2013c). Still, its benefits in non-mechanized family farms in sub-Saharan Africa remain not clear (Bolliger et al., 2006; Giller et al., 2009; Scopel et al., 2013). Most studies on the performance of CA in sub-Saharan Africa were done in research stations or by setting up experiments on farmer fields but managed by researchers, erasing the effect of any socio-economic constraint.

In southern Africa, maize grain yields increased under CA in the long term (up to 15 years), but there were no yield benefits in the short run, and losses were just as probable (Rusinamhodzi et al., 2011). Yield increases were obtained with CA in cotton production in north Cameroon, although it was difficult to distinctly separate the actual impact of CA from the impact of fertilizer use (Naudin et al., 2010). In the highlands of Madagascar, a long term study of a soybean-maize rotation exhibited a higher level of soil organic carbon content under CA as compared to conventional tillage (Razafimbelo et al., 2008). Few studies in Africa have reported agronomic benefits of CA on farmer's fields. Rotations of cotton and Sorghum in the mid Zambezi valley of Zimbabwe yielded similarly under CA or under current famer practices in a two-year experiment on farmer fields (Baudron et al., 2012a). The low rate of CA adoption in sub-Saharan Africa raises the question of the relevance of CA at the farm, village, or region scale (Giller et al., 2009). A critical issue hampering adoption of CA – as of other knowledge-intensive practices – is the risk of yield penalties during the transition period from current practices to full CA adoption. Reasons for potentially lower yields during the first years of CA adoption include (Affholder et al., 2010; Pannell et al., 2006; Tittonell et al., 2012): (i) the time needed to learn and eventually master a new way of farming, (ii) profound changes in the flow of resources (including labor) within the farming system, and (iii) the competition for mineral nitrogen between crops and decomposing soil bacteria when crop residues are kept as mulch. Yet, these shortcomings could be traded off by improved rainwater productivity in regions with erratic rainfall (Scopel et al., 2004), making CA attractive to family farmers from the first year of implementation.

Since 2003, CA has been promoted and disseminated in a region of erratic rainfall around Lake Alaotra, Madagascar, where upland rice expansion is taking place. Our objective was to assess the impact of conservation agriculture on yield and yield variability of upland rice during the first six years of CA adoption by local farmers. We monitored fields transitioning to CA over a period of four years in a series of locations and soil types, resulting in ca. 3800 site x season combinations. The data were analyzed through classification and regression trees and boundary line models (Delmotte et al., 2011; Tittonell et al., 2008) to unravel the effect of single factors.

2. Materials and Methods

2.1. Site description

The Lake Alaotra region (17°35'S, 48°30'E) is a graben located in Toamasina province 250 km north of Antananarivo, Madagascar (Bakoariniaina et al., 2006). The plain is located at 750 m elevation and covers an area of 180,000 ha. It is surrounded by high ferralitic hills raised on a granite-gneissic platform. A 25,000 ha shallow lake (2-4 m depth) is found in the centre of the plain. The region, which has always been a focus of rice production management strategies, is currently referred as the "Madagascar rice granary" (Devèze, 2006; Teyssier, 1994): The region consists of almost 30,000 ha of irrigated paddy fields (fields benefiting from irrigation channel maintenance) and 72,000 ha of paddy fields with poor water control (unsecure fields that can undergo damaging silting, drought or floods) (MAEP, 2004). The region attracts a high rate of immigration of farmers' families, resulting in the highest population growth rate in Madagascar over the last 20 years, with 4.2% growth per year (the mean annual population growth rate of the country is 2.7%) (Wilhelm and Ravelomanantsoa, 2006). The Lake Alaotra population was estimated to have doubled since 1987 and reached 670,000 in 2005 (Devèze, 2006).

As the farming systems are mainly based on rice cultivation, the dramatic increase in population forced farmers to develop and intensify rainfed production. Rainfed crops are grown either on ferralitic soils of hillsides with gentle to steep slopes or on alluvial soil of non-irrigated lowlands with more-or-less access to the water table (respectively referred as hillside and lowland in this study). The region is characterized by an erratic humid tropical altitude climate with a mean annual temperature of 20°C and a single rainy season, roughly from November to March, with a mean annual rainfall of 1000 mm. The rainy season is highly variable intra- and inter-annually in terms of duration, daily distribution and annual cumulated rainfall. In this context of hazardous climate, low capacity of investment combined with continuous tillage led to soil erosion and soil fertility losses, putting rainfed production at risk. Since 2003, the BV/Lac program has promoted and disseminated CA on a large scale to address these issues.

2.2. Yield, weather and management data

After a first phase of promotion of CA, the BV/Lac program entered a phase of dissemination of CA at a large scale based on farmers' volunteering. The program only provided technical advice at the field level and monitored main descriptive, management, and yield information (Laurent et al., 2011). Yields were calculated from the total weight of the grain harvested divided by the field area, which was known. Several CA cropping systems integrating rice in multi-year crop rotations and associations were proposed, most commonly (i)no-till maize associated with a legume during the first cropping season, followed by no-till upland rice on mulch of maize and legume residues during the second cropping season; and (ii) no-till maize associated with a legume during the first cropping season, followed by the growth of the legume that has not been harvested during the second cropping season, followed by no-till upland rice on mulch of maize and legume residues during the third cropping season. For the first year of involvement with the program (Y0), the soil was tilled and did not benefit from the mulch of the previous crop that has been conventionally grown. Tillage was then stopped from the second year of involvement with the program and remained so year after year (Y1, Y2, Y3, Y4+). Often, farmers wanted to grow rainfed rice during Y0. In this case, crop management was similar to tillage-based conventional crop management of rainfed rice at the exception that rice straws were kept in the field after harvest. However, it required to grow a legume the next cropping season (Y1) to produce enough biomass to then start a CA rotation in Y3, as proposed. This rice cropping system, which only occurs in Y0, is referred to as Cv in the study.

Table 4: Monitored farmers' fields
CA and Cv field distributions around the five villages during four cropping seasons for two landscape positions.

Village	Landscape position	Manage-ment	2006-07	2007-08	2008-09	2009-10	Total
Ambohimiarina	Lowland	CA	81	190	230	284	785
		Cv	139	229	183	174	725
	Hillside	CA	13	3	9	6	31
		Cv	24	10	2	7	43
Ambohitsilaozana	Lowland	CA	13	34	43	172	262
		Cv	52	84	141	192	469
	Hillside	CA	--	2	4	5	11
		Cv	4	2	8	1	15
Ambongabe	Lowland	CA	66	66	13	60	205
		Cv	54	65	43	16	178
	Hillside	CA	2	3	--	--	5
		Cv	1	2	1	--	4
Ampitatsimo	Lowland	CA	--	7	1	4	12
		Cv	--	3	5	3	11
	Hillside	CA	--	22	2	17	41
		Cv	--	13	5	11	29
Antsahamamy	Lowland	CA	13	38	35	51	137
		Cv	49	36	70	7	162
	Hillside	CA	67	88	107	121	383
		Cv	138	81	56	20	295
		Total	716	978	958	1151	3803

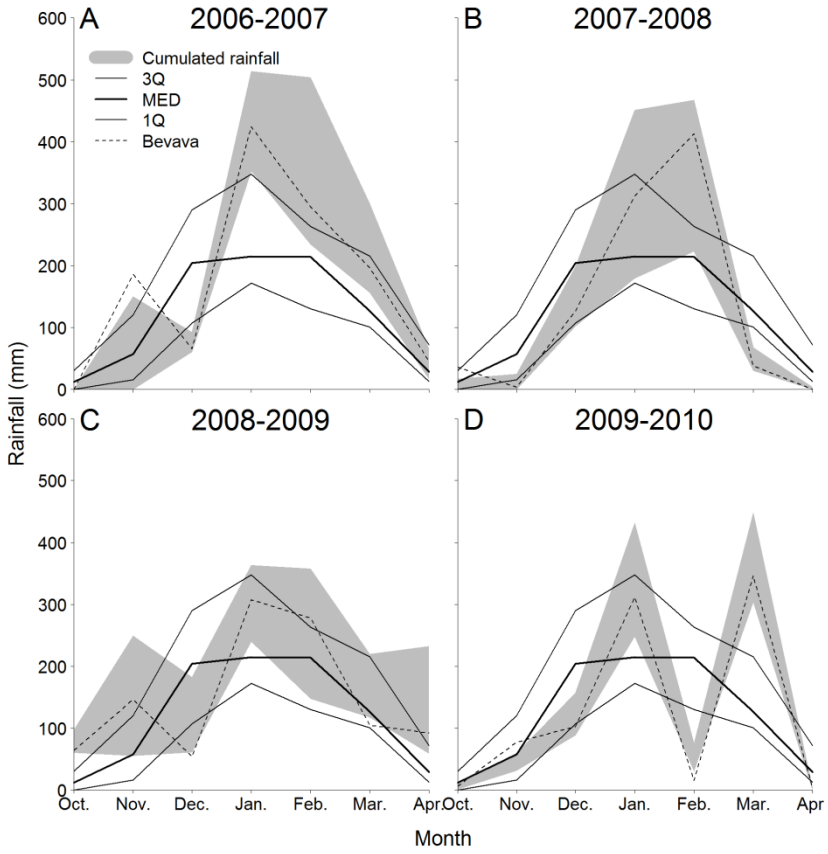


Figure 6: Rainfall distribution
Comparison, for each studied rainy season, between the actual monthly rainfall distribution (monthly rainfall distributions of the five localities are contained within the grey-colored area) and an average monthly rainfall distribution calculated from a 39-year series (Bevava weather station, 1963-1988 and 1990-2004 datasets, 1Q=first quartile, MED=median, 3Q=third quartile). The dashed line corresponds to the actual monthly rainfall distribution at Bevava for each rainy season.

Data on rainfed rice production and management were collected for cropping seasons 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009, and 2009-2010 around the five villages of the program scope on lowland and hillside fields, resulting in 3803 site x management x soil x season combinations (Table 4). Analyses were conducted independently for hillside (n=2946) and lowland (n=857) fields. The four rainy seasons covered by the study differed with respect to both the total amount of rainfall and its distribution (Figure 6). The 2006-2007 season was above average, lasting 137 days from mid-November to early April, with 1272 mm of total rainfall. The monthly rainfall distribution remained above the median, except in December when it showed a deficit of 100 mm (Figure 6.A). In 2007-2008, the onset of the rainy season was as late as mid-December, with a total of 887 mm, which fell over an 80 day period concentrated in January and February (Figure 6.B). The 2008-2009 rainy season showed a quasi-similar pattern as in 2006-2007, with the same deficit in December. The January/February rainfall peak was smaller, but the season lasted 30 days longer, resulting in a total rainfall of only 80 mm less (Figure 6.C). 2009-2010 was an average rainy season, with 960 mm falling in 111 days from late November to mid-March. However, there was an abnormal rainfall deficit in February and a violent tropical storm

occurred in March (more than 400 mm fell around March 8th, Figure 6.D) (Waliser and Moncrieff, 2011). Our study thus covered four unique years in terms of climate variability. Such variability was an opportunity to assess how these rain season profiles, among other agronomic, management and environmental factors, reflected on rainfed rice productivity. Using the daily rainfall series of the closest weather station from each field, we calculated the cumulated rainfall during: (i) the 15 days surrounding the sowing date, (ii) the 15 days before flowering, (iii) the entire development cycle, and (iv) the entire rainy season. We estimated a single 120-day phenological cycle starting at the sowing date, with a flowering stage 85 days after sowing (personal communication, Dusserre, 2012). Finally, we obtained a dataset structured as described in Table 5, source of all the results obtained in this study.

Table 5: Dataset structure
List of variables included in the final dataset.

Variable name	Unit or label	Description
General field information		
id_field	--	a unique designation number
crop_season	--	from September 2006 to April 2010
village	--	the nearest village with a monitored rain gauge
soil	--	landscape position (lowland, hillside)
area	ares	field area (100 ares = 1 hectare)
General management information		
tillage system	Cv, CA	conventional or conservation agriculture
CA_year	Y0, Y1, ..., Y4+	Y0 = conventional, Y1 to Y4+ = first to more than 4th year of CA
sow_date	date	sowing date of the rice crop
Pesticide use		
2,4D	binary	application YES or NO
glypho	binary	application YES or NO
Fertilization		
manure	t ha^{-1}	quantity of spread manure
urea	t ha^{-1}	quantity of spread urea
NPK	t ha^{-1}	quantity of spread NPK
nitrogen	t ha^{-1}	calculated quantity of Nitrogen use
Rainfall information		
rain_sow	mm	cumulated rainfall in the 15 days surrounding sowing date
rain_flow	mm	cumulated rainfall in the 15 days surrounding flowering
rain_cycle	mm	cumulated rainfall during the whole rice cycle
rain_year	mm	cumulated rainfall during the rainy season
Yield information		
yield	t ha^{-1}	calculated (rice production/field area)

2.3. Analyzing rice yield variability

All of the statistical analyses were performed using the R software version 2.14.1 (R Development Core Team, 2011). After a simple frequency distribution analysis of the entire dataset, we compared the impact of different factors on rice yield distributions. First, we focused on the effect of the number of consecutive years of CA cropping from Y0 (first year of involvement in the program under Cv) to Y4+ (fourth to sixth consecutive year of CA) to detect whether there was a progressive or cumulative effect on yield distribution over time. Then, we focused on the effect of nitrogen fertilization on yields. We only took the first two cropping seasons into account because chemical input prices tripled in 2008, which forced farmers to stop using fertilizers. Finally, we focused on the impact of the erratic rainfall

distribution on sowing dates and consequently on yield, as early sowing is considered to be one of the main advantages of CA. We used two common methods to statistically analyze distribution differences. The Student's t-Test allowed us to compare means of two groups. For multiple factor variables, we performed an analysis of variance and a Duncan's Test to test significant differences between group means.

Yield being the result of complex interactions between soil, crops, management and environment, we decided to run a Classification and Regression Tree (CART) analysis for each landscape position in order to classify the weight of potential explanatory variables in the yield distribution. CART analyses can deal with non-linearity, thresholds, skewed distributions and a mix of continuous and categorical variables. This non-parametric method and its application in the agronomy field is fully explained in Tittonell et al. (2008). Thus, for each landscape position, we considered:

Yield = f (General field information, General management information,
Pesticide use, Fertilization, Rainfall information)

Where General field information, General management information, Pesticide use, Fertilization and Rainfall information are categories pooling the variables presented in Table 5. With all these variables as candidate explanatory variables of yield, we generated complex trees and then pruned them back to select the most parsimonious tree models according to 20-fold cross-validations and the '1-Squared Error' rule (Breiman et al., 1984).

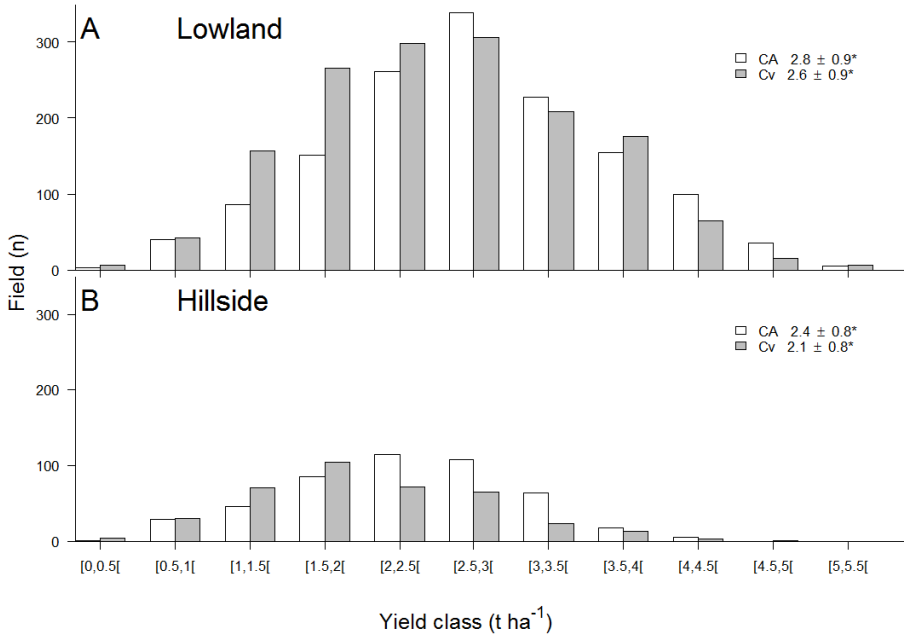


Figure 7: Overall yield distribution
Frequency distribution of yields among 11 classes for CA and Cv (A) on lowland (n = 2946) and (B) hillside (n= 857). * indicates that the two group means are statistically different according to a Student's t-test.

3. Results

3.1. Yield variability and short-term impact of CA

When considering all locations, years, landscape positions and soil management systems, the average rainfed rice yield of the whole dataset was 2.6 ± 0.9 t ha^{-1}, which is above the average rainfed rice yield for the region (2.0 t ha^{-1}, Penot et al. 2010). Monitored fields presented a wide array of rice yields for both lowland and hillside. It ranged from 0.3 t ha^{-1} to 5.4 t ha^{-1} and from 0.4 t ha^{-1} to 4.5 t ha^{-1}, respectively (Figure 7). The coefficient of variation, exceeding 30%, illustrates the large yield variability in the region. Given the number of fields considered in this study, we considered the highest yields compiled in this study to be fairly representative of the highest attainable upland rice yield for family farmers in the region, i.e. 5.4 t ha^{-1} on lowlands and 4.4 t ha^{-1} on hillsides. Maximum and average yields were higher on lowlands than on hillsides. Lowland alluvial soils provide a better agroecological environment and, consequently, higher soil fertility which resulted in an average 0.5 t ha^{-1} yield gap between lowland and hillside fields in our study.

When considering all years and locations, the average yields under CA were significantly higher than under Cv for the two landscape positions (0.2 t ha^{-1} higher on lowland and 0.3 t ha^{-1} higher on hillside, Figure 7), while the magnitude of yield variability was only slightly reduced under CA (the coefficient of variation was only 3% to 5% lower). As the maximum observed yield was the same under Cv and CA (5.4 t ha–1 on lowland and 4.4 t ha–1 on hillside), the net effect of CA was thus a significant reduction in the yield gap, without impacting – on average – on the maximum attainable yield on farmer's fields.

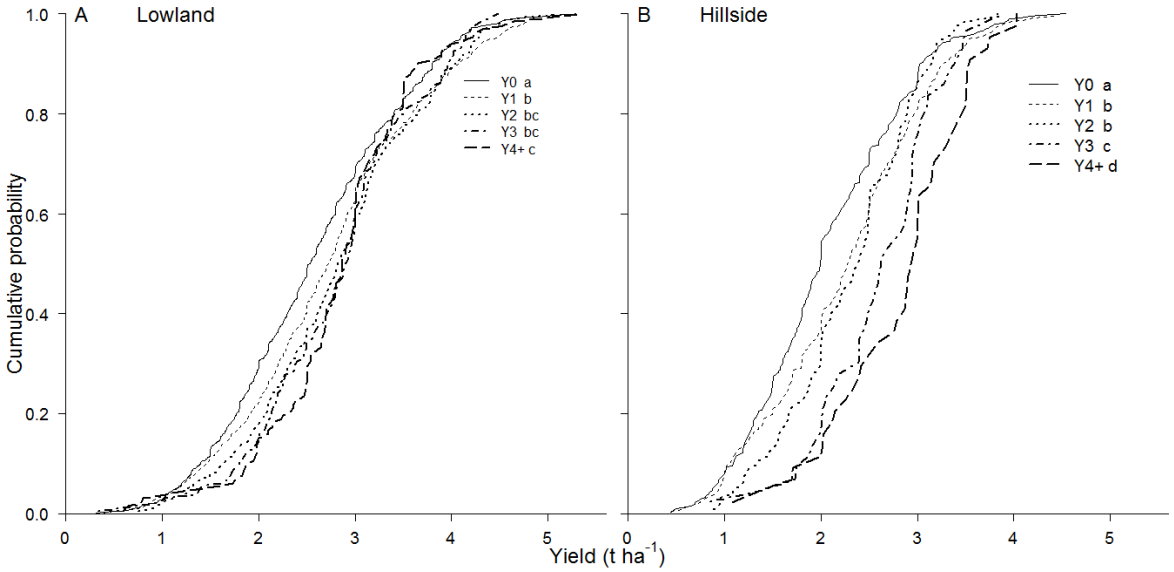


Figure 8: Evolution of yield distribution
Cumulative probability distribution of rainfed rice yield in (A) lowland fields (n = 2946) and (B) hillside fields (n= 857) under conventional tillage (Y0) and under one to four or more consecutive years of conservation agriculture (Y1 to Y4+). The letters a, b, c, and d pool homogenous groups according to Duncan's test.

Consecutive years of CA on the same field progressively improved productivity and decreased yield variability from the first year of CA application. On lowland fields, average yields increased only slightly (+0.2 t ha^{-1}) but significantly from the first year, under Cv, to the fourth to sixth consecutive year under CA (Figure 8), together with a 6% decrease in the coefficient of variation. On hillside fields, average yields increased by 0.7 t ha^{-1} after four years of CA, with a decrease in variance that resulted in a 13% decrease in the coefficient of variation. Although these are average yields from a large diversity of situations in terms of location, year, landscape position, and farmer management decisions, CA exhibited a cumulative positive effect on yields year after year, starting from the first year of application.

3.2. Nitrogen fertilization effect

Mineral fertilization was highly dependent on the market conditions. The soaring price paid locally for mineral fertilizers resulted in a dramatic decrease in their use. While more than 70% of the fields monitored had been fertilized with mineral N until 2008, only 18% of them received fertilizers in cropping season 2008-2009, and 0% in cropping season 2009-2010. Overall, nitrogen fertilization was highly variable (coefficient of variation of almost 100%) and poorly correlated to yield (less than 5% of correlation). There was no obvious relationship between soil management and the fertilization strategy, i.e. no clear pattern was noted after the comparison of nitrogen application depending on the number of continuous years of CA involvement (Table 6). The average fluctuated around 21 kg N ha^{-1} on lowland and 24 kg N ha^{-1} on hillside when fertilizers were used, regardless CA or Cv management, so that the observed differences in yield between both systems were not due to significantly different N fertilization rates.

Table 6: Nitrogen fertilization
Average nitrogen fertilization rates, comparing (A) CA and Cv for 2006-2007 and 2007-2008, and (B) consecutive years of CA application, the two cropping seasons combined. * indicates that the two group means are statistically different according to a Student's t-test. For the same landscape position the letters a, b and c pool homogenous groups according to Duncan's test.

A			n	Lowland (kg N ha^{-1})	n	Hillside (kg N ha^{-1})
	2006-2007	CA	173	30 ± 23	82	35 ± 19*
		Cv	295	28 ± 23	167	28 ± 19*
	2007-2008	CA	335	17 ± 16	118	21 ± 15
		Cv	417	17 ± 17	108	20 ± 18
B	The two crop seasons combined					
		Y0	712	22 ± 21 ab	275	25 ± 19 ab
		Y1	331	21 ± 20 b	137	29 ± 19 a
		Y2	104	25 ± 21 a	51	21 ± 17 b
		Y3	49	16 ± 17 c	10	20 ± 17 b
		Y4+	24	23 ± 15 ab	2	21 ± 3 b

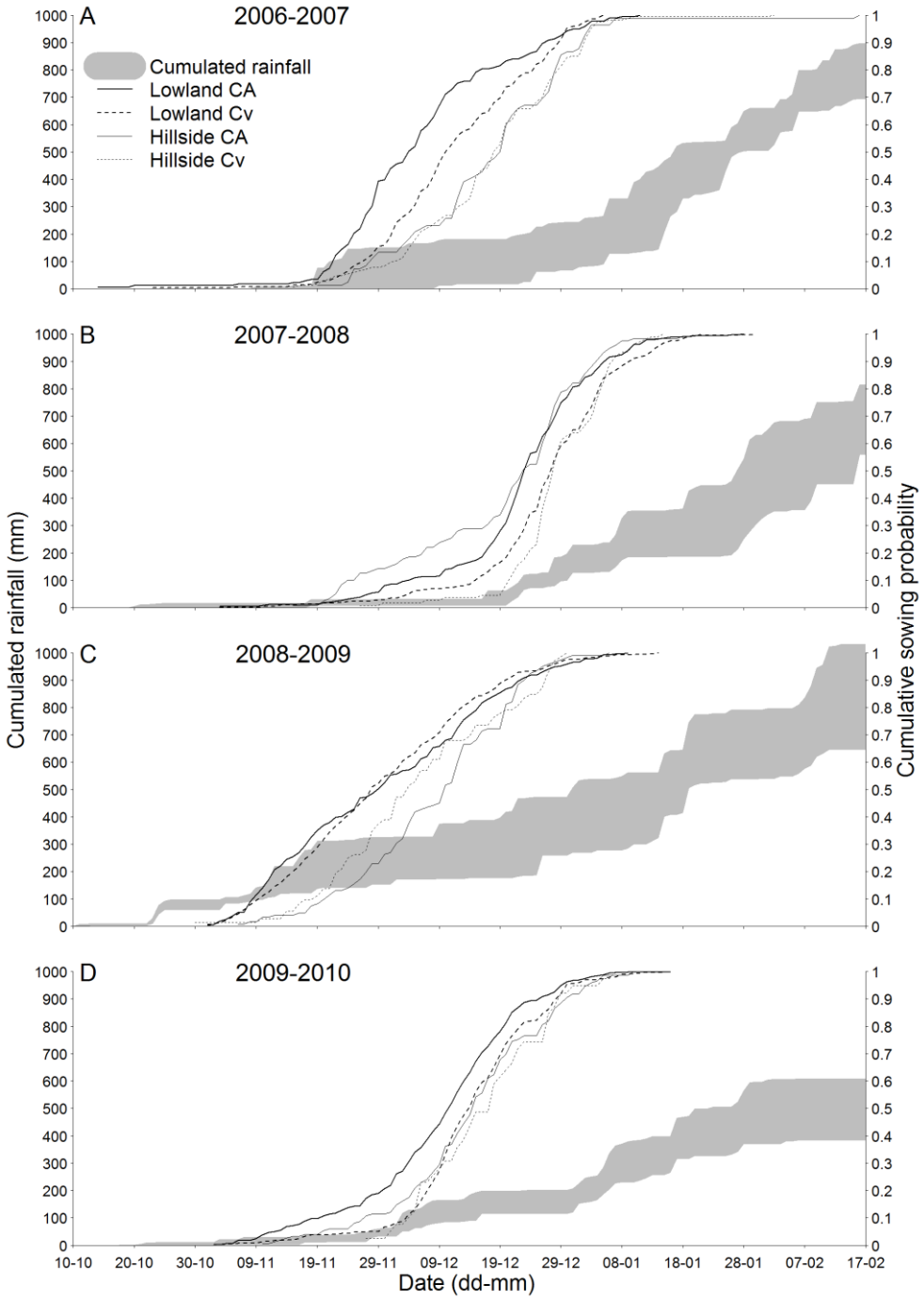


Figure 9: **Rainfall & sowing strategies**
Cumulated rainfall (the grey-colored area is limited by the minimum and maximum daily cumulated rainfall observed at the five villages) and cumulative probability of sowing date distribution under Cv and CA for both lowland and hillside during the four crop seasons.

3.3. Effect of season and sowing date

Given the contrasted climatic years (Figure 6), farmers had to adapt their sowing strategy to each rainy season pattern. In 2007-2008 and 2009-2010, the rainy season started late, and a large majority of fields were sown at the time of the first rainfall (81% of fields in 2007-2008, Figure 9.B and .D). For the two other cropping seasons (2006-2007 and 2008-2009), sowing strategies differed depending on

landscape position. Lowland fields were sown earlier than hillside fields in both cropping seasons. When comparing tillage systems, we observed that the CA sowing peak occurred 10 days before the Cv sowing peak (Figure 9.A and .C). In 2006-2007, CA sowing was concentrated within a 20-day window, while Cv sowing was spread over 40 days. In 2008-2009, sowing was spread over 50 days for both tillage systems. Hillside fields were sown later than lowland fields and the sowing dates were spread over a 50-day period both years. CA and Cv fields were sown simultaneously in 2006-2007, but CA fields were sown slightly later in 2008-2009. No specific sowing strategy was pursued during these four seasons. Sowing was mostly driven by the rainfall distribution and particularly by the onset of the rainy season.

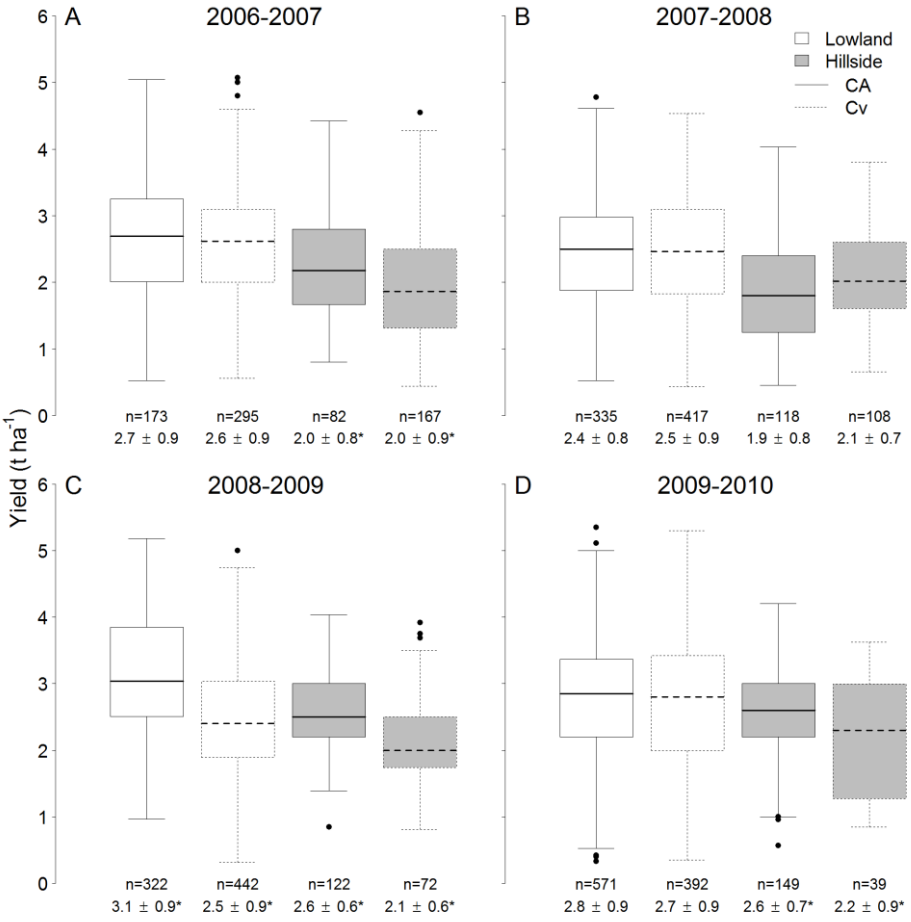


Figure 10: Yields over the seasons
Boxplot distribution of rice yields under Cv and CA for both landscape positions in (A) 2006-2007, (B) 2007-2008, (C) 2008-2009 and (D) 2009-2010. * indicates that the two group means are statistically different according to a Student's t-test.

Irrespective of the sowing date, average yields under CA were always equivalent or higher than average yield under Cv each season (Figure 10). The lowest yields were observed during cropping season 2007-2008, the driest one, with no average difference between CA and Cv. Yield differences in favor of CA were observed on hillside fields during the three other rainy seasons and on lowland fields

during 2008-2009. These three rainy seasons, averagely better than 2007-2008, underwent an important rainfall deficit during a month. Thus, the intra-annual variability of rainfall did not affect yield under CA when the rainy season was averagely good. For both landscape positions the highest average yield under CA was obtained during the cropping season 2008-2009, the longest and wettest.

Table 7: Yields and extreme sowing dates
Focus on extreme sowing dates. Average yield comparison between CA and Cv for the four cropping seasons, considering the first 25% of sown fields (Early) and the last 25% of sown fields (Late) (A) on lowland, and (B) on hillside. * indicates that the two group means are statistically different according to a Student's t-test.

			Yield (t ha-1)			
			2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010
A	Early	CA	2.7 ± 0.9	2.6 ± 0.7*	3.0 ± 0.8*	2.7 ± 0.8
		Cv	2.8 ± 0.9	2.3 ± 0.9*	2.6 ± 0.9*	2.7 ± 0.9
	Late	CA	2.6 ± 0.9	2.3 ± 0.9	3.0 ± 0.9*	2.7 ± 1.0
		Cv	2.3 ± 0.9	2.4 ± 0.9	2.5 ± 0.9*	2.7 ± 1.0
B	Early	CA	2.5 ± 0.8	1.9 ± 0.8	2.7 ± 0.5	2.5 ± 0.8
		Cv	2.2 ± 0.9	2.3 ± 0.8	2.4 ± 0.7	2.2 ± 0.9
	Late	CA	2.3 ± 0.9*	1.7 ± 0.7	2.8 ± 0.7*	2.4 ± 0.7*
		Cv	1.7 ± 0.7*	2.0 ± 0.6	2.3 ± 0.7*	1.7 ± 0.8*

When focusing on extreme sowing dates, both the earliest and latest each year, we observed that average yields under CA were always equivalent or higher than under Cv (Table 7). Yield differences in favor of CA were mainly noted in late-sown fields in 2006-2007 and 2008-2009. In these two cropping seasons, there was a rain deficit in December (Figure 6), which had a higher negative impact on germination under Cv. CA appeared to allow not only early-planting but also delayed sowing which widens the sowing window and enables more flexibility in terms of labor allocation.

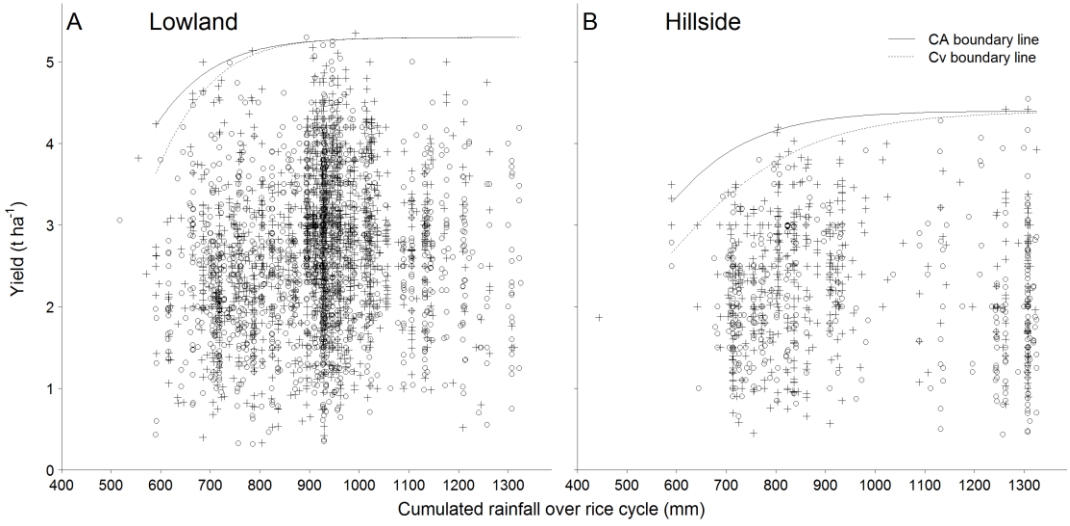


Figure 11: Yields & rainfalls
The relationship between cumulated rainfall during rice cycle and yield for both landscape positions. Boundary line models were fitted to the maximum yield observed for each level of rainfall: (A) for Cv $y=5.3*(1/1+614\exp(-0.0122x))$ $r^2=0.99$, for CA $y=5.3*(1/1+125\exp(-0.0105x))$ $r^2=0.94$, and (B) for Cv $y=4.4*(1/1+31\exp(-0.00655x))$ $r^2=0.95$, for CA $y=4.4*(1/1+50\exp(-0.00846x))$ $r^2=0.93$.

Under a certain threshold of cumulated rainfall during rice cycle, CA appeared to improve the rainfall use efficiency. The boundary line models, fitted to the maximum observed yields at each rainfall level indicate that the attainable yield in lowland fields (5.4 t ha-1) was reached at a threshold of total rainfall of 900 mm, and in hillside fields at 1300 mm. Below this threshold, the lower the total rainfall the larger the yield difference in favor of CA, which exceeded 0.5 t ha^{-1} for 600 mm of total rainfall in the two landscape positions (Figure 11).

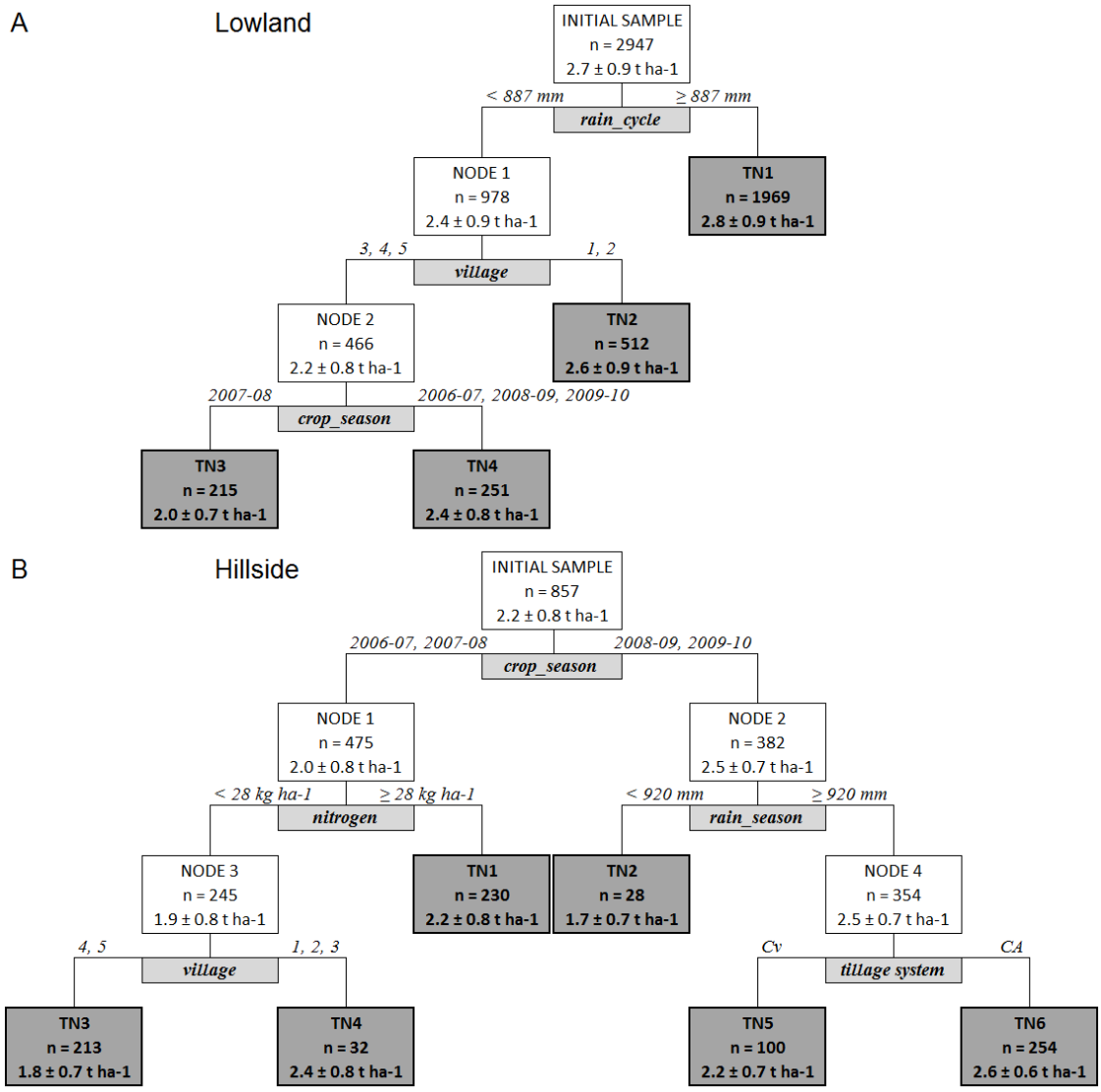


Figure 12: Factors impacting yield distribution
Classification and regression tree models to describe rice yield (A) on lowland and (B) on hillside as a function of agro-environmental and management variables. The initial sample is divided into two nodes (white square boxes) according to a splitting criterion (white font labels) and its threshold (mentioned on the branches). For qualitative variables, the threshold is a list of values such as a list of villages. Each node can be split into two smaller nodes while it is statistically relevant. When a node cannot be split further, it is called a terminal node (TN, grey square boxes). The number of observations and the average yield are contained in each node. The five villages are 1=Ambohimiarina, 2=Ambohitsilaozana, 3=Ambongabe, 4=Ampitatsimo and, 5=Antsahamamy.

3.4. Ranking factors in order of yield explicability

Until now, we focused on the individual effects of landscape position, tillage system, years under

consecutive CA cropping, nitrogen fertilization, rainfall, and sowing date. These factors, which are in reality complexly intertwined, were categorized through classification and regression trees for both landscape positions, with 'rice yield' as target variable (Figure 12). On lowland fields (n=2947, Figure 12.A), total rainfall during the rice cycle was the main factor that explained the yield variability. Maximum average yields (2.8 ± 0.9 t ha^{-1} on average) were obtained on fields that received more than 887 mm of cumulated rainfall during the rice cycle (Terminal node 1, n = 1969 fields). Fields that received less than 887 mm of total rainfall (Node 1, n=978) produced an average yield of 2.4 ± 0.9 t ha^{-1}, and they were further split by village (Node 2, n=466) and cropping season (Terminal node 3, n=215). Fields located in Ambongabe, Ampitatsimo or Antsahamamy produced the smallest yields in 2007-2008, of 2.0 ± 0.7 t ha^{-1} on average, and yields that were on average 20% larger the rest of the seasons (Terminal node 4, n = 251).

On hillside fields (Figure 12.B), yields were categorized not only by environmental variables such as locality or cropping season but also by management variables. The highest average yield (2.6 ± 0.6 t ha^{-1}) was obtained in fields cultivated in 2008-2009 or 2009-2010, with more than 920 mm of annual rainfall, and under CA (Terminal node 6, n = 254). In 2006-2007 and 2007-2008, yields were lower and were further split by nitrogen application rate (above or below 28 kg ha-1), and fields receiving less nitrogen yielded more or less depending on the locality. Tillage system (CA vs. Cv) was a splitting criterion for yields in wetter seasons, resulting in the highest average yield, as mentioned above, but most importantly in the lowest standard deviation (23% coefficient of variation). These trees illustrated the weight of the environmental factors and particularly rainfall on rainfed rice production in our dataset, and indicated that the positive effect of CA was part of a combination of factors resulting in the highest yields for the lowest variability.

4. Discussion

In many parts of SSA, rainfall is typically erratic and unreliable (Giller et al., 2011). Combined with the farmers' low capacity of investment and the poor fertility status of soils, rainfed crop production remains hazardous and unsteady. As shown in the climatic analysis (Figure 6) and the in yield frequency distribution of the entire sample of fields monitored in this study (Figure 7), the Lake Alaotra region is not spared. In this context, CA appeared to decrease production risk by increasing yields, on average, and by reducing the coefficient of variation on the short to mid-term. These observations were more notorious on hillside than on lowland fields and they contravene the common scheme of yield penalties during the first years of transition to CA that is often reported in the scientific literature (Abdalla et al., 2007; Akinyemi, 2003; Giller et al., 2009). Significant – though relatively narrow – yield differences in favor of CA were observed from the first year of implementation, and they progressively kept on

increasing year after year (Figure 8).

The implementation and eventual adoption of CA technologies often come along with an increased use of mineral fertilizers, and the extent of yield benefit actually due to the CA innovation itself becomes hard to identify and isolate (Giller et al., 2009; Naudin et al., 2010). In our study, the bias related to the role of fertilizers in yield enhancement could be effectively avoided thanks to the large number of fields that were monitored, among which we observed variable rates of fertilizer use. We showed that even though N fertilization had a significant positive yield impact for some hillside fields, it was not related to the application of the new CA technology. Indeed, CA did not go hand-in-hand with higher N fertilization. When comparing yields under CA and Cv on different landscape positions, cropping seasons or consecutive years of CA practice, average yields obtained under CA were always equivalent or even higher, regardless of the extent of N fertilization. The highest average yields on hillside, with the lowest variability, were obtained under CA without any fertilizer use because of the soaring fertilizer prices experienced since 2008. We thus showed that the increase in yield under CA was not due to an increase in fertilizer. Our results thus indicate that, in these soils, CA does not necessitate higher N input levels to achieve yields similar to those obtained with conventional cropping systems (Abiven and Recous, 2007). N immobilization was not systematic under CA in this region, as noted in other SSA regions (Giller et al., 2009), probably because the CA systems assessed here were diversified crop rotations, with legumes cover crops rotating or intercropped with maize prior to rainfed rice under CA.

Early sowing is considered to be one the main advantages of CA. It avoids competition with other crops in terms of labor, without any negative impact on yield. Nevertheless, no comparison across a range of sowing dates has been done to date (Giller et al., 2011). In this study, early sowing did not seem to be systematically applied on farmers' fields. Although a small minority of fields under CA were sown earlier, especially during years with late rainy seasons, most fields were sown virtually at the same time. CA sowing was even delayed on hillsides during the 2008-2009 cropping season. Technical, economic and social enabling or constraining factors are intimately linked with farmers' decision making. In addition to the technical support provided by the program, farmers' own choices resulted in a wide array of probable crop husbandries. The intention to make use of the early sowing advantage of CA was slightly perceptible in the study. The yield comparison at early or late sowing dates showed that yields under CA were always equivalent to or higher than those under Cv. The synchrony between the sowing period and the occurrence of rain storms – which is relatively random – seemed to have a significant impact on productivity (Scopel et al., 2004). While germination in fields under CA might have benefitted from extra soil moisture due to mulching, germination under Cv suffered from the lack of

rain in December during the 2006-2007 and 2008-2009 rainy seasons. These findings open up avenues of research on improving water capture to reduce yield variability associated with erratic rainfall regimes. CA appeared to widen the sowing window, allowing better flexibility not only limited to the early-planting benefit often highlighted in literature. Mulch offers a better environment for sowing, thus reducing the dependency and need for synchrony between the germination stage and major rainfall events, thereby spreading labor demands more evenly. At the farm level, this could be a considerable advantage by avoiding competition with other crops for labor use via backward or forward deferral of sowing.

The overall comparison of rice yields under CA and CV and the single factor comparisons (nitrogen, rainfall, sowing dates, landscape position) gave the same result each time: average yields under CA were equivalent to or even higher than average yields under Cv. The classification and regression tree analysis highlighted the importance of agro-environmental variables in determining yields, in line with empirical findings on maize in southern Africa (Rusinamhodzi et al., 2011), revealing that no crop husbandry can totally offset extreme climatic conditions. The 2007-2008 rainy season happened to be the shortest and driest one of the study, resulting in the lowest yields, with no significant yield differences noted between CA and Cv management.

CA showed its best potential under the overall best climatic conditions (Figure 6 and Figure 12). These results could be explained by the weed-control function of mulch (Teasdale and Mohler, 2009). Farmers are better able to control weed emergence in conventional fields when the rainy season is dry. When rainfall is abundant, weeding becomes a real issue that can overwhelm farmers, who are unable to allocate enough labor to this activity (Naudin and Rasolofo, 2012). In this latter case, the 'weed prevention' function of a dense mulch allows better initial crop development, thus increasing the yield difference between CA and Cv. In addition, mulching has a major influence on the water balance – it improves water use efficiency by reducing soil evaporation and runoff and increasing infiltration (Adekalu et al., 2007; Findeling et al., 2003; Scopel et al., 2004). Although the climatic conditions during the 2006-2007 and 2008-2009 rainy seasons appeared to be generally better, a rainfall deficit did occur during the crucial stage of rice germination. The greater yields observed under CA in these seasons suggest also that mulching contributed to buffer the variability associated with erratic rainfall distribution within a season.

5. Conclusion

In the context of the Lake Alaotra, Madagascar, we showed clear evidence of CA benefits on the short and mid-term for family farmers cultivating upland rice on a wide diversity of environments resulting from the combination soil types, land use history, seasons and management practices (3803

observations). Although the yield differences in favor of CA were only in the order of 20%, this study showed no evidence of yield penalties often observed during the first years of CA adoption. Implementation of CA practices by local family farmers over four consecutive years led to gradual yield increases and gradual reduction of yield variability, particularly on hillside fields, without increasing fertilizer use, and allowing more flexibility in sowing dates to cope with erratic rainfall. As the CA systems implemented included crop rotations, this contributed also to a diversification of the agricultural produce of these family farmers, who grow typically rice monocultures. In a constraining environment, in terms of both biophysical and socioeconomic conditions, the implementation of a new technology which is able to address a direct constraint will immediately express its potential. In the case of upland rice in Lake Alaotra, the capacity of conservation agriculture to buffer the effect of erratic rainfall may facilitate the process of adoption by family farmers.

Chapitre III

Impact du mulch sur le bilan hydrique

Ce chapitre est adapté de l'article :

Bruelle, G., Affholder, F., Abrell, T., Ripoche, A., Dusserre, J., Naudin, K., Tittonell, P., Rabeharisoa, L., Scopel, E., 2014. Mitigating water stress trough conservation agriculture: the case of upland rice growing under the erratic rainfall condition of the Lake Alaotra region of Madagascar. En cours de finalisation pour soumission.

Synthèse

Introduction

En alternative aux techniques conventionnelles de cultures sur labour, l'agriculture de conservation (AC) est diffusée dans de nombreux pays tropicaux comme solution durable de productivité. Parmi les trois principes de l'AC, la couverture permanente des sols cultivés augmente l'infiltration et diminue l'évaporation. Ces fonctions permettent de tamponner le stress hydrique en zone semi-aride. Au lac Alaotra, Madagascar, caractérisé par une pluviométrie très aléatoire, l'AC a été introduite récemment afin d'assurer la productivité des cultures pluviales, notamment en tamponnant en améliorant le bilan hydrique. Mais dans les conditions climatiques de la zone, aucune expérimentation n'a encore été mise en place pour analyser l'impact du couvert végétal sur le bilan hydrique et les rendements. En alternative à la mise en place d'une expérimentation lourde, nous avons proposé d'utiliser un modèle biophysique pour capturer la variabilité des conditions agroécologiques et climatiques de la zone d'étude, dans l'objectif de faire une évaluation *ex-ante* de l'impact du mulch sur la dynamique de l'eau et les rendements en riz sous le climat erratique du lac Alaotra. Nous avons utilisé le modèle PYE-CA et une expérimentation virtuelle sur 17 années climatiques.

Matériels et Méthodes

Pour analyser l'impact du mulch sur le bilan hydrique dans les conditions du lac Alaotra, nous avons procédé en deux étapes : (i) calibrer le modèle avec des données expérimentales et (ii) réaliser une expérimentation virtuelle. Nous avons basé notre étude sur le cultivar non photosensible B22.

PYE-CA est dérivé de PYE, un modèle à pas de temps journalier qui simule croissance et rendements potentiels ou limité en eau, sans limitation autres que la température, le rayonnement et la pluie, auquel nous avons ajouté un module pour simuler l'impact du mulch sur le ruissellement et l'évaporation.

Le module phénologie est basé sur l'approche classique des constantes de temps thermiques. Le LAI atteint son maximum avant le début du remplissage du grain. L'accumulation de biomasse est fonction de l'interception lumineuse par le LAI et d'un coefficient de conversion de rayonnement en biomasse. Le rendement grain est calculé sur la base d'un indice de récolte. Un coefficient de stress hydrique, calculé dans le module de bilan hydrique, réduit le LAI et la croissance de biomasse.

Le module bilan hydrique est basé sur l'approche de 'tipping bucket'.

Le module mulch prend en compte la décomposition des résidus de culture au cours du temps, la capacité de rétention d'eau du mulch, la diminution du ruissellement et l'évaporation.

Des expérimentations en station ont été mises en place pour estimer les paramètres cultivar- et site-dépendants. Les autres paramètres ont été extraits de la littérature.

Nous avons réalisé une expérimentation virtuelle sur 17 années de pluies journalières (de 1994 à 2012, 1998 exclus) en faisant varier cinq facteurs pour prendre en compte la variabilité des pratiques agricoles et des conditions agroécologiques : (i) la date de semis, (ii) la réserve utile du sol, (iii) le remplissage du sol en début de saison culturale, (iv) le niveau de ruissellement et d'évaporation et (v)les limitations de croissances et de rendements par les apports nutritifs.

Résultats et Discussion

Parmi les différents paramètres estimés durant la phase de calibration, nous avons constaté une réduction efficace du ruissellement par le mulch, ce qui confirme les résultats déjà démontrés par ailleurs. Les niveaux très bas de ruissellement mesurés peuvent être expliqués par la faible pluviométrie de l'année de mesure. C'est pour cela que nous avons intégré un niveau de ruissellement de 30%, étant le maximum observé dans la région d'après la littérature. Nous

avons aussi observé une réduction efficace du ruissellement avec une faible quantité de mulch sur la parcelle. Ainsi, exporter une partie des résidus de cultures pour l'alimentation du bétail semble être possible sans altérer la fonction de diminution du ruissellement du mulch.

Les simulations nous ont permis d'identifier la période de semis pour la quelle la culture de riz est la moins sujette au stress hydrique dans les conditions du lac Alaotra : il s'agit de la fin du mois de novembre. Cette période correspond aux dates de semis majoritairement pratiquées par les agriculteurs au lac Alaotra. En culture pluviale, les pratiques semblent donc être principalement guidées par les conditions agro-climatiques de la région.

Les conditions simulées les moins stressantes du point de vue hydrique sont celles où le sol est à saturation en début de saison et avec la plus importante réserve utile. Dans les conditions de croissance limitée par l'apport nutritif, l'impact du stress hydrique sur les rendements s'exprime de la même manière, avec une amplitude des différences de rendements moindre.

De manière générale, la diminution du ruissellement et de l'évaporation par l'apport d'un mulch sur la surface provoque une augmentation des rendements simulés et une diminution du risque interannuel. Cette augmentation des rendements simulés est très limitée et apparaît de manière plus prononcée pour les dates de semis précoces ou tardives, relativement à la période optimale de novembre. Si les rendements ne sont pas grandement changés, le risque interannuel est diminué, particulièrement pour les dates de semis précoce et dans les conditions les plus stressantes, offrant jusqu'à 35 jours en dehors des dates de semis idéales pour assurer les mêmes niveaux de production.

Dans les conditions simulées, notre étude a aussi montré qu'une amélioration de l'infiltration se traduit par une augmentation du drainage sous la couche de sol colonisée par les racines. Ces résultats montrent l'importance de la distribution des pluies pendant la saison. Il semble qu'au lac Alaotra les épisodes pluvieux permettent un remplissage de la réserve utile des sols même avec un niveau de ruissellement élevé. Ainsi, réduire le ruissellement, dans la majorité des cas, ne modifie que très peu la disponibilité en eau pour la culture. Les effets deviennent intéressants dans les conditions très stressantes.

Conclusion

Intégrer l'effet du mulch dans la modélisation de la dynamique de l'eau des sols cultivés nous a permis de mieux appréhender l'impact de la distribution des pluies sur la croissance et les rendements du riz puvial dans les conditions climatiques du la Alaotra. La variabilité pluviométrique dans la région induit un stress hydrique qui, dans la majorité des conditions agroécologique et pour la majorité des pratiques agricoles, n'est que très peu tamponné par l'apport d'un mulch. En revanche, l'AC semble offrir des opportunités de pratiques plus flexibles (date de semis précoce) ou d'intensification sans augmenter le risque. Etant données la tendance climatique actuelle de raccourcissement de la saison des pluies, l'AC peut être envisagée pour sécuriser les semis. Il serait intéressant d'étudier l'impact, à l'échelle exploitation, de décaler les semis. De plus, si cette étude se focalise sur l'impact au niveau du bilan hydrique, le mulch et l'AC en générale ont d'autres fonctions agronomiques (lutte contre les adventices, augmentation de la matière organique des sols, …) qui pourraient être pris en compte pour une analyse plus complète.

1. Introduction

As an alternative to conventional tillage, conservation agriculture (CA) is promoted in many tropical countries to cope with the issues of productivity and sustainability of family farm's production systems (Brouder and Gomez-Macpherson, 2014; Lal, 2006; Scopel et al., 2013). Among the three principles of CA, as defined by the FAO (2014), the permanent retention of crop residues on soil surface increases water infiltration (Findeling et al., 2003; Rao et al., 1998) and reduces soil evaporation (Adekalu et al., 2007; Todd and Klocke, 1991). These functions of a surface mulch are effective to limit water stress and increase productivity in semi-arid regions, but under more humid climates, even with strong inter-annual variability of rainfall, they may translate into increased drainage below the root zone rather than attenuating water stress (Scopel et al., 2004).

In the Lake Alaotra region of Madagascar, the area under rainfed upland rice has expanded lately in response to the increasing food needs of the growing local population. The region is characterized by a variable rainfall distribution (Bruelle et al., 2014) and upland rice yield is expected to be strongly dependent on rainfall, specifically on hillsides. The idea of introducing conservation agriculture has emerged recently as a way to prevent soil erosion and to improve nutrient and water balances on the newly cultivated area, especially on sloping land (Tittonell et al., 2012). Under the soil and climatic conditions of the region, no experimental evidence has been yet reported regarding the impact of mulch of crop residues on water balance and yield risk of rainfed rice. Building appropriate agronomic experimentation for doing so would require experimental plots to cover a relatively large number of years and locations to capture the spatial and temporal variations of soil and climate. As an alternative, a modeling approach allows simulating crop growth and yield over a long climate data series while requiring a relatively limited set of experimental data to evaluate and calibrate the model.

The objective of this study was to carry out an *ex-ante* evaluation of the impact of mulch on soil water dynamics in the hazardous rainfall context of the Lake Alaotra region of Madagascar, and consequently the impact on upland rice yield. We used the simulation tool PYE-CA (Potential Yield Estimator for Conservation Agriculture) and a virtual experiment approach on a long-term weather data series to better identify the agroecological conditions under which mulch is likely to buffer rainfall variability and water stress.

2. Material and Methods

The modeling approach to assess the impact of mulch on water balance under the agroecological conditions of the Lake Alaotra consisted in two steps: (1) calibrating a model using experimental data and (2) performing a virtual experiment.

The calibration step aimed at estimating cultivar-dependent, soil-dependant and mulch-dependent parameters of the model, i.e. parameters of the model for which no-direct measurement is practicable and no reference from the literature is suitable. The virtual experiment consisted in running sets of simulations with the model in order to estimate the water fluxes, phenological development, growth and yield of a rainfed rice crop over a range of agroecological conditions and management options chosen to cover the variability of upland rice cropping conditions met by farmers in the region. All calibration measurements and simulations detailed in this section were performed on cultivar B22, a non-photoperiodic rainfed rice cultivar adapted to the agroecological conditions of the region and commonly used by local farmers.

2.1. Model presentation

We chose to use the model PYE (Potential Yield estimator, fully described in Affholder et al., 2013), a crop growth model with a minimum data requirement based on the re-use of existing model components: STICS for the crop development and growth module (Brisson et al., 2003, 1998), Sarra for the water balance module (Affholder, 1997; Forest and Clopes, 1994). PYE works on a daily time step and simulates potential and water limited crop growth, potential yield and water-limited yield, the latter being defined as the yield that would be achieved without any growth limitation other than temperature, solar radiation, and rainfall (van Ittersum and Rabbinge, 1997). We brought a few modifications to PYE in order to make it able to simulate the impact of mulch on runoff and evaporation. The resulting model, built *ad hoc* for the specific purpose of our study (Affholder et al., 2012; Sinclair and Seligman, 1996), is called PYE-CA in the remainder of the text. Below we describe the main features of the model and all the components that needed to be empirically calibrated specifically for the studied region and the methodologies used.

Main features of PYE:

In PYE, crop phenology is calculated using a classical thermal time approach (Gao et al., 1992). Thermal time constants are assumed cultivar-dependant and temperature thresholds species-dependant. We considered six key development stages in the study: (i) germination to emergence (Ger), (ii) emerging to maximum tillering (Juv), (iii) maximum tillering to the end of increase in leaf area index (LAI) (Till), (iv) the end of increase in LAI to the start of grain filling (Flow), the start of grain filling to the start of decrease in LAI (Grain), and (vi) the start of decrease in LAI to maturity (Mat).

LAI is assumed to be only depending on thermal time, water stress, and the cultivar-dependant value of LAImax, the maximum LAI reached at the end of stage Till (Figure 13). Likewise, root development is assumed to be only depending on thermal time, soil water content, and the maximal

root depth ZRmax.

Biomass accumulation is calculated using a beer-law formula for light interception by LAI and a net light-to-biomass conversion formula in which a coefficient accounts for growth limitation by water stress:

$$dBiom = Ebmax \times (Raint / 100) \times Ftemp \times WS$$

where dBiom is the daily accumulation of biomass, Ebmax a species-dependant coefficient of maximal net radiation conversion; Raint the solar interception by the leaves depending on global daily radiation, a species-dependant coefficient of radiation extinction, and the LAI; Ftemp the coefficient of sensitivity to temperature depending on species-dependant temperature thresholds; and WS the water stress coefficient.

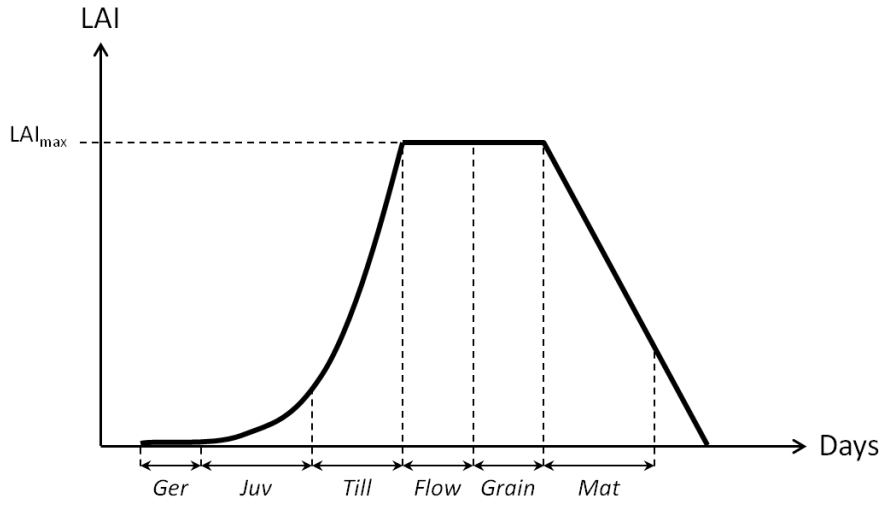


Figure 13: Modeling LAI
Potential Leaf Area Index (LAI) according to the six rice development stages as simulated in PYE-CA.

Grain yield is derived from the total aerial biomass using a harvest index approach coupled with a sink limitation (Brisson et al., 1998):

$$Yield = Minimum (Biom \times HI, W1Smax \times Ngrain)$$

$$Ngrain = Cgrain \times Growth + CgrainG0$$

where Yield is the grain yield, Biom the biomass produced, HI the daily harvest index limited by a cultivar-dependant maximal harvest index, W1Smax the maximal weight of one seed, Ngrain the number of grain per unit area, Growth the simulated growth rate averaged over the flowering stage, and Cgrain and CgrainG0 two cultivar-dependent parameters of the linear function that determines

Ngrain.

A water stress coefficient reducing LAI and biomass growth is calculated using a water balance module based on the 'tipping bucket' approach (van Keulen, 1975). The water stress coefficient depends on the ratio of the available water over the water holding capacity of soil WHCsoil in the root zone as calculated by Allen et al. (1998).

Details of the addition made to PYE in PYE-CA:

A mulch of crop residues held on the soil surface decays over time and the remaining layer impacts on the water balance by intercepting rainfall, decreasing surface water runoff and limiting soil evaporation. The modeling of these three effects on water balance was taken from Scopel et al. (2004). Soil temperature or albedo changes are not taken under account.

The relation between mulch quantity and soil cover as described by Gregory (1982) is an area-to-mass ratio involved in the exponential function:

$$\%cover = 1 - \exp(-CVmulch \times Qmulch)$$

$$Qmulch(day) = Qmulch0 \times \exp(-Dmulch \times day)$$

where %cover is the proportion of soil covered by Qmulch the quantity of mulch, and CVmulch the cover capacity of mulch. Mulch decomposition is described by first-order kinetics where Qmulch(day) is the mulch quantity at a given day, Qmulch0 the quantity of mulch at day 0, and Dmulch the mulch decomposition index. CVmulch and Dmulch are mulch-dependent parameters, i.e. parameters specific to the straw material constituting the mulch.

The amount of intercepted rainfall by mulch IRF each day is calculated as following:

$$IRF = \text{Minimum}((RF - RO) \times \%cover, IRFmax)$$

$$IRFmax = WRmulch \times Qmulch - Wmulch$$

where RF is the daily rainfall, RO the surface water runoff, IRFmax the maximum intercepted rainfall by mulch, WRmulch a mulch-dependent water retention index, and Wmulch the amount of water currently held in mulch. According to an empirical relationship (Scopel et al., 2004), RO is simulated as simple constant proportion MR0 of rainfall when the latter exceeds a threshold Lim:

$$RO(day) = MRO \times (RF(day) - Lim) \quad \text{if } RF(day) \geq Lim$$

$$RO(day) = 0 \quad \text{if } RF(day) < Lim$$

Potential soil evaporation Eos is related to the energy available at the soil surface and is reduced in

the presence of mulch:

$$Eos = ETp \times \exp(-ExtinC \times LAI) \times \exp(-ExtinM \times CVmulch \times Qmulch)$$

where ETp is the reference evapotranspiration, and ExtinC and ExtinM the extinction coefficients for net radiation in the crop canopy layer and the mulch layer respectively. Soil evaporation is limited to a maximum depth Zevap. Likewise, the intercepted rainfall by mulch is assumed to evaporate in proportion to the energy incident upon the mulch surface. The potential evaporation from the mulch Eom is calculated as:

$$Eom = ETp \times \exp(-ExtinC \times LAI) \times (1 - \exp(-ExtinM \times CVmulch \times Qmulch))$$

2.2. Experimental design for model calibration

To set the values of non-cultivar-dependent phenological parameter we used the set of literature-based parameters proposed by Affholder et al. (2013), extracted from studies covering a wide array of agroecological conditions and assumed to be applicable to rainfed rice regardless of the specific cultivar considered. Cultivar-dependent phenological parameters were estimated calibrating simulated phenology against observations made on the experiment site of Ivory (19°32'60"S, 46°24'60"E; alt. 950 m; Ferralsol), in a region with a humid tropical altitude climate similar to the Lake Alaotra region (1100 mm average annual rainfall). In that location, data were available from an experiment with cultivar B22 grown under rainfed conditions and varying inorganic fertilizer supply. We used growth, LAI, and yield data measured from cropping season 2009-2010 to 2013-2014, period on which minimum and maximum temperature and rainfall were daily monitored. Following the calibration methodology of Affholder et al. (2013) values of thermal time constants, LAImax, HImax, W1Smax, Cgrain, and CgrainG0 were estimated, considering the highest yields observed in the experiment as water limited yields Yw. The main phenological parameters used in PYE-CA are listed in Table 8.A.

The values of CVmulch, WRmulch, and ExtinM were taken from published studies (Table 8.B). Other mulch and soil water parameters were estimated using observations made on the experimental site of Ambohitsilaozana (17°41'19"S, 48°27'39"E; alt. 770m; Ferralsol) in the Lake Alaotra region (1000 mm average annual rainfall). To estimate *Dmulch*, a specific experiment with three replications was set up on 100 m^2 plots cultivated with no-till B22 rice on *Stylosanthes guianensis* mulch, weighting litter bags dry matter along the rice cycle during the cropping season 2011-2012. To estimate MRO and Lim, an experiment with three replications was set up during cropping season 2012-2013 (720 mm total seasonal rainfall) on 18 m^2 runoff plots with 6% (S6) or 25% (S25) slope cultivated with no-till B22 rice on three *S. guianensis* mulch amounts: (i) no mulch (M0), (ii) 1 t ha^{-1} mulch (M1), i.e. 30% of soil cover,

which is the threshold below which agroecological benefits of conservation agriculture are commonly admitted to be inefficient (Erenstein, 2003), and (iii) 8 t ha^{-1} mulch (M8), i.e. 95% of soil cover, which is the maximum amount of mulch measured on farmers' fields in the region after one year of *S. guianensis* fallow (Naudin et al., 2012). On the same experimental device, soil moisture monitored during the entire rainy season at 10, 20, 30, 40 and 60 cm depth using a TDR probe (Topp and Davis, 1985) with three replications. We estimated WHCsoil by measuring soil moisture (i) at the end of the dry season, assuming that the entire soil profile was then at wilting point, and (ii) 24 hours after water was brought to the soil up to saturation. Zevap was estimated by trial-and-error approach, fitting step by step simulated to measured soil moisture for each slope x soil cover combination. All mulch and soil water parameters used in PYE-CA are listed in Table 8.B.

Table 8: Model parameters
Main rice phenology (A) and mulch and soil water dynamics (B) parameters used in the PYE-CA model. Figures between brackets indicate literature references.

A - Rice phenology parameters			
Parameters	Description	Unit	Value
Literature-based parameters			
TDmin(1)	Minimal temperature for development	°C	11
TDmax(2)	Maximal temperature for development	°C	40
TCmin(1)	Minimal temperature for radiation-to-dry matter conversion efficiency	°C	11
TCmax(2)	Maximal temperature for radiation-to-dry matter conversion efficiency	°C	42
TCopt(1)	Optimal temperature for radiation-to-dry matter conversion efficiency	°C	29
Ebmax(1)	Coefficient of maximal net radiation conversion	g MJ^{-1}	2.6
Kmax(3)	Maximal cultural coefficient		1.2
ExtinC(2)	Coefficient of radiation extinction of the canopy		0.5
RZmax(4)	Maximal root depth	cm	100
Estimated parameters			
TCjuv	Thermal time constant of stage *Juv*	°C day^{-1}	510
TCtill	Thermal time constant of stage *Till*	°C day^{-1}	420
TCflow	Thermal time constant of stage *Flow*	°C day^{-1}	210
TCgrain	Thermal time constant of stage *Grain*	°C day^{-1}	100
TCmat	Thermal time constant of stage *Mat*	°C day^{-1}	300
LAImax	Maximal leaf area index		6.1
HImax	Maximal harvest index		0.47
Cgrain	Number of grain production rate		1850
CgrainG0	Number of grain for a null growth	grain m^{-2}	-4600
W1Smax	Maximal one-seed weight	g	0.045
B - Mulch and soil water dynamics parameters			
Parameters	Description	Unit	Value
Literature-based parameter			
CVmulch(5)	Cover capacity of *S. guianensis* mulch	ha t^{-1}	0.377
ExtinM(6)	Coefficient of radiation extinction of mulch		0.625
WRmulch (7)	Mulch water retention index	mm t^{-1} ha^{-1}	0.204
Estimated parameters			
Dmulch	Mulch decomposition index	10^{-3}	7.5
WHCsoil	Water holding capacity of soil	mm m^{-1}	120
MRO_0	Mean runoff index for soil without mulch on steep slope		0.11
MRO_1	Mean runoff index for soil with 1 t ha^{-1} mulch on steep slope		0.02
MRO_8	Mean runoff index for soil with 8 t ha^{-1} mulch on steep slope		0.01
Lim	Minimum daily rainfall for runoff	mm	4
Zevap	Depth of top soil layer that undergoes evaporation	cm	20

1: Shrestha et al. (2013); 2: Affholder et al. (2013), and Luu Ngoc et al. (2014); 3: Allen et al. (1998); 4: Dusserre et al. (2012); 5: Naudin et al. (2012); 6: Scopel et al. (2004); 7: Iqbal et al. (2013).

Table 9: The virtual experiment
Parameterization of PYE-CA for the virtual experiment.

Factor		Number	**Levels**				
Parameter	Unit	of levels	Value				
Sowing date		36	**SD1, SD2, ..., SD36**				
Sowing date	--		Sep. 2nd to Feb. 24th (5-day step)				
Runoff and mulch		5	**R30M0**	**R11M0**	**R0M0**	**R2M1**	**R1M8**
MRO	--		0.30	0.11	0	0.02	0.01
Mulch	t ha^{-1}		0	0	0	1	8
Initial soil water content		2	**Empty**	**Full**			
Initial soil water content	%		0	100			
Growth and yield limitation		2	**Water-limited**		**Water- and nutrient-limited**		
LAImax	--		6.1		4.5		
Water holding capacity of soil		2	**Low**		**High**		
WHCsoil	mm m^{-1}		84		120		

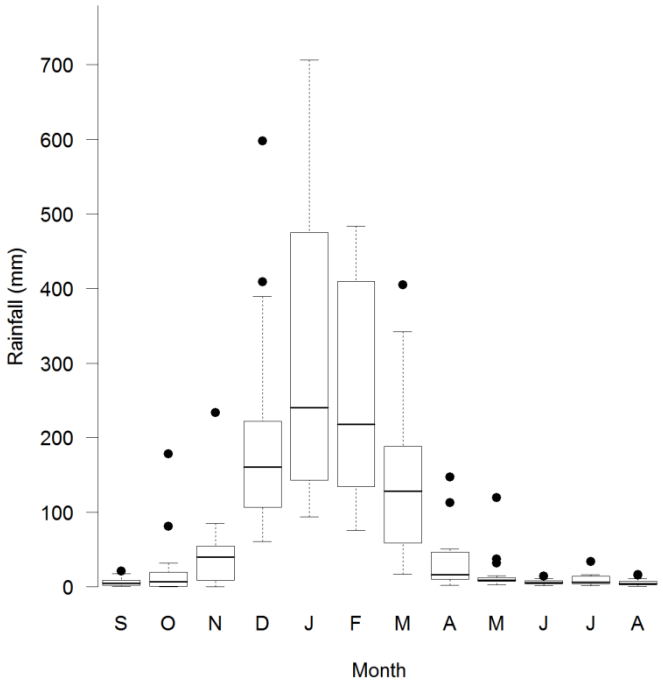


Figure 14: Rainfall distribution
Monthly cumulated rainfall distribution in Ambohitsilaozana over 17 years (from October 1994 to September 1998 and from October 1999 to September 2012) of the daily rain series used in the study. Thick horizontal lines within the boxes are medians; lower and upper boundaries of the boxes are respectively the 1st and the 3rd quartiles; lower and upper whiskers are 1.5-times the interquartile ranges; symbols are outliers.

2.3. Virtual experiment

2.3.1. Design

To assess the impact of mulching on water balance and hence on yield risk, we ran a virtual experiment (VE) over a long-term weather data series: 17 cropping season climates were considered, each being taken as one year of daily weather data (including temperature, radiation, and rainfall) among a series of 17 years that was available for the studied location from 1994 to 2012. The year 1998 was excluded because of missing rainfall data. Rainfall distribution over these 17 years depicts the erratic humid tropical altitude climate of the region (Figure 14). The VE consisted in simulating

scenarios including all the cross-combinations of the following five factors: (i) sowing date, (ii) water holding capacity of soil, (iii) initial soil water content, (iv) surface water runoff and soil evaporation, and (v) growth and yield limitation by nutrient availability. The parameterization of PYE-CA corresponding to variations of the factors considered in the virtual experiment is shown in Table 9. The levels considered for these factors are detailed as follows.

Sowing date:

36 sowing dates were considered in the VE, scattered every five days from September 2nd to February 24th. This interval was chosen to be wider than the range of sowing dates practiced by farmers known from a previous on-farm survey (Bruelle et al., 2014), in order to test whether conservation agriculture may favor new options for sowing dates.

Water holding capacity of soil:

In order to account for possible variations of water holding capacity of soil in the rooting zone across farmers' fields, we considered two values of WHCsoil, assumed to represent the extremes occurring in the study region: 84 mm m^{-1} and 120 mm m^{-1}.

Initial soil water content:

Under tropical climates with a dry season of more than three months, it is generally admitted that just before the first rain of the rainy season, soil evaporation and transpiration from both the previous crop and weeds subsisting along the dry season have led the soil profile to be at wilting point or even dryer throughout the rooting zone. But management techniques aiming at conserving soil water, such as mulching, are expected to allow more water to be conserved in the rooting zone during the dry season. In order to assess in a simple way the possible cumulative effect of mulching on soil water available at the beginning of the season, we considered the two extremes of soil water content at the first day of the simulation: Empty (entire rooting zone at wilting point) or Full (entire rooting zone at field capacity).

Surface water runoff and mulch:

In PYE-CA mulching participates to water conservation through both the decrease in surface water runoff (or the increase in water infiltration) and the decrease in soil evaporation, these changes depending on the mulch amount. Yield and inter-annual yield variability are expected to change according to the level of these two factors. In order to analyze these changes, we considered five levels of water conservation. From the least to the most water conserving, we considered five conditions: (i) the highest runoff observed in the region (Goujon et al., 1968) for a soil with no mulch (R30M0); (ii) a

medium runoff for a soil with no mulch (R11M0); (iii) a suppressed runoff for a soil with no mulch (R0M0); (iv) a low runoff for a soil with 1 t ha^{-1} mulch (R2M1); and (v) a low runoff for a soil with 8 t ha^{-1} mulch (R1E8). Each condition was reached by setting different values to the parameters Mulch and MRO as presented in Table 9. Conditions (ii), (iv), and (v) were inspired from the results of the runoff experiment set in Ambohitsilaozana, as presented in the 'Results' section.

Growth and yield limitation:

Nutrient supply is expected to be limiting in many farmers' fields with low fertilizer input. Transpiration is expected to be lower when crop growth is reduced as compared to water-limited growth. Thus, the impact of mulch on water stress and hence on inter-annual yield variations is expected to differ in fields with low inputs ('extensive management') from that of theoretic fields managed to achieve water limited growth and yields. In order to assess this specific interaction between nutrient supply and mulch on yield and inter-annual yield variability, we considered two levels of nutrient availability: Non-limiting, i.e. growth and yield only limited by water supply (water-limited conditions GYLw); and limiting, i.e. growth and yield limited by nutrient and water supply (water- and nutrient-limited conditions GYLwn). Under GYLwn the value of LAImax was set at a value such that simulated biomass and grain yield are reduced by half as compared to GYLw (Figure 17).

2.3.2. Analysis of simulation outputs

The VE consisted in 1440 individual combinations of factors at their considered levels; each individual combination resulting in a virtual elementary plot VEP(subscript) characterized by a yield distribution, i.e. 17 yield values obtained from the simulation of one specific combination under 17 cropping season climates. For each VEP, subscript is a character string identifying the specific combination of factors as following:

$$\text{subscript} = SD\alpha__WHC\beta_IWC\gamma_R\delta M\varepsilon_GYL\sigma$$

where α is the sowing date SD in the sequence of sowing dates of the experiment (from 1 to 36), β the water holding capacity of soil WHC (l: low, h:high), γ the initial soil water content IWC (e: empty, f: full), δ and ε respectively the levels of mean water runoff R (in %) and mulch quantity M (in t ha^{-1}), and σ the growth and yield limitation GYL (w: water-limited, wn: water- and nutrient-limited). To describe the yield distribution of each VEP, we calculated two indicators of the impact of the tested factors and their interactions: an indicator of yield level Ym, and an indicator of climatic risk CR. For a given [α, β, γ, δ, ε, σ] combination of factors, Ym was calculated as the average yield of a VEP as following:

$$Ym(\text{subscript}) = \Sigma\, Yield_i(\text{subscript}) / 17$$

for i = 1 to 17

where $Yield_i$ is an individual yield of a VEP distribution. And for each VEP, CR was calculated as following:

$$CR(subscript) = 1 - P(Yield_j(subscript) \geq Yacc(WHC\beta_IWC\gamma__GYL\sigma))$$

for j = 1 to 17

where P is the probability to reach at least an 'acceptable level of yield' Yacc a certain year j among 17. Yacc was arbitrary determined as 70% of the maximum yield simulated under the least water conserving conditions R30M0 for the 36 sowing dates of a given [β, γ, σ] combination of factors as following:

$$Yacc(WHC\beta_IWC\gamma__GYL\sigma) = 0.7 \times Max\ (Yield_k(SD_l__WHC\beta_IWC\gamma_R30M0_GYL\sigma))$$

for k = 1 to 17 and l = 1 to 36

Thus, we calculated the Yacc for each of the eight [β, γ, σ] combinations, as presented in Table 10. For each VEP, we defined a 'favorable sowing windows' FSW, as the interval of sowing dates for which CR is null, i.e. the period within which yield is higher than Yacc every year.

Table 10: Minimum 'acceptable level of yield'
Minimum 'acceptable level of yield' *Yacc* for the eight initial soil water content (IWC) × growth and yield limitation (GYL) × soil water holding capacity (WHC) combinations of the virtual experiment.

IWC	GYL	WHC	Yacc (t ha^{-1})
Empty	w	Low	3.76
		High	3.82
	wn	Low	2.20
		High	2.23
Full	w	Low	3.88
		High	3.93
	wn	Low	2.28
		High	2.29

See **Table 9** for water conserving conditions captions. w: water-limited; wn: water- and nutrient-limited.

3. Results

3.1. Model calibration

All the PYE-CA model parameters that we empirically estimated are presented in Table 8.

We estimated a Dmulch of 0.0075 by fitting the equation used in the model PYE-CA with the observed value during cropping season 2011-2012 in Ambohitsilaozana (Figure 15).

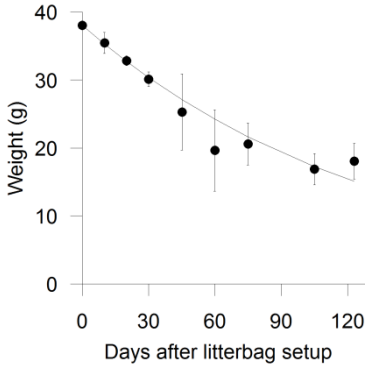


Figure 15: Mulch decomposition
Observed data (symbols) and fitted relationship used in PYE-CA (solid line) for *S. guianensis* mulch decomposition over time during cropping season 2011-2012 in Ambohitsilaozana. Error bars give standard deviation.

The empirical runoff-rainfall relationship for each slope-mulch combination during rainy season 2012-2013 in Ambohitsilaozana is presented in Figure 16. Under the rainfall distribution of this season, estimated MRO values were low. Runoff was limited on S6, regardless of the mulch quantity. It reached a maximum of 0.03 for M0.. On S25, runoff reached 0.11 for M0 and mulching reduced runoff to 0.02 for M1 and 0.01 for M8. Under the low runoff conditions of cropping season 2012-2013, mulching did efficiently offset runoff, even with a small amount of mulch. But this runoff reduction was only significant on S25. Thus, in the VE, the water conserving conditions R11M0, R2M1, and R1M8 described in the 'Material and Methods' section were met by setting the MRO and Mulch values of the model to the results of treatments S25-M0, S25-M1, and S25-M8, respectively (Table 9).

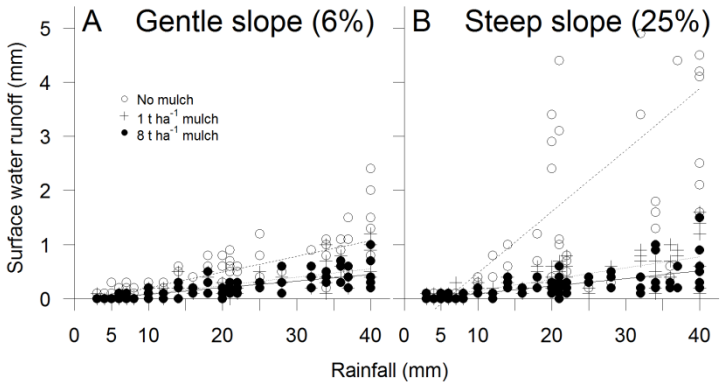


Figure 16: Surface water runoff
Relationship between surface water runoff and rainfall amount for two slopes in Ambohitsilaozana. Symbols are observed data and lines are the fitted relationships used in PYE-CA.

WHCsoil was estimated at 120 mm m^{-1} and Zevap was estimated by fitting the model to observed soil water content. Figure 18 shows the evolution of observed and simulated soil water content for each slope-mulch combination during rainy season 2012-2013 in Ambohitsilaozana. Soil proprieties (Razafimbelo et al., 2010) and the estimated soil water holding capacity were characteristic of the best hillside soils dedicated to rainfed cultivation in the region.

The model was also fitted to observed data on above-ground biomass and grain yield for the Ivory site. Figure 17 shows the fitting of model's main outputs with the boundary line of the clouds of paired observed-simulated values, after calibration of Ebmax, HImax, W1Smax, Cgrain, and CgrainG0.

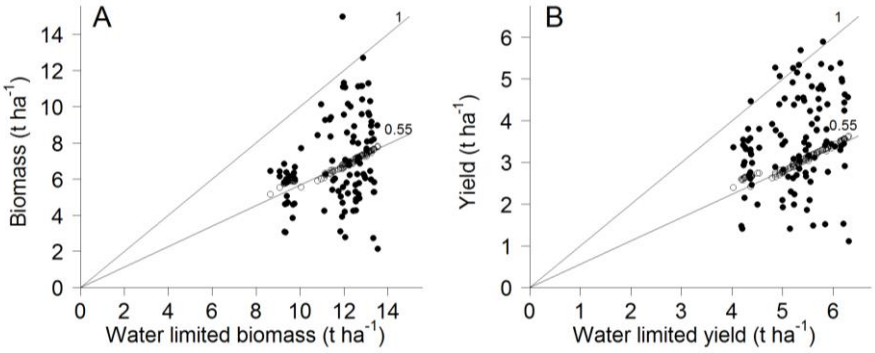


Figure 17: Biomass and grain yield
Observed (•) or simulated water- and nutrient-limited (o) values versus simulated water-limited values for total above-ground biomass (A) and grain yield (B) from cropping season 2009-2010 to 2013-2014 in Ivory. The solid lines 1 represent the boundary line y=x of the clouds of paired observed-simulated values under water-limited conditions. The solid lines 0.55 represent the boundary line y=0.55x of the clouds of paired simulated-simulated values under water- and nutrient-limited conditions, with simulated above-ground biomass and grain reduced by half.

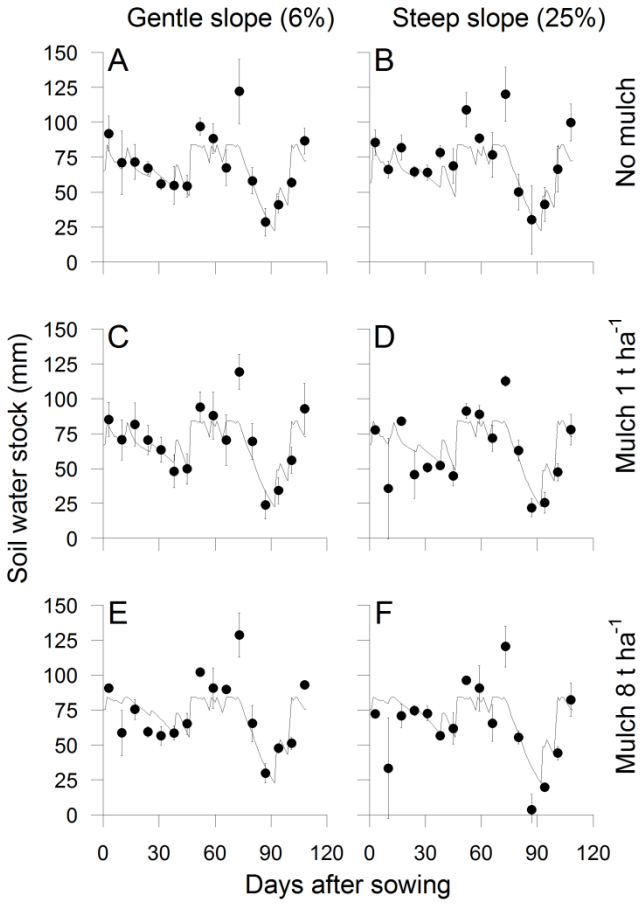


Figure 18: Soil water content
Observed (symbols) and simulated (solid lines) soil water content evolutions over time for 6 slope-mulch combinations during cropping season 2012-2013 in Ambohitsilaozana. Error bars give standard deviation.

3.2. Simulated impact of water stress in the region

Under the rainfall conditions of the Lake Alaotra region, the VE indicated that simulated crop growth was the least impacted by water stress when sowing date was in November. Highest inter-annual yield (highest Ym) and lowest climatic risk (lowest CR) were reached for sowing dates in November regardless of the conditions of R-M, IWC, GYL, and WHC (e.g. for the least water conserving conditions R30M0 presented in Figure 19).

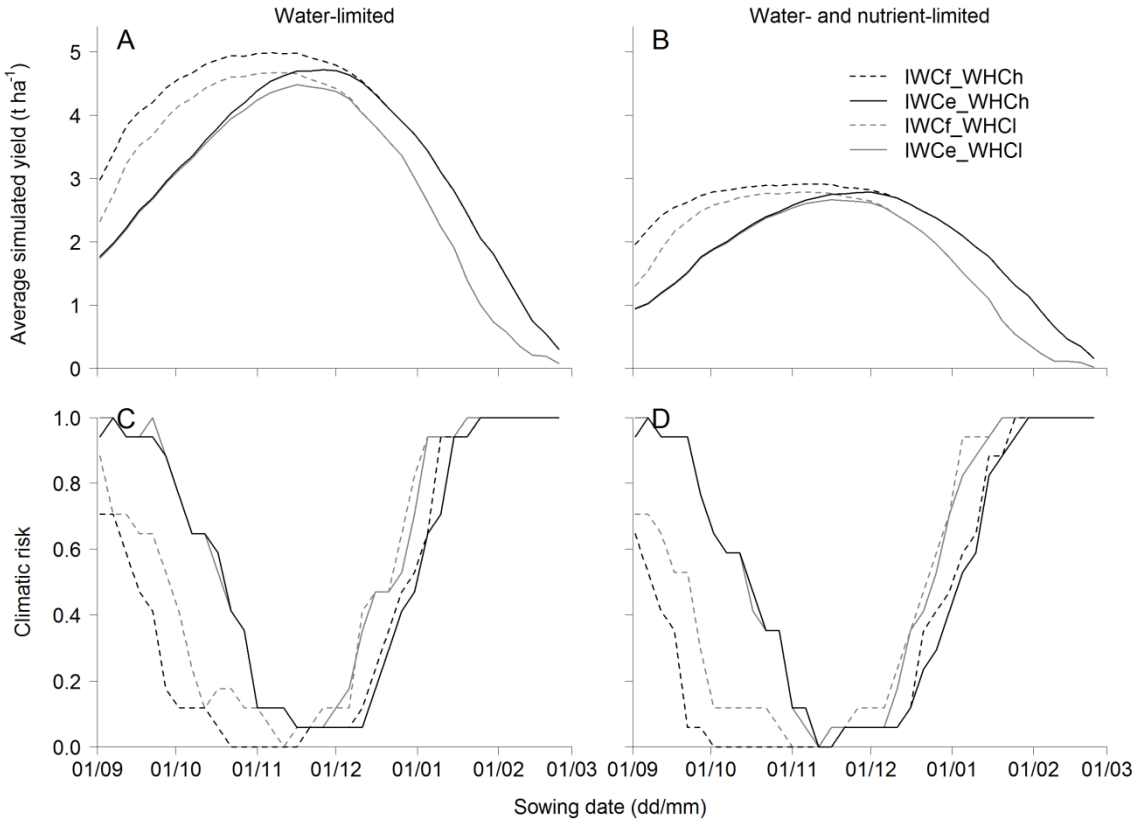


Figure 19: Simulated grain yield & climatic risk
Average simulated grain yield Ym (A and B) and climatic risk CR (C and D) under four initial soil water content (IWC) x soil water holding capacity (WHC) scenarios for water-limited (A and C) and water- and nutrient-limited (B and D) conditions. Simulations outcomes for the least water conserving conditions R30M0 only are presented in this figure. e or f: empty or full IWC; l or h: low or high WHC.

In the simulations, earlier or later sowing resulted in progressively higher water stress, lowering yield and increasing risk as getting farther from this sowing period. But the water stress impacted yield differently depending on IWC, GYL, and WHC. Under IWCe × GYLw, shifting from WHCl to WHCh translated into higher Ym and lower or equivalent CR for late sowing date. For instance, under IWCe × R30M0 × GYLe simulations resulted in a 0.38 t ha^{-1} increase in Ym, in average (Table 11), the yield difference in favor of WHCh applied to all sowing dates from SD12 (beginning of November) to the end of the tested interval of sowing dates with CR always lower or equal. Under IWCf × GYLw, shifting from WHCl to WHCh translated into higher Ym and lower CR for all the tested sowing dates, resulting

in an increase in Ym of 0.54 t ha^{-1} in average under R30M0. Thus, over all the tested sowing date, simulated crop growth under GYLw was the most impacted by water stress under IWCe × WHCl and the least impacted under IWCf × WHCh, the latter conditions resulting on the wider FSW (e.g. 30 days under R30M0, Table 12).

Crop growth simulation under GYLwn underwent even less water stress. Over all the tested sowing dates, simulations were affected by IWC and WHC similarly as under GYLw but with lower magnitude in Ym changes and wider FSW. For instance, under IWCf, shifting from WHCl to WHCh resulted in an increase in Ym of 0.36 t ha^{-1} in average under R30M0. And IWCf × WHCh × R30M0 resulted in a FSW of 50 days.

3.3. Simulated impact of water conservation on yield and inter-annual risk

The VE showed that enhancing water conservation by limiting surface water runoff and soil evaporation through mulch resulted in higher simulated yields (Table 11) and lower inter-annual risks (Table 12). Higher Ym and lower CR were observed for the entire sowing period tested in the VE, but the impact of water conserving scenarios was mostly expressed for early sowing dates (data not shown).

Table 11: Simulated grain yield
Average simulated yield for the eight initial soil water content (IWC) × growth and yield limitation (GYL) × water holding capacity (WHC) combinations of the virtual experiment for five water conserving conditions.

			Water conserving conditions							
IWC	GYL	WHC	R30M0 (1) (t ha^{-1})	R11M0 (t ha^{-1})	R0M0 (2) (t ha^{-1})	R2M1 (t ha^{-1})	R1M8 (3) (t ha^{-1})	*(2) - (1) (t ha^{-1})*	*(3) - (2) (t ha^{-1})*	*(3) - (1) (t ha^{-1})*
Empty	w	Low	2.77	2.91	2.97	2.98	3.06	*0.20*	*0.09*	*0.29*
		High	3.15	3.29	3.36	3.36	3.45	*0.21*	*0.09*	*0.30*
	wn	Low	1.62	1.70	1.73	1.74	1.81	*0.11*	*0.08*	*0.19*
		High	1.87	1.95	1.98	1.98	2.05	*0.11*	*0.07*	*0.18*
Full	w	Low	3.10	3.24	3.31	3.31	3.38	*0.21*	*0.07*	*0.28*
		High	3.64	3.77	3.83	3.83	3.88	*0.19*	*0.05*	*0.24*
	wn	Low	1.84	1.93	1.97	1.97	2.03	*0.13*	*0.06*	*0.19*
		High	2.20	2.26	2.29	2.29	2.34	*0.09*	*0.05*	*0.14*

See **Table 9** for water conserving conditions captions. w: water-limited; wn: water- and nutrient-limited.

Table 12: Favorable sowing window
Length of favorable sowing window for the eight initial soil water content (IWC) × growth and yield limitation (GYL) × water holding capacity (WHC) combinations of the virtual experiment for five water conserving conditions.

			Water conserving conditions							
IWC	GYL	WHC	R30M0 (1) (days)	R11M0 (days)	R0M0 (2) (days)	R2M1 (days)	R1M8 (3) (days)	*(2) - (1) (days)*	*(3) - (2) (days)*	*(3) - (1) (days)*
Empty	w	Low	0	10	10	10	20	*10*	*10*	*20*
		High	0	15	15	15	25	*15*	*10*	*25*
	wn	Low	5	10	15	15	20	*10*	*5*	*15*
		High	10	20	20	20	30	*10*	*10*	*20*
Full	w	Low	5	20	25	25	30	*20*	*5*	*25*
		High	30	45	50	50	50	*20*	*0*	*20*
	wn	Low	15	35	45	45	50	*30*	*5*	*35*
		High	50	65	65	65	70	*15*	*5*	*20*

See **Table 9** for water conserving conditions captions. w: water-limited; wn: water- and nutrient-limited.

Table 13: Simulated water drainage
Average ratio of rainfall losses through water drainage beyond the rooting zone for the eight initial soil water content (IWC) × growth and yield limitation (GYL) × water holding capacity (WHC) combinations of the virtual experiment for five water conserving conditions.

			Water conserving conditions					
IWC	GYL	WHC	R30M0 (1) (%)	R11M0 (%)	R0M0 (%)	R2M1 (%)	R1M8 (2) (%)	*(2) - (1) (%)*
Empty	w	Low	32	44	53	52	56	*24*
		High	28	41	49	48	52	*24*
	wn	Low	32	45	54	53	57	*25*
		High	29	42	50	49	53	*24*
Full	w	Low	35	48	56	56	60	*25*
		High	34	47	55	54	58	*24*
	wn	Low	36	49	57	57	61	*25*
		High	35	49	57	56	60	*25*

See **Table 9** for water conserving conditions captions. w: water-limited; wn: water- and nutrient-limited.

In the simulations, the gain in average yield through water conservation was limited and this gain was mostly due to runoff reduction. When shifting from R30M0 (the least water conserving scenario) to R1M8 (the most water conserving scenario), the maximum gain in average yield (+0.30 t ha^{-1}) was obtained under IWCe × GYLw × WHCh conditions. Under these conditions, shifting from R30M0 to R0M0 (sole suppression of runoff) resulted in a +0.21 t ha^{-1} increase in average yield while shifting from R0M0 to R1M8 (alteration of soil evaporation through mulching) resulted in a +0.09 t ha^{-1} increase.

Enhancing water conservation mostly translated into a decrease in inter-annual risk for early sowing dates, and hence, a wider FSW. Under IWCe × GYLw × WHCh conditions, the FSW was null for R30M0 (the least water conserving scenario), meaning that none of the tested sowing date could guarantee a minimum simulated yield of 3.82 t ha^{-1} every year (Table 10). Shifting from R30M0 to R1M8 resulted in a 25 days FSW, 15 days resulting from the sole runoff suppression and 10 days from the alteration of soil evaporation.

Under the rainfall conditions of the Lake Alaotra region, enhancing water conservation positively impacted simulated yields and their inter-annual variability for early sowing dates. The gain in average yield, even if limited, was more important for the conditions of the VE under which simulated crop growth was the most impacted by water stress (+0.29 t ha^{-1} under IWCe × GYLw × WHCl, +0.14 t ha^{-1} under IWCf × GYLwn × WHCh). Risk related to the inter-annual variability of simulated yields was reduced. It allowed securing yields when crop growth was the most impacted by water stress (+20 days of FSW under IWCe × GYLw × WHCl) and widening even more the FSW when crop growth was the least impacted by water stress (+20 days of FSW under IWCf × GYLwn × WHCh).

Over the range of conditions tested in the VE, enhancing water conservation also translated into higher simulated water drainage. A minimum of 28% of rainfall was lost through water drainage beyond the rooting zone for R30M0 (Table 13). Enhancing water conservation led to a maximum increase in

drainage of 25% for R1M8.

4. Discussion

With 720 mm of total rainfall, the rainy season 2012-2013 was below average. Thus, observed surface water runoff during this rainy season could be considered as an underestimate when compared to standard runoff levels recorded in other studies from similar tropical conditions. We observed a maximum runoff of 11%, which is below the 30% runoff measured in the same region (Goujon, 1968), the 14% runoff in South Africa (Woyessa and Bennie, 2004), the 32% in Mexico (Scopel et al., 2005), or the 35% in Brazil (Scopel et al., 2004). Thus, we integrated a 30% mean runoff scenario (R30M0) in the virtual experiment to cope with any possible underestimation.

Over all the conditions tested in the VE, November was identified as the optimal period for sowing, i.e. the period within which crop growth and yield would undergo the minimum water stress under the rainfall conditions of the studied region. This result is in line with the on-farm survey conducted in a previous study in the region (Bruelle et al., 2014). Farmers start to sow in mid-November for early-start rainy seasons or right after the first substantial rainfall episode for late-start rainy seasons. But in any case, the large majority of fields are sown before the end of December regardless of the type of season. Even if farmers' choices of management are not driven solely by agroecological conditions, it clearly illustrates the influence of climate, and particularly rainfall, on rainfed crop management.

Mulching allows water conservation through reducing surface runoff and soil evaporation. In agreement with other studies where crop residues remained on the soil surface, mulch decomposition was only partial (50% after 120 days) and it dramatically reduced runoff even with small amounts (Scopel et al., 2004; Findeling et al., 2003). But the impact of mulching on soil evaporation was less pronounced. At the beginning of rice growing, the reduction of soil evaporation may be partially counterbalanced by the direct evaporation from the mulch layer. When the rice leaf area grows, it covers the soil surface and progressively reduces soil and mulch evaporation. Large amounts of mulch are needed to observe significant impact on soil evaporation. But small amounts (1 t ha^{-1}) are sufficient to completely offset runoff. Thus, mulching buffered water stress mainly through runoff reduction. Hence, this water conservation technique does not go against a potential use of biomass for animal feeding, an important tradeoff in sub-Saharan family farming (Giller et al., 2009; Naudin et al., 2014).

Water conservation through mulching offers ample opportunities for earlier sowing. It has potential positive impacts on labor organization at farm-scale through greater flexibility for resource allocation over time. However, this is directly dependant on farmer's priorities, labor availability and social habits. For instance, on a farm combining irrigated and upland rice production, task related to irrigated rice cropping would always be prioritized. Or, within a village territory, a farmer alone could not decide to

sow earlier his upland rice, as he or she will risk losing the young seedling to free grazing of livestock.

Using the simple empirical runoff-rainfall relationship of Scopel et al. (2004), a 30% mean runoff resulted in a minimum 28% average loss of rainfall through drainage beyond the rooting zone. This empirical approach could be refined by taking into account the influence of frequency and intensity of rainfall episodes as proposed by Albergel et al. (1990), but it would require setting up runoff experiments on several rainy seasons. These levels of water loss through deep drainage result from the particular pattern of rainfall distribution in the region. Most rainfall episodes are substantial enough to replenish the water holding capacity of soil, and the exceeding amounts of water are lost through deep drainage. Thus, a decrease in runoff (or an increase in infiltration) necessarily leads to an increase in deep subsoil drainage. However, we showed in the virtual experiment that enhancing water conservation could increase crop yield and reduce risks under 'high water stress' conditions such as early sowing in soils of poor water holding capacity. It would also secure crop intensification, giving the opportunity to grow crops with high water demand, i.e. with higher density and nutrient levels, without increasing risk related to water stress.

The study focused on the impact of mulch on water balance. But more generally, the implementation of conservation agriculture (CA) in the Lake Alaotra region of Madagascar aims to restore and maintain soil fertility (Tittonell et al., 2012). Thus, assuming soil aggradation and increase in soil fertility derived from other CA functions, mulch buffering effect on water balance would enhance and secure agroecological intensification by limiting water stress.

The study also focused on current and past climate. Climate change being a worldwide concern, this type of study applied on climate change scenarios would be essential to apprehend and understand the capacity of conservation agriculture to adapt to these environment changes. On cultivar B22, for example, an increase in temperature would affect the leaf area growth, shortening the cycle and reducing yield (Shrestha et al., 2012). Yet, in practice, we may expect that rice breeding would be evolving along with climate change and supply new rice varieties. As regards the rainfall distribution, current model predictions are not yet free of uncertainty (Trenberth et al., 2007). Both increase and decrease in rainfall amount could be expected. In the Lake Alaotra context, an increase would lead to more water drainage under conservation agriculture whereas a decrease could generate more water stress episodes allowing mulching to better express its potential as a practice for soil water conservation and buffering water stress.

5. Conclusions

The inclusion of the effects of mulching in simulation of soil-crop water dynamics allowed a better understanding of the impact of rainfall distribution on growth and yield of upland rice in the Lake

Alaotra region. The region is subject to variable successions of rain and dry episodes during the rainy season, causing crop water stress. Our study showed that enhancing water infiltration in the soil profile would be beneficiary under early-sowing, high runoff conditions, or in situations of crop intensification through increased nutrient availabilities. Given the current climatic trends that show a gradual shortening of the rainy season in Lake Alaotra, mulching could be an effective way to secure sowing, as it can contribute to better capture and store the water received during the first erratic rains of the season. This would also translate into more flexibility for land use, task organization, and investment without increasing inter-annual risks. The positive aspects of mulching are multiple. Although this study focused only on the impact of mulching on water dynamics, in the long term mulching would also lead to increased biomass inputs to soil, leading to soil organic matter accumulation, to reduced soil erosion, or to a better control of weed emergence.

Discussion générale & Conclusion

1. Réponses aux hypothèses et objectifs de départ

Pour mener notre étude, nous nous somme basés sur les deux hypothèses principales suivantes :

- Parmi tous les bénéfices potentiels apportés par les systèmes en AC, la capacité du mulch à améliorer le bilan hydrique permet de tamponner le stress hydrique, et donc de sécuriser les rendements, lorsque les pluies sont limitées et/ou aléatoirement distribuées.
- Le contexte pluviométrique de la région du lac Alaotra est très aléatoire et le stress hydrique, qui influe très fortement sur les niveaux de production en culture pluviale, est tamponné par les systèmes en AC.

Nous avons choisi de structurer cette thèse autour de trois chapitres sous forme d'articles scientifiques. Ainsi, même si l'étude a suivi un fil conducteur, se basant sur les hypothèses de départ et essayant de répondre aux objectifs fixés, la lecture des trois chapitres peut se faire de manière indépendante. Dans cette section, nous proposons donc de rappeler les objectifs de l'étude, les résultats obtenus et le déroulement de la réflexion afin de faire apparaître ce fil conducteur et de repositionner les hypothèses de départs au regard des résultats.

1.1. Du plus général au plus spécifique

Dans le premier chapitre, nous avons voulu dépasser le cadre d'étude de cette thèse et ouvrir à une problématique plus large que l'évaluation de la capacité des systèmes en agriculture de conservation (AC) à tamponner la variabilité des pluies. En effet, comme nous l'exposons dans l'introduction générale, au regard des projections de croissance démographique et de changement climatique en Afrique sub-Saharienne, il est important de développer des systèmes de culture et de production qui puissent répondre de manière durable à la demande actuelle et future, c'est-à-dire développer des systèmes qui soient à la fois capables d'augmenter les niveaux de production et de s'adapter aux changements climatiques, tout en préservant l'environnement et les ressources naturelles. Les enjeux sont donc très importants ; et l'AC est proposée comme une alternative écologiquement intensive qui a le potentiel de répondre aux enjeux agricoles des contextes sub-Sahariens, notamment par la FAO qui est très fortement engagée dans la promotion de ses systèmes (http://www.fao.org/ag/ca). D'après les différentes études que nous avons pu identifier, il semble que l'AC ait la capacité de maintenir, voire d'augmenter les niveaux de production sur le long-terme, et à plus court-terme dans les contextes agro-climatiques africains où les pluies sont faibles et/ou mal distribuées. Cela suggère aussi que les systèmes en AC seraient adaptés au changement climatique qui prévoit une augmentation de la

variabilité de la distribution des pluies en Afrique sub-Saharienne. Nous ne nous sommes pas intéressés à tous les bénéfices environnementaux potentiels qui accompagnent la mise en place de ces systèmes écologiquement intensifs (par exemple, l'impact sur l'utilisation des pesticides ou des amendements chimiques, ou encore sur la conservation de la biodiversité), mais uniquement à la capacité de ces systèmes, en séquestrant du carbone dans les sols cultivés, à atténuer le changement climatique en compensant les émissions de gaz à effet de serre causées par l'activité humaine. Nos conclusions sont restées assez mitigées car la littérature scientifique indique un stockage du carbone dans les couches superficielles du sol et la stabilité de ce carbone est mise en question. De manière générale et non exhaustive, cette revue de la littérature nous a permis de replacer l'AC dans le contexte du développement agricole en Afrique sub-Saharienne. Plus spécifiquement, elle nous a aussi permis de confirmer que tous les effets positifs attendus en AC, notamment la capacité à tamponner l'aléa pluviométrique, dépendent essentiellement de l'action du mulch maintenu sur la parcelle cultivée.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes donc recentrés sur le sujet et la zone de cette étude afin d'évaluer le potentiel de l'AC à tamponner l'aléa pluviométrique. La région du lac Alaotra, Madagascar, est sujette à de fortes variations pluviométriques intra- et interannuelles, évoquées comme l'un des premiers facteurs de risque par les agriculteurs (Durand and Nave, 2007). Les cultures pluviales, se développant de plus en plus à cause de la saturation foncière des terres irriguées, sont directement dépendantes de la distribution des pluies ; et l'AC a été introduite dans la région pour augmenter les performances de la production pluviale, notamment par sa capacité potentielle à tamponner l'aléa pluviométrique. En se basant sur les données de suivi parcellaire du projet BV/Lac, couvrant quatre saisons des pluies contrastées, nous avons pu constater, en moyenne, une augmentation des rendements en riz pluvial dès la première année de transition en AC, avec une augmentation progressive des rendements moyens et une diminution de la variabilité au fur et à mesure des années de pratiques. La grande majorité des parcelles répertoriées n'a bénéficié d'aucun apport en engrais minéral, mais lorsque cela a été le cas, nous n'avons pas observé de relation entre l'augmentation des rendements et la fertilisation apportée. Nous n'avons pas observé de stratégie de semis particulière en AC. Comme pour la culture de riz pluvial conventionnelle, les parcelles ont été semées avant la fin de l'année, avec des premiers semis plus ou moins tôt, en fonction du démarrage de la saison des pluies chaque année. Néanmoins, les rendements des quelques parcelles semées précocement ou tardivement ont été parfois supérieurs en AC, suggérant une capacité de ces systèmes à sécuriser les semis hors 'pratiques dominantes'. Enfin, nous avons constaté un poids très important du climat sur la variabilité des rendements dans la zone d'étude. Pour l'année la plus sèche, nous avons observé les rendements les plus bas, sans différence entre AC et conventionnel. Pour l'année la plus

humide, nous avons observé les rendements les plus élevés, avec l'écart de rendement le plus important des quatre années entre AC et conventionnel. Ces observations semblent être en contradiction avec les conclusions tirées du premier chapitre, suggérant une meilleure expression du potentiel de l'AC sous faibles pluies. Cependant, nous avons remarqué une importante période de sécheresse pendant la saison la plus humide, nous laissant supposer que l'écart de rendements ait résulté d'une limitation du stress hydrique en AC. Cette analyse exploratoire nous a donc permis d'observer des effets positifs des systèmes en AC dans les conditions climatiques de la région du lac Alaotra, suggérant notamment un effet potentiel sur la ressource hydrique. Avec les informations à notre disposition et le nombre d'années couvertes par cette analyse, nous n'avons pas pu vérifier cette hypothèse.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes donc intéressés de manière plus précise à l'impact du mulch sur le bilan hydrique et les rendements dans les conditions agro-environnementales de la zone d'étude. A notre connaissance, jusqu'ici, une telle étude n'a pas encore été menée en culture pluviale au lac Alaotra. Il faudrait donc mettre en place un dispositif expérimental assez lourd, couvrant plusieurs sites et plusieurs années, pour atteindre cet objectif et couvrir la variabilité des conditions de sol et de climat de la région. En alternative, nous avons opté pour une approche 'modélisation', nous permettant de simuler la croissance et le rendement du riz pluviale en AC pour différents sols sur une longue série de données climatiques ; cette approche nécessitant un jeu de données expérimentales relativement limité pour évaluer et calibrer le modèle. Dans cette étude, nous avons confirmé la capacité du mulch a fortement réduire le ruissellement et donc à augmenter l'infiltration de l'eau dans les sols cultivés. L'expérimentation virtuelle nous a permis d'identifier les dates de semis pour lesquelles le riz pluvial est le moins impacté par le stress hydrique dans la région. L'apport de mulch et la diminution du ruissellement ont provoqué une légère augmentation des rendements moyens simulés et une forte augmentation du drainage moyen simulé sous la zone colonisée par les racines. En revanche, la diminution du ruissellement s'est traduite par une réduction de la variabilité des rendements simulés, et donc une diminution du risque. La modélisation nous a donc permis de mieux appréhender l'impact du climat, de sa distribution et de sa variabilité, sur la culture pluviale au lac Alaotra. En effet ces résultats nous ont indiqué que pour les dates de semis majoritairement pratiquées par les agriculteurs, et dans un éventail de conditions de sol, la disponibilité en eau est très peu affectée par une modification du ruissellement car, même dans le scénario de conservation de l'eau le plus pessimiste, les quantités d'eau apportées au sol par chaque évènement pluvieux permet un remplissage de la réserve utile. Les bénéfices d'une réduction du ruissellement apparaissent dans des conditions hydriques plus stressantes telles que des dates de semis précoce ou une intensification, en

diminuant la variabilité des rendements.

1.2. Des hypothèses à nuancer

Les résultats obtenus dans les deux premiers chapitres vont dans le sens de notre première hypothèse : il semble y avoir un impact positif du mulch en AC, et cet impact se ressent essentiellement dans des conditions pluviométriques limitantes. Seulement, étant donnée la généricité de ces chapitres, nous ne sommes pas en mesure de confirmer cette hypothèse avec certitude. Le troisième chapitre apporte des éléments de réponses qui invitent à nuancer les hypothèses de départ. En AC, le mulch a la capacité d'améliorer le bilan hydrique en diminuant le ruissellement ; confirmant les résultats déjà démontrés par ailleurs (Scopel et al., 2004; Findeling et al., 2003). Seulement, notre étude met le doigt sur l'importance de la spécificité de chaque contexte agro-climatique. L'augmentation de l'infiltration de l'eau dans les sols cultivés ne se traduit pas nécessairement par une amélioration du bilan hydrique dès lors que les conditions de pluies sont limitées et/ou aléatoires. La réserve utile des sols, les besoins en eau des cultures, les niveaux de ruissellements de départ, et la dynamique aléatoire des pluies sont autant de facteurs déterminants de la pertinence à réduire le ruissellement par un apport de mulch à la parcelle. Le troisième chapitre illustre bien l'importance de définir et d'appréhender le caractère aléatoire des pluies dans une région.

Avec une moyenne des précipitations annuelles de 1000 mm, le climat de la région du lac Alaotra ne peut pas être qualifié de déficitaire en pluies, telles que certaines régions semi-arides d'Afrique sub-Saharienne (Tittonell et al., 2012). En revanche, la saison des pluies est caractérisée par une forte variabilité de la distribution des pluies qui entraîne une alternance de campagnes très sèches et très arrosées, mais elle est aussi caractérisée par des périodes de sécheresse pendant la saison, principalement en début de saison (Razakavololona, 2011). Enfin, la région étant régulièrement sujette à des tempêtes tropicales, l'agressivité des précipitations devient parfois spectaculaire (par exemple, en 2010, le cyclone 'Hubert' a provoqué plus de 400 mm en trois jours, Waliser & Moncrieff, 2011). Ces précipitations sont particulièrement érosives et entraînent ruptures de barrages et inondations de parcelles. Il y a vingt ans, lors de son aventure à la recherche de *Hapalemur griseus alaotrensis*, le naturaliste britannique Durrell (1993) écrivait au sujet du lac Alaotra:

> *Le lac est serti dans un paysage de douces collines, jadis tapissées de forêts. Mais au fil des ans, ces bastions naturels étaient tombés, au bénéfice des cultures ; le bouclier de végétation détruit avait laissé un sol pelé. Rien désormais n'y poussait plus au-delà de quelques années. Puis les collines elles-mêmes s'étaient mises à s'effriter doucement. Sans les arbres pour la retenir, la terre glissait vers Alaotra comme un immense glacier rouge, engorgeant imperceptiblement les eaux du lac, l'effaçant peu à peu de la surface de la Terre.*

Nous ne reviendrons pas sur la véracité des éléments décrits par l'auteur, mais cet extrait illustre de

manière romancée la vision plutôt pessimiste que l'on peut avoir du contexte pédoclimatique de la région ; une vision qui maintient un apriori de 'climat capricieux', sans doute dans une moindre mesure, dans les perceptions des agriculteurs, techniciens et chercheurs qui travaillent dans cette région. En effet, la gestion de l'eau est une problématique primordiale au Lac Alaotra, car elle est déterminante du succès des cultures de riz irrigué. Les épisodes pluvieux importants combinés au contexte socio-économique de la région peuvent engendrer de lourdes pertes de production dans les plaines irriguées. En culture pluviale, il existe des phénomènes de ruissellement et d'érosion qui contribuent au problème plus global de perte de fertilité des sols (André et al., 2010), et par amalgame, on émet l'hypothèse que ces phénomènes affectent fortement les niveaux de productions. D'après les résultats du troisième chapitre, malgré la distribution erratique des pluies dans la région, agir sur le ruissellement n'influe que très légèrement sur les niveaux de productions en riz pluvial pour les dates de semis usuelles des agriculteurs dans une gamme assez large de conditions de sol. La deuxième hypothèse de notre étude est donc à nuancer : Au lac Alaotra, les systèmes en AC peuvent tamponner le stress hydrique dans certains cas particuliers tels que le semis précoce ou l'intensification de la production.

2. Limites et perspectives de l'étude

2.1. Le changement climatique

Annoncé dans notre introduction comme un enjeu agricole majeur pour l'Afrique sub-Saharienne, nous avons abordé la thématique du changement climatique et de la capacité des systèmes en AC à s'adapter à ce changement de manière assez globale dans le premier chapitre. Nous avons supposé une adaptation potentielle des systèmes en AC aux changements climatiques prévus en Afrique sub-Saharienne (cumuls de précipitations saisonnières inchangés, retard du démarrage de la saison des pluies et augmentation en fréquence et en intensité des évènements extrêmes) en s'appuyant sur les performances des systèmes en AC dans des contextes pluviométriques contrastés. Seulement, ces contextes représentent aussi des zones agroécologiques et des types de systèmes de cultures différents. Ces résultats préliminaires sont donc à interpréter avec précautions. Dans une zone agroécologique donnée, l'approche par expérimentation virtuelle utilisée dans le troisième chapitre pourrait être utilisée afin d'évaluer de manière plus précise la capacité d'adaptation de l'AC aux changements climatiques. Cela suppose néanmoins que l'on soit capable de prévoir les changements à l'échelle de la zone d'étude et que l'on puisse générer des données climatiques journalières représentatives de ces changements. Les modèles de changement climatique sont aujourd'hui capables de prévoir de manière assez fiable les changements de températures, mais les prédictions concernant les pluies, qui dépendent de facteurs micro-locaux tels que la topographie, restent très imprécises

(communication personnelle, B. Sultan, 2013). Nous avons eu accès à la base de données IPSL Global Climate Modeling Group qui recense les projections climatiques des principaux modèles mondiaux et nous avons extrait les données climatiques de 38 modèles pour la moitié nord de Madagascar. La Figure 20 représente les changement projeté à 2050 par les trois modèles représentant le mieux le climat actuel de la région du lac Alaotra. Pour les pluies, les scénarios sont effectivement très contrastés. D'après les observations de Razakavololona (2011), la perception des agriculteurs et l'évolution des pluies totales des mois d'octobre depuis 50 ans (Figure 21), il semble y avoir un retard du démarrage de la saison des pluies dans notre zone d'étude, laissant penser que les scénarios des modèles EC-EARTH et MPI-ESM-MR soit les plus probables. Seulement, ce 'ressenti' se base sur les 12 saisons consécutives, de 1995-96 à 2006-07, où il n'a quasiment pas plus en octobre. Etant donné la reprise des pluies en octobre pour les saisons suivante, il est difficile de pouvoir affirmer que ce changement brutal soit de l'ordre 'du changement' ou de l' 'aléa'.

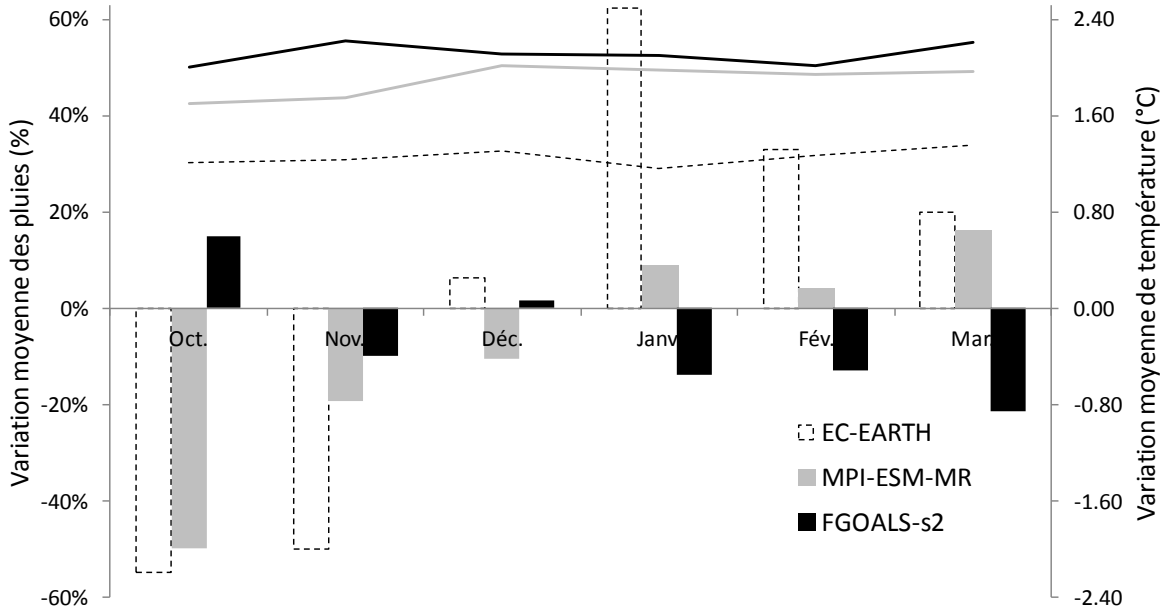


Figure 20 : Le changement climatique
Projection à 2050 des variations mensuelles moyennes des pluies (histogrammes) et des températures (courbes) calculées à partir des données de trois modèles climatiques pour la moitié nord de Madagascar (IPSL, Global Climate Modeling Group).

La méthodologie utilisée dans le troisième chapitre pourrait donc être appliquée pour prospecter l'adaptabilité des systèmes en AC au changement climatique à Madagascar. Le modèle que nous avons utilisé pourrait être amélioré afin de prendre en compte l'impact de l'enrichissement de l'atmosphère en CO_2 (Gerardeaux et al., 2011), mais la contrainte majeure actuelle semble être la qualité des prédictions des changements pluviométriques.

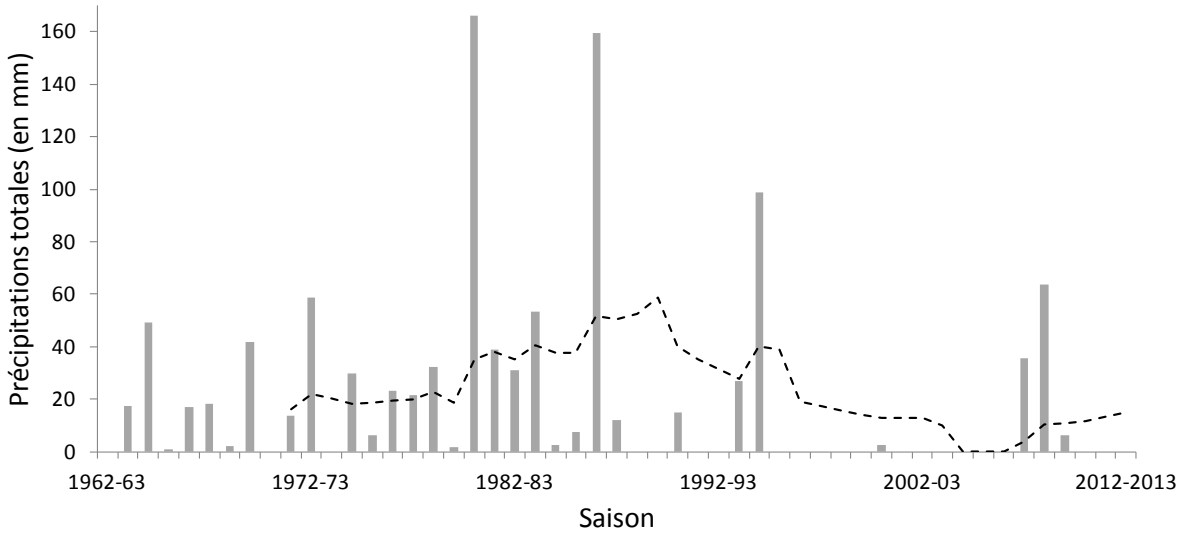


Figure 21 : La pluie en octobre
Précipitations cumulées du mois d'octobre à la station de Bevava de 1962 à 1988 et de 1990 à 2010. La ligne en pointillés représente la moyenne mobile sur une période de 10 saisons.

2.2. Passage de l'échelle parcelle à l'échelle exploitation

Dans cette étude, nous nous sommes principalement intéressés aux impacts agronomiques des systèmes en AC à l'échelle de la parcelle. Seulement, l'évaluation agronomique à l'échelle parcelle prend tout son sens lorsque qu'elle intègre les facteurs et interactions à l'échelle exploitation. En effet, un agriculteur raisonne sa gestion des ressources disponibles à l'échelle de l'exploitation. Ainsi, les contraintes et/ou avantages apportés par l'insertion de systèmes en AC dans le système de production seront des freins ou des moteurs de l'adoption de ces systèmes par les agriculteurs (Giller et al., 2009). Par exemple, la diminution de la charge et des coûts du travail sont souvent avancés comme un des principaux avantages des systèmes en AC. Effectivement, nous avons vu dans le premier chapitre que l'AC peut diminuer la charge de travail, principalement en supprimant les travaux de préparation du sol. Mais cette charge peut tout aussi bien augmenter si le mulch maintenu sur la parcelle n'a pas suffit à limiter la pression des mauvaises herbes. Cette fluctuation de la charge de travail engendre une fluctuation plus ou moins importante des performances économiques en fonction du coût du travail dans la région, du type de culture ou encore du type d'exploitation (mécanisée ou manuelle). Au-delà de l'impact économique à la parcelle, il est important d'analyser l'impact sur la charge de travail totale de l'exploitation.

La Table 14 présente les temps de travaux moyens de systèmes en riz dans notre zone d'étude. On constate que le riz pluvial en AC requiert plus de travail qu'en conventionnel, notamment parce que le semis et le désherbage dans un mulch sont plus difficiles. Si l'on s'intéresse à la répartition des temps de travaux, on comprend qu'en fonction des systèmes mis en place par un agriculteur, il y aura des

périodes de pics de travail lorsque des travaux agricoles devront être effectués simultanément sur plusieurs parcelles (par exemple, en riz irrigué et en riz pluvial AC pour la seconde quinzaine de novembre ; ou en riz irrigué et en riz pluvial CV pour la première quinzaine d'avril).

Table 14 : Culture du riz et temps de travaux
Exemple de répartition des temps de travaux (en heure ha^{-1}) par quinzaine pour quatre systèmes de culture en riz (Naudin et al., 2014). ~ : Maîtrise de l'irrigation aléatoire ; CV : système conventionnel sur labour ; AC : système en agriculture de conservation

Mois	Oct.		Nov.		Déc.		Jan.		Fév.		Mar.		Avr.		Mai		*Total*
Quinzaine	1ière	2nde	1ière	2nde	1ière	2nde	1ière	2nde	1ière	2nde	1ière	2nde	1ière	2nde	1ière	2nde	
Riz irrigué		220		220	70	270		170					180				*1130*
Riz ~irrigué					176	264	272		344						120		*1176*
Riz pluvial CV						384		352					264				*1000*
Riz pluvial AC				240		272		352				264					*1128*

Les résultats des deuxième et troisième chapitres suggèrent une sécurisation des semis précoces en AC. Il serait donc intéressant de prospecter quel serait l'impact sur la répartition de la charge de travail lorsque l'on offre une plus grande flexibilité de semis. Effectivement, nous avons observé, dans le deuxième chapitre, une concentration des dates de semis de mi-novembre à fin décembre dans la région mais la modélisation biophysique, dans le troisième chapitre, a révélé que les conditions pluviométriques du lac Alaotra permettraient de semer plus tôt. Nous émettons l'hypothèse que les travaux agricoles pendant la saison des pluies sont rythmés par les besoins en main d'œuvre de la culture de riz irriguée au lac Alaotra et un semis plus précoce des cultures pluviales coïnciderait alors avec les travaux de mise en boue et de repiquage dans les plaines. Seulement, la part du riz irrigué dans les exploitations agricoles de la région est variable et l'on peut supposer que cela influe sur la disponibilité de la main d'œuvre familiale.

Cet exemple illustre la nécessité de passer de l'échelle parcelle à l'échelle exploitation afin de cerner de manière plus complète les contraintes et intérêts des systèmes en AC pour les agriculteurs. Cela ouvre des perspectives d'utilisation des résultats de notre étude, notamment dans une approche de modélisation à l'échelle de l'exploitation, voire même dans un couplage de modèles bio-économiques.

Références bibliographiques

Abdalla, M.A., Mohamed, A.E., Makki, E.K., 2007. The response of two-sorghum cultivars to conventional and conservation tillage systems in central Sudan. AMA - Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America 38, 67–71.

Abiven, S., Recous, S., 2007. Mineralisation of crop residues on the soil surface or incorporated in the soil under controlled conditions. Biology and Fertility of Soils 43, 849–852. doi:10.1007/s00374-007-0165-2

Adekalu, K.O., Olorunfemi, I.A., Osunbitan, J.A., 2007. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria. Bioresource technology 98, 912–7. doi:10.1016/j.biortech.2006.02.044

Affholder, F., 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. Field Crops Research 52, 79–93. doi:10.1016/S0378-4290(96)03453-3

Affholder, F., Jourdain, D., Quang, D.D., Tuong, T.P., Morize, M., Ricome, A., 2010. Constraints to farmers' adoption of direct-seeding mulch-based cropping systems: A farm scale modeling approach applied to the mountainous slopes of Vietnam. Agricultural Systems 103, 51–62. doi:10.1016/j.agsy.2009.09.001cam

Affholder, F., Poeydebat, C., Corbeels, M., Scopel, E., Tittonell, P., 2013. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. Field Crops Research 143, 106–118. doi:10.1016/j.fcr.2012.10.021

Affholder, F., Tittonell, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., Wery, J., 2012. Ad Hoc Modeling in Agronomy: What Have We Learned in the Last 15 Years? Agronomy Journal 104, 735. doi:10.2134/agronj2011.0376

Aflakpui, G.K.S., Boa-Amponsem, F.K., Anchirinah, V.M., Osei-Yeboah, S., Bolfrey-Arku, G.G.E.-K., Osei-Bonsu, P., Asumadu, H., Manu-Aduening, J.A., Allou, P.B., Akowuah, P.K., Baffour, A., 2007. Sustaining Crop Production Through Conservation Tillage in Ghana. Journal of Plant Sciences 2, 68–74.

Agbede, T.M., 2008. Nutrient availability and cocoyam yield under different tillage practices. Soil and Tillage Research 99, 49–57. doi:10.1016/j.still.2007.12.003

Agbede, T.M., Ojeniyi, S.O., 2009. Tillage and poultry manure effects on soil fertility and sorghum yield in southwestern Nigeria. Soil and Tillage Research 104, 74–81. doi:10.1016/j.still.2008.12.014

Agboola, A., 1981. The effects of different soil tillage and management practices on the physical and chemical properties of soil and maize yield in a rainforest zone of western Nigeria. Agronomy Journal.

Agele, S.O., Ewulo, B.S., Oyewusi, I.K., 2005. Effects of some soil management systems on soil physical properties, microbial biomass and nutrient distribution under rainfed maize production in a humid rainforest Alfisol. Nutrient Cycling in Agroecosystems 72, 121–134. doi:10.1007/s10705-004-7306-x

Agenbag, G.A., 2012. Growth, yield and grain protein content of wheat (Triticum aestivum L.) in response to nitrogen fertiliser rates, crop rotation and soil tillage. South African Journal of Plant and Soil 29, 73–79. doi:10.1080/02571862.2012.716457

Agenbag, G.A., Maree, P.C.J., 1989. The effect of tillage on soil carbon, nitrogen and soil strength of simulated surface crusts in two cropping systems for wheat (Triticum aestivum). Soil and Tillage Research 14, 53–65.

Aguilera, E., Lassaletta, L., Gattinger, A., Gimeno, B.S., 2013. Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment 168, 25–36. doi:10.1016/j.agee.2013.02.003

Ahmed, M., Asif, M., Sajad, M., Khattak, J.Z.K., Ijaz, W., Fayyaz-ul-Hassan, Wasaya, A., Chun, J.A., 2013. Could agricultural system be adapted to climate change? A review. Australian Journal of Crop Science 7, 1642–1653.

Akinyemi, J., 2003. Performance of cowpea under three tillage systems on an Oxic Paleustalf in southwestern Nigeria. Soil and Tillage Research 72, 75–83. doi:10.1016/S0167-1987(03)00066-7

Albergel, J., Diatta, M., Juncker, E., 1990. Méthodes pour améliorer l'infiltration et réduire le ruissellement: présentation du cas du Sine-Saloum (Sénégal). Bulletin-Réseau ….

Alexandratos, N., Bruinsma, J., 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working Paper, FAO.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO 1–15.

Ambassa-Kiki, R., Aboubakar, Y., Boulama, T., 1996. Zero-tillage for rice production on Cameroonian Vertisols. Soil and Tillage Research 39, 75–84. doi:10.1016/S0167-1987(96)01042-2

Anazodo, U., Onwualu, A.P., Watts, K.C., 1991. Evaluation of alternative tillage systems in the absence of herbicides for maize production in a savannah loamy sand. Journal of agricultural engineering … 49, 259–272.

André, L., Bernard, C., Boulanger, F., Bruelle, G., Fabre, J., Falconnier, G., Fleury, J., Kong, R., Michel, E., Paresys, L., Ricard, B., Salanié, F., Topi, M., Pineda, A.V., Villemaine, R., Collectif, 2010. Erosion et pratiques des agriculteurs du Lac Alaotra, Madagascar . Cas des communes d'Ilafy et de Feramanga. Master thesis.

Andrieu, N., Vayssières, J., Corbeels, M., Blanchard, M., Vall, E., Tittonell, P., 2014. From farm scale synergies to village scale trade-offs: Cereal crop residues use in an agro-pastoral system of the Sudanian zone of Burkina Faso. Agricultural Systems. doi:10.1016/j.agsy.2014.08.012

Anthony, S.R.J.I., Franzluebbers, K., Dabiri, A., Ikhile, B., Juo, A.S.R., 1996. Soil properties and crop performance on a kaolinitic Alfisol after 15 years of fallow and continuous cultivation. Plant and Soil 180, 209–217.

Araya, T., Cornelis, W.M., Nyssen, J., Govaerts, B., Bauer, H., Gebreegziabher, T., Oicha, T., Raes, D., Sayre, K.D., Haile, M., Deckers, J., 2011. Effects of conservation agriculture on runoff, soil loss and crop yield under rainfed conditions in Tigray, Northern Ethiopia. Soil Use and Management no–no. doi:10.1111/j.1475-2743.2011.00347.x

Araya, T., Cornelis, W.M., Nyssen, J., Govaerts, B., Getnet, F., Bauer, H., Amare, K., Raes, D., Haile, M., Deckers, J., 2012. Medium-term effects of conservation agriculture based cropping systems for sustainable soil and water management and crop productivity in the Ethiopian highlands. Field Crops Research 132, 53–62. doi:10.1016/j.fcr.2011.12.009

Baggs, E.M., Chebii, J., Ndufa, J.K., 2006. A short-term investigation of trace gas emissions following tillage and no-tillage of agroforestry residues in western Kenya. Soil and Tillage Research 90, 69–76. doi:10.1016/j.still.2005.08.006

Bakoariniaina, L.N., Kusky, T., Raharimahefa, T., 2006. Disappearing Lake Alaotra: Monitoring catastrophic erosion, waterway

silting, and land degradation hazards in Madagascar using Landsat imagery. Journal of African Earth Sciences 44, 241–252. doi:10.1016/j.jafrearsci.2005.10.013

Bänziger, M., Setimela, P.S., Hodson, D., Vivek, B., 2006. Breeding for improved abiotic stress tolerance in maize adapted to southern Africa. Agricultural Water Management 80, 212–224. doi:10.1016/j.agwat.2005.07.014

Barthès, B., Azontonde, A., Blanchart, E., Girardin, C., Villenave, C., Lesaint, S., Oliver, R., Feller, C., 2004. Effect of a legume cover crop (Mucuna pruriens var. utilis) on soil carbon in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. Soil Use and Management 20, 231–239. doi:10.1079/SUM2004235

Barton, A.P., Fullen, M.A., Mitchell, D.J., Hocking, T.J., Liu, L., Wu Bo, Z., Zheng, Y., Xia, Z.Y., 2004. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province, China. Agriculture, Ecosystems & Environment 104, 343–357. doi:10.1016/j.agee.2004.01.034

Baudoin, E., Philippot, L., Chèneby, D., Chapuis-Lardy, L., Fromin, N., Bru, D., Rabary, B., Brauman, A., 2009. Direct seeding mulch-based cropping increases both the activity and the abundance of denitrifier communities in a tropical soil. Soil Biology and Biochemistry 41, 1703–1709. doi:10.1016/j.soilbio.2009.05.015

Baudron, F., Andersson, J.A., Corbeels, M., Giller, K.E., 2012a. Failing to Yield? Ploughs, Conservation Agriculture and the Problem of Agricultural Intensification: An Example from the Zambezi Valley, Zimbabwe. Journal of Development Studies 48, 393–412. doi:10.1080/00220388.2011.587509

Baudron, F., Jaleta, M., Okitoi, O., Tegegn, A., 2014. Conservation agriculture in African mixed crop-livestock systems: Expanding the niche. Agriculture, Ecosystems & Environment 187, 171–182. doi:10.1016/j.agee.2013.08.020

Baudron, F., Tittonell, P., Corbeels, M., Letourmy, P., Giller, K.E., 2012b. Comparative performance of conservation agriculture and current smallholder farming practices in semi-arid Zimbabwe. Field Crops Research 132, 117–128. doi:10.1016/j.fcr.2011.09.008

Bernoux, M., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., Neto, M.S., Metay, A., 2006. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. Agronomy for Sustainable Development.

Bolliger, A., Magid, J., Amado, J.C.T., 2006. Taking Stock of the Brazilian "Zero-Till Revolution": A Review of Landmark Research and Farmers' Practice. Advances in Agronomy 91, 47–110. doi:10.1016/S0065-2113(06)91002-5

Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J., 1984. Classification and regression trees. Belmont, CA, Wadsworth.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy 18, 309–332. doi:10.1016/S1161-0301(02)00110-7

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.M., Delécolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie 18, 311–346. doi:10.1051/agro:19980501

Brouder, S.M., Gomez-Macpherson, H., 2014. The impact of conservation agriculture on smallholder agricultural yields: A scoping review of the evidence. Agriculture, Ecosystems & Environment. doi:10.1016/j.agee.2013.08.010

Bruelle, G., Naudin, K., Scopel, E., Domas, R., Rabeharisoa, L., Tittonell, P., 2014. Short- to mid-term impact of conservation agriculture on yield variability of upland rice: Evidence from farmer's fields in Madagascar. Experimental Agriculture 1–19. doi:10.1017/S0014479714000155

Buysman, E., Mol, A.P.J., 2013. Market-based biogas sector development in least developed countries -The case of Cambodia. Energy Policy 63, 44–51. doi:10.1016/j.enpol.2013.05.071

Chapuis-Lardy, L., Metay, A., Martinet, M., Rabenarivo, M., Toucet, J., Douzet, J.-M., Razafimbelo, T.M., Rabeharisoa, L., Rakotoarisoa, J., 2009. Nitrous oxide fluxes from Malagasy agricultural soils. Geoderma 148, 421–427. doi:10.1016/j.geoderma.2008.11.015

Chivenge, P.P., Murwira, H.K., Giller, K.E., Mapfumo, P., Six, J., 2007. Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils. Soil and Tillage Research 94, 328–337. doi:10.1016/j.still.2006.08.006

Corbeels, M., de Graaff, J., Ndah, T.H., Penot, E., Baudron, F., Naudin, K., Andrieu, N., Chirat, G., Schuler, J., Nyagumbo, I., Rusinamhodzi, L., Traore, K., Mzoba, H.D., Adolwa, I.S., 2014a. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: A multi-scale analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment 187, 155–170. doi:10.1016/j.agee.2013.10.011

Corbeels, M., Sakyi, R., Kühne, R., Whitbread, A., 2014b. Meta-analysis of crop responses to conservation agriculture in sub-Saharan Africa. CCAFS report.

Corbeels, M., Scopel, E., Cardoso, A., Bernoux, M., Douzet, J.-M., Neto, M.S., 2006. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. Global Change Biology 12, 1773–1787. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01233.x

Dalton, T.J., Yahaya, I., Naab, J., 2014. Perceptions and performance of conservation agriculture practices in northwestern Ghana. Agriculture, Ecosystems and Environment 187, 65–71. doi:10.1016/j.agee.2013.11.015

Delmotte, S., Tittonell, P., Mouret, J., 2011. On farm assessment of rice yield variability and productivity gaps between organic and conventional cropping systems under Mediterranean climate. European Journal of Agronomy 35, 223–236. doi:10.1016/j.eja.2011.06.006

Derpsch, R., Franzluebbers, a. J.J., Duiker, S.W.W., Reicosky, D.C.C., Koeller, K., Friedrich, T., Sturny, W.G.G., Sá, J.C.M.C.M., Weiss, K., 2014. Why do we need to standardize no-tillage research? Soil and Tillage Research 137, 16–22. doi:10.1016/j.still.2013.10.002

Devèze, J.-C., 2006. Réflexions sur l'avenir des agricultures familiales du lac Alaotra Madagascar.

Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., Tittonell, P., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. European Journal of Agronomy 34, 197–210. doi:10.1016/j.eja.2011.02.006

Durand, C., Nave, S., 2007. Les paysans de l'Alaotra, entre rizières et tanety. Étude des dynamiques agraires et des stratégies paysannes dans un contexte de pression foncière Lac Alaotra, Madagascar. Master thesis.

Durrell, G., 1993. Le aye-aye et moi. Traduit de l'anglais par Isabelle Chapman. Version originale : The aye-aye and I: A rescue mission in Madagascar, Editions H. ed.

Dusserre, J., Chopart, J., Douzet, J., Rakotoarisoa, J., Scopel, E., 2012. Upland rice production under conservation agriculture cropping systems in cold conditions of tropical highlands.

Field Crops Research 138, 33–41. doi:10.1016/j.fcr.2012.09.011

Enfors, E., Barron, J., Makurira, H., Rockström, J., Tumbo, S., 2011. Yield and soil system changes from conservation tillage in dryland farming: A case study from North Eastern Tanzania. Agricultural Water Management 98, 1687–1695. doi:10.1016/j.agwat.2010.02.013

Erenstein, O., 2003. Smallholder conservation farming in the tropics and sub-tropics: A guide to the development and dissemination of mulching with crop residues and cover crops. Agriculture, Ecosystems & Environment 100, 17–37. doi:10.1016/S0167-8809(03)00150-6

Erkossa, T., Stahr, K., Gaiser, T., 2006. Soil tillage and crop productivity on a Vertisol in Ethiopian highlands. Soil and Tillage Research 85, 200–211. doi:10.1016/j.still.2005.01.009

Fabre, J., 2010. Evaluation technico-économique des effets des systèmes de culture sous couverture végétale dans les exploitations agricoles du lac Alaotra. IRC Montpellier SupAgro, CIRAD, projet PAMPA.

FAO, 2010. Climate-Smart Agriculture: Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation, FAO.

FAO, 2013. Climate-smart agriculture sourcebook, Book.

FAO, 2014. Conservation agriculture homepage [WWW Document]. URL http://www.fao.org/ag/ca/

Findeling, A., Ruy, S., Scopel, E., 2003. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. Journal of hydrology 275, 49–66.

Forest, F., Clopes, A., 1994. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré.

Gao, L., Jin, Z., Huang, Y., Zhang, L., 1992. Rice clock model—a computer model to simulate rice development. Agricultural and Forest Meteorology.

Gerardeaux, E., Giner, M., Ramanantsoanirina, A., Dusserre, J., 2011. Positive effects of climate change on rice in Madagascar. Agronomy for Sustainable Development 32, 619–627. doi:10.1007/s13593-011-0049-6

Gill, K.S., Aulakh, B.S., 1990. Wheat yield and soil bulk density response to some tillage systems on an oxisol. Soil and Tillage Research 18, 37–45. doi:10.1016/0167-1987(90)90091-Q

Gill, K.S.K., Arshad, M.A., Chivunda, B.K.B., Phiri, B., Gumbo, M., 1992. Influence of residue mulch, tillage and cultural practices on weed mass and corn yield from three field experiments. Soil and Tillage Research 24, 211–223.

Giller, K.E., Corbeels, M., Nyamangara, J., Triomphe, B., Affholder, F., Scopel, E., Tittonell, P., 2011. A research agenda to explore the role of conservation agriculture in African smallholder farming systems. Field Crops Research 124, 468–472. doi:10.1016/j.fcr.2011.04.010

Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M., Tittonell, P., 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. Field Crops Research 114, 23–34. doi:10.1016/j.fcr.2009.06.017

Goujon, P., 1968. conservation des sols en Afrique et à Madagascar 1ère partie. Bois et forêt des tropiques 3–17.

Goujon, P., de Vergnette, B., de Coignac, B., Roche, M., 1968. Influence du couvert végétal sur le ruissellement et les pertes en terre 2ème partie. Bois et forêt des tropiques 17–27.

Guto, S.N., Pypers, P., Vanlauwe, B., de Ridder, N., Giller, K.E., 2011. Tillage and vegetative barrier effects on soil conservation and short-term economic benefits in the Central Kenya highlands. Field Crops Research 122, 85–94. doi:10.1016/j.fcr.2011.03.002

Gwenzi, W., Gotosa, J., Chakanetsa, S., Mutema, Z., 2009. Effects of tillage systems on soil organic carbon dynamics, structural stability and crop yields in irrigated wheat (Triticum aestivum L.)-cotton (Gossypium hirsutum L.) rotation in semi-arid Zimbabwe. Nutrient Cycling in Agroecosystems 83, 211–221. doi:10.1007/s10705-008-9211-1

Harvey, C. a., Chacón, M., Donatti, C.I., Garen, E., Hannah, L., Andrade, A., Bede, L., Brown, D., Calle, A., Chará, J., Clement, C., Gray, E., Hoang, M.H., Minang, P., Rodríguez, A.M., Seeberg-Elverfeldt, C., Semroc, B., Shames, S., Smukler, S., Somarriba, E., Torquebiau, E., van Etten, J., Wollenberg, E., 2014. Climate-Smart Landscapes: Opportunities and Challenges for Integrating Adaptation and Mitigation in Tropical Agriculture. Conservation Letters 7, 77–90. doi:10.1111/conl.12066

Hulugalle, N.R., Lal, R., 1986. Root growth of maize in a compacted gravelly tropical alfisol as affected by rotation with a woody perennial. Field Crops Research 13, 33–44.

IPCC, Bindoff, N.L., Stott, P.A., AchutaRao, K.M., Allen, M.R., Gillett, N., Gutzler, D., Hansingo, K., Hegerl, G., Hu, Y., Jain, S., Mokhov, I.I., Overland, J., Perlwitz, J., Sebbari, R., Zhang, X., Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M.C., Frame, D., Mahowald, N., Winther, J.-G., Christensen, J.H., Kumar, K.K., Aldrian, E., An, S.-I., Cavalcanti, I.F.A., Castro, M. de, Dong, W., Goswami, P., Hall, A., Kanyanga, J.K., Kitoh, A., Kossin, J., Lau, N.-C., Renwick, J., Stephenson, D.B., Xie, S.-P., Zhou, T., Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J., Wehner, M., 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in: Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Iqbal, A., Beaugrand, J., Garnier, P., Recous, S., 2013. Tissue density determines the water storage characteristics of crop residues. Plant and Soil 367, 285–299. doi:10.1007/s11104-012-1460-8

Khatibu, A., Lal, R., Jana, R., 1984. Effects of tillage methods and mulching on erosion and physical properties of a sandy clay loam in an equatorial warm humid region. Field Crops Research 8, 239–254.

Kihara, J., Bationo, a., Mugendi, D.N., Martius, C., Vlek, P.L.G., 2011. Conservation tillage, local organic resources and nitrogen fertilizer combinations affect maize productivity, soil structure and nutrient balances in semi-arid Kenya. Nutrient Cycling in Agroecosystems 90, 213–225. doi:10.1007/s10705-011-9423-7

Koné, A.W., Tondoh, J.E., Bernhard-Reversat, F., Loranger-Merciris, G., Brunet, D., Tano, Y., 2008. Changes in soil biological quality under legume-and maize-based farming systems in a humid savanna zone of côte d'ivoire Biotechnology, Agronomy and Society and Environment 12, 147–155.

Lal, R., 1976. Soil erosion on alfisols in Western Nigeria: IV. Nutrient element losses in runoff and eroded sediments. Geoderma 16, 403–417.

Lal, R., 1986a. Effects of 6 years of continuous no-till or puddling systems on soil properties and rice (Oryza sativa) yield of a loamy soil. Soil and Tillage Research 8, 181–200.

Lal, R., 1986b. Effects of eight tillage treatments on a tropical Alfisol: maize growth and yield. Journal of the Science of Food and Agriculture 1073–1082.

Lal, R., 1995. Tillage and Mulching Effects on Maize Yield for Seventeen Consecutive Seasons on a Tropical Alfisol. Journal of Sustainable Agriculture 5, 79–93. doi:10.1300/J064v05n04_07

Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate

change. Geoderma 123, 1–22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032

Lal, R., 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. Land Degradation & Development 17, 197–209. doi:10.1002/ldr.696

Lal, R., Wilson, G.F., Okigbo, B.N., 1978. No-till farming after various grasses and leguminous cover crops in tropical Alfisol. I. Crop performance. Field Crops Research 1, 71–84.

Lanckriet, S., Araya, T., Cornelis, W., Verfaillie, E., Poesen, J., Govaerts, B., Bauer, H., Deckers, J., Haile, M., Nyssen, J., 2012. Impact of conservation agriculture on catchment runoff and soil loss under changing climate conditions in May Zeg-zeg (Ethiopia). Journal of Hydrology 475, 336–349. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.10.011

Laurent, J.-B., Mézino, M., Enjalric, F., 2011. Manamora : Base de données mutualisée pour la Gestion des parcelles en SCV. IDDN.FR.001.160007.000.S.P.2013.000.10000.

Lawrance, K.F., Prinsloo, M.A., Berry, W.A.J., Taylor, P., 1999. Long and short term effects of tillage systems on grain yield, the incidence of diseases and production costs for maize. South African Journal of Plant and Soil 16, 85–91. doi:10.1080/02571862.1999.10634852

Loke, P.F., Kotzé, E., du Preez, C.C., 2012. Changes in soil organic matter indices following 32 years of different wheat production management practices in semi-arid South Africa. Nutrient Cycling in Agroecosystems 94, 97–109. doi:10.1007/s10705-012-9529-6

Luo, Z., Wang, E., Sun, O.J., 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. Agriculture, Ecosystems & Environment 139, 224–231. doi:10.1016/j.agee.2010.08.006

Luu Ngoc, Q., Affholder, F., Montagne, J., Jourdain, D., Ripoche, A., Capillon, A., 2014. Sowing windows for a spring crop introduced in rice cultivation areas affected by low temperature and radiation. Experimental Agriculture (under submission).

MAEP, 2004. Compte rendu de la visite au lac Alaotra du 06 et 07 juin 2004.

Materechera, S. a., Mloza-Banda, H.R., 1997. Soil penetration resistance, root growth and yield of maize as influenced by tillage system on ridges in Malawi. Soil and Tillage Research 41, 13–24. doi:10.1016/S0167-1987(96)01086-0

Mesfine, T., Abebe, G., Al-Tawaha, A., 2005. Effect of reduced tillage and crop residue ground cover on yield and water use efficiency of sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) under semi-arid conditions. World Journal of Agricultural Sciences 1, 152–160.

Mupangwa, W., Thierfelder, C., 2013. Intensification of conservation agriculture systems for increased livestock feed and maize production in Zimbabwe. International Journal of Agricultural Sustainability 12, 425–439. doi:10.1080/14735903.2013.859836

Mupangwa, W., Twomlow, S., Walker, S., 2012. Reduced tillage, mulching and rotational effects on maize (Zea mays L.), cowpea (Vigna unguiculata (Walp) L.) and sorghum (Sorghum bicolor L. (Moench)) yields under semi-arid conditions. Field Crops Research 132, 139–148. doi:10.1016/j.fcr.2012.02.020

Mupangwa, W., Twomlow, S., Walker, S., 2013. Cumulative effects of reduced tillage and mulching on soil properties under semi-arid conditions. Journal of Arid Environments 91, 45–52. doi:10.1016/j.jaridenv.2012.11.007

Mupangwa, W., Twomlow, S., Walker, S., Hove, L., 2007. Effect of minimum tillage and mulching on maize (Zea mays L.) yield and water content of clayey and sandy soils. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 32, 1127–1134. doi:10.1016/j.pce.2007.07.030

Naudin, K., Bruelle, G., Salgado, P., Penot, E., Scopel, E., Lubbers, M., de Ridder, N., Giller, K.E., 2014. Trade-offs around the use of biomass for livestock feed and soil cover in dairy farms in the Alaotra lake region of Madagascar. Agricultural Systems. doi:10.1016/j.agsy.2014.03.003

Naudin, K., Gozé, E., Balarabe, O., Giller, K.E., Scopel, E., 2010. Impact of no tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon: A multi-locational on-farm assessment. Soil and Tillage Research 108, 68–76. doi:10.1016/j.still.2010.03.002

Naudin, K., Rasolofo, L.I., 2012. Contrôle de l'émergence des adventices par le paillage en riziculture pluviale à Madagascar, in: Conférence Internationale Sur Les Systèmes de Production Rizicole Biologique. Montpellier, France, p. 2.

Naudin, K., Scopel, E., Andriamandroso, A.L.H., Rakotosolofo, M., Andriamarosoa Ratsimbazafy, N.R.S., Rakotozandriny, J. de N., Salgado, P., Giller, K.E., 2012. Trade-offs between biomass use and soil cover. The case of rice-based cropping systems in the Lake Alaotra region of Madagascar. Experimental Agriculture 48, 194–209. doi:10.1017/S001447971100113X

Ngwira, A.R., Aune, J.B., Mkwinda, S., 2012a. On-farm evaluation of yield and economic benefit of short term maize legume intercropping systems under conservation agriculture in Malawi. Field Crops Research 132, 149–157. doi:10.1016/j.fcr.2011.12.014

Ngwira, A.R., Sleutel, S., de Neve, S., 2012b. Soil carbon dynamics as influenced by tillage and crop residue management in loamy sand and sandy loam soils under smallholder farmers' conditions in Malawi. Nutrient Cycling in Agroecosystems 92, 315–328. doi:10.1007/s10705-012-9492-2

Ngwira, A.R., Thierfelder, C., Lambert, D.M., 2013. Conservation agriculture systems for Malawian smallholder farmers: Long-term effects on crop productivity, profitability and soil quality. Renewable Agriculture and Food Systems 28, 350–363. doi:10.1017/S1742170512000257

Nyamadzawo, G., Chikowo, R., Nyamugafata, P., Nyamangara, J., Giller, K.E., 2007. Soil organic carbon dynamics of improved fallow-maize rotation systems under conventional and no-tillage in Central Zimbabwe. Nutrient Cycling in Agroecosystems 81, 85–93. doi:10.1007/s10705-007-9154-y

Nyamadzawo, G., Wuta, M., Nyamangara, J., Nyamugafata, P., Chirinda, N., 2014. Optimizing dambo (seasonal wetland) cultivation for climate change adaptation and sustainable crop production in the smallholder farming areas of Zimbabwe. International Journal of Agricultural Sustainability 1–17. doi:10.1080/14735903.2013.863450

Obalum, S.E., Amalu, U.C., Obi, M.E., Wakatsuki, T., 2011. Soil Water Balance and Grain Yield of Sorghum Under No-Till Versus Conventional Tillage With Surface Mulch in the Derived Savanna Zone of Southeastern Nigeria. Experimental Agriculture 47, 89–109. doi:10.1017/S0014479710000967

Ohiri, A.C., Ezumah, H.C., 1990. Tillage effects on cassava (Manihot esculenta) production and some soil properties. Soil and Tillage Research 17, 221–229.

Ojeniyi, S.O., Adekayode, F.O., 1999. Soil conditions and cowpea and maize yield produced by tillage methods in the rainforest zone of Nigeria. Soil and Tillage Research 51, 161–164. doi:10.1016/S0167-1987(99)00018-5

Osuji, G., 1984. Water storage, water use and maize yield for tillage systems on a tropical alfisol in Nigeria. Soil and Tillage Research 4, 339–348.

Ouédraogo, E., Mando, A., Brussaard, L., Stroosnijder, L., 2007. Tillage and fertility management effects on soil organic matter and sorghum yield in semi-arid West Africa. Soil and Till-

age Research 94, 64–74. doi:10.1016/j.still.2006.07.001

Ouédraogo, E., Stroosnijder, L., Mando, A., Brussaard, L., Zougmoré, R., 2007. Agroecological analysis and economic benefit of organic resources and fertiliser in till and no-till sorghum production after a 6-year fallow in semi-arid West Africa. Nutrient Cycling in Agroecosystems 77, 245–256. doi:10.1007/s10705-006-9063-5

Pannell, D.J., Llewellyn, R.S., Corbeels, M., 2014. The farm-level economics of conservation agriculture for resource-poor farmers. Agriculture, Ecosystems & Environment 187, 52–64. doi:10.1016/j.agee.2013.10.014

Pannell, D.J., Marshall, G.R., Barr, N., Curtis, A., Vanclay, F., Wilkinson, R., 2006. Understanding and promoting adoption of conservation practices by rural landholders. Australian Journal of Experimental Agriculture 46, 1407. doi:10.1071/EA05037

Paul, B.K., Vanlauwe, B., Ayuke, F., Gassner, A., Hoogmoed, M., Hurisso, T.T., Koala, S., Lelei, D., Ndabamenye, T., Six, J., Pulleman, M.M., 2013. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. Agriculture, Ecosystems & Environment 164, 14–22. doi:10.1016/j.agee.2012.10.003

Paustian, K., Andrén, O., Janzen, H.H., Lal, R., Smith, P., Tian, G., Tiessen, H., Van Noordwijk, M., Woomer, P.L., 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO2 emissions. Soil Use and Management 13, 230–244.

Penot, E., Fabre, J., Domas, R., 2011. The real adoption of conservation agriculture (CA) in the lake Alaotra area after 10 years of diffusion. WCCA.

Penot, E., Scopel, E., Domas, R., Naudin, K., 2010. La durabilité est elle soluble dans le développement ? L'adoption des techniques de conservation de l'agriculture dans un contexte d'incertitudes multiples au lac Alaotra, Madagascar. [WWW Document].

Powlson, D.S., Stirling, C.M., Jat, M.L., Gerard, B.G., Palm, C.A., Sanchez, P.A., Cassman, K.G., 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. Nature Climate Change 4, 678–683. doi:10.1038/nclimate2292

R Development Core Team, , 2011. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.

Rabenarivo, M., Wrage-Moennig, N., Chotte, J.-L., Rabeharisoa, L., Razafimbelo, T.M., Chapuis-Lardy, L., 2014. Emissions of CO2 and N2O from a pasture soil from Madagascar-Simulating conversion to direct-seeding mulch-based cropping in incubations with organic and inorganic inputs. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 177, 360–368. doi:10.1002/jpln.201300032

Rakotondramanana, Husson, O., Enjalric, F., 2010. Documentation et synthèse de l'Agriculture de Conservation à Madagascar.

Rao, K., Steenhuis, T., Cogle, A., 1998. Rainfall infiltration and runoff from an Alfisol in semi-arid tropical India. I. No-till systems. Soil and Tillage Research.

Razafimbelo, T.M., Albrecht, A., Feller, C., Ravelojaona, H., Moussa, N., Razanamparany, C., Rakotoarinivo, C., Razafintsalama, H., Michellon, R., Naudin, K., Rabeharisoa, L., Rabearisoa, M.Y., 2010. Stockage de carbone dans les sols sous systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) dans différents contextes pédoclimatiques à Madagascar. Etude et gestion des sols 17, 143–158.

Razafimbelo, T.M., Albrecht, A., Oliver, R., Chevallier, T., Chapuis-Lardy, L., Feller, C., 2008. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. Soil and Tillage Research 98, 140–149. doi:10.1016/j.still.2007.10.012

Razakavololona, A., 2011. Indicateurs de vulnérabilité des exploitations agricoles face aux variabilités climatique et démographique: Applications à la riziculture dans la région du Lac Alaotra (Madagascar). Ph.D. thesis. ESSA, Université d'Antananarivo.

Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Van Wijk, M.T., Rufino, M.C., Nyamangara, J., Giller, K.E., Wijk, M.T., 2011. A meta-analysis of long-term effects of conservation agriculture on maize grain yield under rain-fed conditions. Agronomy for Sustainable Development 31, 657–673. doi:10.1007/s13593-011-0040-2

Saito, K., Azoma, K., Oikeh, S.O., 2010. Combined effects of Stylosanthes guianensis fallow and tillage management on upland rice yield, weeds and soils in southern Benin. Soil and Tillage Research 107, 57–63.

Schroth, G., Jeusset, A., Gomes, A.S., Florence, C.T., Coelho, N.A.P., Faria, D., Läderach, P., 2014. Climate friendliness of cocoa agroforests is compatible with productivity increase. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. doi:10.1007/s11027-014-9570-7

Scopel, E., Da Silva, F.A.M.M., Corbeels, M., Affholder, F., Maraux, F., 2004. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. Agronomie 24, 383–395. doi:10.1051/agro:2004029

Scopel, E., Findeling, A., Guerra, E.C., Corbeels, M., Copel, E.S., Indeling, A.F., Havez, E.C., Uerra, G., Orbeels, M.C., 2005. Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield. Agronomy for Sustainable Development 25, 425–432. doi:10.1051/agro:2005041

Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F., Silva, F.A.M., Corbeels, M., Xavier, J.H.V., Lahmar, R., Recous, S., Bernoux, M., Blanchart, E., Mendes, I., Tourdonnet, S., Da Silva, F.A.M.M., De Carvalho Mendes, I., De Tourdonnet, S., 2013. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. Agronomy for Sustainable Development 33, 113–130. doi:10.1007/s13593-012-0106-9

Shemdoe, R.S., Van Damme, P., Kikula, I.S., 2009. Increasing crop yield in water scarce environments using locally available materials: An experience from semi-arid areas in Mpwapwa District, central Tanzania. Agricultural Water Management 96, 963–968. doi:10.1016/j.agwat.2009.01.007

Shrestha, S., Asch, F., Brueck, H., Giese, M., Dusserre, J., Ramanantsoanirina, A., 2013. Phenological responses of upland rice grown along an altitudinal gradient. Environmental and Experimental Botany 89, 1–10. doi:10.1016/j.envexpbot.2012.12.007

Shrestha, S., Asch, F., Dusserre, J., Ramanantsoanirina, A., Brueck, H., 2012. Climate effects on yield components as affected by genotypic responses to variable environmental conditions in upland rice systems at different altitudes. Field Crops Research 134, 216–228. doi:10.1016/j.fcr.2012.06.011

Siedenburg, J., Martin, A., McGuire, S., 2012. The power of "farmer friendly" financial incentives to deliver climate smart agriculture: a critical data gap. Journal of Integrative Environmental Sciences 9, 201–217. doi:10.1080/1943815X.2012.748304

Sinclair, T., Seligman, N., 1996. Crop modeling: from infancy to maturity. Agronomy Journal.

Singh, R.B., 2012. Climate Change and Food Security, in: Improving Crop Productivity in Sustainable Agriculture. Wiley-VCH, National Academy of Agricultural Sciences, NASC Complex, DPS Marg, Pusa, New Delhi 110012, India, pp. 1–22. doi:10.1002/9783527665334.ch1

Sissoko, F., Affholder, F., Autfray, P., Wery, J., Rapidel, B., 2013. Wet years and farmers' practices may offset the benefits of residue retention on runoff and yield in cotton fields in the Sudan–Sahelian zone. Agricultural Water Management 119, 89–99. doi:10.1016/j.agwat.2012.12.012

Teasdale, J.R., Mohler, C.L., 2009. The quantitative relationship between weed emergence and the physical properties of mulches. Weed Science 48, 385–392. doi:10.1614/0043-1745

Teyssier, A., 1994. Contrôle de l'espace et développement rural dans l'ouest Alaotra : de l'analyse d'un système agraire à un projet de gestion de l'espace rural.

Thierfelder, C., Cheesman, S., Rusinamhodzi, L., 2012. A comparative analysis of conservation agriculture systems: Benefits and challenges of rotations and intercropping in Zimbabwe. Field Crops Research 137, 237–250. doi:10.1016/j.fcr.2012.08.017

Thierfelder, C., Cheesman, S., Rusinamhodzi, L., 2013a. Benefits and challenges of crop rotations in maize-based conservation agriculture (CA) cropping systems of southern Africa. International Journal of Agricultural Sustainability 11, 108–124. doi:10.1080/14735903.2012.703894

Thierfelder, C., Chisui, J.L., Gama, M., Cheesman, S., Jere, Z.D., Trent Bunderson, W., Eash, N.S., Rusinamhodzi, L., 2013b. Maize-based conservation agriculture systems in Malawi: Long-term trends in productivity. Field Crops Research 142, 47–57. doi:10.1016/j.fcr.2012.11.010

Thierfelder, C., Mwila, M., Rusinamhodzi, L., 2013c. Conservation agriculture in eastern and southern provinces of Zambia: Long-term effects on soil quality and maize productivity. Soil and Tillage Research 126, 246–258. doi:10.1016/j.still.2012.09.002

Thierfelder, C., Wall, P.C., 2010. Rotation in conservation agriculture systems of Zambia: Effects on soil quality and water relations. Experimental Agriculture 46, 309–325. doi:10.1017/S001447971000030X

Thierfelder, C., Wall, P.C., 2012. Effects of conservation agriculture on soil quality and productivity in contrasting agro-ecological environments of Zimbabwe. Soil Use and Management 28, 209–220. doi:10.1111/j.1475-2743.2012.00406.x

Tittonell, P., Giller, K.E., 2013. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. Field Crops Research 143, 76–90. doi:10.1016/j.fcr.2012.10.007

Tittonell, P., Scopel, E., Andrieu, N., Posthumus, H., Mapfumo, P., Corbeels, M., van Halsema, G.E.E., Lahmar, R., Lugandu, S., Rakotoarisoa, J., Mtambanengwe, F., Pound, B., Chikowo, R., Naudin, K., Triomphe, B., Mkomwa, S., 2012. Agroecology-based aggradation-conservation agriculture (ABACO): Targeting innovations to combat soil degradation and food insecurity in semi-arid Africa. Field Crops Research 132, 168–174. doi:10.1016/j.fcr.2011.12.011

Tittonell, P., Shepherd, K., Vanlauwe, B., Giller, K.E., 2008. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya—An application of classification and regression tree analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment 123, 137–150. doi:10.1016/j.agee.2007.05.005

Todd, R., Klocke, N., 1991. Evaporation from soil influenced by crop shading, crop residue, and wetting regime. Transactions of the ASAE ….

Topp, G.C., Davis, J.L., 1985. Measurement of Soil Water Content using Time-domain Reflectrometry (TDR): A Field Evaluation. Soil Science Society of America Journal 49, 19. doi:10.2136/sssaj1985.03615995004900010003x

Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Tank, A.K., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J.A., Rusticucci, M., Soden, B., Zhai, P., 2007. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Tulema, B., Aune, J.B., Johnsen, F.H., Vanlauwe, B., 2008. The prospects of reduced tillage in tef (Eragrostis tef Zucca) in Gare Arera, West Shawa Zone of Oromiya, Ethiopia. Soil and Tillage Research 99, 58–65. doi:10.1016/j.still.2007.12.001

Umar, B.B., Aune, J.B., Johnsen, F.H., Lungu, I.O., 2012. Are Smallholder Zambian Farmers Economists? A Dual-Analysis of Farmers' Expenditure in Conservation and Conventional Agriculture Systems. Journal of Sustainable Agriculture 36, 908–929. doi:10.1080/10440046.2012.661700

Van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. Field Crops Research 52, 197–208. doi:10.1016/S0378-4290(97)00037-3

Van Keulen, H., 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions.

Van Nguyen, N., 1987. Effect of nitrogen, phosphorus and soil and crop residues management practices on maize (Zea mays L.) yield in ultisol of eastern Cameroon. Fertilizer research 14, 135–142. doi:10.1007/BF01066606

Vogel, H., 1993. Tillage effects on maize yield, rooting depth and soil water content on sandy soils in Zimbabwe. Field Crops Research 33, 367–384. doi:10.1016/0378-4290(93)90159-K

Waliser, D.E., Moncrieff, M., 2011. The "Year" of Tropical Convection (May 2008 to April 2010): Climate Variability and Weather Highlights. American Meteorological Society 1189–1218.

Wilhelm, L., Ravelomanantsoa, O., 2006. Première approche de la problématique famille/genre/jeunes ruraux pour appréhender le devenir des agricultures familiales autour du Lac Alaotra.

Woyessa, Y.E., Bennie, A.T.P., 2004. Factors affecting runoff and soil loss under simulated rainfall on a sandy Bainsvlei Amalia soil. South African Journal of Plant and Soil 21, 203–208. doi:10.1080/02571862.2004.10635050

Xiong, W., van der Velde, M., Holman, I.P., Balkovic, J., Lin, E., Skalský, R., Porter, C., Jones, J., Khabarov, N., Obersteiner, M., 2014. Can climate-smart agriculture reverse the recent slowing of rice yield growth in China? Agriculture, Ecosystems & Environment 196, 125–136. doi:10.1016/j.agee.2014.06.014

Annexes

Table 15: Conservation agriculture & soil carbon content

List of the 27 peer-reviewed articles measuring the impact of conservation agriculture on soil carbon content as compared to conventional agriculture (CV) in sub-Saharan Africa

Ref.	Location	Duration (years)	Soil texture	Cropping system	Tillage	Soil cover	Conservation agriculture			Depth (cm)	Soil C under CV	Units	C gain (g kg^{-1} or %)
							P1	P2	P3				
1	Kenya	6	Clay	S/M	CV; MT	RRm; RRt	**X**	**X**		0-15 15-30	20.4 18.5	mg g^{-1}	NS NS
2	Zimbabwe	4	Clay loam	M/Cp/Sg	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	0-20	~8	g kg^{-1}	2
3	Zambia; Zimbabwe	4; 5	Clay loam	M; x/M; x/y/M	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	0-10 0-30 0-10 0-30	~9 ~24 ~7 ~17	Mg ha^{-1}	+33% +38% +43% +53%
4	Ethiopia	7	Sandy loam Clay loam Clay	W/Gp/W/H/Gp/W	CV; NT	Stubble	**X**	**X**	**X**	0-5 0-5 0-5	0.89 1.35 1.41	%	0.3 5.2 0.2
5	Malawi	2 to 5		M	CV; NT	RI; RRt	**X**	**X**		0-20	5.93	g kg^{-1}	4.47
6	South Africa	8	Sandy loam	W; W/L/W/Cn	CV; MT; NT		**X**		**X**	0-15 15-30 30-45	0.43 0.45 0.45	%	5.4 3.4 3.4
7	South Africa	32	Loam	W; O	CV; NT	B; uB	**X**	**X**		0-5 5-10 10-15 15-25 25-35 35-45	~0.66 ~0.64 ~0.65 ~0.66 ~0.63 ~0.60	%	0.75 NS NS -0.63 NS 0.90
8	Zimbabwe	5	Sandy	M/S ; M/Cp	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	0-10 10-20 20-30 30-60 0-60 0-10 10-20 20-30 0-30	3.2 2.5 1.7 3.8 11.2 7.1 6.7 4.6 18.4	Mg ha^{-1}	+41% +28% NS NS +31% +39% +43% NS +34%
9	Zimbabwe	5; 6	Sandy	M/S ; M/Cp	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	0-20 0-20 0-10 10-20 20-30 0-30	6.9 37.5 7.0 6.7 4.6 18.7	Mg ha^{-1}	2.42 2.42 NS NS NS 0.83
10	Benin	3	Sandy loam	R/NF; R/St	CV; NT	SB	**X**		**X**	0-15	9.0	g kg^{-1}	NS
11	Zambia	4	Sandy loam	M; M/Ct; M/Ct/Sh	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	0-10 0-30	0.56 0.54	%	2.1 1.4
12	Madagascar	5	Clay	R/M; R/S	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		0-10 10-20 20-30	4.04 3.96 3.23	g $100g^{-1}$	NS NS NS
13	Zimbabwe	6	Sandy loam	W/Ct	CV; MT; NT	RI; pRRT; RRt	**X**	**X**		0-15 15-30 30-45 45-60	2.9 3.1 2.9 3.1	g kg^{-1}	2.9 2.2 NS NS
14	Madagascar	12	Clay	S/M	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		0-20	47.4	Mg ha^{-1}	+16%

Table 15: Conservation agriculture & soil carbon content

List of the 27 peer-reviewed articles measuring the impact of conservation agriculture on soil carbon content as compared to conventional agriculture (CV) in sub-Saharan Africa

Ref.	Location	Duration (years)	Soil texture	Cropping system	Tillage	Soil cover	Conservation agriculture			Depth (cm)	Soil C under CV	Units	C gain (g kg^{-1} or %)
							P1	P2	P3				
15	Nigeria	2	Sandy loam	Cy	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		0-20	1.37	g kg^{-1}	0.27
16	Burkina Faso	2	Loam	Sg	CV; NT	RRt	**X**			0-10		g kg^{-1}	-1.7
17	Zimbabwe	10	Sandy clay loam	M; NF/M; IF/M	CV; NT	RRm	**X**			0-5 5-10 10-20	5.9 6.0 5.9	g kg^{-1}	3.2 2.9 3.0
18	Zimbabwe	1	Clay; Sandy	M	CV; MT	RRm; RRt	**X**	**X**		0-30 0-30	14.9 4.2	mg g^{-1}	5.5 NS
19	Nigeria	2	Clay loam	M	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		0-5 0-5	3.4 3.1	mg g^{-1}	2.1 1.9
20	Benin	12	Sandy loam	M; M/Mc	CV; NT	RRt	**X**	**X**	**X**	0-10 10-20 20-30 30-40 50-60	5.3 4.0 3.5 3.2 2.4	g kg^{-1}	6.2 3.3 0.9 1.0 0.9
21	Nigeria	3	Sandy clay loam	Cp/M	CV; MT; NT		**X**		**X**	0-15	0.99	g kg^{-1}	0.24
22	Nigeria	15	Sandy loam	IF; M; M/C		RRm; RRt	**X**	**X**		0-10 10-20	7.9 7.0	g kg^{-1}	NS NS
23	Nigeria	3	Sandy clay loam	C	CV; MT; NT		**X**			0-20	1.64	%	2.3
24	South Africa	11	Sandy loam	W; Lg/W	CV; MT; NT	B; G	**X**		**X**	0-10	1.07	%	9.5
25	Nigeria	2	Sandy loam	M; Pp/M	CV; MT; NT		**X**		**X**	0-20	1.0	%	2.8
26	Nigeria	5	Loamy	R	CV; NT	RRt	**X**			0-20	1.0	%	NS
27	Nigeria	3	Sandy clay	IF/M; C; Cp; Pp; S	CV; NT		**X**	**X**		0-10 10-20	1.05 0.30	%	10.5 9.0

Ref.: 1: (Paul et al., 2013); 2: (Mupangwa et al., 2013); 3: (Thierfelder et al., 2013a); 4: (Lanckriet et al., 2012); 5: (Ngwira et al., 2012b); 6: (Agenbag, 2012); 7: (Loke et al., 2012); 8: (Thierfelder et al., 2012); 9: (Thierfelder and Wall, 2012); 10: (Saito et al., 2010); 11: (Thierfelder and Wall, 2010); 12: (Chapuis-Lardy et al., 2009); 13: (Gwenzi et al., 2009); 14: (Razafimbelo et al., 2008); 15: (Agbede, 2008); 16: (E Ouédraogo et al., 2007); 17: (Nyamadzawo et al., 2007); 18: (Chivenge et al., 2007); 19: (Agele et al., 2005); 20: (Barthès et al., 2004); 21: (Ojeniyi and Adekayode, 1999); 22: (Anthony et al., 1996); 23: (Ohiri and Ezumah, 1990); 24: (Agenbag and Maree, 1989); 25: (Hulugalle and Lal, 1986); 26: (Lal, 1986a); 27: (Lal et al., 1978).

Cropping systems: /: crop succession; C: Cassava; Cn: Canola; Cp: Cowpea; Ct: Cotton; Cy: Cocoyam; Gn: Groundnut; Gp: grasspea; H: Hanfets; IF: Improved fallow; L: Lupins; Lg: Legume; M: Maize; Mc: Mucuna; NF: Natural fallow; O: Oats; Pp: Pigeonpea; Ps: Pasture; R: rice; S: Soybean; Sg: Sorghum; Sh: Sunnhemp; St: Stylosanthes; W: Wheat; x and y: other crops.

Tillage: CV: Conventional tillage; MT: Minimum tillage; NT: No-tillage.

Soil cover: B: Burned residue; G: Grazing; pRRt: Partial residue retention; RI: Residue incorporation; RRm: Residue removal; RRt: Residue retention; SB: Slashed and burned residue; uB: Unburned residue.

Conservation agriculture: P1: Minimal soil disturbance; P2: Permanent soil cover; P3: crop rotations with legumes.

Soil C under CV: ~:graph estimates.

C gain (in favor of CA): Value are given in % when conversion is impossible; NS: Non-significant difference.

Table 16: Conservation agriculture & rainfall

List of the 29 peer-reviewed articles measuring the impact of conservation agriculture on yield as compared to conventional agriculture (CV) in sub-Saharan Africa

Ref.	Location	Duration (Years)	Soil texture	Cropping system	Tillage	Soil cover	Conservation agriculture			Fertilization	Rainfall (mm)	Yield under CV	Yield gain
							P1	P2	P3			(t ha-1)	(t ha-1)
1	Nigeria	3	Sandy loam	Sg	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		No	375	0.57	0.18
												0.53	0.16
											866	1.55	NS
												1.48	NS
											410	1.36	0.21
												1.28	0.2
										Manure	375	0.69	0.25
												0.62	0.25
											866	2.13	NS
												2.11	NS
											410	2.21	NS
												1.99	NS
2	Nigeria	4	Sandy loam	M	CV; MT; NT		**X**			Mineral	1250	3.00	-1.29
											950	2.98	-1.96
											960	2.97	-1.97
											1500	2.90	-1.98
3	Nigeria	5	Loamy sand	M	CV; NT	RRt; RI	**X**	**X**		No	1067	2.43	-1.9
											567	3.61	NS
											1200	5.62	-3.84
											1033	4.35	-3.7
											1000	3.63	-3.14
4	Ethiopia	3	Clay	W; T	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Mineral	~350	~1.5	NS
											~500	~1.1	-0.5
											~450	~1.6	1.1
5	Ethiopia	6	Clay	W/Gp/W/Hf/Gp/W	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	Mineral	455	2.8	NS
											412	2.9	-0.8
											313	2.9	NS
											428	1.9	NS
											343	2	NS
											402	4	1.2
6	Zimbabwe	3	Sandy clay loam Sandy loam Loam sand	Ct/Sg/Lg	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	No	845	0.57	NS
												1.5	NS
											850	0.72	NS
												1.04	NS
												1.03	NS
											600	0.82	-0.09
												1.45	-0.23
												0.69	0.07

Table 16: Conservation agriculture & rainfall

List of the 29 peer-reviewed articles measuring the impact of conservation agriculture on yield as compared to conventional agriculture (CV) in sub-Saharan Africa

Ref.	Location	Duration (Years)	Soil texture	Cropping system	Tillage	Soil cover	Conservation agriculture			Fertilization	Rainfall (mm)	Yield under CV	Yield gain
							P1	P2	P3			(t ha-1)	(t ha-1)
7	Tanzania	3	Sandy loam	M/Lg	CV; MT		**X**	**X**	**X**	No	165	0.32	NS
											326	2.58	NS
											163	2.08	NS
											549	0.39	NS
											244	0.51	NS
										Manure	165	0.26	NS
											326	2.3	NS
											163	2.39	0.54
											549	0.49	NS
											244	0.74	NS
8	Ethiopia	6	Clay	W/M/T	CV; MT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	No	541	1.21	NS
											767	1.79	NS
											908	1.14	NS
											1051	2.19	NS
											702	0.27	NS
9	Zambia	3	Clay	W	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Mineral	923	1.77	0.74
											1275	1.32	NS
											1364	0.77	NS
10	Zambia	2	Clay	M	CV; MT	RRt; RI; RRm	**X**	**X**		Mineral	1009	6.79	NS
												8.09	NS
											687	1.69	NS
												1.65	0.68
11	Zanzibar	2	Sandy clay loam	M; Cp; S	CV; NT	P; RRt	**X**	**X**		Mineral	800	2.83	-0.49
												0.55	0.51
												0.64	-0.2
											400	1.48	NS
												0.77	NS
												0.79	NS
12	Kenya	3	Sandy clay loam	M	CV; NT; MT	RRm; RRt	**X**	**X**		Manure	245	1.3	NS
											285	1.36	NS
											825	2.12	NS
											374	1.73	NS
										Mineral	245	1.87	NS
											285	1.68	NS
											825	3.4	NS
											374	1.74	NS
13	Nigeria	4	Sand	M	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Mineral	~950	2.6	NS
											~400	1.8	NS
											~700	3.4	NS
											~380	0.7	NS
											~600	3.8	0.8
											~200	0.9	NS
											~610	3.8	NS
											~220	2.1	-1.6

Table 16: Conservation agriculture & rainfall

List of the 29 peer-reviewed articles measuring the impact of conservation agriculture on yield as compared to conventional agriculture (CV) in sub-Saharan Africa

Ref.	Location	Duration (Years)	Soil texture	Cropping system	Tillage	Soil cover	Conservation agriculture			Fertilization	Rainfall (mm)	Yield under CV	Yield gain
							P1	P2	P3			(t ha-1)	(t ha-1)
14	Nigeria	9	Sand	M	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Mineral	604	1	0.56
											637	1.3	2.96
											615	2.9	0.53
											581	3.14	NS
											682	4.11	1
											936	2.11	0.78
											714	2.35	-0.3
											724	0.81	0.34
											586	0.33	0.26
											845	0.58	0.92
											432	0.27	0.21
											224	0.43	0.3
											231	0.92	NS
											481	2.14	0.53
											736	0.65	0.42
											379	0.23	0.42
15	Malawi	3	Sandy clay loam	M	MT; NT		**X**			Mineral	1084	5.07	NS
											839	4.59	NS
											647	4.77	-0.54
16	Ethiopia	1	Silty clay loam	Sg	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Mineral	580	2.4	1.47
17	Zimbabwe	2	Clay; sand	Cp/M	CV; MT; NT	RRt; RI	**X**	**X**	**X**	Manure	290	2.62	NS
											910	2.72	NS
											280	0.2	NS
											790	1.26	NS
18	Zimbabwe	4	Clay loam	M; Cp; Sg	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	Mineral	465	0.68	1.45
											364	1.5	-0.58
											832	1.29	NS
											465	0.16	0.33
											465	2.01	NS
											364	1.5	2.17
19	Malawi	4	Loamy sand	M; M/Lg	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	Mineral	~680	4.19	NS
											~580	2.83	1.47
											~590	3.52	1.25
											~710	2.88	1.51
											~410	3.82	NS
											~550	3.42	NS
20	Nigeria	2	Sandy loam	Sg	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Manure	855	1.14	NS
											1051	0.7	NS
21	Nigeria	5	Sandy loam	M	CV; NT;	RRm; RRt	**X**	**X**		Mineral	607	3.12	-0.48
											686	5.24	NS
											1211	5.53	0.42
											264	0.71	0.51
											258	2.51	0.21
											330	2.9	-1.05

Table 16: Conservation agriculture & rainfall

List of the 29 peer-reviewed articles measuring the impact of conservation agriculture on yield as compared to conventional agriculture (CV) in sub-Saharan Africa

Ref.	Location	Duration (Years)	Soil texture	Cropping system	Tillage	Soil cover	Conservation agriculture			Fertilization	Rainfall (mm)	Yield under CV	Yield gain
							P1	P2	P3			(t ha-1)	(t ha-1)
22	Kenya	6	Clay	S/M	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Mineral	625	6.3	NS
											988	4	NS
											713	3.5	NS
											641	4.5	NS
											301	0.4	NS
											846	1.7	NS
											595	1	NS
											522	0.6	NS
23	Benin	3	Sandy loam	M; M/Mc	CV; NT	SB	**X**		**X**	Mineral	1395	2.5	-0.7
24	Tanzania	2	Loamy sand	Sg	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Manure	920	1.44	NS
											660	1.17	1.16
25	Mali	2	Sandy silt	Ct/Sg	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Mineral	1230	2.25	NS
											1323	2.12	NS
26	Zimbabwe	5;6	Sandy	M/S; M/Cp	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**	**X**	Mineral	393	0.12	NS
											870	1.13	0.52
											412	1.57	0.86
											1377	1.1	NS
											382	1.49	1.22
											561	0.45	0.28
											557	3.51	NS
											664	5.44	NS
											1033	5.68	1.34
											938	4.88	NS
											815	4.97	NS
											772	2.55	NS
											1096	3.29	NS
											534	4.38	NS
											1060	1.17	NS
											734	1.76	NS
											617	1.17	NS
27	Ethiopia	2	Clay	T	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Mineral	670	0.47	NS
											763	1.27	-0.38
											670	1.42	NS
											763	1.56	NS
28	Cameroon	2	Loamy sand	M	CV; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		No	1390	1.25	NS
												1.65	NS
											1490	1.03	NS
												1.18	NS
										Mineral	1390	2.11	-0.55
												2.83	-0.24
												3.91	-1.15
												2.44	NS
											1490	2.28	-0.56
												2.38	NS
												3.01	-0.08
												2.49	NS

Table 16: Conservation agriculture & rainfall

List of the 29 peer-reviewed articles measuring the impact of conservation agriculture on yield as compared to conventional agriculture (CV) in sub-Saharan Africa

Ref.	Location	Duration (Years)	Soil texture	Cropping system	Tillage	Soil cover	Conservation agriculture			Fertilization	Rainfall (mm)	Yield under CV	Yield gain
							P1	P2	P3			(t ha-1)	(t ha-1)
29	Zimbabwe	3	Sand	M	CV; MT; NT	RRm; RRt	**X**	**X**		Mineral	905	3.82	1.21
											1180	2.76	1.81
											739	3.06	1.5
											415	2.05	NS
											742	6.49	-1.08
											343	1.72	-0.79

Ref : 1: (Agbede and Ojeniyi, 2009); 2: (Agboola, 1981); 3: (Anazodo et al., 1991); 4: (Araya et al., 2011); 5: (Araya et al., 2012); 6: (Baudron et al., 2012b); 7: (Enfors et al., 2011); 8: (Erkossa et al., 2006); 9: (Gill and Aulakh, 1990); 10: (Gill et al., 1992); 11: (Khatibu et al., 1984); 12: (Kihara et al., 2011); 13: (Lal, 1986b); 14: (Lal, 1995); 15: (Materechera and Mloza-Banda, 1997); 16: (Mesfine et al., 2005); 17: (Mupangwa et al., 2007); 18: (Mupangwa et al., 2012); 19: (Ngwira et al., 2012a); 20: (Obalum et al., 2011); 21: (Osuji, 1984); 22: (Paul et al., 2013); 23: (Saito et al., 2010); 24: (Shemdoe et al., 2009); 25: (Sissoko et al., 2013); 26: (Thierfelder and Wall, 2012); 27: (Tulema et al., 2008); 28: (Van Nguyen, 1987); 29 : (Vogel, 1993).

Cropping systems: /: crop succession; Cp: Cowpea; Ct: Cotton; Gp: grasspea; H: Hanfets; Lg: Legume; M: Maize; Mc: Mucuna; S: Soybean; Sg: Sorghum; T: Tef; W: Wheat.

Tillage: CV: Conventional tillage; MT: Minimum tillage; NT: No-tillage.

Soil cover: P: Polythene; RI: Residue incorporation; RRm: Residue removal; RRt: Residue retention; SB: Slashed and burned residue.

Conservation agriculture: P1: Minimal soil disturbance; P2: Permanent soil cover; P3: crop rotations with legumes.

Rainfall and Yield under CV: ~:graph estimates.

Yield gain (in favor of CA): NS: Non-significant difference.

Annexe 1 : Les unités morpho-pédologiques de la région Alaotra

En 1984, Raunet établit une classification des unités morpho-pédologiques de l'Alaotra. Son étude met en évidence une répartition des unités depuis la périphérie vers le centre de la cuvette. On distingue alors différents types de sols selon leurs spécificités pédologiques et leurs régimes hydriques propres :

→Les sols ferralitiques de *tanety :* Dans les collines périphériques, on rencontre un éventail de sols allant de sols moyennement différenciés ferralitiques à très différenciés lessivés. La fertilité et la stabilité dépend de la nature de la roche mère (essentiellement cristallines métamorphiques), on distingue :

- ✓ *les sols sur roches acides* (gneiss, granites et migmatites) : ils occupent la région Ouest de la cuvette. La rareté de la végétation au sommet de ces *tanety* explique un horizon organique O particulièrement mince. Dans le meilleur des cas, il atteint les 3 ou 4 cm, le plus souvent, l'érosion a totalement arraché cet horizon superficiel. Se développe alors en surface une couche de matériaux colmatée (sorte de cuirasse), de structure lamellaire qui constitue un véritable obstacle à la pénétration verticale de l'eau et au développement de systèmes radiculaires. Cette « croûte », colonisée par endroit par des lichens, facilite la circulation latérale des eaux de pluies qui ruissellent le long des pentes, accélérant ainsi les processus d'érosion.

  Pour le cas des sols moyennement différenciés, l'horizon inférieur, de structure grumeleuse, est un horizon d'altération S, plus précisément Sk, caractérisé par la présence de l'association Fer – Kaolinite. Cet horizon, de couleur rouge, est relativement riche en hématites (oxydes de fer Fe2O3) ce qui témoigne d'un régime hydrique très contrasté (alternance de forte humidité et de sècheresse accentuée).

  Pour les sols très différenciés lessivés, les particules d'argiles et les hydroxydes (fer et aluminium) ont migré vers le bas du profil. Cette migration génère un horizon E appauvrit en argiles au profit d'un horizon inférieur B enrichi en argiles. La présence d'ions monovalents (H+, Na+) sur le complexe absorbant facilite la dispersion et donc la migration des particules, c'est le cas des milieux les plus acides. Par endroit, l'hydrolyse et la lixiviation des éléments est telle que l'on trouve, insérés dans les limons et les sables du l'horizon E, des quartzs (produits résiduels initialement contenus dans les roches et ayant résisté à la dissolution). L'horizon E peut prendre des couleurs variables : il est rosâtre si le milieu est bien drainé (reçoit beaucoup d'eau mais s'assèche vite), brun ou jaune si l'horizon est moyennement bien drainé.

  Ces sols acides sont parmi les plus pauvres du lac, ils sont extrêmement fragiles d'un point de vue structural (l'érosion en *lavaka* y prédomine). Dans certaines zones particulièrement lessivées, ils atteignent le stade de podzolisation.

- ✓ *les sols sur roches basiques* (amphibolites, gabbros, gneiss à amphiboles) : ils se trouvent plutôt à l'Est et au Sud de la cuvette. L'érosion par ravinement est plus fréquente que celle en *lavaka*. Ces sols de couleur rouge sont plus argileux et globalement mieux structurés que ceux rencontrés à l'Ouest. Ils ne dépassent que très rarement le stade moyennement différencié. Leur pH neutre ou légèrement basique les rend plus fertiles que les sols acides très lessivés des *tanety* de l'Ouest.

Que l'on soit à l'Ouest ou à l'Est, il est fréquent de trouver au bas du profil (souvent au fond de micro cuvettes) des traces d'hydromorphisme au sein d'horizons particulièrement mal drainés (traces repérables à leur couleur grises tachetée de rouille).

→Les sols de bas de pente : ils correspondent à la zone de piémont des *tanety*. Ces sols minéraux (majoritairement argilo sableux) sont composés de matériaux issus du fluage des altérites des collines alentours. Leur fertilité est faible du fait de leur pH acide (4,5 à 5), d'une capacité d'échange faible et d'une capacité de rétention d'eau voisine de 3%.

→Les sols de plaines : commence ici une grande zone de rizières (beaucoup plus étendue à l'Ouest qu'à l'Est). Les sols se présentent de l'amont vers l'aval en :

- ✓ *sols hydromorphes minéraux* : ce sont des sols très argileux, contenant par endroit des strates de sable pur à faible profondeur (gênant pour la riziculture). Ils représentent cependant 25% de l'ensemble des rizières cultivées dans la région (soit environ 10% de la plaine). Leur pH se situe entre 5 et 6 et leur capacité de rétention d'eau dépasse les 10%. Malgré une faible porosité, ces sols présentent une structure correcte et sont donc globalement plus fertiles que les sols de bas de pente.
- ✓ *sols hydromorphes moyennement organiques* : plus en aval, se trouve des sols hydromorphes contenant 6 à 15% de matière organique. Ils offrent de meilleurs potentiels agronomiques que les sols hydromorphes minéraux mais la présence de strates sableuses y est plus fréquente. Ces sols concernent 7% de la superficie de la plaine et près de 20% des rizières.
- ✓ *sols hydromorphes à tourbe résiduelle* : situés dans le prolongement aval des sols précédemment décrits, ces sols présentent un horizon supérieur tourbeux contenant plus de 15% de matière organique. Ils sont le résultat de la récupération (par brûlage et drainage) d'anciennes tourbes flottantes pour la riziculture. Cette zone s'étend sur une vaste surface et représente 35% des rizières (soit 15% de la plaine).
- ✓ *zone de marécage* : il s'agit d'un marais à Cypéracées couvrant 50% de la cuvette. Dans cette zone, l'accumulation de débris issus de la végétation dense de papyrus a généré une épaisse tourbe flottante. Sur le premier mètre sous la surface, se trouve des débris brun-

rougeâtre (racines et tiges vivantes et mortes). Sur les 100 cm inférieurs se concentrent des débris végétaux morts et fibreux. Cette tourbe mêlée à l'eau repose sur un substrat alluvial se décomposant en une couche supérieure organominérale grise et une couche inférieure plus claire, totalement minérale.

- ✓ Enfin, dans la partie centrale de la plaine se trouvent **les eaux libres du lac.** Celles-ci recouvrant moins de 15% de la surface totale de la plaine.

→**Les sols alluviaux (*baiboho*)** : comme le précise Raunet, ce type de sols ne répond pas à une zonalité comme précédemment décrite mais recoupe transversalement et indifféremment les différentes unités de milieu. Les *baiboho* sont des cônes d'épandage d'alluvions fluviatiles. Ils coïncident avec l'exutoire aval des bassins versants et recueillent par conséquent les résidus de roches pourries évacués par les *lavaka*. Ces alluvions contiennent de minuscules particules brillantes de micas (résultats de la pourriture des roches). Ces sols ne sont pas homogènes d'un point de vue granulométriques et s'ordonnent dans l'espace selon le tri suivant : sableux en amont, ils deviennent progressivement à dominance limoneuse, puis argileuse en aval. Ainsi, si les propriétés chimiques sont relativement comparables d'un *baiboho* à un autre, les caractéristiques physiques de ces sols riches permettent de les différencier et offrent une grande diversité :

- ✓ **Les *baiboho* à dominante sableuse** (de structure continue) se trouvent souvent dans les zones à proximité des cours d'eau (l'érosion des bassins versants charge les rivières en sables qui se déposent sur les terrains plats en aval). Les *baiboho* constitués d'un mélange de sables, limons et argiles (en proportion variables) présentent une structure fragmentaire à agrégats nettement anguleux. Ces agrégats peuvent être de tailles très variables (allant de quelques millimètres à plusieurs centimètres). Leur structure anguleuse laisse imaginer la présence d'argiles gonflantes.
- ✓ **Les *baiboho* les plus argileux** sont souvent les plus humides et sont riches en micas. Ils se rencontrent en général dans les zones les plus basses d'un point de vue topographique. En saison humide, ces sols forment des agrégats à faces lisses (structures vertiques) très compacts. Dès que le sol s'assèche, des écailles séparées de profondes fissures (plus de 10 cm) apparaissent, il est alors possible de voir une structure en feuillets. Cette alternance entre structure extrêmement compacte et écailles de dessiccation témoigne de la présence d'argiles gonflantes (smectites et en particulier montmorillonites).
- ✓ **Les *baiboho* de fond des vallées**, situés dans les cuvettes entre deux *tanety*, se distinguent des précédents par leur richesse en matière organique (provenant des nombreux arbres fruitiers poussant dans ces zones). Cette matière organique est à l'origine de leur couleur

nettement plus sombre que les autres *baiboho* : certains sont complètement noirs alors que les sols précédemment décrits sont de couleur rosâtre, (comparable la couleur de la poudre de cacao). Leur structure est de type arrondie grenue, c'est le résultat de la floculation et de la fissuration des argiles (mécanisme lié à la présence de matière organique et de cations bivalents Ca++ et Mg++ sur le complexe absorbant). Ces sols constituent des milieux particulièrement accueillent pour les racines : ils sont à la fois poreux, friables et stables (les agrégats résistent à la destruction par l'eau).

Quel que soit le type de *baiboho*, leur couleur et leur structure reste homogène le long du profil, il est quasiment impossible de distinguer des horizons. La seule variation repérable est liée à un gradient d'humidité : la surface étant logiquement plus sèche que le bas du profil proche de la nappe. Une microporosité développée permet à l'eau de remonter par capillarité. Leur pH neutre, ainsi que leur richesse en matière organique les rend chimiquement très fertiles. Leur principal inconvénient tient à l'apparition par endroit de couches purement sableuses, difficile à prévoir et à localiser. Situées entre la surface et la nappe (c'est-à-dire à moins de 2 m de profondeur), ces couches font barrière aux circulations d'eau par capillarité. Malgré cette difficulté, les *baiboho* restent les meilleurs sols de la région d'un point de vue physico-chimique et hydrique.