UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

MONTPELLIER SUPAGRO

Ecoles doctorales	Institutions d'accueil	Encadrement

ÉTUDE DES FONCTIONS AGRO-ECOLOGIQUES DES PRINCIPES DE L'AGRICULTURE DE CONSERVATION DANS L'AMÉLIORATION DE LA PRODUCTION DU RIZ PLUVIAL DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA (MADAGASCAR)

Thèse en cotutelle

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Présentée par **LALAINA RANAIVOSON**

Directeurs de thèse : **Marc CORBEELS** et **Lilia RABEHARISOA**

Co-encadrant : **Krishna NAUDIN**

Soutenue le 13 décembre 2017 devant le jury composé de :

Tantely RAZAFIMBELO	Professeur titulaire Université d'Antanarivo	Rapporteur ***Président de jury***
Marie-Hélène JEUFFROY	Directeur de recherche INRA	Rapporteur
Harilala ANDRIAMANIRAKA	Enseignant-chercheur Université d'Antananarivo	Examinateur
Florian CELETTE	Enseignant-chercheur ISARA	Examinateur
Krishna NAUDIN	Chercheur CIRAD	Co-encadrant
Lilia RABEHARISOA	Professeur titulaire Université d'Antananarivo	Directeur de thèse
Marc CORBEELS	Chercheur CIRAD	Directeur de thèse

UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

MONTPELLIER SUPAGRO

Ecoles doctorales	Institutions d'accueil	Encadrement

FIKAROHANA MOMBAN'NY VOKATRY NY VOLY MITANDRO NY TONTOLO IAINANA EO AMIN'NY FANATSARANA NY VOKA-BARY AN-TANETY ANY AMIN'NY FARITRA ALAOTRA

(MADAGASIKARA)

ÉTUDE DES FONCTIONS AGRO-ECOLOGIQUES DES PRINCIPES DE L'AGRICULTURE DE CONSERVATION DANS L'AMÉLIORATION DE LA PRODUCTION DU RIZ PLUVIAL DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA (MADAGASCAR)

STUDY ON AGROECOLOGICAL FUNCTIONS OF CONSERVATION AGRICULTURE PRINCIPLES ON RAINFED RICE PRODUCTION IN THE LAKE ALAOTRA REGION (MADAGASCAR)

Thèse en cotutelle

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Présentée par **LALAINA RANAIVOSON**

Tantely RAZAFIMBELO	Professeur titulaire, Université d'Antanarivo	Rapporteur ***Président de jury***
Marie-Hélène JEUFFROY	Directeur de recherche, INRA	Rapporteur
Harilala ANDRIAMANIRAKA	Enseignant-chercheur, Université d'Antananarivo	Examinateur
Florian CELETTE	Enseignant-chercheur, ISARA	Examinateur
Krishna NAUDIN	Chercheur, CIRAD	Co-encadrant
Lilia RABEHARISOA	Professeur titulaire, Université d'Antananarivo	Directeur de thèse
Marc CORBEELS	Chercheur, CIRAD	Directeur de thèse

Remerciements

La thèse a été réalisée dans le cadre du projet ABACO (Agroecology-Based Aggradation Conservation agriculture) à Madagascar financé par l'Union Européenne dont je tiens à remercier. J'exprime également mes sincères remerciements à Eric Scopel du CIRAD et Jacqueline Rakotoarisoa du FOFIFA de m'avoir proposé de faire une thèse après mon embauche en 2013 et de m'avoir toujours soutenu durant les années de thèse.

Je remercie le CIRAD par les actions incitatives – soutien aux doctorants, le projet CARIM (Conservation Agriculture in Rice Cropping Systems in Madagascar) financé par Agropolis fondation et la bourse RSM (Robert S. McNamara Fellowships Program) de la Banque mondiale qui ont financés mes séjours à Montpellier durant la thèse.

Je remercie les membres du Jury de cette thèse :

- Mes directeurs de thèse : Lilia Rabeharisoa et Marc Corbeels, ainsi que mon co-encadrant Krishna Naudin
- Tantely Razafimbelo et Marie-Hélène Jeuffroy d'avoir acceptés d'être mes rapporteurs de thèse
- Harilala Andriamaniraka et Florian Celette, d'avoir accepté d'examiner ma thèse

Je remercie en particulier Marc Corbeels, Krishna Naudin et Aude Ripoche pour l'encadrement et le suivi de la thèse. Merci pour vos disponibilités et vos conseils. Ce fût un réel plaisir de travailler avec vous, vos compétences en matière d'encadrement et vos niveaux de connaissance en agronomie (et bien d'autres domaines) m'impressionneront toujours.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse, de l'élaboration du projet de thèse jusqu'au traitement et analyse des résultats. Je tenais à remercier plus particulièrement :

- François Affholder pour son appui sur la partie modélisation.
- Guillaume Bruelle pour ses conseils et son aide dans mes travaux de recherche et dans mes démarches administratives
- Les assistantes de l'UPR AIDA et surtout Anne-Laure et Brigitte pour leurs aides et accueil lors de mes séjours à Montpellier
- Philippe Letourmy, Eric Goze, Diarétou et Romain pour les appuis en statistiques
- Pascal Marnotte pour les discussions enrichissantes sur les adventices
- Sandrine et Guillaume pour leurs appuis sur la gestion des bases de données
- Julie Dusserre pour les biblio sur la physiologie végétale
- Les stagiaires en M2 de la mention AT2D de l'ESSA qui ont réalisé leurs mémoire de fin d'étude dans le cadre de la thèse : Antonio, Fidy et Sedera de la promotion HINA

et Sandratra, Ella et Mirana de la promotion KINGATSA. Merci de m'avoir fait découvrir les joies de l'encadrement et partagé de bon moment sur le terrain
- Monique Rakotomalala, technicienne du CRR-ME FOFIFA et les mains d'œuvre qui ont contribué à la mise en place et les travaux de collecte de données sur les dispositifs expérimentaux
- Elena Kazakou et Christian Gary d'avoir accepté de faire partie du comité de suivi de la thèse depuis la première jusqu'à la dernière année. Merci pour vos conseils.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont partagé avec moi ces années de thèse. En particulier :

- Les collègues du FOFIFA/SPAD : Mamy Hanitra, Jean François, Hary, Bodo et Richard
- Les doctorantes du DP SPAD : Laingo, Tatiana, Tahiry, Fanja, Narindra, …
- Les chefs de centre du CRR-ME FOFIFA qui se sont succédé durant mes trois années au Lac Alaotra : Tilahizara et Charlotte Razafindrakoto.
- Les étudiants qui ont partagé le même bureau au cirad durant mes séjours à Montpellier : Léo, Amadou, Lila, Dian, Boris, Adama, Maryam, Francesco, …
- Et les belles rencontres à Montpellier : Manjaka Bozy, Faniry, Ignace, Aina Fhzr

Je remercie toute ma famille pour leur soutien, leur encouragement et leur prière.

Je remercie enfin Antonio pour son soutien, sa patience et sa compréhension. C'est à lui et à mes parents que je dédie ce travail.

Merci à tous,
Lalaina

FINTINA

Ny voly rakotra (VR) dia voafaritra toy ny fampihenana ny fiasana ny tany, ny fandrakofana ny tany mandritra ny voly ary ny fifandimbiasam-boly. Nampidirina taty amin'ny faritra Alaotra, Madagasikara, izy io entina hanatsarana ny tambim-bokatra azo avy amin'ny voly an-tanety izay matetika misedra olana eo amin'ny faharatsian'ny tsiron-tany, ny tsy fahampian'ny rano ary ny firongatry ny ahi-dratsy. Ny tanjona fototr'ity fikarohana ity dia ny ijerena ny fiaintraikan'ny asan'ny VR eo amin'ny fanatsarana ny voka-bary an-tanety mihoatra amin'ny voly mahazatra (VM). Araka izany dia nijery ny zava-misy voarakitry ny lahatsoratra eo amin'ny vokatra entin'ny fandrakofana ny tany arakarakin'ny lanjan'ny rakotra avela eo amin'ny tany no natao voalohany. Izany no nahitana fa ny lanjan'ny rakotra ilaina dia miankina indrindra amin'izay vokatra endrasana aminy. Rakotra milanja 2 ka hatramin'ny 3 t ha^{-1} dia efa ahazoana vokatra mazava eo amin'ny fanatsarana ny fanindronan'ny rano, fiarovana amin'ny riaka sy ny fahalasan'ny tany. Amin'ny lafiny iray anefa, ny fiarovana amin'ny firongatry ny ahi-dratsy, ny fanatsarana ny tsiron-tany na ny bibikely ao anatin'ny tany dia nahitana fahasamihafana maro teo amin'ny tahirin-kevitra hita teo amin'ny lahatsoratra, izay midika fifandraisan'ireo vokatra ireo amin'ny zavatra hafa, indrindra ny karazana rakotra ampiasaina sy ny toe-tany ary ny toe-trandro. Ankoatr'izay dia nanaraka fanandramana roa izay natao tao amin'ny toera-pikarohan'ny FOFIFA tany amin'ny faritra Alaotra ihany koa entina hanatratrarana ny tanjona. Ny fanadramana voalohany izay natao ijerena ny vokatrin'ny fisian'ny rakotra eo amin'ny fiarovana amin'ny ahi-dratsy, izay nampiasana rakotra milanja 0 ka hatramin'ny 45 t ha^{-1} dia nahitana fa ny firongatry ny ahi-dratsy amin'ny ankapobeany dia mihena arakarakin'ny ampitomboina ny lanjan'ny rakotra eo amin'ny tany. Na izany aza dia mila lanja ambony, eo ho eo amin'ny 10 t ha^{-1} raha ny teo amin'ny andrana, vao ahitana vokatra manan-danja amin'ny fanenana ny firongatry ny ahi-dratsy raha oharina amin'ny tany tsisy rakotra. Ny andrana faharoa izay notanana nandritran'ny 6 taona (2003/10 ka hatramin'ny 2014/15), izay nahitana fifandimbiasam-boly mandritran'ny roa taona teo amin'ny katsaka + antaka // vary sy fifandimbiasam-boly mandritran'ny telo taona teo amin'ny katsaka + stylosanthes // stylosanthes // vary ; miaraka amin'ny fomba 3 karazany eo amin'ny fikirakirana ny tany sy ny rakotra ary fomba 2 eo amin'ny fitondrana zezika. Ny tany tsirairay dia notsinjaraina 2 izay miavaka eo amin'ny fikirakirana ny ahitra tamin'ny taona 2013/14 sy 2014/15. Ny fanatsarana ny voka-bary miaraka amin'ny VR raha oharina amin'ny VM dia miankina indrindra amin'ny fihenan'ny ahi-dratsy teo amin'ny tany VR. Ny fahamandoan'ny tany sy ny tahan'ny azota mineraly dia miankina be kokoa amin'ny rotsa-korana ary tsy nahitana fahasamihafana amin'ny ankapobeny tao amin'ny VR sy VM. Ary farany, ny fandalinana natao teo amin'ny fiovaovan'ny voka-bary nandritran'ny 6 taona teo amin'ny andrana faharoa tamin'ny alalan'ny fampitahana ny voakatra azo tamin' ny voka-bary salatsalany sy tamin'ny voka-bary izay tokony ho azo nandritra ny taona dia nahitana fa ny fifandimbiasam-boly, ny fomba

fikirakirana ny tany sy ny rakotra ary ny tahan'ny zezika dia mifandraika amin'ny zavatra hafa izay miankina amin'ny fahasamihafan'ny tany izay nety nisy teo amin'ny toerana nanaovana ny andrana. Ny valin'ny fikarohana tamin'ity asa ity dia mandroso ny ijerena akaiky ny vokatra izay endrasana amin'ny rakotra sy ny fitsinjaran'ny rotsa-korana rehefa androso VR entina hanatsarana ny tambi-bokatra any amin'ny faritra Alaotra. Raha ny VR miaraka amin' ny lanjan'ny rakotra avelan'ny tantsaha eny amin'ny tany amin'ny ankapobeny (izay 1 – 2 t ha^{-1}) dia mahomby raha entina iadiana amin'ny riaka sy ny fahalasan'ny tany. Ilaina kosa anefa ny fampitomboina ny lanjan'ny rakotra, izay afaka vokarina tsara raha manao fifandimbiasam-boly mamokatra rakotra ambony, raha te iady amin'ny firongatry ahi-dratsy.

Teny manan-danja: rakotra, fifandrimbiasam-boly, ahitra, tsiron-tany, fahamandoan'ny tany

RESUME

L'Agriculture de conservation (AC) repose sur trois principes: le minimum de travail du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des espèces cultivées. Elle a été introduite vers la fin des années 90 dans la région du lac Alaotra, Madagascar, dans l'objectif d'augmenter la productivité de l'agriculture pluviale qui, généralement, pâtit des problèmes liés à la faible fertilité des sols, aux contraintes hydriques et à l'enherbement. L'objectif principal de la thèse consiste à quantifier et caractériser les impacts des fonctions agro-écologiques de l'AC dans l'amélioration du rendement en riz pluvial par rapport aux pratiques conventionnelles (CT). Une revue de la littérature sur les fonctions agro-écologiques du mulch en fonction de leur quantité retenue sur la parcelle a tout d'abord montré que la quantité de couverture nécessaire va dépendre essentiellement des fonctions agro-écologiques attendues. Une quantité de couverture de 2 à 3 t ha^{-1} permet d'obtenir des effets très nets en ce qui concerne l'amélioration de l'infiltration de l'eau, la limitation du ruissellement et de l'érosion du sol. En revanche, les données sur le contrôle de l'enherbement, la disponibilité des nutriments ainsi que la faune du sol en fonction de la quantité de mulch étaient très variables, suggérant l'interaction de ses fonctions agro-écologiques avec d'autres facteurs, notamment le type de résidus et les conditions pédoclimatiques. Une première expérimentation dont l'objectif était la quantification des effets physiques du mulch sur l'enherbement, avec différentes quantités de résidus de 0 à 45 t ha^{-1} a montré que l'émergence et la biomasse des adventices sur les parcelles couvertes dépend essentiellement de la quantité et de la distribution de la pluviométrie durant la saison culturale. L'émergence ainsi que la biomasse des mauvaises herbes diminuent en général avec l'augmentation de la quantité de mulch maintenue sur les parcelles. Toutefois, une quantité de résidus de l'ordre de 10 t ha^{-1} est nécessaire pour réduire significativement la pression des adventices sur le riz par rapport à un sol nu dans les conditions de notre dispositif expérimental. Un deuxième dispositif maintenu durant 6 ans (2009/10 à 2014/15), combinait une rotation biennale de maïs + dolique // riz et une rotation triennale de maïs + stylosanthes // stylosanthes // riz ; trois modes de gestion du sol et des résidus et deux niveaux de fertilisation. Deux niveaux d'enherbement en split plot ont été ajoutés en 2013/14 et 2014/15. L'amélioration du rendement en riz sur les parcelles en AC par rapport aux parcelles en CT est essentiellement liée à une diminution de la pression des adventices sur les parcelles AC pendant la période de végétation du riz. La dynamique de l'eau dans le sol ainsi que la dynamique de l'azote minéral sont fortement influencées par le régime pluviométrique et ne différent généralement pas entre AC et CT. Enfin, l'analyse de stabilité et l'écart de rendement au potentiel utilisés pour étudier les variations de rendements en riz sur les 6 saisons culturales du second dispositif expérimental ont montré que les effets des traitements étaient en interaction avec d'autres facteurs probablement liés à la variabilité spatiale du sol sur le dispositif expérimental. Les résultats de cette étude nous suggèrent de tenir compte aussi bien des fonctions agro-écologiques du

mulch attendues que les régimes pluviométriques lors de la promotion d'un système AC pour améliorer la productivité des cultures. L'AC avec une quantité de résidus généralement retenus dans les parcelles de l'agriculteur (i.e. 1 - 2 t ha^{-1}) serait efficace pour lutter contre le ruissellement et l'érosion. Cependant, des quantités supplémentaires de résidus, qui pourraient être produites avec l'introduction de rotations culturales avec une forte production de biomasse, seraient nécessaires pour lutter efficacement contre les adventices et diminuer les charges liées au sarclage.

Mots-clés : zéro labour; couverture du sol; rotation culturale; mulch; adventice; azote minéral; humidité du sol

ABSTRACT

Conservation agriculture (CA) is based on the principles of minimum soil disturbance, permanent soil cover and diversification of crop species grown in rotations and/or associations. CA was introduced in the late 90s in the Lake Alaotra region, Madagascar, in order to improve rainfed crop productivity which is commonly constrained by low soil fertility, soil water stress and weed infestation. The main objective of this study was to quantify and understand the impact of CA on rainfed rice productivity as compared to the practice of conventional tillage (CT). First, a review of literature was conducted on the agro-ecological functions of mulching with crop residues in relation to their quantity. The literature review showed that the optimal amount of residues required principally depends on the agro-ecological function searched for. Residue amounts of 2 to 3 t ha^{-1} had clear positive effects in terms of improving water infiltration and limiting water runoff and soil erosion. On the other hand, results on weed control, nutrient availability and soil fauna in relation to the amount of mulch were highly variable, suggesting the interaction of these agro-ecological functions with other factors, including residue type and soil-climate conditions. Second, two field experiments were monitored at the research center of FOFIFA in the Lake Alaotra region. A first experiment aiming at quantifying the physical effect of a mulch of crop residues on weed infestation, with amounts of surface residues ranging from 0 to 45 t ha^{-1} showed that the emergence and biomass of weeds on mulched plots depend mainly on the quantity and distribution of rainfall during the cropping season. Overall, weed emergence and biomass decreased with increasing amounts of mulch. However, a large quantity of residues, i.e. in the order of 10 t ha^{-1}, was required to significantly ($p<0.05$) reduce weed pressure as compared to a bare soil under the agro-ecological conditions of our experiments. The second experiment was conducted during six years (2009/10 to 2014/15), and a 2-year rotation of maize + *Dolichos lablab* // rice and a 3-year rotation of maize + *Stylosanthes guianensis* // *S. guianensis* // rice were combined with three soil/residue management practices and two level of fertilization. Two levels of weed pressure were added as split-plot in 2013/14 and 2014/15. Higher rice grain yields on CA plots as compared to CT plots in the fifth and sixth year of the CA practice were mainly related to a decline of weed pressure under CA. Soil water and mineral nitrogen dynamics did not differ markedly between CA and CT and were strongly influenced by the rainfall pattern. Finally, the use of the concept of stability analysis and the yield gap approach to analyze the variation of rice yield under the 6 crop seasons from 2009/10 to 2014/15 showed that the effects of treatments including crop rotation, soil and residue management, and fertilization levels interact with other factors likely related to the spatial variability of the experimental design. Results of our study suggest that both agro-ecological function of mulch searched for and rainfall conditions should be taken into account when promoting CA systems to improve crop productivity in the Lake Alaotra region. Practicing CA with typical amounts of residues that are produced on farmer's field (i.e. 1 – 2 t

ha^{-1}) is sufficient to control water runoff and soil erosion. However, extra amounts of crop residues are required to effectively control weed infestation. These extra amounts could be produced with the introduction of high biomass-producing crop rotations and could decrease the labor pressure from weeding.

Keywords: zero till; residues cover; crop rotation; mulch, weed, mineral N, soil moisture

TABLE DES MATIERES

Remerciements **4**

FINTINA **6**

RESUME **8**

ABSTRACT **10**

TABLE DES MATIERES **12**

Liste des figures **14**

Liste des tables **17**

Liste des abréviations **18**

INTRODUCTION GENERALE **20**

1. Contexte générale et justification de l'étude 20
2. Présentation de la zone d'étude : la région du Lac Alaotra 21
3. Objectifs et hypothèse de recherche 23

CHAPITRE 1 : FONCTIONS AGRO-ECOLOGIQUES DES PLANTES DE COUVERTURE EN AGRICULTURE DE CONSERVATION. UNE REVUE DE LA LITTERATURE **26**

1. Introduction 28
2. Material and Methods 30
3. Results and discussion 33
4. Conclusions 49

CHAPITRE 2 : EFFETS PHYSIQUES DU MULCH SUR L'ENHERBEMENT DES PARCELLES **51**

1. Introduction 53
2. Material and methods 54
3. Results 58
4. Discussion 74
5. Conclusions 77

CHAPITRE 3 : EFFETS DE L'AGRICULTURE DE CONSERVATION SUR L'ENHERBEMENT, LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LE SOL, LA DISPONIBILITE DE L'AZOTE ET LE RENDEMENT EN RIZ **78**

1. Introduction 80
2. Materials and methods 81
3. Results 85
4. Discussion 96
5. Conclusions 99

CHAPITRE 4 : EFFETS DE LA ROTATION CULTURALE, LA GESTION DU SOL ET DES RESIDUS ET LA FERTILISATION SUR LA VARIATION DE PERFORMANCE DU RIZ 100

1. Introduction 101
2. Matériel et méthode 102
3. Résultats 108
4. Discussions 117
5. Conclusion 119

DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION 120

1. Fonctions agro-écologiques du mulch en fonction de la quantité de résidus 120
2. Effet physique du mulch sur l'enherbement 121
3. Effet de l'AC sur le rendement en riz 123
4. Variations de performance du riz selon la rotation culturale, la gestion du sol/résidus et la fertilisation 125

ANNEXES 137

Liste des figures

Introduction générale

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude à Madagascar 21

Figure 2 : Pluviométrie annuelle de 1993/94 à 2014/15 22

Figure 3 : Schéma conceptuel de la thèse 25

Chapitre 1 : Fonctions agro-écologiques des plantes de couverture en agriculture de conservation. Une revue de la littérature

Figure 1 : Agro-ecological functions of surface crop residues 29

Figure 2 : Illustration of bare and mulched soil 30

Figure 3 : Relative effect of surface crop residues on soil water evaporation control, soil water infiltration and soil water runoff control 36

Figure 4 : Relative effect of surface crop residues on soil erosion control 38

Figure 5 : Relative effect of surface crop residues on soil nutrient availability (N, P, K) 41

Figure 6 : Relative effect of surface crop residues on SOC stocks and annual SOC gains 43

Figure 7 : Relative effect of surface crop residues on weed emergence and weed biomass control 45

Figure 8 : Relative effect of surface crop residues on meso- and macro-fauna abundance 46

Figure 9 : Maximum effect of surface crop residues in relation to their amount for a set of agro-ecological functions. 48

Chapitre 2 : Effets physiques du mulch sur l'enherbement des parcelles

Figure 1: Cumulative rainfall amounts (mm) within 100 days following the first rain which triggered weed emergence 59

Figure 2 : Decomposition of S and MD residues during 2011/12 (red), 2013/14 (green) and 2014/15 (purple) 60

Figure 3 : Relationship between total weed emergence and amount of residues from the first rain to 100 DAF 63

Figure 4: Relationship between cumulative weed emergence and the amount of residue 65

Figure 5: Evolution of weed biomass production in relation to the type and the amount of residue 67

Figure 6 : Relationship between cumulative weed biomass and the amount of residue 70

Figure 7: Correlation between weed biomass production relative to the bare soil treatment and weed emergence relative to the bare soil treatment 71

Figure 8: Rice grain yield in relation to the proportion of soil covered with corresponding amounts of residue 72

Figure 9: Relationship between rice grain yield (Mg ha^{-1}) and cumulative weed biomass (Mg ha^{-1})..... 73

Chapitre 3 : Effets de l'agriculture de conservation sur l'enherbement, la dynamique de l'eau dans le sol, la disponibilite de l'azote et le rendement en riz

Figure 1 : Cumulative rainfall (mm) at the experimental site during the 2013/14 and 2014/15 rice growing seasons 85

Figure 2: Rice grain yield in relation to the soil/residue management and the crop rotation during the 2013/14 and 2014/15 growing seasons 87

Figure 3: Relationship between rice grain yield and number of filled spikelet 88

Figure 4: PAR interception by the rice canopy at four development stages of rice..... 90

Figure 5: Cumulative weed biomass according to the soil/residue management and crop rotation during the 2013/14 and 2014/15 for total, monocot and dicot weed 92

Figure 6 : Soil water content in the 0-150 cm (a) and 0-20cm (b) soil layers according to the soil/residue management and the crop rotation..... 93

Figure 7: Dynamics of mineral N content..... 95

Figure 8: Nitrate contents over soil depth (0-90 cm) 96

Chapitre 4 : Effets de la rotation culturale, la gestion du sol et des residus et la fertilisation sur la variation de performance du riz

Figure 1 : Pluviométrie annuelle de 1993/94 à 2014/15 103

Figure 2 : Schéma conceptuel du modèle PYE..... 105

Figure 3 : Rendement en riz pluvial observé dans l'expérimentation durant les 6 saisons culturales 109

Figure 4 : Le rendement par rapport à la moyenne environnementale (Ye) 111

Figure 5 : Rendement par rapport à la moyenne environnementale..... 111

Figure 6 : Jour de début de floraison en fonction du jour de la levée avec les données observées et les données simulées par le modèle..... 113

Figure 7 : Dynamique du stock en eau dans l'horizon 0 à 180cm observé et simulé durant la saison 2014/15, superposé avec la pluviométrie journalière et la courbe d'évolution du LAI. 114

Figure 8 : Rendement du riz en grain observé durant les 6 années d'expérimentation en fonction du rendement potentiel simulé par PYE 114

Figure 9 : Rendement potentiel et rendement potentiel limité par l'eau de 2009/10 à 2014/15 115

Figure 10 : Rendement potentiel et rendement potentiel limité par l'eau selon la densité de plantation 116

Figure 11 : Evolution du rendement observé (t ha^{-1}), du rendement par rapport à la moyenne environnementale (%) et du rendement relatif au rendement potentiel limité par l'eau (%) de 2009/10 à 2014/15 (A1 à A6) 116

Figure 12 : Rendement relatif au rendement potentiel limité par l'eau 117

Discussion générale et conclusion

Figure 1 : Effet maximum de l'augmentation de la quantité de résidus jusqu'à 4 t ha^{-1} sur les fonctions agro-écologiques à partir des données de la littérature 121

Figure 2 : Relation entre l'émergence des adventices et le type et la quantité de mulch maintenues sur la parcelle avec la correspondance en taux de couverture du sol sur 4 saisons culturales 122

Figure 3 : Relation entre la différence de rendement en riz et la différence en émergence des adventices en AC et CT 123

Figure 4 : Rendement en riz par rapport à la moyenne environnementale sur 6 saisons culturales du 2009/10 au 2014/15 126

Liste des tables

Chapitre 1: Fonctions agro-ecologiques des plantes de couverture en agriculture de conservation. Une revue de la littérature

Table 1: Parameters of the boundary lines fitted in this study 49

Chapitre 2 : Effets physiques du mulch sur l'enherbement des parcelles

Table 1: Selected physical and chemical properties of the soil 54

Table 2: Experimental treatments during the four growing seasons 56

Table 3: Field operations during the 2013/14 and 2014/15 growing seasons 57

Table 4: P-values for the effect of amount and type of residue on cumulative weed emergence 66

Table 5: P-values for the effects of amount and type of residue on cumulative weed biomass 71

Chapitre 3 : Effets de l'agriculture de conservation sur l'enherbement, la dynamique de l'eau dans le sol, la disponibilite de l'azote et le rendement en riz

Table 1: Selected physical and chemical properties (mean and standard deviation) of the soil 81

Table 2: Field operations during the 2013/14 and 2014/15 growing seasons. 82

Table 3: Effect of crop rotation, soil/residue management, level of weed pressure and their interactions on rice yield (kg ha^{-1}) in 2013/14 and 2014/15 86

Table 4: Effect of weed pressure, crop rotation, soil/residue managementand their interactions on PAR interception by the rice canopy 89

Table 5: Effect of crop rotation, soil/residue managementand their interactions on cumulative weed emergence at rice harvest (number m^{-2}) in 2013/14 and 2014/15 91

Chapitre 4 : Effets de la rotation culturale, la gestion du sol et des residus et la fertilisation sur la variation de performance du riz

Table 1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol (0-90 cm) sur le dispositif expérimental situé sur un bas de pente à Ambohitsilaozana, région du Lac Alaotra 103

Table 2 : Description des traitements sur le dispositif expérimental. 104

Table 3 : Récapitulation des termes relatifs au rendement 108

Table 4 : ANOVA du rendement en riz (Yobs) 110

Liste des abréviations

A2E	Agriculture Elevage Environnement
ABACO	Agroecology-based aggradation-conservation agriculture
AC	Agriculture de conservation
AFD	Agence française de développement
AIDA	Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles
Am	Area to mass ratio
ANOVA	Analysis of variance
BD	Base de données
BV-Lac	Projet de mise en valeur et de protection des bassins versants du Lac Alaotra
CA	Conservation agriculture
CARIM	Conservation Agriculture in Rice Cropping Systems in Madagascar
CEC	Capacité d'échange cationique / cation-exchange capacity
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CRR-ME	Centre régional de recherche du Moyen-Est
CT	Conventional tillage / Labour conventionnel
DAF	Days after the first rain
DAS	Days after sowing
Dens15	Densité de plantation optimale
DensRe	Densité de plantation réelle
EMBRAPA	Brazilian agricultural research corporation
F0	Sans apport de fertilisation
F1	Avec apport de fertilisation
FAO	Food and agriculture organization
Fc	Proportion of soil covered
FIDA	Fonds international de développement agricole
FOFIFA	Foibem-pirenena momba ny fikarohana ampiharina amin'ny fampandrosoana ny ambany vohitra
GAIA	Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau
HW	High weed pressure
IOA	Index of agreement
JDA	Jour de l'année
L+/R-	Labour sans restitution des résidus
L+/R+	Labour avec incorporation des résidus dans le sol
LAI	Leaf area index / Indice foliaire
LSD	Least significant difference
LW	Low weed pressure
M	Quantity of crop residues

MD	Maize + dolichos
MD//R	Rotation biennale de maïs + *Dolichos lablab*, suivie du riz / 2-year rotation of maize + *D. lablab*, followed by rice
MS//S//R	Rotation triennale de maïs + *Stylosanthes guianensis*, puis *S. guianensis*, et du riz / 3-year rotation of maize + *S. guianensis*, then *S. guianensis*, and rice
NS	Not significant
OECD	Organization for economic co-operation and development
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONG	Organisation non gouvernementale
PAM	Programme alimentaire mondiale
PAR	Photosynthetically active radiation
PRISMA	Preferred reporting items fro systematic reviews and meta-analysis
PYE	Potential yield estimator
RRMSE	Erreur quadratique moyenne relative
S	Stylosanthes
SARRA	Système d'analyse régionale des risques agrocilimatiques
SD	Standard deviation
SED	Standard error of difference of mean
SensPhot	Coefficient de sensibilité à la photopériode
SOC	Soil organic carbon
SPAD	Système de production d'altitude et durabilité
STICS	Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard
TAFA	Tany sy fampandrosoana / Terre et développement
TDR	Time-Domain reflectometry
UA	Université d'Antananarivo
VM	Voly mahazatra
VR	Voly rakotra
Yb	Agro-ecsological function on bare soil
Ye	Rendement relatif à la moyenne environnementale
Ym	Agro-ecological function on mulched soil
Ymoy	Rendement moyen (moyenne environnementale)
Yobs	Rendement observés
Yp	Rendement potentiel
Yrel	Rendement relatif au rendement potentiel limité par l'eau
Yw	Rendement potentiel limité par l'eau

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte générale et justification de l'étude

La sécurité alimentaire qui se traduit par la suffisance de l'apport énergétique alimentaire se détériore à l'échelle mondiale (OECD 2013). Bien que la quantité produite de denrées alimentaires semble suffisant pour la population mondiale, sa répartition sur le globe reste très déséquilibrée. En 2016, le nombre de personnes souffrant de sous-alimentation chronique s'élève à 815 millions et touche plus particulièrement l'Afrique Sub-saharienne (FAO, FIDA, OMS, PAM 2017). Par ailleurs, la menace que constitue le changement climatique contraint la capacité du secteur agricole à répondre aux besoins alimentaires de la population mondiale.

L'amélioration de la sécurité alimentaire et la résilience face aux changements climatiques requièrent de profonds changements des systèmes alimentaires et agricoles. L'agriculture familiale étant la principale forme d'agriculture (Bélières et al. 2014), la sécurité alimentaire au niveau mondial repose essentiellement sur la résilience des petites exploitations face aux changements climatiques. Il s'avère ainsi indispensable de développer des pratiques agricoles durables reposant sur l'exploitation raisonnable des ressources naturelles.

L'agriculture de conservation (AC) qui s'inspire du mode de fonctionnement de l'écosystème forestier en assurant une production équilibrée tout en préservant l'environnement figure parmi les réorientations possibles des systèmes agricoles. L'AC est basée sur trois principes fondamentaux dont le travail minimal du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des espèces cultivées par les associations et/ou les rotations culturales (FAO 2015). Les études précédentes sur l'AC ont démontré les fonctions agro-écologiques de ses trois principes notamment sur l'amélioration du bilan hydrique et de la fertilité du sol (e.g. Hobbs 2007). La couverture du sol améliore le stockage en eau dans le sol en limitant l'évaporation de l'eau du sol et le ruissellement et en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol (e.g. Scopel et al. 2004). Elle limite également les risques d'érosion du sol en lui fournissant une protection physique et en améliorant ses propriétés (e.g. Smets et al. 2008; Razafindramanana et al. 2012). La diversité de la plantation et la décomposition des résidus retenus à la surface du sol influent sur le cycle des nutriments du sol et favorisent leur disponibilité pour la plante (Maltas et al. 2007). L'AC contribue à réduire la pression des adventices (Teasdale and Mohler 2000; Bilalis et al. 2003) et à améliorer l'activité biologique dans le sol par la restitution de fortes quantités de biomasse (Kladivko 2001). Elle favorise également le stockage de carbone dans le sol grâce au non labour et la présence de plantes de couvertures (e.g. Razafimbelo 2005; Bernoux et al. 2006; Corbeels et al. 2006).

Madagascar figure parmi les pays les plus touchés par l'insécurité alimentaire. Le programme alimentaire mondial (PAM) compte 14 millions de personnes menacées par la faim en 2015, représentant environ 46% de la population malgache. Avec une majorité de population rurale (86%), l'agriculture tient une place prépondérante dans l'économie de Madagascar. Il s'agit du principal secteur pourvoyeur d'emploi utilisant près de 70% de la main d'œuvre active et assure principalement la consommation alimentaire de la population. Les faibles performances agricoles couplées avec une croissance démographique sont les principaux déterminants de l'insécurité alimentaire à Madagascar. Il s'avère indispensable de mettre en place des pratiques agricoles plus performantes, durables et résilientes au changement climatique. L'AC a été alors introduit à Madagascar dans le début des années 1990 à Antsirabe dans les hautes terres afin d'assurer une amélioration de la productivité des cultures. L'ONG TAFA (Terre et développement) avec l'appui technique du CIRAD ont réalisés des tests dans différentes conditions climatiques de Madagascar dont le climat semi-aride du Sud-Ouest, climat tropical humide du Sud-Est et aux écologies de moyennes altitude dans la région du lac Alaotra et au Moyen-Ouest (Husson and Rakotondramanana 2006).

2. Présentation de la zone d'étude : la région du Lac Alaotra

L'étude a été réalisée dans la région du lac Alaotra qui se trouve dans le centre-Est de Madagascar (17°35'S, 48°30'E, 760 m alt.) (Figure 1).

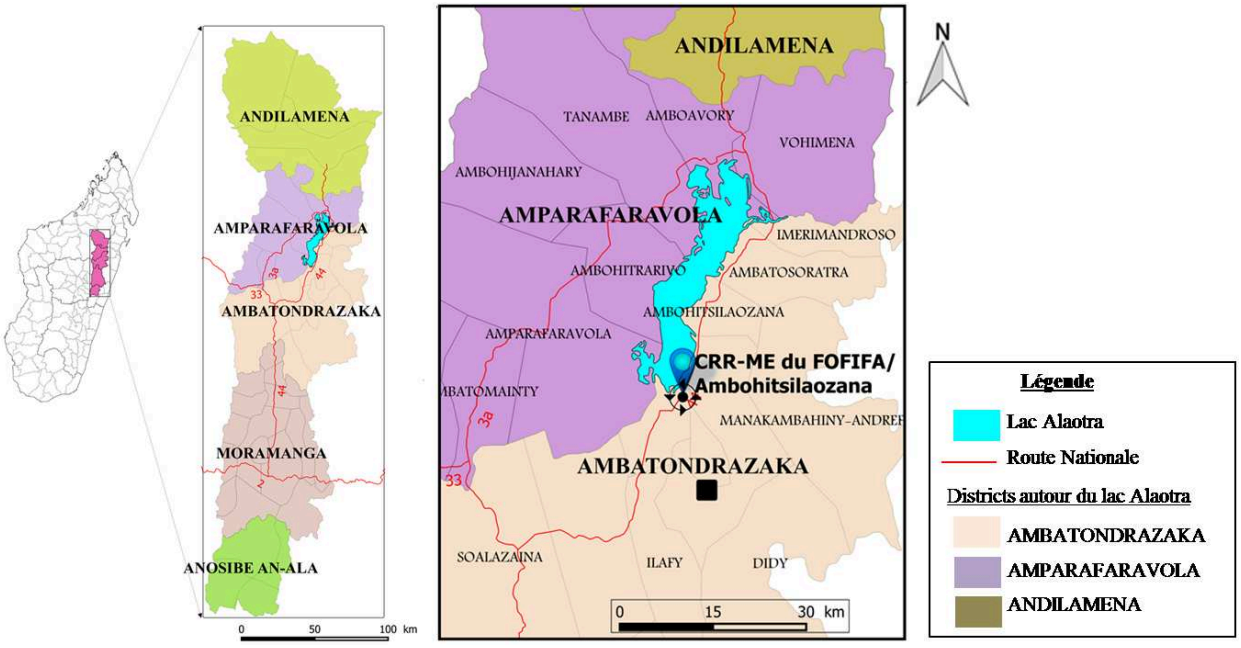


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude à Madagascar
Les dispositifs expérimentaux ont été installés sur les parcelles et du centre de recherche régionale du Moyen-Est (CRR-ME) du FOFIFA dans la région du lac Alaotra (Adapté de BD 500)

La région est caractérisée par un climat tropical humide d'altitude avec une grande variabilité intra- et interannuelle de la pluviométrie (Figure 2). La pluviométrie annuelle de 1993/94 à 2014/15 varie de 638 mm à 1 569 mm, avec une moyenne de 1 060mm. La température moyenne mensuelle varie de 18.0°C en juillet et de 24.4°C en décembre.

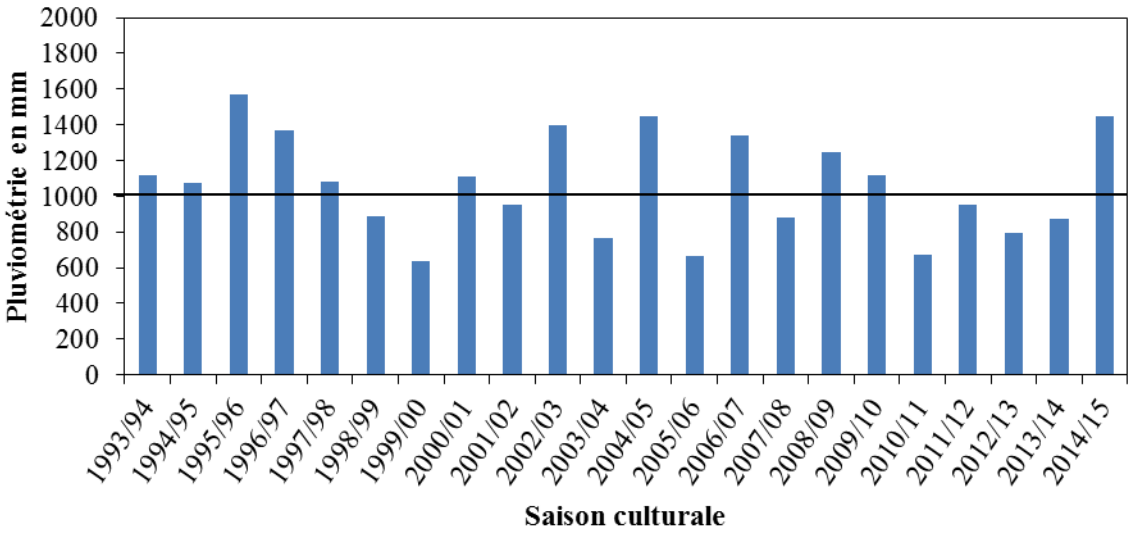


Figure 2 : Pluviométrie annuelle de 1993/94 à 2014/15
Les données ont été enregistrées à la station météo d'Ambohitsilaozana, commune d'Ambatondrazaka, région du lac Alaotra, Madagascar

La région du lac Alaotra est une zone à vocation agricole avec une prédominance de la riziculture. Il s'agit du deuxième grenier à riz de Madagascar. Avec plus de 120 000 ha de rizières, elle assure environ 13 % de la production rizicole de Madagascar. La production annuelle de riz dans la région dépend principalement de la quantité et de la répartition de la pluviométrie durant la saison culturale. Selon les rapports de la FAO et de la PAM (Programme Alimentaire Mondial) sur l'évaluation de la sécurité alimentaire à Madagascar, elle varie de 320 000 à 500 000 tonnes de 2007/08 à 2015/16.

Le riz est principalement cultivé en système irrigué sur les plaines agricoles qui contournent le lac Alaotra. Suite à une augmentation de la demande et une saturation des bas-fonds, la riziculture pluviale exploitant les collines est de plus en plus importante depuis les années 80 (Penot et al. 2009). L'expansion de la riziculture irriguée étant limitée par la vétusté et la dégradation des infrastructures hydro-agricoles, l'exploitation des surfaces pluviales reste une option potentielle à développer pour augmenter la production rizicole dans la région. La durabilité ainsi que la productivité de la riziculture pluviale est cependant remise en question. En effet, les surfaces pluviales sont les plus souvent sensibles à l'érosion et aux ruissellements, et sont de faible fertilité.

Les études pédologiques dans la région ont montré des sols hydromorphes organiques et minéraux sur les plaines, des sols minéraux d'apports alluvionaires de type argilo-limoneux sur les parcelles exondées dans les vallées et bas-fonds (*Baiboho*) et des sols de type ferralitique sur les bassins versants (*Tanety*) (Raunet 1984). En ce qui concerne les dispositifs expérimentaux utilisés dans cette étude, ils se situent sur un bas de pente en bordure de la rive Sud-Est du Lac Alaotra sur les parcelles expérimentales du centre régional du Moyen-Est du FOFIFA (CRR-ME) (Figure 1). Le sol est de type Orthic ferralsol (Classification FAO) avec une texture limono-argileux, un pH acide et une capacité d'échange cationique faible. Les caractéristiques physico-chimiques du sol sont détaillées dans les chapitres 2, 3 et 4 de la thèse.

En ce qui concerne l'AC, il a été proposé comme solution technique pour sécuriser et augmenter la productivité des cultures pluviales dans la région depuis la fin des années 90. Sa diffusion auprès des producteurs a été assurée par un projet de développement BV-Lac (Projet de mise en valeur et de protection des bassins versants du Lac Alaotra) financé par l'AFD (Agence Française de Développement). Malgré les efforts de vulgarisation, le taux d'adoption de l'AC dans la région reste faible. En 2010, le projet recensait 1 080 ha de parcelles en AC (Penot et al. 2015). Les principales contraintes d'adoption de l'AC concernent principalement la production et la gestion des résidus de culture sur les parcelles. En effet, les résidus de culture sont aussi utilisés à d'autres fins, notamment l'alimentation des bétails. Pour la plupart des agriculteurs, l'utilisation des résidus de culture pour nourrir le bétail s'avère plus avantageuse économiquement que le mulch utilisé pour augmenter la fertilité du sol (Naudin et al. 2012). Du point de vue technique, bien qu'il ait été démontré dans les études antérieures que la rétention des résidus sur les parcelles peut avoir un effet sur le contrôle des mauvaises herbes, la gestion des mauvaises herbes reste un défi majeur dans l'adoption de l'AC (Chauhan et al. 2012).

3. Objectifs et hypothèse de recherche

L'objectif principal de la thèse consiste à quantifier et caractériser les impacts des fonctions agro-écologiques de l'AC dans l'amélioration du rendement en riz afin de cerner les avantages de l'AC par rapport au contexte pédoclimatique de la région. Les objectifs spécifiques et les hypothèses correspondant aux 4 chapitres de la thèse (Figure 3) sont les suivants :

(1) Déterminer les relations entre les fonctions agro-écologiques et la quantité de mulch laissés sur la parcelle

Hypothèse 1 : L'efficacité des fonctions agro-écologiques du mulch dépend de la quantité de résidus laissés sur les parcelles ;

Le premier chapitre a été consacré à une revue de la littérature afin d'étudier les relations entre l'efficacité des fonctions agro-écologiques du mulch et la quantité retenue sur la parcelle. La base de données en ligne Scopus (http://www.scopus.com) a été utilisée. Nous avons sélectionné les études avec zéro labour afin de se consacrer sur les effets du mulch indépendamment des

effets des autres principes de l'AC. Parmi les fonctions agro-écologiques du mulch, l'amélioration du bilan hydrique, la limitation des pertes en terre, l'augmentation de la disponibilité des nutriments du sol (N, P, K) et du carbone du sol, le contrôle de l'émergence et de la biomasse des adventices, et l'augmentation de la méso et macrofaune du sol ont été étudiés. L'efficacité du mulch sur une fonction agro-écologique a été évaluée en utilisant l'écart relatif entre la valeur sur des parcelles couvertes et la valeur sur des parcelles nues. Les papiers utilisés pour chaque fonction agro-écologique dans ce chapitre sont récapitulés dans *Annexe 1*. Cette première partie a permis de déterminer le niveau de performance de ces fonctions agro-écologiques en fonction de la quantité de résidus laissés sur les parcelles au travers des données de la littérature.

(2) Caractériser les effets physiques du mulch sur l'enherbement

Hypothèse 2 : Le contrôle des adventices avec les systèmes en AC dépend de la quantité et de la qualité des résidus laissés sur les parcelles ;

Afin de se situer dans le contexte agro-écologique de la région du lac Alaotra, un dispositif expérimental constitué de différents niveaux de couverture du sol avec deux types de couverture, du *Stylosanthes guianensis* et un mélange de maïs et *Dolichos lablab* allant de 0 à 45 t ha^{-1} a été suivi sur 4 saisons de culture (2010/11, 2011/12, 2013/14 et 2014/15). Les parcelles n'ont pas été labourées et les résidus de culture ont été apportés sur les parcelles au début de l'expérimentation. Les mesures d'émergence et de biomasse des adventices ont permis d'évaluer les effets de la quantité ainsi que de la qualité du mulch sur l'enherbement.

(3) Caractériser les effets de l'AC sur l'enherbement, la dynamique de l'eau dans le sol, sur la disponibilité en azote pour le riz et le rendement en riz

Hypothèse 3 : La gestion du sol et des résidus ainsi que la rotation culturale ont un effet positif sur le rendement en riz par la diminution de l'enherbement et l'amélioration de la disponibilité de l'eau et de l'azote du sol;

Le 3^{e} objectif concerne les effets des 3 principes de l'AC sur le rendement en riz. Contrairement au précédent dispositif expérimental, les résidus sur les parcelles sont issus de la rotation culturale. Un dispositif expérimental constitué de deux rotations culturales : une rotation biennale de maïs + *D. lablab* // riz (MD//R) et une rotation triennale de maïs + *S. guianensis* // *S. guianensis* // riz (MS//S//R); trois modes de gestion de sol et des résidus de culture, deux niveaux d'enherbement et deux niveaux de fertilisation mis en place depuis la saison culturale 2009/10 et retenue pendant 6 saisons culturales a été étudié. Afin d'évaluer les effets de la rotation culturale, le mode de gestion du sol et des résidus ainsi que le niveau d'enherbement de la parcelle sur l'amélioration du rendement en riz, la dynamique de l'eau dans le sol, la dynamique de l'azote minéral dans le sol et l'enherbement ont été mesurés en 2013/14 (5^{e} année) et en 2014/15 (6^{e} année).

(4) Evaluer les effets de la rotation culturale, de la gestion du sol et des résidus et de la fertilisation sur les variations de performance du riz

Hypothèse 4 : Les systèmes en Agriculture de Conservation réduisent les écarts entre le rendement observé et le rendement potentiel du riz pluvial

Afin d'expliquer davantage les rendements en riz issus de l'expérimentation agronomique, on a eu recours à deux approches : une méthode utilisant le concept de l'« analyse de stabilité » comparant le rendement à la moyenne de l'expérimentation sur une saison culturale et l'approche mobilisant le modèle PYE (Potential Yield Estimator). Les données de rendement en riz sur les 6 saisons culturales de 2009/10 à 2014/15 du dispositif expérimental du chapitre 3 ont été utilisées afin d'évaluer les effets de la rotation culturale, la gestion du sol et la fertilisation sur la variation de performance du riz. Le modèle PYE permet de simuler le rendement potentiel atteint dans des conditions favorables sans limitation de croissance de la plante autre que la température, le rayonnement solaire et la pluviométrie. Le rendement relatif au rendement potentiel simulé par le modèle PYE ainsi que le rendement relatif à la moyenne environnementale ont permis d'évaluer les effets de nos variables d'intérêt dont la rotation culturale, la gestion du sol et la fertilisation dans l'élaboration du rendement.

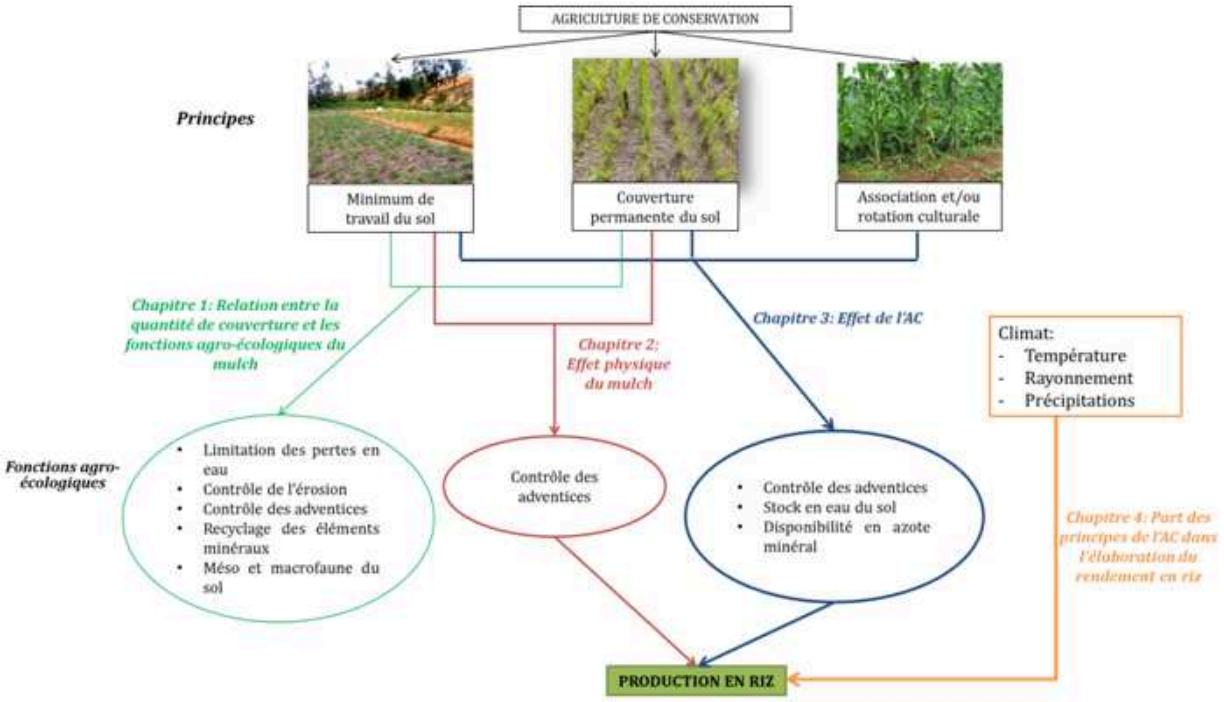


Figure 3 : Schéma conceptuel de la thèse

CHAPITRE 1 : FONCTIONS AGRO-ECOLOGIQUES DES PLANTES DE COUVERTURE EN AGRICULTURE DE CONSERVATION. UNE REVUE DE LA LITTERATURE

Ce chapitre a été publié dans le journal *Agronomy for Sustainable Development* :

Ranaivoson, L., Naudin, K., Ripoche, A., Affholder, F., Rabeharisoa, L., Corbeels, M., 2017. Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture . A review. Agron. Sustain. Dev. doi:10.1007/s13593-017-0432-z

L'agriculture de conservation, qui se définit comme le travail minimum du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des espèces cultivées par l'association et/ou la rotation culturale, a été largement diffusée comme pratique pour maintenir ou améliorer la qualité du sol et accroître la productivité des cultures. D'après les précédentes études sur l'agriculture de conservation, les effets bénéfiques de cette technique proviennent principalement de la couverture permanente du sol avec les résidus de cultures. Les résidus des cultures laissées sur les parcelles jouent un rôle important dans la production agricole par leurs effets bénéfiques sur les composantes structurales du sol et les processus liés à l'agro-écosystème, dites fonctions agro-écologiques dans cette étude.

Dans ce chapitre, on a étudié les relations entre l'efficacité d'un certain nombre de fonctions agro-écologiques du mulch et la quantité de résidus de culture laissées sur la parcelle à partir d'une méta-analyse de la littérature. Parmi les fonctions agro-écologiques, on a étudiés le contrôle de l'évaporation de l'eau dans le sol, l'infiltration de l'eau dans le sol, le contrôle du ruissellement de l'eau dans le sol, le contrôle des pertes en terre, l'amélioration de la disponibilité des éléments nutritifs du sol, les stocks et les gains de carbone organique du sol, le contrôle des adventices et l'abondance de la méso et macrofaune du sol. La performance d'une quantité de mulch pour une fonction agro-écologique a été calculée à partir des écart relatifs au sol nu sans labour. Et les effets potentiels du mulch ont été quantifiés à l'aide des courbes enveloppes des données disponible dans la littérature.

Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review

Lalaina Ranaivoson[1,2], Krishna Naudin[2,3], Aude Ripoche[2,4], François Affholder[2], Lilia Rabeharisoa[5], Marc Corbeels[2,6]

[1] Centre national de recherche appliquée au développement rural (FOFIFA), Route d'Andraisoro, 101, BP1690 Antananarivo, Madagascar

[2] Agro-ecology and Sustainable Intensification of Annual Crops, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Av. Agropolis, 34098 Montpellier, France

[3] Embrapa Cerrados, Rodovia BR-020, Km 18 Caixa Postal: 08223, Planaltina, DF 73310-970, Brazil

[4] SRR FOFIFA, BP 230, Antsirabe, Madagascar

[5] Laboratoire des Radio-Isotopes (LRI), Université d'Antananarivo, BP 3383, 101, Antananarivo, Madagascar 6 Sustainable Intensification Program, International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), P.O. Box 1041–00621, Nairobi, Gigiri, Kenya

ABSTRACT

Conservation agriculture, which is based on minimum tillage, permanent soil cover and crop rotations, has widely been promoted as a practice to maintain or improve soil quality and enhance crop productivity. To a large extent, the beneficial effects of conservation agriculture are expected to be provided by permanent soil cover with crop residues. Surface crop residues play an important role for crop growth through their benefits on soil-related structural components and processes in the agro-ecosystem, referred to in this study as agro-ecological functions.

Through a meta-analysis of the literature we have studied the relative effects of surface crop residue levels on the performance of a set of agro-ecological functions compared with a no-till bare soil, i.e. without surface residues. The selected agro-ecological functions were soil water evaporation control, soil water infiltration, soil water runoff control, soil loss control, soil nutrient availability, soil organic carbon (SOC) stocks and gains, weed control and soil meso- and macro-fauna abundance. The potential effects of crop residue cover were quantified using boundary line models. Our main findings were: 1) 8 t ha^{-1} of residues were needed to decrease soil water evaporation by about 30% compared to no-till bare soil. 2) To achieve the maximum effect on soil water infiltration, water runoff and soil loss control, residue amounts of at least 2 t ha^{-1} were required. 3) The effect of increasing the amounts of surface crop residues on soil nutrient supply (N, P and K) was relatively low; the boundary line models were not significant. 4) The average annual SOC gain increased with increasing amounts of residues, with a mean of 0.38 t C ha^{-1} $year^{-1}$ with 4 to 5 t ha^{-1} of residues. 5) Weed emergence and biomass can reduced by 50% compared to a no-till bare soil with residue amounts of 1 t

ha^{-1} or more. 6) There was a weak response in soil meso- and macro-fauna abundance to increasing amounts of surface crop residues. The maximum effect corresponded to an increase of 45% compared to a no-till bare soil and was reached from 10 t ha^{-1} of residues.

Our findings suggest that optimal amounts of surface residues in the practice of conservation agriculture will largely depend on the type of constraints to crop production which can be addressed with mulching.

1. Introduction

Soil degradation, defined as negative changes in a soil's organic matter and nutrient status, is a worldwide problem. It has emerged as a threat to food security through the reduction in crop production (Oldeman 1998). Practical solutions for soil conservation are needed to ensure sustainable food production. Conservation agriculture has widely been promoted as a practice to maintain or improve soil quality and enhance crop productivity (Scopel et al. 2013). Conservation agriculture is based on three principles: minimum soil disturbance, permanent soil cover and crop rotations (FAO 2015). Previous studies have stated that increases in crop productivity using conservation agriculture are to a large extent provided by the permanent soil cover (e.g. Hobbs 2007).

Crop residues retained as mulch on the soil have effects on the soil-related structural components and processes of the agro-ecosystem (see Figure 1), potentially enhancing crop production. In this study, we denote these components or processes as agro-ecological functions.

Mulching with crop residues limits soil water evaporation and soil crusting, thereby increasing soil water infiltration and soil water availability to the crop (e.g. Scopel et al. 2004; Gangwar et al. 2006). Residue cover provides physical soil protection from water runoff and minimizes the risks of water and wind erosion (e.g. Bertol et al. 2007; Lal 2009). Decomposition of crop residues retained on the soil surface also influences nutrient cycling in the soil and the availability of nutrients to the crop (Aulakh et al. 1991; Govaerts et al. 2007; Turmel et al. 2014). Finally, minimum soil disturbance and the presence of a residue cover may enhance soil carbon storage (Corbeels et al. 2006), contribute to the reduction of weed infestation (Teasdale and Mohler 2000; Caamal-Maldonado et al. 2001; Bilalis et al. 2003) and increase soil biological activity (Kladivko 2001; Liu et al. 2016).

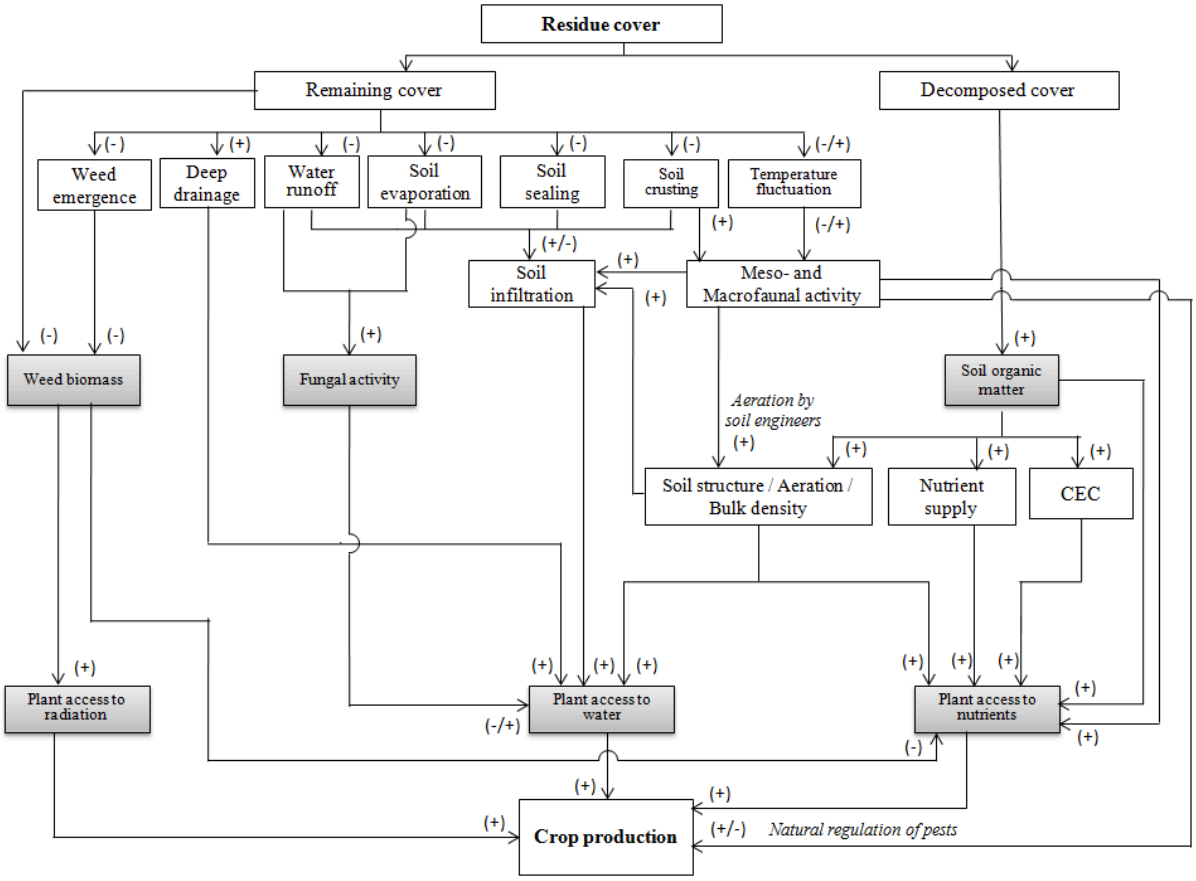


Figure 1 : Agro-ecological functions of surface crop residues
(+) and (-) signs designate positive and negative effects respectively, adapted from Lu et al. (2000) and Turmel et al. (2014)

The effects of surface crop residues vary according to climate conditions, and factors such as residue level and type of residue can influence crop responses to mulching. Some authors have reported low or delayed germination rates and reduced crop growth with high quantities of crop residues under cool and humid climates (e.g. Schneider and Gupta 1985; Swanson and Wilhelm 1996). Several studies have found that additional nitrogen (N) fertilizer is needed when cereal crop residues are left on soils to avoid an immobilization of soil mineral N resulting in lower crop yields (e.g. Beri et al. 1995; Govaerts et al. 2006).

Crop residues have uses other than mulch, such as for livestock feed (Giller et al. 2009; Naudin et al. 2012) or for biofuel production (Wilhelm 2004; Lal 2009). Using crop residues as livestock feed can result in greater economic benefits than their retention as mulch for the improvement of soil fertility (Naudin et al. 2012). One megagram of maize residues is equivalent to about 378 l of ethanol (Lal 2009). So, there are clearly competing uses for crop residues between energy production, livestock feed and agro-ecological functions. This implies that trade-offs exist in their use. Evaluating the performance of surface crop residues

in relation to a set of agro-ecological functions can therefore indicate which crop residue management is best and what amounts are optimal.

The aim of this paper is to identify relationships between soil cover using crop residues and the performance of selected agro-ecological functions. To achieve this, the performance of agro-ecological functions on no-till mulched soils was compared with that of no-till bare soils (Figure 2), i.e. without surface residues, through a systematic literature review. Such a comprehensive review has not been conducted before.



Figure 2 : Illustration of bare and mulched soil
Rice crop under no-till practice on bare soil (A) and with a mulch of *Stylosanthes guianensis* residues (B), Madagascar (Photo by L. Ranaivoson)

The agro-ecological functions provided by surface crop residues that were analyzed in this study were soil water evaporation control, soil water infiltration, soil water runoff control, , soil loss control, soil nutrient availability (mineral N, available phosphorus (P), exchangeable potassium (K)), soil organic carbon (SOC) stocks and gains, weed control (weed emergence, weed biomass) and meso- and macro-fauna abundance. The performance of each function was analyzed both according to the amount of residue and the proportion of soil covered by residue.

2. Material and Methods

2.1. Literature search

We performed a systematic literature search according to the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) statement (Moher et al. 2009). The on-line Scopus database (http://www.scopus.com) was used for the literature search. The subject area was limited to Agricultural and Biological Sciences, the search language to English and the

combination of keywords varied according to the agro-ecological function being studied. For all searches, the following keywords were used (an asterisk being a replacement for any ending of the respective term): [mulch* OR residu* OR straw] AND [‘Conservation Agriculture’ OR ‘no till*’ OR ‘zero till*’ OR ‘direct seeding’ OR ‘direct drilling’ OR DMC]. DMC is the acronym for direct seeding mulch-based cropping, another denomination for conservation agriculture. These keywords were combined with [evaporation], [infiltration], [runoff*], [erosion], [‘inorganic nitrogen’ OR ‘soil nitrogen supply’ OR ‘nitrogen availability’ OR ‘mineral nitrogen’], [phosphorus OR phosphorous], [potassium], [carbon], [weed], [*fauna OR termit* OR earthworm OR nematode* OR spider* OR centiped* OR staphylinid* OR ant* OR slug*] for studying the effects of surface crop residues on, respectively, soil water evaporation, soil water infiltration, water runoff, soil erosion, mineral nitrogen, available phosphorus, exchangeable potassium, weed infestation and soil meso- and macro-fauna abundance.

2.2. Study selection

Publications were eligible for inclusion if data on the selected agro-ecological functions was available from field experiments in which a no-till bare soil treatment, i.e. without crop residues, was compared with a no-till soil treatment using a mulch of crop residues. Taking this approach, the sole effect of surface crop residues on agro-ecological functions could be investigated, without the interactive effects of (no-) tillage. Studies from the selected publications compared bare soil and mulched soil treatments using randomized block designs or paired comparison designs with repetitions. The results in our analysis were expressed relative to no-till bare soil, thus allowing for the aggregation and analysis of data from studies conducted under different agro-ecological conditions. This approach also allowed us to compare the different agro-ecological functions that are provided by residue cover. Publications which did not report the quantities of surface crop residues or the extent of soil cover provided by crop residues used in the experiments were excluded. We also excluded publications involving residues from perennial crops, plastic mulch or live mulch. Data from model simulations was not used in the analysis, however published models which show a relationship between the quantity of mulch and an agro-ecological function were presented. Studies from the same publication that were conducted under different experimental conditions or treatments (e.g., slope, fertilization and cropping season) were considered as

individual cases in this review. In total, 54 papers were considered in our analysis, representing a total of 110 study cases.

2.3. Data extraction

For each study, we extracted data that were available in the text, tables or figures on the agro-ecological functions under study in our review. Numerical values were extracted from figures by using WebPlotDigitizer 3.8. (Rohatgi 2015). Study cases were classified as tropical or temperate according to the Köppen climate classification (Peel et al. 2007). From the 110 study cases, 56% were from tropical regions and 44% from temperate regions. The study cases included several types of mulch: 34% used maize residues, 20% used wheat residues and 20% used rice residues.

2.4. Data analysis

For each agro-ecological function, results were analyzed both according to the amount of surface residue and the proportion of soil covered by residue. When the soil cover was not available, the quantity of crop residues (M) was converted to the proportion of soil covered (F_c) following the equation described in Gregory (1982):

$$F_c = 1 - e^{-Am*M}, \quad \text{(eq 1)}$$

where the coefficient A_m is the area-to-mass ratio of the residue (ha kg^{-1}). Values for A_m were taken from Steiner et al. (2000) for wheat, oat, barley and rye residues; Dickey et al. (1985) for soybean, pea, cowpea, pigeon pea and oil radish residues; Gregory (1982) for maize and sorghum residues; Anzalone et al. (2010) for rice and Bahiagrass residues; Macena Da Silva et al. (2006) for millet residues and Teasdale and Mohler (2000) for vetch and lupine residues. M is the amount of residue (kg ha^{-1}). The reverse was conducted when the proportion of soil covered by residues was available, but no data on the quantity of residues was available in the published study.

The performance by which an agro-ecological function is provided by surface crop residues for functions which normally have positive impacts on crop production, namely soil water infiltration, soil nutrient availability, SOC stocks and meso- and macro-fauna abundance, was defined as (Törnqvist et al. 1985):

$$(Ym - Yb)/Yb, \quad \text{(eq 2)}$$

where *Ym* and *Yb* are the values of the function considered on mulched (m subscript) and bare soil (b subscript) respectively. Using the same naming convention, for soil water evaporation, water runoff, soil loss, weed emergence and weed biomass, which normally have a negative impact on crop production, performance was defined as:

$$(Yb - Ym)/Yb \quad \text{(eq 3)}$$

For each agro-ecological function, we reported both discrete values and continuous functions from the publications selected for this review.

Boundary line models, as the maximum response for each function in relation to the amount of surface residues, were drawn. They represent the best performance of surface residues with respect to a given agro-ecological function across the studies in this review. These boundary lines were fitted by using the maximum likelihood methodology (Milne et al. 2006). The boundary line models were evaluated using the Index of Agreement (IOA) based on Willmott et al. (2012), which spans between -1 and +1, with values approaching +1 representing better model performance. Exponential models were the best fit for all agro-ecological functions. The parameters of each boundary line model are detailed in Table 1.

3. Results and discussion

3.1. Effect of surface crop residues on soil water processes

We analyzed the effect of quantity and cover of surface crop residues on three major soil water processes affecting the crop water balance, i.e. soil water evaporation, soil water infiltration and water runoff.

3.1.1. Soil water evaporation

Four cases, from Balwinder-Singh et al. (2011) and Gava et al. (2013), were retrieved from the literature measuring soil water evaporation under no-till soil with and without a mulch of crop residues. All these studies were conducted in tropical regions.

Total soil water evaporation during the cropping season was reduced by crop residue mulches (Figure 3). The maximum effect of the quantity of surface residues on soil water evaporation as shown by the boundary line was a reduction of close to 30% compared to bare soil, which

is reached with 8 t ha^{-1} of residues or more (Figure 3a). Parameter estimates of the boundary line were highly significant ($p < 0.001$), despite the low number of observations. There was a general trend of decreasing soil water evaporation with increasing proportions of soil covered by residues (Figure 3b).

Surface crop residues provide physical soil protection and reduce the solar energy reaching the soil, thereby reducing soil water evaporation losses (Scopel et al. 2004; Lal 2008; Balwinder-Singh et al. 2011). A mulch of crop residues is more effective in reducing soil water evaporation when the soil is wet and the leaf areas of growing crops are low (Lal 2008; Balwinder-Singh et al. 2011), which explains the differences in effects on soil water evaporation during the pre- versus post-anthesis period of wheat observed by Balwinder-Singh et al. (2011).

3.1.2. Soil water infiltration

The data published on the effect of increasing amounts of surface residues on soil water infiltration was highly dispersed (Figure 3c, d). The majority of studies were from tropical zones. The boundary line showed a two-fold increase in soil water infiltration compared to bare soil with 2 t ha^{-1} of residues or more. Parameter estimates of the boundary line were significant ($p < 0.05$) (Figure 3c). There was a general trend of an increase in the soil water infiltration rate with an increasing proportion of soil covered by residues (Figure 3d). A totally covered soil can increase soil water infiltration four-fold compared to bare soil.

Residue cover intercepts part of the rainfall, limiting soil crusting and soil losses through runoff, and thereby increasing the soil water infiltration rate (Lal 2008). Residues and the products of their decomposition improve soil structure through enhanced soil aggregate stability and soil porosity (Jordán et al. 2010), which also improves the soil water infiltration rate. The negative effects of residue cover on soil water infiltration, as shown in some case studies from Blanco-Canqui and Lal (2007a; 2009), could be explained by the fact that the presence of mulch may restrict water infiltration by imparting water repellent and hydrophobic properties to the soil surface (Sharratt et al. 2006).

It is important to note that the relationship between soil water infiltration and surface residues also depends on several other factors, such as slope, soil hydraulic conductivity, vegetation density, and rainfall quantity and intensity (Dunne et al. 1991; TerAvest et al. 2015). Blanco-Canqui and Lal (2007a; 2009) reported that water infiltration increased with increasing levels of soil cover on a slope of 10%, while on a slope of less than 2%, water infiltration was not

related to the level of soil cover. Such interactions between factors involved in soil water infiltration processes make it unlikely that a clear relationship between soil water infiltration and mulch quantity or cover can be defined. We were unable to account for these factors as, for example, co-variates because of the limited information available on these factors in the selected papers. Nevertheless, since we compared soil water infiltration rates between bare and mulched soils under the same (no-till) soil conditions, it can be expected that the major effects on water infiltration are the result of residue cover and its effect on soil structure (Verhulst et al. 2010).

3.1.3. Soil water runoff

The efficiency by which surface residues control water runoff increased with the amount of residue. The spread of observations on soil water runoff as a function of residue mulch was lower when related to the quantity of residues than to the proportion of soil covered (Figure 3e, f). Residue amounts of 1.5 to 4.5 t dry matter ha^{-1} decreased water runoff by about 50% compared to bare soil (Figure 3e). Parameter estimates of the boundary line were significant ($p < 0.05$). The equation from Scopel et al. (2004) for soil cover suggests that the same effect can be reached with a soil cover of about 20% (Figure 3f).

Surface crop residues protect soil against structural degradation of the surface, thereby increasing rainfall infiltration and reducing water runoff. Residue cover delays the time before runoff is initiated and slows runoff flows as a result of the increased roughness of the soil surface and the obstruction of runoff pathways (Lal 1997).

For an equal amount of surface residue, significant differences in efficiency on water runoff can to a great extent be explained by the level of the slope of the field (Scopel et al. 2005) and by the amount and intensity of rainfall (Dunne et al. 1991). Results from Scopel et al. (2005) showed that 4.5 t dry matter ha^{-1} of surface residues reduced runoff by 20% and 40% compared to bare soil on slopes of 3% and 7% respectively. Findeling et al. (2003) and Scopel et al. (2005) showed that 1.5 t dry matter ha^{-1} of residues reduced water runoff by 50% compared to bare soil when the total rainfall was less than 40 mm, while with rainfall of more than 1000 mm, 4.5 t ha^{-1} of residues was needed to achieve the same effect.

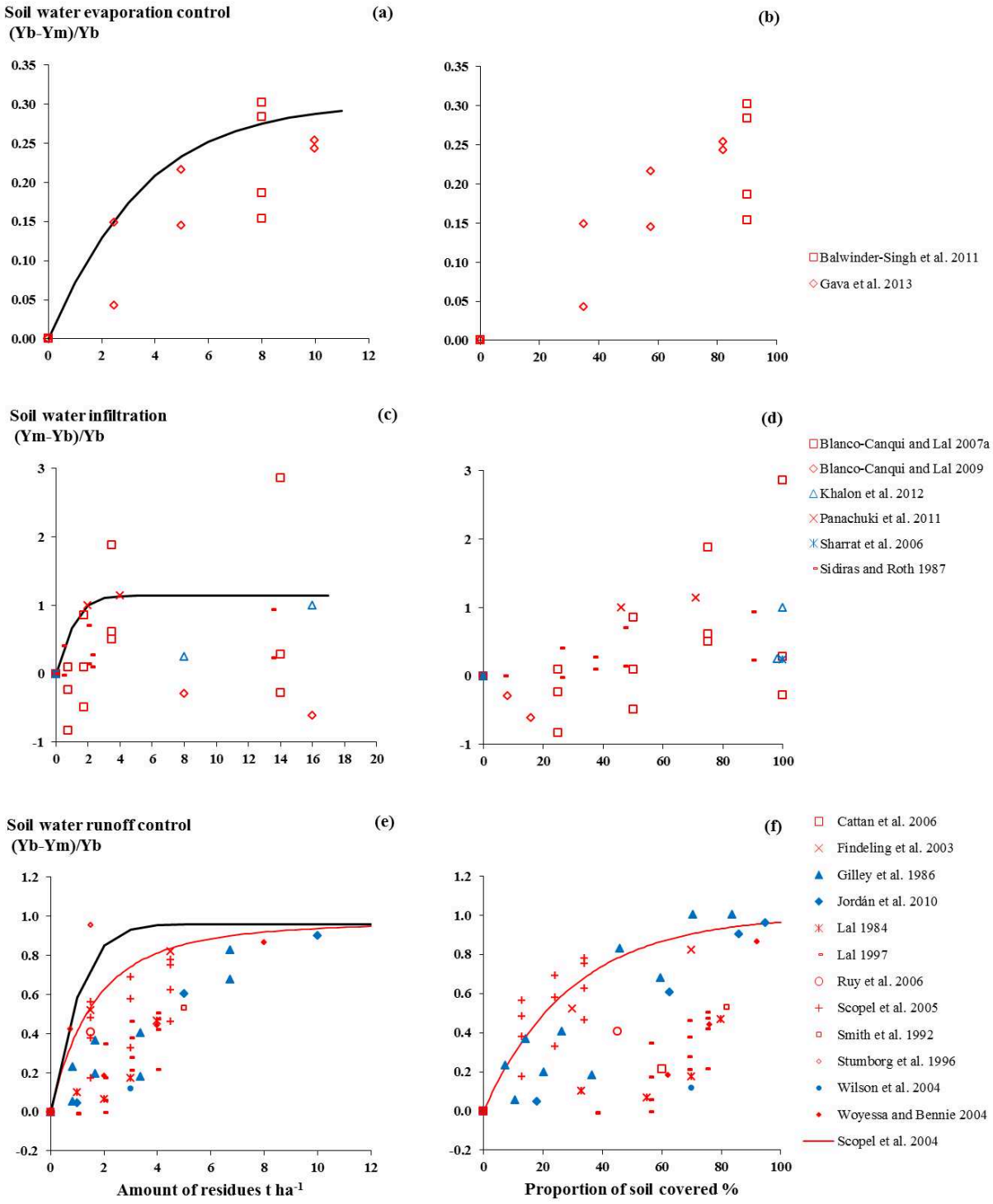


Figure 3 : Relative effect of surface crop residues on soil water evaporation control, soil water infiltration and soil water runoff control

Blue symbols are data from temperate zones and red symbols from tropical zones. For soil water runoff, filled symbols are data from simulated rainfall and unfilled symbols are from real rainfall events. Black curves are the boundary lines using the maximum likelihood methodology. Red curves are from published literature.

3.2. Effect of surface crop residues on soil erosion

Soil erosion decreased drastically with increasing amounts of surface crop residues (Figure 4). Residue levels of 2 to 4 t dry matter ha^{-1} reduced soil erosion by about 80% compared to bare soil. With 8 t dry matter ha^{-1} of residues and above, there is virtually no more soil loss. Examining the level of soil cover, around 60% soil cover reduced soil loss by an average of 80%. The boundary line showed that the maximum effect of surface residue amounts on soil erosion can be reached with 2 t ha^{-1} of residues (Figure 4a). This corresponds to 80% soil cover or more (Figure 4b). Parameter estimates of the boundary line were highly significant ($p < 0.001$).

Residue cover dissipates raindrop energy and reduces the velocity of runoff flows, thereby decreasing soil detachment (Mannering and Meyer 1963; Gilley et al. 1986). It protects the physical structure of topsoil, improves aggregate stability and minimizes surface crusting (Jordán et al. 2010).

The efficiency of residue cover in reducing soil loss depends to a great extent on rainfall intensity (Lal 1997; Scopel et al. 2005). Results from Scopel et al. (2005) show that 4.5 t dry matter ha^{-1} reduced soil erosion by 36% compared to bare soil during a stormy year, whereas the same quantity of residues reduced soil erosion by only 16% compared to bare soil in years with low rainfall intensity. This effect may also explain the differences between results from experiments with simulated and real rainfall events; residue cover was in general more effective under simulated rainfall having, on average, higher rainfall intensities than real rainfall events (Figure 4a, b).

The efficiency of residue cover in soil erosion control also depends on the type of residue. Wheat residues, which have a higher area-to-mass ratio than maize, rye or rice residues, are the most effective for soil erosion control. For maize, rye and rice residues, amounts between 1.5 to 4.5 t dry matter ha^{-1} were needed to reduce soil loss by 50% compared to bare soil, while only 2 t dry matter ha^{-1} of wheat residues reduced soil loss by about 90% (Woyessa and Bennie 2004).

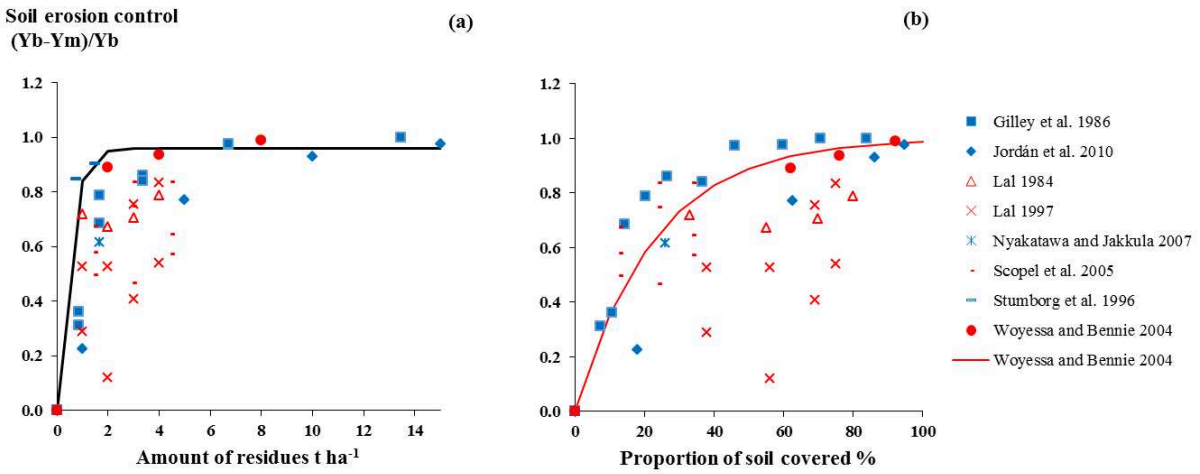


Figure 4 : Relative effect of surface crop residues on soil erosion control
Blue symbols are data from temperate zones and red symbols from tropical zones. Filled symbols are data from simulated rainfall and unfilled symbols are from real rainfall events. The black curve is the boundary line using the maximum likelihood methodology. The red curves is from published literature.

3.3. Effect of surface crop residues on soil nutrient availability

Residue decomposition releases nutrients to the soil and increasing amounts of surface residues are expected to improve soil nutrient content, at least in the long term. In the short term (< 1 year), an immobilization of nutrients into soil organic matter may occur as a result of the relatively high C-to- nutrient ratios of residues such as cereal straw. Data studied in this section concerns soil nutrient concentrations (g kg^{-1}) in the 0-30 cm topsoil layer from studies with time horizons of one to three years. In this part of the paper, we review the effect of residue cover on soil mineral N, available P and exchangeable K. Although it is expected that changes in soil bulk density may occur under a no-till bare soil compared to a no-till soil with surface crop residues, especially during the first years of the experiment, the use of nutrient concentrations instead of stocks does not essentially affect the final relationships and conclusions that we found on the effects of surface crop residues on soil nutrient availability. Nutrient contents in no-till soil with surface residues may somewhat have been underestimated as a result of a possible lower soil bulk density compared to no-till bare soil (without residues).

3.3.1. Soil mineral nitrogen

Results from the studies reviewed showed a trend of increased mineral N concentration with increased residue cover. The efficiency of residue cover in improving soil mineral N concentration was, however, relatively low (Figure 5a,b). The maximum effect corresponded

to an increase of around 30% compared to bare soil and was reached with more than 10 t dry matter ha^{-1} of residues, which is equivalent to 100% soil cover. However, in some case studies residue amounts from 4 to 7 t dry matter ha^{-1} caused a decrease in soil mineral N compared to bare soil without surface residues.

Residue decomposition influences the availability of N for crops through the release of mineral N to the soil. Legume residues with a relatively low C-to-N ratio lead to nitrogen mineralization, whereas cereal residues with a relatively high C-to-N ratio can temporally immobilize N (Aulakh et al. 1991; Govaerts et al. 2006). As expected, the results from the reviewed papers showed in general a higher increase of soil mineral N in the case of legume residues than in the case of cereal residues (Figure 5a,b).

The observed decreases of soil mineral N concentration in mulched soils compared to bare soils can therefore be explained by the immobilization of N during the decomposition process of non-legume residues (Feng et al. 2014).

3.3.2. Available soil phosphorus

As shown in the figure 5c,d, observations of available soil P as a function of the amount of surface residues or the proportion of soil covered were highly dispersed.

Retention of crop residues in the field is expected to increase the availability of P in topsoil through mineralization, which was demonstrated by the data from Feng et al. (2014) and Pradhan et al. (2011), showing an improvement of available soil P with an increase in the amount of residue. However, wheat and maize residues in the studies conducted by Iqbal et al. (2011) and Wang et al. (2011) showed a decrease in available P under mulched soil compared to bare soil. Singh and Jones (1976) found that residues with a P concentration of less than 0.22% resulted in a net P immobilization. Moreover, surface residues can affect topsoil pH (e.g. Lal 1997; Govaerts et al. 2007) which may also have a strong effect on soil P availability (Sato and Comerford 2005). The possible effects on soil pH are related to the chemical composition of residues and soil properties. This could be one of the explanations for the spread of observations. It has also been demonstrated that organic compounds released during residue decomposition can increase or decrease a soil's P adsorption capacity, depending on the P concentration of residues (Haynes and Mokolobate 2001).

3.3.3. Exchangeable soil potassium

Surface crop residues increased exchangeable soil K content compared to bare soil (Figure 5e,f) in the two studies that we retrieved from the literature. According to the observations

made in these studies, the efficiency of residue cover in enhancing soil exchangeable K was more pronounced in a temperate climate than in a tropical climate.

Crop residues are known to be rich in K and are therefore expected to be an important source of soil K when retained on the soil (Lupwayi et al. 2006). The efficiency of residue cover in increasing soil exchangeable K depends to a large extent on the residue's K content. Rosolem et al. (2005) have shown that released K is correlated to the residue's K content. Potassium is, however, prone to leaching (Rosolem et al. 2006; Calonego and Rosolem 2013). This could explain the relatively small increase of exchangeable K in the top soil layers with increased residue levels (Figure 5e).

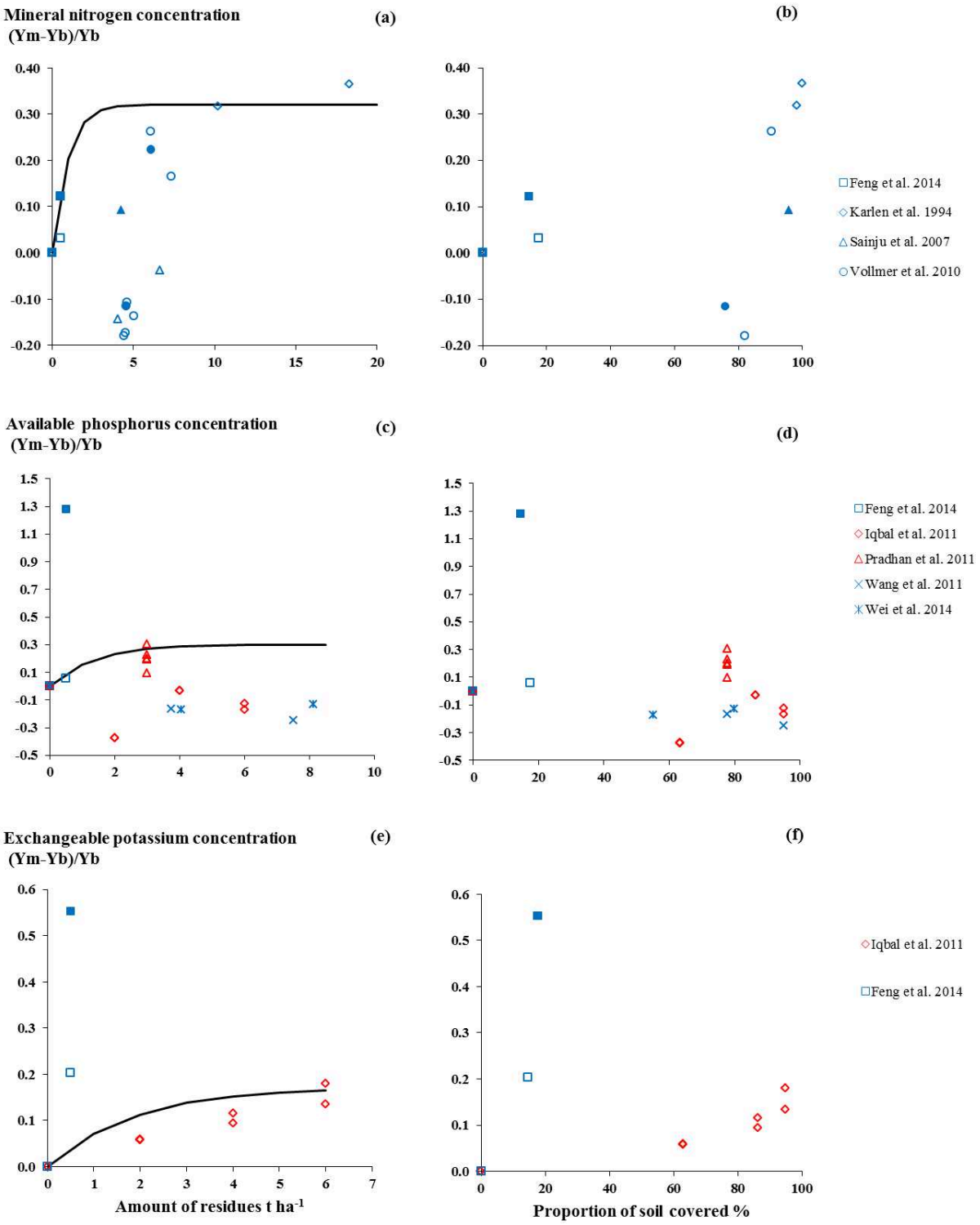


Figure 5 : Relative effect of surface crop residues on soil nutrient availability (N, P, K)
Blue symbols are data from temperate zones and red symbols from tropical zones. Filled symbols are data with legume residues and unfilled symbols with cereal and a mixture of cereal and legume residues. Black curves are the boundary lines using the maximum likelihood methodology.

3.4. Effect of surface crop residues on soil organic carbon

The studies examined in this section reported soil organic carbon (SOC) stocks (t ha^{-1}) in the 0–20 cm topsoil layer and varied in time between three to 28 years. For some cases, SOC stocks were calculated from the reported data on SOC concentration and bulk density. For each study, we also calculated the corresponding average annual SOC storage rate.

Overall, SOC stocks increased with increasing amounts of residues (Figure 6). According to the boundary line, the maximum increase of SOC stocks compared to bare soil was 50% with residue amounts of 6 t ha^{-1}. Parameter estimates for the boundary line were highly significant ($p < 0.01$). No relationship was found for the proportion of soil covered by residues (Figure 6b).

Annual gains of SOC from the selected studies were relatively low, with a mean of 0.50 t C ha^{-1} $year^{-1}$ for residue levels of 1.5 t ha^{-1} to 16 t ha^{-1}. The maximum SOC gain corresponded to 1.75 t C ha^{-1} $year^{-1}$ with 16 t ha^{-1} of residues (Figure 6c). Parameter estimates for the boundary line were also highly significant ($p < 0.001$).

SOC storage depends mainly on soil texture and structure (Campbell et al. 1996a; Campbell et al. 1996b; Lal 2004) which to a large extent explains the variability of results for the same amount of residue. The finer fraction of soil (silt and clay) plays an important role in stabilizing SOC (Lorenz et al. 2008; Jagadamma and Lal 2010). As a result, clay soils will in general have higher SOC stocks than sandy soils. However, we were not able to consider clay or sand content as a co-variable in our analysis because of the limited data; information on soil texture was not always available for the selected studies.

The low response of SOC stocks to residue cover for some of the cases studied could also be due to the high initial SOC content (Rasmussen and Collins 1991). Once steady state SOC levels are reached, annual returns of residues no longer affect SOC stocks (Hooker et al. 2005). This may explain the relatively small increases of SOC stocks in the >15-year experiments reported by Hooker et al. (2005) and Lenka and Lal (2013).

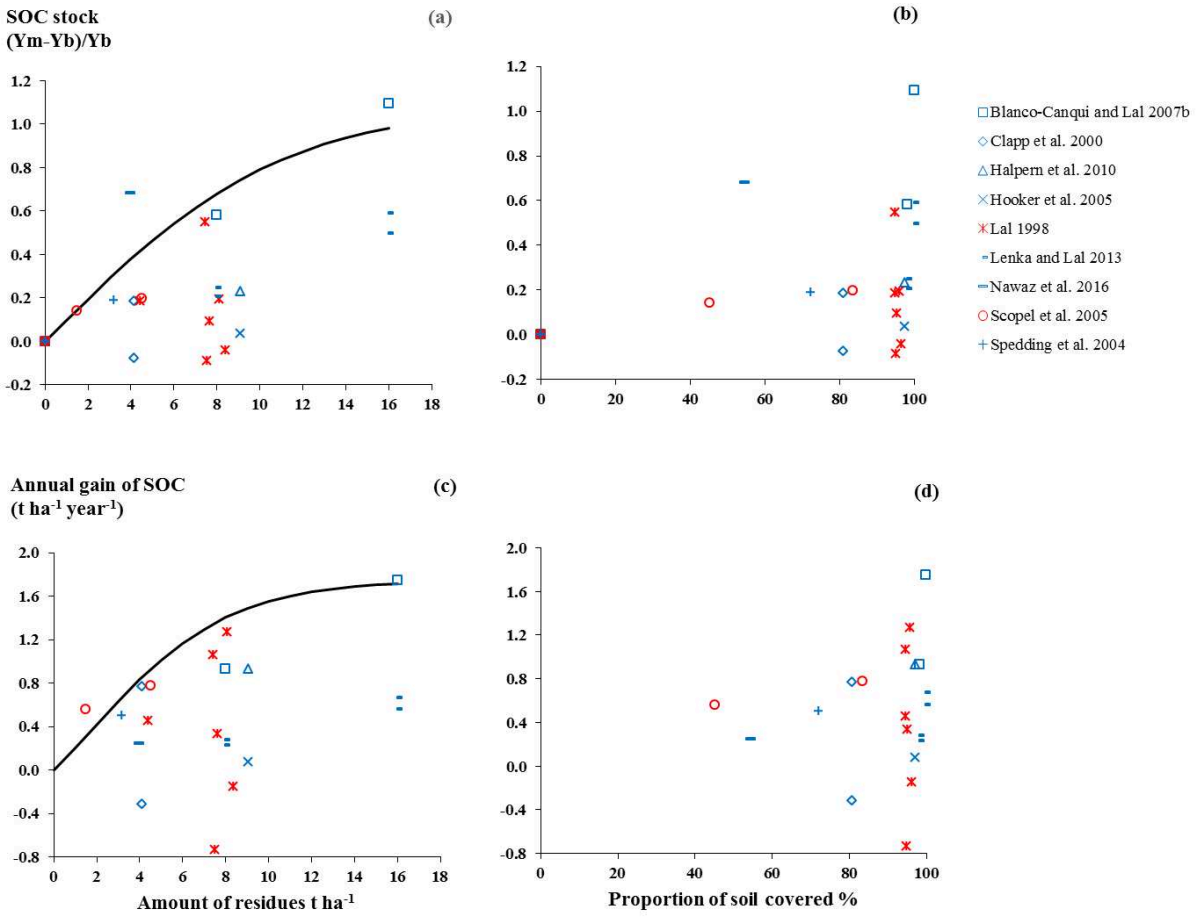


Figure 6 : Relative effect of surface crop residues on SOC stocks and annual SOC gains
Blue symbols are data from temperate zones and red symbols from tropical zones. Black curves are the boundary lines using the maximum likelihood methodology.

3.5. Effect of surface crop residues on weed infestation

Surface crop residues are known to have an impact on weed ecology (Chauhan et al. 2012). Residue cover can influence weed emergence and weed biomass by altering soil moisture, light transmittance to the soil surface and the leaves of weed seedlings or through allelopathic effects (Chauhan et al. 2012).

3.5.1. Weed emergence

Overall, weed emergence decreased with increasing amounts of residues (Figure 7a). However, in some cases where mulch rates were less than 7 t dry matter ha^{-1}, weed emergence was stimulated compared to bare soil. The quantity of mulch needed to reduce weed emergence by 50% relative to bare soil varied widely from 1 to 10 t dry matter ha^{-1}. The maximum effect, as shown by the boundary line, occurred with residue amounts of 4 t dry matter ha^{-1} or above. Parameter estimates for the boundary line were highly significant ($p <$

0.001). No relationship was found between the proportion of soil covered by crop residues and weed emergence (Figure 7b).

Surface crop residues create micro-environments that are either inhibitive or favorable to weed germination. Crop residues can interfere with weed establishment either by physically impeding their emergence and altering soil conditions (Teasdale and Mohler 2000; Bilalis et al. 2003), or by exhibiting allelopathic effects which inhibit weed germination (Weston 1996). An increase in soil moisture in the topsoil layer due to the presence of surface crop residues can stimulate weed emergence, particularly under a partially covered soil (Buhler et al. 1996).

The effect of surface residues on weed emergence may also vary according to the rate of residue decomposition (Teasdale and Mohler 2000). Rapid residue decomposition leads to a swift decrease in soil cover and may promote weed emergence by increasing soil fertility. Among other factors, this could explain the variable responses for equal residue amounts (Figure 7a). For example, the two distinct relationships between weed emergence and the amount of surface residue found by Teasdale and Mohler (2000) during the 1996 and 1997 seasons were in part explained by the faster residue decomposition in 1996 than in 1997. The different responses of weed emergence to residue cover between temperate and tropical climate zones (Figure 7a,b) can to a certain extent be explained by the effect of climate conditions on the dormancy release of weed populations (Benech-Arnold et al. 2000).

3.5.2. Weed biomass

An increase in the amount of surface crop residues limited weed biomass compared to bare soil (Figure 7c,d). The maximum effect, as shown by the boundary line, occurred with residue amounts of 4 t dry matter ha^{-1} or above. Parameter estimates for the boundary line were significant ($p < 0.01$). No relationship was found between the proportion of soil covered by crop residues and weed biomass (Figure 7d).

Residues retained on the soil influence light, temperature and moisture conditions of a soil and thereby affect weed biomass (Teasdale and Mohler 1993). Apart from the amount of residue, the efficiency of weed control through mulching also depends on the type of residue and the weed species (Teasdale and Mohler 2000), which could explain the variable responses. For example, results from Mischler et al. (2010), Campiglia et al. (2012) and Radicetti et al. (2013) showed that oat residues had a higher weed suppression capacity than residues from hairy vetch and oilseed rape. Oat residues are known to act as a smother crop for weed control (Zerner et al. 2008). In addition, oat residues have allelopathic effects

influencing the germination and growth of weeds (Kato-Noguchi et al. 1994). Finally, surface crop residues influence the specific conditions of weed growth, which may influence the species composition and population of weeds (Teasdale et al. 1991). This in turn may affect the weed biomass as a result of weed-specific development and growth rates. To a large extent, this probably explains the different responses of weed biomass to crop residue cover.

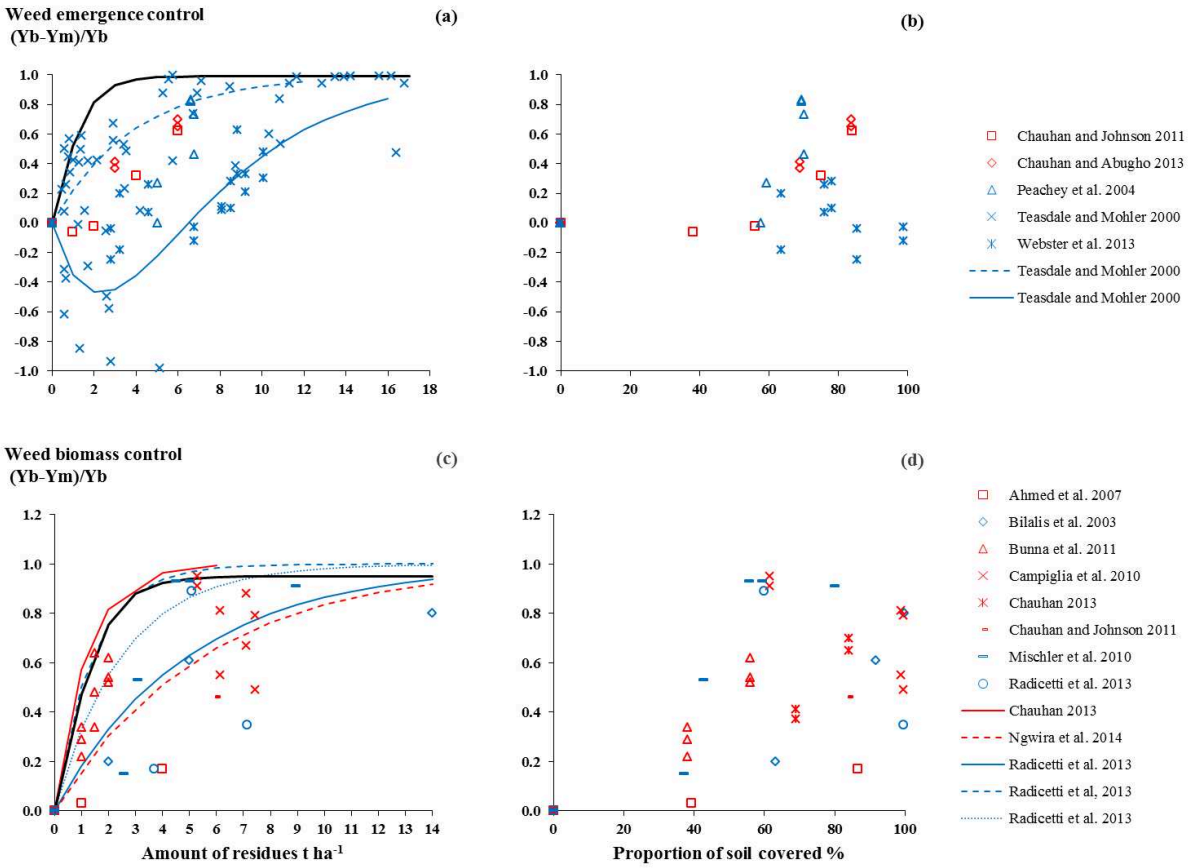


Figure 7 : Relative effect of surface crop residues on weed emergence and weed biomass control
Equations on weed emergence are from Teasdale and Mohler (2000) and correspond to a regression curve fitted to their observed data, with the solid line for the year 1996 (r^2=0.43) and the dotted line for 1997 (r^2=0.59). For weed biomass, curves in blue are from Radicetti et al. (2013) and correspond to regression curves fitted to their observed data (r^2 not available). Solid line in red is an equation from Chauhan (2013) and corresponds to a regression curve fitted to his observed data (r^2=0.99). Dotted line in red is from Ngwira et al. (2014) and corresponds to a boundary line fitted through their boundary points. Blue symbols are data from temperate zones and red symbols from tropical zones. Black curves are the boundary lines using the maximum likelihood methodology.

3.6. Effect of surface crop residues on soil meso- and macro-fauna abundance

Soil meso- and macro-fauna abundance plays an important role in the soil environment. It has been stated that the application of crop residues is the most effective practice for enhancing soil biodiversity (Liu et al. 2016). Among the eight papers reviewed, one paper studied the nematode community, two studied arthropods and five studied earthworms. The results

showed that this type of fauna increased with increasing amounts of surface residues (Figure 8a). However, the increases in soil fauna in relation to increasing amounts of residues were relatively low. With 5 t dry matter ha^{-1} of surface residues, soil fauna can be increased by a maximum of 30% compared to bare soil, as shown by the boundary line. Karlen et al. (1994) found that increasing the mulch rate to more than 10 t dry matter ha^{-1} did not further increase soil fauna, which corresponds to the boundary line fitted in our study. We did not find a clear relationship between the proportion of soil covered by crop residues and soil meso- and macro-fauna abundance (Figure 8b).

Residue cover provides organic matter which is a food source for soil fauna (Stinner 1990; Kladivko 2001). However, the effects vary according to the type of residue, which to a large extent explains the variability in responses to crop residue amounts (Figure 8a). Some authors have found that the earthworm population was negatively correlated to the C-to-N ratio and polyphenol concentration of residues (Hendriksen 1990; Tian et al. 1993).

The relatively weak response of fauna in soils with surface residues compared to bare soil could also be explained by the fact that the bare reference soils are no-till soils. It is generally known that no-till enhances the diversity of soil fauna and their recovery after conventional tillage (Kladivko 2001; Blanchart et al. 2007; Brévault et al. 2007).

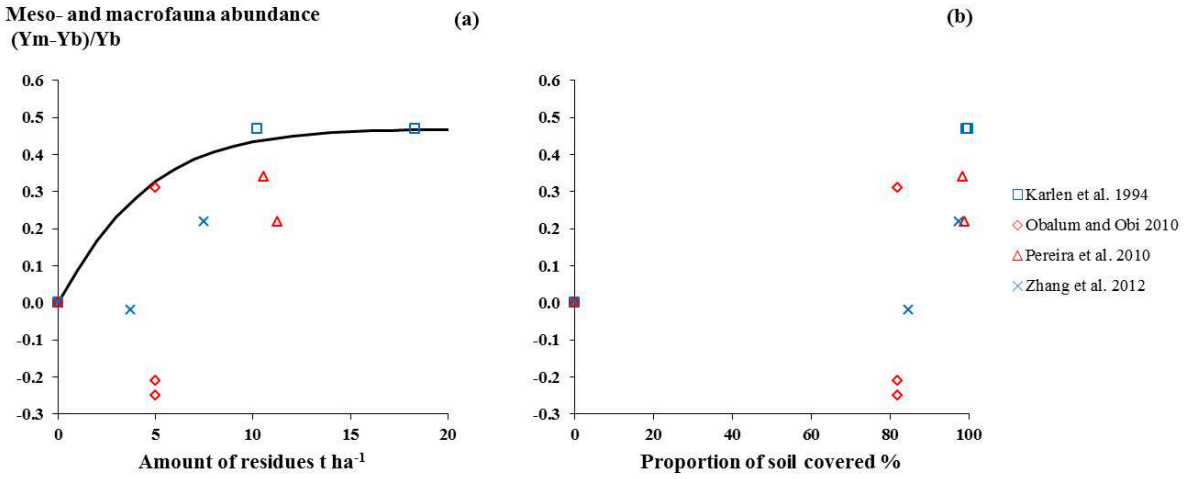


Figure 8 : Relative effect of surface crop residues on meso- and macro-fauna abundance
Blue symbols are data from temperate zones and red symbols from tropical zones. Black curves are the boundary lines using the maximum likelihood methodology.

3.7. Maximum effects of crop residue cover

The boundary lines for all agro-ecological functions were combined in order to compare the maximum effects of surface residue cover between the agro-ecological functions. As shown in figure 9, the potential maximum effect of increasing amounts of surface crop residues on soil water evaporation control and soil nutrient availability was relatively low. Meso- and macro-fauna abundance had a similarly weak response to increasing amounts of surface crop residues. On the other hand, the potential maximum effect of surface crop residues on soil water infiltration, water runoff and soil loss control was large. The threshold value of 2–3 t ha^{-1} of residues to reach the maximum effect on these agro-ecological functions predicted by the boundary lines is in accordance with the usual recommendation of a minimum soil cover of 30% in the practice of conservation agriculture (FAO 2015). Weed emergence and biomass control showed a maximum response from 4 t ha^{-1} of residues. The SOC stock increases with increasing amounts of mulch.

Our estimated amounts of surface crop residues from the boundary lines are low compared to the estimated 7 t dry matter ha^{-1} recommended by Carvalho et al. (2016) to preserve the maximum agronomic benefits of mulch. However, it should be noted that while the boundary lines represent the largest possible responses of agro-ecological functions to surface crop residues, typically a range of responses exists depending on other factors such as soil and climate conditions and the type of residue. Indeed, it is assumed that values below the boundary line are influenced by other independent variables or a combination of variables (Webb 1972) which limit the agro-ecological functions. The boundary lines represent the potential effects.

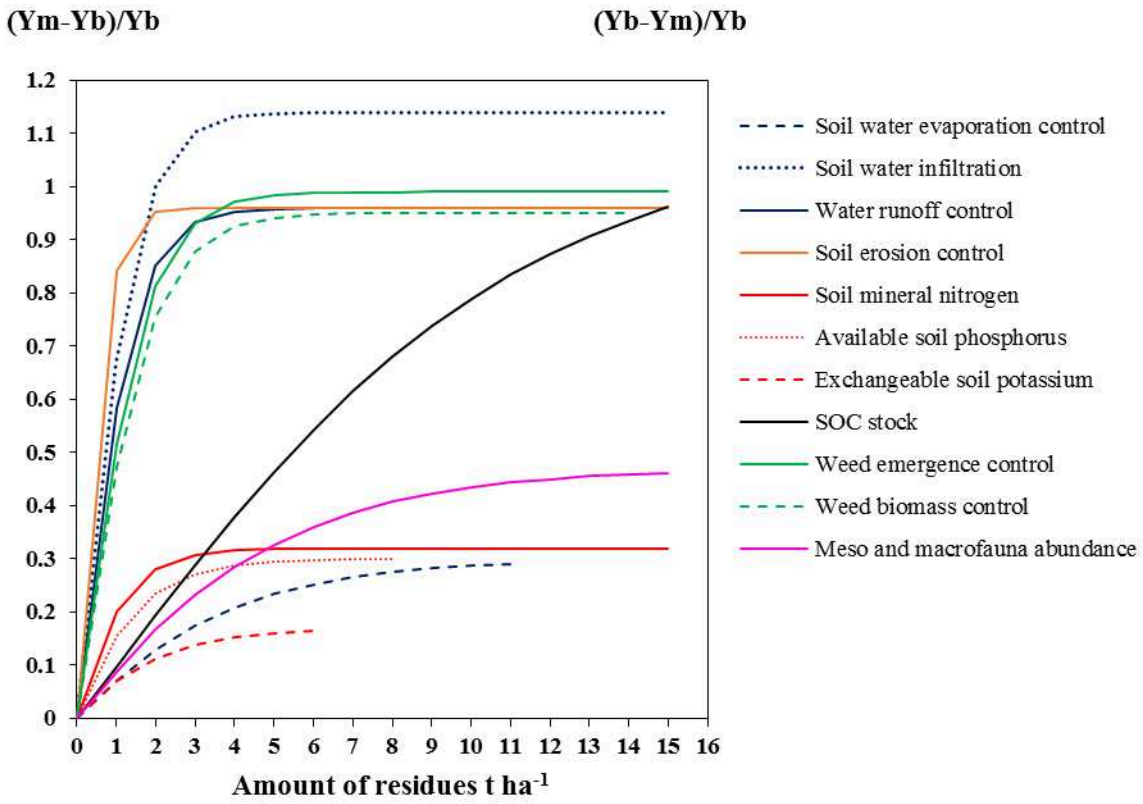


Figure 9 : Maximum effect of surface crop residues in relation to their amount for a set of agro-ecological functions.
Effect of residues was calculated as (Ym-Yb)/Yb for soil water infiltration, available N P K, SOC stock and meso- and macro-fauna abundance, which have positive impacts on crop production; and (Yb-Ym)/Yb for soil water evaporation, water runoff, soil erosion, weed emergence and weed biomass, which have negative impacts on crop production. Ym = agro-ecological function on mulched soil, Yb = agro-ecological function on bare soil. The curves are the boundary lines fitted from published data using the maximum likelihood methodology.

Table 1: Parameters of the boundary lines fitted in this study

Agro-ecological function	Regression model	Estimate, a	Significance test of the parameter estimate (1)	Confidence interval of parameter estimate (95%)	r^2	IOA
Soil water evaporation control	y ~ (1.30/(1 + 0.30 * exp(-a * x))) - 1	0.344	***	0.256 ; 0.430	0.98	0.94
Soilwater infiltration	y ~ (2.14/(1 + 1.14 * exp(-a * x))) - 1	1.402	*	0.413 ; 2.391	0.97	0.95
Water runoff control	y ~ (1.96/(1 + 0.96 * exp(-a * x))) - 1	1.405	*	0.473 ;2.337	0.85	0.82
Soil erosion control	y ~ (1.96/(1 + 0.96 * exp(-a * x))) - 1	2.702	***	1.861 ; 3.543	0.99	0.97
Soil mineral nitrogen	y ~ (1.32/(1 + 0.32 * exp(-a * x))) - 1	1.184	NS	-0.017 ; 2.385	0.94	0.91
Available soil phosphorus	y ~ (1.30/(1 + 0.30 * exp(-a * x))) - 1	0.867	NS	-0.264 ; 1.998	0.96	0.90
Exchangeablesoil potassium	y ~ (1.17/(1 + 0.17 * exp(-a * x))) - 1	0.600	NS	-	-	-
SOC stock	y ~ (2.09/(1 + 1.09 * exp(-a * x))) - 1	0.187	**	0.109 ; 0.264	0.84	0.82
Annual gain of SOC	y ~ (2.75/(1 + 1.75 * exp(-a * x))) - 1	0.313	***	0.228 ; 0.399	0.91	0.86
Weed emergence control	y ~ (1.99/(1 + 0.99* exp(-a * x))) - 1	1.156	***	0.767 ; 1.543	0.86	0.84
Weed biomass control	y ~ (1.95/(1 + 0.95* exp(-a * x))) - 1	1.075	**	0.626 ; 1.524	0.96	0.93
Meso- and macro-fauna abundance	y ~ (1.47/(1 + 0.47 * exp(-a * x))) - 1	0.295	**	0.199 ; 0.390	0.99	0.95

*(1) *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; NS = not significant; x: amount of residues, y: agro-ecological function performance, IOA: index of agreement, SOC: soil organic carbon*

4. Conclusions

This systematic review of the agro-ecological functions of crop residue cover showed the overall beneficial effects of increasing the amounts of residues retained in the field as mulch. The amount of residue needed to have a significant effect compared to bare soil varied according to the agro-ecological function. Our analysis showed that more than 8 t ha^{-1} of residues was needed to decrease soil water evaporation by about 30% compared to a no-till bare soil. On the other hand, residue amounts of 2 to 3 t dry matter ha^{-1} were sufficient to significantly improve soil water infiltration and control soil loss and water runoff. Soil nutrient (N, P and K) availability and SOC stocks showed relatively weak responses to increased amounts of residues. The boundary line models for soil N, P and K supply were not significant. The estimated average annual gains in SOC were relatively low, with a mean of 0.38 t ha^{-1} $year^{-1}$ of SOC for residue amounts of 4 to 5 t ha^{-1}. The maximum effects of residue cover on weed emergence and biomass control were reached with 4 t ha^{-1} of residues or more,

and corresponded to a decrease of more than 90% compared to bare soil. Soil meso- and macro-fauna abundance showed a weak response to increasing residue levels. The maximum effect corresponded to an increase of 45% compared to no-till bare soil and was reached from 10 t ha^{-1} of residues. However, the predictive power of the derived functions should be considered with caution, particularly for soil water evaporation and soil nutrient availability, for which available data from the published literature were very limited.

The optimal amounts of surface residues in the practice of conservation agriculture will depend on the type of constraints to crop production which can be addressed with mulching. In high-input cropping systems, the role of surface residues may be more that of enhancing soil water processes, especially water runoff and soil erosion control, while in low-input systems, the role of mulching lies probably more in enhancing soil fertility through maintaining or increasing SOC stocks.

In reality, for many farmers leaving optimal levels of surface residues on their fields is problematic because of trade-offs that exist with other uses. For example, small-scale farmers in sub-Saharan Africa tend to give precedence to using residues for livestock feed; not feeding crop residues to livestock would create too great a trade-off in livestock production on their farms. Likewise, commercial large-scale producers of maize in the USA or South America may find it economically more attractive to harvest maize residues for ethanol production and give preference to this rather than its use as mulch on the soil.

Acknowledgements: We would like to thank FOFIFA (Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural), CIRAD (Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement), the ABACO project (Agroecology-based aggradationconservation agriculture) funded by the European Union and the CARIM project (Conservation agriculture in rice cropping systems in Madagascar: sustainability and adoption) funded by the Agropolis Foundation, for financial support.

CHAPITRE 2 : EFFETS PHYSIQUES DU MULCH SUR L'ENHERBEMENT DES PARCELLES

Ce chapitre a été publié dans le journal *Field Crop Research* :

Ranaivoson, L., Naudin, K., Ripoche, A., Rabeharisoa, L., Corbeels, M., 2018. Is mulching an efficient way to control weed infestation? Effects of type and amount of crop residues on weeds in rainfed rice based cropping systems in Madagascar. F Crop Res 217:20–31. doi: 10.1016/j.fcr.2017.11.027

Les adventices constituent une contrainte majeure pour l'agriculture dans les systèmes de production tropicaux, en particulier pour les petits exploitants agricoles qui ne peuvent pas se permettre d'acheter des herbicides. Il a été avancé que la couverture du sol avec les résidus de récolte peut limiter la pression des adventices dans les systèmes en agriculture de conservation.

Dans ce chapitre, nous avons quantifié l'effet d'une augmentation de la quantité de résidus de culture laissés sur les parcelles sur l'émergence des adventices, la biomasse des adventices et le rendement du riz en menant des experimentations agronomiques. L'expérience a été reconduit pendant quatre saisons culturales dans la région du lac Alaotra, Madagascar. Deux types de paillis ont été appliqués sur un sol non labourré, *Stylosanthes guianensis* et un mélange de maïs et *Dolichos lablab*, avec des quantités allant de 0 à 45 Mg de matière sèche ha^{-1}. L'émergence des adventices a été mesurée chaque semaine à partir du jour de la première pluie qui a déclenché l'émergence des adventices jusqu' à 100 jours par la suite, et la biomasse des adventices a été mesurée à quatre dates au cours de la saison culturale.

Is mulching an efficient way to control weeds? Effects of type and amount of crop residue in rainfed rice based cropping systems in Madagascar

Lalaina Ranaivoson[a,b,*], Krishna Naudin[b,c], Aude Ripoche[b,d], Lilia Rabeharisoa[e], Marc Corbeels[b,f]

[a] Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), BP 1690, Antananarivo, Madagascar

[b] Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UPR AIDA, F-34398 Montpellier, France. AIDA, Univ Montpellier,

CIRAD, Montpellier, France

[c] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Cerrados, Planaltina, DF 73310-970, Brazil

[d] Centre National de Recherche Appliquée au Developpement Rural (FOFIFA), SRR, BP 230, Antsirabe, Madagascar

[e] Université d'Antananarivo, LRI, 101, Antananarivo, Madagascar

[f] International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), Sustainable Intensification Program, P.O. Box 1041-00621, Nairobi, Gigiri, Kenya

ABSTRACT

Weeds are a major constraint to crop yields in tropical production systems, especially for smallholder farmers who cannot afford to purchase herbicides. It has been argued that the practice of mulching with crop residues can suppress weeds in conservation agriculture systems. However, few data are available on the effect of crop residue mulching on weed infestation. In this study we quantified the effect of increasing amounts of surface crop residues on weed emergence, weed biomass production and rice yield. The experiment was conducted during four growing seasons in the Lake Alaotra region, Madagascar. Two types of mulch were applied on a no-tilled soil, Stylosanthes guianensis and a mixture of maize and Dolichos lablab, with different amounts ranging from 0 to 45 Mg dry matter ha^{-1}. Weed emergence was measured every week from the day of the first rain that triggered weed germination to 100 days thereafter, and weed biomass was monitored at four dates during the cropping season. Our results show that weed emergence and weed biomass decreased with increasing amount of residue. More than 10 Mg ha^{-1} was, however, needed to significantly reduce weed emergence and weed biomass as compared to the bare soil treatment without surface residues. Rice grain yields decreased by 16% for an increase in weed biomass of one Mg ha^{-1}. Our results indicate that mulching is not a viable option of weed control for smallholder farmers, given the low amounts of residue currently retained on their fields, which is at best about 4 Mg ha^{-1} in the case of a stylosanthes crop and about 5 Mg ha^{-1} in case of dolichos intercropped with maize.

Key words: Weed emergence; Weed biomass; Rainfed rice; No till, Conservation agriculture, Smallholder farms

1. Introduction

Weeds are one of the most severe biotic constraints to food production (FAO 2017). They act as competitive plants to the cultivated crop for several resources, such as light, water and nutrients, which may result in important crop yield losses (Oerke 2006). Moreover, their control increases labor demand and inflates the crop production costs. Smallholder farmers in developing countries generally lack adequate access to external inputs, such as herbicides or mechanization, to control weeds. They mostly rely on hand weeding which is an effective method and does not require extensive knowledge, but is highly time consuming and labor intensive (Tu et al. 2001).

The Lake Alaotra region in Madagascar has a great agricultural potential with a predominance of rice farming and livestock keeping. This region is the second largest area of rice production in Madagascar with more than 100 000 ha of cultivated rice. Because of limited availability of land in the irrigated plains, rice production in this region has expanded into the rainfed upland areas. These areas are generally characterized by low crop productivity, mainly due to low soil fertility, low access to fertilizers and high weed infestation. In contrast to the irrigated lowlands, use of flooding is not an option to control weeds. Moreover, upland rice production suffers from labor shortages and limited access to mechanized equipment and herbicides for weed control. In general, available farm labor and capital are preferably used on the more productive lowland fields to optimize resource use and minimize risks on the farms (Lallau 2008). Therefore, there is a need for alternative methods of weed management in upland rice fields.

Conservation agriculture has been introduced in the Lake Alaotra region in the late 90s to improve crop productivity of rainfed agriculture (Husson and Rakotondramanana 2006). Conservation agriculture is based on three principles: minimum soil disturbance, permanent organic soil cover and diversification of crop species grown in rotations and/or associations (FAO 2015). One of the expected functions of the soil cover or mulching is to reduce weed infestation. Crop residues that are retained on the soil surface can interfere with weed establishment by physically impeding their emergence (Teasdale and Mohler 2000), creating a microclimate that disturbs weed germination and weed development (Teasdale and Mohler 1993) or by releasing allelopathic substances that inhibit weed germination and growth (Liebman and Mohler 2001). The efficiency of weed control through mulching depends on the type of crop residue and the amount of residue left on the field (e.g. Ranaivoson et al, 2017, Teasdale and Mohler 2000; Radicetti et al. 2013; Ngwira et al. 2014). There is, however, a lack of information on the amount of residue required to effectively reduce weed infestation.

This study aims to quantify the effect of the type and amount of crop residue on weed emergence, weed biomass production and rice yield under no-tillage in upland fields in the Lake Alaotra region of Madagascar.

2. Material and methods

2.1. Study site

The study was carried out on the research station of the National Research Center for Rural Development (FOFIFA) located at Ambohitsilaozana (17°30'S; 48°30'E, 780 m asl) in the Lake Alaotra region, Madagascar. This region is characterized by a mid-altitude tropical climate, Cfa (Köppen classification), with a mean annual temperature of 22°C. The cropping season starts at the end of November with the onset of the rains and ends in April. The mean seasonal rainfall recorded between 2004/05 and 2014/15 was 1040 mm. The soil of the experimental site is an Orthic Ferralsol (FAO classification). Selected physical and chemical properties of the topsoil layer (0-20 cm) are shown in Table 1.

Table 1: Selected physical and chemical properties of the soil
Data corresponds to the 0–20cm topsoil layer of the experimental field at the FOFIFA research station located in Lake Alaotra, Madagascar; SD: standard deviation; n: number of samples.

	mean	SD	n
pH (H_2O)	5.2	0.2	60
Clay (%)	31.2	6.2	60
Silt (%)	41.9	3.4	60
Sand (%)	26.9	4.7	60
Olsen P (mg kg^{-1})	316.3	41.4	60
CEC (meq $100g^{-1}$)	7.0	2.8	60
Organic C (g kg^{-1})	34.7	4.3	8

2.2. Field experiment

An experiment was conducted to study the effects of surface crop residues on weed dynamics and rice yield. Field trial were set up during four growing seasons, from 2010 to 2015 (season 2010/11 = year 1; 2011/12 = year 2; 2013/14 = year 3 and 2014/15 = year 4 in this paper). Each year, a trial was established on a different part of the experimental field to eliminate residual treatment effects on weed dynamics and on the soil seed bank from one year to another. At the start of each trial, existing aboveground biomass was removed from the site. A trial was located at a maximum distance of 10 m from the previous one.

The experimental design for each trial was a randomized complete block with four replications. Treatments consisted of two types of crop residue mulches, *Stylosanthes guianensis* (S) and a mixture of maize (*Zea mays*) and *Dolichos lablab* (MD), and different amounts of these residues, ranging from 0 to 45 Mg dry matter ha^{-1} (Table 2). The

corresponding proportions of soil cover were calculated using the equation described in Gregory (1982):

$$F_c = 1 - e^{-A_m * M} , \quad \text{(Equation 1)}$$

where F_c is the proportion of soil covered, A_m is the area-to-mass ratio of the residue in $m^2\ kg^{-1}$ (0.377 for S residue and 0.251 for MD residue, Naudin et al. 2012)) and M is the amount of residue in kg m^{-2}.

During the first two growing seasons (year 1 and 2), 15 treatments were studied corresponding to seven levels of soil cover for each type of crop residue and a bare soil treatment (Table 2). The crop residues were brought from a nearby field. Amounts of crop residue covered a wide range, including large quantities, to determine the potential effects of surface residues on weed emergence and weed biomass production. No crop was grown during year 1 and year 2. During the 2013/14 and 2014/15 seasons (year 3 and 4) we reduced the number of treatments (levels of soil cover) based on the results of the previous years, whilst still encompassing a range from 0 to 99.9 % soil cover (Table 2). Four levels of soil cover were applied for each type of residue along with a bare soil treatment, and a rice crop was grown. The rice cultivar used was B22, a short-duration (120 days) upland rice variety from the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA) that is adapted to the agro-ecological conditions of the Lake Alaotra region. Rice was sown manually under no-tillage using a planting stick with an inter-row spacing of 40 cm and intra-row spacing of 20 cm. No fertilizer, herbicides or pesticides were applied on the treatments. Weeding was done manually (Table 3).

The individual plot sizes in each trial were 4 m² (2 x 2 m). Each year, crop residues were brought on the soil surface during the last week of November, which corresponds to the start of rainy season.

Table 2: Experimental treatments during the four growing seasons
Amounts of residue (Mg dry matter ha^{-1}) applied and the corresponding proportion of soil cover (%) for both types of residue used.

Type of residue	2010/11		2011/12		2013/14		2014/15	
	Quantity (Mg ha^{-1})	Cover (%)	Quantity (Mg ha^{-1})	Cover (%)	Quantity (Mg ha^{-1})	Cover (%)	Quantity (Mg ha^{-1})	Cover (%)
Bare soil	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stylosanthes	0.6	20.2	1.1	32.7	0.9	30.0	0.9	30.0
	1.5	43.8	2.7	63.9	3.2	70.0	3.2	70.0
	2.7	63.7	4.7	83.3	12.2	99.0	12.2	99.0
	3.9	76.6	6.8	92.3	18.3	99.9	18.3	99.9
	7.7	94.5	13.6	99.4				
	11.6	98.7	20.4	100.0				
	17.4	99.9	27.2	100.0				
Maize + dolichos	0.7	16.1	1.8	35.7	1.4	30.0	1.4	30.0
	1.8	36.4	4.5	67.8	4.8	70.0	4.8	70.0
	3.2	55.2	7.9	86.4	18.4	99.0	18.4	99.0
	4.6	68.5	11.4	94.2	27.6	99.9	27.6	99.9
	9.2	90.1	22.7	99.7				
	13.8	96.9	34.1	100.0				
	20.7	99.4	45.5	100.0				

2.3. Measurements

Weed emergence (number of seedlings m^{-2}) was measured during the four growing seasons of the experiment, following a method used by Jodaugienė et al. (2006); Moore et al. (1994); Teasdale and Mohler (2000) and Webster et al. (2016). Measurements were done on a single fixed quadrat of 0.25 m² (0.5 x 0.5 m) in each individual plot of the trials. Emerged seedlings (monocots and dicots) were counted and removed from the quadrats at 7-day intervals from the day of the first rain that triggered weed germination to 100 days after the first rain (DAF).

Weed biomass production (Mg dry matter ha^{-1}) was measured during year 3 and year 4. Measurements were done on a single fixed quadrat of 1 m² (1 x 1 m) in each individual plot of the trials at each weeding operation and at rice harvest (Table 3). Weeds were cut at soil level, oven-dried at 70°C for 48 h and weighted to obtain dry matter contents. Monocots and dicots were weighted separately.

Rice grain yields (Mg dry matter ha^{-1}) were determined during year 3 and year 4. Measurements were done at physiological maturity on the quadrats of 1 m² (1 x 1m) that were

used for the weed biomass measurements. Panicles were hand-threshed; all spikelets were stripped from panicles. Unfilled spikelets were removed and filled spikelets were weighted to estimate grain yield. Moisture content of filled spikelets was determined by oven-drying at 70°C for 48 h. All results were expressed as dry matter on hectare basis.

Table 3: Field operations during the 2013/14 and 2014/15 growing seasons
DAS: days after rice sowing

Cropping practices	2013/14		2014/15	
	Date	DAS	Date	DAS
Rice sowing	06/12/13	-	08/12/14	-
First weeding	07/01/14	32	31/12/14	23
Second weeding	30/01/14	55	04/02/15	58
Third weeding	07/03/14	91	19/03/15	101
Fourth weeding	21/03/14	105	14/04/15	127
Rice harvest	25/03/14	109	16/04/15	129

2.4. Residue decomposition

Decomposition of both types of crop residue (S or MD) was measured in 2011/12, 2013/14 and 2014/15 using a litterbag experiment (Maltas et al. 2009) that was set-up in a rice field under no-tillage located near the weed trial sites. Each year, air-dried samples of S and MD residues were collected randomly from a field experiment where respectively stylosanthes, and dolichos intercropped with maize were grown. The residues (stems and leaves) were chopped into pieces with length of less than 20 cm. Nylon litterbags (20 x 25 cm) with a mesh size of 2 mm were filled with an amount of residue that corresponded to about 6 - 7 Mg dry matter ha^{-1}. The two residue treatments were arranged in plots on the rice field in a randomized complete block design with four replications. On each plot, twenty-four litterbags of each type of residue were randomly placed on the soil surface and collected every 10 - 15 days from the start of the rice growing season to harvest date (8 sampling dates with 3 litterbags randomly withdrawn per sampling date). Each sample was air-dried, and the contents brushed free of soil, oven-dried at 70°C for 48 h and weighted to determine dry matter content. Results were expressed as percentage of to the initial amount dry matter amount present in the litterbag.

2.5. Data analysis

Data on weed emergence were presented and analyzed from the day of the first rain that triggered weed germination to 100 DAF for each growing season. Cumulative weed emergence and weed biomass on each date of measurements were subjected to analysis of variance (ANOVA) to test the effects of the amount of residue and the interactive effect of

type and amount of residue. The means of the treatments were compared to the reference bare soil treatment on each date of measurements using Dunnett's test at $P < 0.05$. Data were analyzed separately by year.

Regression analysis was performed to determine the relationship between respectively cumulative weed emergence and weed biomass at 100 DAF, and amount of residue. Exponential functions gave the best fits.

Correlation analysis was performed to examine the relationship between weed emergence and weed biomass production. The Pearson's correlation coefficient (r) and its significance (P value) were used to evaluate the relationships. Equality of slopes between the two types of residue for each year was evaluated based on Akaike information criterion (AIC) (Akaike 1974).

The rate of decomposition of S and MD residues was estimated by fitting an exponential equation to the observed data from the litterbag experiment for each growing season.

Rice grain yields were subjected to ANOVA to test the effect of the type and amount of residue. Means of treatments were separated using least significant difference (LSD) at $P < 0.05$. Rice grain yields during year 3 and year 4 were analyzed separately. Correlation analysis was performed to examine the relationship between rice yield and weed biomass. The Pearson's correlation coefficient (r) and its significance (P value) were used to evaluate the relationships.

All statistical analyses were performed with R software (*R*-3.3.1) using the package agricolae (De Mendiburu 2016), the package pscl version 1.4.9 (Jackman et al. 2015) and the package multcomp (Hothorn et al. 2008).

3. Results

3.1. Rainfall characteristics

Cumulative rainfall amounts from the date of the first rain that triggered weed emergence to 100 DAF showed high variability between the four growing seasons (Figure 1). The dates of first rains were 16 December 2010, 20 November 2011, 26 November 2013 and 21 November 2014. Year 1 was the driest year with 537 mm of cumulative rainfall at 100 DAF, followed by year 2 and year 3 with comparable rainfall amounts at 100 DAF (respectively 782 mm and 733 mm). The wettest year was year 4 with 1076 mm of cumulative rainfall at 100 DAF.

Before 30 DAF, rainfall patterns were similar for the four growing seasons. From 30 DAF, year 4 was characterized by continuous heavy rains until 100 DAF. Year 2 and year 3 showed several heavy rainfall events after 30 DAF, which was not the case for year 1 apart from one heavy rainfall event (56 mm) at 60 DAF.

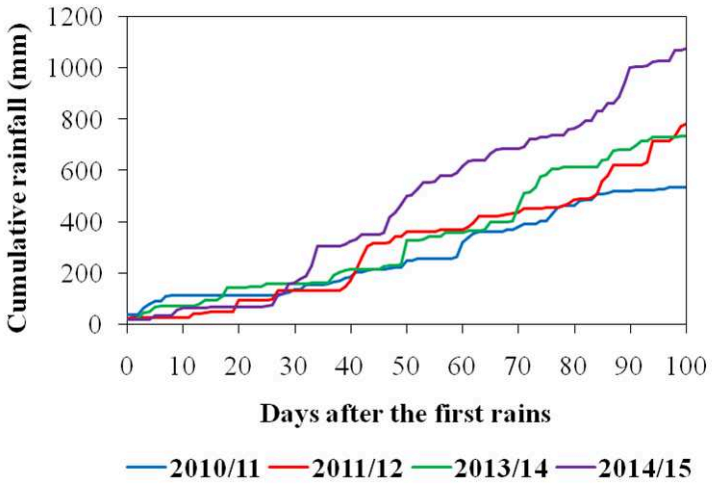


Figure 1: Cumulative rainfall amounts (mm) within 100 days following the first rain which triggered weed emergence
Data corresponded to the four growing seasons of the weed experiment at the FOFIFA research station located in the Lake Alaotra region, Madagascar. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

3.2. Crop residue decomposition

Rates of residue decomposition differed according to the growing season and the type of residue. In year 2 and year 4, S residue decomposed faster than MD residue, whereas the two types of residue had similar rates of decomposition in year 3. At the end of rice growing cycle (120 days after rice sowing (DAS)) about 65% of the initial residue biomass remained in year 3 (733 mm) for both residues types, 45% and 52% of the initial S and MD residue amounts in year 2 (782 mm), and 36% and 55% of the initial S and MD residue amounts in year 4 (1076 mm) (Figure 2).

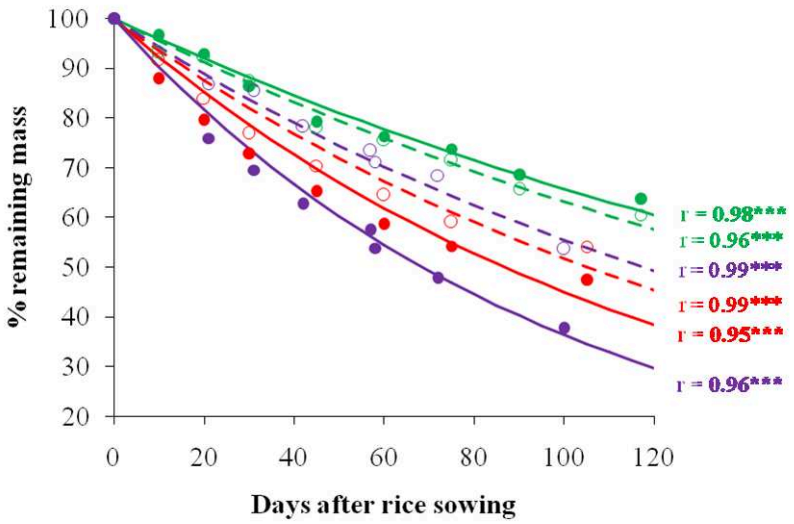


Figure 2 : Decomposition of S and MD residues during 2011/12 (red), 2013/14 (green) and 2014/15 (purple)
Symbols are observed data (filled symbols for S residue and unfilled symbols for MD residue) and curves are fitted relationship (solid line for S residue and dotted line for MD residue), S: stylosanthes, MD: maize + dolichos. Asterisks indicate the significance level of the r value: *** $P < 0.001$. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

3.3. Weed emergence

3.2.1. Dynamics of weed emergence

The main weed species observed in the experiment during the four growing seasons were *Digitaria horizontalis*, *Commelina benghalensis* and *Eleusine indica* for monocot weeds; *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia hirta*, *Mitracarpus hirtus* and *Ageratum conyzoides* for dicot weeds (*cf. Annexe 2*).

During the two growing seasons without rice crop (year 1 and 2), a large proportion of the total weed emergence (at 100 DAF) on bare soil was reached before 30 DAF, 918 seedlings m^{-2} and 1408 seedlings m^{-2} in respectively year 1 and year 2 corresponding to 74% and 50% of total weed emergence (Figure 3a,b,e,f). On the other hand, during the two growing seasons with rice crop (year 3 and year 4), 369 seedlings m^{-2} and 593 seedlings m^{-2}, corresponding to less than 20% of total weed emergence occurred in the bare soil treatment before 30 DAF respectively (Figure 3c,d,g,h). In year 3, weed emergence was in general low compared to the other years and increased continuously during the growing season for amounts of residue less than 10 Mg ha^{-1} (Figure 3c,g). In year 4, weed emergence occurred in general mainly between 25 - 55 DAF irrespective of the type of residue, which corresponded to the period of high and continuous rainfall (Figure 3d,h).

ANOVA results showed that the interactive effect of amount and type of residue on weed emergence (total, monocot, dicot) was not significant ($P \geq 0.05$) at any date of measurements for year 1, year 2 and year 4. In year 3, the interactive effect of amount and type of residue was significant ($P \leq 0.05$) on total and monocot weed emergence at all dates of measurements, and on dicot weed emergence from 27 to 100 DAF.

Results of Dunnett's significance test at $P \leq 0.05$ for differences of weed emergence between the bare soil treatment and treatments with residue cover are shown in *Annexe 3*.

During the driest year 1, the amount of residue (S or MD) required to significantly reduce weed emergence varied over time. Treatments with more than 9.2 Mg ha^{-1} of residue significantly reduced total weed emergence as compared to the bare soil between 19 and 70 DAF, whilst more than 20.7 Mg ha^{-1} was needed to have the same effect from 77 to 100 DAF (Figure 3a,e; *Annexe 3*). Treatments with more than 9.2 Mg ha^{-1} of residue (S or MD) significantly reduced monocot weed emergence as compared to the bare soil from 19 to 100 DAF. Dicot weed emergence was significantly higher in treatment with 1.5 Mg ha^{-1} of residue as compared to the bare soil between 19 - 42 DAF. More than 9.2 Mg ha^{-1} of residue was needed to significantly reduce dicot weed emergence between 19 - 35 DAF, whereas mulching had no significant effect on dicot weed emergence between 42 - 100 DAF. In year 2, more than 13.6 Mg ha^{-1} of residue (S or MD) were needed to significantly reduce total weed emergence as compared to the bare soil between 68 - 100 DAF (Figure 3b, f; *Annexe 3*). Emergence of monocots was significantly reduced in treatments with 20.4 Mg ha^{-1} of residue at 19 DAF, whilst treatments with 13.6 Mg ha^{-1} of residue significantly reduced monocot weed emergence between 26 - 100 DAF. Treatments with residue amounts of 20.4 Mg ha^{-1} or more significantly reduced emergence of dicots as compared to the bare soil between 68 - 100 DAF. During year 3 with rice crop, total weed emergence was significantly reduced in treatments with more than 12.2 Mg ha^{-1} of S residue and 18.4 Mg ha^{-1} of MD residue as compared to the bare soil between 20 - 100 DAF (Figure 3c,g; *Annexe 3*). Monocot weed emergence was significantly reduced in treatments with more than 3.2 Mg ha^{-1} of S residue and 18.3 Mg ha^{-1} of MD residue between 27 - 41 DAF, whilst 18.3 Mg $ha^{-1}$of S residue and 27.6 Mg ha^{-1} of MD residue were needed between 20 - 100 DAF for the same effect. Dicot weed emergence was significantly reduced as compared to the bare soil between 69 - 83 DAF in treatments with more than 12.2 Mg ha^{-1} of residue irrespective of the type of residue, whereas the amount needed increased to 18.3 Mg ha^{-1} of residue at 90 and 100 DAF for MD residue. In year 4, total weed emergence was significantly higher as compared to the bare soil in treatments with 3.2 Mg ha^{-1} of S residue and 4.8 Mg ha^{-1} of MD residue at 25 DAF. Between 39 - 100 DAF, it was significantly reduced in treatments with more than 12.2 Mg ha^{-1} (Figure 3d,h; *Annexe 3*). Monocot weed emergence was significantly higher in treatments with 3.2 Mg ha^{-1} of residue (S or MD) at 25 DAF, whilst it was significantly reduced in treatments with more than 12.2 Mg ha^{-1} of residue between 46 - 100 DAF as compared to the

bare soil. Dicot weed emergence was also higher as compared to the bare soil in treatments with 4.8 Mg ha^{-1} of residue at 25 DAF, and more than 18.3 Mg ha^{-1} of residue was needed to significantly reduce dicot weed emergence between 39 - 100 DAF.

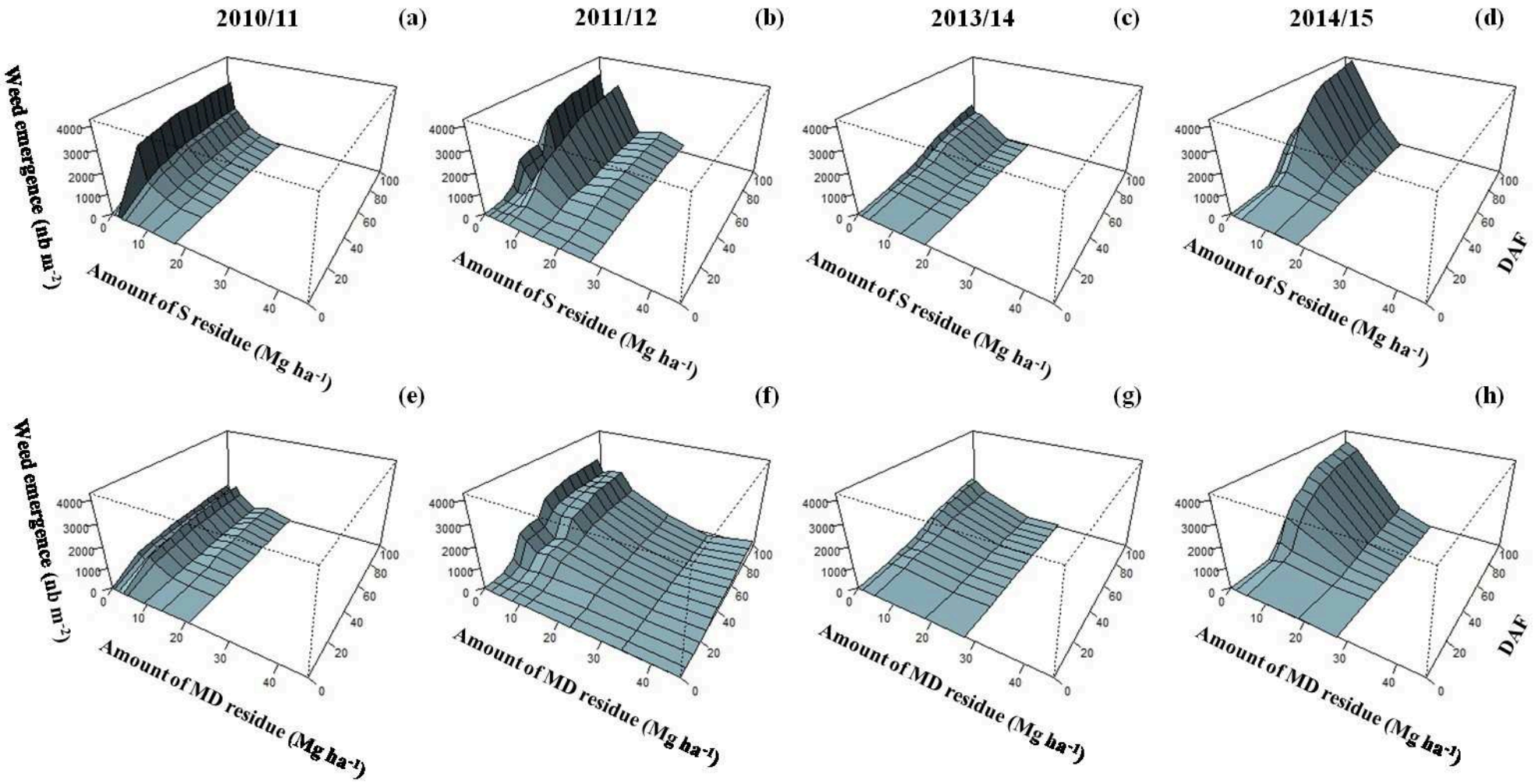


Figure 3 : Relationship between total weed emergence and amount of residues from the first rain to 100 DAF

Data corresponds to total weed emergence (number of seedlings m^{-2}) during the four growing seasons according to the amount of residue (Mg ha^{-1}) for the two types of residue: S (a, b, c, d) and MD (e, f, g, h), S: stylosanthes, MD: maize and dolichos, DAF: days after the first rain.

3.2.2. Effect of increasing amount of residue on cumulative weed emergence

Cumulative weed (total, monocots and dicots) emergence at 100 DAF declined with increasing amount of residue for both types of residue during the four growing seasons following exponential decay functions (Figure 4). According to the ANOVA results (Table 4), the interactive effect of amount and type of residue was not significant ($P \geq 0.05$) on cumulative total and monocot weed emergence during year 1, 2 and 4. In contrast, in year 3 cumulative total and monocot weed emergence was significantly ($P \leq 0.05$) affected by the interactive effect of amount and type of residue. For example, 10 Mg ha^{-1} of S residue reduced total weed emergence by 80 % compared to bare soil, whilst the same amount of MD residue reduced total weed emergence by only 50 % (Figure 4b). With respect to cumulative dicot weed emergence, the interactive effect of amount and type of residue was significant ($P \leq 0.05$) in year 2 and year 3. For example, in year 3, 10 Mg ha^{-1} of S residue reduced emergence of dicots by 75 % as compared to the bare soil, whilst the same amount of MD residue reduced it only by 50 % (Figure 4f).

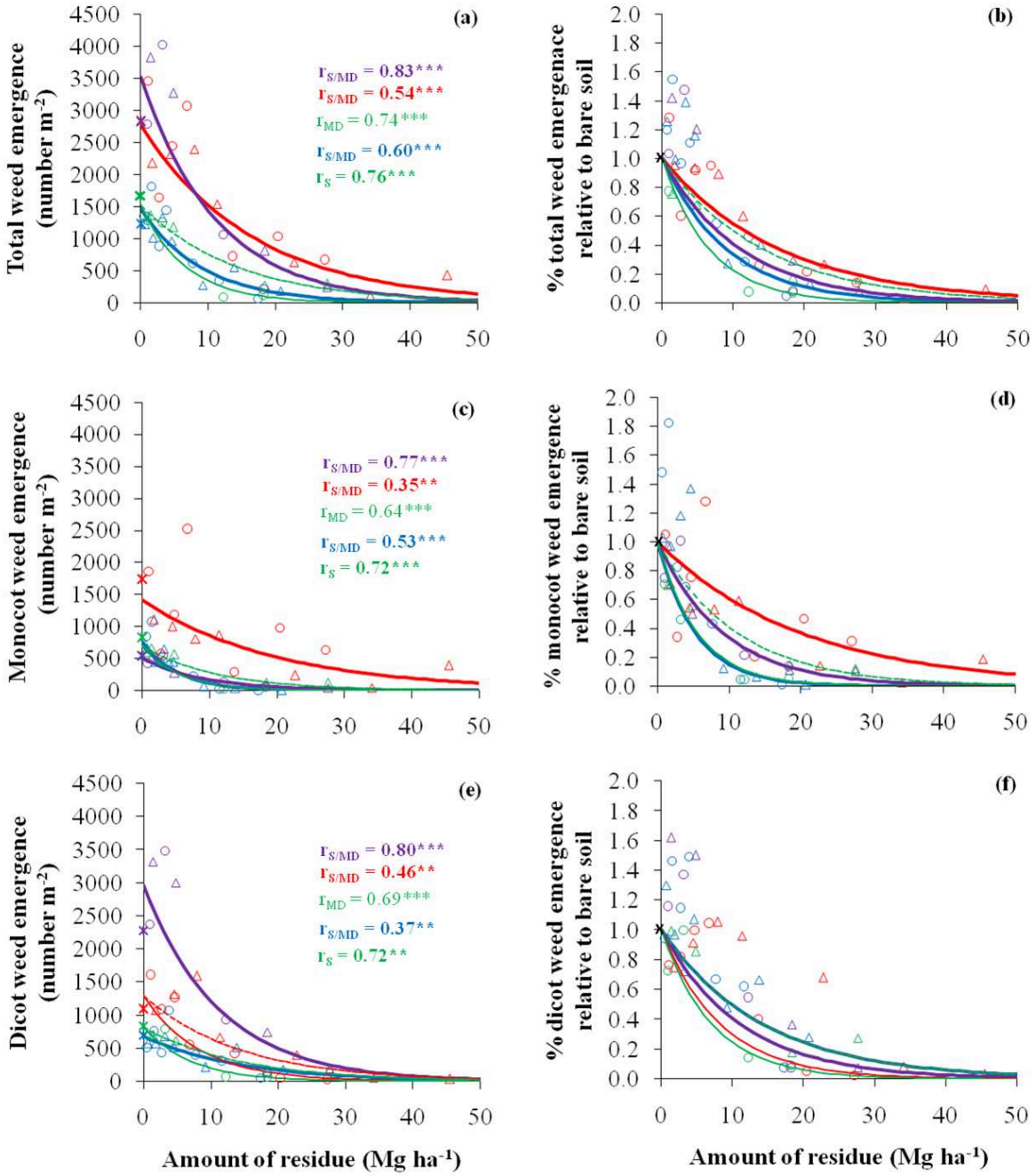


Figure 4: Relationship between cumulative weed emergence and the amount of residue
Data corresponds to absolute cumulative weed emergence (number of seedlings m^{-2}) (a, c, e) and cumulative weed emergence relative to that on bare soil (b, d, f) according to the amount of residue during year 1 (blue), year 2 (red), year 3 (green) and year 4 (purple) for total, monocot and dicot weeds. Regressions for the two types of mulch were combined (bold solid line) when there was no significant difference between them, if not S: solid line and MD: dotted line. Symbols are observed data (asterisks for bare soil, circles for S residue and triangles for MD residue). Astersisks of r-values indicate the significance level: *** $P \leq 0.001$; ** $P \leq 0.01$; S: stylosanthes, MD: maize + dolichos. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Table 4: P-values for the effect of amount and type of residue on cumulative weed emergence
ANOVA for effects of amount of residue and the interaction of amount and type of residue on cumulative weed emergence (total, monocot and dicot) at 100 DAF in year 1, year 2, year 3 and year 4 of the experiment.

	Total weed		Monocot weed		Dicot weed	
	amount	**amount x type**	**amount**	**Amount x type**	**amount**	**amount x type**
Year 1	***	NS	***	NS	**	NS
Year 2	***	NS	***	NS	***	*
Year 3	***	*	***	*	***	NS
Year 4	***	NS	***	NS	***	NS

*NS: not significant; *** $P \leq 0.001$; ** $P \leq 0.01$; * $P \leq 0.05$; DAF: Days after the first rain*

3.4. Weed biomass

3.3.1. Dynamics of weed biomass

Dynamics of weed biomass under bare soil during the rice growing season were different between year 3 and year 4 (Figure 5). In year 3, more than 70% of total weed biomass was reached from the second weeding onwards (55 DAS). Thereafter, from 60 DAS, increase of total weed biomass was relatively low (Figure 5a). In contrast, in year 4 a continuous increase of total weed biomass was observed from the first to the last weeding operation with the largest increase between 20 - 100 DAS (Figure 5b).

ANOVA results showed that the interactive effect of amount and type of residue was significant ($P \leq 0.05$) on total and monocot weed biomass production in year 3 at each date of weeding, but no significant effect ($P \geq 0.05$) on dicot weed biomass was found. In year 4, the interactive effect of amount and type of residue on total weed biomass was significant ($P \leq 0.05$) at the third and the last weeding operation, whereas no significant effect ($P \geq 0.05$) on monocot and dicot weed biomass was observed at any date of weeding.

Results of Dunnett's significance test at $P \leq 0.05$ for differences in weed biomass production between the bare soil treatment and the treatments with residue cover are shown in *Annexe 4*. In year 3, at the minimum 4.8 Mg ha^{-1} of MD residue and 12.2 Mg ha^{-1} of S residue significantly reduced total weed biomass as compared to the bare soil from the first to the last weeding. Total weed biomass production was less than 0.2 Mg ha^{-1} for treatments with more than 12.2 Mg ha^{-1} of both residue types from the first to the last weeding (Figure 5a). Biomass of monocot weeds was significantly reduced as compared to the bare soil with more than 18.4 Mg ha^{-1} of MD residue and 12.2 Mg ha^{-1} of S residue from the first to the last weeding date, whilst mulching had no significant effect on dicot weed biomass (Figure 5c,e, *Annexe 4*). In year 4 with high rainfall, surface residues (S or MD) had no significant effect on total weed biomass at the first weeding, whilst more than 18.4 Mg ha^{-1} of MD residue and 12.2 Mg ha^{-1}

of S residue was needed to significantly reduce total weed biomass as compared to the bare soil from the second to the last weeding date (Figure 5b). Biomass of monocot weeds was significantly reduced as compared to the bare soil with more than 4.8 Mg ha^{-1} of both residue types from the second to the last weeding date (Figure 5d). Surface residues (S or MD) had no significant effect on biomass of dicot weeds at the first and second weeding, whilst more than 18.3 Mg ha^{-1} of both residue types significantly reduced dicot weed biomass at the third and fourth weeding operation (Figure 5f).

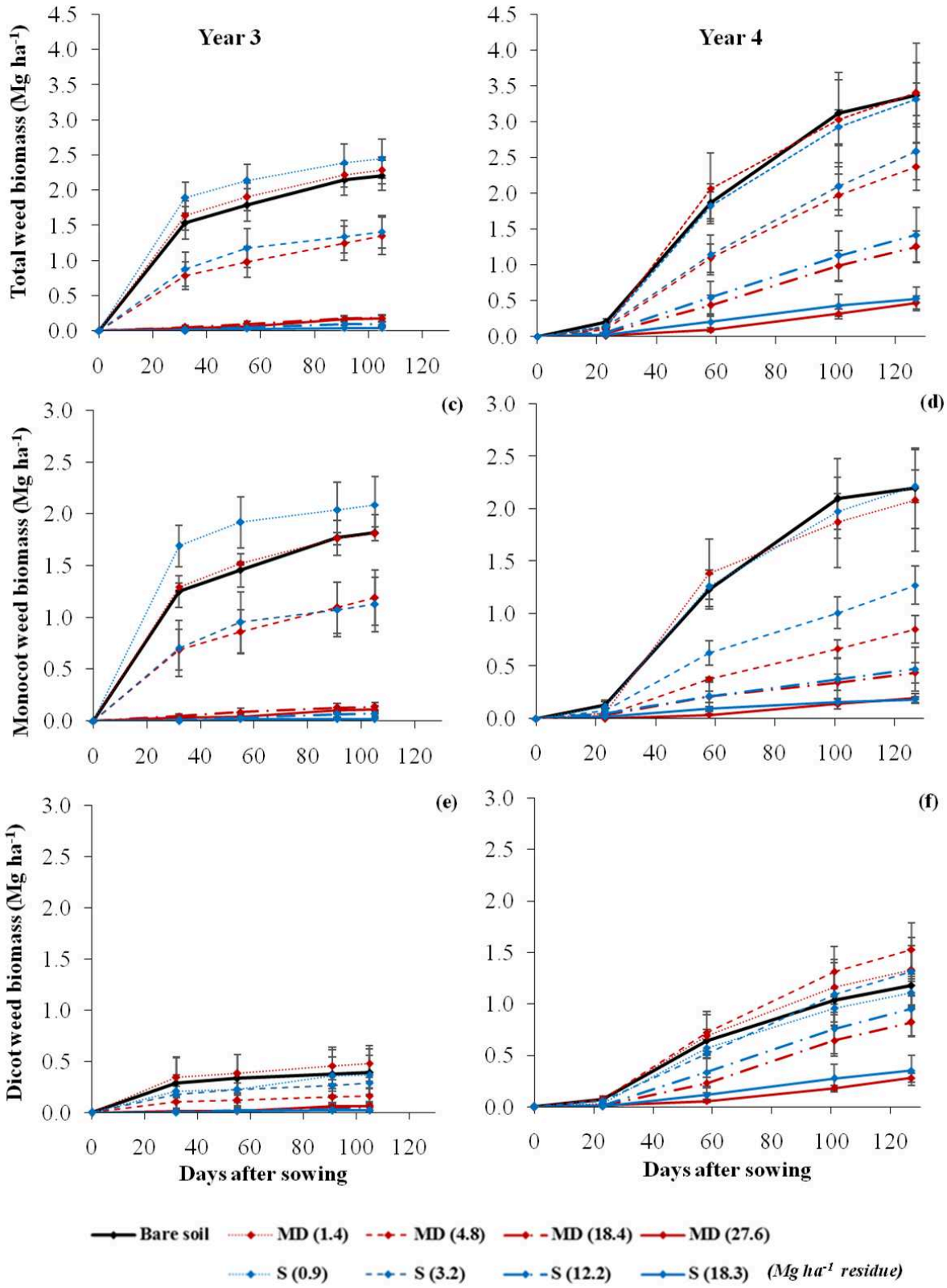


Figure 5: Evolution of weed biomass production in relation to the type and the amount of residue

Data corresponds to total, monocot and dicot weeds biomass according to the type of residue (red curves for MD and blue curves for S) and the amount of residue (Mg dry matter ha^{-1}) during the 2013/14 and 2014/15 growing season. Black curves correspond to the bare soil treatment. Vertical bars represent standard errors of the mean, S: stylosanthes, MD: maize + dolichos. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

3.3.2. Effect of increasing amount of residue on cumulative weed biomass

Cumulative weed (total, monocots, dicots) biomass production at 100 DAF decreased with increasing amount of residue for both types of residue (S and MD) during the two growing seasons (year 3 and 4) following exponential decay functions (Figure 6). According to the ANOVA results, the interactive effect of amount and type of residue was significant ($P \leq 0.05$) on cumulative total weed biomass during the two growing seasons (Figure 6a,b, Table 5). For example, 10 Mg ha^{-1} of S residue reduced total weed biomass by 90 % as compared to the bare soil in year 3, whilst the same amount of MD residue reduced total weed biomass by only 70 %. In year 4, 10 Mg $ha^{-1}$of residue reduced total weed biomass by 59 and 48 % in case of S and MD residue, respectively. The interactive effect of amount and type of residue on cumulative monocot weed biomass was significant ($P \leq 0.05$) in year 3, but not in year 4 (Figure 6c,d, Table 5). In year 3, cumulative monocot weed biomass was reduced by 91 % as compared to the bare soil with 10 Mg ha^{-1} of S residue, whilst it was reduced only by 72 % with the same amount of MD residue. The interactive effect of amount and type of residue on cumulative dicot weed biomass was not significant ($P \geq 0.05$) (Table 5) during the two growing seasons (Figure 6e, f). Amounts of 10 Mg ha^{-1} of residue reduced dicot weed biomass on average by 72 % and 38% as compared to the bare soil, respectively in year 3 and year 4.

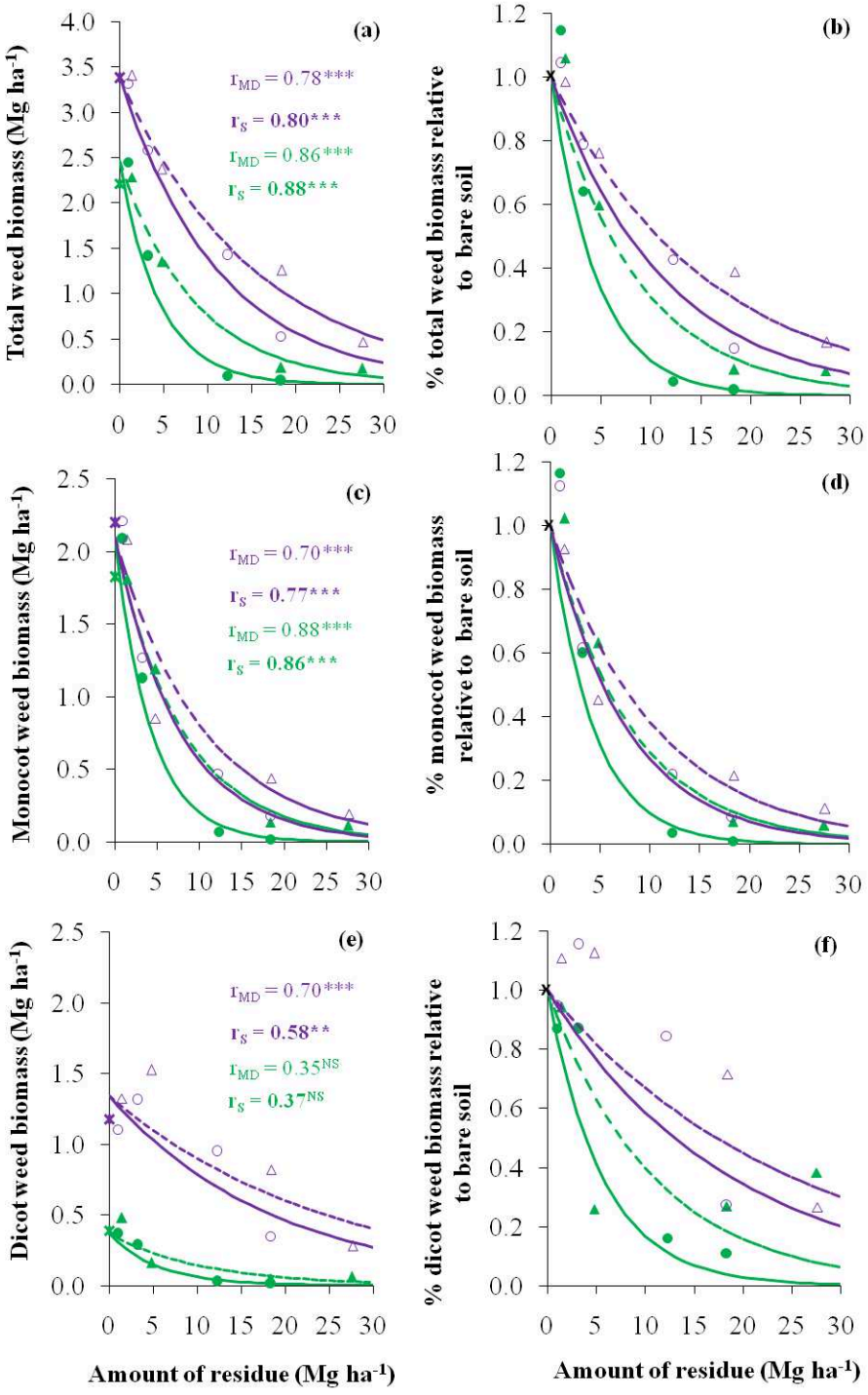


Figure 6 : Relationship between cumulative weed biomass and the amount of residue
Data corresponds to absolute cumulative weed biomass (Mg ha^{-1}) (a, c, e) and cumulative weed biomass relative to the bare soil (b, d, f) and the amount of residues for the two types of residues (solid line for S residue and dotted line for MD residue) during year 3 (color green) and year 4 (color purple) for total, monocot and dicot weeds. Symbols are observed data (asterisks for bare soil, circles for S residues and triangles for MD residues). Astersiks of r-values indicate the significance level: *** $P \leq 0.001$; ** $P \leq 0.01$; NS = not significant; S: stylosanthes, MD: maize + dolichos. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Table 5: P-values for the effects of amount and type of residue on cumulative weed biomass
Data corresponds to ANOVA result for effects of amount of residue and the interaction of amount and type of residue on cumulative weed biomass (total, monocot and dicot) at 100 DAF in year 3 and year 4 of the experiment.

	Total weed		Monocot weed		Dicot weed	
	amount	**amount x type**	**amount**	**Amount x type**	**amount**	**Amount x type**
Year3	***	***	***	***	***	NS
Year4	***	*	***	NS	***	NS

*NS: not significant; *** P ≤ 0.001; ** P ≤ 0.01; * P ≤ 0.05; DAF: Days after the first rain*

Weed emergence and weed biomass expressed relative to values of the bare soil treatment showed similar relationships in response to increasing amounts of residue for both types of residue (Figure 4b,6b). They were highly correlated (r= 0.83, *p-value* ≤ 0.001), as shown in Figure 7. The slope of the regression curves differed between years 3 and 4, and between the types of residue in year 3, based on AIC.

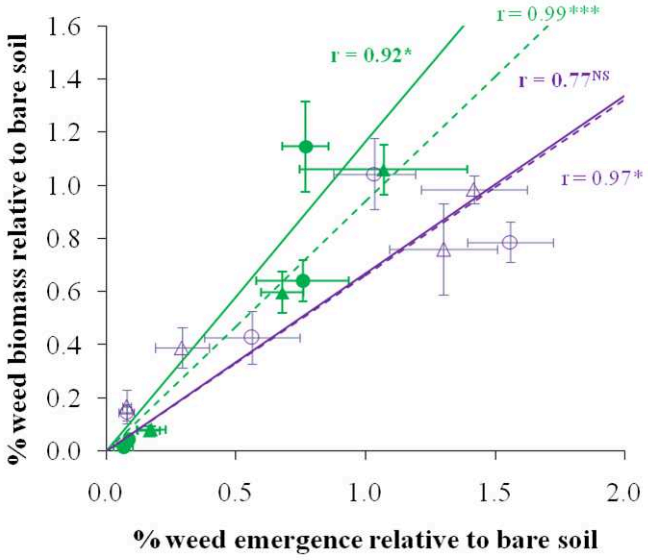


Figure 7: Correlation between weed biomass production relative to the bare soil treatment and weed emergence relative to the bare soil treatment
Data corresponds to year 3 (green) and year 4 (purple) depending on the type of residue (solid line for S residue and dotted line for MD residue). Symbols correspond to observed data (circles for S residue and triangles for MD residue). Vertical and horizontal bars represent standard errors of the mean. Asterisks indicate the significance level of the r value: *** P ≤ 0.001; * P ≤ 0.05; NS = not significant. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

3.5. Rice grain yield

Rice grain yield was significantly lower in year 4 than in year 3 ($P \leq 0.001$). Yields in year 4 were about 5% of those in year 3. The effect of mulching on rice yield was different depending on the growing season (Figure 8). In year 3, rice yield was significantly higher when the amount of residue was more than 12.2 Mg ha^{-1} for S residue whilst no significant effect was observed for MD residue (Figure 8a). In year 4, higher rice yields were observed only for the treatments with the highest amounts of residue, 18.3 Mg ha^{-1} and 27.6 Mg ha^{-1} respectively for S and MD residue (Figure 8b).

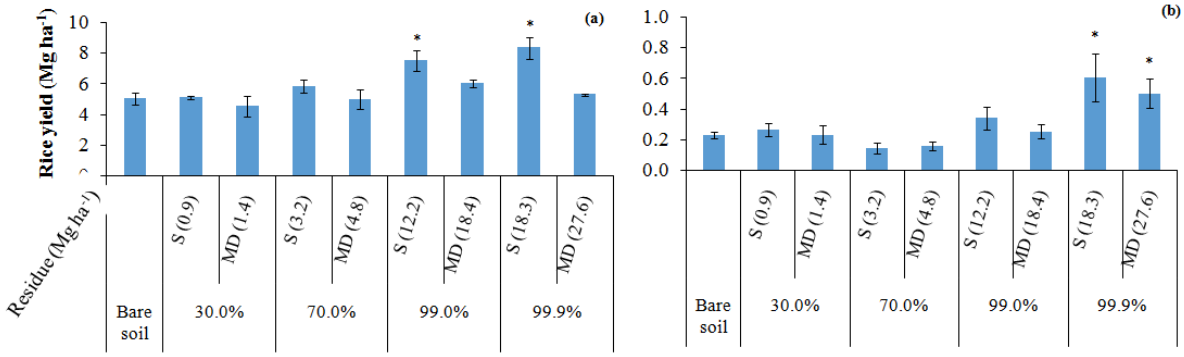


Figure 8: Rice grain yield in relation to the proportion of soil covered with corresponding amounts of residue

Data corresponds to year 3 (a) and year 4 (b). * represents significant differences as compared to the bare soil (LSD, $p \leq 0.05$). Vertical bars represent standard errors of the mean, S: stylosanthes, MD: maize + dolichos.

For both types of residue, rice grain yield decreased with increasing amount of weed biomass in both growing seasons (Figure 9). Correlation between rice yield and weed biomass was however only significant in case of the treatments with S residue. In year 3, grain yield in the S residue treatments was significantly correlated to total, monocot and dicot weed biomass ($r \geq 0.95$, $P \leq 0.05$), whilst these correlations were non-significant for MD residue (Figure 9a,c,e). In year 4, the relationship between rice yield and total or monocot weed biomass was not significant for both types of residue (Figure 9b,d). Dicot weed biomass showed a significant relationship with rice yield for S residue ($r = 0.99$, $P \leq 0.001$), whilst the relationship was non-significant for MD residue ($r = 0.93$, $P \geq 0.05$) (Figure 9f).

Estimated grain yield loss was on average 13% and 18% for an increase in weed infestation of one Mg ha^{-1}, respectively in year 3 and year 4 (Figure 9a, b). The bare soil treatment with on average 2.2 Mg ha^{-1} and 3.3 Mg ha^{-1} of total weed biomass in year 3 and year 4 resulted in a loss of 26% and 59% of rice yield compared to a totally covered soil that had the lowest total weed biomass amount (0.1 Mg ha^{-1} and 0.5 Mg ha^{-1}).

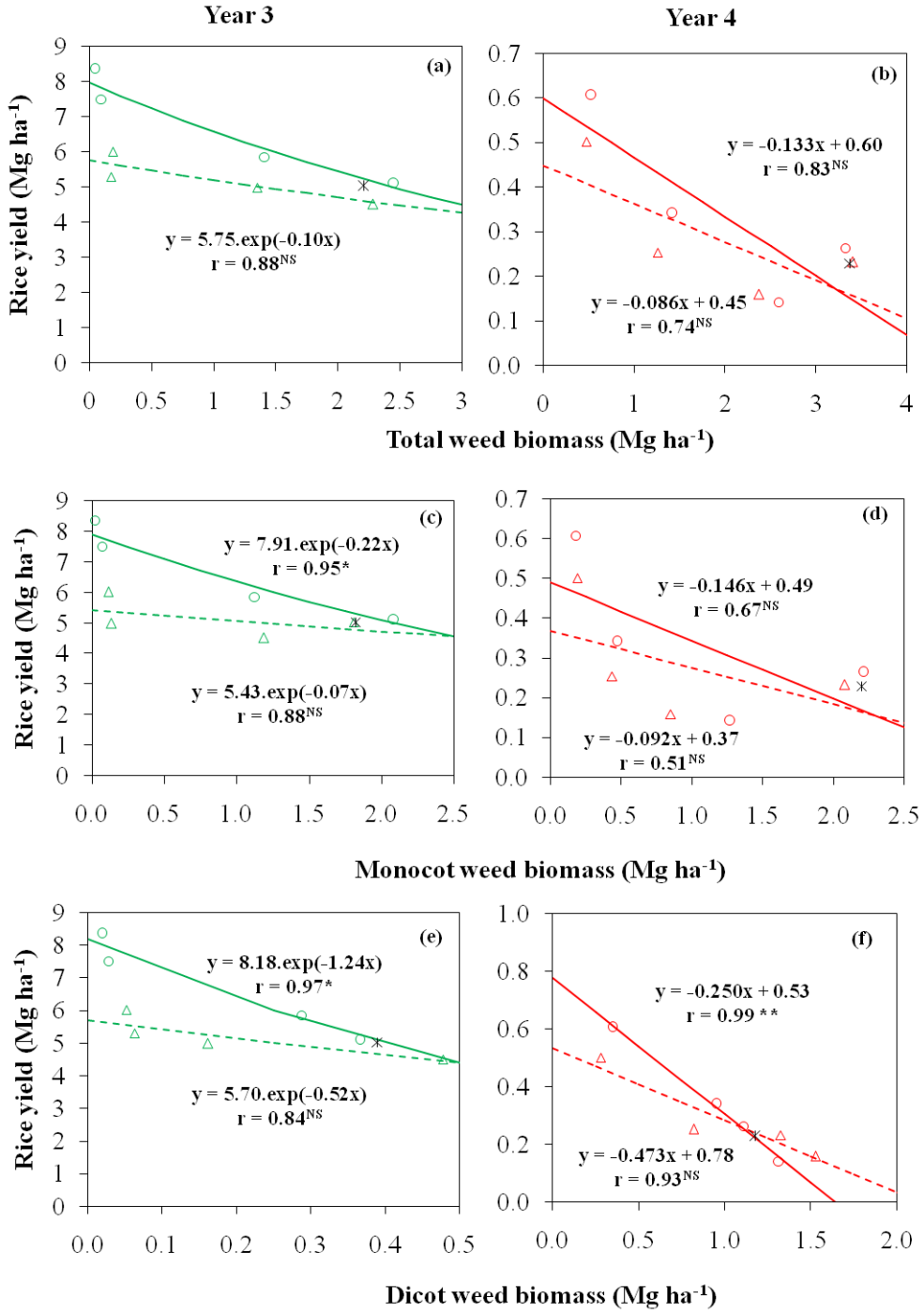


Figure 9: Relationship between rice grain yield (Mg ha^{-1}) and cumulative weed biomass (Mg ha^{-1})

Data corresponds to total, monocot and dicot weeds (solid line for S residue and dotted line for MD residue). Symbols are observed data (asterisks for bare soil, circles for S residue and triangles for MD residue). Asterisks of r-values indicate the significance level: *** P ≤ 0.001; * P ≤ 0.05; NS = not significant; S: stylosanthes, MD: maize + dolichos.

4. Discussion

4.1. Weed emergence

Our results showed that weed emergence decreased exponentially with increasing amounts of residue. The decrease was affected by the seasonal rainfall amount and pattern. Under wetter conditions larger amounts of residue were needed to obtain the same efficiency in controlling weed emergence. For example, 10 Mg ha^{-1} of S residue reduced weed emergence by 78% as compared to the bare soil during the relatively dry year 3 (733 mm rainfall), whilst the same amount reduced weed emergence by 60% during the wet year 4 (1076mm rainfall). This can largely be explained by the positive effect of soil moisture on weed emergence. Besides, the more rapid decomposition of crop residues under wetter soil conditions (Figure 2), which results in a more progressive decrease of soil cover along the growing season, may also positively affect weed emergence.

There is generally no effect of type of residue on weed emergence, except in year 3 during which weed emergence was lower with S residue than with MD residue. However, this can be partly ascribed to an indirect effect caused by the rice vegetation. In year 3, the standing rice biomass was higher with S residue than with MD residue (data not shown) causing a greater shading effect affecting weed emergence. This effect was nonexistent in year 4, because of the overall low-standing biomass of rice during that year.

During a year with high rainfall (year 4), weed emergence was stimulated under a partial soil cover at the start of the growing season when the rice crop was not yet well developed. In our study, amounts of up to 5 Mg dry matter ha^{-1} of crop residue increased weed emergence by on average 76 % as compared to the bare soil at 25 DAF. Stimulation of weed emergence on a partially covered soil was also observed in previous studies (Buhler et al. 1996; Teasdale and Mohler 2000; Mashingaidze et al. 2012). Factors that explain this are the conservation of favorable moisture conditions in the topsoil layer for seed germination and seedling emergence with at a same time the absence of a solid physical barrier to seedling development (Teasdale and Mohler 1993; Buhler et al. 1996).

Large amounts of residue of around 10 Mg ha^{-1} were needed to significantly decrease weed emergence as compared to the bare soil. These high amounts are consistent with result from a previous study that found that at least 6 Mg ha^{-1} of residue was needed to reduce light levels below those required for emergence of most weed species (Teasdale and Mohler 1993). Besides, it is known that surface crop residues can actually interfere with the establishment of weeds by physically impeding their emergence and altering edaphic factors such as soil moisture and soil temperature (Teasdale and Mohler 1993; Bilalis et al. 2003).

Larger amounts of residue were needed to significantly reduce dicot than monocot weed emergence across all years. In other words, mulching with crop residues suppressed monocot

weed emergence more effectively than dicot weed emergence, which is consistent with findings from previous studies (Rippin et al. 1994; Yordanova and Shaban 2007). The reasons and mechanisms behind this are, however, not understood.

Overall, weed emergence occurred mainly before 60 DAF which corresponds to the critical weed-free period of rainfed rice, i.e. the critical point in time during the growing season when weeds cause the largest yield loss (Moorthy and Saha 2005; Touré et al. 2013). After this critical period, weed emergence was smaller (Figure 3) with smaller effects on crop yield. Emerging weeds after the critical period have small effects on crop yield because the leaves as well as the roots of the rice plants are well developed resulting in competitive advances over the emerging weeds. However, late-emerging weeds can be problematic for the cropping systems, because they may increase the weed seed production, and potentially cause increased weed infestation during the next crop cycle.

4.2. Weed biomass

Weed biomass decreased with increasing amounts of residue. Effect of mulching on weed biomass depended on the type of residue and the quantity (and distribution) of seasonal rainfall. With the same amount of residue, S residue depressed weed biomass more than MD residue, irrespective of the growing season. This can be explained by the soil cover capacity of the residues which is higher for S (0.377 m^2 kg^{-1}) than for MD (0.251 m^2 kg^{-1}) (Naudin et al., 2012). Mulching was more efficient in controlling weed growth during year 3 (733 mm rainfall) as compared to year 4 (1 076 mm rainfall). The poor establishment of the rice crop during year 4 probably interfered, causing a reduced shadow effect of the standing rice biomass and less competition between the rice crop and weeds for soil nutrient resources. The faster degradation of residues during year 4 (Figure 2) probably also had a stimulating effect on weed growth.

More than 10 Mg ha^{-1} of residue was needed to significantly reduce total weed biomass as compared to a bare soil without surface residues. Lower weed biomass under mulching are attributed both to a reduction of weed emergence (see above) and the reduced weed growth below the mulch of crop residues due to shading effects (Liebman and Mohler 2001). Amounts needed to significantly reduce weed biomass were higher than those estimated in previous studies (Ranaivoson et al., 2017). For example, Ahmed et al. (2007) found a significant decrease of weed biomass with 4 Mg ha^{-1} of wheat straw residue; Bilalis et al. (2003) with 5 Mg ha^{-1} of wheat straw and Campiglia et al. (2012) with 5 Mg ha^{-1} of oat residue. There may be several reasons for this discrepancy in results. Possible explanations are a larger soil weed seed bank at our experimental site, or some weed species are less sensitive to mulching/shading or the soil and climatic conditions in our experiment caused a more favorable environment for weed growth under mulching.

Mulching was more effective in reducing monocot weed biomass than dicot weed biomass, especially during the wet year. This is in line with the results on weed emergence, and suggests that the effect of mulching on weed biomass can mainly be explained through its effect on weed emergence. In some situations, a decrease of weed emergence may result in more vigorous weed growth as a result of reduced competition between weed seedlings (Pfaff and Gonter 2000). However, this was not observed in our study.

4.3. Rice yield

Lower rice yield in year 4 as compared to year 3 was probably because the dry spell (10 days) after rice sowing and the heavy and continuous rainfall thereafter, resulting in water-logging of the soil which is not favorable for rainfed rice growth (Ito et al. 1999; Lafitte et al. 2004).

Rice yield decreased with increasing weed biomass (Figure 9). Lower rice yield due to weed pressure is related to increased competition for light, water and nutrients between the cultivated crop and weeds (e.g. Matloob et al., 2015). Yield losses on bare soil without surface residues (and with the highest level of weed infestation) were on average 30% and 59% of yields on a fully covered soil in year 3 and year 4, respectively. These results are in line with globally estimated rice yield losses due to weeds of around 40% (Oerke and Dehne 2004). However, higher rice yields with mulching can also be ascribed to other agro-ecological functions of surface crop residues, in addition to weed control (Ranaivoson et al. 2017). Surface residues can improve soil water availability to the crop by reducing water losses from soil evaporation and runoff, and by improving soil water infiltration (e.g. Scopel et al., 2004). Decomposition of residues influences nutrient cycling in the soil and can improve the availability of nutrients to the crop (Aulakh et al. 1991). Finally, residue cover can increase soil biological activity which improves soil physical properties (Kladivko 2001). In our study, mulching had probably a positive effect on rice yield through its effect on soil nutrient supply, since rice growth was nutrient-limited; no fertilizer was applied to the rice crop.

4.4. Crop residue mulching under farmer's conditions

Amounts of crop residue that normally can be produced on farmers' fields in the study region are at the best about 3 - 4 Mg ha^{-1} for stylosanthes and 5 - 6 tha^{-1} for dolichos intercropped with maize (Naudin et al., 2012). Typical amounts retained on farmers' field are however lower than these amounts. Farmers have other uses for crop residues than mulching; crop residues are mainly used to feed cattle on the mixed crop-livestock farms in the region. According to the results of our study, this low range of amounts rather stimulates weed emergence than suppresses it, especially under high-rainfall conditions. It suggests that mulching with crop residues is not a viable option of weed control for the smallholder farmers

in the region. Therefore, other means of weed control are required. For example, it has been suggested that for mulching to be effective it has to be combined with manual weeding at early stage of the cropping season (Mashingaidze et al. 2012), or with the use of pre-emergence herbicides (Muoni et al. 2013), or with appropriate crop rotations (Nichols et al. 2015). These practices reduce weed emergence at the early stages of the cropping season which are the most critical period to crop yields.

5. Conclusions

Our study clearly shows that weed emergence and weed biomass production in rice fields decrease with increasing amount of applied surface crop residues. The reduction of weed biomass by mulching was mainly due to a reduction of weed emergence. It means that the control of weed infestation through crop residue mulching can mainly be attributed to the effect on weed emergence. The rate of weed emergence and weed biomass decrease depended on the seasonal rainfall amount, its distribution during the growing season, the type of residue and the standing vegetation of the rice crop. More than 10 Mg ha^{-1} of residue were needed to significantly reduce weed emergence and biomass as compared to the bare soil without surface crop residues. Under high-rainfall conditions, low amount of residue (up to 5 Mg ha^{-1}) can significantly stimulate weed emergence as compared to the bare soil when the rice crop is not yet well developed. Rice yield decreased with increase of weed biomass; with yield losses of about 16% for an increase in weed infestation of one Mg ha^{-1}. Our results suggest that mulching with crop residues should be combined with other means to control weeds on smallholder fields in the Lake Alaotra region, because of the limited availability of crop residues on farms.

Acknowledgments: This work was funded by 'Foibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiharina amin'ny Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra' (FOFIFA), 'Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement' (CIRAD), the Agroecology-Based Aggradation Conservation agriculture (ABACO) project from the European Union, the Conservation Agriculture in Rice Cropping Systems in Madagascar (CARIM) project from the Agropolis Foundation and the Robert S. McNamara Fellowships Program. We would like to thank Eric Goze for statistical assistance, Pascal Marnotte, Mathias Christina and all MSc students who contributed to data collection: Laingo Rasolofo, Joel Rakotomalala, Sedera Rakotonjanahary and Mirana Rabarivololona.

CHAPITRE 3 : EFFETS DE L'AGRICULTURE DE CONSERVATION SUR L'ENHERBEMENT, LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LE SOL, LA DISPONIBILITE DE L'AZOTE ET LE RENDEMENT EN RIZ

Ce chapitre est en cours de finalisation pour soumission dans le journal European Journal of Agronomy :

Ranaivoson, L., Naudin, K., Ripoche, A., Rabeharisoa, L., Corbeels, M. Effect of conservation agriculture on agronomic performance and biotic constraints of rainfed rice based cropping systems.

L'agriculture de conservation (AC), qui repose sur les principes de perturbation minimale des sols, d'une couverture permanente des sols et d'association et/ou rotation culturale, a été vulgarisée depuis la fin des années 90 dans la région du lac Alaotra à Madagascar, pour une agriculture plus durable et rentable. Malgré ses avantages, l'adoption de l'AC reste faible dans la région, en partie à cause des effets variables de l'AC sur les rendements des cultures.

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'enherbement des parcelles, la dynamique de de l'eau du sol et l'azote minéral (N), qui sont les principaux facteurs qui déterminent le rendement en riz pluvial dans la région étudiée. Le dispositif expérimental mis en place depuis 2009 consiste en quatre traitements disposés en blocs randomisés avec quatre répétitions : 1) travail du sol conventionnel avec une rotation biennale de maïs + *Dolichos lablab* // riz (CT-MD//R); 2) travail du sol conventionnel avec une rotation triennale de maïs + *Stylosanthes guinensis* // *S. guianensis* // riz (CT-MS//S//R); 3) agriculture de conservation avec la rotation biennale (AC-MD//R); et 4) agriculture de conservation avec la rotation triennale (AC-MS//S//R). L'enherbement, l'humidité du sol et la dynamique de l'azote minéral du sol, ainsi que le rendement en riz ont été étudiées au cours des saisons culturales 2013/14 et 2014/15.

Effect of conservation agriculture on agronomic performance and biotic constraints of rainfed rice based cropping systems

Lalaina Ranaivoson[1,2], Krishna Naudin[2,3], Aude Ripoche[2,4], Lilia Rabeharisoa[5], Marc Corbeels[2,6]

[1] Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), BP 1690, Antananarivo, Madagascar

[2] Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UPR AIDA, F-34398 Montpellier, France. AIDA, Univ Montpellier,

CIRAD, Montpellier, France

[3] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Cerrados, Planaltina, DF 73310-970, Brazil

[4] Centre National de Recherche Appliquée au Developpement Rural (FOFIFA), SRR, BP 230, Antsirabe, Madagascar

[5] Université d'Antananarivo, LRI, 101, Antananarivo, Madagascar

[6] International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), Sustainable Intensification Program, P.O. Box 1041-00621, Nairobi, Gigiri, Kenya

ABSTRACT

Conservation agriculture (CA), that is based on the principles of minimum soil disturbance, permanent soil cover and diversified crop rotations and/or associations, has since the late 90s been promoted in the Lake Alaotra region of Madagascar, for a more sustainable and profitable agriculture. Despite its benefits, CA adoption remains low in the region, partly because of the variable effects of CA on crop yields. The objective of this study was to better understand the mechanisms that explain rice yield responses to the practice of CA versus conventional tillage (CT). We therefore studied the dynamics of weed infestation, and soil water and mineral nitrogen (N), which are the main factors that determine rice yield under rainfed conditions in the study region. The experiment was established in 2009 at the experimental station of the National Research Center (FOFIFA) located at Ambohitsilaozana in a completely randomized block design with four replications. Four experimental treatments were established: 1) conventional tillage with a 2-year rotation of maize + *Dolichos lablab* // rice (CT-MD//R); 2) conventional tillage with a 3-year rotation maize + *Stylosanthes guinensis* // *S. guianensis* // rice (CT-MS//S//R); 3) conservation agriculture with the 2-year rotation (CA-MD//R); and 4) conservation agriculture with the 3-year rotation (CA-MS//S//R). During the 2013/14 and 2014/15 seasons two levels of weed pressure: 'high' and 'low 'were introduced as a split-plot design. Weed infestation, soil moisture and soil mineral N dynamics, and rice productivity were studied during 2013/14 and 2014/15 rice growing

seasons. Our results showed that an increase of rice yield with CA as compared to CT was principally related to a decrease of weed pressure during the rice growth period. In comparison, treatment effects on soil moisture and mineral nitrogen contents were marginal and depended on the rainfall patterns. In conclusion, the potential benefits of CA on crop productivity through reduced weed pressure, especially when large amounts of residues are retained on the soil surface, may be important benefit for smallholder farmers in regions such as Lake Alaotra, who face labor constraints with hand weeding, but usually cannot afford herbicide use for weed control.

Keywords: zero till; residue cover; crop rotation;weed biomass; weed emergence;soil moisture; nitrate; ammonium

1. Introduction

The Lake Alaotra region is one of the main zones of rice production in Madagascar. Soil degradation and erratic rainfall are major constraints to rice cultivation in this region. Since the 1980s, the irrigated plains do no longer produce sufficient food to meet the needs of the population, leading to an expansion of dry rice cultivation into the upland areas (Domas et al. 2008). Rainfed agriculture in the region is however constrained by low soil fertility, high risk of soil erosion and severe weed pressure, resulting in low crop productivity (Penot et al. 2009).

Conservation agriculture (CA) has been introduced in Madagascar in the late 90s in order to cope with the above constraints and to enhance crop productivity in the rainfed areas. CA is based on three principles: minimal soil disturbance, permanent soil cover and diversification of crop species grown in rotations and/or associations (FAO 2015). Despite the potential benefits related to its principles, CA adoption remains low in the region (Penot et al. 2015). Producers encounter several practical challenges, mainly with producing and maintaining crop residues on the fields (Naudin et al. 2012) and with the implementation of crop rotations due to the small areas of available cultivable land (Penot et al. 2015). Moreover, yield gains with CA are not always apparent (Bruelle et al. 2017) since they depend to a large extent on the local soil and climatic conditions (Corbeels et al. 2014).

CA can increase crop yields through agro-ecological functions that are related to the principles of CA (Ranaivoson et al. 2017). For example, it has been shown that a mulch of crop residues can enhance soil moisture conservation by improving soil water infiltration and reducing soil water evaporation and runoff (e.g. Hobbs 2007; Scopel et al. 2004). No-tillage

combined with retention of crop residues on the soil surface can reduce weed infestation by altering the soil environment (*cf*. chapter 2). Retention of crop residues on the soil surface also improves soil structure and can enhance soil nutrient availability (Turmel et al. 2014; Ranaivoson et al. 2017). Finally, crop rotations can break pest and disease life cycles, and play an important role in total crop biomass production, and thus in residue supply for mulching (Jordan and Hutcheon 2002; Thierfelder and Wall 2010).

Information is, however, lacking on the relative importance of the agro-ecological functions provided by CA and their effects on rainfed rice productivity in the Lake Alaotra region. The objective of this study was to better understand the mechanisms that explain rice yield responses to the practice of CA versus conventional tillage (CT). We therefore studied the dynamics of weed infestation, and soil water and mineral nitrogen (N), which are the main factors that determine rice yield underrainfed conditions in the study region.

2. Materials and methods

2.1. Study site

The study was carried out at the experimental station of the National Research Center (FOFIFA) located at Ambohitsilaozana in the Lake Alaotra region of Madagascar (17°30'S, 48°30'E, 780 m a.s.l.) during two growing seasons 2013/14 and 2014/15. The region has a tropical altitude climate, Cfa, (Köppen classification) with a mean seasonal rainfall of 1040 mm and a mean annual temperature of 22°C (2004/05 to 2014/15). The soil was classified as an OrthicFerralsol (FAO classification). Selected soil physical and chemical properties are shown in Table 1.

Table 1: Selected physical and chemical properties (mean and standard deviation) of the soil
Data corresponds to the soil of the experimental field at the FOFIFA research station located in the Lake Alaotra region, Madagascar.

Soil layer (cm)	pH (H_2O)	Olsen P (mg kg^{-1})	CEC (meq 100 g^{-1})	Organic C (g kg^{-1})	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
0-10	5.2 (±0.2)	317 (±42)	7.0 (±2.8)	34.6 (±4.1)	31.3 (±6.3)	41.9 (±3.4)	26.8 (±4.7)
10-20	5.2 (±0.2)	316 (±42)	7.0 (±2.8)	33.8 (±4.7)	31.2 (±6.2)	41.9 (±3.4)	26.9 (±4.7)
20-30	5.3 (±0.2)	309 (±48)	6.3 (±2.2)	31.0 (±8.3)	35.6 (±8.3)	42.3 (±5.0)	22.2 (±4.5)
30-60	5.4 (±0.2)	289 (±51)	5.7 (±1.9)	18.2 (±6.6)	35.4 (±9.8)	42.2 (±6.1)	22.4 (±5.9)
60-90	5.6 (±0.2)	219 (±30)	4.0 (±0.9)	8.8 (±2.9)	35.1 (±8.9)	43.4 (±4.3)	21.5 (±5.6)

2.2. Experimental design

The experiment was established in 2009 in a completely randomized block design with four replications. Treatments consisted of factorial combinations of two soil/residue management treatments: conventional tillage withoutcrop residue retention (CT) and no-tillage with residue retention on the soil surface (CA); and two crop rotations: a 2-year rotation of maize (*Zea mays*) + *Dolichos lablab*//rice (*Oryza sativa*) (MD//R) and a 3-year rotation of maize + *Stylosanthes guianensis*// *S. guianensis* // rice (MS//S//R). Therefore, the four treatments were: 1) conventional tillage with a 2-year rotation (CT-MD//R); 2) conventional tillage with a 3-year rotation (CT-MS//S//R); 3) conservation agriculture with a 2-year rotation (CA-MD//R); and 4) conservation agriculture with a 3-year rotation (CA-MS//S//R). The experimental design was arranged so that each crop of the 2-year and 3-year rotation was grown every year.

During the 2013/14 and 2014/15 seasons, each main plot was subdivided into two subplots corresponding to two levels of weed pressure: a subplot with 'high' weed pressure (HW) in which weeding was delayed (see Table 2) and a subplot with 'low' weed pressure (LW) which was maintained clean from weeds through regular hand-weeding throughout the cropping season.Each subplot measured 50 m² (10 x 5 m).

Our study was carried out during the fifth (2013/14) and the sixth (2014/15) year of experiment on the plots with rice. Cropping practices are summarized in Table 2. Tillage consisted of plowing using the "*angady*", a hand ploughing tool, to a depth of 20 cm. Rice under the CA treatment was sown manually using sticks. In both treatments, rice was sown at an inter-row spacing of 40 cm and intra-row spacing of 20 cm. No fertilizer, herbicides and insecticides were applied.

Table 2: Field operations during the 2013/14 and 2014/15 growing seasons.

Cropping practices	2013/14				2014/15			
	HW		LW		HW		LW	
	Date	DAS	Date	DAS	Date	DAS	Date	DAS
Rice sowing	26/11/2013	-	26/11/2013	-	08/12/2014	-	08/12/2014	-
First weeding	08/01/2014	43	28/12/2013	32	03/01/2015	26	30/12/2014	22
Second weeding	08/02/2014	74	05/01/2014	40	11/02/2015	65	16/01/2015	39
Third weeding	23/03/2014	117	16/01/2014	51	23/03/2015	105	06/02/2015	60
Fourth weeding			01/02/2014	67	09/04/2015	122	17/03/2015	99
Rice harvest	03/04/2014	128	03/04/2014	128	13/04/2015	126	13/04/2015	126

DAS: days after sowing; HW: high weed pressure; LW: low weed pressure treatment

2.3. Agronomic measurements

2.3.1. Rice yield measurements

Rice yield was determined at physiological maturity. All panicles were collected manually from the whole subplot (50 m²) and hand-threshed by stripping the spikelets from the panicles. Unfilled spikelets were removed and filled spikelets were weighted to estimate grain yield. Moisture content of spikelets was determined by oven-drying subsamples of 50 g at 70°C during 48 hours. Results were expressed as dry matter content on hectare basis.

Rice yield components, i.e. the number of seed holes per m², the number of panicles per seed hole, the number of spikelets per panicle, the percentage of filled spikelets per panicle and the weight of 1000 grain were determined on four quadrants of 1 m² (1 x 1m) in each subplot.

2.3.2. Light interception measurements

Photosynthetically active radiation (PAR) was measured using a SW-11L PAR line sensor (S.W. & W.S. Burrage, Ashford, UK) by placing a control bar above the rice canopy and a second bar below the canopy. The ratio between the photosynthetic photon flux density (micromoles of photons per meter squared per second) under and above the canopy determined the proportion of PAR intercepted by the rice canopy. Measurements were done during the 2014/15 growing season at four development stages of rice corresponding to tillering (S2), panicle initiation (S3), flowering (S4) and maturity (S5) on four quadrants of 1 m² (1 x 1 m) in each subplot. Three measurements per quadrant were done.

2.3.3. Weed infestation measurements

Emerged weed seedlings were counted and removed every week during the rice growing season using two quadrants of 0.5 x 0.5 m in each HW subplot. Dicots and monocots were counted separately. Cumulative weed emergence on a given date was calculated by summing up all emerged weed seedlings from the first measurement to the date.

Weed biomass was measured at the weeding operations and at rice harvest using four quadrants of 1 m² (1 x 1 m) in each HW subplot. Aerial biomass was cut at soil level and oven dried at 70°C for 48 hours to obtain dry matter content. Dicots and monocots were measured separately. Cumulative weed biomass on a given date was calculated by summing up all weed biomass measured from the first weeding to the date.

2.3.4. Soil water content measurements

The TRIME®-PICO IPH (SDEC, France) probe was used for soil water measurements. One access tube was installed per subplot and volumetric soil moisture content was determined weekly during the 2014/15 rice growing season. Measurements were done at every 10 cm up to 2 m soil depth. The calibration of the probe was done on tubes installed aside the experimental field by comparing probe measurements with volumetric soil water contents that were calculated from gravimetric soil water and soil bulk density measurements. Calibration equations were established for each 10 cm soil depth interval.

2.3.5. Soil Mineral N measurements

Soil sampling for mineral N was done at five development stages of rice: emergence (S1), tillering (S2), panicle initiation (S3), flowering (S4) and maturity (S5) during both growing seasons. At each stage, soil was sampled fromthe following depth intervals: 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 and 60-90 cm in five locationsof each subplot. Composite samples from the five locationswere placed in plastic bags and stored in a freezer until they were processed. Ammonium and nitrate were extracted from soil with 2 N KCl solutions by shaking the suspension for 1 hour (30 g soil per 100 ml of solution). Samples were allowed to decant for 1 hour before recovering the supernatant using a syringe. The supernatant was then filtered with a 0.2 µm Millipore filter (Merck KGaA, Darmstadt, Allemagne) and stored in sterile tube before analysis. A subsample of the soil sample (50g) was oven-dried at 150°C for 48 hours to determine the dry weight of the extracted soil.

Nitrate concentration was determined using the colorimetric cadmium reduction and the Griess-Ilosvay reaction (Henriksen and Selmer 1970) and ammonium concentration using the indophenol blue method (Anderson and Ingram 1989).

Mineral N content (kg ha^{-1}) of a particular soil layer was calculated using the soil bulk density value of the soil layer. Soil bulk density was measured by collecting undisturbed soil cores (4 cm diameter) in each 10 cm soil layer up to 90 cm soil depth. Samples were oven dried at 105°C during 24hours and weighted. Mineral N content in the 0-90 cm soil layer was determined by summing the contents in the 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 and 60-90 cm soil layers.

2.4. Data analysis

Rice yield, rice yield components, light interception by the rice vegetation, weed emergence, weed biomass, soil water and soil mineral N contents were subjected toanalysis of variance (ANOVA) for a split-plot design. The main plot factors consisted of crop rotation, soil/residue management, and the interaction soil/residue management x crop rotation, and the subplot factor consisted of the level of weed pressure. ANOVA was done separately for each cropping season. The means of treatments were compared using the Least Significance Test (LSD) at $p < 0.05$. Statistical analyses were donewith R software using package lmerTest(Kuznetsova et al. 2016) and package agricolae (De Mendiburu 2016) for ANOVA and LSD test, respectively.

3. Results

3.1. Rainfall characteristics

Cumulative seasonal rainfall was higher during the 2014/15 growing season (1 348 mm) than during 2013/14 (757 mm) (Figure 1). The date of first rains occurred in both growing seasons at the end of November. The 2014/15 season was characterized by regular heavy (> 40 mm day^{-1}) rainfall events which occurred from December to the end of rice growing season, whereas during 2013/14 heavy (> 40 mm day^{-1}) rainfall events occurred from mid-January to the end of February.

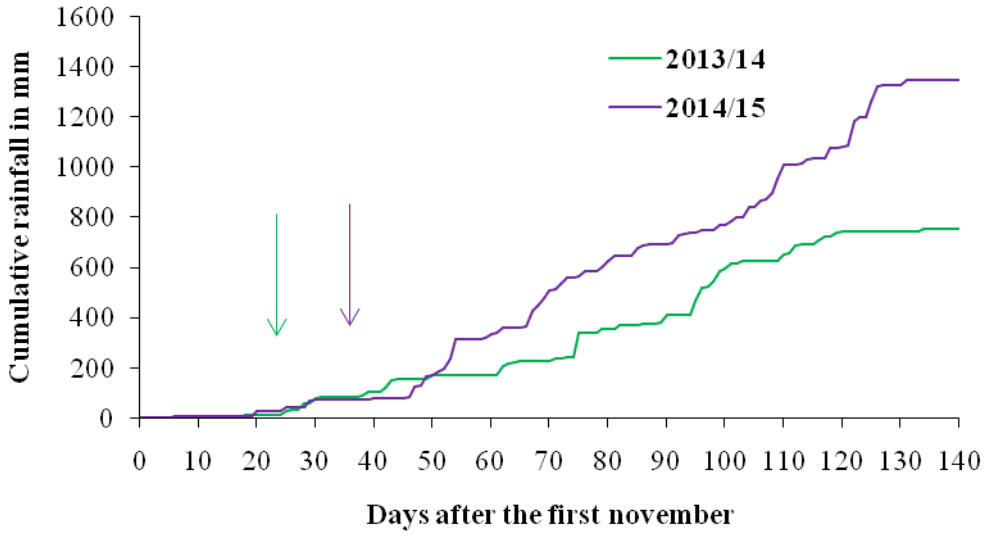


Figure 1 : Cumulative rainfall (mm) at the experimental site during the 2013/14 and 2014/15 rice growing seasons
Arrows indicate the sowing dates of rice.

3.2. Rice grain yield and its components

ANOVA results showed a significant ($p < 0.01$) effect of the level of weed pressure on rice grain yield in both growing seasons. Yield was on average 839 kg ha^{-1} and 650 kg ha^{-1} higher under LW than HW, respectively in 2013/14 and 2014/15 (Table 3). In 2014/15, a significant interaction between crop rotation x soil/residue management was observed: rice yield was significantly ($p < 0.05$) higher under CA than CT under MS//S//R, which was not the case under MD//R (Figure 2).

Table 3: Effect of crop rotation, soil/residue management, level of weed pressure and their interactions on rice yield (kg ha^{-1}) in 2013/14 and 2014/15

	2013/14	**2014/15**
LW	2610	2325
HW	1771	1675
p. value	**0.002****	**0.002****
SED	343.3	335.9
MS//S//R	2268	2293
MD//R	2091	1707
p. value	0.89	0.06
SED	695.6	456.3
CA	2636	2266
CT	1684	1733
p.value	0.08	0.08
SED	695.6	456.3
rotation X management	0.75	**0.01***
weed pressure X rotation	0.68	0.36
weed pressure X management	0.52	0.53
weed pressure X rotation X management	0.67	0.21

**** p<0.001; ** p<0.01; * p<0.05 SED: Standard Error of Difference of Mean; MD//R: maize + dolichos // rice rotation; MS//S//R: maize + stylosanthes // stylosanthes // rice rotation; CA: conservation agriculture; CT: conventional tillage; LW: low weed pressure; HW: high weed pressure.*

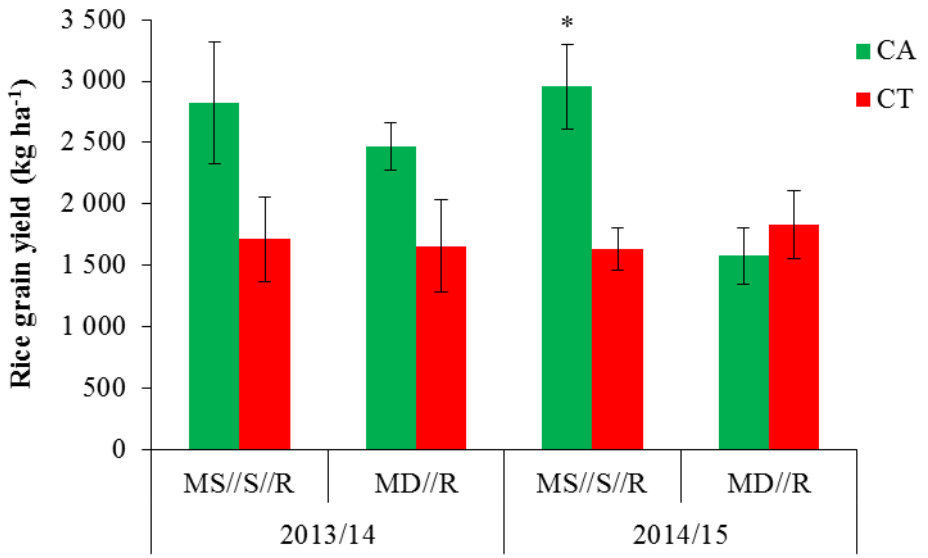


Figure 2: Rice grain yield in relation to the soil/residue management and the crop rotation during the 2013/14 and 2014/15 growing seasons
CA: conservation agriculture; CT: conventional tillage; MD//R: maize + dolichos // rice; MS//S//R: maize + stylosanthes // stylosanthes // rice. Vertical bars represent standard errors of the mean.* indicate significant differences of the interaction rotation x soil/residue management at $p<0.05$.

Rice grain yields were explained by the number of filled spikelets per m² (Figure 3a). Analysis of yield components (*cf. Annexe 6*) showed that the number of filled spikelets was significantly corelated ($r = 0.71$, $p < 0.001$) to the number of filled spikelets per panicle, and the relation varied according to the treatment (Figure 3b,c). The number of filled spikelets per panicle was significantly affected by weed pressure ($p < 0.001$) and soil/residue management ($p < 0.05$). Comparison of means showed that the number of filled spikelets was significantly ($p < 0.05$) higher under LW than HW, and under CA than CT.

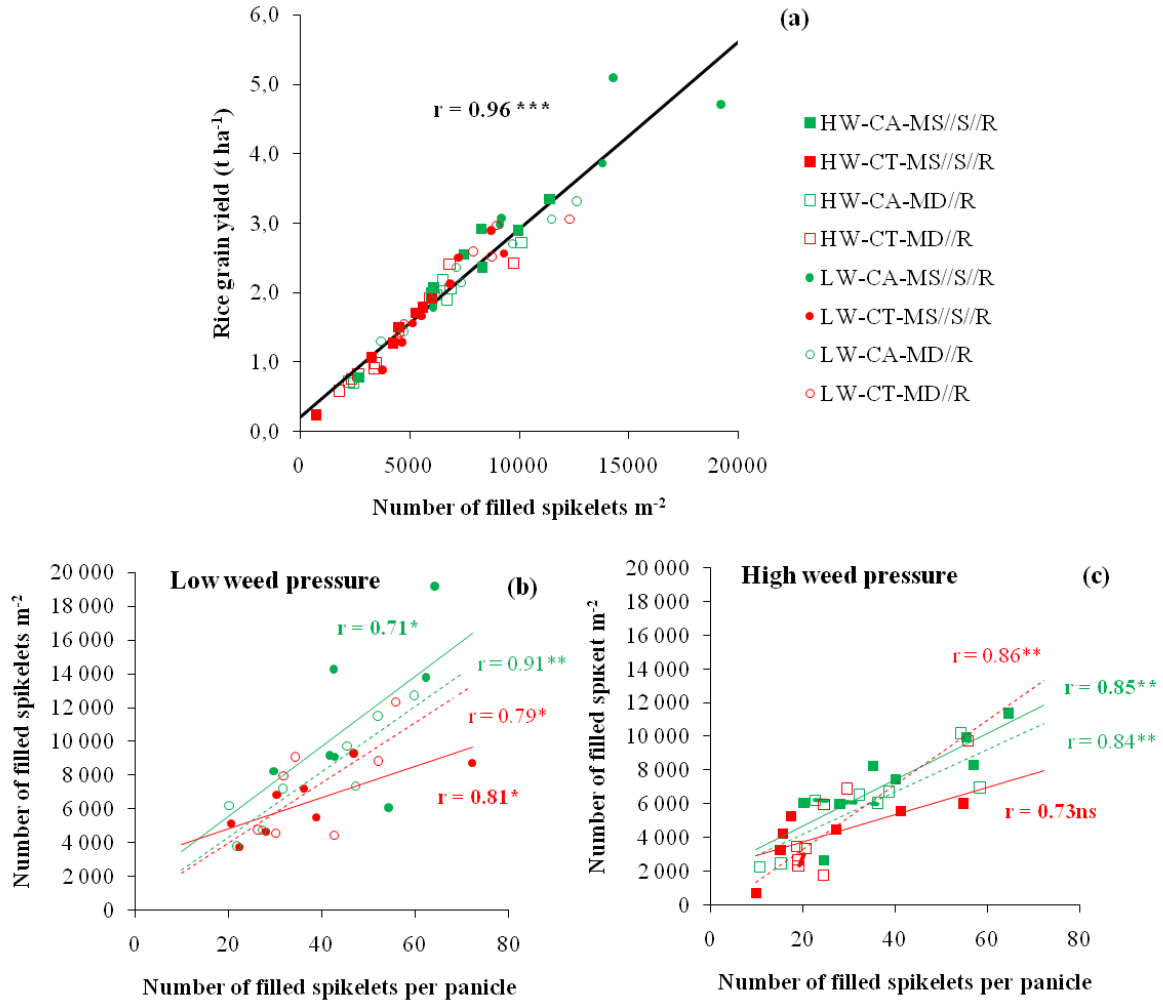


Figure 3: Relationship between rice grain yield and number of filled spikelet
Data corresponds to rice grain yield in relation to the number of filled spikelets per m² during the 2013/14 and 2014/15 growing seasons according to the level of weed pressure (), crop rotation (MD//R: maize + dolichos // rice; MS//S//R: maize + stylosanthes // stylosanthes // rice) and the soil/residue management (CA: conservation agriculture; CT: conventional tillage) (a). Number of filled spikelets per m² in relation to the number of filled spikeletsper panicle for each treatment under low (b) and high weed pressure (c). Asterisksindicate the significance levelof the r value: *** p< 0.001; ** p< 0.01; * p <0.05.

3.3. PAR interception by the rice canopy

At panicle initiation (S3, 77 DAS), flowering (S4, 94 DAS) and maturity (S5, 123 DAS) of rice, crop rotation ($p<0.05$), soil/residue management ($p<0.05$) and the level of weed pressure ($p<0.001$) had significant effects on light interception. At tillering stage (S2, 66 DAS), only crop rotation showed a significant effect ($p<0.05$) (Table 4).

Table 4: Effect of weed pressure, crop rotation, soil/residue managementand their interactions on PAR interception by the rice canopy
Data on PAR (%) at tillering (S1), panicle initiation (S2), flowering (S3) and maturity (S4) of rice, and data on soil water content (mm) at 23 DAS in the 0-150 and 0-40 cm soil layers in 2014/15.

	PAR interception by the rice canopy			
	S2	**S3**	**S4**	**S5**
LW	0.47	0.49	0.6	0.68
HW	0.45	0.39	0.49	0.48
p. value	0.23	**<0.001*****	**<0.001*****	**<0.001*****
SED	0.03	0.04	0.03	0.07
MS//S//R	0.5	0.52	0.6	0.64
MD//R	0.42	0.35	0.48	0.53
p. value	**0.04***	**<0.001*****	**0.007****	**0.03***
SED	0.06	0.04	0.05	0.08
CA	0.48	0.5	0.59	0.65
CT	0.44	0.38	0.49	0.51
p.value	0.33	**0.002****	**0.02***	**0.01***
SED	0.06	0.04	0.05	0.08
rotation X management	0.09	0.16	0.4	0.17
rotation X weed pressure	0.15	0.07	0.47	0.39
management X weed pressure	0.07	0.48	0.31	0.84
rotation X management X weed pressure	**0.02***	0.06	**0.009****	0.46

**** p <0.001; ** p <0.01; * p <0.05 SED: Standard error of difference of mean; LW: low weed pressure; HW: high weed pressure; MD//R: maize + dolichos // rice rotation; MS//S//R: maize + stylosanthes // stylosanthes // rice rotation; CA: conservation agriculture; CT: conventional tillage*

Besides, the 3-way interaction of crop rotation, soil/residue management and the level of weed pressure was significant at tillering ($p<0.05$) and flowering ($p<0.01$). Under HW, CA under MS//S//R showed significantly ($p<0.05$) higher PAR interception than CT, whereas there was no effect of soil/residue management under MD//R. In contrast, under LW, the 2-way interaction between crop rotation and soil/residue management had no effect ($p>0.05$) on PAR interception (Figure 4).

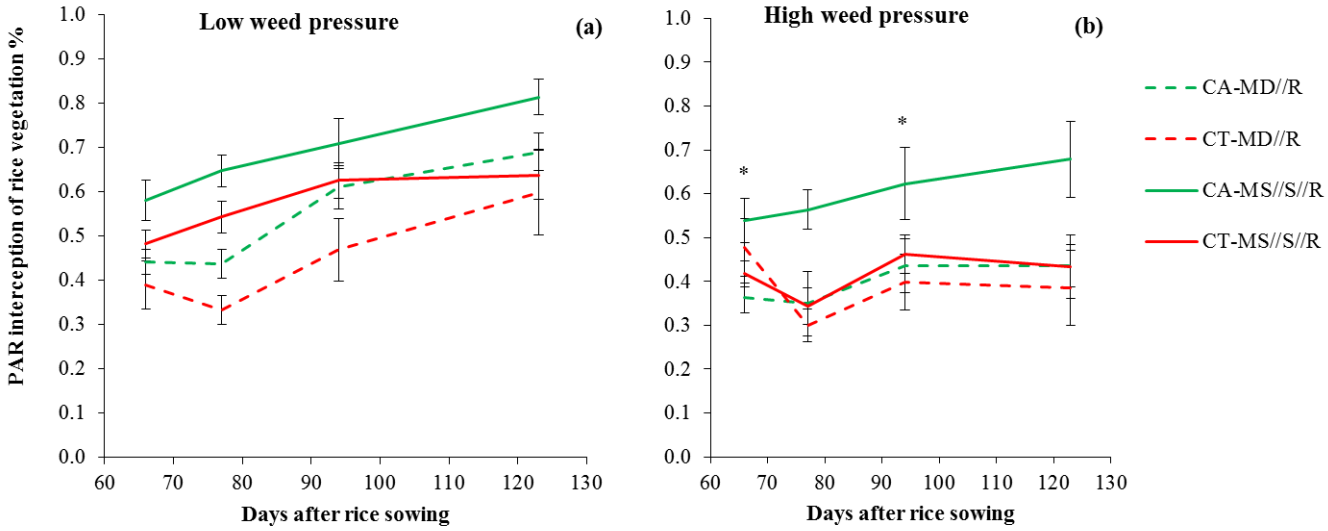


Figure 4: PAR interception by the rice canopy at four development stages of rice
Data corresponds to PAR interception at tillering (66 DAS), panicle initiation (77 DAS), flowering (94 DAS) and maturity (123 DAS) stages under low (a) and high weed pressure (b)according to the soil/residue management (CA: conservation agriculture: CT: conventional tillage)and crop rotation (MD//R: maize + dolichos // rice; MS//S//R: maize + stylosanthes // stylosanthes // rice) during 2014/15. Vertical bars represent standard errorsof the mean, DAS: days after sowing. * indicate significant differences of the interaction rotation x soil/residue management at $p<0.05$

3.4. Weed infestation

3.4.1. Weed emergence

Treatment effects on weed emergence varied depending on the rice growing season. In 2013/14, cumulative weed emergence at the end of rice growing season was significantly ($p < 0.01$) higher under CT as compared to CA for total, monocot and dicot weeds (Table 5). Cumulative weed emergence was also higher under MS//S//R as compared to MD//R for emergence of total and dicot weeds. The interaction between soil/residue management and rotation was however not significant ($p > 0.05$). In 2014/15, no significant ($p > 0.05$) effects were observed.

Table 5: Effect of crop rotation, soil/residue managementand their interactions on cumulative weed emergence at rice harvest (number m^{-2}) in 2013/14 and 2014/15
Data for total, monocot and dicot weeds

	2013/14			2014/15		
	Total	**Monocots**	**Dicots**	**Total**	**Monocots**	**Dicots**
MS	893.3	238.0	655.3	1457.9	469.8	988.1
MD	1326.3	388.8	937.5	965.6	343.6	622.0
p. value	**0.003****	0.06	**0.02***	0.1	0.35	0.06
SED	171.6	92.1	175.7	390.2	186.0	249.2
CA	824.8	205.0	619.8	1003.8	330.8	673.0
CT	1394.8	421.8	973.0	1419.8	482.6	937.1
p. value	**<0.001*****	**0.008****	**0.003****	0.16	0.26	0.1
SED	171.6	92.1	175.7	390.2	186.03	249.2
rotation X management	0.44	0.67	0.48	0.12	0.11	0.18

**** p <0.001; ** p <0.01; * p <0.05 SED: Standard error of difference of mean; MD//R: maize + dolichos // rice rotation; MS//S//R: maize + stylosanthes // stylosanthes // rice rotation; CA: conservation agriculture; CT: conventional tillage*

3.4.2. Weed biomass

In 2013/14, cumulative weed biomass under MS//S//R was significanlty ($p < 0.05$) lower under CA than CT at the first weeding (43 DAS), whereas there was no significant ($p > 0.05$) effect under MD//R (Figure 5a). At the second (74 DAS) and the third weeding (117 DAS), cumulative weed biomass was significantly ($p < 0.05$) lower under CA than CT, and under MS//S//R than MD//R.

In 2014/15, cumulative weed biomass did not significantly ($p > 0.05$) differ between MD//R and MS//S//R at all weeding dates. Besides, there was no significant ($p > 0.05$) difference between CA and CT at the first (26 DAS), third (105 DAS) and fourth weeding date (122 DAS). In contrast, at the second weeding (65 DAS), cumulative weed biomass was significanly ($p < 0.01$) higher under CT than CA (Figure 5b).

Observed trends for monocot weeds were similar as for total weed biomass (Figure 5c,d). Dicot weed biomass was significantly ($p < 0.05$) higher under MS//S//R as compared to MD//R in 2013/14 at all weeding dates, whereas no significant ($p > 0.05$) treatment effect was found in 2014/15 (Figure 5e,f).

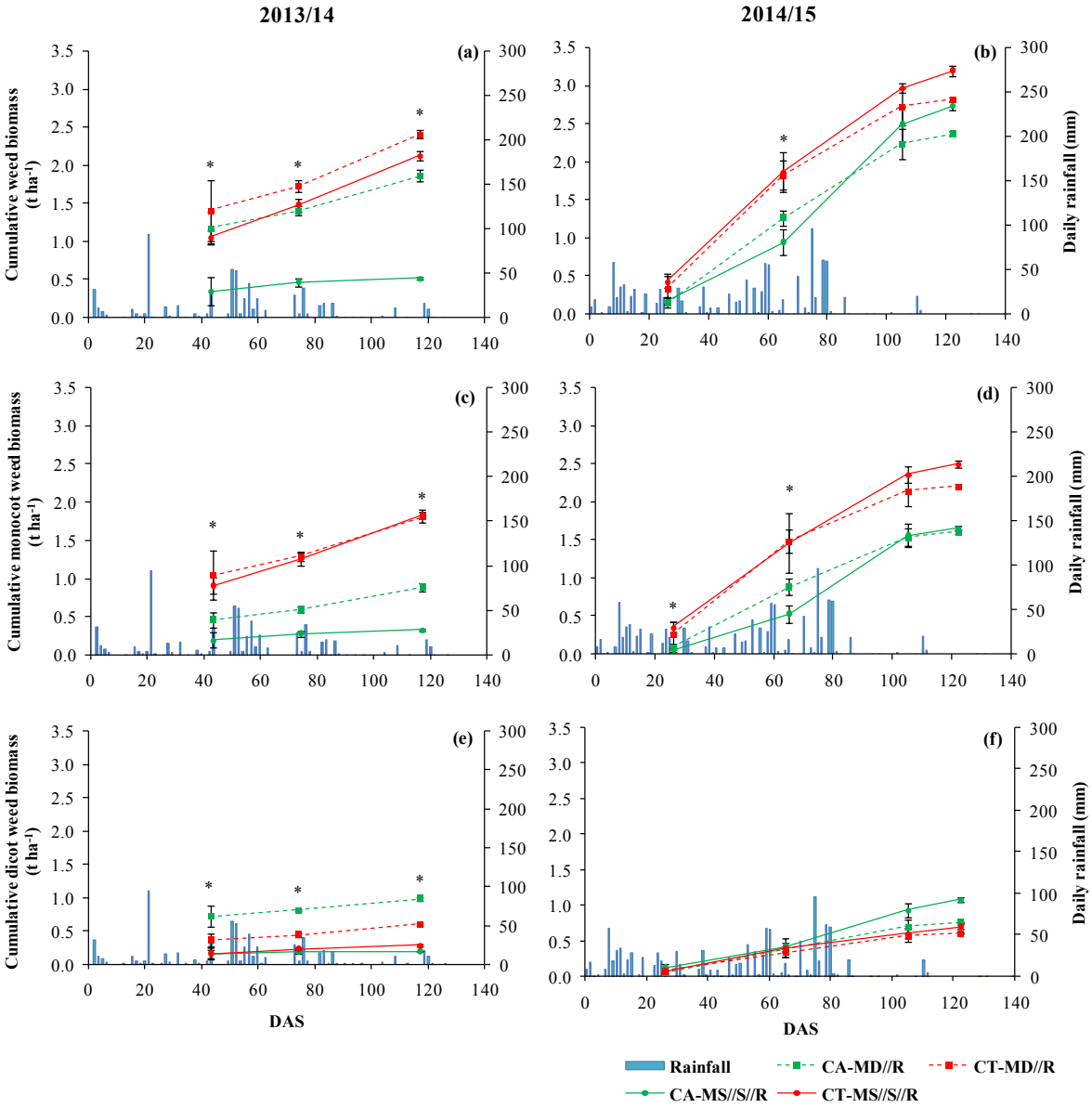


Figure 5: Cumulative weed biomass according to the soil/residue management and crop rotation during the 2013/14 and 2014/15 for total, monocot and dicot weed

CA: conservation agriculture: CT: conventional tillage; MD//R: maize + dolichos // rice rotation; MS//S//R: maize + stylosanthes // stylosanthes // rice rotation. * indicate significant differences of the interaction rotation x soil/residue managementat $p<0.05$. Vertical bars represent standard errors of the mean

3.5. Soil water content

The rainfall pattern affected the soil water dynamics with a large increase of water content from 10 DAS onwards for all treatments (Figure 6). Soil water contentin the 0-150 cm soil profile showed no significant ($p > 0.05$) differences for levels of weed pressure, crop rotation and soil/residue management throughout the rice growing season (Figure 6a). Soil/residue management had however a significant ($p < 0.05$) effect on soil water content in the topsoil layer (0-20 cm) at 23 and 30 DAS (Figure 6b). No other significant ($p > 0.05$) treatment effects were observed.

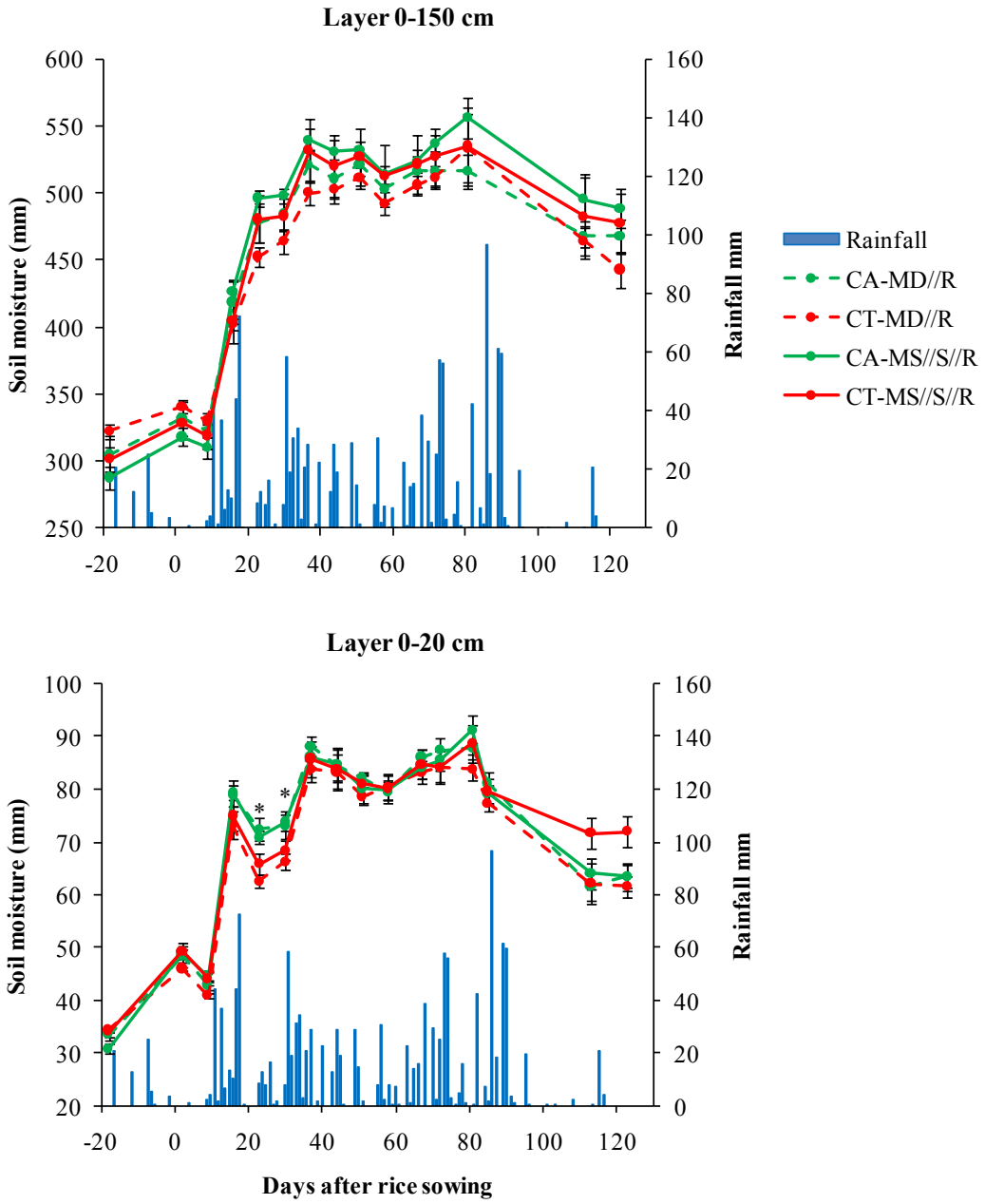


Figure 6 : Soil water content in the 0-150 cm (a) and 0-20cm (b) soil layers according to the soil/residue management and the crop rotation
CA: conservation agriculture: CT: conventional tillage; MD//R: maize + dolichos // rice; MS//S//R: maize + stylosanthes // stylosanthes // rice. The blue bars represent daily rainfall amounts in mm. * indicates significant differences of the interaction rotation x soil/residue management at $p<0.05$. Vertical bars represent standard errors of the mean.

3.6. Soil mineral N dynamics

Mineral N decreased during the rice vegetative phase in the two growing seasons with a larger decrease in 2014/15 than in 2013/14 (Figure 7). Mineral N increased at S4 and then decreased until S5 in 2013/14, whereas it showed a continuous decline throughout the rice growing season in 2014/15.

In 2013/14, there were no significant ($p > 0.05$) treatment effects on mineral N content in the 0-90 cm soil layer at S1, S2, S3 and S4 in 2013/14, whereas there was a significant ($p < 0.05$) effect of weed pressure and crop rotation at S5. Mineral N content was higher under HW than LW , and under MS//S//R as compared to MD//R.

In 2014/15, at S1, the 3-way interaction of weed pressure, crop rotation and soil/residue management had a significant effect ($p < 0.01$) on mineral N content in the 0-90 cm soil layer. Under LW, CA with MS//S//R showed higher mineral N content as compared to CT, whereas there was no significant ($p > 0.05$) effect of the 2-way interaction of crop rotation and soil/residue management under HW. At S4, CT showed significantly ($p < 0.05$) higher mineral N contents as compared to CA. There were no signficant ($p > 0.05$) treatment effects at S5.

Ammonium which accounted for most of the mineral N in 2013/14 showed the same patterns as total mineral N with higher contents under MS//S//R than MD//R, and under LW than HW at S5. The missing data at S2 and S3 in 2014/15 was due to a problem of contamination of the samples with ammonium. In 2014/15, treatments had no significant ($p > 0.05$) effect on ammonium contents at S1, S4 and S5.

In 2013/14, nitrate content was significanlty higher under LW than HW ($p < 0.05$) at S1. There were no treatment effects ($p > 0.05$) at S2, S3, S4 and S5 (Figure 7). In 2014/15, the 3-way interaction of weed pressure, crop rotation and soil/residue management was significant ($p<0.01$) at S1. Under LW, nitrate content was higher under CA with MS//S//R than under CT, whereas the 2-way interaction of crop rotation and soil/residue management was not singificant ($p > 0.05$) under HW (Figure 7). Analysis of the nitrate contents over soil depth showed that this effect at S1 occurred in the 0-10 cm and 30-60 cm soil layers (Figure 8). At S2, there were no significant ($p > 0.05$) treatment effects on nitrate content. By contrast, nitrate content was significantly ($p < 0.05$) higher under CT than CA at S3, S4 and S5. This mainly occurred in the 60-90 cm soil layer (Figure 8).

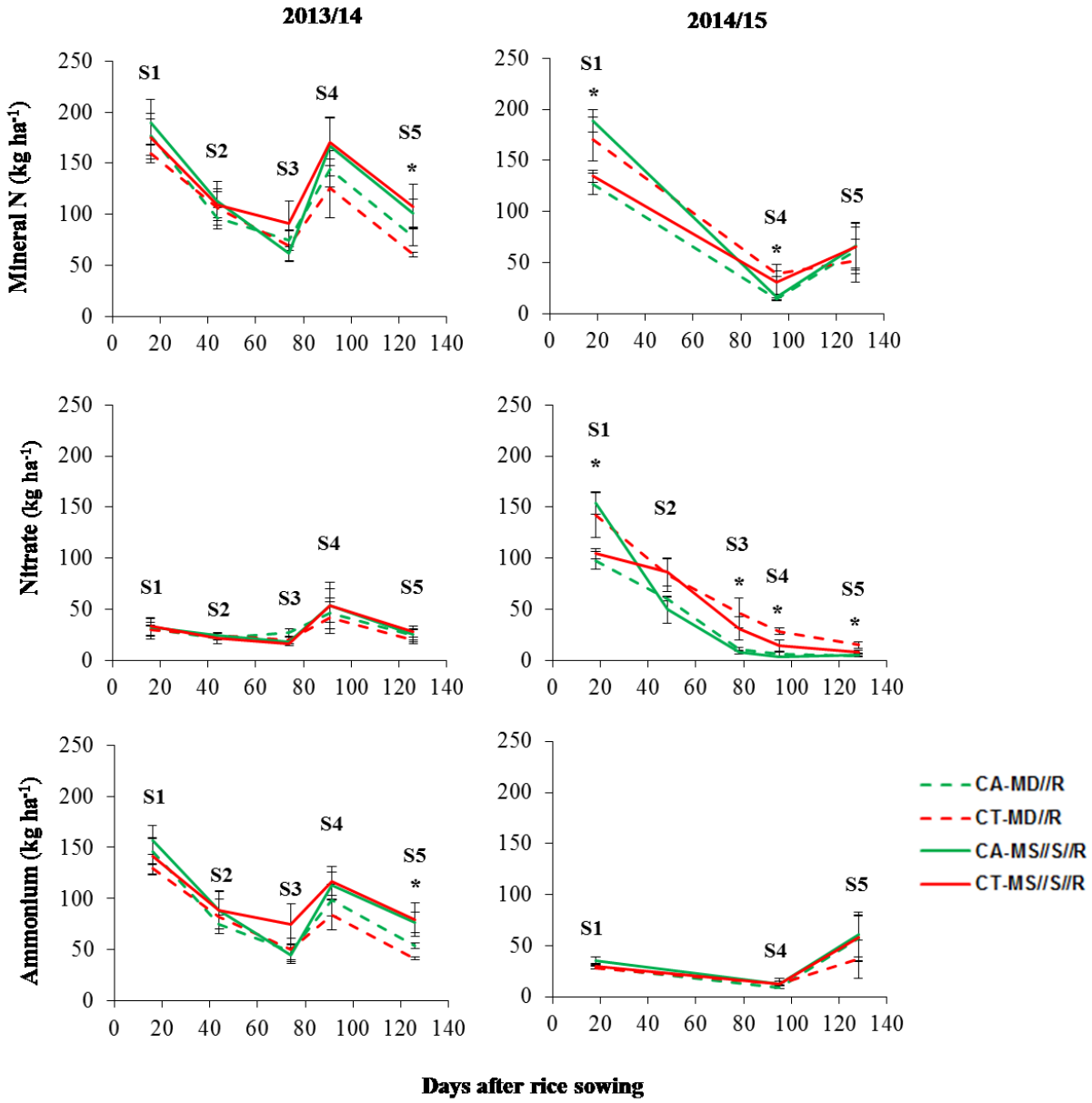


Figure 7: Dynamics of mineral N content

Data corresponds to total, nitrate and ammonium content at S1: germination, S2: tillering, S3: panicle initiation, S4: flowering and S4: maturity stages of rice in the soil profile (0-90 cm) during the two growing season (2013/14 and 2014/15) according to soil/residue management (CA: conservation agriculture: CT: conventional tillage) and crop rotation (MD//R: maize + dolichos // rice; MS//S//R: maize + stylosanthes // stylosanthes // rice). * indicate significant differences of the interaction rotation x soil/residue management at $p < 0.05$. Vertical bars represent standard errors of the mean.

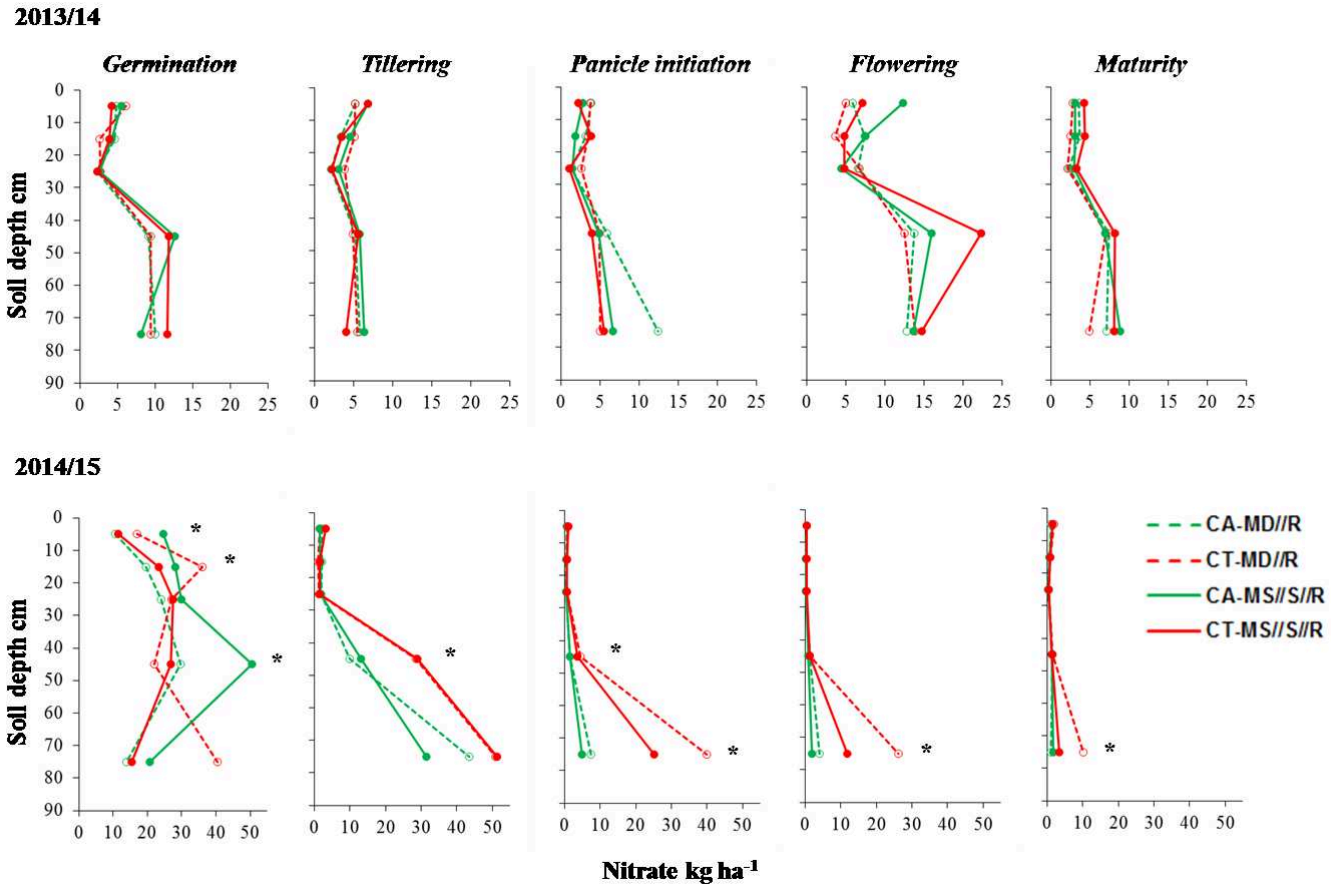


Figure 8: Nitrate contents over soil depth (0-90 cm)
Data at four stages of rice during two growing seasons (2013/14 and 2014/15) according to soil/residue management (CA: conservation agriculture: CT: conventional tillage) and crop rotation (MD//R: maize + dolichos // rice; MS//S//R: maize + stylosanthes // stylosanthes // rice).* indicate significant differences of the interaction rotation x soil/residue management at $p<0.05$

4. Discussion

In our study, higher rice grain yields under CA as compared to CT were mainly attributed to a decrease of weed infestation under CA during the rice growing period. Overall, the practice of CA did not affect soil water and soil mineral N dynamics. Results from 2014/15 suggested that the type of residue and the length of rotation influenced the CA effects on rice yield. The 3-year MS//S//R rotation resulted in significantly less weed infestation as compared to 2-year MD//R rotation. These findings are in agreement with Thierfelder et al.(2013) who showed the importance of the type of crop rotation for obtaining yield benefits with CA.

Yield effects mainly occurred through effects on the number of filled spikelets per panicle, which were determined at the elongating stage of rice (Moreau 1987). A significant decrease of weed infestation under CA as compared to CT occurred at this stage, which corresponded to the first and the second weeding operation.

Effect of CA on weed emergence

Observed reduction of weed emergence under CA was mainly as a result of a physical barrier created by the mulch layer (Teasdale and Mohler 1993; Bilalis et al. 2003). It has also been stated that lower weed emergence under CA is caused by altered soil moisture conditions (Mohler and Teasdale 1993). Observed soil water content during 2014/15 in our study showed the efficiency of CA in retaining moisture in topsoil layer (0-20 cm) during periods without rainfall. Our study also showed that the effect of CA on weed emergence was not related to a decrease of the weed seed bank in the soil (*cf. Annexe 7*). This finding is in contrast with some other studies that found declining weed seed banks in the soil under CA (Chauhan et al. 2012).

Weed emergence did not differ between CT and CA during 2014/15. This was probably related to the continuous rainfall during 2014/15 which accelerated residue decomposition (*cf. Annexe 5*) leading to a relative rapid disappearance of the physical barrier created by the mulch and enhanced weed emergence later in the season (Mohler and Teasdale 1993). In addition, high rainfall usually promotes weed emergence irrespective of the soil/residue management (Chauhan et al. 2012).

Effect of CA on weed biomass

The practice of CA generally decreased weed biomass as compared to CT. This could be explained by the effects of surface crop residues on light, temperature and moisture conditions in the surface soil layer (Teasdale and Mohler 1993). Observed soil water contents from our study during 2014/15 indicated that mulched soil retained moisture in the topsoil layer (0-20 cm) during periods without rainfall.

The higher efficiency of stylosanthes residues as compared to the mixture of maize and dolichos residues in controlling weed growth could be explained by an indirect effect of the rice canopy. We found that light interception of the rice vegetation was significantly higher from rice panicle initiation to rice harvest in 2014/15 under the 3-year rotation with stylosanthes than under the 2-year rotation with maize and dolichos. Besides, stylosanthes residues that have a higher N concentration than maize + dolichos residues (Naudin et al. 2012) could enhance rice growth and development through better soil N supply. However, the results of our study on mineral N did not show evidence of this during the two growing season of the experiment.

Effect of CA on weed biomass varied depending on the cropping season. Weed biomass under CA was lower as compared to CT throughout the rice growing in 2013/14, while this effect was only observed at the start of the season in 2014/15. This was consistent with the results of

Mhalanga et al. (2017) showing that the suppressive effect of CA on weeds depends on rainfall amount and distribution during the cropping season.

Effect of CA on soil water content

CA effects on soil water content through moisture conservation as a result of mulching were marginal because of high rainfall during 2014/15. This season had 40 % more rainfall than the mean rainfall for the past 20 years.

Nevertheless, soil water contents in the 0-20 cm topsoil layer showed that CA retained moisture compared to CT, irrespective of the type of residue. For example, after the high-rainfall events from 12 to 19 DAS, soil water content in the topsoil was significantly ($p<0.05$) higher under CA as compared to CT. Residues retained on the soil surface enhance soil water infiltration and reduce water losses from soil evaporation and runoff (Ranaivoson et al. 2017).

From 30 DAS onwards, continuous rainfall resulted in high soil water contents throughout the soil profile. As a result there was no water stress on rice growth (*cf.* chapter 5) and, thus no mulching effect through moisture conservation.

Effect of CA on soil mineral N dynamics

The practice of CA in our study had generally little effect on soil mineral N dynamics. We measured high soil mineral N contents of up to 200 kg ha^{-1} in the 0-90 cm soil layer, irrespective of treatments. Although positive effects of CA on soil nutrient contents are frequently reported (e.g. Lal 2009; Turmel et al. 2014), other studies also found no effects (Karlen et al. 1994; Maltas et al. 2009; Iqbal et al. 2011).

Nitrogen supply from residue decomposition calculated from the decomposition rates in the litter bag experiments and the initial N concentrations in the residues was about 60 and 150 kg N ha^{-1} respectively in 2013/14 and 2014/15. These amounts were however not retrieved in the soil mineral N measurements.

The observed decrease of mineral N during the rice growing season was related to plant N uptake and nitrate leaching in 2014/15. The occurrence of nitrate leaching losses during that season is suggested by the observed accumulation of nitrate in the 60-90 cm soil layer. The increase of mineral N at flowering stage in 2013/14 can be explained by a decrease of plant N uptake combined with continuous soil N mineralization without leaching losses given the relative low rainfall. The more pronounced decrease of mineral N under CA as compared to CT in 2014/15 can probably be explained by the increased plant N uptake as a result of the higher rice yields and by more pronounced N leaching resulting from higher water infiltration under residue cover in CA (Scopel et al. 2004; Ranaivoson et al. 2017).

5. Conclusions

The effects of CA systems on weed infestation, soil water and soil mineral N dynamics varied according to the type of crop rotation and the rainfall distribution during rice growing season.CA systems reduced weed emergence and weed biomass during rice growth period as compared to CT systems. Soil moisture content in the topsoil layer (0-20 cm) increased under CA during periods without rainfall. On the other hand, CA systems increased mineral N leaching during the rainy year. Stylosanthes residue improved mineral N availability in the topsoil at the start of the cropping season, *i.e.* when leaching losses are relatively low. The higher rice grain yields under CA as compared to CT were mainly related to a decrease of weed infestation under CA. Thus our study points out the potential benefits of CA on crop productivity through reduced weed pressure, especially when large amounts of residues are retained on the soil surface. This may be important benefit for smallholder farmers in regions such as Lake Alaotra, who face labor constraints with hand weeding, but usually cannot afford herbicide use for weed control.

CHAPITRE 4 : EFFETS DE LA ROTATION CULTURALE, LA GESTION DU SOL ET DES RESIDUS ET LA FERTILISATION SUR LA VARIATION DE PERFORMANCE DU RIZ

Ce chapitre est en cours de préparation en vue d'une soumission :

Ranaivoson, L., Affholder, F., Naudin, K., Ripoche, A., Rabeharisoa, L., Corbeels, M., 2017. Effets de la rotation culturale, la gestion du sol et des résidus et la fertilisation sur la variation de performance du riz. En cours de préparation pour soumission

RESUME

L'agriculture de conservation (AC) est caractérisée par le travail minimum du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des espèces cultivées en association et/ou dans une rotation culturale. A Madagascar, elle a été introduite dans la région du lac Alaotra dans l'objectif d'augmenter la productivité de l'agriculture pluviale qui, généralement, rencontre des problèmes de fertilité du sol. La région étant caractérisé par une forte variabilité pluviométrique intra- et interannuelle, les effets de l'AC sur le rendement en riz varient fortement en fonction du climat. Cette étude a pour objectif d'évaluer la part de la rotation culturale, le mode de gestion du sol et des résidus et le niveau de fertilisation dans l'élaboration du rendement du riz. Elle se base sur un dispositif expérimental mis en place dans les parcelles du centre régional de recherche du FOFIFA dans la région du lac Alaotra maintenu pendant 6 saisons culturales de 2009/10 à 2014/15. De manière à évaluer les effets des traitements sur le rendement en riz, deux approches complémentaires des méthodes statistiques classiques ont été mobilisées. D'une part une méthode utilisant le concept de l'analyse de stabilité, comparant les données des traitements rapportée à la moyenne de l'essai chaque année permet d'étudier les interactions entre l'année de culture et les traitements. D'autre part, le modèle PYE (Potential Yield Estimator) a été utilisé pour simuler le rendement potentiel du riz pluvial qui est défini par le climat dont le rayonnement global, la température, la pluviométrie, les paramètres du sol définissant sa capacité de rétention en eau et les paramètres du cultivar. Le rendement observé relatif au rendement potentiel a été analysé pour évaluer les effets des traitements. Ainsi, le modèle PYE a été calibré avec le cultivar de riz pluvial B22 utilisé sur le dispositif expérimental. Malgré le manque de données mesurées sur le cultivar, les résultats de simulation ont été satisfaisants. L'analyse du rendement par rapport à la « moyenne environnementale » ainsi que le rendement relatif au rendement potentiel ont montré que les facteurs rotation culturale, mode de gestion du sol et des résidus et niveau de fertilisation sont en interactions avec d'autres facteurs probablement liés à la variabilité spatiale des sols dans le dispositif expérimental.

1. Introduction

Le riz tient une place importante dans l'économie de Madagascar. Il constitue l'alimentation principale des malgaches avec une consommation moyenne annuelle de 115 kg par habitant et occupe près de 55% des surfaces cultivées sur l'ensemble du pays (Dabat et al. 2008). La région du lac Alaotra constitue une de ses principales zones de production à Madagascar avec plus de 120 000 ha de rizières. L'augmentation de la demande suite à une croissance démographique et la forte variabilité pluviométrique constituent cependant des contraintes majeures pour la production rizicole. De plus, l'augmentation du rendement en riz sur les bas-fonds reste limitée par la vétusté et la dégradation des infrastructures hydro-agricoles. Afin d'assurer une production suffisante, la région a connu un fort développement de l'agriculture pluviale depuis les années 1980. Toutefois, l'exploitation des zones pluviales rencontre des contraintes pratiques notamment la faible fertilité du sol, les phénomènes de ruissellement et d'érosion.

L'agriculture de conservation (AC) a été introduite dans la zone vers la fin des années 90 afin d'améliorer la productivité des cultures pluviales. Elle repose sur trois principes : le travail minimal du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des espèces cultivées en association et/ou dans la rotation culturale (FAO 2015). Certaines études ont démontré dans certaines situations les effets de l'AC notamment sur l'amélioration du bilan hydrique et de la fertilité du sol (e.g. Hobbs 2007). La couverture du sol peut améliorer le stockage en eau dans le sol en limitant son évaporation et le ruissellement et en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol (e.g. Scopel et al. 2004). Elle peut également limiter les risques d'érosion du sol en fournissant une protection physique et en améliorant ses propriétés (Smets et al. 2008). La diversité des espèces cultivées et la décomposition des résidus retenus à la surface du sol influencent le cycle des nutriments et favorise leur disponibilité pour la plante (Maltas et al. 2007). L'AC peut contribuer à réduire la pression des adventices (Teasdale and Mohler 2000; Bilalis et al. 2003) et à améliorer l'activité biologique dans le sol (Kladivko 2001) principalement par la restitution de fortes quantités de biomasse au sol. Enfin elle peut favoriser le stockage de carbone dans le sol grâce à une réduction de la minéralisation en cessant le labour et à une augmentation des apports en carbone via la présence de plantes de couvertures (Corbeels et al. 2006).

D'autres études ont avancé que l'efficacité de l'AC est influencée par l'environnement pédoclimatique de la culture. Un effet positif à court terme de l'AC sur le rendement n'est mis en évidence que dans des conditions limitantes de l'eau à la plante (Bruelle et al. 2017). Sous certaines conditions pédoclimatiques, la réduction du ruissellement peut ne pas se traduire par une réduction nette des stress hydriques mais plutôt par une augmentation du drainage sous culture, avec des risques induits de pertes de nutriments par lixiviation (Scopel et al. 2004; Bruelle et al. 2017). Domas et al. (2008) ont aussi montré que le choix du système en AC doit dépendre du type du sol, notamment de son niveau de fertilité.

Les effets de l'AC à partir d'une expérimentation sur plusieurs années sont ainsi difficiles à interpréter. Les variations annuelles du rendement en riz peuvent être liées aux variations pluviométriques, mais aussi aux effets cumulatifs du système sur la fertilité du sol ou les attaques des ravageurs. Afin de tenter de résoudre ces problèmes, nous avons eu recours dans cette étude à deux approches, d'une part la méthode utilisant le concept de l'analyse de stabilité et d'autre part la modélisation afin d'interpréter les effets de l'AC sur le rendement en riz à partir de données issues d'un dispositif expérimental maintenu sur plusieurs années.

L'analyse de stabilité utilisant le rendement par rapport à la « moyenne environnementale » a été développée pour étudier les expérimentations à long-terme ou sur plusieurs sites (Raun et al. 1993; Ripoche et al. 2015). La moyenne environnementale qui consiste en un rendement moyen obtenu au cours de l'année est facile à calculer mais ne tient cependant pas compte des effets cumulatifs des systèmes dans le temps. En effet, la moyenne environnementale n'est pas indépendante des traitements dans une expérimentation agronomique et ne représente plus le seul facteur de variation interannuelle de l'environnement (Raun et al. 1993).

L'étude du rendement potentiel qui se définit comme le rendement atteint par la culture dont la croissance ne serait limitée que par le climat (van Ittersum and Rabbinge 1997) permet de réduire les effets de la variabilité climatique sur le rendement. La modélisation agronomique passant par un paramétrage avec les données observées des expérimentations agricoles permet de calculer le rendement potentiel d'une culture (Affholder et al. 2012). Bien que nécessitant un effort de paramétrage du modèle, cette deuxième approche permet d'évaluer les parts de l'environnement indépendamment des traitements dans la variation de rendement.

Ainsi, l'objectif principal de cette étude consiste à évaluer la part respective des effets des facteurs climatiques et de celle des effets des facteurs tels que la rotation culturale, la gestion du sol et des résidus ainsi que le niveau de fertilisation dans l'élaboration du rendement en riz, dans une expérimentation sur plusieurs années.

2. Matériel et méthode

2.1. La zone d'étude

L'étude a été réalisée dans la région du Lac Alaotra, à Ambatondrazaka. Elle est située au centre-Est de Madagascar (17°69'S, 48°46'E) à environ 780 m d'altitude. La région est caractérisée par un climat tropical d'altitude Cfa (Classification Köppen) avec une température moyenne annuelle de 22 °C. La pluviométrie annuelle est très variable avec une moyenne de 1 060 mm entre les saisons 1993/94 et 2014/15 (Figure 1). La saison des pluies commence généralement vers la fin du mois de novembre et se termine en avril.

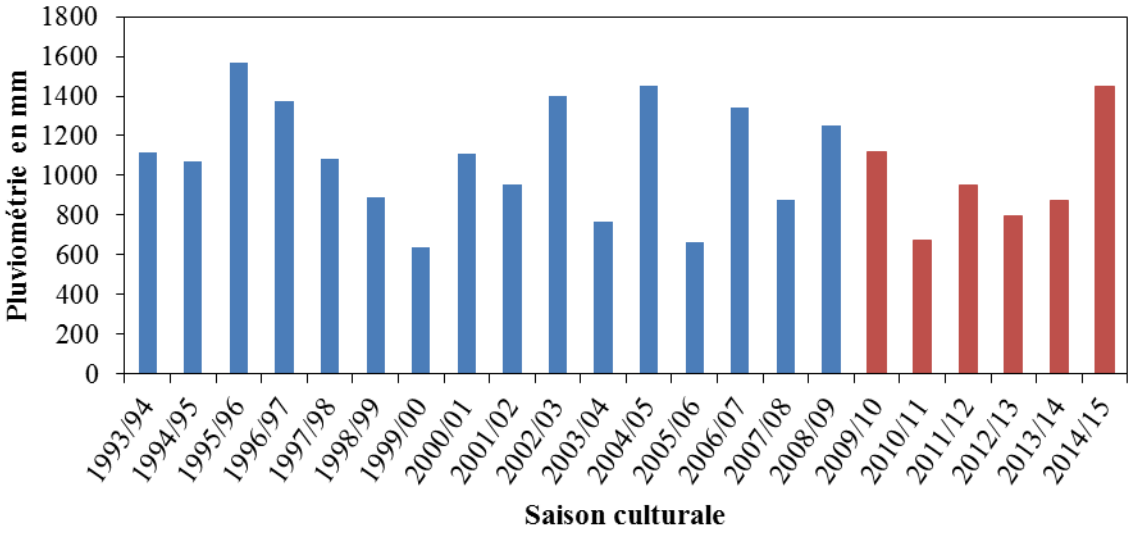


Figure 1 : Pluviométrie annuelle de 1993/94 à 2014/15
Données enregistrées par la station météo d'Ambohitsilaozana, commune d'Ambatondrazaka, région du Lac Alaotra, Madagascar. Les saisons culturales concernées par ce chapitre sont en rouge.

Le dispositif expérimental a été implanté sur un sol de type ferralitique avec une texture limono-argileuse et un ph acide (Table 1).

Table 1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol (0-90 cm) sur le dispositif expérimental situé sur un bas de pente à Ambohitsilaozana, région du Lac Alaotra
Les analyses ont été effectuées au Laboratoires des radio-isotopes, 2009

Horizon	pH eau	Granulométrie		
		% Argile	% Limon	% Sable
0-10 cm	5.24	31.29	41.88	26.82
10-20 cm	5.24	31.21	41.90	26.89
20-30 cm	5.34	35.56	42.28	22.16
30-60 cm	5.42	35.36	42.25	22.39
60-90 cm	5.64	35.13	43.36	21.50

2.2. Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été mis en place en 2009 et a fait l'objet d'un suivi jusqu'en 2014/15. Il est constitué de 12 traitements issus de la combinaison de trois facteurs dont la rotation culturale, le mode de gestion du sol et des résidus et le niveau de fertilisation (Table 2). Les traitements sont disposés en blocs randomisés avec 4 répétitions.

Deux rotations culturales qui diffèrent par le type de plante de couverture utilisés et la longueur de la rotation ont été étudiées :

- Une rotation biennale d'une association de maïs et *Dolichos lablab*, suivie du riz (MD//R)
- Une rotation triennale d'une association de maïs et *Stylosanthes guianensis*, une jachère améliorée de *S. guianensis*, suivie du riz (MS//S//R)

En ce qui concerne le mode de gestion de sol et des résidus, l'AC qui consiste en l'absence de labour et la restitution des résidus à la surface a été comparée avec un système labouré sans restitution des résidus (L+/R-) et un système labouré avec incorporation des résidus dans le sol (L+/R+).

La combinaison de la rotation culturale et du mode de gestion du sol et des résidus a été étudiée sans apport de fertilisation (F0) et avec un apport de 5 t ha^{-1} de fumier, 150 kg ha^{-1} de NPK 11 22 16 et 50 kg ha^{-1} d'urée 46 % N (F1).

Table 1 : Description des traitements sur le dispositif expérimental.

Traitement	Rotation culturale	Gestion du sol et des résidus	Fertilisation
T1	MD//R	L+/R-	F0
T2	MD//R	L+/R+	F0
T3	MD//R	AC	F0
T4	MD//R	L+/R-	F1
T5	MD//R	L+/R+	F1
T6	MD//R	AC	F1
T7	MS//S//R	L+/R-	F0
T8	MS//S//R	L+/R+	F0
T9	MS//S//R	AC	F0
T10	MS//S//R	L+/R-	F1
T11	MS//S//R	L+/R+	F1
T12	MS//S//R	AC	F1

MD//R : rotation biennale d'une association de maïs et dolique suivie du riz ; MS//S//R : rotation triennale d'une association de maïs et stylosanthes, une année de stylosanthes, suivie du riz ; AC : agriculture de conservation, sans labour et restitution des résidus ; L+/R- : Labour sans restitution des résidus : L+/R+ : Labour avec restitution des résidus ; F0 : sans apport de fertilisation ; F1 : avec apport de fertilisation

En ce qui concerne le riz pluvial, le cultivar utilisé est le B22. Il s'agit d'une variété à cycle court (120 jours) sélectionnée à l'EMBRAPA, l'institut brésilien de recherche agronomique. Le B22 été choisi de par son adaptation aux conditions pédoclimatiques de la région (Domas et al. 2009).

2.3. Présentation du modèle PYE

PYE (Potential Yield Estimator, Affholder et al. 2013) est un modèle dynamique de culture construit dans le langage de programmation Visual Basic avec le logiciel Microsoft Access. Il fonctionne avec un pas de temps journalier et emprunte les composantes du module développement et croissance des cultures au modèle STICS (Brisson et al. 1998, 2003) et les composantes du module bilan hydrique au modèle SARRA (Forest and Clopes 1994; Affholder 1997). PYE permet de simuler le rendement potentiel (Yp) et le rendement potentiel limité par l'eau (Yw) (Table 3). Ce dernier se définit comme le rendement atteint dans des conditions favorables sans limitation de croissance de la plante autre que la température, le rayonnement solaire et la pluviométrie (van Ittersum and Rabbinge 1997). Le schéma conceptuel du modèle PYE est représenté par la Figure 2.

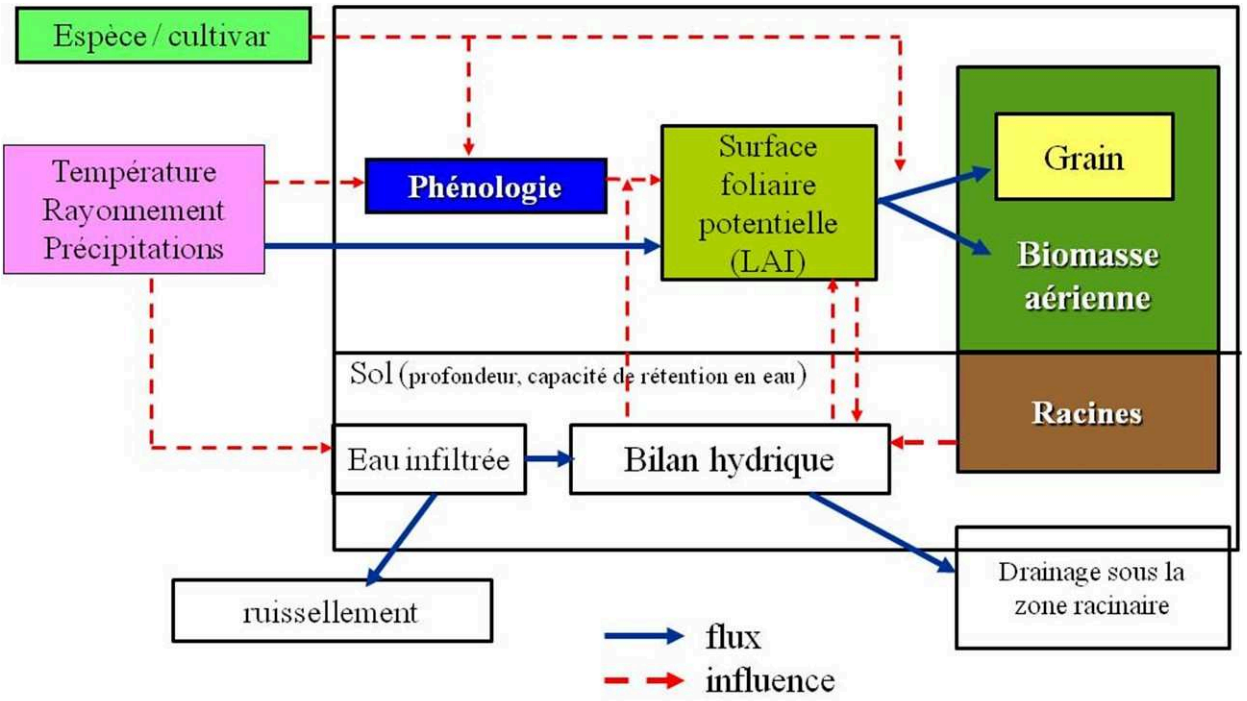


Figure 2 : Schéma conceptuel du modèle PYE

Les différente stades phénologiques des cultures sont définis à partir d'une approche de temps thermique (Gao et al. 1992). Les constantes de temps thermiques à chaque stade de développement ainsi que les seuils de température sont caractéristiques du cultivar. Un stade *i* démarrant le jour *k* est atteint le jour *n* lorsque :

$$\sum_{k+1}^{n}(\mathrm{f(Tm)}) = \mathrm{TT}(i)$$

Où *Tm* est la température moyenne du jour en °C ; *TT(i)* est la constante de temps thermique en degrés jours du stade *i* et est caractéristique de l'espèce ; f(Tm) est une fonction définie comme suit : si Tm < tdmin, f(Tm) = 0 ; si Tm > tdmax, f(Tm) = tdmax – tdmin ; sinon, f(TM) = Tm – tdmin, où *tdmin* est la température-base en dessous de laquelle le développement de la plante est nul et *tdmax* est la température-seuil au-dessus de laquelle la vitesse de développement de la plante n'augmente plus.

Pour les cultivars sensibles à la photopériode, la vitesse de développement de la plante est influencée par un facteur qui est déterminé selon la formule :

$$PhotFact\ (j) = 1 - (DL\ (j) - MOPP) * SensPhot$$

Où *PhotFact* est un facteur appliqué à la vitesse de développement de la plante sensible à la photopériode au jour j; *DL* est la durée de la longueur du jour j ; *MOPP* est la période à laquelle la photopériode agit sur la plante ; *SensPhot* est un coefficient de sensibilité de la plante à la photopériode.

En ce qui concerne le riz, cinq étapes clés du développement sont considérées par le modèle: du stade levée à la montaison (Juv), du tallage maximal à l'épiaison (Tall), de l'épiaison jusqu'à la

pleine floraison (Flo), du début du remplissage de grain jusqu'à la sénescence (Grain), et de la sénescence à la maturité (Mat).

L'indice de surface foliaire (LAI) est une variable clé du modèle qui entre dans le déterminisme de la quantité de biomasse produite. Le modèle calcule chaque jour un incrément de LAI en fonction du stade phénologique de la plante et de la densité de culture selon la formule suivante :

$$dLAI = \frac{DLAImax}{1+\exp(5.5*(Vlaimax - Ulai))} * Turfac * TT$$

Où *dLAI* est le taux de croissance quotidien du LAI ; *DLAImax* est le taux de croissance quotidien maximal du LAI en m² m^{-2} jour^{-1} ; *Ulai* est l'unité de développement foliaire ; *Vlaimax* est le Ulai au point d'inflexion de la fonction dLAI = f(Ulai) ; *Turfac* est le coefficient de sensibilité de dLAI au stress hydrique variant entre 0 et 1 selon le niveau de remplissage de la réserve utile dans la couche de sol occupé par les racine ; *TT* est une fonction définie comme suit : si Tm < tdmin, TT = 0 ; si Tm > tdmax, TT = tdmax – tdmin ; sinon, TT = Tm –tdmin.

Le rayonnement solaire intercepté par les feuilles noté *raint* est calculé à partir du LAI en utilisant une formule selon la loi d'extinction de Beer-Lamber :

$$raint = 0.95 * parsurRg * Rg * (1 - (\exp(-coefExtin * LAI))$$

Où *Rg* est le rayonnement global journalier (MJ m^{-2}) ; *ParsurRg* est la fraction photosynthétiquement active du rayonnement (PAR/Rg) ; *coefExtin* est le coefficient d'extinction du rayonnement par le LAI.

L'accumulation de biomasse est calculée par la suite en utilisant une formule de conversion de la lumière à la biomasse comme suit :

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

Où *dBiom* est l'incrément quotidienne de biomasse (t ha^{-1} jour^{-1}) ; *Ebmax* est un coefficient de conversion maximal du rayonnement en biomasse ; *WS* est l'indice de stress hydrique variant de 0 à 1 selon le niveau de remplissage de la réserve utile dans la couche de sol occupée par les racines ; *Ftemp* est un coefficient de sensibilité du croit de biomasse quotidien à la température.

Le rendement en grains est calculé à partir de la biomasse aérienne totale en utilisant une approche d'indice de récolte (Brisson et al. 1998) selon la formule:

$$Rendement = \text{Minimum}\ (Biom \times HI, P1grainMax \times Ngrain)$$

Où *Biom* est la biomasse produite, *HI* est l'indice de récolte quotidien limité par un indice de récolte maximal caractéristique de l'espèce ; *P1grainMax* est le poids maximal d'une graine ; *Ngrain* est le nombre de grains par unité de surface.

Ngrain est calculé selon la formule :

$$Ngrain = Cgrain \times Vitmoy + CgrainV0$$

Où *Cgrain* est la pente de la relation entre le nombre de grains et le taux de croissance moyen ; *Vitmoy* est le taux de croissance moyen simulé ; *CgrainV0* est le nombre de grain produit avec un *Cgrain* égal à 0. *Cgrain* et *CgrainV0* sont des paramètres caractéristiques de l'espèce.

2.4. Mesures et calculs effectués

Les stades phénologiques du riz dont la date de levée, début tallage, initiation paniculaire, début floraison, maturité ont été notés durant les 6 saisons culturales de 2009/10 à 2014/15.

Le stock en eau dans le sol (0-180 cm) a été mesuré durant la saison 2014/15 à l'aide d'une sonde TRIME®-PICO IPH (SDEC, France) de mesure de l'humidité volumique en différents points du sol. Cet équipement consiste en des tubes d'accès installés sur chaque parcelle élémentaire et une sonde TDR (Time-Domain Reflectometry) mobile introduite dans ces tubes pour réaliser des mesures à différentes profondeurs dans le sol, connectée à un boîtier de commande et de stockage des données. Des mesures hebdomadaires tous les 10 cm de 0 à 200 cm ont été réalisées une semaine avant la date de semis du riz jusqu'à la récolte. La réserve utile du sol a été calculée à partir des données mesurées sur un sol sec (point de flétrissement) et les données mesurées sur un sol après ressuyage (capacité au champ). Plus précisément, pour chaque profondeur de mesure, l'humidité au point de flétrissement permanent était la valeur minimale de l'humidité observée au cours de l'ensemble de la campagne de mesures, qui comportait des mesures en fin de saison sèche. Et de même pour chaque profondeur de mesure, l'humidité à la capacité au champ correspondait à la valeur maximale de l'humidité mesurée, en écartant cependant les mesures réalisées moins de 24 heures après une pluie.

La densité de plantation (nombre de poquet m^{-2}), le nombre de grain/m^2 et le rendement en riz (Yobs) ont été mesurés durant les 6 saisons culturales de 2009/10 à 2014/15.

Le rendement par rapport à la « moyenne environnementale » (Ye) a été calculé pour les 6 saisons culturales selon la formule :

$$Ye = \frac{Yobs}{Ymoy}$$

Où *Ymoy* est le rendement moyen de tous les traitements sur une saison culturale dit « moyenne environnementale » (Table 3). L'analyse du rendement relatif Ye permet d'évaluer les interactions entre les années de culture et les traitements.

Le rendement relatif au rendement potentiel limité par l'eau simulé par PYE (Yrel) a été calculé pour les 6 saisons culturales, selon la formule :

$$Yrel = \frac{Yobs}{Yw}$$

Table 3 : Récapitulation des termes relatifs au rendement

Notation	Définition	Formule
Yobs	Rendement observe sur les parcelles expérimentales	
Ymoy	Moyenne environnementale: rendement moyen obtenu durant une saison culturale indépendamment des traitements	$\text{Ymoy} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \text{Yobs}(i)$
Ye	Rapport entre le rendement observé et la moyenne environnementale	$Ye = \frac{Yobs}{Ymoy}$
Yp	Rendement potentiel simulé par le modèle PYE	
Yw	Rendement potentiel limité par l'eau simulé par le modèle PYE	
Yrel	Rapport entre le rendement observé et le rendement potentiel limité par l'eau	$Yrel = \frac{Yobs}{Yw}$

2.5. Traitements statistique

Le rendement observé (Yobs), le rendement relatif à la « moyenne environnementale » (Ye) et le rendement relatif au rendement potentiel limité par l'eau (Yrel) sur les 6 saisons culturales ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA) pour mettre en évidence l'effet de l'année de culture, la rotation culturale, la gestion du sol et des résidus et le niveau de la fertilisation ainsi que leurs interactions. Le classement des traitements après les analyses de variance a été réalisé avec le test LSD de Fischer au seuil de 5%. Les traitements statistiques ont été réalisés avec le logiciel statistique R avec le package agricolae 1.2-4 (De Mendiburu 2016).

3. Résultats

3.1. Rendement en riz influencé par la saison culturale (Yobs)

Le rendement en riz observé dans l'expérimentation présente une forte variabilité interannuelle avec une baisse marquée en 2012/13 (Figure 3). En général, les expérimentations se sont bien déroulées de 2009/10 à 2014/15. L'année 2012/13 avec une faible quantité pluviométrique a connu une forte attaque fongique. Il est à noter que la densité de plantation réelle a connu une variation inter-parcellaire et une variation interannuelle bien que l'on ait défini la densité de plantation sur le dispositif expérimental avec un écartement 20 x 40 cm entre les poquets. Elle varie de 9 à 15 poquet/m² avec une moyenne de 13 poquet/m² indépendamment des traitements.

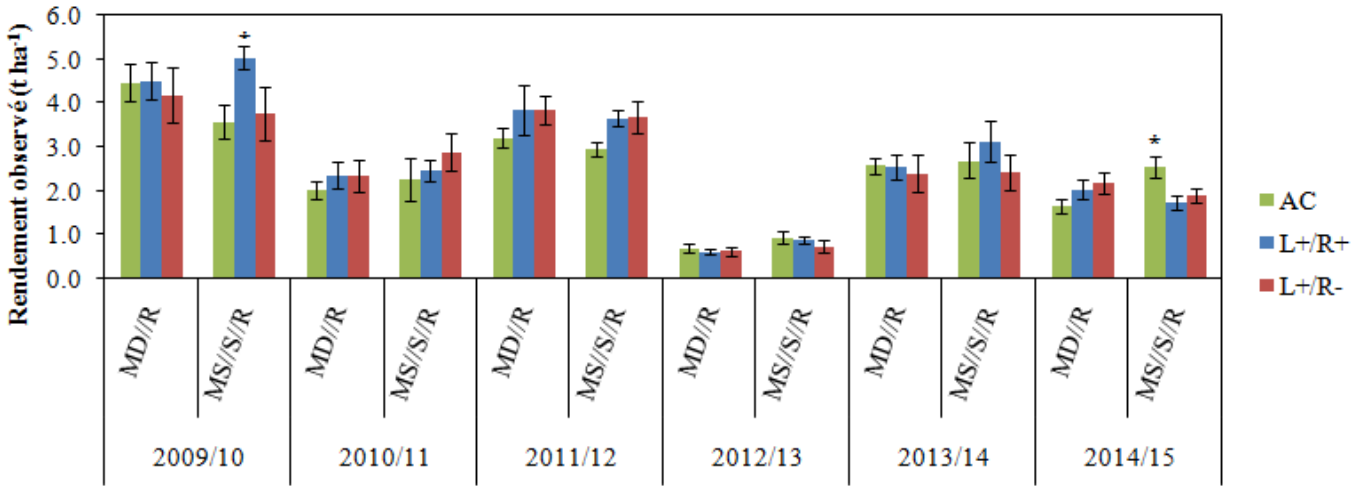


Figure 3 : Rendement en riz pluvial observé dans l'expérimentation durant les 6 saisons culturales
Données selon la rotation culturale (MD//R : rotation biennale de maïs + dolique // riz ; MS//S//R : rotation triennale de maïs + stylosanthes // stylosanthes // riz) et le mode de gestion du sol/résidus (AC : sans labour avec rétention des résidus, L+/R+ : labour avec incorporation des résidus dans le sol, L+/R- : Labour sans restitution des résidus) de 2009/10 à 2014/15. Les astérisques indiquent une différence significative entre le mode de gestion du sol/résidus selon saison culturale X rotation culturale

L'ANOVA sur le rendement a montré des effets significatifs de l'année de culture ($p < 0.001$), du mode de gestion du sol et des résidus ($p < 0.05$) et de la fertilisation ($p < 0.05$). Il montre également un effet significatif de l'interaction de l'année de culture avec les traitements (Table 4). L'effet de la gestion du sol et des résidus en interaction avec la rotation culturale dépend de l'année de culture ($p < 0.01$). Et la fertilisation est également en interaction avec l'année de culture ($p < 0.001$).

Table 4 : ANOVA du rendement en riz (Yobs)
Evaluation des principaux effets de l'année de culture, la rotation culturale, la gestion du sol et des résidus, la fertilisation ainsi que leurs interactions respectives.

	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F.value	Pr(>F)[1]
Année [1]	**5**	**3.43E+02**	**68.56**	**141.6709**	**<2.20E-16*****
Rotation culturale [2]	1	0.32	0.317	0.6555	0.41922
Gestion du sol et des résidus [3]	**2**	**3.42**	**1.711**	**3.5364**	**0.031123***
Fertilisation [4]	**1**	**3.03**	**3.03**	**6.2607**	**0.013221***
[1] : [2]	5	2.81	0.562	1.1608	0.330245
[1] : [3]	**10**	**11.13**	**1.113**	**2.2995**	**0.014472***
[2] : [3]	2	0.44	0.219	0.4526	0.63671
[1] : [4]	**5**	**10.48**	**2.095**	**4.3291**	**0.000954*****
[2] : [4]	1	0.1	0.103	0.2128	0.645128
[3] : [4]	**2**	**3.59**	**1.796**	**3.7107**	**0.02632***
[1] : [2] : [3]	**10**	**11.93**	**1.193**	**2.4642**	**0.008689****
[1] : [2] : [4]	5	2.05	0.41	0.8464	0.518504
[1] : [3] : [4]	10	3.45	0.345	0.7131	0.711447
[2] : [3] : [4]	2	2.22	1.112	2.2986	0.103292
[1] : [2] : [3] : [4]	10	8.74	0.874	1.8061	0.062172
Residuals	183	88.56	0.484		

*(1) *** P < 0.001; ** P < 0.01; * P<0.05.ddl : degré de liberté*

3.2. Evaluation des rendements par rapport à la moyenne environnementale (Ye)

La « moyenne environnementale » qui est le rendement moyen des traitements par saison culturale représente la variation interannuelle du rendement qui ne serait pas due aux traitements. L'ANOVA sur le rapport entre le rendement observé et la moyenne environnementale noté Ye a montré un effet significatif de l'interaction de l'année de culture avec la rotation culturale et le mode de gestion du sol et des résidus ($p < 0.05$). Avec MD//R, le mode de gestion du sol et des résidus n'a pas d'effet sur Ye quelle que soit la saison culturale. Par contre, des effets significatifs du mode de gestion du sol et des résidus ont été mis en évidence avec MS//S//R pour la saison 2009/10 (première année) et la saison 2014/15 (sixième année). En 2009/10, le labour avec restitution de résidus a un Ye plus élevé par rapport à AC. En 2014/15, le système AC a un rendement Ye plus élevé par rapport aux systèmes labourés avec la rotation MS//S//R (Figure 4).

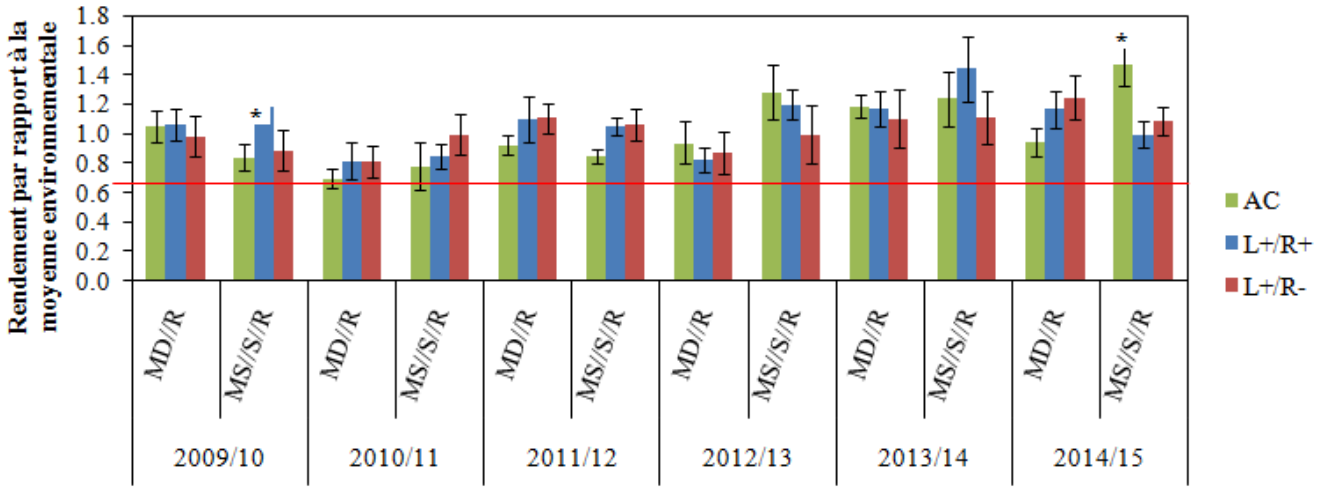


Figure 4 : Le rendement par rapport à la moyenne environnementale (Ye)
Données selon la rotation culturale (MD//R : rotation biennale de maïs + dolique // riz ; MS//S//R : rotation triennale de maïs + stylosanthes // stylosanthes // riz) et le mode de gestion du sol et des résidus (AC : sans labour avec rétention des résidus, L+/R+ : labour avec incorporation des résidus dans le sol, L+/R- : Labour sans restitution des résidus) de 2009/10 à 2014/15

En ce qui concerne les effets de l'apport de fertilisation, les résultats ANOVA ont montré un effet significatif de l'interaction de l'année de culture et de la fertilisation. L'apport de fertilisation a eu un effet sur le rendement Ye, seulement pour l'année 2011/12 (Figure 5a).

La fertilisation est également en interaction avec le mode de gestion du sol et des résidus. L'apport de fertilisation augmente le rendement en riz pour un système labouré sans restitution des résidus (L+/R-), ce qui n'est pas le cas pour les systèmes AC et labouré avec restitution des résidus (L+/R+) (Figure 5b). Ceci suggère l'efficacité de la restitution des résidus dans le recyclage des nutriments.

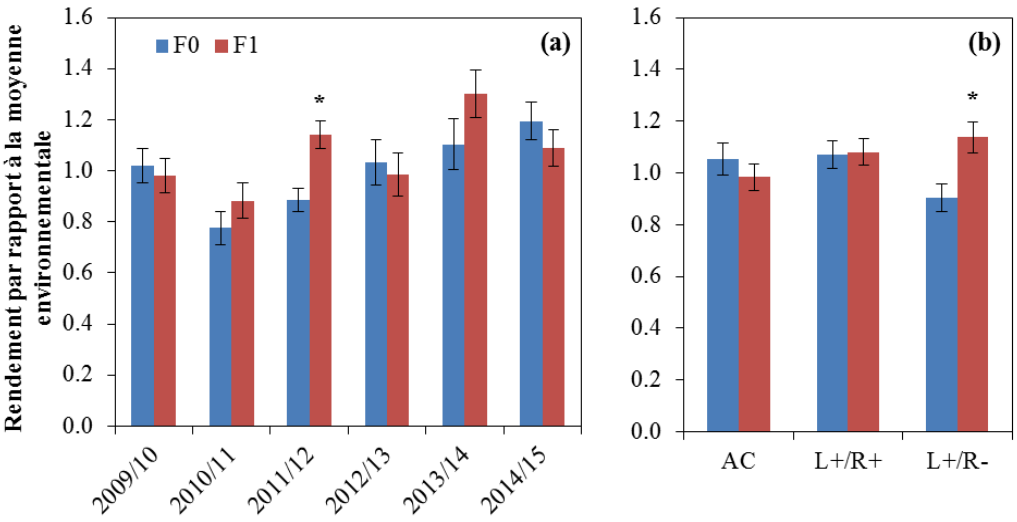


Figure 5 : Rendement par rapport à la moyenne environnementale
Données en fonction de la saison culturale et la fertilisation du sol (F0 : sans fertilisation, F1 : avec fertilisation) (a) et en fonction du mode de gestion du sol et la fertilisation du sol (AC : sans labour avec rétention des résidus, L+/R+ : labour avec incorporation des résidus dans le sol, L+/R- : Labour sans restitution des résidus)

3.3. Evaluation du rendement par rapport au rendement potentiel

3.3.1. Calibration du modèle avec le cultivar B22

La calibration du modèle consiste à utiliser les données observées sur le cultivar d'intérêt ainsi que des données de la littérature afin d'ajuster les sorties du modèle aux observations sur le terrain. Les paramètres du modèle PYE estimés dans le cadre de cette étude sont récapitulés dans *Annexe 8*.

Les constantes thermiques définissant les stades phénologiques du riz ont été estimées à partir des données de dates d'atteinte des stades phénologiques collectées sur quatre sites, à Ambatondrazaka (17°69'S, 48°46'S, 780m alt.), à Andranomanelatra (19°77, 47°1'S, 1 642m alt.), à Ankepaka (21°19'S, 47°88'S, 40m alt.) et à Ivory (19°55'S, 46°41'S, 954 alt.), où l'on disposait simultanément de mesures journalières des températures minimales et maximales de l'air à moins de 1 km de la culture. Le cultivar B22 n'est pas réputé photosensible (Shrestha et al. 2013) et nous avons pu le vérifier comme le montre la figure 6 présentant une relation quasi linéaire entre les données observées du jour de début floraison et le jour de la levée, pour un très large intervalle de dates de levées. En effet, pour les cultivars photosensibles, il existe un intervalle de dates de levées pour lequel la date de floraison dépend moins de la date de levée, voire pas du tout (sensibilité maximale à la photopériode). La figure 6 permet de montrer également l'adéquation du modèle avec les observations sur les dates de floraison après le calage des constantes thermiques et de la sensibilité à la photopériode (Sensphot = 0) avec un biais de 4.5 jours. Les données sur les quatre sites à différentes altitudes nous ont permis d'avoir une large gamme de date de levée qui va de 268 à 400 jour depuis le 1er janvier de l'année de semis (jour de l'année ou JDA dans ce qui suit) et de mettre en évidence les effets de la diversité climatique sur la date de début floraison en fonction de la date de levée.

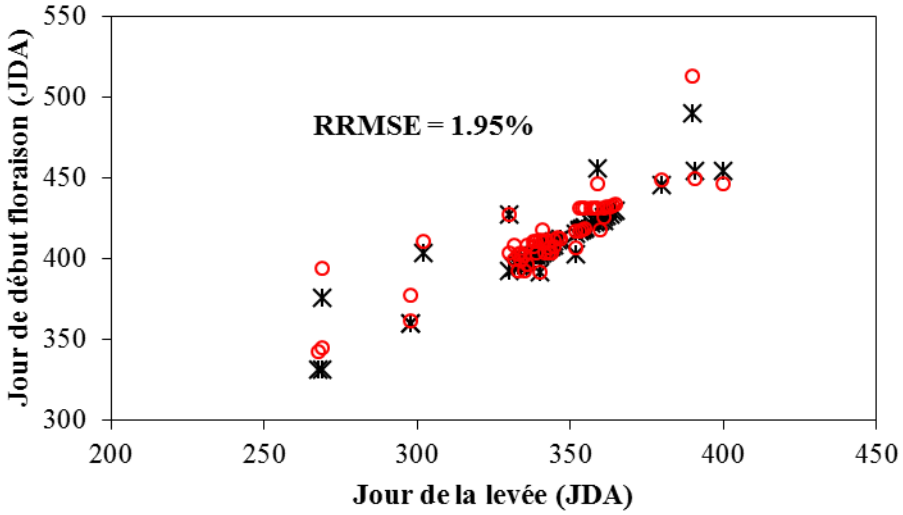


Figure 6 : Jour de début de floraison en fonction du jour de la levée avec les données observées et les données simulées par le modèle
Les symboles correspondent aux données observées et les symboles noirs les données simulées. RRMSE : erreur quadratique moyenne relative ; JDA : Jour de l'année

La valeur de croît maximale journalier du LAI a été fixée à 0.00098 m² poquet^{-1}. Elle a été estimée à partir des mesures de LAI à différents stades de développement du riz et de la densité de plantation sur un dispositif expérimental à Ivory durant 3 saisons culturales (2011/12, 2013/14 et 2014/15).

En ajustant les sorties du modèle aux données observées sur le stock en eau 0-180 cm en 2014/15, la réserve utile sur le dispositif expérimental de notre étude a été estimée à 170 mm m^{-1}. La figure 7 montre la superposition du stock en eau simulés et observés durant la saison culturale. Bien que pendant une partie assez longue de la saison, le stock soit maintenu à des valeurs élevées, voisines de la capacité au champ, l'arrêt des précipitations en fin de cycle conduit à un assèchement du sol par évapotranspiration. Les données observées de stock hydrique du sol à la fin de cette période d'assèchement permettent de montrer que la simulation rend bien compte de l'évapotranspiration de la culture à cette période.

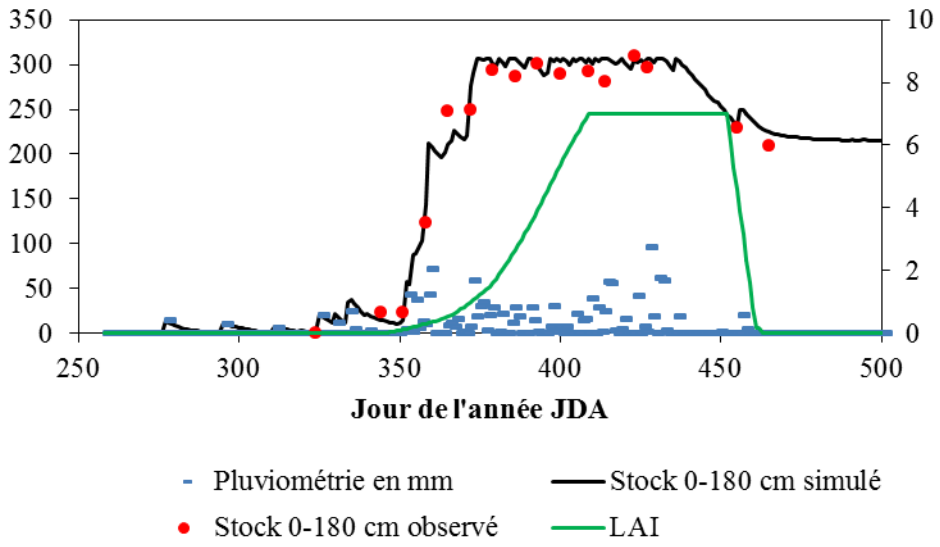


Figure 7 : Dynamique du stock en eau dans l'horizon 0 à 180cm observé et simulé durant la saison 2014/15, superposé avec la pluviométrie journalière et la courbe d'évolution du LAI.

Le modèle a été calibré par rapport au rendement en grain observé sur le dispositif expérimental durant les 6 saisons culturales (de 2009/10 à 2014/15). Les paramètres liés à l'évolution du nombre de grain durant la période de croissance de la plante ont été ajustés à partir des données sur le nombre de grain/m² relevés sur le dispositif expérimental. Le taux d'augmentation journalière a été fixé à 0.03 g de grain/ g de matière sèche /jour. Le rendement potentiel dont les contraintes de croissance de la plante sont la pluviométrie, la température et le rayonnement global est généralement supérieur au rendement observé (Figure 8). Les variations de rendement potentiel sur une année donnée s'expliquent par les différentes dates de semis des parcelles sur le dispositif expérimental. L'atteinte du rendement potentiel varie d'une année à l'autre et d'un traitement à l'autre. L'analyse du rendement relatif au rendement potentiel limité par l'eau va nous permettre d'évaluer les effets des traitements dans la variation du rendement en riz.

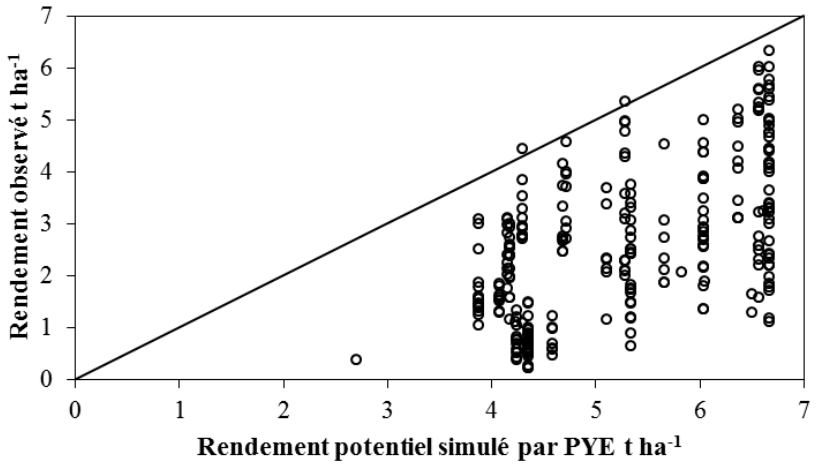


Figure 8 : Rendement du riz en grain observé durant les 6 années d'expérimentation en fonction du rendement potentiel simulé par PYE

3.3.1. Evolution du rendement potentiel et du rendement potentiel limité par l'eau du riz

Le rendement potentiel du riz (Yp) et le rendement potentiel limité par l'eau (Yw) durant les 6 saisons culturales sont représentés par la figure 9. A l'exception de l'année 2012/13, les rendements potentiels Yp et Yw sont très proches. Ce qui suggère qu'il n'y avait généralement pas de stress hydrique dans cette expérimentation agronomique. Toutefois, on a noté une variation des rendements potentiels (Yp et Yw) d'une année à l'autre qui serait due à la pluviométrie, la température et le rayonnement global. Une baisse progressive d'une année à l'autre des rendements potentiels (Yp et Yw) est visible de 2009/10 à 2012/13. La baisse est en moyenne de 11% en 2010/11, 23% en 2011/12 et 35% en 2012/13 par rapport à 2009/10.

Le rendement limité par l'eau Yw représente 63% du rendement Yp en 2012/13. Cette année a été caractérisée par une pluviométrie nettement défavorable par rapport aux autres années. La quantité de pluies a été faible et mal répartie durant la saison culturale conduisant à un effet marqué du stress hydrique.

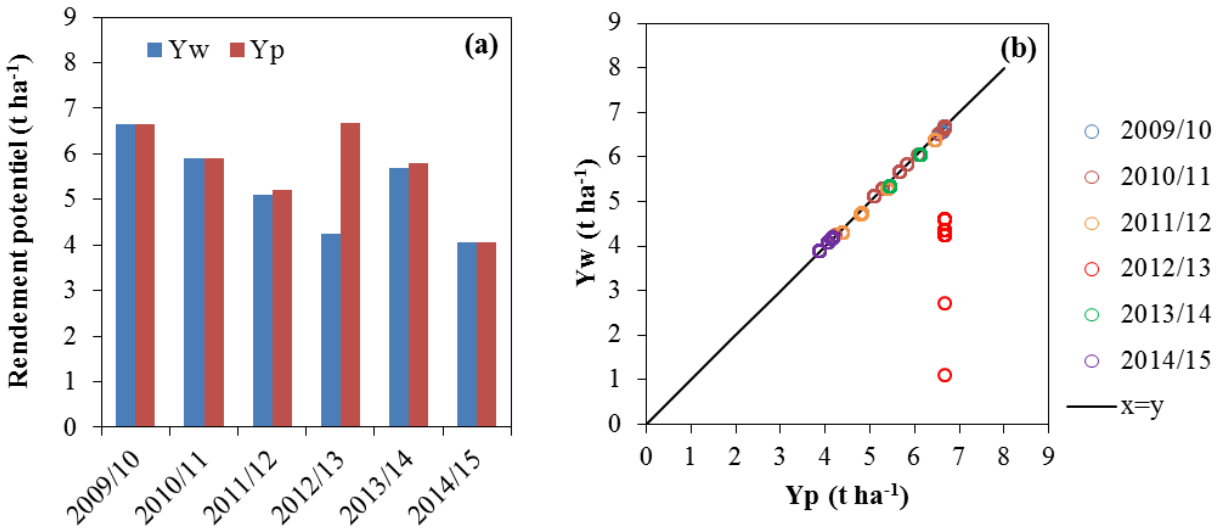


Figure 9 : Rendement potentiel et rendement potentiel limité par l'eau de 2009/10 à 2014/15
Evolution du rendement potentiel (Yp) et du rendement potentiel limité par l'eau (Yw) (a). Relation entre Yw et Yp (b) simulé avec une densité de plantation optimale (15 poquet/m²). Les variations des points pour la même année sont dues à des dates de semis différentes

Afin d'évaluer les effets de la densité de plantation sur les variations de rendement, la simulation a été réalisé avec une densité de plantation optimale (15 poquets m^{-2}) et avec la densité de plantation réelle. La diminution de rendement due à la densité de plantation est en moyenne de 7.5% durant les 6 saisons culturales variant de 0.7 % en 2012 à 13% en 2011 (Figure 10a,b).

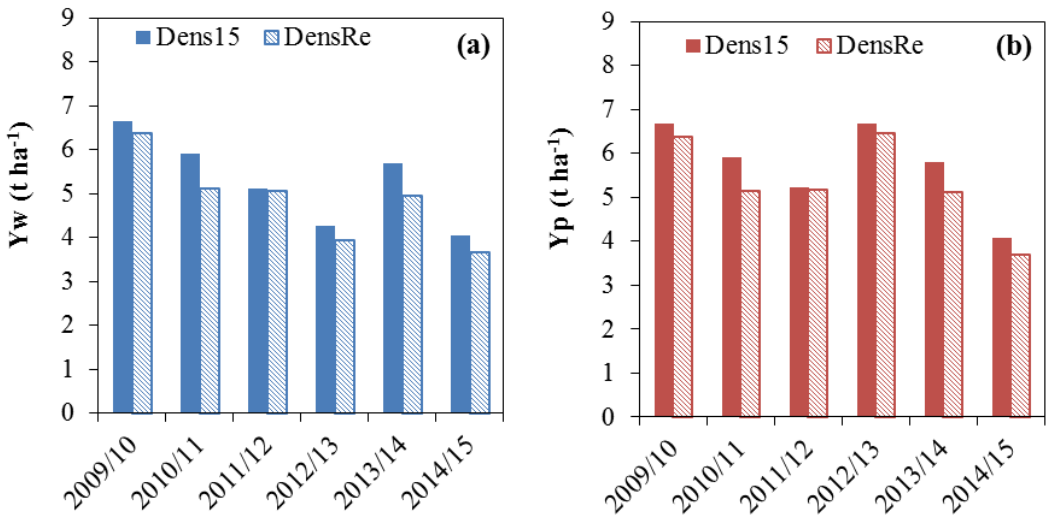


Figure 10 : Rendement potentiel et rendement potentiel limité par l'eau selon la densité de plantation
Evolution du rendement potentiel limité par l'eau (Yw) (a) et le rendement potentiel (Yp) (b) avec une densité de plantation optimale de 15 poquet/m² (Dens15) et une densité de plantation réelle (DensRe)

3.3.2. Effet des traitements sur le rendement relatif au rendement potentiel (Yrel)

L'ANOVA sur le rendement relatif au rendement potentiel révèle un effet de l'année de culture en interaction avec les traitements. Ce qui suggère que d'autres facteurs d'intensité variable entre les années autre que la pluviométrie, la température et le rayonnement global, influencent le rendement en riz durant une année de culture. L'année 2012/13, qui est la seule année à stress hydrique notable, est aussi l'année où les rendements sont les plus nettement inférieurs au rendement potentiel limité par l'eau. Durant cette année, il paraît nécessaire d'invoquer un aléa particulier, non climatique, pour expliquer les rendements particulièrement bas observés dans cet essai (figure 11).

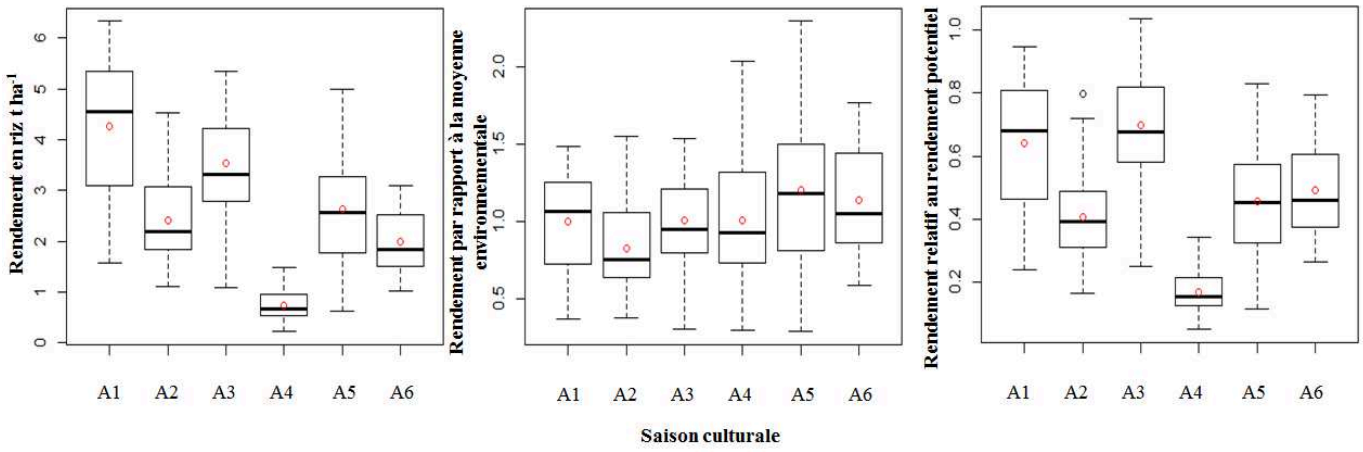


Figure 11 : Evolution du rendement observé (t ha^{-1}), du rendement par rapport à la moyenne environnementale (%) et du rendement relatif au rendement potentiel limité par l'eau (%) de 2009/10 à 2014/15 (A1 à A6)
Chaque boite représente 48 données de rendement par an, soit 12 traitements x 4 répétitions. Les points rouges représentent la moyenne annuelle.

Le résultat de l'ANOVA sur le rendement relatif a montré un effet principal de l'année de culture ($p < 0.001$) et de l'interaction de l'année de culture, le mode de gestion du sol et des résidus et de la rotation culturale ($p < 0.01$). La gestion du sol et des résidus avec MD//R n'a pas d'effet sur le rendement relatif Yrel tandis que des effets ont été mis en évidence avec MS//S//R pour la saison 2009/10 (première année) et 2014/15 (sixième année). En 2009/10, le système AC a un faible Yrel par rapport aux systèmes labourés. En 2014/15, le labour avec restitution de résidus a un faible Yrel par rapport à AC. (Figure 12).

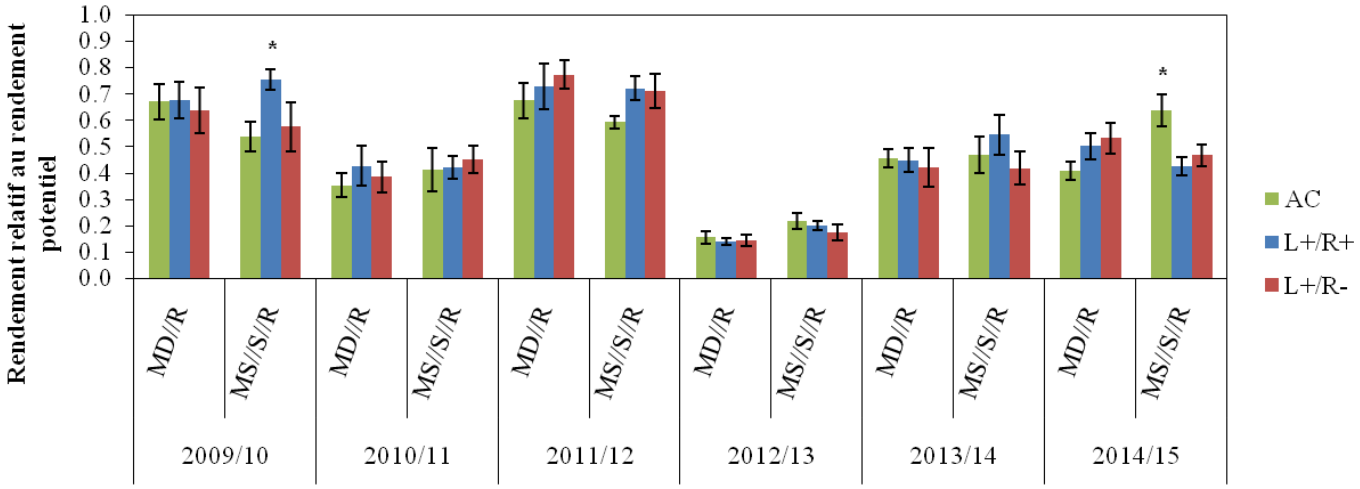


Figure 12 : Rendement relatif au rendement potentiel limité par l'eau
Données selon la rotation culturale (MD//R : rotation biennale de maïs + dolique // riz ; MS//S//R : rotation triennale de maïs + stylosanthes // stylosanthes // riz) et le mode de gestion du sol et des résidus (AC : sans labour avec rétention des résidus, L+/R+ : labour avec incorporation des résidus dans le sol, L+/R- : Labour sans restitution des résidus) de 2009/10 à 2014/15. Les astérisques indiquent une différence significative entre le mode de gestion du sol et des résidus selon saison culturale x rotation culturale

4. Discussions

4.1. Simulation du rendement potentiel de B22 avec PYE

Les calibrations réalisées dans cette étude ont permis d'apporter plus de précision sur la définition des stades phénologiques de B22 ainsi que les paramètres du bilan hydrique, déjà bien avancé dans les travaux de Bruelle et al. 2017. Toutefois, les manques ainsi que la variabilité des données sur la densité de plantation et la profondeur maximale atteinte par les racines ont induits des incertitudes sur la valeur de ces paramètres.

Les mesures de stock en eau sur le dispositif expérimental ont été réalisées tardivement après les premières pluies, ce qui n'a pas permis d'évaluer les pertes par évaporation du sol et la transpiration en début de cycle. Par ailleurs, les données de stock en eau sur quelques parcelles du dispositif expérimental durant une année pluvieuse suggèrent que la réserve utile varie d'une parcelle à l'autre. Toutefois, la variation des paramètres définissant la réserve utile du sol n'a pas

d'effet significatif sur les sorties du modèle à l'exception de l'année 2012/13 où il y a eu un stress hydrique notable.

En général, les résultats de simulation ont suggéré qu'il n'y avait pas eu de stress hydrique sur l'essai mais plutôt une variation du rendement potentiel importante due aux variations de température, de pluviométrie et de rayonnement.

4.2. Les effets des traitements sur la variation du rendement en riz

L'utilisation du modèle PYE et la moyenne environnementale n'ont pas permis de mettre en évidence les effets des traitements sur les variations du rendement en riz. Les résultats suggèrent que d'autres facteurs potentiels non contrôlés par le modèle et par l'expérimentateur contribuent à la variabilité annuelle du rendement en grain de B22. Il semble également qu'il y ait des facteurs variant entre les parcelles de l'essai expliquant la forte variabilité intra-traitement des données de cet essai.

Les mesures de stock en eau sur les parcelles en 2014/15 ont montré une grande variabilité de la réserve utile du sol d'une parcelle à l'autre. De plus, les simulations de rendement potentiel limité par l'eau montrent des taux de drainage importants sous culture la plupart des années. Ces observations suggèrent la possibilité de variations importantes des pertes de nutriments par lixiviation, à la fois entre les années et entre parcelles une année donnée, sans lien avec les traitements. Ainsi, les pertes par lixiviation pourraient expliquer d'une part le faible rendement observé par rapport au rendement potentiel, même avec les traitements les plus fertilisés, d'autre part, la variabilité des résultats intra traitements qui est forte par rapport aux variations entre traitements.

Cette variabilité intra-traitements peut également être amplifiée par le ruissellement qui n'a pas été pris en compte dans les simulations et qui peut varier dans le dispositif expérimental en fonction des années comme entre les parcelles. En effet, le taux de ruissellement dépend principalement du taux d'infiltration de l'eau dans le sol et de la quantité et de l'intensité de la pluviométrie (Dunne et al. 1991). Enfin, les maladies et la pression parasitaire durant le cycle cultural peuvent également être un facteur de variation annuelle du rendement en riz. Ainsi, il semble nécessaire de tenir compte de la variabilité spatiale du dispositif expérimental, notamment de la fertilité du sol.

Les analyses de variance sur le rendement relatif ainsi que le rendement par rapport à la « moyenne environnementale » ont permis de mettre en évidence un effet significatif de la rotation triennale avec les résidus de stylosanthes en AC à la sixième année. D'après les résultats dans le chapitre 3 de la thèse, les variations de rendement entre les traitements en 2014/15 étaient principalement liées à une diminution significative de l'enherbement sur les parcelles en AC issus de la rotation triennale par rapport aux autres traitements. De plus, la teneur en azote

minéral dans l'horizon superficiel du sol au stade germination a été supérieure pour ce traitement par rapport aux autres.

Le faible rendement en 2012/13 est dû en partie au le stress hydrique d'après le rendement Yp et Yw. Toutefois, l'écart avec le rendement potentiel reste élevé. Ce qui suggère que l'attaque fongique durant cette année a joué une part importante dans la diminution du rendement en riz.

5. Conclusion

Le rendement en riz sur le dispositif expérimental est faiblement expliqué par le mode de gestion du sol et des résidus, la rotation culturale et le niveau de fertilisation, comparativement à d'autres facteurs responsables des variations importantes observées dans cet essai en fonction des années et à l'intérieur des traitements. Parmi ces autres facteurs de variation, il y a les facteurs pédoclimatiques dont la pluviométrie, le rayonnement global, la température et la capacité de rétention en eau du sol. La pluviométrie impacte peu les rendements à travers le stress hydrique, qui ne se manifeste qu'une année sur 6 dans l'essai analysé. Mais il paraît probable qu'elle contribue fortement aux variations de rendement à travers des variations de ruissellement et de drainage, suscitées par les variations temporelles de la pluie et les variations spatiales des caractéristiques du sol, ainsi que par les variations du système de culture susceptibles d'interagir avec cet excès d'eau. L'analyse du rendement avec la moyenne environnementale n'a pas permis de déterminer les interactions en jeu entre saison culturale et les différents facteurs du système de culture (rotation culturale, mode de gestion du sol/résidus, fertilisation). Et bien que le calage de PYE avec le cultivar B22 ait été satisfaisant, notre approche par modélisation n'a pas été suffisante pour démêler ces interactions entre système de culture, bilan hydrique et rendements suite à une variabilité spatiale du dispositif expérimental. Notre étude suggère que d'autres facteurs non tenu en compte dans l'expérimentation et par le modèle PYE peuvent influencer la variabilité annuelle du rendement en riz.

L'effet de l'AC avec un type de mulch à forte teneur en azote a été mis en évidence à la sixième année de pratique par l'approche faisant appel à la modélisation et à l'analyse de stabilité. Une rotation triennale avec le stylosanthes est plus favorable qu'une rotation biennale avec l'association de maïs et dolique sur le rendement en riz à long terme. Les résultats de cette étude nous ont montré que les mesures de réserve utile du sol des parcelles sur le dispositif ainsi que la croissance racinaire du riz sont nécessaire afin d'identifier les pertes de nutriments par lixiviation et leur rôle dans les variations de rendements.

DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION

La thèse a été structurée en 4 chapitres sous forme d'articles scientifiques afin de répondre à l'objectif principal qui est de caractériser les impacts des fonctions agro-écologiques de l'AC dans l'amélioration du rendement en riz. L'AC a été proposée dans la région comme une solution technique pour augmenter la productivité de l'agriculture pluviale qui est menacée par la variabilité pluviométrique et la faible fertilité des zones pluviales (Penot et al. 2009). Il est important d'évaluer les impacts de ses principes qui sont le minimum de travail du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des espèces cultivées dans l'amélioration de la production agricole. Avec une revue de la littérature, des expérimentations agricoles et des approches utilisant le concept de l' « analyse de stabilité » et la modélisation, cette étude nous a permis de mettre en évidence les impacts de l'AC sur la production rizicole ainsi que les interactions des fonctions agro-écologiques de l'AC avec les conditions pédoclimatiques.

1. Fonctions agro-écologiques du mulch en fonction de la quantité de résidus

La revue de la littérature nous a montré que la quantité de couverture nécessaire va dépendre essentiellement des fonctions agro-écologiques attendues. Il a été démontré que les effets de la couverture du sol sur un sol non labouré sont très nets en ce qui concerne l'amélioration du taux d'infiltration de l'eau dans le sol, la limitation du ruissellement et de l'érosion du sol, même avec une faible quantité de couverture de l'ordre de 2 à 3 t ha^{-1}. Ceci rejoint les recommandations de la FAO avec une couverture du sol à 30 % pour avoir les effets bénéfiques de l'AC (FAO 2015). Par contre, les données sur le contrôle de l'enherbement, la disponibilité des nutriments ainsi que la faune du sol en fonction de la quantité de mulch étaient très dispersées, suggérant l'interaction de ses fonctions agro-écologiques avec d'autres facteurs, notamment le type de résidus et les conditions pédoclimatiques. Il a été aussi montré que les effets maximums de la couverture du sol sur la disponibilité des nutriments (N, P, K) et l'augmentation de la faune du sol parmi les données de la littérature sont faibles et ne représente qu'une augmentation respective de 30% et de 45% par rapport au sol nu. L'effet maximum serait atteint dès 3 t ha^{-1} de résidus pour la disponibilité des nutriments, tandis que l'effet maximum pour l'augmentation de la faune du sol ne serait atteint qu'à partir de 10 t ha^{-1} de résidus. Néanmoins, les données disponibles pour ces dernières fonctions sont nettement moins nombreuses que pour ce qui est de l'effet du mulch sur l'érosion par exemple. Ce premier chapitre nous a permis également de déterminer des courbes enveloppe qui correspondent au maximum d'effet qu'il a été permis d'observer dans la littérature (Figure 1). Ces courbes enveloppe sont une bonne approximation de l'effet maximum que l'on espérer en produisant ou en ajoutant des quantités croissantes de mulch. Les manques de biomasse ont toujours été une des principales contraintes pour la mise en œuvre de l'AC, notamment en Afrique Sub-saharienne (Wezel and Rath 2002; Erenstein 2002; Giller et al. 2009). Avec cette revue, il a été possible de déterminer les fonctions agro-écologiques du mulch

qui seraient potentiellement atteintes avec une faible quantité de biomasse, ainsi que le niveau de biomasse nécessaire pour atteindre les autres fonctions. Ainsi, selon l'objectif du producteur, il n'est pas forcément nécessaire de produire de grandes quantités de biomasse.

L'originalité de ce chapitre est aussi d'avoir représenté de manière homogène l'intensité de ces différentes fonctions agro-écologique en fonction de la quantité de mulch. Ceci permettant de mieux hiérarchiser les effets que l'on peut attendre avec une quantité donnée de mulch. Les conclusions de cette revue doivent être cependant interprétées avec précaution, sachant que pour certaines fonctions agro-écologiques, les données de la littérature ont été très limitées.

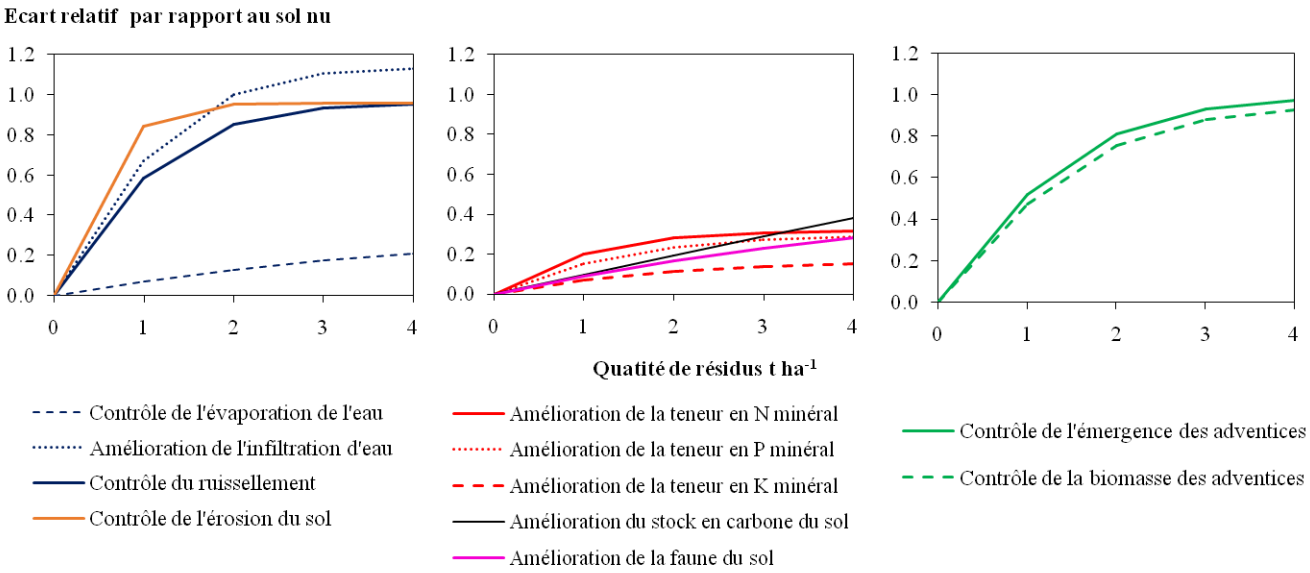


Figure 1 : Effet maximum de l'augmentation de la quantité de résidus jusqu'à 4 t ha^{-1} sur les fonctions agro-écologiques à partir des données de la littérature

En se référant aux quantités de résidus normalement produites sur les parcelles paysannes dans la région du lac Alaotra qui est de l'ordre de 3 - 4 t ha^{-1} pour le stylosanthes et à 5 - 6 t ha^{-1} pour le maïs + dolique (Naudin et al. 2012), il est possible d'atteindre le maximum d'effet des fonctions agro-écologiques du mulch selon les données de la littérature. Toutefois, les quantités de résidus réellement retenues sur les parcelles sont largement plus faibles suite à d'autres utilisations des résidus de culture, notamment pour l'alimentation animale (Naudin et al. 2012). Ainsi, d'après les résultats de la revue, la couverture du sol avec les conditions réelles chez les producteurs serait donc adaptée sur des parcelles dont les contraintes sont relatives aux ruissellements et à l'érosion du sol. D'autres méthodes doivent être mobilisées afin d'assurer les fonctions du mulch sur le contrôle de l'enherbement, de même pour l'augmentation de la teneur en N, P et K minéral dans le sol par la couverture du sol qui reste faible même avec une quantité élevée de mulch.

2. Effet physique du mulch sur l'enherbement

Des expérimentations agricoles ont été menées dans la région du lac Alaotra sur 4 saisons culturales afin d'évaluer l'efficacité de la couverture du sol pour contrôler l'émergence et la

croissance des adventices et l'effet induit sur la production du riz. Les résultats ont montré que l'enherbement sur les parcelles couvertes dépend essentiellement de la quantité et de la distribution de la pluviométrie durant la saison culturale. L'émergence ainsi que la biomasse des mauvaises herbes diminuent avec l'augmentation de la quantité de mulch maintenu sur les parcelles. Toutefois, une grande quantité de résidus de l'ordre de 10 t ha^{-1} est nécessaire pour réduire significativement ($p < 0.05$) la pression des adventices sur le riz par rapport à un sol nu dans les conditions agro-écologiques de notre dispositif expérimental. Nos résultats sont cohérents avec les études précédentes démontrant qu'il faut au moins un taux de couverture de 90% du sol pour avoir un effet sur le contrôle de l'enherbement (Teasdale and Mohler 2000; Bilalis et al. 2003). Il a été également démontré que l'efficacité du mulch sur le contrôle des adventices va dépendre de la vitesse de dégradation du mulch. Une année avec une forte pluviométrie va diminuer l'efficacité du mulch sur le contrôle des adventices suite à une dégradation rapide des résidus. Ceci suggère que le type de résidus joue un rôle dans l'efficacité du mulch sur l'enherbement. Par ailleurs, l'étude sur 2 types de résidus a également permis de montrer que l'effet du mulch sur l'émergence des adventices est plus lié à la quantité de couverture que le taux de couverture du sol (Figure 2).

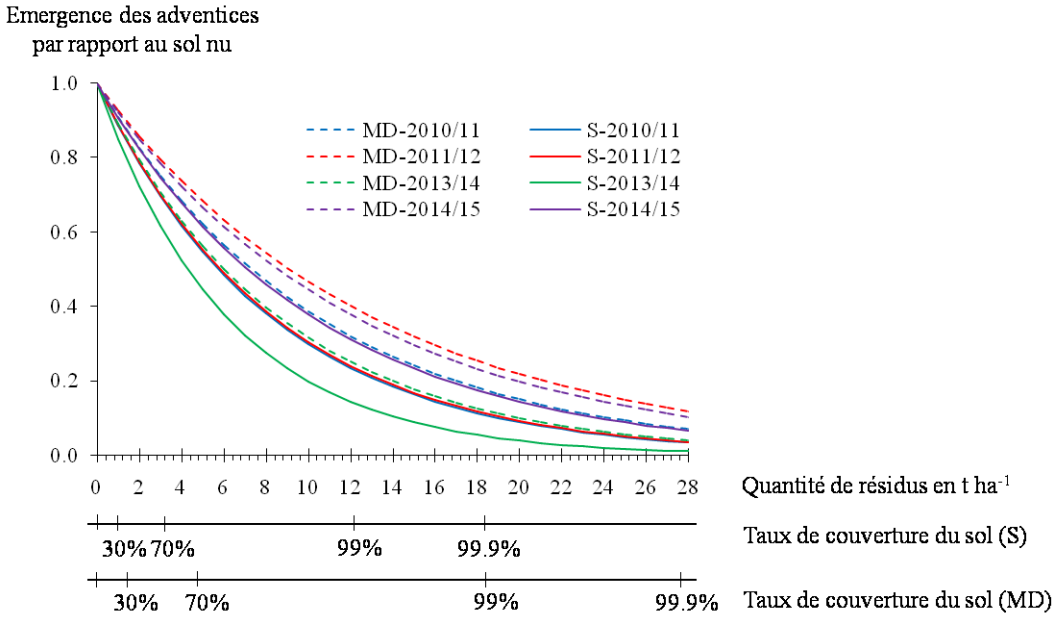


Figure 2 : Relation entre l'émergence des adventices et le type et la quantité de mulch maintenues sur la parcelle avec la correspondance en taux de couverture du sol sur 4 saisons culturales
S : stylosanthes ; MD : maïs + dolique

D'après nos résultats, la biomasse de résidus de stylosanthes et de maïs + dolique mesurés dans les travaux de Naudin et al. (2012) dans la région ne sera pas suffisant pour avoir un effet sur l'émergence et la biomasse des adventices. En revanche, il est probable que l'émergence des adventices soit favorisée sur ces parcelles durant la phase végétative du riz. Dans ce cas, la couverture du sol doit être combinée avec l'utilisation d'herbicide afin de réduire la richesse des graines d'adventices (Muoni et al. 2013) ou d'un sarclage régulier en début de la saison culturale

afin d'assurer le contrôle de l'émergence des adventices en début de cycle du riz (Mashingaidze et al. 2012). D'après les résultats d'expérimentation, le contrôle de l'émergence ainsi que le développement des adventices lorsque le stade du riz est plus avancé (fin tallage) sont assurés. Autrement, il est nécessaire d'augmenter la production de biomasse par la fertilisation ou de choisir une culture à forte production biomasse.

La quantité de couverture nécessaire pour contrôle les adventices dans cette étude semble être élevée par rapport aux études précédentes. La revue de littérature dans le premier chapitre a montré un effet maximum de réduction de l'émergence et de la biomasse des adventices de 90% par rapport au sol nu, effet qui serait atteint à partir de 3 – 4 t ha^{-1} de résidus. La richesse de la banque de semence d'adventices sur le dispositif expérimental atteignant plus de 3000 plantules d'adventices par m² émergeant durant une saison culturale peut en être la cause principale.

3. Effet de l'AC sur le rendement en riz

Dans le troisième chapitre, il a été démontré que l'augmentation du rendement en riz sur les parcelles en AC par rapport aux parcelles en CT en cinquième et sixième année de pratique de l'AC est essentiellement liée à une diminution de l'infestation des adventices pendant la période de végétation du riz. Le gain en rendement suite aux pratiques de l'AC est proportionel à la perte d'émergence des adventices (Figure 3). L'émergence et la biomasse des adventices ont généralement été réduites sur les parcelles en AC, avec en moyenne 7 t ha^{-1} de résidus, en 2013/14 et 2014/15. Les résultats ont aussi montré que les effets de l'AC sur le contrôle de l'émergence des adventices sont liés à un effet physique du mulch qui va créer un environnement peu favorable à l'émergence et le développement des adventices (Teasdale and Mohler 1993).

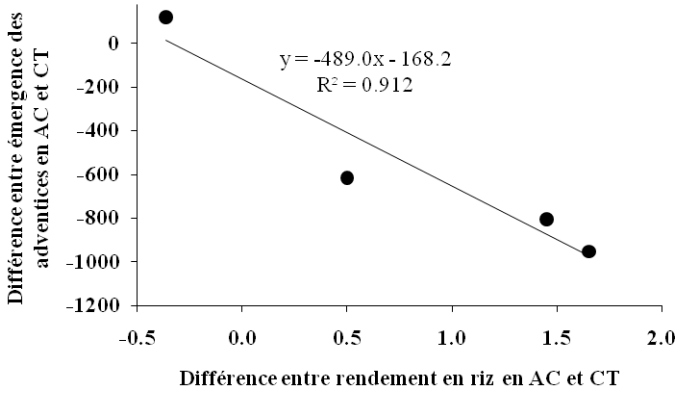


Figure 3 : Relation entre la différence de rendement en riz et la différence en émergence des adventices en AC et CT
AC : Agriculture de conservation, CT : pratiques conventionnelles

Pendant l'année à forte pluviométrie (2014/15) qui a favorisé la dégradation des résidus, les effets de l'AC sur la réduction de la biomasse des adventices par rapport au CT ont été significatifs seulement pendant la phase de croissance végétative du riz, alors que la réduction a été perçue durant toute la saison culturale en 2013/14. Les effets de l'AC sur le contrôle des

adventices sont fortement dépendants de la quantité de pluie et de la distribution des pluies dans l'année (Mhalanga et al. 2017).

La dynamique de l'eau dans le sol ainsi que la dynamique de l'azote minéral sont fortement influencées par le régime pluviométrique et ne différent généralement pas significativement entre AC et CT. Il faut cependant noter que les mesures du stock en eau ont été réalisées sur une année à forte pluviométrie (1 348 mm). Le sol a été saturé pendant presque toute la saison culturale. Bien que l'amélioration du stock en eau dans l'horizon superficiel du sol (0-20 cm) en AC par rapport au CT ait été mise en évidence sur deux prélèvements pendant les périodes d'assèchement du sol, ceci n'a probablement pas affecté le rendement en riz. Afin de mettre en évidence les effets de l'AC sur le rendement en riz suite à l'amélioration du stockage en eau du sol, les mesures devraient être réalisées durant une année moins pluvieuse. Ceci a déjà été avancé par les précédentes études qui ont pas pu mettre en évidence les effets bénéfiques de l'AC durant les années pluvieuses (Sissoko et al. 2013; Bruelle et al. 2017). Les effets de la couverture permanente du sol sur la limitation des pertes en eau par évaporation (*cf.* chapitre 1) en début de cycle seront mis en évidence avec des mesures du stock en eau bien avant les premières pluies. En ce qui concerne la teneur en azote minéral du sol, elle a été plus élevée dans l'horizon superficiel 0-10 cm au stade germination avec le traitement Ac avec la rotation triennale à base de stylosanthes par rapport aux autres traitements en 2014/15. Ceci se manifeste également par une interception lumineuse plus élevée de la culture avec ce traitement à ce stade, et sur une parcelle enherbée (HW). La forte teneur en azote minéral à ce stade peut être liée à une faible infestation des mauvaises herbes, mais aussi à une restitution d'azote minéral dans le sol par la dégradation du stylosanthes (Rakotoarivelo 2017).
Les mesures de l'azote dans le sol nous ont renseignés sur la teneur élevée de l'azote minéral dans le sol du dispositif expérimental quelque soit le traitement, allant jusqu'à 200 kg ha^{-1} dans l'horizon 0-90 cm. Bien que les effets de l'AC sur le recyclage des nutriments ont été reportés (e.g. Lal 2009; Turmel et al. 2014), d'autres études ont aussi trouvé l'absence des effets de l'AC sur l'azote minéral dans le sol (Karlen et al. 1994; Maltas et al. 2009; Iqbal et al. 2011). Cette étude nous a également permis de mettre en évidence la migration de l'azote minéral en profondeur après les fortes pluies quelle que soit la rotation culturale et le mode de gestion du sol et des résidus. L'azote minéral en profondeur peut être absorbé par les plantes, mais aussi perdu par lessivage. Une mesure de la teneur en azote dans le plant de riz à chaque date de prélèvement du sol aurait apporté des informations complémentaires sur les effets de la dynamique de l'azote sur le développement du riz.

Dans l'ensemble, les résultats montrent qu'il y a eu peu d'effet de l'AC par rapport au CT sur le dispositif expérimental à part les effets sur l'enherbement, malgrè l'âge du dispositif (5^{e} et 6^{e} année de pratique de l'AC considérées dans cette étude). Nos résultats sont cohérents avec ceux de Maltas et al. (2007) qui ont démontré un faible impact des systèmes AC sur l'amélioration de la fertilité du sol même après 10 ans de pratique d'AC.

Cette étude a permis de mettre en évidence les avantages potentiels sur la productivité des cultures grâce à la réduction de la pression des adventices. Bien que nécessitant une grande quantité de couverture dépassant la capacité des producteurs dans la région du Lac Alaotra (Naudin et al. 2012), il a été déduit de nos travaux qu'il est possible de produire environ 7 t ha^{-1} de résidus avec une rotation culturale à forte production de biomasse. L'AC présente ainsi des avantages pour les petits exploitants agricoles dans des régions comme le lac Alaotra, qui font face à des contraintes de main-d'œuvre en raison du désherbage manuel, mais qui ont généralement des moyens limités pour acheter les herbicides.

4. Variations de performance du riz selon la rotation culturale, la gestion du sol/résidus et la fertilisation

Les résultats du dernier chapitre analysant les rendements en riz sur les 6 saisons culturales ont montré que les effets des facteurs dont la rotation culturale, le mode de gestion du sol et des résidus ainsi que le niveau de fertilisation du sol sont en interaction avec d'autres facteurs probablement liés à la variabilité spatiale du dispositif expérimental. En effet, les rendements du riz par rapport à la moyenne environnementale présentent une forte variabilité dans le dispositif expérimental indépendamment des traitements (Figure 4). Ceci peut s'expliquer par les attaques des bio-agresseurs qui peuvent varier d'une parcelle à l'autre et d'une année à l'autre, mais aussi par les flux hydrique qui n'ont pas été étudiés en détail dans l'expérimentation. D'après les mesures de stock en eau du sol durant la saison culturale en 2014/15, la capacité de rétention en eau du sol qui se traduit par la différence entre une mesure réalisée sur sol sec et sur sol saturé est variable d'une parcelle à l'autre indépendamment des traitements. Les flux hydrique influençant les flux des nutriments, cela pourrait expliquer la variabilité spatiale du dispositif expérimental. Les deux approches ont permis de mettre en évidence l'effet de l'AC sur l'amélioration du rendement en riz à la sixième année d'expérimentation. En se référant aux résultats du chapitre 3, ceci s'explique principalement par un faible enherbement des parcelles en AC pendant la phase végétative du riz et une teneur élevée en azote minéral du sol au stade germination avec les résidus de stylosanthes durant 2014/15.

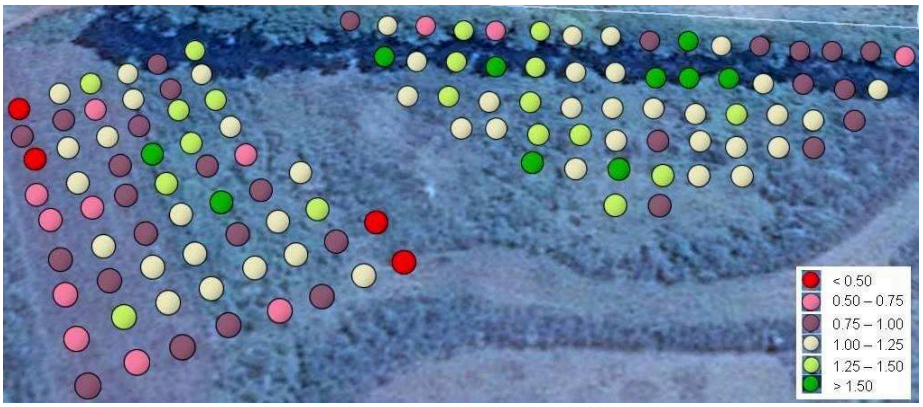


Figure 4 : Rendement en riz par rapport à la moyenne environnementale sur 6 saisons culturales du 2009/10 au 2014/15
Données du dispositif expérimental à Ambohitsilaozana (17°35'S, 48°30'E, 760 m alt.), région du lac Alaotra, Madagascar

Le manque de données sur le cultivar B22 a conduit à des incertitudes sur la valeur de certains paramètres notamment sur la profondeur maximale des racines et la densité de plantation. Bien que cela n'ait pas affecté significativement les sorties sur le rendement potentiel du riz, des mesures complémentaires pourrainet être réalisées afin d'améliorer la calibration du modèle avec le cultivar B22. Cette étude nous a également renseigné sur l'importance de la prise en compte des flux hydriques dans le sol, et par conséquent des flux de nutriments qui semble jouer un rôle considérable dans l'élaboration du rendement en riz. Il est alors indispensable d'intégrer les flux de nutriments dans le modèle afin d'apporter plus d'éléments d'explication dans l'élaboration du rendement en riz sur le dispositif expérimental. Ainsi, la proposition de système AC doit tenir compte des principales contraintes parcellaire, notamment son niveau de fertilité, son niveau d'enherbement et la capacité de rétention en eau du sol afin d'obtenir les effets bénéfiques de l'AC sur l'augmentation du rendement.

Les avantages de l'AC face aux aléas climatiques peuvent également se traduire par une bonne gestion du calendrier cultural. Avec la présence de mulch, la date de semis peut être réalisée précocement sans pour autant être affectée par le retard ou la manque de pluie (Bruelle et al. 2015). De plus, des gains sur la diminution des charges de travail pourraient survenir suite à l'absence de labour et la diminution des temps de sarclage (Domas et al. 2008).

Notre étude qui se base sur les performances agronomiques de l'AC en milieu contrôlé pourrait être complétée par la vérification des résultats dans les conditions réelles en milieu paysan, notamment en ce qui concerne les conditions pédologiques, la densité de plantation, la pression des adventices et la quantité de résidus réellement retenue sur les parcelles. Il serait également plus judicieux de confronter les résultats avec les perceptions et les objectifs des producteurs afin de déterminer les conditions dans lesquelles les pratiques de l'AC seraient bénéfiques pour les producteurs. En ce qui concerne la modélisation, les résultats avec les expérimentations agronomiques suggèrent qu'il va falloir aussi modéliser le bilan azoté ainsi que la compétition de la culture avec les adventices afin de pouvoir mieux prédire l'effet de l'AC sur le rendement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Affholder F (1997) Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. F Crop Res 52:79–93.

Affholder F, Tittonell P, Corbeels M, et al (2012) Ad Hoc Modeling in Agronomy: What Have We Learned in the Last 15 Years? Agron J 104:735–748. doi: 10.2134/agronj2011.0376

Affholder F, Poeydebat C, Corbeels M, et al (2013) The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics : Assessment and analysis through field surveys and modelling. F Crop Res 143:106–108. doi: 10.1016/j.fcr.2012.10.021

Ahmed ZI, Ansar M, Iqbal M, Minhas NM (2007) Effect of planting geometry and mulching on moisture conservation, weed control and wheat growth under rainfed conditions. Pakistan J Bot 39: 1189–1195

Akaike H (1974) A new look at the statistical model identification. IEEE Trans Automat Contr 19:716–723. doi: 10.1109/TAC.1974.1100705

Anderson JM, Ingram JSI (1989) Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. UK, pp 73–74

Anzalone A, Cirujeda A, Aibar J et al (2010) Effect of biodegradable mulch materials on weed control in processing tomatoes. Weed Technol 24:369–377. doi:10.1614/WT-09-020.1

Aulakh MS, Doran JW, Walters DT, et al (1991) Crop Residue Type and Placement Effects on Denitrification and Mineralization. Soil Sci Soc Am J 1025:1020–1025.

Balwinder-Singh, Eberbach PL, Humphreys E, Kukal SS (2011) The effect of rice straw mulch on evapotranspiration, transpiration and soil evaporation of irrigated wheat in Punjab, India. Agric Water Manag 98:1847–1855. doi:10.1016/j.agwat.2011.07.002

Bélières J., Bonnal P, Bosc P., et al (2014) Les agricultures familiales du monde : définitions, contributions, et politiques publiques, Coéd. AFD.

Benech-Arnold R, Sanchez R, Forcella F et al (2000) Environmental control of dormancy in weed seed banks in soil.pdf. Field Crop Res 67:105–122

Beri V, Sidhu BS, Bahl GS, Bhat AK (1995) Nitrogen and phosphorus transformations as affected by crop residue management practices and their influence on crop yield. SoilUseManag 11:51–54. doi:10. 1111/j.1475-2743.1995.tb00496.x

Bernoux M, Cerri CC, Cerri CEP, et al (2006) Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil: A review. Agron Sustain Dev 26:1–8. doi: 10.1051/agro:2005055

Bertol I, Engel FL, Mafra AL et al (2007) Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. Soil Tillage Res 94:142–150. doi:10.1016/j.still.2006.07.008

Bilalis D, Sidiras N, Economou G, Vakali C (2003) Effect of different levels of wheat straw soil surface coverage on weed flora in Vicia faba crops. J Agron Crop Sci 189:233–241

Blanchart E, Bernoux M, Sarda X et al (2007) Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in Central Brazil. Agric Conspec Sci 72:81–87

Blanco-Canqui H, Lal R (2007a) Impacts of long-term wheat strawman- agement on soil hydraulic properties under no-tillage. Soil Sci Soc Am J 71:1166–1173. doi:10.2136/sssaj2006.0411

Blanco-Canqui H, Lal R (2007b) Soil structure and organic carbon rela- tionships following 10 years of wheat straw management in no-till. Soil Tillage Res 95:240–254. doi:10.1016/j.still.2007.01.004

Blanco-Canqui H, Lal R (2009) Crop Residue Removal Impacts on Soil Productivity and Environmental Quality. Plant Sci 37–41. doi:10. 1080/07352680902776507

Brévault T, Bikay S, Maldès JM et al (2007) Impact of a no-till with mulch soil management strategy on soil macrofauna communities in a cotton cropping system. Soil Tillage Res 97:140–149. doi:10. 1016/j.still.2007.09.006

Brisson N, Mary B, Ripoche D, et al (1998) STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances . 1 . Theory and parameterization applied to wheat and corn.

Brisson N, Gary C, Justes E, et al (2003) An overview of the crop model STICS. Eur J Agron 18:309–332.

Bruelle G, Naudin K, Scopel E, et al (2015) Short-to mid-term impact of conservation agriculture on yield variability of upland rice: Evidence from farmer's fields in madagascar. Exp Agric 51:66–84. doi: 10.1017/S0014479714000155

Bruelle G, Affholder F, Abrell T, et al (2017) Can conservation agriculture improve crop water availability in an erratic tropical climate producing water stress? A simple model applied to upland rice in Madagascar. Agric Water Manag 192:281–293. doi: 10.1016/j.agwat.2017.07.020

Buhler DT, Mester C, Kohler KA (1996) The effect of maize residues and tillage on emergence of Setaria faberi Abutilon theophrasti , Amaranthus retroflexus and Chenopodium album. Weed Res 36:153–165. doi: 10.1111/j.1365-3180.1996.tb01811.x

Bunna S, Sinath P, Makara O et al (2011) Effects of straw mulch on mungbean yield in rice fields with strongly compacted soils. Field Crop Res 124:295–301. doi:10.1016/j.fcr.2011.06.015

Caamal-Maldonado JA, Jiménez-Osornio JJ, Torres-Barragán A, Anaya AL (2001) The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. Agron J 93:27–36

Calonego JC, Rosolem CA (2013) Phosphorus and potassium balance in a corn–soybean rotation under no-till and chiseling. Nutr Cycl Agroecosyst 96:123–131. doi:10.1007/s10705-013-9581-x

Campbell CA, Mcconkey BG, Zenlner RP et al (1996a) Long-term ef- fects of tillage and crop rotations on soil organic C and total N in a clay soil in southwestern Saskatchewan. Can J Soil Sci 76:395–401

Campbell CA, Mcconkey BG, Zentner RP et al (1996b) Tillage and crop rotation effects on soil organic C and N in a coarse-textured Typic Haploboroll in southwestern Saskatchewan. Soil Tillage Res 37:3– 14

Campiglia E, Caporali F, Radicetti E, Mancinelli R (2010) Hairy vetch (Vicia villosa Roth.) cover crop residue management for improving weed control and yield in no-tillage tomato (Lycopersicon esculentum Mill.) production. Eur J Agron 33:94–102. doi:10. 1016/j.eja.2010.04.001

Campiglia E, Radicetti E, Mancinelli R (2012) Weed control strategies and yield response in a pepper crop (Capsicum annuum L.) mulched with hairy vetch (Vicia villosa Roth.) and oat (Avena sativa L.) residues. Crop Prot 33:65–73. doi: 10.1016/j.cropro.2011.09.016

Carvalho JLN, Nogueirol RC, Menandro LMS, et al (2016) Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal : a ma- jor review. GCB Bioenergy 1–16. doi: 10.1111/gcbb.12410

Cattan P, Cabidoche Y-M, Lacas J-G, Voltz M (2006) Effects of tillage and mulching on runoff under banana (Musa spp.) on a tropical Andosol. Soil TillageRes 86:38–51. doi:10.1016/j.still.2005.02.002

Chauhan BS, Johnson DEE (2011) Ecological studies on Echinochloa crus- galli and the implications for weed management in direct-seeded rice. Crop Prot 30:1385–1391. doi:10.1016/j.cropro.2011.07.013

Chauhan BS, Singh RG, Mahajan G et al (2012) Ecology and management of weeds under conservation agriculture: a review. Crop Prot 38:57–65. doi:10.1016/j.cropro.2012.03.010

Chauhan BS (2013) Seed germination ecology of feather lovegrass [Eragrostis tenella (L.) Beauv. Ex Roemer & J.A. Schultes]. PLoS One 8:e79398. doi:10.1371/journal.pone.0079398

Chauhan BS, Abugho SB (2013) Effect of crop residue on seedling emer- gence and growth of selected weed species in a sprinkler-irrigated zero-till dry-seeded rice system. Weed Sci 61:403–409. doi:10. 1614/WS-D-12-00147.1

Clapp CE, Allmaras RR, LayeseMF et al (2000) Soil organic carbon and 13C abundance as related to tillage, crop residue, and nitrogen fer- tilization under continuous corn management in Minnesota. Soil Tillage Res 55:127–142. doi:10.1016/S0167-1987(00)00110-0

Corbeels M, Scopel E, Cardoso A et al (2006) Soil carbon storage potential of direct seedingmulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. Glob Chang Biol 12:1773–1787. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01233.x

Corbeels M, Graaff J De, Hycenth T, et al (2014) Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa : A multi-scale analysis. Agric Ecosyst Environ 187:155–170. doi: 10.1016/j.agee.2013.10.011

Dabat M, Jenn-treyer O, Razafimandimby S (2008) L'histoire inachevée de la régulation du marché du riz à Madagascar. Econ Rural 308:6–18. doi: 10.4000/economierurale.330

De Mendiburu F (2016) Statistical procedures for agricultural research. Packag 124 1–157.

Dickey EC, Shelton DP, Jasa PJ, Peterson T (1985) Soil Erosion from Tillage Systems Used in Soybean and Corn Residues in Soybean and Corn Residues. Trans Am Soc Agric Eng 28:1124–1130

Domas R, Penot E, Andriamalala H, Quand SC (2008) Quand les tanetys rejoignent les rizières au lac Alaotra : Diversification et innovation sur les zones exondées dans un contexte foncier de plus en plus saturé. In: Regional Workshop on conservation agriculture Investing in sustainable agriculture: The case of Conservation Agriculture and Direct Seeding Mulch-Based Cropping Systems. Laos,

Domas R, Penot E, Andriamalala H (2009) "Système de riziculture pluviale innovants" Le cas de la rive Est du Lac Alaotra. In: Atelier national sur la recherche et le développement du riz pluvial à Madagascar. Madagascar, pp 86–91

Dunne T, Zhang W, Aubry BF (1991) Effects of Rainfall, Vegetation, and Microtopography on infiltration and Runoff. Water Resour Res 27:2271–2285.

Erenstein O (2002) Crop residue mulching in tropical and semi-tropical countries: An evaluation of residue availability and other technological implications. Soil Tillage Res 67:115–133. doi: 10.1016/S0167-1987(02)00062-4

FAO (2015) Conservation agriculture. http://www.fao.org/ag/ca/1a.html. Accessed 16 Feb 2017

FAO (2015) Conservation agriculture. http://www.fao.org/ag/ca/1a.html. Accessed 16 Feb 2017

FAO (2017) Plant Production and Protection Division: Integrated Weed Management. http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/spi/scpi-home/managing-ecosystems/integrated-weed-management/en/. Accessed 16 Feb 2017

FAO, FIDA, OMS, PAM U (2017) L'Etat de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2017. Renforcer la résilience pour favoriser la paix et la sécurité alimentaire, FAO. Rome

Feng Y, Liu Q, Tan C et al (2014) Water and nutrient conservation effects of different tillage treatments in sloping fields. Arid Land Res Manag 28:14–24. doi:10.1080/15324982.2013.811446

Findeling A, Ruy S, Scopel E (2003) Modeling the effects of a partial residuemulch on runoff using a physically based approach. JHydrol 275:49–66. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00021-0

Forest F, Clopes A (1994) Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In: Reyniers F-N, Netoyo L (eds) Bilan Hydrique Agricole et Sécheresse en Afrique Tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par le système de culture. Libbey, Paris, pp 3–15

Gangwar KS, Singh KK, Sharma SK, Tomar OK (2006) Alternative tillage and crop residue management in wheat after rice in sandy loam soils of Indo-Gangetic plains. Soil Tillage Res 88:242–252

Gao LZ, Jin ZQ, Huang Y, Zhang LZ (1992) Rice clock model: a computer model to simulatte rice development. Agric For Meteorol 60:1–16.

Gava R, de Freitas PSL, de Faria RT et al (2013) Soil water evaporation under densities of coverage with vegetable residue. Eng Agric 33: 89–98. doi:10.1590/S0100-69162013000100010

Giller KE, Witter E, Corbeels M, Tittonell P (2009) Conservation agri- culture and smallholder farming in Africa: the heretics' view. Field Crop Res 114:23–34. doi:10.1016/j.fcr.2009.06.017

Gilley JE, Finkner SC, Varvel GE (1986) Runoff and erosion as affected by sorghum and soybean residue. Trans Am Soc Agric Eng 29: 1605–1610

Govaerts B, Sayre KD, Ceballos-Ramirez JM et al (2006) Conventionally tilled and permanent raised beds with different crop residue man- agement: effects on soilCandNdynamics. Plant Soil 280:143–155. doi:10.1007/s11104-005-2854-7

Govaerts B, Mezzalama M, Unno Y et al (2007) Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity. Appl Soil Ecol 37:18–30. doi:10.1016/j. apsoil.2007.03.006

Gregory JM (1982) Soil cover predictionwith various amounts and types of crop residue. Trans ASABE 25:1333–1337

Halpern MT, Whalen JK, Madramootoo CA (2010) Long-term tillage and residue management influences soil carbon and nitrogen dynamics. Soil Sci Soc Am J 74:1211. doi:10.2136/sssaj2009. 0406

Haynes RJ, Mokolobate MS (2001) Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and themechanisms involved.Nutr Cycl Agroecosyst 59:47–63. doi:10.1023/A:1009823600950

Hendriksen NB (1990) Leaf litter selection by detritivore and geophagous earthworms. Biol Fertil Soils 10:17–21. doi:10.1007/BF00336119

Henriksen BYA, Selmer AR (1970) Automatic Methods for Determining Nitrate and Nitrite in Water and Soil Extracts. Analyst 95:514–518.

Hobbs PR (2007) Conservation agriculture: what is it and why is it important for future sustainable food production? JAgric Sci 145:127– 137. doi:10.1017/S0021859607006892

Hooker BA, Morris TF, Peters R, Cardon ZG (2005) Long-term effects of tillage and corn stalk return on soil carbon dynamics. Soil Sci Soc Am J 69:188–196

Hothorn T, Bretz F, Westfall P (2008) Simultaneous inference in general parametric models. Biometrical J 50:346–363. doi: 10.1002/bimj.200810425

Husson O, Rakotondramanana (2006) Mise au point, évaluation et diffusion des techniques agro-écologiques à Madagascar, GSDM/CIRAD.

Iqbal M, Ul-Hassan A, van Es HM (2011) Influence of Residue Management and Tillage Systems on Carbon Sequestration and Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Dynamics of Soil and Plant and Wheat Production in Semi-arid Region. Soil Sci Plant Anal 42:528–547. doi: 10.1080/00103624.2011.546929

Ito O, Ella E, Kawano N (1999) Physiological basis of submergence tolerance in rainfed lowland rice ecosystem.

Jackman S, Tahk A, Zeileis A, et al (2015) Package "pscl." 100.

Jagadamma S, Lal R (2010) Distribution of organic carbon in physical fractions of soils as affected by agricultural management. Biol Fertil Soils 46:543–554. doi: 10.1007/s00374-010-0459-7

Jodaugienė D, Pupalienė R, Urbonienė M, et al (2006) The impact of different types of organic mulches on weed emergence. Agron Res 4:197–201.

Jordán A, Zavala LM, Gil J (2010) Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. Catena 81:77–85. doi:10.1016/j.catena.2010.01.007

Jordan V, Hutcheon J (2002) Influence of Cultivation Practices on Arable Crop Diseases. In: Soil Tillage in Agroecosystems. CRC Press,

Kahlon MS, Lal R, Ann-Varughese M (2012) Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. Soil Tillage Res 126:151–158

Karlen DL, Wollenhaupt NC, Erbach DC, et al (1994) Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. Soil Tillage Res 31:149–167.

Kato-Noguchi H, Kosemura S, Yamamura S et al (1994) Allelopathy of oats. I. Assessment of allelopathic potential of extract of oat shoots and identification of an allelochemical. J Chem Ecol 20:309–314. doi:10.1007/BF02064439

Kladivko EJ (2001) Tillage systems and soil ecology. Soil Tillage Res 61: 61–76. doi:10.1016/S0167-1987(01)00179-9

Kuznetsova A, Brockhoff P, Christensen R (2016) lmerTest: Tests in Linear Mixed Effects Models. R Packag version 3.0.0:https://cran.r-project.org/package=lmerTest.

Lafitte HR, Ismail A, Bennett J (2004) Abiotic stress tolerance in rice for Asia : progress and the future. Crop Sci 1–17.

Lal R (1984) Mulch requirements for erosion control with the no-till system in the tropics: a review. In: D.E. W (ed) Challenges in African Hydrology and Water Resources, Proceedings of the Harare Symposium. International Association of Hydrological Sciences; IAHS-AISH Publication 144,Washington, DC, USA, pp 475–484

Lal R (1997) Mulching effects on runoff, soil erosion, and crop response on alfisols in western Nigeria. J Sustain Agric 11:135–154. doi:10. 1300/J064v11n02_10

Lal R (1998) Soil quality changes under continuous cropping for seven- teen seasons of an Alfisol in western Nigeria. Land Degrad Dev 9: 259–274. doi:10.1002/(SICI)1099-145X(199805/06)9:3<259:: AID-LDR290>3.0.CO;2-V

Lal R (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science (80-) 304:1623–1627. doi: 10.1126/ science.1097396

Lal R (2008) Managing soilwater to improve rainfed agriculture in India. JSustain Agric32:51–75. doi:10.1080/10440040802121395

Lal R (2009) Soil quality impacts of residue removal for bioethanol pro- duction. Soil Tillage Res 102:233–241. doi:10.1016/j.still.2008.07. 003

Lallau B (2008) Les agriculteurs africains entre vulnérabilité et résilience. Pour une approche par les capabilités de la gestion des risques. Rev Française Socio-Économie 1:177. doi: 10.3917/rfse.001.0177

Lenka NK, Lal R (2013) Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till sys- tem. Soil Tillage Res 126:78–89. doi:10.1016/j.still.2012.08.011

Liebman M, Mohler CL (2001) Weeds and the soil environment. In: Liebman M, Mohler CL, Staver CP (eds) Ecological Management of Agricultural Weeds. Cambrdge University Press, New York, pp 210–268

Liu T, Chen X, Hu F et al (2016) Carbon-rich organic fertilizers to in- crease soil biodiversity: evidence froma meta-analysis of nematode communities. Agric Ecosyst Environ 232:199–207. doi:10.1016/j. agee.2016.07.015

Lorenz K, Lal R, Shipitalo MJ (2008) Chemical stabilization of organic carbon pools in particle size fractions in no-till and meadow soils. Biol Fertil Soils 44:1043–1051. doi: 10.1007/s00374-008-0300-8

Lu Y-C, Watkins KB, Teasdale JR, Abdul-baki AA (2000) Cover Crops in Sustainable Food Production. Food Rev. Int. 16, 121–157. doi:10.1081/FRI-100100285

Lupwayi NZ, Clayton GW, O'Donovan JT et al (2006) Potassium release during decomposition of crop residues under conventional and zero tillage. Can J Soil Sci 86:473–481

Macena Da Silva FAM, Pinto HS, Scopel E et al (2006)Water fluxes in maize, millet and soybean plant-residue mulches used in direct seeding. Pesqui Agropecu Bras 41:717–724. doi:10.1590/S0100-204X2006000500001

Maltas A, Corbeels M, Scopel E, et al (2007) Long-term effects of continuous direct seeding mulch-based cropping systems on soil nitrogen supply in the Cerrado region of Brazil. Plant Soil 298:161–173. doi: 10.1007/s11104-007-9350-1

Maltas A, Corbeels M, Scopel E, et al (2009) Cover crop and nitrogen effects on maize productivity in no-tillage systems of the Brazilian cerrados. Agron J 101:1036–1046. doi: 10.2134/agronj2009.0055

Mannering JV, Meyer LD (1963) The Effects of Various Rates of Surface Mulch on Infiltration and Erosion. Soil Sci Soc Am J 27: 84–86. doi:10.2136/sssaj1963.03615995002700010029x

Mashingaidze N, Madakadze C, Twomlow S, et al (2012) Crop yield and weed growth under conservation agriculture in semi-arid Zimbabwe. Soil Tillage Res 124:102–110. doi: 10.1016/j.still.2012.05.008

Matloob A, Khaliq A, Chauhan BS (2015) Weeds of Direct-Seeded Rice in Asia: Problems and Opportunities. Adv. Agron. 130:291–336.

Mhalanga B, Cheesman S, Maasdorp B, et al (2017) Relay intercropping and mineral fertilizer effects on biomass production, maize productivity and weed dynamics in contrasting soils under conservation agriculture. J Agric Sci 155:876–887. doi: 10.1017/S0021859616000927

Milne AE, Ferguson RB, Lark RM (2006) Estimating a boundary line model for a biological response by maximum likelihood. Ann Appl Biol 149:223–234. doi:10.1111/j.1744-7348.2006.00086.x

Mischler RA, Curran WS, Duiker SW, Hyde JA (2010) Use of a rolled- rye cover crop for weed suppression in no-till soybeans. Weed Technol 24:253–261. doi:10.1614/WT-D-09-00004.1

Moher D, LiberatiA, Tetzlaff J, et al (2009) Preferred Reporting Items for Systematic Reviews andMeta-Analyses : The PRISMA Statement. Plos Med. doi: 10.1371/journal.pmed.1000097

Mohler CL, Teasdale JR (1993) Response of weed emergence to rate of Vicia villosa Roth and Secale cereale L. residue. Weed Res 33:487–499. doi: 10.1111/j.1365-3180.1993.tb01965.x

Moore MJ, Gillespie TJ, Swanton CJ (1994) Effect of cover crop mulches on weed emergence, weed biomass, and soybean (Glycine max) development. Weed Technol 8:512–518.

Moorthy BTS, Saha S (2005) Studies on crop-weed competition in rainfed direct-seeded lowland rice (Oryza sativa). indian J weed Sci 37:267–268.

Moreau D (1987) L'analyse de l'élaboration du rendement du riz: Les outils de diagnostic.

Muoni T, Rusinamhodzi L, Thierfelder C (2013) Weed control in conservation agriculture systems of Zimbabwe: Identifying economical best strategies. Crop Prot 53:23–28. doi: 10.1016/j.cropro.2013.06.002

Naudin K, Scopel E, Andriamandroso ALH et al (2012) Trade-offs be- tween biomass use and soil cover. The case of rice-based cropping systems in the Lake Alaotra region of Madagascar. Exp Agric 48: 194–209. doi:10.1017/S001447971100113X

Nawaz A, Lal R, Shrestha RK, Farooq M (2016) Mulching affects soil properties and greenhouse gas emissions under long-term no-till and plough-till systems in alfisol of Central Ohio. L Degrad Dev 681: 673–681. doi:10.1002/ldr.2553

Ngwira AR, Aune JB, Thierfelder C (2014) On-Farm Evaluation of the Effects of the Principles and Components of Conservation Agriculture on Maize Yield and Weed Biomass in Malawi. Exp Agric 50:591–610. doi: 10.1017/S001447971400009X

Nichols V, Verhulst N, Cox R, Govaerts B (2015) Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review. F Crop Res 183:56–68. doi: 10.1016/j.fcr.2015.07.012

Nyakatawa E, Jakkula V (2007) Soil erosion estimation in conservation tillage systems with poultry litter application using RUSLE 2.0 model. Soil Tillage 94:410–419. doi:10.1016/j.still.2006.09.003

Obalum SE, Obi ME (2010) Physical properties of a sandy loam Ultisol as affected by tillage-mulch management practices and cropping systems. Soil Tillage Res 108:30–36. doi:10.1016/j.still.2010.03. 009

OECD (2013) Sécurité alimentaire mondiale: Défis pour le système agricole et agro-alimentaire.

Oerke EC (2006) Crop losses to pests. J Agric Sci 144:31. doi: 10.1017/S0021859605005708

Oerke EC, Dehne HW (2004) Safeguarding production - Losses in major crops and the role of crop protection. Crop Prot 23:275–285. doi: 10.1016/j.cropro.2003.10.001

Oldeman LR (1998) Soil degradation: a threat to food security? In: International soil reference and information centre.Wageningen

Panachuki E, Bertol I, Sobrinho TA, et al (2011) Soil and water loss and water infiltration in red latosol under differentmanagement systems. Rev Bras Cienc do Solo 35:1777–1786. doi:10.1590/S0100-06832011000500032

Peachey RE, William RD, Mallory-smith C (2004) Effect of no-till or conventional planting and cover crops residues on weed emergence in vegetable rowcrop 1.WeedTechnol 18:1023–1030. doi:10.1614/ WT-03-205R

Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrol Earth Syst Sci 11: 1633–1644. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130

Penot E, Domas R, Andriamala H, et al (2009) Rôle et place du riz pluvial dans les exploitations du lac Alaotra. Atelier Natl sur la Rech le développement du riz pluvial à Madagascar 1–33.

Penot E, Domas R, Fabre J, et al (2015) Le technicien propose, le paysan dispose. Le cas de l'adoption des systèmes de culture sous couverture végétale au lac Alaotra, Madagascar. Cah Agric 24:84–92. doi: 10.1684/agr.2015.0745

Pereira JL, Picanço MC, Pereira EJG et al (2010) Influence of cropman- agement practices on bean foliage arthropods. Bull Entomol Res 100:679–688. doi:10.1017/S0007485310000039

Pfaff SL, Gonter MA (2000) Seeding two native grass species on reclaimed phosphate minedlands. In: 2000 National Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation. Tampa, Florida,

Pradhan PR, Pandey RN, Behera UK et al (2011) Tillage and crop residue management practices on crop productivity, phosphorus uptake and forms in wheat (Triticumaestivum)-based cropping systems. Indian J Agric Sci 81:1168–1173

Radicetti E, Mancinelli R, Campiglia E (2013) Impact of managing cover crop residues on the floristic composition and species diversity of the weed community of pepper crop (Capsicum annuum L.). Crop Prot 44:109–119. doi: 10.1016/j.cropro.2012.10.017

Rakotoarivelo M (2017) Le rôle de stylosanthes sur la résilience des sols cultivés sur les plateaux d'altitude à Madagascar.

Ranaivoson L, Naudin K, Ripoche A, et al (2017) Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. Agron Sustain Dev. doi: 10.1007/s13593-017-0432-z

Rasmussen PE, Collins HP (1991) Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. Adv Agron 45:93–134. doi: 10.1016/S0065-2113(08)60039- 5

Raun WR, Barreto HJ, Westerman RL (1993) Use of Stability Analysis for long-term Soil Fertility Experiments. Agron. J. 85:159–167.

Raunet M (1984) Région du Lac Alaotra Madagascar. Le milieu physique. Aptitude à la mise en valeur agricole. Système de culture. Madagascar

Razafimbelo T (2005) Stockage Et Protection Du Carbone Dans Un Sol Ferrallitique Sous Systemes En Semis Direct Avec Couverture Vegetale Des Hautes Terres Malgaches. Ecole nationale superieure agronomique de montpellier

Razafindramanana NC, Douzet JM, Barthes B, et al (2012) Evaluation des effets de systèmes de semis direct sous couverture végétale pérenne (SCV) sur l'érosion hydrique et la production agricole sur les hautes terres de Antsirabe (Madagascar). In: Roose E, Duchaufour H, De Noni G (eds) Lutte

antiérosive: réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles, IRD editio.

Ripoche A, Crétenet M, Corbeels M, et al (2015) Cotton as an entry point for soil fertility maintenance and food crop productivity in savannah agroecosystems-Evidence from a long-term experiment in southern Mali. F Crop Res 177:37–48. doi: 10.1016/j.fcr.2015.02.013

Rippin M, Haggar JP, Kass D, Kopke U (1994) Alley cropping and mulching with Erythrina poeppigiana (Walp.) O.F. Cook and Gliricidia sepium (Jacq.) Walp.: Effects on maize/weed competition. Agrofor Syst 25:119–134.

Rohatgi A (2015) WebPlotDigitizer 3.8. http://arohatgi.info/ WebPlotDigitizer. Accessed 1 Feb 2016

Rosolem CA, Calonego JC, Foloni JSS (2005) Potassium leaching from millet straw as affected by rainfall and potassium rates. Commun Soil Sci Plant Anal 36:1063–1074. doi:10.1081/CSS-200050497

Rosolem CA, Dos Santos FP, Foloni JSS et al (2006) Soil potassium as affected by fertilization over the millet straw and simulated rain. Pesqui Agropecu Bras 41:1033–1040

Ruy S, Findeling A, Chadoeuf J (2006) Effect of mulching techniques on plot scale runoff: FDTF modeling and sensitivity analysis. J Hydrol 326:277–294. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.11.003

Sainju UM, Singh BP, Whitehead WF, Wang S (2007) Accumulation and crop uptake of soil mineral nitrogen as influenced by tillage, cover crops, and nitrogen fertilization. Agron J 99:682–691. doi:10.2134/ agronj2006.0177

Sato S, Comerford NB (2005) Influence of soil pH on inorganic phospho- rus sorption and desorption in a humid Brazilian Ultisol. Rev Bras Cienc do Solo 29:685–694. doi:10.1590/S0100-06832005000500004

Schneider EC, Gupta SC (1985) Corn emergence as influenced by soil temperature, matric potential, and aggregate size distribution. Soil Sci Soc Am J 49:415–422. doi:10.2136/sssaj1985. 03615995004900020029x

Scopel E, Da Silva FAM, Corbeels M, et al (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, Chavez Guerra E et al (2005) Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion andmaize yield. Agron Sustain Dev 25:425–432. doi:10.1051/agro: 2005041

Scopel E, Triomphe B, Affholder F et al (2013) Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, perfor- mances and impacts. A review. Agron Sustain Dev 33:113–130. doi:10.1007/s13593-012-0106-9

Sharratt B, Zhang M, Sparrow S (2006) Twenty years of conservation tillage research in subarctic Alaska. Soil Tillage Res 91:82–88. doi: 10.1016/j.still.2006.01.010

Shrestha S, Asch F, Brueck H, et al (2013) Phenological responses of upland rice grown along an altitudinal gradient. Environ Exp Bot 89:1–10. doi: 10.1016/j.envexpbot.2012.12.007

Sidiras N, Roth CH (1987) Infiltration measurements with double-ring infiltrometers and a rainfall simulator under different surface condi- tions on an Oxisol. Soil Tillage Res 9:161–168

Singh BB, Jones J. (1976) Phosphorous Sorption and Desorption Characteristics of Soil as Affected by Organic Residues. Soil Sci So c Am J 40:389 –394. doi: 1 0 .2136/sssaj1976. 03615995004000030025x

Sissoko F, Affholder F, Autfray P, et al (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. Agric Water Manag 119:89–99. doi: 10.1016/j.agwat.2012.12.012

Smets T, Poesen J, Knapen A (2008) Spatial scale effects on the effectiveness of organic mulches in reducing soil erosion by water. Earth-Science Rev 89:1–12. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.04.001

Smith GD, Coughlan KJ, Yule DF et al (1992) Soil management options to reduce runoff and erosion on a hardsetting alfisol in the semi-arid tropics. Soil Tillage Res 25:195–215

Spedding TA, Hamel C, Mehuys GR, Madramootoo CA (2004) Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. Soil Biol Biochem 36:499–512. doi:10.1016/j.soilbio.2003.10.026

Steiner JL, Schomberg HH, Unger PW, Cresap J (2000) Biomass and residue cover relationships of fresh and decomposing small grain residue. Soil Sci Soc Am J 64:2109–2114

Stinner BR (1990) Arthropods and other invertebrates in conservation- tillage agriculture. Annu Rev Entomol 35:299–318. doi:10.1146/ annurev.en.35.010190.001503

Stumborg M, Townley-Smith L, Coxworth E, East S (1996) Sustainability and economic issues for cereal crop residue export. Can J Plant Sci 76:669–673

Swanson S,WilhelmW (1996) Planting Date and Residue Rate Effects on Growth , Partitioning , and Yield of Corn. Agron J 88:205–210

Teasdale JR, Beste CE, PottsWE (1991) Response ofweed to tillage and cover crop residue.Weed Sci. Soc. Am. 39:195–199

Teasdale JR, Mohler CL (1993) Light transmittance, soil temperature, and soil moisture under residue of hairy vetch and rye. Agron J 85:673–380. doi: 10.2134/agronj1993.00021962008500030029x

Teasdale JR, Mohler CL (2000) The quantitative relationship between weed emergence and the physical properties of mulches. Weed Sci 48:385–392. doi: 10.1614/0043-1745(2000)048[0385:TQRBWE]2.0.CO;2

Teasdale JR, MohlerCL (1993) Light transmittance, soil temperature, and soil moisture under residue of hairy vetch and rye. Agron J 85:673– 380. doi:10.2134/agronj1993.00021962008500030029x

TerAvest D, Carpenter-Boggs L, Thierfelder C, Reganold JP (2015) Crop production and soil water management in conservation agriculture, no-till, and conventional tillage systems in Malawi. Agric Ecosyst Environ 212:285–296. doi:10.1016/j.agee.2015.07.011

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

Thierfelder C, Wall PC (2010) Rotation in Conservation Agriculture Systems of Zambia: Effects on Soil Quality and Water Relations. October 46:309–325. doi: 10.1017/S001447971000030X

Tian G, Brussaard L, Kang BT (1993) Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions: effects on soil fauna. Soil Biol Biochem 25:731–737

Törnqvist L, Vartia P, Vartia YO, et al (1985) How Should Relative Changes Be Measured ? Am Stat 39:37–41. doi:10.1080/ 00031305.1985.10479385

Touré A, Sogbedji JM, Gumedzoé YMD (2013) The critical period of weed interference in upland rice in northern Guinea savanna: Field measurement and model prediction. Acad Journals 8:1748–1759. doi: 10.5897/AJAR12.1688

Tu M, Hurd C, Randall JM (2001) Weed Control Methods Handbook : Tools & Techniques for Use in Natural Areas.

Turmel M-S, Speratti A, Baudron F et al (2014) Crop residue management and soil health: a systems analysis. Agric Syst 134:6–16. doi: 10.1016/j.agsy.2014.05.009

van Ittersum MK, Rabbinge R (1997) Concept of production ecology for analysis and quantification of agricultural imput-output combination. F Crop Res 52:197–208.

Verhulst N, Kienle F, Sayre KD et al (2010) Soil quality as affected by tillage-residue management in a wheat-maize irrigated bed planting system. Plant Soil 340:453–466. doi:10.1007/s11104-010-0618-5

Vollmer ER, Creamer N, Reberg-Horton C, Hoyt G (2010) Evaluating cover crop mulches for no-till organic production of onions. Hortscience 45:61–70

Wang JB, Chen ZH, Chen LJ et al (2011) Surface soil phosphorus and phosphatase activities affected by tillage and crop residue input amounts. Plant Soil Environ 57:251–257

Webb RA (1972) Use of the boundary line in the analysis of biological data. J Hortic Sci 47:309–319. doi:10.1080/00221589.1972. 11514472

Webster TM, Scully BT, Grey TL, Culpepper AS (2013) Winter cover crops influence Amaranthus palmeri establishment. Crop Prot 52: 130–135. doi:10.1016/j.cropro.2013.05.015

Webster TM, Simmons DB, Culpepper AS, et al (2016) Factors affecting potential for Palmer amaranth (Amaranthus palmeri) suppression by winter rye in Georgia, USA. F Crop Res 192:103–109. doi: 10.1016/j.fcr.2016.04.020

Wei K, Chen Z, Zhu A et al (2014) Application of 31P NMR spectros- copy in determining phosphatase activities and P composition in soil aggregates influenced by tillage and residue management practices. Soil Tillage Res 138:35–43. doi:10.1016/j.still.2014.01.001

Weston LA (1997) Utilization of Allelopathy for Weed Management in Agroecosystems. Int Inf Syst Agric Sci Technol 88:860–866

Wezel A, Rath T (2002) Resource conservation strategies in agro-ecosystems of semi-arid West Africa. J Arid Environ 51:383–400. doi: 10.1006/jare.2001.0968

Wilhelm W (2004) Crop and Soil Productivity Response to Corn Residue Removal : A Literature Review. Agronomy Journal, 96(1), 1–17

Willmott CJ, Robeson SM, Matsuura K (2012) A refined index of model performance. Int J Climatol 32:2088–2094. doi:10.1002/joc.2419

Wilson GV, Dabney SM, McGregor KC, Barkoll BD (2004) Tillage and residue effects on runoff and erosion dynamics. TransAmSoc Agric Eng 47:119–128

Woyessa YE, Bennie TP (2004) Factors affecting runoff and soil loss under simulated rainfall on a sandy Bainsvlei Amalia soil. S Afr J Plant Soil 21:203–208. doi:10.1080/02571862.2004.10635050

Yordanova M, Shaban N (2007) Effect of mulching on weeds of fall broccoli. Bull Univ Agric Sci Vet Med Cluj-Napoca 2007:3–6.

Zerner MC, Gill GS, Vandeleur RK (2008) Effect of height on the competitive ability of wheat with oats. Agron J 100:1729–1734

Zhang X, Li Q, Zhu A et al (2012) Effects of tillage and residue management on soil nematode communities in North China. Ecol Indic 13: 75–81. doi:10.1016/j.ecolind.2011.05.009

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des publications selectionnées dans la revue de la littérature sur les fonctions agro-écologiques du mulch

Authors	Title	Year	Published In
	Soil water evaporation control		
Balwinder-Singh, Eberbach, P L, Humphreys, E, Kukal, S S	The effect of rice straw mulch on evapotranspiration, transpiration and soil evaporation of irrigated wheat in Punjab, India	2011	Agricultural Water Management
Gava, R, De Freitas, P S L, De Faria, R T, Rezende, R, Frizzone, J A	Soil water evaporation under densities of coverage with vegetable residue	2013	Engenharia Agricola
	Soil water infiltration		
Blanco-Canqui, H, Lal, R	Impacts of long-term wheat straw management on soil hydraulic properties under no-tillage	2007	Soil Science Society of America Journal
Blanco-Canqui, H, Lal, R	Crop Residue Removal Impacts on Soil Productivity and Environmental Quality	2009	Plant sciences
Kahlon, M S, Lal, R, Ann-Varughese, M	Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio	2012	Soil and Tillage Research
Panachuki, E, Bertol, I, Sobrinho, T A, De Oliveira, P T S, Rodrigues, D B B	Soil and water loss and water infiltration in red latosol under different management systems	2011	Revista Brasileira de Ciencia do Solo
Sharratt, B, Zhang, M, Sparrow, S	Twenty years of conservation tillage research in subarctic Alaska	2006	Soil and Tillage Research
Sidiras, N, Roth, C H	Infiltration measurements with double-ring infiltrometers and a rainfall simulator under different surface conditions on an Oxisol	1987	Soil and Tillage Research
	Water runoff control		
Cattan, P, Cabidoche, Y M, Lacas, J G, Voltz, M	Effects of tillage and mulching on runoff under banana (Musa spp.) on a tropical Andosol	2006	Soil and Tillage Research
Findeling, A, Ruy, S, Scopel, E	Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach	2003	Journal of Hydrology

Gilley, J E, Finkner, S C, Varvel, G E	Runoff and Erosion As Affected By Sorghum and Soybean Residue	1986	Biological systems engineering
Jordán, A, Zavala, L M, Gil, J	Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain	2010	Catena
Lal, R	Mulch requirements for erosion control with the no-till system in the tropics: a review	1984	Challenges in African Hydrology and Water Resources, Proceedings of the Harare Symposium
Lal, R	Mulching effects on runoff, soil erosion, and crop response on alfisols in Western Nigeria	1997	Journal of Sustainable Agriculture
Ruy, S, Findeling, A, Chadoeuf, J	Effect of mulching techniques on plot scale runoff: FDTF modeling and sensitivity analysis	2006	Journal of Hydrology
Scopel, E, Findeling, A, Chavez Guerra, E Corbeels, M	Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield	2005	Agronomy for Sustainable Development
Smith, G D, Coughlan, K J, Yule, D F, Laryea, K B, Srivastava, K L, Thomas, N P, Cogle, A L	Soil management options to reduce runoff and erosion on a hardsetting Alfisol in the semi-arid tropics	1992	Soil and Tillage Research
Stumborg, M, Townley-Smith, L, Coxworth, E	Sustainability and economic issues for cereal crop residue export	1996	Canadian Journal of Plant Science
Wilson, G V, Dabney, S M, McGregor, K C, Barkoll, B D	Tillage and residue effects on runoff and erosion dynamics	2004	Transactions of the American Society of Agricultural Engineers
Woyessa, Y E, Bennie, T P	Factors affecting runoff and soil loss under simulated rainfall on a sandy Bainsvlei Amalia soil	2004	South African Journal of Plant and Soil
	Soil erosion control		
Gilley, J E, Finkner, S C, Varvel, G E	Runoff and Erosion As Affected By Sorghum and Soybean Residue	1986	Biological systems engineering
Jordán, A, Zavala, L M, Gil, J	Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain	2010	Catena

Lal, R	Mulch requirements for erosion control with the no-till system in the tropics: a review	1984	Challenges in African Hydrology and Water Resources, Proceedings of the Harare Symposium
Lal, R	Mulching effects on runoff, soil erosion, and crop response on alfisols in Western Nigeria	1997	Journal of Sustainable Agriculture
Nyakatawa, E Z, Jakkula, V	Soil erosion estimation in conservation tillage systems with poultry litter application using RUSLE 2.0 model	2007	Soil and Tillage Research
Scopel, E, Findeling, A, Chavez Guerra, E Corbeels, M	Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield	2005	Agronomy for Sustainable Development
Stumborg, M, Townley-Smith, L, Coxworth, E	Sustainability and economic issues for cereal crop residue export	1996	Canadian Journal of Plant Science
Woyessa, Y E, Bennie, T P	Factors affecting runoff and soil loss under simulated rainfall on a sandy Bainsvlei Amalia soil	2004	South African Journal of Plant and Soil
	Mineral nitrogen concentration		
Feng, Y, Liu, Q, Tan, C, Yang, G, Qin, X, Xiang, Y	Water and Nutrient Conservation Effects of Different Tillage Treatments in Sloping Fields	2014	Arid Land Research and Management
Karlen, D L, Wollenhaupt, N C, Erbach, D C, Berry, E C, Swan, J B, Eash, N S, Jordahl, J L	Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn	1994	Soil and Tillage Research
Sainju, U M, Whitehead, W F, Singh, B P, Wang, S	Tillage, cover crops, and nitrogen fertilization effects on soil nitrogen and cotton and sorghum yields	2007	European Journal of Agronomy
	Available phosphorous concentration		
Feng, Y, Liu, Q, Tan, C, Yang, G, Qin, X, Xiang, Y	Water and Nutrient Conservation Effects of Different Tillage Treatments in Sloping Fields	2014	Arid Land Research and Management
Iqbal, M, Ul-Hassan, A, van Es, H M	Influence of Residue Management and Tillage Systems on Carbon Sequestration and Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Dynamics of Soil and Plant and Wheat Production in Semi-arid Region	2011	Soil science and plant analysis

Pradhan, P R, Pandey, R N, Behera, U K, Swarup, A, Datta, S C, Dwivedi, B S	Tillage and crop residue management practices on crop productivity, phosphorus uptake and forms in wheat (Triticum aestivum)-based cropping systems	2011	Indian Journal of Agricultural Sciences
Wang, J B, Chen, Z H, Chen, L J, Zhu, A N, Wu, Z J	Surface soil phosphorus and phosphatase activities affected by tillage and crop residue input amounts	2011	Plant, Soil and Environment
Wei, K, Chen, Z, Zhu, A, Zhang, J, Chen, L	Application of 31P NMR spectroscopy in determining phosphatase activities and P composition in soil aggregates influenced by tillage and residue management practices	2014	Soil and Tillage Research
Exchangeable potassium concentration			
Iqbal, M, Ul-Hassan, A, van Es, H M	Influence of Residue Management and Tillage Systems on Carbon Sequestration and Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Dynamics of Soil and Plant and Wheat Production in Semi-arid Region	2011	Soil science and plant analysis
Feng, Y, Liu, Q, Tan, C, Yang, G, Qin, X, Xiang, Y	Water and Nutrient Conservation Effects of Different Tillage Treatments in Sloping Fields	2014	Arid Land Research and Management
Soil organic carbon			
Blanco-Canqui, H, Lal, R	Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till	2007	Soil and Tillage Research
Clapp, C E, Allmaras, R R, Layese, M F, Linden, D R, Dowdy, R H	Soil organic carbon and 13C abundance as related to tillage, crop residue, and nitrogen fertilization under continuous corn management in Minnesota	2000	Soil and Tillage Research
Halpern, M T, Whalen, J K, Madramootoo, C A	Long-Term Tillage and Residue Management Influences Soil Carbon and Nitrogen Dynamics	2010	Soil Science Society of America Journal
Hooker, B A, Morris, T F, Peters, R, Cardon, Z G	Long-term effects of tillage and corn stalk return on soil carbon dynamics	2005	Soil Science Society of America Journal
Lal, R	Soil quality changes under continuous cropping for seventeen seasons of an Alfisol in western Nigeria	1998	Land Degradation and Development
Lenka, N K, Lal, R	Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system	2013	Soil and Tillage Research

Nawaz, A, Lal, R, Shrestha, R K, Farooq, M	Mulching Affects Soil Properties and Greenhouse Gas Emissions Under Long-Term No-Till and Plough-Till Systems in Alfisol of Central Ohio	2016	Land Degradation and Development
Scopel, E, Findeling, A, Chavez Guerra, E Corbeels, M	Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield	2005	Agronomy for Sustainable Development
Spedding, T A, Hamel, C, Mehuys, G R, Madramootoo, C A	Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems	2004	Soil Biology and Biochemistry
Weed emergence control			
Chauhan, B S S, Johnson, D E E	Ecological studies on Echinochloa crus-galli and the implications for weed management in direct-seeded rice	2011	Crop Protection
Chauhan, B S, Abugho, S B	Effect of Crop Residue on Seedling Emergence and Growth of Selected Weed Species in a Sprinkler-Irrigated Zero-Till Dry-Seeded Rice System	2013	Weed Science
Peachey, R E, William, R D, Mallory-smith, C	Effect of No-Till or Conventional Planting and Cover Crops Residues on Weed Emergence in Vegetable Row Crop	2004	Weed technology
Teasdale, J R, Mohler, C L	Light transmittance, soil temperature, and soil moisture under residue of hairy vetch and rye	2000	Agronomy Journal
Webster, T M, Scully, B T, Grey, T L, Culpepper, A	Winter cover crops influence Amaranthus palmeri establishment	2013	Crop Protection
Weed biomass control			
Ahmed, Z I, Ansar, M, Iqbal, M, Minhas, N M	Effect of planting geometry and mulching on moisture conservation, weed control and wheat growth under rainfed conditions	2007	Pakistan Journal of Botany
Bilalis, D, Sidiras, N, Economou, G, Vakali, C	Effect of Different Levels of Wheat Straw Soil Surface Coverage on Weed Flora in Vicia faba Crops	2003	Journal of Agronomy and Crop Science
Bunna, S, Sinath, P, Makara, Ouk, Mitchell, J, Fukai, S	Effects of straw mulch on mungbean yield in rice fields with strongly compacted soils	2011	Field Crops Research
Campiglia, E, Caporali, F, Radicetti, E, Mancinelli, R	Hairy vetch (Vicia villosa Roth .) cover crop residue management for improving weed control and yield in no-tillage tomato (Lycopersicon esculentum Mill .) production	2010	European Journal of Agronomy

Chauhan, B S	Seed germination ecology of feather lovegrass [Eragrostis tenella (L.) Beauv. Ex Roemer & J.A. Schultes]	2013	PLoS ONE
Chauhan, B S S, Johnson, D E E	Ecological studies on Echinochloa crus-galli and the implications for weed management in direct-seeded rice	2011	Crop Protection
Mischler, R A, Curran, W S, Duiker, S W, Hyde, J A	Use of a Rolled-rye Cover Crop for Weed Suppression in No-Till Soybeans	2010	Weed technology
Radicetti, E, Mancinelli, R, Campiglia, E	Impact of managing cover crop residues on the floristic composition and species diversity of the weed community of pepper crop (Capsicum annuum L.)	2013	Crop Protection
Meso and macrofauna abundance			
Karlen, D L, Wollenhaupt, N C, Erbach, D C, Berry, E C, Swan, J B, Eash, N S, Jordahl, J L	Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn	1994	Soil and Tillage Research
Obalum, S E, Obi, M E	Physical properties of a sandy loam Ultisol as affected by tillage-mulch management practices and cropping systems	2010	Soil and Tillage Research
Pereira, J L, Picanço, M C, Pereira, E J G, Silva, A A, Jakelaitis, A, Pereira, R R, Xavier, V M	Influence of crop management practices on bean foliage arthropods	2010	Bulletin of Entomological Research
Zhang, X, Li, Q, Zhu, A, Liang, W, Zhang, J, Steinberger, Y	Effects of tillage and residue management on soil nematode communities in North China	2012	Ecological Indicators

Annexe 2 : List of dominant weed species observed in the experiment during the four growing seasons (2010/11, 2011/12, 2013/14 and 2014/15)

Species	Family	Classes
Year 1		
Ageratum conyzoides	Asteraceae	Dicots
Amaranthus hybridus	Amarananthaceae	Dicots

Commelina benghalensis	Commelinaceae	Dicots
Digitaria horizontalis	Poaceae	Monocots
Eleusine indica	Poaceae	Monocots
Euphorbia hirta	Euphorbiaceae	Dicots
Mitracarpus hirtus	Rubiaceae	Dicots
Sida rhombifolia	Malvaceae	Dicots
Tridax procumbens	Asteraceae	Dicots
Year 2		
Acanthospermum hispidum	Asteraceae	Dicots
Amaranthus hybridus	Amaranthaceae	Dicots
Bidens pilosa	Asteraceae	Dicots
Commelina benghalensis	Commelinaceae	Monocots
Corchorus olitorus	Tiliaceae	Dicots
Eleusine indica	Poaceae	Monocots
Portulaca oleracea	Portulacaceae	Dicots
Tithonia diversifolia	Asteraceae	Dicots
Tribulis terrestris	Tribulaceae	Dicots
Year 3		

Acanthospermum hispidium	Asteraceae	Dicots
Aeschynomene americana	Fabaceae	Dicots
Ageratum conyzoides	Asteraceae	Dicots
Amaranthus hybridus	Amaranthaceae	Dicots
Bidens pilosa	Asteraceae	Dicots
Commelina benghalensis	Commelinaceae	Monocots
Digitaria horizontalis	Poaceae	Monocots
Eleusine indica	Poaceae	Monocots
Euphorbia hirta	Euphorbiaceae	Dicots
Mitracarpus hirtus	Rubiaceae	Dicots
Sida rhombifolia	Malvaceae	Dicots
Tridax procumbens	Asteraceae	Dicots
Year 4		
Acanthospermum hispidium	Asteraceae	Dicots
Aeschynomene americana	Fabaceae	Dicots
Ageratum conyzoides	Asteraceae	Dicots
Amaranthus hybridus	Amaranthaceae	Dicots
Bidens pilosa	Asteraceae	Dicots

Bulbostylis barbata	Cyperaceae	Monocots
Commelina benghalensis	Commelinaceae	Monocots
Corchorus tridens	Tiliaceae	Dicots
Digitaria horizontalis	Poaceae	Monocots
Eulesine indica	Poaceae	Monocots
Euphorbia hirta	Euphorbiaceae	Dicots
Leucas matrinicensis	Lamiaceae	Dicots
Mitracarpus hirtus	Rubiaceae	Dicots
Mollugo nudicaulis	Aizoaceae	Dicots
Oxalis corniculata	Oxalidaceae	Dicots
Solanum nigrum	Solanaceae	Dicots

Annexe 3 : Statistical significance from Dunnett's test ($p < 0.05$) comparing weed emergence on bare soil and mulched soil at each date of measurements (+: significantly higher; -: significantly lower, ns: non-significant). Cumulative rainfall from the first rain that triggered weed germination was given on each date of measurements.

2010/11														2011/12														
TOTAL WEED EMERGENCE																												
Residue		Days after the first rain												Residue		Days after the first rain												
Type	t/ha	**19**	**28**	**35**	**42**	**49**	**56**	**63**	**70**	**77**	**84**	**91**	**100**	Type	t/ha	**5**	**12**	**19**	**26**	**33**	**40**	**47**	**54**	**61**	**68**	**75**	**82**	**89**	**100**
S	**0.6**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**1.1**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**0.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**1.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**1.5**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**2.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**1.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**4.5**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**2.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**4.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**3.2**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**6.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**3.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**7.9**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**4.6**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**11.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**7.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**13.6**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	-	-
MD	**9.2**	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	**S**	**20.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	-	-
S	**11.6**	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	**MD**	**22.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	-	-
MD	**13.8**	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	**S**	**27.2**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	-	-
S	**17.4**	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	**MD**	**34.1**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	-	-
MD	**20.7**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**MD**	**45.5**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	-	-
Rainfall (mm)		**114**	**121**	**155**	**205**	**224**	**258**	**361**	**38.5**	**458**	**508**	**524**	**537**	**Rainfall (mm)**		**27**	**41.5**	**50**	**101**	**134**	**171**	**320**	**362**	**381**	**430**	**455**	**492**	**620**	**782**
MONOCOT WEED EMERGENCE																												
Type	t/ha	**19**	**28**	**35**	**42**	**49**	**56**	**63**	**70**	**77**	**84**	**91**	**100**	Type	t/ha	**5**	**12**	**19**	**26**	**33**	**40**	**47**	**54**	**61**	**68**	**75**	**82**	**89**	**100**
S	**0.6**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**1.1**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**0.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**1.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**1.5**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**2.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**1.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**4.5**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**2.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**4.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

MD	**3.2**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**6.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**3.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**7.9**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**4.6**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**11.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**7.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**13.6**	ns	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	**9.2**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**S**	**20.4**	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	**11.6**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**MD**	**22.7**	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	**13.8**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**S**	**27.2**	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	**17.4**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**MD**	**34.1**	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	**20.7**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**MD**	**45.5**	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rainfall (mm)		**114**	**121**	**155**	**205**	**224**	**258**	**361**	**38.5**	**458**	**508**	**524**	**537**	**Rainfall (mm)**		**27**	**41.5**	**50**	**101**	**134**	**171**	**320**	**362**	**381**	**430**	**455**	**492**	**620**	**782**

DICOT WEED EMERGENCE

Type	t/ha	**19**	**28**	**35**	**42**	**49**	**56**	**63**	**70**	**77**	**84**	**91**	**100**	Type	t/ha	**5**	**12**	**19**	**26**	**33**	**40**	**47**	**54**	**61**	**68**	**75**	**82**	**89**	**100**
S	**0.6**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**1.1**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**0.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**1.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**1.5**	+	+	+	+	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**2.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**1.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**4.5**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**2.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**4.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**3.2**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**6.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**3.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**7.9**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**4.6**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**11.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**7.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**13.6**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**9.2**	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**20.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	-	-
S	**11.6**	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**22.7**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**13.8**	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**27.2**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	-	-
S	**17.4**	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**34.1**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	-	-
MD	**20.7**	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**45.5**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	-	-
Rainfall (mm)		**114**	**121**	**155**	**205**	**224**	**258**	**361**	**38.5**	**458**	**508**	**524**	**537**	**Rainfall (mm)**		**27**	**41.5**	**50**	**101**	**134**	**171**	**320**	**362**	**381**	**430**	**455**	**492**	**620**	**782**

2013/14	**2014/15**

TOTAL WEED EMERGENCE

Residue	Days after the first rain	Residue	Days after the first rain

Type	t/ha	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83	90	100	Type	t/ha	25	32	39	46	53	59	67	73	81	88	100
S	**0.9**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**0.9**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**1.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**1.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**3.2**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**3.2**	+	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**4.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**4.8**	+	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**12.2**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**S**	**12.2**	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	**18.3**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**S**	**18.3**	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	**18.4**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**MD**	**18.4**	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	**27.6**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**MD**	**27.6**	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rainfall (mm)		**144**	**160**	**163**	**215**	**231**	**345**	**366**	**404**	**607**	**615**	**683**	**733**	**Rainfall (mm)**		**71**	**188**	**313**	**360**	**555**	**591**	**684**	**725**	**778**	**888**	**1077**

MONOCOT WEED EMERGENCE

Type	t/ha	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83	90	100	Type	t/ha	25	32	39	46	53	59	67	73	81	88	100
S	**0.9**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**0.9**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**1.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**1.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**3.2**	ns	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**3.2**	+	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**4.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**4.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**12.2**	ns	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**12.2**	ns	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-
S	**18.3**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**S**	**18.3**	ns	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	**18.4**	ns	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**18.4**	ns	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	**27.6**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**MD**	**27.6**	ns	ns	ns	-	-	-	-	-	-	-	-
Rainfall (mm)		**144**	**160**	**163**	**215**	**231**	**345**	**366**	**404**	**607**	**615**	**683**	**733**	**Rainfall (mm)**		**71**	**188**	**313**	**360**	**555**	**591**	**684**	**725**	**778**	**888**	**1077**

DICOT WEED EMERGENCE

Type	t/ha	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83	90	100	Type	t/ha	25	32	39	46	53	59	67	73	81	88	100
S	**0.9**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**0.9**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**1.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**1.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**3.2**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**S**	**3.2**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**4.8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**MD**	**4.8**	+	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**12.2**	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	-	-	-	-	-	**S**	**12.2**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**18.3**	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	-	-	-	-	-	**S**	**18.3**	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	**18.4**	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	-	-	-	-	-	**MD**	**18.4**	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

MD	**27.6**	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	-	-	-	-	-	**MD**	**27.6**	ns	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rainfall (mm)		**144**	**160**	**163**	**215**	**231**	**345**	**366**	**404**	**607**	**615**	**683**	**733**	**Rainfall (mm)**		**71**	**188**	**313**	**360**	**555**	**591**	**684**	**725**	**778**	**888**	**1077**

Annexe 4 : Statistical significance from Dunnett's test (P<0.05) comparing weed biomass on bare soil and mulched soil at each date of measurements (+: significantly higher; -: significantly lower, ns: non-significant). Cumulative rainfall from the first rain that triggered weed germination was given on each date of measurements.

		2013/14												**2014/15**											
		TOTAL				MONOCOTS				DICOTS				TOTAL				MONOCOTS				DICOTS			
Type	**Amount**	**32**	**55**	**91**	**105**	**32**	**55**	**91**	**105**	**32**	**55**	**91**	**105**	**23**	**58**	**101**	**127**	**23**	**58**	**101**	**127**	**23**	**58**	**101**	**127**
S	**0.9**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**1.4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S	**3.2**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MD	**4.8**	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	ns	ns	ns	ns
S	**12.2**	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	ns	-	-	-	ns	ns	ns	ns
S	**18.3**	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	ns	-	-	-	ns	ns	-	-
MD	**18.4**	ns	-	-	-	ns	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	ns	-	-	-	ns	ns	-	-
MD	**27.6**	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-	ns	-	-	-	ns	ns	-	-

Annexe 5 : Residue decomposition during the rice growing season in 2013/14 and 2014/15

Litterbag experiment

Standing biomass from the previous season was estimated before sowing of the rice on 4 quadrants of 1m² (1 x 1m) in each subplot. Plants were cut at ground level and oven-dried at 70°C for 48 hours to obtain dry matter. Decomposition of the crop residues was then monitored using the litterbag technique (Murungu et al., 2011). The litterbags were 0.20 x 0.25 m with a mesh size of 2 mm. Litterbags were filled with a mixture of maize and dolichos or with stylosanthesresidues according to crop rotation, with amounts equivalent to the initial amounts measured on the fields.Twenty-four litterbags were randomly placed on the soil surface of each CA subplot and collected every 10 to 15 days from rice sowing to harvest (8 sampling dates with 3 litterbags per sampling date).

Crop residue decomposition

Initial amounts of crop residues from the previous cropping season, varied from 6 to 7 t dry matter ha^{-1} (Table A5.1). Rate of residue decomposition depended mainly on rainfall distribution during the growing season (Figure A5.1). Residues decomposed faster during the 2014/15 growing season with continuous rainfall as compared to 2013/14. Stylosanthes and the mixture of maize and dolichosshowed similar decomposition patterns in 2013/14, whereas in 2014/15 stylosanthes residues decomposed faster than the mixture. In 2013/14, 38 % of the residues (both types) had disappeared at rice harvest, whereas 56 % and 66 % decomposed during the 2014/15 rice growing season, respectively for the MD and S residues.

Table A5.1: Amount of residues in t ha^{-1}under CA at rice sowing and harvest.

	2013/14		2014/15	
	Initial	**Final**	**Initial**	**Final**
CA - stylosanthes	6.05	3.81 (± 0.03)	8.59	2.92 (± 0.91)
CA – maize + dolichos	7.05	4.23 (± 0.03)	7.64	3.36 (± 1.20)

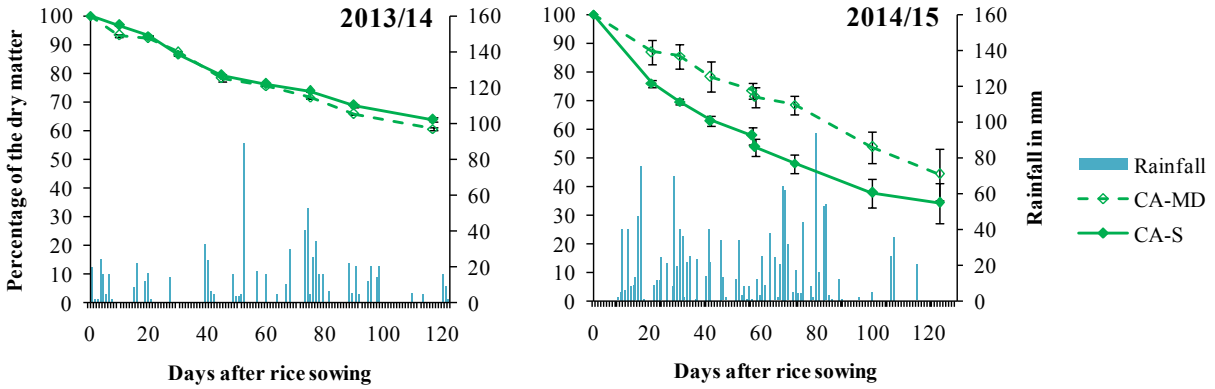
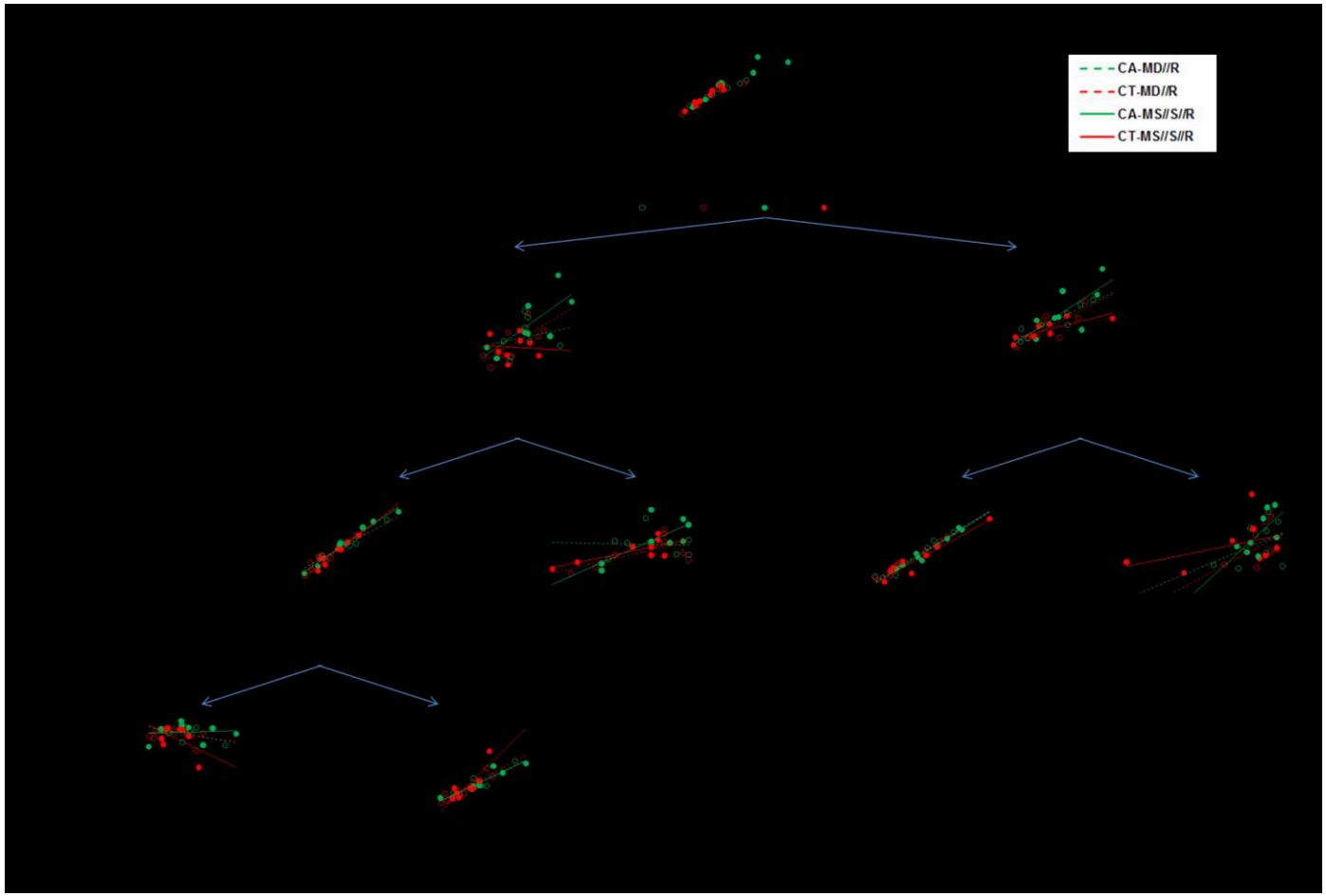


Figure A5.1: Crop residue decomposition
Data corresponds to litter bag study under CA plot during the 2013/14 and 2014/15 rice growing seasons with S and MD residue (MD: maize and dolichos; S: stylosanthes). Vertical bars represent standard deviations of the mean

Annexe 6 : Analysis of the rice yield components under the low weed pressure treatment according to the crop rotation (MS//S//R, MD//R) and soil/residue management (CA, CT) during the 2013/14 and 2014/15 growing seasons.



Annexe 7 : Mesure de l'effet assainissant de l'Agriculture de Conservation

L'agriculture de conservation a un effet sur le contrôle des adventices grâce à l'effet physique du mulch, mais aussi grâce à un effet « assainissant ». En effet, le stock en semence d'adventice dans le sol devrait s'épuiser au cours des années. La diminution de l'infestation des adventices diminuerait la production de graine et éviterait le renouvellement du stock. Le stock en surface germerai mais va s'épuiser rapidement et le stock en profondeur ne sera pas remonté par le labour.

Protocole :

L'évaluation de l'effet assainissant de l'agriculture de conservation (AC) a été réalisée à la sixième année d'expérimentation (2014/15) sur le dispositif expérimental utilisé dans les chapitres 3 et 4 de la thèse.

Les mesures ont été réalisées sur les parcelles de riz issus des 2 rotations culturales, la rotation biennale maïs + dolique // riz et la rotation triennale maïs + stylosanthes // stylosanthes // riz et avec deux modes de gestion du sol et des résidus, non labour avec rétention des résidus (AC) et labour sans rétention des résidus (Labour). Sur chaque parcelle, deux placettes de comptage de 0.25 m² (0.5 X 0.5 m) ont été utilisées. Afin d'évaluer l'effet assainissant de l'AC, le mulch dans les placettes sur les parcelles AC a été enlevé. L'émergence des mauvaises herbes dans les placettes aété mesurée chaque semaine du semis à la récolte du riz. Les plantules ont été séparées en monocotylédones et dicotylédones. Et les plantules des plantes de couverture, dolique et stylosanthes n'ont pas été comptabilisées.

Résultats :

L'analyse de variance a montré qu'il y a significativement plus d'émergence de mauvaises herbes, notamment de dicotylédones sur les parcelles en AC dont le mulch a été enlevé par rapport aux parcelles labourées quelle que soit la rotation culturale. En ce qui concerne les monocotylédones, il n'y a pas de différence significative entre les parcelles labourées et les parcelles en AC. Par contre, il y a plus d'émergence de monocotylédones avec la rotation triennale (MS) par rapport à la rotation biennale (MD) (Figure A7.1).

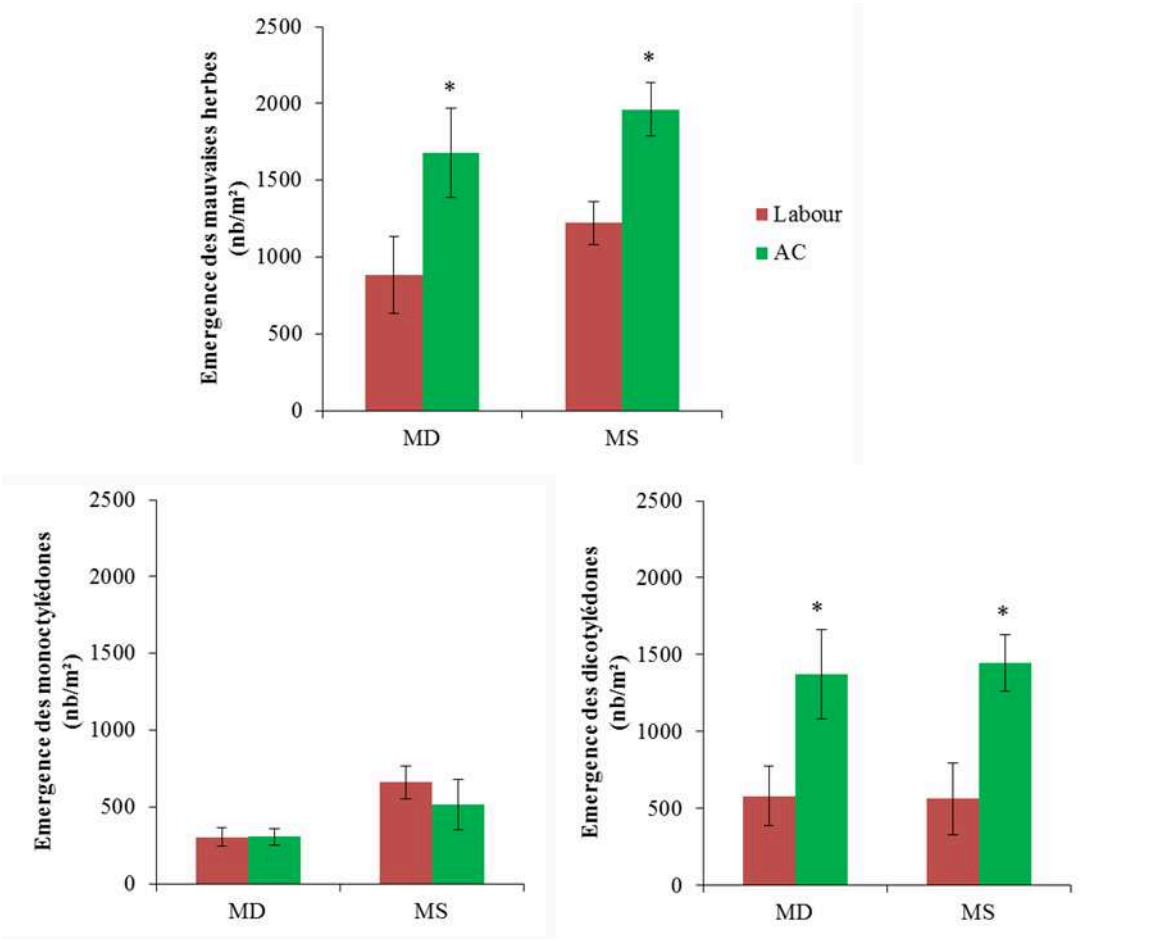


Figure A7.1 : Emergence des mauvaises herbes en fonction de la rotation culturale et du mode de gestion du sol et des résidus
Données sur l'émergence du total, des monocotylédones et des dicotylédones. MD//R : rotation biennale de maïs + dolique // riz ; MS//S//R : rotation triennale de maïs + stylosanthes // stylosanthes // riz sur les parcelles labourées (CT) et les parcelles AC avec des placettes sans mulch

Conclusion :

Les effets de l'AC sur la diminution de l'émergence des mauvaises herbes démontrés dans la section 3.3.1 du chapitre 3 de la thèse sur les parcelles en AC, notamment avec la rotation culturale MS//S//R ne sont pas dus à un effet assainissant de l'AC, mais plutôt liés à un effet physique du mulch.

Annexe 8 : Les paramètres du modèle PYE estimés dans le chapitre 4

Paramètres	Description	Unité	Valeur
	Calage des stades phénologiques		
CTStade 1	Constante thermique du stade Juv (Levée – montaison)	°C.jour^{-1}	440
CTStade 2	Constante thermique du stade Tall (Tallage max – épiaison)	°C.jour^{-1}	420
CTStade 3	Constante thermique du stade Flo (Epiaison – pleine floraison)	°C.jour^{-1}	460
CTStade 4	Constante thermique du stade Grain (Pleine floraison – sénescence)	°C.jour^{-1}	100
CTStade 5	Constante thermique du stade Matu (Sénescence – maturité)	°C.jour^{-1}	100
	Calage de la courbe d'évolution du LAI		
a-dens	Coefficient de sensibilité aux densités élevées		-1
b-dens	Seuil de densité à partir duquel le LAI dépend de la densité	poquet	17
dlaimax	Croît journalier max du LAI	m²/poquet	0.00098
	Calage de la courbe d'évolution du stock en eau du sol		
ZracMax	Profondeur max atteinte par les racines	m	150
DeltaracMax	Vitesse de croissance de la racine (profondeur max/CTStade1,2,3)	cm.°jour^{-1}	0.13
Kmax	Coefficient cultural (ETP/transpiration max de la plante)		1.12
	Calage du rendement en grain		
Cgrain	Nombre de grain mis en place par g de MS/jour	Grain/m²	11219
CgrainV0	Cgrain si croissance nulle pendant les nbjgrain	Grain/m²	-152944
Vitircarb	Augmentation journalière de l'IR		0.03
Nbjgrain	Nombre de jour déterminant le nombre de grain avant st4	Jour	30